



Universidad Autónoma de Querétaro
Facultad de Ingeniería
Maestría en Ciencias (Geotecnia)

**Metodología para determinar la influencia de las discontinuidades en la
velocidad de propagación de ondas sísmicas en geotecnia**

TESIS

Que como parte de los requisitos para obtener el Grado de
Maestro en Ciencias (Geotecnia)

Presenta:

Ing. Rigoberto Ramírez Chávez

Dirigido por:

M.C. Alfonso Alvarez Manilla Aceves

M.C. Alfonso Alvarez Manilla Aceves
Presidente

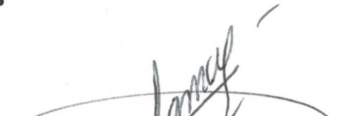
Dra. María de la Luz Pérez Rea
Secretario

Dr. Mauricio Barrera Bucio
Vocal

M.I. José Alfredo Zepeda Garrido
Suplente

Dr. Edgar Alejandro Rivas Araiza
Suplente


Dr. Aurelio Domínguez González
Director de la Facultad de Ingeniería



Firma


Firma


Firma


Firma


Firma


Firma

Dra. Ma. Guadalupe Flavia Loarca Piña
Director de Investigación y Posgrado

Centro Universitario
Querétaro, Qro.
Septiembre, 2016

“Debes realizar por lo menos un movimiento diario, que te acerque un poco más a tu meta”

Bruce Lee

“Invertir en conocimientos produce siempre los mejores beneficios”

Benjamin Franklin



Resumen

El comportamiento mecánico de los materiales geológicos (rocas y suelos) *in situ*, está frecuentemente gobernado o controlado por discontinuidades como juntas, fracturas, facies y estratificación entre otras, además de defectos intrínsecos del material por lo tanto son materiales típicamente heterogéneos y anisotrópicos. La anisotropía se descuida porque en la práctica geotécnica es difícil de determinar, sin embargo su omisión puede desencadenar consecuencias poco deseables. El estudio de la propagación de ondas sísmicas permite establecer en cualquier dirección el estado que guarda la integridad del subsuelo, incluso a profundidad, lo que resulta una herramienta importante en la ingeniería geotécnica. A partir de esta problemática esta investigación estudia la influencia anisotrópica que tienen las discontinuidades en la velocidad de propagación de ondas mecánicas mediante experimentación previa en laboratorio (diseño experimental en suelos con fracturas rellenas solidas inducidas y ensayos de propagación de ondas en suelos antes y después del estado límite de falla) y una metodología propuesta con base en tendidos sísmicos perpendiculares en pruebas en campo mediante el Análisis Multicanal de Ondas Superficiales y la Tomografía Sísmica de ondas “diving” aplicada en cinco sitios de características y condiciones distintas (típicamente anisotrópicos y aparentemente isótropos), logrando determinar características anisotrópicas en la distribución de velocidades en tres dimensiones, cubriendo un área de influencia mayor y una cierta profundidad, enfatizando la importancia de contemplar la anisotropía en la geotecnia. Por lo que en conjunto con la exploración directa, la metodología permitirá obtener caracterizaciones geomecánicas más apegadas a la realidad para garantizar la estabilidad y mayor seguridad en cualquier proyecto. Se sugiere desarrollar más estudios con esta metodología y aplicarla con otros métodos geofísicos en dos dimensiones.

Palabras clave: discontinuidades, anisotropía, velocidad de propagación de ondas sísmicas, tendidos sísmicos perpendiculares, Análisis Multicanal de Ondas Superficiales (AMOS), Tomografía Sísmica de Ondas “Diving” (Tomo-DW).



Abstract

The mechanical behavior of geological materials (rocks and soils) *in situ*, is often governed or controlled by discontinuities as joints, fractures, facies and stratification among others, in addition to intrinsic defects of the material therefore are typically heterogeneous and anisotropic materials. The anisotropy is neglected because in geotechnical practice is difficult to determine, however its omission can trigger undesirable consequences. The study of propagation of seismic waves allows to establish in any direction the status of the subsoil integrity even at depth, which result an important tool in geotechnical engineering. From this problematic this research studies the anisotropic influence of discontinuities in the velocity of propagation of mechanical waves through laboratory experimentation (experimental design in soils with solid backfilled induced fractures and assays of wave propagation in soil before and after the state limit failure) and a methodology proposed based on perpendicular seismic lines in field trials by Multichannel Analysis of Surface Waves and Diving Wave - Refraction Tomography applied in five sites with different characteristics and conditions (typically anisotropic and apparently isotropic), achieving determine anisotropic characteristics of the velocity distribution in three dimensions, covering a greater area of influence and a certain depth, emphasizing the importance of considering anisotropy in geotechnics. So in set with the direct exploration, the methodology will allow to obtain geomechanical characterizations more attached to reality to guarantee stability and greater safety in any project. It is suggested develop more studies with this methodology and apply it with other geophysical methods in two dimensions.

Keywords: discontinuities, anisotropy, velocity of propagation of seismic waves, perpendicular seismic lines, Multichannel Analysis of Surface Waves (MASW), Diving Wave – Refraction Tomography (Tomo-DW) .



Dedicatoria

A mi madre,
que siempre lo da todo para ayudarme,
y me inspira a continuar ante cualquier situación.

A la memoria de mi padre,
que siempre intento mostrarme las herramientas para salir adelante
y ser útil en cualquier circunstancia.



Agradecimientos

A mi familia, mi madre y mi hermana que siempre estuvieron detrás de mí apoyándome e inspirándome para seguir.

A mi novia, que estuvo a mi lado cada día ayudándome e impulsándome a mejorar y por mostrarme panoramas que no conocía.

A mis compañeros y amigos tanto los que estuvieron hombro a hombro conmigo, como a los que estuvieron lejos, siendo mis aliados para facilitar el trayecto, ya sea para estudiar, trabajar o esfumar el estrés.

A mi asesor, el MC. Alfonso Alvarez Manilla Aceves, el cual me mostro y guío por el camino, mostrándose como un apoyo para mí y me compartió parte de su experiencia laboral ampliando mi perspectiva.

A mi coordinadora, la Dra. María de la Luz Pérez Rea, la cual me otorgó confianza y me mantuvo enfocado con su disciplina y presión constante.

A mis profesores por el conocimiento y experiencias brindadas dentro y fuera del aula.

A mis sinodales por las observaciones, comentarios acertados y críticas constructivas realizadas durante la revisión.

A mi asesor y al Dr. Mauricio Barrera Bucio por proporcionarme materiales, el equipo y las herramientas para hacer posible la realización de la experimentación en esta investigación.

A la Dra. Marina Vega González y al Centro de Geociencias de la Universidad Nacional Autónoma de México por brindarme su tiempo y apoyo durante la experimentación en sus instalaciones.

A los encargados del Laboratorio de Mecánica de Suelos que siempre se mostraron amables y disponibles para apoyarme en mis pruebas.

A la Universidad Autónoma de Querétaro (Facultad de Ingeniería) y al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por brindarme la oportunidad de cursar la Maestría y otórgame el apoyo económico necesario.



Tabla de contenidos

RESUMEN	I
ABSTRACT	II
DEDICATORIA	III
AGRADECIMIENTOS	IV
TABLA DE CONTENIDOS	V
ÍNDICE DE TABLAS	IX
ÍNDICE DE FIGURAS	XI
CAPÍTULO 1	1
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. <i>Descripción del problema</i>	2
1.2. <i>Justificación</i>	3
1.3. <i>Antecedentes históricos</i>	4
1.4. <i>Hipótesis</i>	7
1.5. <i>Objetivos</i>	7
1.5.1. Objetivo general	7
1.5.2. Objetivos particulares	7
CAPÍTULO 2	8
2. TEORÍAS, PRINCIPIOS Y CONCEPTOS INTRODUCTORIOS	8
2.1. <i>Teoría de la elasticidad</i>	9
2.1.1. Deformación	9
2.1.2. Tensor esfuerzo	9
2.1.3. Ley de Hooke	10
2.1.4. Parámetros elásticos	10
2.2. <i>Principios de sismología</i>	12
2.2.1. Tipos de ondas sísmicas	12
2.2.2. Ecuación de la onda	13
2.2.3. Terminología de la onda	13
2.2.3.1. Polaridad	14
2.2.3.2. Velocidad	14
2.2.4. Métodos sísmicos	15
2.3. <i>Rigidez de pequeñas deformaciones en suelos y rocas</i>	16
2.3.1. Límites de deformación	16
2.3.2. Definición de los módulos inicial, tangente y secante	17
2.3.3. Mediciones de pequeñas deformaciones	18
2.3.3.1. Ensayes de laboratorio	18
2.3.3.2. Ensayes en campo	19



2.3.4.	Parámetros que afectan a la rigidez de pequeñas deformaciones	19
2.3.4.1.	Influencia de la presión de confinamiento.....	20
2.3.4.2.	Influencia del índice de poros	20
2.3.5.	Correlaciones entre módulos y velocidades de corte	21
CAPÍTULO 3.....		22
3.	ANISOTROPÍA Y DISCONTINUIDADES EN SÓLIDOS ELÁSTICOS.....	22
3.1.	<i>Origen de la anisotropía.....</i>	<i>23</i>
3.1.1.	Anisotropía en rocas: origen y composición de las rocas cristalinas	23
3.1.1.1.	Principales características de los minerales que originan anisotropía	23
3.1.2.	Anisotropía en suelos: origen y composición de los suelos y rocas clásticas.....	25
3.1.2.1.	Principales características de los sedimentos que propician anisotropía	25
3.1.2.2.	Estructura de los sedimentos debido a la compactación mecánica.....	29
3.1.2.3.	Facies	29
3.1.2.4.	Estructuras sedimentarias	30
3.1.3.	Estructuras geológicas	31
3.1.3.1.	Pliegues.....	31
3.1.3.2.	Fallas	31
3.1.3.3.	Diaclasas	31
3.1.4.	Factor escala	32
3.2.	<i>Petrofísica y sus aportaciones.....</i>	<i>34</i>
3.2.1.	Tipos de anisotropía	34
3.2.1.1.	Isotropía transversal (TI)	34
3.2.1.2.	Anisotropía ortorrómbica (ORT)	35
3.2.1.3.	Anisotropía monoclinica (MNC)	36
3.2.2.	Técnicas azimutales y modelos anisotrópicos para medios fracturados	36
3.2.3.	Consideraciones generales para medios fracturados	37
3.2.4.	Parámetros de Thomsen, velocidades y desplazamientos	38
3.2.5.	Compactación dependiente de la orientación de grano.....	39
3.2.6.	Evaluación de la densidad - profundidad y presión de confinamiento	40
3.2.7.	Evaluación de la porosidad por medio de la velocidad de ondas sísmicas	41
3.3.	<i>Discontinuidades en sedimentos.....</i>	<i>43</i>
3.3.1.	Grietas y fallas en sedimentos	43
3.3.1.1.	Modos de agrietamiento	43
3.3.1.2.	Teorías de falla.....	43
3.3.2.	Mecanismos de agrietamiento (grietas de tensión)	44
3.3.2.1.	Juárez Badillo	44
3.3.2.2.	Hunt – Alvarez Manilla.....	45
3.3.2.3.	Santamarina - Shin.....	46
CAPÍTULO 4.....		47
4.	MODELO DE UN SÓLIDO ELÁSTICO ISOTRÓPICO Y PROPAGACIÓN DE ONDAS	47
4.1.	<i>Propagación de ondas planas.....</i>	<i>48</i>
4.1.1.	Ondas planas en medios isotrópicos y anisotrópicos	48
4.1.1.1.	Ondas planas en un medio isotrópico transversal	49
4.1.1.2.	Ondas planas en un medio ortorrómbico	52
4.2.	<i>Sismogramas sintéticos para un medio de rocas cristalinas fracturadas</i>	<i>54</i>
4.2.1.	Influencia del espesor de capas en la propagación de ondas	57



4.2.2.	Influencia del relleno de fracturas en la propagación de ondas	58
CAPÍTULO 5.....		60
5.	METODOLOGÍA: ENSAYES DE PROPAGACIÓN DE ONDAS EN LABORATORIO Y CAMPO	60
5.1.	<i>Experimentación preliminar (diseño de experimentos de laboratorio)</i>	61
5.1.1.	Análisis experimental a escala de laboratorio	61
5.1.1.1.	Objetivo y descripción del experimento	61
5.1.1.2.	Caracterización de materiales utilizados.....	62
5.1.1.3.	Sistema de medición	65
5.1.1.4.	Procedimiento de análisis	66
5.1.2.	Ensayes de propagación de ondas en laboratorio	68
5.1.2.1.	Objetivo y descripción del ensaye.....	68
5.1.2.2.	Materiales utilizados.....	69
5.1.2.3.	Sistema de medición	69
5.1.2.4.	Procedimiento de análisis	69
5.1.3.	Micrografía electrónica de barrido	71
5.1.3.1.	Objetivo y descripción del experimento	71
5.1.3.2.	Materiales utilizados.....	71
5.1.3.3.	Sistema de medición	71
5.1.3.4.	Procedimiento de análisis	71
5.2.	<i>Experimentación dirigida (diseño de experimento en campo)</i>	73
5.2.1.	Ensayes de propagación de ondas en campo	73
5.2.1.1.	Objetivo y descripción del experimento	73
5.2.1.2.	Ubicación de los sitios de estudio	73
5.2.1.3.	Procedimiento de adquisición de datos.....	74
5.2.1.4.	Descripción de la geometría en los sitios de estudio	75
5.2.1.5.	Procedimiento de análisis	79
CAPÍTULO 6.....		80
6.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	80
6.1.	<i>Experimentación preliminar</i>	81
6.1.1.	Análisis experimental a escala de laboratorio	81
6.1.1.1.	Control de humedad y peso específico	81
6.1.1.2.	Resultados y análisis	82
6.1.2.	Ensayes de propagación de ondas en laboratorio	88
6.1.2.1.	Ensayes triaxiales	88
6.1.2.2.	Análisis de la propagación de ondas	90
6.1.3.	Micrografía electrónica de barrido	91
6.2.	<i>Experimentación dirigida</i>	95
6.2.1.	Ensayes de propagación de ondas en campo	95
6.2.1.1.	Resultados y análisis del primer sitio de estudio (S1)	95
6.2.1.2.	Resultados y análisis del segundo sitio de estudio (S2)	99
6.2.1.3.	Resultados y análisis del tercer sitio de estudio (S3)	103
6.2.1.4.	Resultados y análisis del cuarto sitio de estudio (S4).....	107
6.2.1.5.	Resultados y análisis del quinto sitio de estudio (S5).....	113
6.2.2.	Algunos casos prácticos reales.....	115
6.2.2.1.	Resultados y análisis del primer caso real (C1)	115
6.2.2.2.	Resultados y análisis del segundo caso real (C2)	116
6.2.2.3.	Resultados y análisis del tercer caso real (C3)	118



CAPÍTULO 7	119
7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	119
7.1. Conclusiones.....	120
7.2. Recomendaciones	123
REFERENCIAS	124
ANEXOS	132
A. CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES PARA LOS EXPERIMENTOS DE LABORATORIO	132
A.1 <i>Peso específico relativo de sólidos</i>	133
A.2 <i>Granulometría</i>	134
A.3 <i>Peso específico</i>	138
A.4 <i>Humedad natural</i>	138
A.5 <i>Límites de consistencia</i>	139
A.6 <i>Compactación</i>	141
A.7 <i>Resistencia a la compresión</i>	143
A.8 <i>Volumetría y pesos de bloques, placas y cajas empleadas.</i>	143
B. MEDICIONES DE PROPAGACIÓN DE ONDAS EN EL EXPERIMENTO A ESCALA DE LABORATORIO.....	145
B.1 <i>Mediciones de propagación de ondas en materiales de referencia</i>	146
B.2 <i>Mediciones de propagación de ondas en diferentes configuraciones</i>	147
C. RESULTADOS DEL ANÁLISIS EXPERIMENTAL A ESCALA DE LABORATORIO	156
C.1 <i>1ª Etapa</i>	157
C.2 <i>2ª Etapa</i>	158
C.3 <i>3ª Etapa</i>	159
D. ENSAYES TRIAXIALES Y MEDICIONES DE PROPAGACIÓN DE ONDAS EN LABORATORIO.....	162
D.1 <i>Dimensionamiento de probetas</i>	163
D.2 <i>Ensayes triaxiales</i>	163
D.3 <i>Mediciones de propagación de ondas</i>	171
E. REGISTROS SÍSMICOS DEL EXPERIMENTO EN CAMPO.....	172
E.1 <i>Sismogramas registrados en campo</i>	173



Índice de tablas

Tabla 2.1 Deformaciones elementarias.....	9
Tabla 2.2 Parámetros elásticos dinámicos.....	21
Tabla 3.1 Resumen de la clasificación de materiales sedimentarios.....	26
Tabla 3.2 Frecuencias características para valores típicos de porosidad y permeabilidad.....	41
Tabla 4.1 Características de dos medios de dos capas cada uno ($V_1 < V_2$).....	54
Tabla 4.2 Características de un medio de tres capas ($V_1 < V_2 < V_3$).....	57
Tabla 4.3 Características de un medio de tres capas con ($V_1 < V_2 > V_3$) y ($V_1 > V_2 < V_3$).....	58
Tabla 5.1 Variables de entrada consideradas en cada etapa del desarrollo.....	62
Tabla 5.2 Pruebas realizadas con su respectiva norma técnica vigente.....	63
Tabla 5.3 Propiedades índice de las muestras M1, M2 y M3.....	63
Tabla 5.4 Propiedades índice del agregado M4.....	65
Tabla 5.5 Propiedades de las placas C1 y C2.....	65
Tabla 5.6 Coordenadas UTM de los puntos de referencia de los sitio de estudio (S1-S5).....	73
Tabla 5.7 Geometría de los tendidos en cada sitio.....	76
Tabla A.1 Factor de corrección al utilizar agua común.....	133
Tabla A.2 Peso específico relativo de sólidos de las muestras M1, M2, M3 y M4.....	133
Tabla A.3 Granulometría vía seca (tamices) y vía húmeda (hidrómetro) de la muestra M1.....	134
Tabla A.4 Granulometría vía seca (tamices) y vía húmeda (hidrómetro) de la muestra M2.....	135
Tabla A.5 Granulometría vía seca (tamices) y vía húmeda (hidrómetro) de la muestra M3.....	136
Tabla A.6 Granulometría vía seca (tamices) de la muestra M4.....	137
Tabla A.7 Peso específico de las muestras M1 y M2 por medio del método del mercurio desplazado.....	138
Tabla A.8 Peso específico seco suelto de las muestras M3 y M4 por medio de un volumen conocido.....	138
Tabla A.9 Humedades naturales de las muestras M1, M2, M3 y M4.....	138
Tabla A.10 Límites de consistencia de la muestra M1.....	139
Tabla A.11 Límites de consistencia de la muestra M2.....	140
Tabla A.12 Cálculo de la energía de compactación para el ensaye Proctor estándar.....	141
Tabla A.13 Ensaye de compactación Proctor estándar de la muestra M1.....	141
Tabla A.14 Ensaye de compactación Proctor estándar de la muestra M2.....	142
Tabla A.15 Ensaye de resistencia a la compresión simple en especímenes de concreto C1.....	143
Tabla A.16 Pesos y volúmenes de las cajas contenedoras utilizadas.....	143
Tabla A.17 Pesos y volúmenes de los bloques de materiales de referencia C1 y C2.....	144
Tabla A.18 Pesos y volúmenes de las placas de concreto C1 y cartón C2 empleadas.....	144
Tabla B.1 Mediciones obtenidas en los materiales de referencia en las primeras dos etapas.....	146
Tabla B.2 Mediciones obtenidas en los materiales de referencia en la tercera etapa.....	146
Tabla B.3 Mediciones en M1, M2 y M3 en la 1ª etapa.....	147
Tabla B.4 Mediciones en M1, M2 y M3 con eje de giro horizontal en la 2ª etapa.....	148
Tabla B.5 Mediciones en M1, M2 y M3 con eje de giro vertical en la 2ª etapa.....	149
Tabla B.6 Mediciones en Arcilla M1 con placas de concreto C1 en la 3ª etapa.....	150
Tabla B.7 Mediciones en Limo M2 con placas de concreto C1 en la 3ª etapa.....	151
Tabla B.8 Mediciones en Arena M3 con placas de concreto C1 en la 3ª etapa.....	152



<i>Tabla B.9 Mediciones en Arcilla M1 con placas de cartón C2 en la 3ª etapa.</i>	<i>153</i>
<i>Tabla B.10 Mediciones en Limo M2 con placas de cartón C2 en la 3ª etapa.</i>	<i>154</i>
<i>Tabla B.11 Mediciones en Arena M3 con placas de cartón C2 en la 3ª etapa.</i>	<i>155</i>
<i>Tabla C.1 Parámetros de anisotropía en la 1ª etapa.</i>	<i>157</i>
<i>Tabla C.2 Parámetros de anisotropía en la 2ª etapa.</i>	<i>158</i>
<i>Tabla C.3 Parámetros de anisotropía en la 3ª etapa 1ª parte.</i>	<i>160</i>
<i>Tabla C.4 Parámetros de anisotropía en la 3ª etapa 2ª parte.</i>	<i>161</i>
<i>Tabla D.1 Datos de las probetas sometidas a ensayos triaxiales de los materiales M1 y M2.</i>	<i>163</i>
<i>Tabla D.2 Resultados del ensaye triaxial en condición saturada a 200KPa en arcilla M1.</i>	<i>163</i>
<i>Tabla D.3 Resultados del ensaye triaxial en condición no saturada a 50KPa en arcilla M1.</i>	<i>164</i>
<i>Tabla D.4 Resultados del ensaye triaxial en condición no saturada a 100KPa en arcilla M1.</i>	<i>165</i>
<i>Tabla D.5 Resultados del ensaye triaxial en condición no saturada a 200KPa en arcilla M1.</i>	<i>166</i>
<i>Tabla D.6 Resultados del ensaye triaxial en condición saturada a 200KPa en limo M2.</i>	<i>167</i>
<i>Tabla D.7 Resultados del ensaye triaxial en condición no saturada a 50KPa en limo M2.</i>	<i>168</i>
<i>Tabla D.8 Resultados del ensaye triaxial en condición no saturada a 100KPa en limo M2.</i>	<i>169</i>
<i>Tabla D.9 Resultados del ensaye triaxial en condición no saturada a 200KPa en limo M2.</i>	<i>170</i>
<i>Tabla D.10 Mediciones en probetas de arcilla M1 y Limo M2.</i>	<i>171</i>
<i>Tabla D.11 Mediciones en probetas falladas de arcilla M1 y limo M2.</i>	<i>171</i>



Índice de figuras

Fig. 2.1 Componentes del esfuerzo en un cuerpo ideal en 3D.	10
Fig. 2.2 Desarrollo esquematizado de una onda sísmica en el subsuelo y un sismograma típico.	12
Fig. 2.3 Ondas sísmicas y su movimiento característico.	12
Fig. 2.4 Movimiento ondulatorio armónico de una partícula A) En el espacio. B) En el tiempo.	13
Fig. 2.5 Esquema de polarización de la onda de corte.	14
Fig. 2.6 Comparación entre velocidad de fase y de grupo en un registro de geófonos sucesivos.	15
Fig. 2.7 Comportamiento característico (rigidez-deformación) de suelos y sus rangos típicos de deformación para pruebas de laboratorio y en estructuras.	16
Fig. 2.8 Definición de módulo de elasticidad inicial, tangente y secante.	17
Fig. 2.9 Ciclos de histéresis en la relación esfuerzo-deformación en suelos.	17
Fig. 3.1 Direcciones de exfoliación comunes en minerales.	24
Fig. 3.2 Esquema de los tipos de foliación en rocas metamórficas.	24
Fig. 3.3 Esquema de una partícula y sus dimensiones triaxiales.	26
Fig. 3.4 Estimación de esfericidad y redondez en partículas granulares.	27
Fig. 3.5 Esquema de los modos naturales más comunes de orientación de partículas alongadas.	28
Fig. 3.6 Esquema del acomodamiento de partículas esféricas uniformes, reduciendo la porosidad.	28
Fig. 3.7 Esquema del tipo de contactos entre granos.	29
Fig. 3.8 Representación de una sección transversal de un ambiente sedimentario.	30
Fig. 3.9 Esquema de una falla a) normal, b) inversa, c) cizalla.	31
Fig. 3.10 Influencia del factor escala en la evaluación de anisotropía de un macizo rocoso.	33
Fig. 3.11 Esquema de isotropía transversal A) Vertical, B) Horizontal.	35
Fig. 3.12 Esquema de un frente de onda A) Esférico, B) Elíptico.	35
Fig. 3.13 Esquema de anisotropía ortorrómbica.	36
Fig. 3.14 Esquema de anisotropía monoclinica.	36
Fig. 3.15 Esquema de trabazón rotacional de partículas en 2D y 3D.	40
Fig. 3.16 Modos de agrietamiento.	43
Fig. 3.17 Esquema de las fases de deformación por la sobreexplotación de agua.	45
Fig. 3.18 Esquema de las etapas del mecanismo de agrietamiento a escala global y de partícula.	46
Fig. 4.1 Esquema de la propagación de ondas en un medio isotrópico y su curva trayectoria-tiempo.	48
Fig. 4.2 Diagrama con simbología para el cálculo del tiempo de tránsito en un medio isotrópico transversal.	49
Fig. 4.3 Esquema general y curva trayectoria-tiempo en un medio con interface sencilla (VTI).	50
Fig. 4.4 Esquema con simbología y relaciones para calcular la distancia crítica.	51
Fig. 4.5 Diagrama con simbología para la derivación del tiempo de tránsito en un medio ortorrómbico.	52
Fig. 4.6 Esquema general y curva trayectoria-tiempo en un medio con ortorrómbico simple (ORT).	53
Fig. 4.7 Sismogramas sintéticos de un modelo de dos capas en suelos.	54
Fig. 4.8 Sismogramas sintéticos de un modelo de dos capas en rocas blandas.	55
Fig. 4.9 Sismogramas sintéticos de un modelo de dos capas en suelos con diferentes parámetros de adquisición.	56
Fig. 4.10 Sismogramas sintéticos de un modelo de dos capas en rocas blandas con diferentes parámetros de adquisición.	56



Fig. 4.11 Sismogramas sintéticos de un modelo de dos capas en suelos con diferentes "off sets".	57
Fig. 4.12 Sismogramas sintéticos de un modelo de dos capas en rocas blandas con diferentes "off sets".	57
Fig. 4.13 Sismogramas sintéticos de un modelo de tres capas ($V_1 < V_2 < V_3$) con diferentes espesores en la capa intermedia.	58
Fig. 4.14 Sismogramas sintéticos de un modelo de tres capas ($V_1 < V_2 > V_3$) con diferentes espesores en la capa intermedia.	59
Fig. 4.15 Sismogramas sintéticos de un modelo de tres capas ($V_1 > V_2 < V_3$) con diferentes espesores en la capa intermedia.	59
Fig. 5.1 Esquema general del experimento para la medición de tiempos de arribo de la onda P.	61
Fig. 5.2 Diagrama de variables del modelo experimental.	62
Fig. 5.3 Curvas granulométricas completas de las muestras M1, M2 y M3.	64
Fig. 5.4 Esquema del sistema de medición utilizado en la 1ª y 2ª etapas.	66
Fig. 5.5 Esquema del sistema de medición utilizado en la 3ª etapa.	66
Fig. 5.6 Pantalla del osciloscopio al momento de registrar la onda y al realizar la lectura del tiempo de arribo de la onda de compresión.	67
Fig. 5.7 Fotografías de diferentes configuraciones durante el desarrollo en las tres etapas.	68
Fig. 5.8 Esquema general del desarrollo del ensaye.	69
Fig. 5.9 Esquema del sistema de medición.	69
Fig. 5.10 Fotografías del desarrollo del experimento.	70
Fig. 5.11 Fotografías durante las micrografías electrónicas de barrido.	72
Fig. 5.12 Ubicación de los sitios de estudio (S1-S5).	74
Fig. 5.13 Esquema simple del tendido sísmico utilizado.	74
Fig. 5.14 Esquemas de cada tendido en los sitios de estudio.	77
Fig. 5.15 Fotografías de los trabajos realizados en los sitios de estudio.	78
Fig. 6.1 Porcentajes de humedad de cada material durante las tres etapas.	81
Fig. 6.2 Valores de peso específico de cada material durante las tres etapas.	81
Fig. 6.3 Gráfico: Velocidad de onda P – Ángulo de la 1ª y 2ª etapa.	83
Fig. 6.4 Gráfico polar de la velocidad de onda P (m/s) en la 1ª y 2ª etapa.	84
Fig. 6.5 Gráfico: Velocidad de onda P – Ángulo en la 2ª etapa / 1ª parte.	85
Fig. 6.6 Gráfico polar de la velocidad de onda P (m/s) en la 2ª etapa / 1ª parte.	86
Fig. 6.7 Gráfico: Velocidad de onda P – Ángulo en la 3ª etapa / 2ª parte.	87
Fig. 6.8 Gráfico polar de la velocidad de onda P (m/s) en la 3ª etapa / 2ª parte.	87
Fig. 6.9 Fotografías de las probetas deformadas y agrietadas después del ensaye triaxial.	89
Fig. 6.10 Gráficos del esfuerzo – deformación en los materiales M1 y M2.	89
Fig. 6.11 Curva de reducción de módulos en materiales M1 y M2.	90
Fig. 6.12 Velocidad de onda P medida con geófono de 55KHz antes y después de la falla.	90
Fig. 6.13 Velocidad de onda P medida con geófono de 100Hz antes y después de la falla.	91
Fig. 6.14 Micrografías electrónicas de barrido de una muestra de arcilla M1 (40x – 10000x).	93
Fig. 6.15 Micrografías electrónicas de barrido de una muestra de limo M2 (40x – 10000x).	94
Fig. 6.16 Perfil de velocidades de corte aparentes del tendido 1000-2000 en el primer sitio S1.	95
Fig. 6.17 Perfil de velocidades de compresión del tendido 1000-2000 en el primer sitio S1.	96
Fig. 6.18 Perfil de velocidades de corte aparentes del tendido 2050 en el primer sitio S1.	96
Fig. 6.19 Perfil de velocidades de compresión del tendido 2050 en el primer sitio S1.	97
Fig. 6.20 Perfil de velocidades de corte aparentes del tendido 1050 en el primer sitio S1.	97



Fig. 6.21 Perfil de velocidades de corte aparentes del tendido 1075 en el primer sitio S1.	97
Fig. 6.22 Diagrama 3D de las velocidades de corte aparentes en el primer sitio S1.	98
Fig. 6.23 Sismograma real y sintético respectivamente, correspondientes al primer disparo del tendido 1000-2000 en el primer sitio S1.	99
Fig. 6.24 Sismograma real y sintético respectivamente, correspondientes al primer disparo del tendido 2050 en el primer sitio S1.	99
Fig. 6.25 Perfil de velocidades de corte aparentes del tendido 4000 en el segundo sitio S2.	100
Fig. 6.26 Perfil de velocidades de compresión del tendido 4000 en el segundo sitio S2.	100
Fig. 6.27 Perfil de velocidades de corte aparentes del tendido 4300 en el segundo sitio S2.	101
Fig. 6.28 Perfil de velocidades de compresión del tendido 4300 en el segundo sitio S2.	101
Fig. 6.29 Diagrama 3D de las velocidades de corte aparentes en el segundo sitio S2.	101
Fig. 6.30 Sismograma real y sintético respectivamente, correspondientes al primer disparo del tendido 4000 en el segundo sitio S2.	102
Fig. 6.31 Sismograma real y sintético respectivamente, correspondientes al primer disparo del tendido 4300 en el segundo sitio S2.	102
Fig. 6.32 Perfil de velocidades de corte aparentes del tendido 1000 en el tercer sitio S3.	103
Fig. 6.33 Perfil de velocidades de corte aparentes del tendido 2000 en el tercer sitio S3.	103
Fig. 6.34 Perfil de velocidades de compresión del tendido 1000 en el tercer sitio S3.	104
Fig. 6.35 Perfil de velocidades de compresión del tendido 2000 en el tercer sitio S3.	104
Fig. 6.36 Diagrama 3D de las velocidades de corte aparentes en el tercer sitio S3.	104
Fig. 6.37 Sismograma real y sintético respectivamente, correspondientes al primer disparo del tendido 1000 en el tercer sitio S3.	105
Fig. 6.38 Sismograma real y sintético respectivamente, correspondientes al primer disparo del tendido 2000 en el tercer sitio S3.	105
Fig. 6.39 Fotografía durante el desarrollo de los tendidos circulares en el tercer sitio S3.	106
Fig. 6.40 Sismogramas de los tendidos circulares en el tercer sitio S3.	106
Fig. 6.41 Velocidad de compresión promedio en los tendidos circulares en el tercer sitio S3.	107
Fig. 6.42 Perfil de velocidades de corte aparentes del tendido 3000 en el cuarto sitio S4.	107
Fig. 6.43 Perfil de velocidades de corte aparentes del tendido 3050 en el cuarto sitio S4.	108
Fig. 6.44 Perfil de velocidades de compresión del tendido 3000 en el segundo sitio S4.	108
Fig. 6.45 Perfil de velocidades de compresión del tendido 3050 en el cuarto sitio S4.	108
Fig. 6.46 Diagrama 3D de las velocidades de corte aparentes en el cuarto sitio S4.	109
Fig. 6.47 Sismograma real y sintético respectivamente, correspondientes al primer disparo del tendido 3000 en el cuarto sitio S4.	109
Fig. 6.48 Sismograma real y sintético respectivamente, correspondientes al primer disparo del tendido 3050 en el cuarto sitio S4.	110
Fig. 6.49 Perfil de velocidades de corte aparentes del tendido 4000 en el cuarto sitio S4.	110
Fig. 6.50 Perfil de velocidades de corte aparentes del tendido 4050 en el cuarto sitio S4.	111
Fig. 6.51 Diagrama 3D de las velocidades de corte aparentes en el cuarto sitio S4.	111
Fig. 6.52 Perfil de velocidades de corte aparentes del tendido 1000 en el cuarto sitio S4.	112
Fig. 6.53 Perfil de velocidades de corte aparentes del tendido 1050 en el cuarto sitio S4.	112
Fig. 6.54 Diagrama 3D de las velocidades de corte aparentes en el cuarto sitio S4.	112
Fig. 6.55 Perfil de velocidades de corte aparentes del tendido 100 y 200 en el quinto sitio S5.	113
Fig. 6.56 Diagrama 3D de las velocidades de corte aparentes en el quinto sitio S5.	113



Fig. 6.57 Perfil de velocidades de compresión del tendido 100 y 200 en el quinto sitio S5.	114
Fig. 6.58 Sismograma real y sintético respectivamente, correspondientes al primer disparo del tendido 100 en el quinto sitio S5.	114
Fig. 6.59 Sismograma real y sintético respectivamente, correspondientes al primer disparo del tendido 200 en el quinto sitio S5.	115
Fig. 6.60 Fotografía del primer caso C1 (relleno antropogénico sobre depósitos aluviales).	116
Fig. 6.61 Perfiles (paralelos) de velocidades de compresión (Tomo-DW) del primer caso C1.	116
Fig. 6.62 Fotografía del segundo caso C2 (excavación rellena por materiales antropogénicos).	116
Fig. 6.63 Perfil de velocidades de corte aparentes del caso C2.	117
Fig. 6.64 Perfil de velocidades de compresión (Tomo-DW) del caso C2.	117
Fig. 6.65 Fotografías del tercer caso C3 (macizo rocoso con estructura brechoide).	118
Fig. A.1 Curva de calibración del matriz aforado.	133
Fig. A.2 Curva granulométrica de la muestra M4.	137
Fig. A.3 Curva de compactación Proctor estándar de la muestra M1.	141
Fig. A.4 Curva de compactación Proctor estándar de la muestra M2.	142
Fig. C.1 Gráfico de interacción de variables para la velocidad de onda P (m/s) en la 1ª etapa.	157
Fig. C.2 Grafico de efectos principales para la velocidad de onda P (m/s) en la 1ª etapa.	157
Fig. C.3 Gráfico de interacción de variables para la velocidad de onda P (m/s) en la 2ª etapa.	158
Fig. C.4 Grafico de efectos principales para la velocidad de onda P (m/s) en la 2ª etapa.	158
Fig. C.5 Gráfico de interacción de variables para la velocidad de onda P (m/s) en la 3ª etapa 1ª parte.	159
Fig. C.6 Grafico de efectos principales para la velocidad de onda P (m/s) en la 3ª etapa 1ª parte.	159
Fig. C.7 Gráfico de interacción de variables para la velocidad de onda P (m/s) en la 3ª etapa 2ª parte.	160
Fig. C.8 Grafico de efectos principales para la velocidad de onda P (m/s) en la 3ª etapa 2ª parte.	161
Fig. E.1 Sismograma registrado en campo en el primer sitio S1 (1000-2000).	173
Fig. E.2 Sismograma registrado en campo en el primer sitio S1 (1050).	173
Fig. E.3 Sismograma registrado en campo en el primer sitio S1 (2050).	173
Fig. E.4 Sismograma registrado en campo en el primer sitio S1 (1075).	174
Fig. E.5 Sismograma registrado en campo en el segundo sitio S2 (4000).	174
Fig. E.6 Sismograma registrado en campo en el segundo sitio S2 (4300).	174
Fig. E.7 Sismograma registrado en campo en el tercer sitio S3 (1000).	175
Fig. E.8 Sismograma registrado en campo en el tercer sitio S3 (2000).	175
Fig. E.9 Sismograma registrado en campo en el cuarto sitio S4 (3000).	175
Fig. E.10 Sismograma registrado en campo en el cuarto sitio S4 (3050).	176
Fig. E.11 Sismograma registrado en campo en el cuarto sitio S4 (4000).	176
Fig. E.12 Sismograma registrado en campo en el cuarto sitio S4 (4050).	176
Fig. E.13 Sismograma registrado en campo en el cuarto sitio S4 (1000).	177
Fig. E.14 Sismograma registrado en campo en el cuarto sitio S4 (1050).	177
Fig. E.15 Sismograma registrado en campo en el cuarto sitio S4 (100).	177
Fig. E.16 Sismograma registrado en campo en el cuarto sitio S4 (200).	177



Capítulo 1

1. Introducción

1.1. Descripción del problema

Los suelos y las rocas son materiales naturales, su comportamiento mecánico in situ, está frecuentemente gobernado o controlado por discontinuidades como juntas, fracturas, facies y estratificación entre otras, además de defectos intrínsecos del material por lo tanto son materiales heterogéneos antes que homogéneos, y en lugar de ser isótropos, son típicamente anisótropos, lo que quiere decir que sus propiedades ingenieriles no son las mismas en direcciones diferentes. La rigidez de algunos materiales geológicos puede llegar a ser más del doble en una dirección que en otra, algunos autores sugieren que hasta 3 o 4 veces mayor. Si se llega a omitir puede producir un error en la estimación del comportamiento mecánico, hidrológico, térmico, etc., su omisión puede desencadenar consecuencias poco deseables.

Muchas de las teorías con las que disponemos actualmente para modelar el comportamiento mecánico de los materiales que se usan en ingeniería, suponen que los materiales son homogéneos e isótropos además obedecen leyes de esfuerzo-deformación lineales (Holtz y Kovacs, 2011); la anisotropía se descuida porque en la práctica es muy difícil de determinar los parámetros anisótropos.

Para Barton y Quadros (2014) la pregunta de si la suposición a priori del comportamiento homogéneo-isótropo-elástico del macizo rocoso no tiene ningún significado en la práctica científica de la mecánica de rocas real. Sabemos que esta suposición es incorrecta, sin embargo, ¿qué tan distinta es de la realidad? Esta es la pregunta que se han realizado varios investigadores y la cual han tratado de responder en distintas condiciones y situaciones, útiles para problemas principalmente en la búsqueda de yacimientos minerales y de hidrocarburos o para el tratamiento de desechos tóxicos.

Esta investigación pretende responder parcialmente a esta pregunta al estudiar la influencia de las discontinuidades en la propagación de ondas sísmicas en suelos y rocas en su aplicación geotécnica mediante la propuesta de una metodología para evaluaciones en campo que sirvan para estimar el comportamiento ante diferentes circunstancias anisotrópicas y sean base para posteriores investigaciones.

1.2. Justificación

En la práctica se desea conocer el comportamiento mecánico de cualquier material geológico con el que se pretenda trabajar, siendo la rigidez una propiedad indispensable, sin embargo se sabe que los suelos y las rocas son naturalmente anisótropos, por lo que se complica tanto la medición, como el cálculo e interpretación en estudios geotécnicos, ya que la anisotropía influye en todas las propiedades. “La anisotropía está en cualquier lugar. La isotropía es rara” (Barton y Quadros, 2014).

En obras civiles tales como presas, túneles, edificaciones y cortes carreteros la anisotropía del subsuelo es el aspecto físico más importante para el desarrollo seguro de la obra. Las inspecciones generalmente se concentran en realizar mapeos en superficie a través de la estereología en afloramientos u obras directas y obtener las características anisótropas en función del número de familias de juntas y diaclasas, quedando con reservas del conocimiento de su estado a profundidad. Esto ha orillado a los ingenieros a asumir isotropía por facilidad y a los investigadores a enfocar sus estudios a la determinación de la anisotropía.

El estudio de la propagación de ondas de cuerpo y superficie permite establecer en cualquier dirección el estado que guarda la integridad de la roca y de sedimentos, incluso a profundidad, logrando obtener imágenes de distribución de rigideces asociadas a las facies de formación del material, su densidad y distribución de elasticidad, además permiten la estimación del grado de fracturamiento o presencia de fallas, lo que resulta una herramienta importante en la ingeniería geotécnica, sin embargo, en la actualidad, si bien algunas veces se utilizan en conjunto con obras directas, pocas veces se usan para evaluar las propiedades en más de una dirección. Así, la metodología propuesta en esta investigación pretende determinar la influencia anisotrópica de las discontinuidades en las velocidades de propagación de ondas sísmicas.

1.3. Antecedentes históricos

El análisis de anisotropía de esfuerzos ha sido un tema bastante estudiado en la ingeniería petrolera y depósitos de desechos tóxicos desde hace ya varias décadas, puesto que su relación con el fracturamiento es imprescindible y por ende el aspecto de la permeabilidad, el cual es primordial. También la minería ha aportado avances en este tema, sin embargo fue Amadei (1996) quien enfatizó la importancia de la anisotropía en la seguridad de obras de ingeniería civil, después de ello se empezaron a generar mayor cantidad de estudios en temas relacionados.

Entonces el comportamiento anisótropo de la resistencia de materiales geológicos ha sido bastante estudiado, involucrando un gran número de metodologías, técnicas y equipos diferentes, tanto en laboratorio como en campo. Entre los estudios más relevantes se presentan: [1] los ensayos de corte directo realizados por Jing et al. (1992); [2] los ensayos brasileños y ensayos a flexión y tensión como los presentados por Amadei (1996), Chen et al. (1998), Dai et al. (2013), Dai y Xia (2013), y Gao et al. (2015); [3] los ensayos de compresión simple (uniaxial) realizado por Amadei (1996), Garagon y Çan (2010), Cho et al. (2012), Yilmaz y Yucel (2014), y Gao et al. (2015); [4] los diferentes ensayos triaxiales empleados por Amadei (1996), Nunes (2002), Hakala et al. (2007), Gonzaga et al. (2008), y Asadi y Bagheripour (2015); [5] los ensayos de estrangulación o de carga puntual realizados por (Yilmaz y Yucel, 2014); [6] la tomografía 3D de rayos X realizada por Yun et al. (2013) y el método de dispersión de rayos X presentado por Gao et al. (2015). En cuanto a la modelación y generación de algoritmos matemáticos Anandarajah (2008), Garagon y Çan (2010), Ozkan et al. (2010), Madadi et al. (2013), Sun et al. (2013), y Asadi y Bagheripour (2015) presentan estudios importantes, algunos otros en medios de rocas blandas o suelos como Saenger et al. (2004), Jung y Chung (2008), Fu et al. (2012), Grammatikopoulou et al. (2013), y Mašín y Rott (2014). Si bien estos aportes son relevantes por que las propiedades mecánicas son de nuestro interés, ninguno de estos presenta el uso de técnicas de propagación de ondas.

Algunos de los estudios sobre la influencia de la anisotropía que utilizan técnicas de propagación de ondas son: [1] el de Santamarina y Cascante (1996) usando el método de columna resonante; [2] el de Diaz-Rodríguez et al. (2001) utilizando “bender elements”; [3] los de Cardarelli y Nardis (2001) y Imhof et al. (2012) mediante tomografía sísmica en campo y laboratorio; [4] los de Calderón Macías et al. (2003) y Quintero Valero (2008) con sísmica de reflexión; [5] el de Sinha (2011) con técnicas de pozo; y [6] el de Petružálek et al. (2013) con sensores dispersos en muestras cilíndricas. En cuanto a la modelación, generación de algoritmos o técnicas de inversión se encuentran los estudios de Trigubov y Gorshkalev (1988), Tsvankin (1997), Chi et al. (2001), Calvet et al. (2006), Jiménez González (2008), Danek et al. (2010), y Leaney et al. (2011); Shin (2005) propone una metodología para la reducción de

parámetros para un medio ortorrómbico. Algunos estudios más con características relevantes son los de Saenger et al. (2004), Sayers (2005), Jung y Chung (2008), Vautier (2012), Pal et al. (2014), y Santos et al. (2014).

Ahora bien existen estudios con un enfoque más centrado en el efecto de las orientaciones preferenciales, discontinuidades y estimación de sus propiedades por medio de la propagación de ondas y con métodos similares o con resultados hasta cierto punto comparables con los obtenidos en esta investigación como son los estudios de Anderson et al. (1974), Morland (1976), y Song y Suh (2014) sobre el efecto de la orientación del fracturamiento y foliación; los realizados por Nishizawa (1982) y Peyras et al. (2014) sobre la caracterización de la apertura de fracturas mediante el análisis de ondas; los estudios de monitoreo sísmico durante la aplicación de esfuerzo cortante en fallas y fracturas realizado por Toomey y Nakagawa (2000).

Kahraman (2002) en su investigación concluyo que la rugosidad disminuye la velocidad de propagación; Rueda et al. (2010), Cortes Gómez (2012) y Cortes Gómez et al. (2013) dirigieron sus estudios a determinar la densidad de micro fracturas y estimar la densidad y la tendencia de fracturas mediante el análisis de ondas sísmicas; y Gutierrez y Youn, (2015) estudio la distribución y la longitud de las fracturas observando que entre mayor longitud y continuidad decrecen los módulos elásticos.

Además existe una gran cantidad de estudios (los más relevantes para esta investigación son los de Kern (1993), Ullemeyer et al. (2006), Best et al. (2007), Kern et al. (2008), Chichinina et al. (2009), Kuila et al. (2011), Eitzenberger (2012), Petružálek et al. (2013), Barton y Quadros (2014), y Chan y Schmitt (2014)) que realizan mediciones de velocidad o atenuación de onda ante diferentes presiones de confinamiento y diferentes temperaturas en rocas sedimentarias o metamórficas con una foliación o fracturamiento evidente mediante mediciones con distintas orientaciones relativas, algunos de ellos dando una gran importancia a las orientaciones preferenciales de cristalización y micro fracturamiento, y por su parte Kim et al. (2012) analiza la relación de la anisotropía de módulos elásticos, velocidad de onda P y propiedades térmicas.

Generalmente los estudios en campo están enfocados a escalas de laboratorio o escalas regionales y globales, los cuales no encajan en la presente investigación, sin embargo, existen algunas con aportaciones de suma importancia como las de Quintero Valero (2008), Tsvankin et al. (2010), Ali y Jakobsen (2011), Behera et al. (2011), y Fan y Sun (2015). Respecto a escalas locales la investigación más relevante es la de Watanabe et al. (1996), quien realizó un estudio en superficie mediante tomografía sísmica en suelos en una superficie cuadrada de 100 metro de lado y encontró de manera general un grado de anisotropía entre 1% y 10%.

Capítulo 1 – Introducción

También existe ya un precedente de la propagación de ondas en muestras artificiales con fracturamiento inducido y controlado, [1] Watanabe y Sassa (1995) presentaron un medio compuesto de múltiples capas delgadas de baja velocidad (aluminio y resina acrílica) en diferentes espesores y configuraciones en el que se propagaron ondas sísmicas; [2] Wu et al. (2013) evaluaron la respuesta sísmica en barras de roca con fracturas controladas rellenas de arena; [3] Ekanem et al. (2013) analizaron el comportamiento anisótropo de la atenuación de la onda P en un medio de resina con virutas de silicón simulando micro fracturamiento; [4] Ding et al. (2014) realizaron mediciones de ondas de cuerpo en diferentes ángulos en muestras sintéticas prismáticas de composición mineral con un fracturamiento artificial inducido; y [5] Lee et al. (2016) realizaron un análisis numérico de la onda SH con inclusiones de anisotropía mediante la colocación de piezas con múltiples capas.

1.4. Hipótesis

Las discontinuidades geológicas afectan directamente la velocidad de propagación de las ondas sísmicas, la magnitud de la variación depende en gran medida de la orientación, provocando evaluaciones no reales de los parámetros elásticos utilizados en geotecnia para la caracterización geomecánica y cálculo de deformaciones.

1.5. Objetivos

1.5.1. Objetivo general

- Determinar la influencia de las discontinuidades en la velocidad de propagación de ondas mecánicas en medios geológicos, mediante mediciones del tiempo de tránsito en experimentos de laboratorio y la evaluación de la distribución de velocidades aplicando la metodología propuesta para pruebas en campo, enfatizando la importancia de la anisotropía en la caracterización geomecánica.

1.5.2. Objetivos particulares

- Determinar la influencia de fracturas rellenas sólidas inducidas con disposición y orientación controlada en la velocidad de propagación de ondas de compresión mediante mediciones del tiempo de tránsito en un experimento de laboratorio en suelos.
- Determinar la influencia del agrietamiento y deformaciones (estado límite de falla) en la velocidad de propagación de ondas de compresión mediante mediciones del tiempo de tránsito en probetas de suelo antes y después de ser sometidas a ensayos triaxiales.
- Analizar el comportamiento anisótropo de la velocidad de ondas sísmicas debido a discontinuidades, mediante el análisis multicanal de ondas superficiales y la tomografía sísmica en pruebas en campo.
- Comparar e interpretar sismogramas sintéticos generados a partir de modelos multicapas ideales obtenidos de los perfiles de distribución de velocidades (resultado del análisis) y sismogramas reales obtenidos directamente de la evaluación en campo.



Capítulo 2

2. Teorías, principios y conceptos introductorios

2.1. Teoría de la elasticidad

La aplicación de una fuerza en la superficie de un cuerpo sólido puede modificar el tamaño y/o la forma del mismo de manera momentánea, ya que existen fuerzas internas que se resisten al cambio, cuando la fuerza externa es retirada el cuerpo tiende a regresar a su condición inicial. Esta propiedad de resistencia al cambio de tamaño y forma y la capacidad de regresar a las condiciones originales al retirar las fuerzas aplicadas, es conocida como elasticidad. La teoría de la elasticidad relaciona las fuerzas aplicadas a los cuerpos con los cambios resultantes en ellos y se expresa en términos del concepto esfuerzo deformación.

2.1.1. Deformación

La deformación es definida como el cambio relativo (es decir, el cambio fraccional) en dimensión o forma del cuerpo, puede ser descompuesta en tres tipos fundamentales, denominadas: deformación normal, deformación cortante y rotación. El cambio por unidad de volumen es llamado dilatación. La Tabla 2.1 presenta las expresiones comúnmente empleadas para las deformaciones elementarias.

Tabla 2.1 Deformaciones elementarias.

Deformación normal	$\varepsilon_{xx} = \frac{\partial u}{\partial x}, \quad \varepsilon_{yy} = \frac{\partial v}{\partial y}, \quad \varepsilon_{zz} = \frac{\partial w}{\partial z}$
Deformación cortante	$\varepsilon_{xy} = \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y}, \quad \varepsilon_{yz} = \frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z}, \quad \varepsilon_{xz} = \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x}$
Rotación	$\theta_x = \frac{\partial w}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial z}, \quad \theta_y = \frac{\partial u}{\partial z} - \frac{\partial w}{\partial x}, \quad \theta_z = \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y}$
Dilatación	$\Delta = \varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy} + \varepsilon_{zz} = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z}$

Fuente: (Telford et al., 1990).

2.1.2. Tensor esfuerzo

El esfuerzo es definido como la fuerza por unidad de área. Si la fuerza aplicada varía de un punto a otro, el esfuerzo también varía y este valor puede ser encontrado si tomamos un pequeño elemento infinitesimal, dividiendo la fuerza total aplicada entre la magnitud del área. Expresado de manera general como:

$$t_i^{(\vec{n})} = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{AF_i}{\Delta A} \quad (2.1)$$

Si la fuerza es perpendicular al área, el esfuerzo es denominado normal (σ), y cortante (τ) cuando es tangencial al área. Generalmente se utiliza la convención de signos en los que los

valores positivos corresponden a esfuerzos de tensión. Cuando la fuerza no es ni paralela ni perpendicular al área, puede descomponerse en sus componentes correspondientes (Telford et al., 1990), la Fig. 2.1 los ilustra en un cuerpo ideal en 3D.

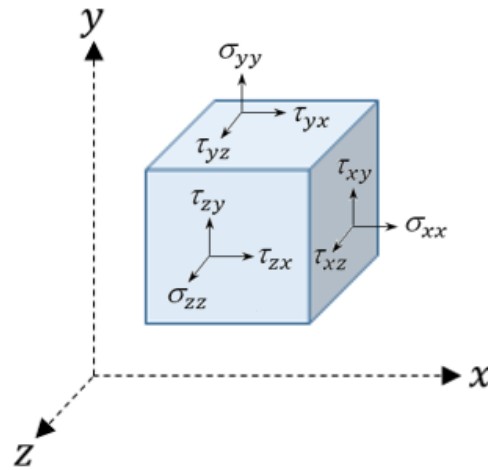


Fig. 2.1 Componentes del esfuerzo en un cuerpo ideal en 3D.

2.1.3. Ley de Hooke

Cuando las deformaciones son pequeñas la relación entre esfuerzo y deformación está dada por la Ley de Hooke, la cual establece que, dada una deformación, ésta es directamente proporcional al esfuerzo producido. De manera general puede plantearse como:

$$\sigma_{ijkl} = C_{ijkl} \varepsilon_{kl} \quad (2.2)$$

La expresión anterior es la ecuación constitutiva para un material elástico lineal, donde C_{ijkl} es el tensor de cuarto orden denominado tensor de constantes elásticas, que inicialmente contiene 81 componentes, sin embargo estas pueden reducirse a 21 constantes independientes mediante un balance de energía y simetría de elementos; y ε_{kl} es el módulo de elasticidad o módulo de Young. O bien en términos de las constantes de Lamé, puede expresarse como:

$$\sigma_{ii} = \lambda \Delta + 2\mu \varepsilon_{ii} \quad i = x, y, z \quad (2.3)$$

$$\sigma_{ij} = \mu \varepsilon_{ij} \quad i, j = x, y, z, \quad i \neq j \quad (2.4)$$

2.1.4. Parámetros elásticos

Para definir cualquier material elásticamente se requieren dos de las cinco constantes elásticas disponibles, en la teoría elástica las más convenientes son los parámetros de Lamé (μ y λ), pero en los problemas de ingeniería donde la medida de la relación es directa de una roca a una fuerza, se requiere una medida directa, el módulo de Young E y la relación de Poisson ν

son las más comúnmente citadas. A pesar de ello en la mayoría de las rocas cuasi y semi-elásticas, todas las constantes elásticas pueden ser relacionadas con buen grado de precisión (Farmer, 1968). A continuación se describe cada parámetro de forma individual:

- **Módulo de elasticidad o módulo de Young (E)**
Es la relación entre el esfuerzo unitario (fuerza sobre superficie) y deformación longitudinal unitaria (deformación longitudinal sobre longitud inicial), también puede ser expresado como la pendiente de la curva esfuerzo deformación dentro de la zona de comportamiento elástico.
- **Relación de Poisson (ν)**
Es la relación entre las deformaciones unitarias transversal y longitudinal.
- **Módulo de compresibilidad o módulo de Bulk (K)**
Es la relación entre la presión hidrostática y el cambio de volumen unitario y se define como el incremento en el esfuerzo volumétrico (presión) sobre la deformación volumétrica unitaria (dilatación). Este parámetro también es empleado en fluidos de manera indistinta.
- **Parámetros de Lamé ($\lambda, \mu \equiv G$)**
Son dos constantes elásticas que definen el comportamiento elástico de un cuerpo isotrópico con pequeñas deformaciones. λ es conocido como el primer parámetro de Lamé; μ es el segundo parámetro de Lamé, también conocido como módulo de rigidez o módulo de corte (G) y definido como la relación entre el esfuerzo transversal unitario y el desplazamiento relativo entre los planos de deslizamiento.

2.2. Principios de sismología

La sismología es la rama de la geofísica que estudia la propagación de ondas sísmicas, mediante el principio teórico que considera la propagación de energía de un lugar a otro sin transferencia de materia, mediante ondas mecánicas o electromagnéticas al cual se le conoce como la teoría del movimiento ondulatorio.

Una onda es definida como una “perturbación” la cual viaja a través del medio. Por lo que una onda sísmica será aquella que viaje a través del subsuelo (Telford et al., 1990). La Fig. 2.2 esquematiza una onda sísmica en el subsuelo, e ilustra un registro típico (sismograma).

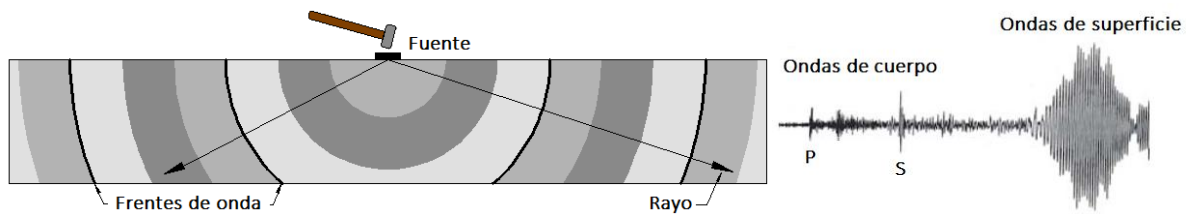


Fig. 2.2 Desarrollo esquematizado de una onda sísmica en el subsuelo y un sismograma típico.
Modificado de: (Burger, 1992; Sellés-Martínez, 2005)

2.2.1. Tipos de ondas sísmicas

Las ondas sísmicas se clasifican en dos grupos por la manera en que se propagan en el medio, y a su vez cada grupo se divide en dos tipos fundamentales de onda por la dirección del movimiento particular que generan en las partículas del subsuelo (Sauter, 1989). Se ilustran en la Fig. 2.3 y se enlistan a continuación.

- **Ondas de cuerpo:** [1] Ondas primarias, de volumen, de compresión u ondas P; [2] ondas secundarias, de corte u ondas S.
- **Ondas de superficie:** [1] Ondas Love u ondas L; [2] Ondas Rayleigh u ondas R

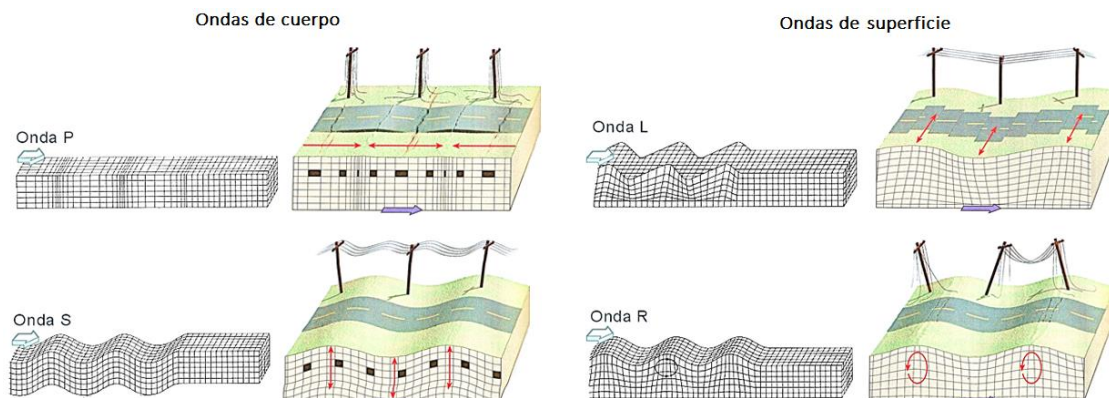


Fig. 2.3 Ondas sísmicas y su movimiento característico.
Modificado de: (Tarbuck et al., 2005).

2.2.2. Ecuación de la onda

La ecuación general de onda puede escribirse como:

$$\frac{1}{V^2} \frac{\partial^2 \psi}{\partial t^2} = \nabla^2 \psi \quad (2.5)$$

Donde V es una constante, la cual representa a la velocidad. Si se considera una onda plana, donde ψ es una función solo de x y t (tiempo) entonces se reduce a:

$$\frac{1}{V^2} \frac{\partial^2 \psi}{\partial t^2} = \frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} \quad (2.6)$$

La solución de D'Alembert suministra un número infinito de soluciones particulares a la ecuación de onda, sin embargo la forma más simple de expresar la variación en el tiempo es como una onda armónica por ejemplo

$$\psi = \text{sen}(x - Vt). \quad (2.7)$$

2.2.3. Terminología de la onda

Para facilitar el entendimiento tratamos con una onda periódica de forma sinusoidal. La longitud de onda λ es la distancia entre dos puntos adyacentes que tienen la misma fase, es decir, la distancia entre dos crestas sucesivas, la amplitud A es el máximo desplazamiento asociado al movimiento de la partícula respecto a la posición sin perturbación, la Fig. 2.4a ilustra los conceptos anteriores, ahora bien, si colocamos un punto de referencia y pretendemos que las ondas se mueven a través del tiempo como se intenta mostrar en la Fig. 2.4b, podremos visualizar los siguientes conceptos: el periodo T es el tiempo que toman dos crestas sucesivas en pasar por el punto de referencia, es decir, completar un ciclo; el número de ciclos por unidad de tiempo (repeticiones/segundo) es definida como frecuencia f y sus unidades son Hertz (Hz).

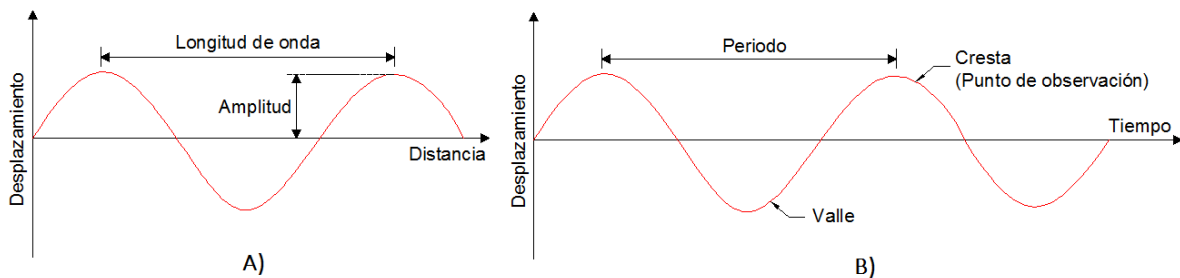


Fig. 2.4 Movimiento ondulatorio armónico de una partícula A) En el espacio. B) En el tiempo.

Modificado de: (Burger, 1992).

2.2.3.1. Polaridad

Al propagarse una onda de compresión, el desplazamiento de cada partícula en el terreno se produce hacia adelante y atrás en la dirección del rayo de la onda, de modo que es natural observar ondas cuyo primer impulso sea hacia delante de manera que genera compresión, en este caso la onda comienza con una cresta; en cambio en las ondas cuyo primer impulso es hacia atrás se genera expansión y la onda comienza con un valle. La Fig. 2.5 ilustra el fenómeno mencionado, el cual es denominado polaridad del primer arribo (Sellés-Martínez, 2005).

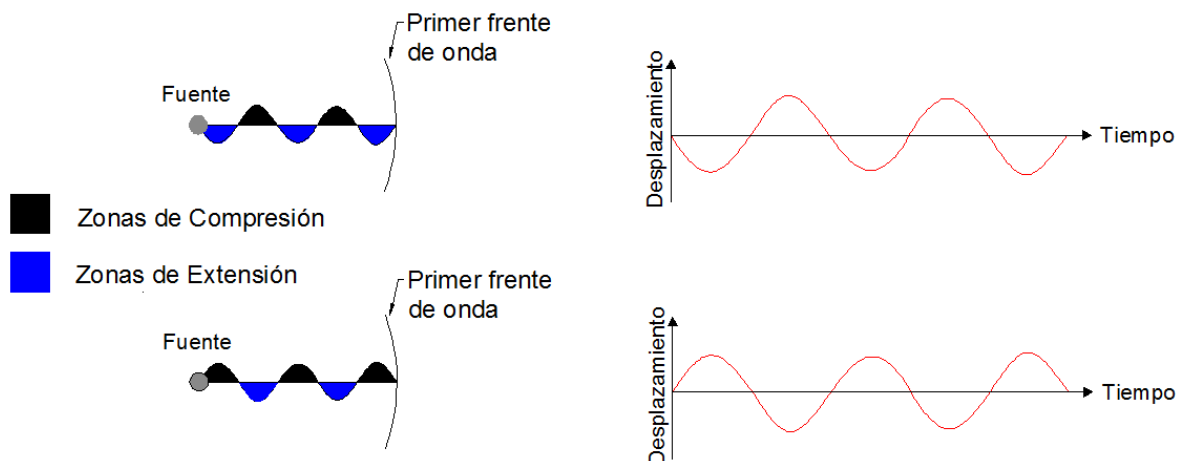


Fig. 2.5 Esquema de polarización de la onda de corte.
 Modificada de: (Sellés-Martínez, 2005).

2.2.3.2. Velocidad

La velocidad V , como aparece en la ecuación (2.6) es conocida como velocidad de fase y es la rapidez con la cual un punto constante de una fase (por ejemplo una cresta) viaja en dirección normal a la superficie de onda en un medio homogéneo e isótropo. La velocidad de grupo U es la rapidez con la que la superficie y la energía de una onda viajan en una dirección radialmente hacia afuera desde la fuente en un medio homogéneo e isótropo (Vasquez Paredes, 2008). La Fig. 2.6 ilustra una comparación entre ambas, las cuales en un medio anisótropo, dependerán del ángulo, en cambio en un medio atenuante dependerán de la dispersión de la frecuencia.

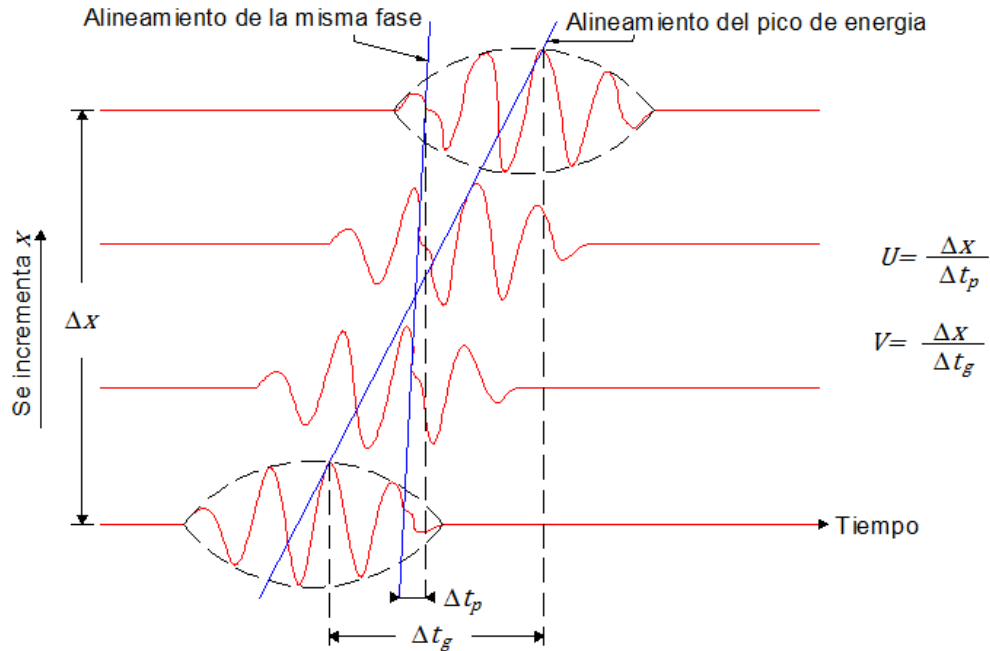


Fig. 2.6 Comparación entre velocidad de fase y de grupo en un registro de geófonos sucesivos.
Modificada de: (Telford et al., 1990).

2.2.4. Métodos sísmicos

Los métodos de prospección sísmica de acuerdo a las técnicas de adquisición de datos se clasifican en métodos pasivos (aquellos que registran los movimientos telúricos del planeta) y activos (aquellos que registran y analizan las ondas generadas por una fuente artificial). Estos últimos también divididos en invasivos (requieren perforación en el subsuelo) y no invasivos (realizados en superficie). Algunos métodos se basan en la propagación de ondas de cuerpo y algunos otros en la propagación de ondas de superficie.

2.3. Rigidez de pequeñas deformaciones en suelos y rocas

La deformación máxima en la que los suelos presentan un comportamiento casi totalmente recuperable es muy pequeña, la rigidez de pequeñas deformaciones es un término utilizado para referenciar la rigidez del suelo a pequeñas deformaciones y está asociada a un rango de deformación, por ejemplo, deformación cortante $\varepsilon_{ij} \leq 1 \times 10^{-6}$, lo cual se cree, es una propiedad fundamental de todos los tipos de materiales geotécnicos como arcillas, limos, arenas, gravas y rocas bajo cargas estáticas o dinámicas y en condiciones no drenadas o drenadas. Con un incremento en la deformación y un decaimiento de la rigidez del suelo de manera no lineal (Benz, 2007).

2.3.1. Límites de deformación

La deformación más pequeña que puede medirse de manera fiable en ensayos convencionales en suelos sin instrumentación especializada es $\varepsilon_{ij} = 1 \times 10^{-3}$ la cual Atkinson (2000) definió como el límite entre las grandes y pequeñas deformaciones, de manera que aquellas deformaciones menores, pueden ser llamadas pequeñas o muy pequeñas deformaciones, el margen entre ambas es difícil de cuantificar, sin embargo para propósitos de esta tesis se considera una deformación cortante de $\varepsilon_{ij} = 1 \times 10^{-6}$ como límite entre ellas, como se muestra en la Fig. 2.7.

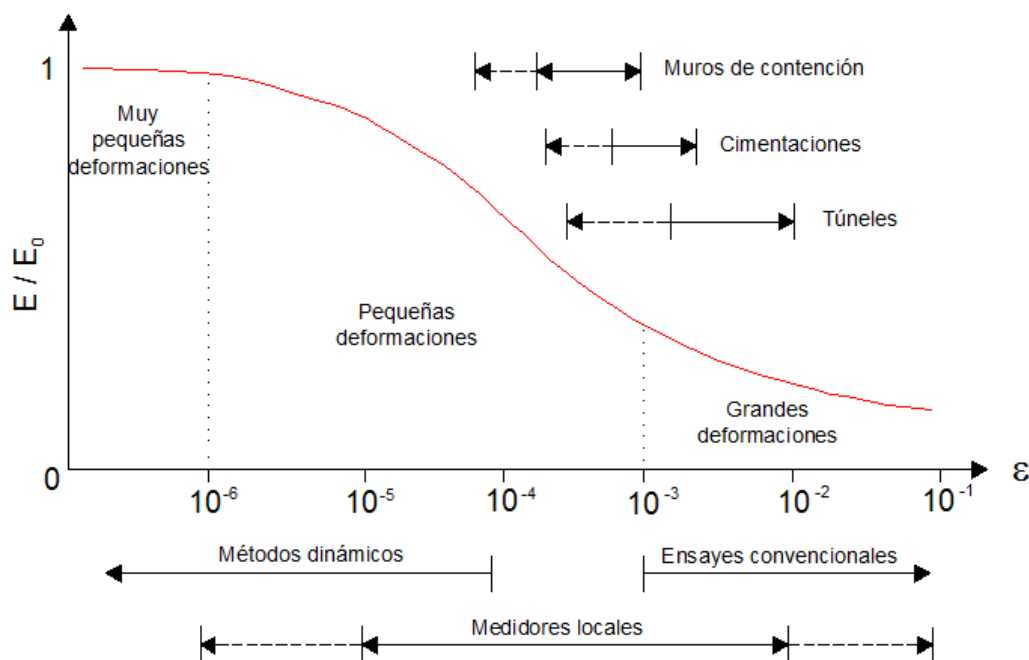


Fig. 2.7 Comportamiento característico (rigidez-deformación) de suelos y sus rangos típicos de deformación para pruebas de laboratorio y en estructuras.

Modificado de: (Benz, 2007).

2.3.2. Definición de los módulos inicial, tangente y secante

Tanto el módulo de elasticidad E como el módulo de rigidez G de algún material geológico pueden ser determinados de manera distinta, la Fig. 2.8 muestra tres pendientes diferentes que representan el módulo de elasticidad de un material en una prueba triaxial.

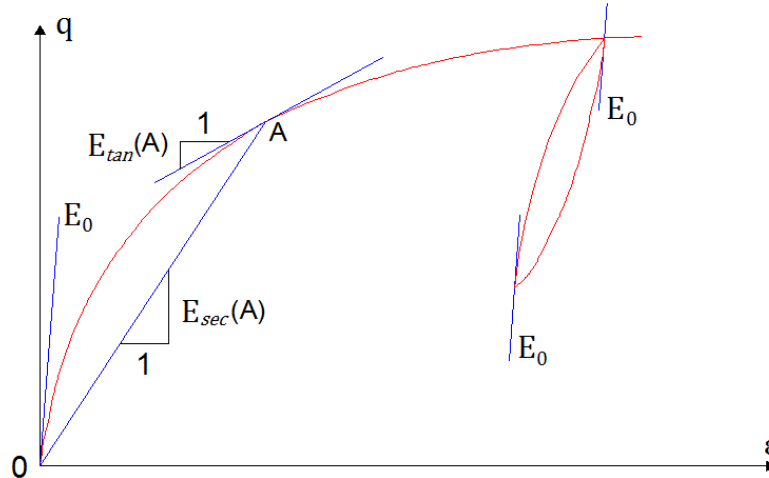


Fig. 2.8 Definición de módulo de elasticidad inicial, tangente y secante. Modificado de: (Benz, 2007).

Los módulos iniciales, de elasticidad y de rigidez se denotan como E_0 y G_0 respectivamente, son las líneas tangentes a la curva inicial de la gráfica esfuerzo-deformación (incluso en pruebas cíclicas) y son asociados al rango de muy pequeñas deformaciones. El módulo tangente E_{tan} es utilizado en cálculos numéricos, mientras que el módulo secante E_{sec} generalmente es utilizado para describir resultados experimentales.

A partir del análisis dinámico, se ha descubierto que la gran mayoría de los suelos presentan una curva en su relación esfuerzo-deformación como se muestra en la Fig. 2.9.

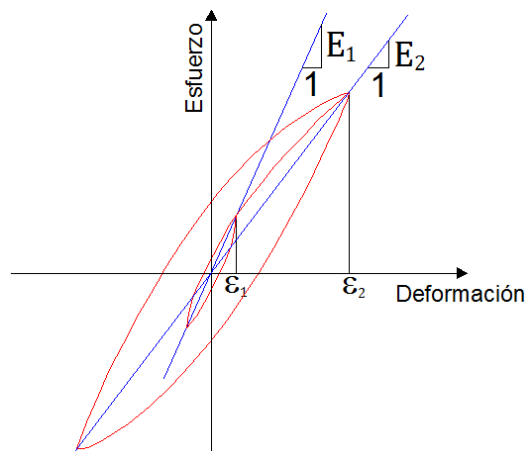


Fig. 2.9 Ciclos de histéresis en la relación esfuerzo-deformación en suelos. Modificado de: (Seed e Idriss, 1970).

El módulo de rigidez G usualmente es representado por el módulo secante G_0 , el cual se determina de los extremos de la curva de histéresis generada, de manera que es evidente que dependerá de la magnitud de la deformación inducida por lo tanto debe determinarse en función de la deformación inducida en la muestra de suelo o en el terreno (Seed e Idriss, 1970).

Sin embargo en el análisis estático, durante mucho tiempo fueron ignoradas o incluso consideradas no aplicables las conclusiones anteriores de la dinámica del suelo y las diferencias entre si no son asumidas por la magnitud de la deformación inducida, si no a la naturaleza de la carga. En la actualidad es aceptado que los factores de la naturaleza de la carga como las fuerzas de inercia y los efectos por el tipo de deformación tienen poca influencia en la rigidez de pequeñas deformaciones. A continuación se presenta evidencia experimental de la influencia de la velocidad de deformación y otros parámetros que afectan más significativamente la rigidez de pequeñas deformaciones.

2.3.3. Mediciones de pequeñas deformaciones

La rigidez de pequeñas deformaciones en suelos puede ser evaluada en laboratorio y/o en pruebas en campo.

2.3.3.1. Ensayes de laboratorio

Algunas de las técnicas en laboratorio pueden ser pruebas triaxiales con transductores de deformación local, también mediante “bender elements” (BE), o bien con ensayos de columna resonante o ensayos de corte torsional. De manera sencilla, a continuación, se describirán algunos de estos métodos.

- Velocidades a partir de “bender elements” (BE)

Los denominados “bender elements” son pequeños dispositivos en forma de placas que pueden recibir y transmitir señales lo que hace que sea fácil medir la velocidad de onda al colocarse en los extremos de una muestra durante una prueba triaxial. Los desarrollos tecnológicos en esta materia han permitido evaluar la velocidad de onda P y S y su fácil aplicación promueve su uso en pruebas de rutina, sin embargo se limita a las muy pequeñas deformaciones, es decir, deformaciones $\varepsilon_{ij} < 1 \times 10^{-6}$. Además un problema que suele presentarse es la dificultad de interpretación al determinar la llegada de la primera onda.

- Ensaye de columna resonante

El ensaye de columna resonante es un ensaye cíclico en el que no solo se pueden cargar muestras de manera triaxial sino también a torsión, en el cual, se evalúa el modo fundamental de la frecuencia de resonancia de una muestra cilíndrica axialmente confinada mediante la excitación torsional o longitudinal de sus extremos, la frecuencia de resonancia medida está relacionada con la rigidez de la muestra, de modo que usando una solución

elástica teórica se obtienen resultados satisfactorios en el rango de muy pequeñas deformaciones, al igual que los “bender elements”, sin embargo es una técnica muy costosa que imposibilita su aplicación de rutina.

2.3.3.2. Ensayes en campo

Los ensayos de campo son pruebas indirectas en donde son identificables rigideces de muy pequeñas deformaciones a través de técnicas geofísicas, algunas de las técnicas más usadas son “cross hole”, “down hole”, registros de velocidad de onda en suspensión, cono sísmico, dilatómetro sísmico plano (SDMT) y análisis espectral de ondas superficiales AEOS (SASW). Enseguida, se describen de manera general algunos de estos métodos.

- Técnica de pozo, “cross hole”

El método “cross hole”, es una técnica sísmica la cual requiere de al menos dos pozos, en uno de ellos se genera una fuente de energía mediante una pequeña explosión, en el pozo adyacente se coloca al menos un geófono receptor a la misma profundidad, de manera que se obtendrán las velocidades de onda a través del suelo entre los pozos, actualmente la tomografía “cross hole” utiliza una serie de receptores, lo cual mejora la resolución, esta técnica probablemente sea una de las más confiables en campo para medir la rigidez de pequeñas deformaciones, sin embargo el más costoso pues requiere pozos cercanos y mediciones exactas de inclinación en ellos.

- Análisis espectral de ondas superficiales AEOS (SASW)

En cambio al método “cross hole”, el análisis espectral de ondas superficiales es una técnica geofísica no invasiva, los receptores son situados a lo largo de un tendido en superficie, y la ubicación de la fuente se va moviendo en cada registro, lo que genera una serie de registros sucesivos que ayuda a su procesamiento, además en lugar de analizar los tiempos de arribo de las ondas P y S, se utilizan las ondas Rayleigh (R) las cuales tienen baja frecuencia y longitud de onda larga. Dado que la velocidad de propagación aumenta conforme se aumenta la presión de confinamiento y por lo tanto con la profundidad, estas ondas viajan más rápidamente que las ondas de alta frecuencia. La facilidad de su operación en campo y el desarrollo tecnológico del procesamiento de señales convierte a esta técnica como la más eficiente para la evaluación de rigidez de pequeñas deformaciones en campo.

2.3.4. Parámetros que afectan a la rigidez de pequeñas deformaciones

Entendemos que G_0 y E_0 denotan el módulo de pequeñas deformaciones, de rigidez y elasticidad respectivamente, ahora bien, introduciremos $\varepsilon_{0.7}$ denotando a la deformación cortante en la cual el módulo de rigidez G decae al 70% de su valor inicial G_0 . De tal manera

que las tuplas $(G_0, 0)$ y $(G_{0.7}$ y $\varepsilon_{0.7})$ marcan dos puntos con los cuales se puede extrapolar la curva de degradación. En la dinámica de suelos el decaimiento de la rigidez de pequeñas deformaciones con la deformación es conocido como amortiguamiento, el cual es una medida para la disipación de energía en ciclos de carga cerrados. Con el modelo de Hardin-Drnevich, cuanto mayor sea el valor de la deformación $\varepsilon_{0.7}$, menor será el amortiguamiento (Hardin y Drnevich (1972).

La magnitud de la deformación, la presión de confinamiento, la relación de vacíos y la unión entre partículas *in situ* resultan ser los parámetros más relevantes que afectan la rigidez de pequeñas deformaciones.

2.3.4.1. Influencia de la presión de confinamiento

La siguiente expresión propuesta por Hardin y Richart Jr. (1963) relaciona el módulo de rigidez inicial G_0 y la presión efectiva confinante p' :

$$G_0 \propto (p')^m \quad (2.8)$$

Para la cual el exponente m varía dependiendo del tipo de suelo. Para suelos no cohesivos se ha confirmado que un rango de $0.40 \leq m \leq 0.55$ es adecuado, sin embargo en el caso de suelos cohesivos, el valor de 0.5 inicialmente contemplado es controversial y varios investigadores confirman que el valor puede superar a $m = 1.0$.

De aquí se destaca que la presión de confinamiento influye en la rigidez de pequeñas deformaciones de manera que el amortiguamiento disminuye al aumentar la presión de confinamiento.

2.3.4.2. Influencia del índice de poros

Hardin y Richart Jr. (1963) también propusieron la relación más aplicada entre la relación de vacíos e y el módulo de rigidez inicial G_0 del suelo a través de una dependencia lineal entre la velocidad de propagación de ondas y la relación de vacíos en arenas, expresándola como:

$$G_0 \propto \frac{(2.17 - e)^2}{1 + e} \quad (2.9)$$

$$G_0 \propto \frac{(2.97 - e)^2}{1 + e} \quad (2.10)$$

Donde la ecuación (2.9) es para arenas de grano redondeado y la ecuación (2.10) para arenas de granos angulares. Posteriormente Hardin y Black (1968; 1969) indicaron que la expresión tal funciona con arcillas con baja actividad superficial, únicamente sustituyendo el coeficiente

2.97 en la ecuación (2.10). Sin embargo otros investigadores presentan una relación distinta de la forma:

$$G_0 \propto e^{-x} \quad (2.11)$$

Donde el valor de x varía desde 0.8 hasta 1.5 dependiendo de las características del suelo, con los valores más bajos para arenas y los más altos para arcillas.

2.3.5. Correlaciones entre módulos y velocidades de corte

En el caso de las técnicas sísmicas, como método indirecto para medir la rigidez de pequeñas deformaciones, nos ofrece un perfil de la velocidad de propagación de ondas, las cuales asumiendo que se trata de un material con comportamiento elástico lineal podemos relacionarlos con las siguientes expresiones:

$$V_p = \sqrt{\frac{\lambda + 2G}{\rho}} \quad (2.12)$$

$$V_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (2.13)$$

Donde V_p es la velocidad de propagación de las ondas primarias (P), V_s es la velocidad de propagación de las ondas secundarias (S) y λ, G son los parámetros de Lamé. A partir de estas relaciones se pueden desglosar los diferentes parámetros elásticos como se muestra en la Tabla 2.2.

Tabla 2.2 Parámetros elásticos dinámicos.

Relación de Poisson	$\nu = \frac{(V_p/V_s)^2 - 2}{2(V_p/V_s)^2 - 2}$
Módulo de Young	$E = 2G(1 + \nu)$
Módulo de Rigidez	$G = \rho V_s^2 = \frac{E}{2(1 + \nu)}$
Módulo de Bulk	$K = \frac{E}{3(1 - 2\nu)}$
Primer parámetro de Lamé	$\lambda = \frac{\nu E}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)}$

Modificado de: (Alvarez Manilla Aceves et al., 2003; Benz, 2007).



Capítulo 3

3. Anisotropía y discontinuidades en sólidos elásticos

3.1. Origen de la anisotropía

La variedad del origen geológico en la formación de macizos rocosos y depósitos de sedimentos son las razones por las cuales las rocas y los suelos con frecuencia presentan cierto grado de anisotropía, definiendo la anisotropía como "la variación de una propiedad física en función de la dirección en la que se mide" (Sheriff, 2002).

Al lado de la anisotropía intrínseca o inherente al origen geológico, existe a menudo anisotropía inducida por esfuerzos externos posteriores, las dos en conjunto dan como resultado una serie de tendencias en el comportamiento mecánico del material (Barton y Quadros, 2014).

3.1.1. Anisotropía en rocas: origen y composición de las rocas cristalinas

Para describir la anisotropía en las rocas, es necesario primeramente comprender cuál es su composición y cuáles son las características de sus componentes, así como el tipo de roca y su origen geológico.

De manera general se define a una roca como una masa sólida de composición mineral, por lo tanto, los minerales son los componentes básicos de las rocas, un mineral es cualquier sólido inorgánico natural que posea estructura interna ordenada y una composición química definida.

3.1.1.1. Principales características de los minerales que originan anisotropía

- **Estructura cristalina**

Cada mineral tiene una disposición ordenada de átomos la cual se denomina como estructura o forma cristalina, donde quiera que se permita la formación de un mineral sin restricciones de espacio se desarrollaran cristales individuales bien formados, sin embargo, generalmente el crecimiento cristalino es interrumpido por la competición por el espacio, lo cual genera un intercrecimiento de cristales y ninguno logra exhibir su forma cristalina.

- **Exfoliación**

En la estructura cristalina de los minerales, algunos enlaces son más débiles que otros. La exfoliación es la tendencia de un mineral a romperse a lo largo de planos generados por enlaces débiles, pueden ser identificados por sus superficies lisas distintivas que se producen al romperse dicho mineral. La exfoliación puede describirse por el número de planos exhibidos y los ángulos en los que se producen. La Fig. 3.1 ilustra las direcciones de exfoliación comunes, acompañados de un esquema y un ejemplo. Los minerales que no contienen exfoliación cuando se rompen, se fracturan.

Esquema						
Ilustración de planos						
Ejemplo						
Cantidad y dirección de los planos	1	2 a 90°	2 ≠ 90°	3 a 90°	3 ≠ 90°	4

Fig. 3.1 Direcciones de exfoliación comunes en minerales.

Modificado de: (Tarbuck et al., 2005).

• **Foliación**

Las rocas metamórficas generalmente muestran alguna clase de orientación preferente en la que los granos minerales presentan un alineamiento, a esta condición se le conoce como foliación (disposición planar de los granos minerales o rasgos estructurales de la roca). Existe foliación en algunas rocas sedimentarias e inclusive en pocas rocas ígneas, sin embargo es una característica fundamental de las rocas afectadas por metamorfismo regional (afectada por esfuerzos diferenciales de compresión).

La foliación puede formarse por la rotación de los minerales alargados hacia una nueva orientación, la recristalización de los minerales para formar nuevos los cuales crecen en una orientación preferencial, o bien mediante cambios de forma en granos equidimensionales en formas alargadas y orientadas preferentemente. Existen varios tipos de foliación, que dependen del grado de metamorfismo y del origen de la roca madre, comúnmente son considerados tres: pizarrosidad (recristalización orientada), esquistosidad (crecimiento cristalino orientado) y bandeo gnéisico (segregación de minerales). En la Fig. 3.2 se presenta un esquema de la orientación de los minerales conforme aumenta el grado de metamorfismo. Las rocas con textura pizarrosa generalmente exhiben una propiedad de separación en planos excelente denominada clivaje.

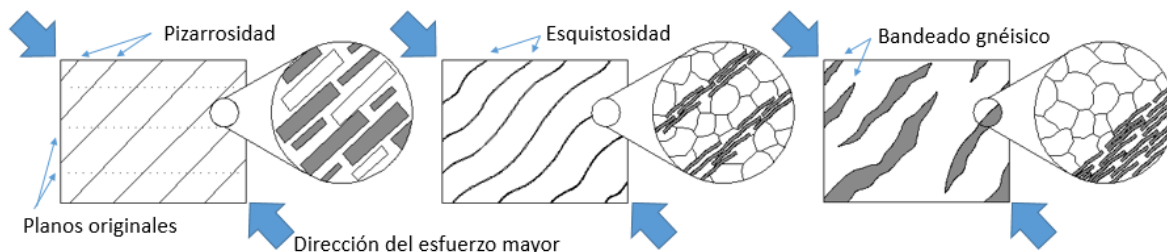


Fig. 3.2 Esquema de los tipos de foliación en rocas metamórficas.

Otro punto importante es que conforme aumenta el grado de metamorfismo regional, las rocas se vuelven menos porosas, más compactas y exhiben una velocidad de propagación de grietas más alta (Akinbinu, 2015), lo cual genera un mayor grado de anisotropía.

3.1.2. Anisotropía en suelos: origen y composición de los suelos y rocas clásticas

Recordemos que las rocas sedimentarias consisten en sedimentos que en la mayoría de los casos se han litificado para formar rocas mediante los procesos de compactación y cementación, por lo que el proceso de formación de rocas sedimentarias involucra implícitamente la formación de suelos. Entonces será necesario comprender en qué consisten los sedimentos y cuáles son sus características de formación, así como algunos conceptos geológicos que nos ayudaran en el proceso.

El suelo es una combinación de material mineral (producto de la meteorización de rocas) y orgánico (restos de flora y fauna), agua y aire. El cuál es el producto de la compleja interacción de diversos factores como los son: la roca madre, el tiempo, el clima, la vegetación y fauna, el relieve topográfico, e inclusive las actividades antropogénicas.

Ahora bien el tipo de sedimentos dependerá del ambiente deposicional (lugar geográfico donde se acumulan) puesto que cada lugar se caracteriza por tener una combinación particular de condiciones ambientales y procesos geológicos. Los ambientes deposicionales suelen clasificarse en tres categorías: continental, marino o de transición; y cada categoría contiene varios subambientes específicos, los cuales propician la acumulación de sedimentos con diferentes características como son tamaño de grano, composición mineral y textural principalmente.

3.1.2.1. Principales características de los sedimentos que propician anisotropía

- **Tamaño de grano**

El tamaño de una partícula (grano) se define en función de tres dimensiones características de la misma, las cuales se denotan en orden decreciente ($a > b > c$), medidas en la dirección de tres ejes ortogonales entre sí. La Fig. 3.3 ilustra un esquema tridimensional de las dimensiones de una partícula. Las dimensiones triaxiales se utilizan preferentemente para especificar el tamaño de partículas gruesas, ya que conforme disminuye el tamaño de la partícula se dificulta su determinación (García Flores y Maza Álvarez, 1998).

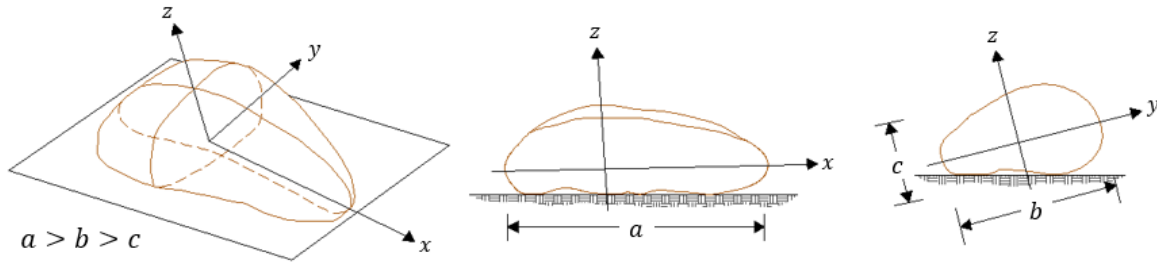


Fig. 3.3 Esquema de una partícula y sus dimensiones triaxiales.
Modificado de: (García Flores y Maza Álvarez, 1998).

La Tabla 3.1 presenta la clasificación por tamaño para materiales sedimentarios, en la cual se denota la frontera natural entre las arenas y limos, observando que 0.062mm es el tamaño máximo que puede tener una partícula para lograr sedimentarse de acuerdo a la ley de Stokes. Una partícula menor a 0.2 micras puede permanecer en suspensión indefinidamente y solo cuando se forman grumos se depositan.

Tabla 3.1 Resumen de la clasificación de materiales sedimentarios.

Clasificación	Tamaño (mm)	
Bolos	256	4096
Cantos	64	256
Grava	2	64
Arena	0.062	2
Limo	0.004	0.062
Arcilla	0.0005	0.004

- **Forma de grano**

La forma de la partícula influye en el movimiento de la misma cuando se encuentra inmerso en un fluido, además influye en las características de los sedimentos o suelos no cohesivos como en el ángulo de reposo, la compacidad y la porosidad. Las partículas pueden asumir un sinnúmero de formas y su clasificación es difícil, por lo que se han definido algunos parámetros para facilitar la evaluación de la forma de los granos.

El factor de forma (“shape factor”) es un parámetro adecuado para el estudio de la velocidad de caída de partículas y se define como:

$$SF = c/\sqrt{ab} \quad (3.1)$$

Donde a , b y c son las dimensiones triaxiales, de manera que para una partícula esférica su factor de forma es uno, para cualquier otra forma su valor será < 1 . La esfericidad también está definida en términos de las dimensiones triaxiales, así:

$$\epsilon = \left[\left(\frac{b}{a} \right)^2 \frac{c}{b} \right]^{1/3} \quad (3.2)$$

Donde de igual manera que para el factor de forma, para una partícula esférica su esfericidad es igual a uno y para cualquier otra forma su valor será < 1. Los parámetros de planidad, grosor y largura de una partícula también se definen en términos de sus dimensiones triaxiales, respectivamente como:

$$i_p = a + b / 2c \quad (3.3)$$

$$i_g = c/a \quad (3.4)$$

$$i_l = a/b \quad (3.5)$$

Por último el parámetro de la redondez se utiliza para detallar el contorno de una partícula en su posición más estable (siendo vertical su menor dimensión), la Fig. 3.4 muestra partículas con distintos grados de redondez, donde se observa que una partícula esférica tendrá un índice de redondez igual a uno, decreciendo para cualquier otra forma, además se hace una comparación con el término de esfericidad antes mencionado.

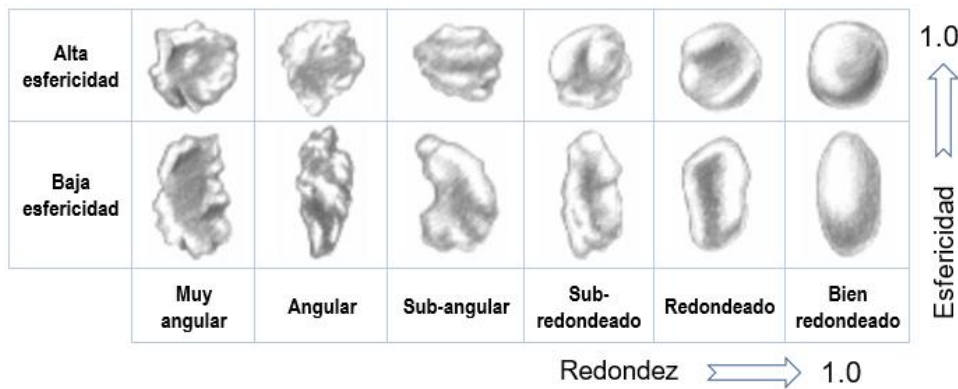


Fig. 3.4 Estimación de esfericidad y redondez en partículas granulares. Modificado de: (García Flores y Maza Álvarez, 1998).

- **Fábrica**

El término fábrica en geología se emplea para designar la relación entre la orientación y el empaque de los granos, los cuales controlan en gran medida algunas de las propiedades físicas de suelos y rocas sedimentarias como la densidad, la porosidad y la permeabilidad. En todos los ambientes sedimentarios las variaciones de energía en el transporte producen variaciones en la graduación o clasificación de los granos, así como en la fábrica (orientación y empaquetamiento).

○ Orientación de los granos

Ciertas partículas tienen una forma alargada o en forma de disco, estas partículas comúnmente muestran una orientación preferente. Esta tendencia es causada por los procesos de transporte y sedimentación, y están relacionadas con la velocidad de flujo y condiciones hidráulicas del lugar de depósito. Generalmente el eje alargado de las partículas se alinea con la dirección del flujo (véase Fig. 3.5a), sin embargo existen condiciones en las que ocurre exactamente lo contrario (véase Fig. 3.5b). Existe otra condición común, la cual es bastante estable dentro de una corriente a la que se le denomina imbricación, consiste en un acomodo similar al de las escamas en las que las partículas se traslapan colocándose parcialmente unas sobre otras (véase Fig. 3.5c). Además existe otro modo de orientación que no requiere ninguna corriente de flujo, como era necesaria en los modos anteriores, sin embargo en éste no se presenta una orientación preferencial y la imbricación es inexistente (véase Fig. 3.5d).

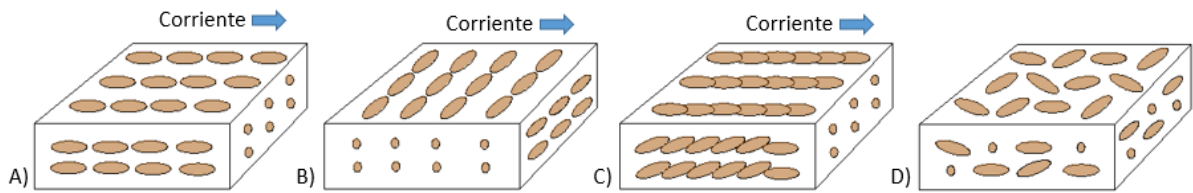


Fig. 3.5 Esquema de los modos naturales más comunes de orientación de partículas alargadas.
Modificado de: (Boggs Jr., 2006).

○ Empaquetamiento de los granos

El empaquetamiento se refiere al espaciamiento o a la densidad debido al patrón de granos y está principalmente en función del tamaño de granos, forma y al grado de compactación o sedimentación. El empaquetamiento está fuertemente relacionado con la densidad, porosidad y permeabilidad, lo cual se puede representar con un ejemplo sencillo, ilustrado en la Fig. 3.6, en el cual se consideran granos esféricos uniformes del mismo tamaño y se empaquetan de manera cúbica (embalaje más flojo), ahora bien las mismas partículas esféricas se reordenan empacándolas de manera romboédrica (embalaje más apretado) de esta manera la porosidad se reduce más de un 20%, obviamente el empaque de las partículas naturales es mucho más complejo puesto que existen gran cantidad de variables presentes (Boggs Jr., 2006).



Fig. 3.6 Esquema del reacomodo de partículas esféricas uniformes, reduciendo la porosidad.
Modificado de: (Boggs Jr., 2006).

Sedimentos pobremente graduados tienden a tener porosidades y permeabilidades más bajas que los sedimentos bien graduados debido a que los granos se encuentran más apretados por que los sedimentos finos rellenan los espacios entre los sedimentos más gruesos.

3.1.2.2. Estructura de los sedimentos debido a la compactación mecánica

Muchas causas de anisotropía inducida tras la deposición se agrupan bajo el concepto de diagénesis, proceso sedimentario final en el cual mediante la alteración física y química se produce generalmente la compactación, antes y durante la litificación.

La compactación causa una reducción en la porosidad, por lo que las capas que sobre yacen a los sedimentos generan con el tiempo una reducción de porosidad y aumento de la densidad. Obliga al grano a tener un contacto más cercano con los granos adyacentes cambiando el tipo de contacto entre granos. Se han identificado diferentes contactos entre granos al observar láminas delgadas (Boggs Jr., 2006).

Contactos puntuales o tangenciales (los granos únicamente están en contacto en un punto o una pequeña superficie plana), contactos largos o completos (a lo largo de un plano), contactos cóncavos o convexos (a lo largo de un plano curvo) y los contactos saturados (superficies onduladas o dentadas entre los granos), o bien en paquetes muy sueltos pueden existir granos que no se encuentran en contacto directo y se les denomina granos flotantes, la Fig. 3.7 esquematiza los contactos antes mencionados.

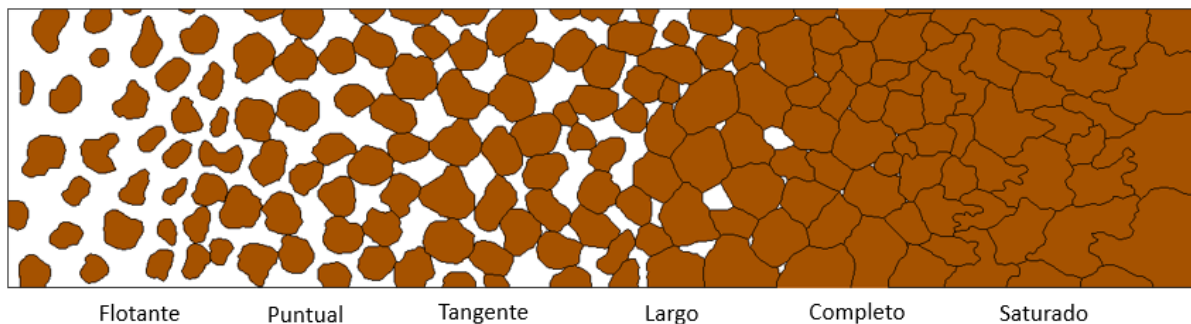


Fig. 3.7 Esquema del tipo de contactos entre granos.

3.1.2.3. Facies

El termino facies se utiliza para describir un conjunto de sedimentos con características distintivas que reflejan condiciones de un ambiente deposicional particular, las cuales están adyacentes a otros. Al examinar una sección transversal, cada facies pasa gradualmente de manera lateral a otra que se formó al mismo tiempo pero con características distintas, la Fig. 3.8 ilustra este concepto al presentar una sección transversal de un ambiente sedimentario.

Las características distintivas pueden deberse a diversos factores, ya sea por el producto de la interacción de procesos físicos y químicos (“litofacies”), por la presencia evidente de fauna y flora (“biofacies”) o específicamente la existencia de fósiles (“icnofacies”).

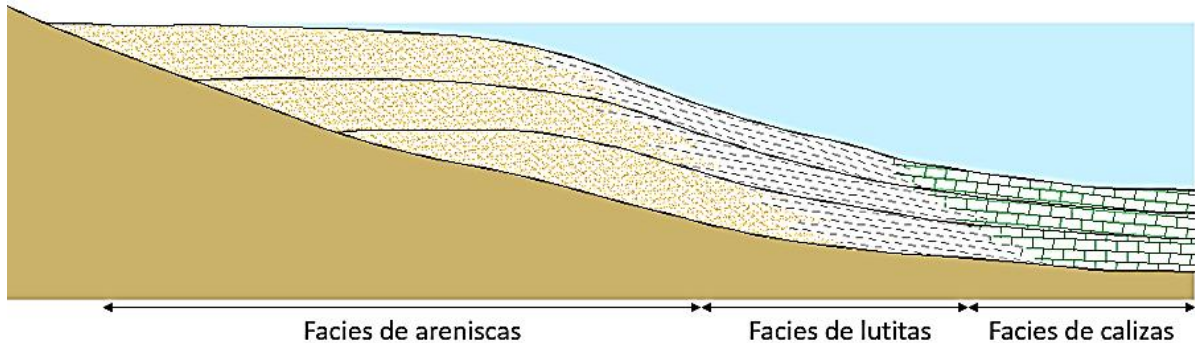


Fig. 3.8 Representación de una sección transversal de un ambiente sedimentario.
Modificado de: (Tarbuck et al., 2005).

En conjunto con la estratificación, se pueden generar secuencias complicadas, a las que se les puede dividir en dos grupos de manera general de acuerdo al orden en el que las capas están colocadas en una columna estratigráfica simple: de transgresión y regresión (inversa).

3.1.2.4. Estructuras sedimentarias

Además de las variaciones en las características de los sedimentos mencionadas anteriormente existe una variedad de estructuras que se exhibe en los depósitos de sedimentos. La estructura más común y característica es la estratificación, la cual consiste en un conjunto de capas (estratos) que pueden oscilar en su espesor desde pocos milímetros hasta decenas de metros. Los planos de estratificación son las superficies planas existentes entre un estrato y otro, indicando el final de un episodio de sedimentación y el comienzo de otro, generalmente rocas y suelos tienden a separarse a lo largo de estos planos.

La mayoría de los sedimentos se acumulan en capas horizontales puesto que suelen depositarse a partir de un fluido, sin embargo, existen condiciones en las que no es así, generando capas inclinadas en distintas direcciones, a esta estructura se le conoce como estratificación cruzada. Existen también variaciones graduales en la granulometría de una misma capa, a esto se le denomina estratificación gradada. Otros rasgos que pueden encontrarse en rocas sedimentarias clásticas son las rizaduras (ondulaciones en la superficie de una capa), grietas de desecación y fósiles.

3.1.3. Estructuras geológicas

En cuanto al origen de la anisotropía de esfuerzos, ésta es causada por la aplicación de esfuerzos externos al macizo rocoso o suelo dando origen a estructuras las cuales presentan características anisótropas en dicho medio. Estas estructuras pueden ser pliegues, fallas y diaclasas.

3.1.3.1. Pliegues

Los pliegues son ondulaciones en la secuencia de estratos a causa de esfuerzos de compresión, los dos tipos más comunes son: anticlinales (arqueamiento convexo) y sinclinales (arqueamiento cóncavo), pueden ser simétricos o asimétricos por la inclinación de su eje, si un pliegue asimétrico está demasiado volcado, se le denomina recumbente. Los pliegues no se extienden indefinidamente, sus extremos se inmergen en el terreno, donde no existen los esfuerzos de compresión. También existen los denominados domos y cubetas, los cuales son estructuras circulares ascendentes o descendientes respectivamente.

3.1.3.2. Fallas

Las fallas son fracturas en los materiales geológicos en las cuales se aprecia un desplazamiento relativo. Son clasificadas de acuerdo a su desplazamiento de manera simple en tres categorías: Fallas normales e inversas (desplazamiento vertical) y de cizalla (desplazamiento horizontal), la Fig. 3.9 las ilustra de manera esquematizada. Cerca de la superficie las rocas expuestas a lo largo de la zona de falla se comportan como un sólido frágil dando como resultado una roca denominada brecha de falla (fragmentos de roca aplastados en una matriz más fina) y fracturas paralelas. Ahora bien conforme la falla profundiza el material deja de comportarse como un sólido frágil y tiene a deformarse de manera dúctil formando una roca denominada milonita (roca pulverizada) por el movimiento de la falla.

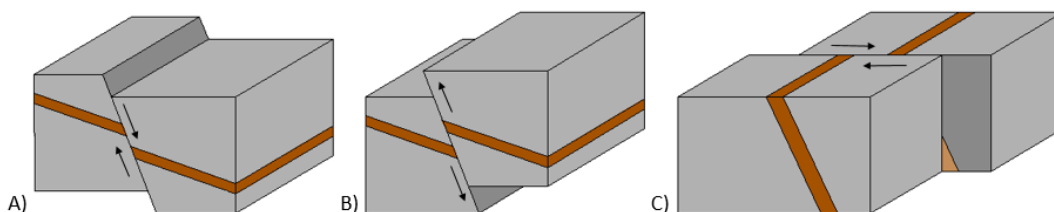


Fig. 3.9 Esquema de una falla a) normal, b) inversa, c) cizalla.

3.1.3.3. Diaclasas

Las diaclasas son fracturas en las cuales no es apreciable ningún desplazamiento, aunque estas pueden tener una orientación aleatoria, generalmente se presentan en patrones con orientaciones aproximadamente paralelas denominadas familias, como consecuencia de la deformación frágil de la corteza terrestre. Estas fracturas tienen diferentes características a

considerar como la rugosidad, apertura, sinuosidad, separación, continuidad y agrupamiento. Además pueden ser rellenadas por algún material mineral generalmente con la ayuda de algún fluido, cuando las fracturas son rellenas se conocen como vetas y las propiedades del relleno tienen una influencia importante sobre las características anisotrópicas del medio.

Las fracturas se distribuyen en cierta medida por las propiedades mecánicas de la roca, tendiendo a concentrarse en las formaciones con baja porosidad que generalmente son más frágiles, para Anderson et al. (1994) son un efecto de primer orden para generar anisotropía en rocas.

Entre los atributos sísmicamente relevantes, la apertura de fractura puede determinar la extensión del acoplamiento mecánica a través de las fracturas, la orientación de la fractura puede controlar la dirección de la velocidad, y la abundancia y tamaño de fracturas puede controlar la magnitud de la firma sísmica (Marrett et al., 2007). Además las zonas de meteorización y alteración, y las propiedades de las discontinuidades como (rugosidad, material de relleno, presencia de agua, entre otras) tienen una importante influencia en la velocidad de ondas (Kahraman, 2002).

El material de relleno puede aumentar o reducir la velocidad de propagación de ondas sísmicas, puesto que el relleno puede ser más denso principalmente cuando su origen es por la precipitación de minerales solubles mediante la formación de cristales (ej. cuarzo y calcita) o bien ser menos densos cuando son solo sedimentos acumulados (ej. arcillo y limo).

La presencia de discontinuidades como fracturas, planos de estratificación, foliación y fallas representan un mecanismo anisótropo a diferentes escalas, es inevitable que la presencia misma de una discontinuidad sea una causa automática de deformación y especialmente de resistencia anisótropa (Barton y Quadros, 2014).

3.1.4. Factor escala

La anisotropía puede encontrarse a diferentes escalas en un medio geológico ya sea en un macizo rocoso o en un suelo. La escala es un punto que debe estar en consideración en cualquier evaluación de anisotropía, la cual dependerá de las necesidades relativas del proyecto. La Fig. 3.10 intenta ilustrar la enorme diferencia que puede existir al evaluar la anisotropía a diferentes escalas, considerando un macizo rocoso con un único conjunto de fracturas en una dirección con separación aproximada de un pie (30cm), en el cual se realizan dos perforaciones, en el primer caso resulta ser un material isotrópico y discontinuo ya que la perforación tiene un diámetro relativamente pequeño y no se presentan las discontinuidades. Ahora bien en el segundo caso resulta ser un material anisótropo y discontinuo, pues la

apertura de la perforación es suficientemente grande como para apreciar el patrón de fracturamiento, el cual genera anisotropía.

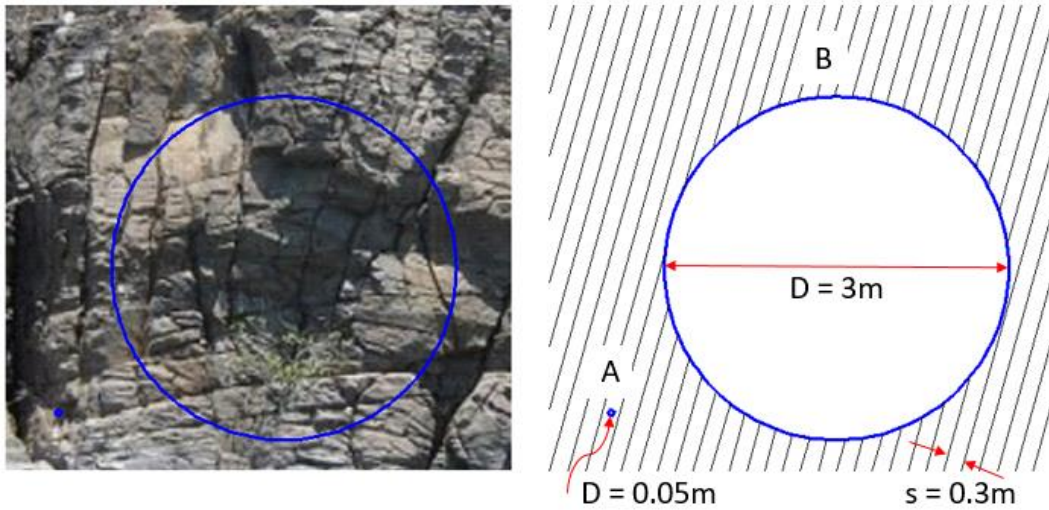


Fig. 3.10 Influencia del factor escala en la evaluación de anisotropía de un macizo rocoso.
Modificado de: (Amadei, 1996).

No se debe olvidar en ningún momento el conocimiento de las escalas medidas, pues estas pueden acarrear un error enorme. La anisotropía puede evaluarse clasificándola en tres escalas: microscópica (escala de laboratorio), mesoscópica (local) y macroscópica (regional).

3.2. Petrofísica y sus aportaciones

La petrofísica conjuga conocimientos de geofísica, geología e ingeniería del petróleo, la cual, por su gran importancia económica en la sociedad desde hace ya varias décadas, tiene grandes aportes al conocimiento de la anisotropía sísmica en medios geológicos. La petrofísica se encarga de estudiar la relación entre fluidos y su movimiento a través de medios porosos. A continuación se desarrollan algunos subtemas importantes en esta investigación, los cuales son aportes destacados de la petrofísica.

Para esto, se define la anisotropía sísmica como la variación de la velocidad de ondas sísmicas según la dirección de propagación (Thomsen, 2002).

Barla (1974) clasificó la anisotropía de las rocas en dos clases dependiendo de la visibilidad aparente de dicha propiedad, incluyendo en la clase "A", a aquellos materiales que aparentemente son isotrópicos y en la clase "B", a aquellos que la anisotropía es evidente como en rocas metamórficas foliadas o macizos rocosos fracturados. La mayoría de los métodos de caracterización anisotrópica, requieren a priori un conocimiento de los planos de simetría a través de la observación previa, por lo tanto es un reto evaluar la anisotropía cuando no es visible (Yun et al., 2013).

3.2.1. Tipos de anisotropía

La anisotropía sísmica puede ser clasificada en tres grupos desde el punto de vista geométrico (por el número de planos de simetría) dependiendo de las características observadas, con el fin de simplificar el análisis y reducir las constantes elásticas necesarias para caracterizar el medio, ya que en un medio anisótropo son 21 las constantes elásticas independientes (Quintero Valero, 2008): Isotropía transversal, anisotropía ortorrómbica y monoclinica, las cuales serán descritas a continuación.

3.2.1.1. Isotropía transversal (TI)

Es el más comúnmente utilizado por ser el más sencillo pues solo tiene un eje de simetría. Puede ser dividido en dos subgrupos por la orientación del eje: anisotropía polar o isotropía transversal con eje de simetría vertical (VTI) y la anisotropía azimutal o isotropía transversal con eje de simetría horizontal (HTI), incluso algunos investigadores consideran como un tercer subgrupo la isotropía transversal con eje de simetría inclinado.

La Fig. 3.11 esquematiza esta clasificación, en la cual puede notarse que la anisotropía polar se asemeja con una secuencia de estratos por lo que generalmente es utilizada para representar rocas sedimentarias o depósitos de sedimentos horizontales, en lo que respecta a la anisotropía azimutal se utiliza para representar macizos rocosos con fracturamiento vertical,

por último, el tercer subgrupo se emplea para representar macizos rocosos con fracturamiento o planos de estratificación inclinados y paralelos entre sí. De manera que únicamente cinco constantes elásticas son necesarias para caracterizar el medio.

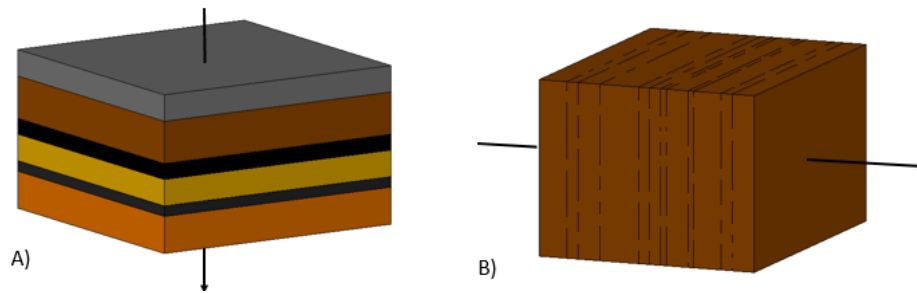


Fig. 3.11 Esquema de isotropía transversal A) Vertical, B) Horizontal.

Independientemente de la subdivisión anterior, puede existir la denominada anisotropía elíptica, generalmente cerca de los planos de simetría, ocurre cuando al propagarse la onda existe un frente de onda elíptico. La forma del frente de onda depende de la velocidad de fase y de grupo, en un medio isótropo dichas velocidades son equivalentes, mientras que en un medio anisótropo ocurre la dispersión (la velocidad varía con respecto a la frecuencia) generando que existan diferencias entre las velocidades de fase y grupo, es por ello que en ocasiones se utiliza el término elipse de anisotropía (Quintero Valero, 2008). La Fig. 3.12 ilustra el esquema en ambos casos.

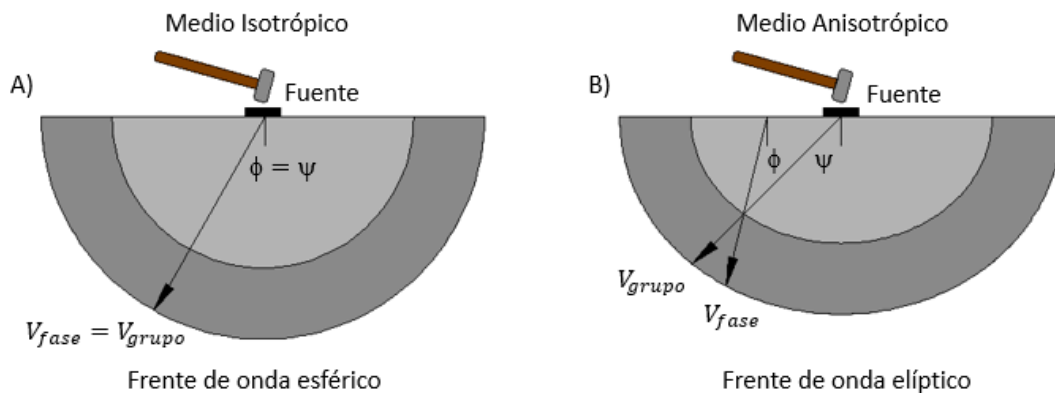


Fig. 3.12 Esquema de un frente de onda A) Esférico, B) Elíptico.

Modificado de: (Quintero Valero, 2008).

3.2.1.2. Anisotropía ortorrómbica (ORT)

Contiene dos planos de simetría perpendiculares entre sí, generalmente representa una secuencia de estratos horizontales con un sistema de fracturamiento vertical, o bien, dos sistemas de fracturamiento mutuamente perpendiculares, como se observa en la Fig. 3.13. Este tipo de medio puede ser caracterizado con nueve constantes elásticas en total.

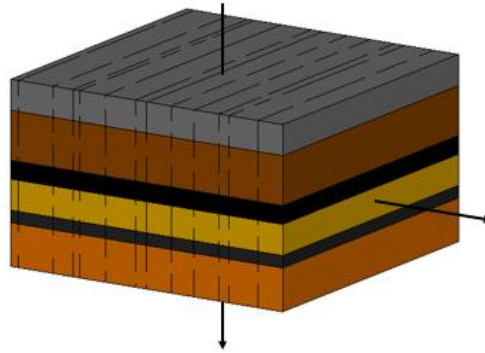


Fig. 3.13 Esquema de anisotropía ortorrómbica.

3.2.1.3. Anisotropía monoclinica (MNC)

Representa dos sistemas de fracturamiento verticales no perpendiculares entre sí, contiene un único plano de simetría horizontal, la Fig. 3.14 lo esquematiza. Son necesarias 12 constantes elásticas para caracterizar este tipo de medios. Al igual que en la anisotropía ortorrómbica no existe una expresión analítica para las expresiones de velocidad de fase y grupo.

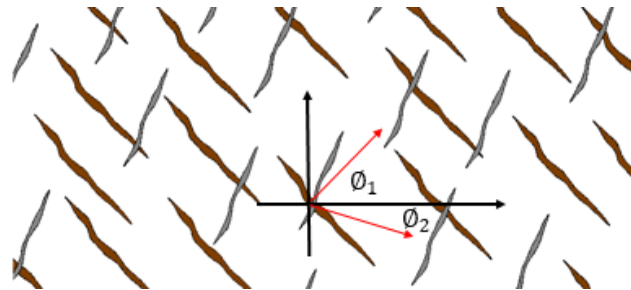


Fig. 3.14 Esquema de anisotropía monoclinica.

3.2.2. Técnicas azimutales y modelos anisotrópicos para medios fracturados

Actualmente existen gran variedad de técnicas azimutales sísmicas de superficie que estiman la anisotropía, algunas de ellas basadas en el tiempo de tránsito y algunas otras basadas en la amplitud de onda. Las cuales utilizan algún modelo de un medio anisotrópico, los modelos abarcan un gran rango de materiales tales como sólidos agrietados, medios porosos y materiales compuestos (Pachano Peláez, 2008). Los métodos más comúnmente conocidos son: Modelo de Thomsen de capas verticales, modelo de la teoría del desplazamiento lineal y el Modelo de grietas elipsoidales de Hudson (Delbecq et al., 2013).

Generalmente se utilizan como parámetros de salida los denominados parámetros de Thomsen, los cuales determinan de manera numérica la anisotropía de la velocidad de ondas de compresión y corte del modelo, sin embargo, es necesario comprender algunas consideraciones generales antes de definirlos.

3.2.3. Consideraciones generales para medios fracturados

Partiendo de los conceptos mencionados en el capítulo 2, el tensor de constantes elásticas (de cuarto orden) C_{ijkl} (presente en la definición de la ley de Hooke) está compuesto por 81 constantes elásticas, sin embargo ya que no son independientes entre sí, son reducidas a 36 por la simetría de esfuerzos ($\sigma_{ij} = \sigma_{ji}$) y deformaciones ($\varepsilon_{kl} = \varepsilon_{lk}$), ahora bien se permite que $C_{ijkl} = C_{klij}$ ya que no existe transferencia de calor, y de esta manera reducir a 21 constantes elásticas, las cuales son las requeridas para describir un medio anisotrópico (Cortes Gómez, 2012). Además con la notación de Voigt:

$$\begin{array}{cccccccc}
 ij & kl & : & 11 & 22 & 33 & 32=23 & 31=13 & 12=21 \\
 \downarrow & \downarrow & & \downarrow & \downarrow & \downarrow & \downarrow & \downarrow & \downarrow \\
 \alpha & \beta & & 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6
 \end{array} \quad (3.6)$$

Puede representarse de manera más compacta como una matriz de 6 x 6 ($C_{\alpha\beta}$), obteniendo para un medio isotrópico la expresión siguiente:

$$C_{\alpha\beta} = \begin{bmatrix} C_{33} & (C_{33} - 2C_{44}) & (C_{33} - 2C_{44}) & & & \\ & C_{33} & (C_{33} - 2C_{44}) & & & \\ & & C_{33} & & & \\ & & & C_{44} & & \\ & & & & C_{44} & \\ & & & & & C_{44} \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

Estos términos están relacionados con las constantes de Lamé con las igualdades:

$$C_{33} = \lambda + 2\mu = K + (4/3)\mu \quad (3.8)$$

$$C_{44} = \mu \quad (3.9)$$

Ahora bien considerando la forma más simple de anisotropía (isotropía transversal con el eje de simetría en cualquier dirección) y utilizando simetría en sus términos $C_{11} \rightarrow C_{33}$, $C_{66} \rightarrow C_{44}$, $C_{13} \rightarrow (C_{33} - 2C_{44})$ la matriz $C_{\alpha\beta}$ se expresa como:

$$C_{\alpha\beta} = \begin{bmatrix} C_{11} & (C_{11} - 2C_{66}) & C_{13} & & & \\ & C_{11} & C_{13} & & & \\ & & C_{33} & & & \\ & & & C_{44} & & \\ & & & & C_{44} & \\ & & & & & C_{66} \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

En la que se denotan únicamente cinco componentes independientes.

3.2.4. Parámetros de Thomsen, velocidades y desplazamientos

Es bastante útil emplear una notación en la que participen solo dos módulos elásticos o equivalentemente las velocidades de onda P y de onda S, más tres parámetros de anisotropía, los cuales son combinaciones adecuadas de los módulos elásticos, para así simplificar las ecuaciones que dan la solución, además son adimensionales (%) y en caso de isotropía se reducen a cero, por lo que materiales con valores menores a uno son considerados débilmente anisotrópicos (Thomsen, 1986).

Los denominados parámetros de Thomsen de acuerdo a las consideraciones anteriores, se definen en términos tensoriales como:

$$\varepsilon \equiv \frac{C_{11} - C_{33}}{2C_{33}} \quad (3.11)$$

$$\gamma \equiv \frac{C_{66} - C_{44}}{2C_{44}} \quad (3.12)$$

$$\delta \equiv \frac{(C_{13} + C_{44})^2 - (C_{33} - C_{44})^2}{2C_{33}(C_{33} - C_{44})} \quad (3.13)$$

La velocidad de onda P en dirección del eje de simetría es definida como:

$$\alpha_0 = \sqrt{\frac{C_{33}}{\rho}} \quad (3.14)$$

Y la velocidad de onda S como:

$$\beta_0 = \sqrt{\frac{C_{44}}{\rho}} \quad (3.15)$$

Donde ρ es la densidad del material. Nótese que estas expresiones son equivalentes a las ecuaciones (2.12) y (2.13). Sin embargo considerando mediciones de velocidad de ondas en un rango de 90 grados en el mismo plano, de las ecuaciones anteriores podemos obtener expresiones simples y prácticas como son (Kelter, 2005):

$$\varepsilon = \frac{V_p(90^\circ) - V_p(0^\circ)}{V_p(0^\circ)} \quad (3.16)$$

$$\gamma = \frac{V_s(90^\circ) - V_s(0^\circ)}{V_s(0^\circ)} \quad (3.17)$$

$$\delta = 4 \left[\frac{V_p(45^\circ)}{V_p(0^\circ)} - 1 \right] - \left[\frac{V_p(90^\circ)}{V_p(0^\circ)} - 1 \right] \quad (3.18)$$

Donde $V_p(90^\circ)$ y $V_s(90^\circ)$ son las velocidades de onda (P y S respectivamente) a lo largo de la foliación, $V_p(0^\circ)$ y $V_s(0^\circ)$ son las velocidades de onda que se propagan a través de la foliación y $V_p(45^\circ)$ es la velocidad de la onda P en una dirección intermedia a las anteriores.

Los primeros dos parámetros (ϵ, γ) son una medida diferencial fraccional de la velocidad de ondas ortogonales y representan la anisotropía de la onda P y onda S respectivamente, si la velocidad en dirección del eje de simetría es mayor se obtendrán valores negativos. El tercer parámetro δ es más difícil de comprender, está determinado por la forma del frente de onda P y generalmente es considerado parámetro de elipticidad.

Además se puede obtener otro parámetro simple, el porcentaje de anisotropía, el cual se define como:

$$\% = \frac{V_p(90^\circ) - V_p(0^\circ)}{V_{prom}} (100) \quad (3.19)$$

Donde V_{prom} el promedio de las velocidades medidas. De manera similar a los primeros dos parámetros, un valor positivo indica que la velocidad a lo largo de la foliación es mayor, de lo contrario será menor que la velocidad a través de la foliación.

Algunos autores dan por hecho que la velocidad a lo largo de la foliación es mayor o bien cuando no es evidente ningún patrón y manejan las expresiones anteriores en términos de las velocidades máxima V_{max} y mínima V_{min} medidas.

3.2.5. Compactación dependiente de la orientación de grano

La compactación por presión de sobrecarga puede causar la rotación de los granos y la deshidratación de lodos (Anderson et al., 1994).

Mientras que el incremento en el esfuerzo promedio induce la reducción de volumen, disminución de porosidad y al aumento de la cantidad de contactos entre partículas, el incremento de esfuerzo desviador causa anisotropía en la distribución de los contactos. Dichas variaciones en la distribución, pueden restringir el eje de rotación que eventualmente lleve a la rotación o trabazón de los granos. En general, la probabilidad de trabazón aumenta cuando aumenta el empaquetamiento, es decir, con la densificación del material (reducción de relación de vacíos (Santamarina, 2004). La Fig. 3.15 esquematiza lo anterior suponiendo granos esféricos uniformes y relaciones de vacíos distintas.

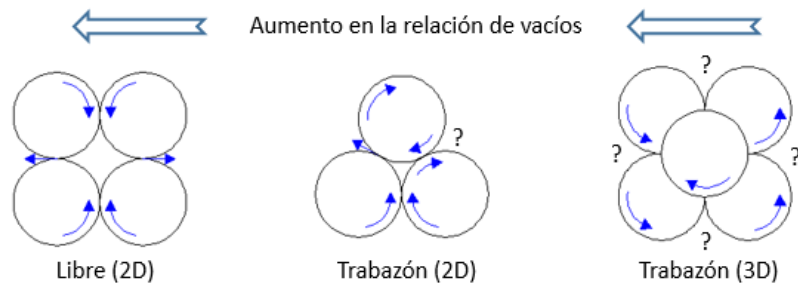


Fig. 3.15 Esquema de trabazón rotacional de partículas en 2D y 3D.
Modificado de: (Santamarina, 2004).

Si bien este concepto se ilustra con partículas esféricas uniformes y del mismo tamaño, la trabazón de la rotación se ve directamente afectada por el tamaño relativo de las partículas vecinas, por la capacidad de densificarse y por la forma de la partícula y sus características (esfericidad, redondez, rugosidad, etc.). Los contactos normales durante un esfuerzo anisótropo se orientan preferentemente en la dirección del esfuerzo principal de acuerdo con las observaciones anteriores (Santamarina, 2004).

3.2.6. Evaluación de la densidad - profundidad y presión de confinamiento

La relación entre la velocidad sísmica y la densidad tiene implicaciones importantes para los estudios geofísicos multidisciplinarios (Christensen and Stanley, 2003), y en rocas es usualmente considerada como lineal expresado de manera simple con la ecuación:

$$V = V_0 + kz \quad (3.20)$$

Donde V_0 es la velocidad en un plano horizontal, z es la profundidad y k es una constante la cual generalmente oscila entre 0.3 y 1.3 por segundo. El tiempo de tránsito de las ondas al propagarse depende de la densidad de los minerales que conforman el material, lo cual incluye la posibilidad de un arreglo anisotrópico (Gaviglio, 1989).

La reducción de la relación de vacíos, es decir, la reducción del tamaño de los poros incrementa la continuidad del material, por lo tanto su densidad, este cambio en la textura es una consecuencia habitual de la presión de confinamiento y es relacionada con la profundidad.

La presión de confinamiento incrementa la velocidad de propagación de las ondas pues como se mencionó anteriormente incrementa la continuidad del material (reduciendo tamaño de poros y cerrando microfisuras), como consecuencia a bajas presiones de confinamiento, las microfisuras orientadas contribuyen en gran parte a la dependencia direccional de las velocidades de onda (valores mayores de anisotropía) (Kern et al., 2008).

El irreversible cambio de la porosidad (y consecuentemente la velocidad) con la presión de confinamiento se ha utilizado para determinar la profundidad máxima. Si la relación velocidad-profundidad para una litología dada se puede establecer, entonces la profundidad máxima puede ser determinada a partir de la observada relación entre velocidad-profundidad (Telford et al., 1990).

3.2.7. Evaluación de la porosidad por medio de la velocidad de ondas sísmicas

Foti et al. (2002) propusieron un procedimiento para evaluar la porosidad de medios porosos por medio de la medición de las velocidades de propagación de ondas sísmicas, basado en la teoría de Biot.

Maurice Biot (1956a; 1956b) dedujo la ecuación de onda en un medio poroso saturado, aplicando la teoría del medio continuo y proponiendo condiciones de frontera iniciales, analizando las ecuaciones de onda para medios porosos, y reveló las características de las ondas elásticas al propagarse por un medio poroso (depósito de areniscas). Predijo la existencia de dos tipos de ondas de compresión y probó su existencia en ensayos de laboratorio. El segundo tipo de onda de compresión es conocido como onda de Biot y es extremadamente difícil de observar experimentalmente ya que es más lenta que el primer tipo. Considerando la escala de tiempo de la propagación de onda y la permeabilidad en suelos, supuso que no existe movimiento relativo entre las fases sólida y fluida, la cual únicamente se mantiene para un rango de frecuencias bajas (Santamarina et al., 2001). La Tabla 3.2 presenta las frecuencias características para valores típicos de porosidad y permeabilidad en diferentes tipos de geomateriales.

Tabla 3.2 Frecuencias características para valores típicos de porosidad y permeabilidad.

Parámetro	Arena suelta	Arena densa	Limo	Arcilla NC	Arcilla OC	Grava	Roca blanda
n	0.454	0.394	0.515	0.543	0.429	0.448	0.315
k (m/s)	1.0×10^{-4}	1.0×10^{-5}	1.0×10^{-6}	1.0×10^{-8}	1.0×10^{-9}	1.0×10^{-2}	1.0×10^{-7}
ω_c (rad/s)	4.45×10^4	3.86×10^5	5.05×10^6	5.33×10^8	4.21×10^9	4.39×10^2	3.09×10^7
f_c (Hz)	7.09×10^3	6.15×10^4	8.04×10^5	8.48×10^7	6.70×10^8	6.99×10^1	4.92×10^6

Modificado de: (Foti et al., 2002).

De la tabla anterior ω_c es la frecuencia angular y f_c es la frecuencia crítica, es decir, valores por encima del mostrado son considerados alta frecuencia, y estos valores dependen del tipo de flujo, tamaño, forma y fábrica de los granos, que conforman el medio poroso.

Introduciendo una hipótesis adicional en la que se consideran las partículas de suelo como incompresibles, es posible obtener la relación de porosidad n , como (Foti et al., 2002):

$$n = \frac{\rho^S - \sqrt{(\rho^S)^2 - \left\{ \frac{4(\rho^S - \rho^F)K^F}{\left[\frac{V_p^2 - 2(1 - \nu^{SK})}{(1 - 2\nu^{SK})V_s^2} \right]} \right\}}}{2(\rho^S - \rho^F)} \quad (3.21)$$

donde V_p y V_s son las velocidades de propagación de las ondas de compresión y corte respectivamente, ρ^S es la densidad de los granos del suelo (sólido), ρ^F es la densidad del agua (fluido), K^F es el módulo de Bulk del agua, y ν^{SK} es la relación de Poisson y está limitada a un rango de 0.1 a 0.4 para suelos.

Para validar la expresión anterior, se realizaron mediciones de velocidad de onda con “bender elements” y cristales piezoeléctricos, posteriormente Foti and Lancellotta (2004) utilizaron mediciones sísmicas en pozos, y numerosos investigadores emplearon dichos avances en sus trabajos.

3.3. Discontinuidades en sedimentos

3.3.1. Grietas y fallas en sedimentos

El fracturamiento consiste en la pérdida de continuidad entre dos partes de un cuerpo, implica la generación de una grieta y su propagación hasta que se presente la falla general o que se alcance el estado de equilibrio (Auvinet y Arias, 1991).

3.3.1.1. Modos de agrietamiento

Es bien conocido que existen tres modos básicos de agrietamiento, la Fig. 3.16 presenta los esquemas de dichos modos.

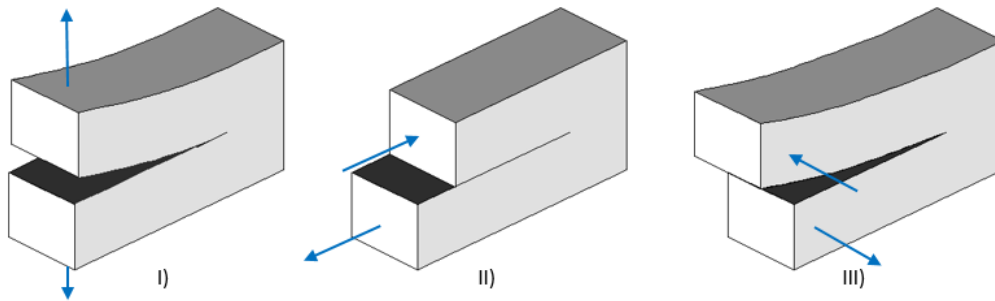


Fig. 3.16 Modos de agrietamiento.

- Modo I: El agrietamiento se genera por tensión. El desplazamiento relativo es perpendicular a la superficie de fractura. Se presenta una abertura simétrica.
- Modo II: El agrietamiento se genera por cortante. Las caras de la grieta se deslizan una sobre la otra con un movimiento relativo tangencial, generando una separación asimétrica.
- Modo III: El agrietamiento se genera por torsión. La separación es asimétrica con desplazamientos tangenciales, deslizando las superficies de las grietas una sobre la otra en dirección perpendicular al vértice.

En un material homogéneo, el agrietamiento de manera general puede describirse por alguno de estos tres modos o bien por un cuarto modo considerando alguna combinación de ellos.

3.3.1.2. Teorías de falla

En la mecánica de suelos se han estudiado las condiciones de esfuerzo límite que producen la falla de los suelos por fractura o flujo plástico (Juárez Badillo y Rico Rodríguez, 2005a). Existen varios criterios o teorías que buscan predecir las condiciones en las que se producirá agrietamiento o la falla misma, las más comúnmente citadas se describen brevemente a continuación:

- Teoría de Rankine (teoría del esfuerzo máximo)

Supone que la falla tiene lugar cuando el mayor de los esfuerzos principales alcanza un valor límite, el cual puede ser el punto de fluencia o el esfuerzo último, según las características del material.

- Teoría de Saint Venant (teoría de la deformación unitaria máxima)

Supone que la falla está determinada por la máxima deformación unitaria elástica, al ser sometida a esfuerzos de tensión o compresión.

- Teoría del máximo esfuerzo cortante

Atribuye que la falla tiene lugar cuando el esfuerzo cortante llega a su máximo. Se desprenden algunas variantes como lo son: la teoría de Guest (supone que el esfuerzo cortante límite es una constante del material), la teoría de Coulomb (propone que existe una ley de variación lineal entre el esfuerzo cortante y el esfuerzo normal actuante en el plano de falla) y la teoría de Mohr (expone que la ley de variación entre los esfuerzos no es lineal sino una curva). De estas dos últimas teorías se generalizó el criterio de Mohr-Coulomb, el cual es el que se utiliza comúnmente en la mecánica de suelos convencional.

- Teoría de Griffith

Supone que el material genera un gran número de grietas pequeñas orientadas (microfisuras) y que la falla se presenta cuando el esfuerzo mayor en la fisura más grande y de orientación más desfavorable alcanza un valor crítico. Ciertos criterios de propagación de grietas y estados de esfuerzos se basan en esta teoría.

3.3.2. Mecanismos de agrietamiento (grietas de tensión)

3.3.2.1. Juárez Badillo

Juárez Badillo (1959) propuso un mecanismo de grietas de tensión con base en que en terrenos arcillosos planos de gran extensión y profundidad, expuestos a fuerte evaporación superficial y a inundación superficial con láminas pequeñas, es frecuente la aparición de grietas de gran longitud y profundidad. Observo que las grietas aparecen cuando las lluvias comienzan a formar una delgada película de agua y que el fenómeno es cíclico y ocurre con mayor intensidad en cada periodo. La primera explicación racional sobre la formación y desarrollo de estas grietas es debida a N. Carrillo, posteriormente Juárez Badillo realizó su planteamiento matemático y algunas modificaciones substanciales (Juárez Badillo y Rico Rodríguez, 2005b).

De manera que considero un primer periodo de evaporación superficial en un suelo arcilloso suponiendo únicamente deformación unidimensional, posteriormente se anula la tensión capilar en el agua intersticial, al formarse una lámina de agua en la superficie de la arcilla por un proceso de lluvia o similar, así pues, la situación final es: la generación de

esfuerzos efectivos horizontales generando grietas al sobrepasar la resistencia del suelo. Una vez iniciada la grieta, se propagara en longitud y profundidad, y puede llegar a ser más profunda que el nivel freático.

3.3.2.2. Hunt – Alvarez Manilla

Hunt (1984) y Alvarez Manilla Aceves et al. (2001) exponen las fases de deformación que sufren los suelos en valles debido a la desmesurada extracción de agua subterránea, definiendo tres fases: fase 1) Hundimiento por abatimiento del nivel del agua; fase 2) generación de grietas; y fase 3) crecimiento de fallas.

La extracción de agua en importantes cantidades ocasiona la reducción de la presión de poro y el incremento del esfuerzo efectivo, basados en el principio de Arquímedes y ley de esfuerzos efectivos de Terzaghi, la magnitud del hundimiento es función del espesor drenado, tipo de materiales y sus propiedades mecánicas. En estratos de arenas, el hundimiento es inmediato, mientras que para limos y arcillas es un proceso lento dependiente de su permeabilidad.

El proceso de deformación se esquematiza en la Fig. 3.17. Donde se considera una formación acuífera sobre yaciendo en un basamento irregular impermeable, con el nivel estático en la superficie en un tiempo t_0 , posteriormente en un tiempo t_1 se inicia la extracción, lo cual causa que cambie el nivel estático, sin embargo aún es recuperable por la recarga natural de aguas pluviales. Al aumentar la extracción en un tiempo t_2 , se quebranta el equilibrio y la extracción excede a la recarga, generando un abatimiento (s) que a su vez ocasiona la primera fase de deformación (hundimiento) al comprimirse los poros rellenos de aire en un tiempo t_3 . En un tiempo t_4 se presenta la segunda fase generando grietas de tensión puesto que los suelos y las rocas son débiles ante los esfuerzos de tensión. Si la extracción continua excediendo la recarga, las grietas se propagan, haciéndose presente el crecimiento de fallas expuesto en la fase 3, posteriormente estas grietas generalmente se azolvan de manera natural.

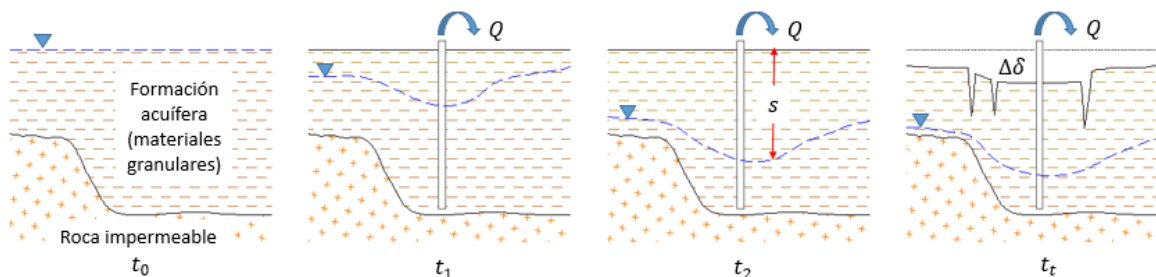


Fig. 3.17 Esquema de las fases de deformación por la sobreexplotación de agua.
Modificado de: (Alvarez Manilla Aceves et al., 2001).

3.3.2.3. Santamarina - Shin

Santamarina y Shin (2009) presentaron un mecanismo hipotético de la iniciación y desarrollo de grietas de desecación, enfocado en la membrana de interface (aire-agua). El esfuerzo efectivo dependiente, las fuerzas de capilaridad y las fuerzas de filtración y arrete interactúan en los defectos de superficie de un suelo o en los grandes poros cercanos a superficie y dan lugar a mecanismos de retroalimentación positiva que promueven la iniciación y propagación de la fractura, el desplazamiento de las partículas alrededor de los poros mayores agranda los poros en la punta y facilitan el agrietamiento.

La secuencia de eventos propuestos se esquematiza en la Fig. 3.18, y se describe a continuación: A) La superficie del agua se encuentra por encima de la superficie de los sedimentos y se evapora libremente y la presión de poro es positiva en cualquier punto. B) Eventualmente el nivel de agua alcanza la superficie de los sedimentos, en ese instante la presión de poro en la superficie es cero. C) La membrana rodea la superficie de los granos, el esfuerzo efectivo aumenta y el suelo sufre un asentamiento vertical equivalente a la cantidad de agua evaporada. D) El aumento de rigidez en la estructura del suelo dificulta la consolidación, la membrana rodea poros más grandes. E) Las partículas del suelo se desplazan lejos de la membrana, el tamaño de los poros se incrementa, y la invasión de la membrana favorece la iniciación de las grietas.

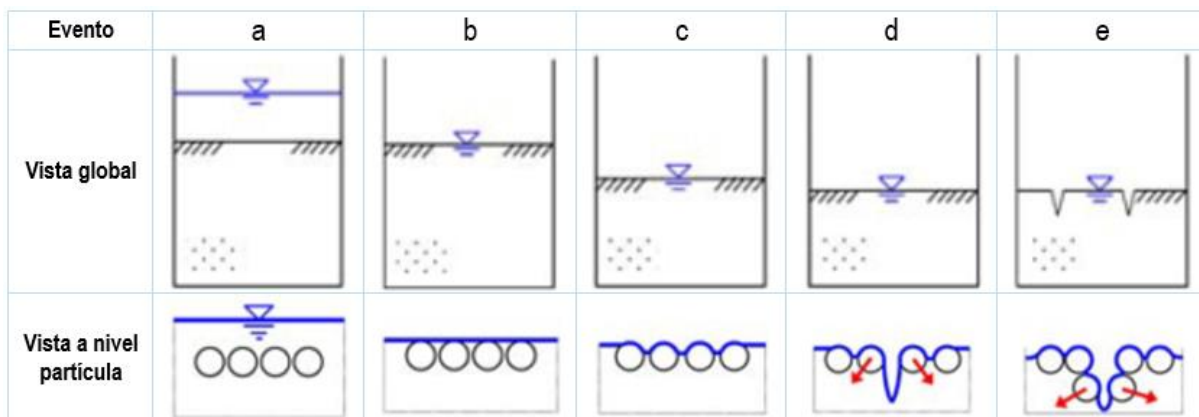


Fig. 3.18 Esquema de las etapas del mecanismo de agrietamiento a escala global y de partícula. Modificado de: (Santamarina y Shin, 2009).



Capítulo 4

4. Modelo de un sólido elástico isotrópico y propagación de ondas

4.1. Propagación de ondas planas

En general la propagación de ondas sísmicas está controlada por las mismas leyes que la propagación de los rayos de luz, basada en la ley de refracción de Snell y el principio de Fermat. Las ondas son refractadas y reflejadas en cualquier interface en la cual exista un cambio de velocidad, por lo que una desviación en su trayectoria normal es observada cuando existen medios con diferentes velocidades. Cuando se ha determinado la variación del tiempo de viaje con la distancia, la profundidad y la naturaleza del medio en la que se refractan las ondas pueden ser deducidas de las curvas trayectoria-tiempo (Heiland, 1963).

4.1.1. Ondas planas en medios isotrópicos y anisotrópicos

En la curva trayectoria-tiempo, los tiempos de viaje se representan frente a las distancias de los receptores (geófonos) desde el punto de disparo (fuente). La figura tal muestra el esquema de un medio isotrópico, homogéneo y su respectiva curva trayectoria-tiempo.

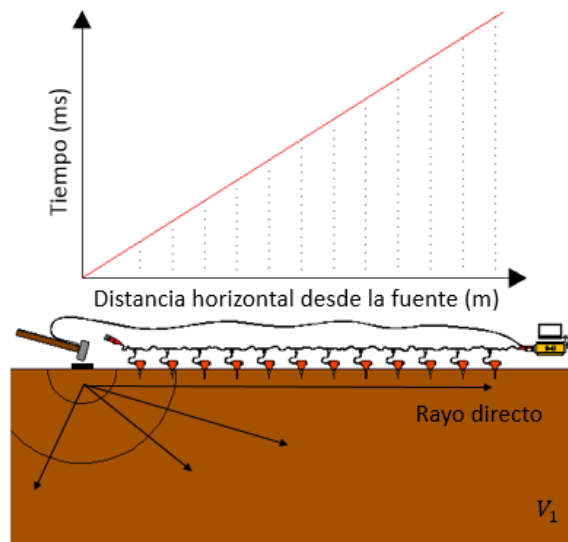


Fig. 4.1 Esquema de la propagación de ondas en un medio isotrópico y su curva trayectoria-tiempo. Modificado de: (Burger, 1992).

Nótese que al ser un medio isotrópico las únicas ondas que perciben los receptores son los rayos directos, de manera que la curva trayectoria tiempo únicamente es una línea recta inclinada, sabiendo que el la velocidad es distancia sobre tiempo, entonces:

$$t = \frac{x}{V_1} \quad (4.1)$$

Derivando respecto a x la expresión anterior obtenemos:

$$\frac{dt}{dx} = \frac{1}{V_1} \quad (4.2)$$

Por lo que la pendiente de la recta será inversamente proporcional a la velocidad del medio.

4.1.1.1. Ondas planas en un medio isotrópico transversal

Para un análisis inicial, considérese un medio isotrópico transversal básico que consta de dos materiales homogéneos (con propiedades distintas) descansando en capas horizontales como se muestra en el diagrama de la Fig. 4.2.

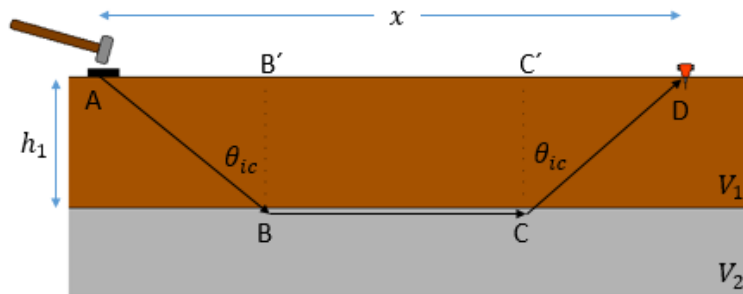


Fig. 4.2 Diagrama con simbología para el cálculo del tiempo de tránsito en un medio isotrópico transversal.

Modificado de: (Burger, 1992).

Por lo que el tiempo de tránsito total será:

$$t = \frac{AB}{V_1} + \frac{BC}{V_2} + \frac{CD}{V_1} \quad (4.3)$$

Ya que existe simetría, $AB = CD$ y $AB' = C'D$, además

$$\cos \theta_{ic} = \frac{h_1}{AB} \quad (4.4)$$

$$\tan \theta_{ic} = \frac{AB'}{h_1} \quad (4.5)$$

$$BC = x - 2(h_1 \tan \theta_{ic}) \quad (4.6)$$

Por lo tanto

$$t = \frac{h_1}{V_1 \cos \theta_{ic}} + \frac{x - 2(h_1 \tan \theta_{ic})}{V_2} + \frac{h_1}{V_1 \cos \theta_{ic}} \quad (4.7)$$

La ecuación tal es la fórmula básica para determinar el tiempo de tránsito para un rayo crítico refractado en una interfaz sencilla que cumple la condición ($V_2 > V_1$). Sin embargo reorganizando términos y utilizando identidades trigonométricas podemos reducirla a la expresión siguiente:

$$t = \frac{2h_1(V_2^2 - V_1^2)^{1/2}}{V_2V_1} + \frac{x}{V_2} \quad (4.8)$$

Derivando respecto a x la ecuación anterior obtenemos una ecuación similar a la (4.2):

$$\frac{dt}{dx} = \frac{1}{V_2} \quad (4.9)$$

En la Fig. 4.3 se ilustran las líneas rectas correspondientes a cada capa considerada formando la curva trayectoria-tiempo y el esquema general de la propagación, ahora bien la recta de la segunda capa puede extenderse hasta interceptar el eje del tiempo, y se le llama tiempo de intercepto (t_i) en el cual la distancia $x = 0$, esta consideración nos servirá para determinar el espesor de la primera capa.

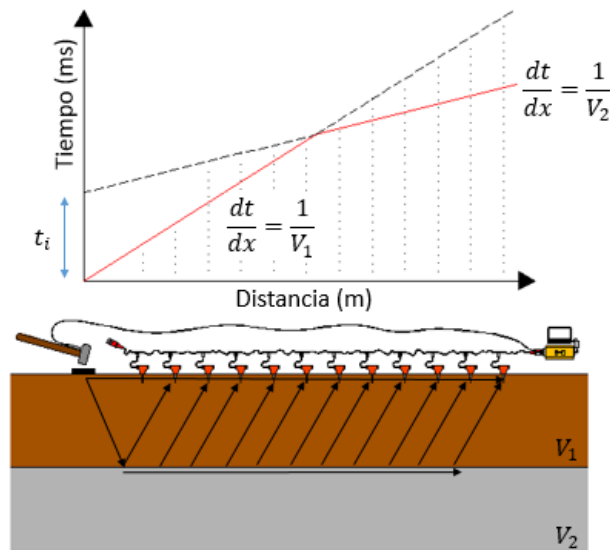


Fig. 4.3 Esquema general y curva trayectoria-tiempo en un medio con interface sencilla (VTI).
Modificado de: (Burger, 1992).

Con la consideración anterior, la ecuación (4.8) se reduce a

$$t_i = \frac{2h_1(V_2^2 - V_1^2)^{1/2}}{V_2V_1} \quad (4.10)$$

De la cual se deduce el espesor con la expresión

$$h_1 = \frac{t_i}{2} \frac{V_2V_1}{(V_2^2 - V_1^2)^{1/2}} \quad (4.11)$$

Entonces para un medio sencillo de dos materiales horizontales, si es posible determinar los tiempos directos y refractados a través de un sismograma, se puede calcular el espesor del material por encima de la interfaz y las velocidades de ambos materiales. Sin

embargo es necesario describir dos términos más, el primero de ellos es la distancia de cruce entre las líneas y también servirá para calcular el espesor h_1 , x_{co} representa la coordenada horizontal de la distancia al cruce, para ello

$$t_d = \frac{x_{co}}{V_1} \quad (4.12)$$

$$t_r = \frac{2h(V_2^2 - V_1^2)^{1/2}}{V_2V_1} + \frac{x_{co}}{V_2} \quad (4.13)$$

Donde t_d y t_r son los tiempos de arribo de la onda directa y la onda refractada respectivamente y su valor es el mismo en el punto x_{co} , por lo tanto, al igualar y reordenar términos, simplificar y despejar el espesor h_1 obtenemos:

$$h_1 = \frac{x_{co}}{2} \left[\frac{V_2 - V_1}{V_2 + V_1} \right]^{1/2} \quad (4.14)$$

Es principalmente una cuestión de conveniencia usar t_i o x_{co} , para determinar el espesor de la capa. Sin embargo, debido a la determinación de x_{co} implica ajustar dos líneas, mientras que t_i requiere sólo una línea, por lo general se puede determinar t_i con más precisión.

El segundo término importante es la distancia crítica x_{crit} , y es la distancia mínima de la fuente al primer punto donde la onda es refractada, la Fig. 4.4 esquematiza el concepto.

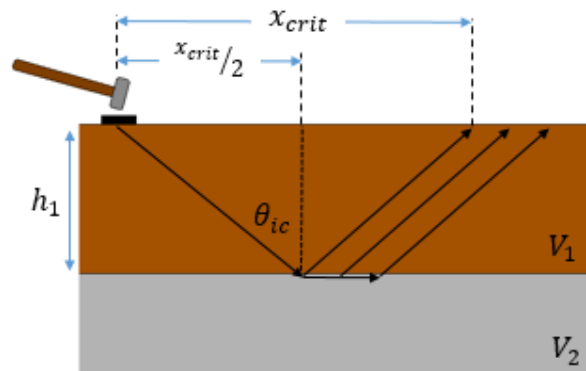


Fig. 4.4 Esquema con simbología y relaciones para calcular la distancia crítica. Modificado de: (Burger, 1992).

De la figura anterior se determina que:

$$\tan \theta_{ic} = \frac{x_{crit}/2}{h_1} \quad (4.15)$$

Ya que $\sin \theta_{ic} = V_1/V_2$, entonces reordenando términos y utilizando identidades trigonométricas obtenemos:

$$x_{crit} = \frac{2h_1}{\left[\left(V_2/V_1\right)^2 - 1\right]^{1/2}} \quad (4.16)$$

De manera análoga al procedimiento mostrado, se pueden deducir las ecuaciones para medios con capas paralelas múltiples.

4.1.1.2. Ondas planas en un medio ortorrómbico

Ahora bien para un análisis en un medio ortorrómbico sencillo, considérese un medio similar al descrito anteriormente pero con la inclusión de un tercer material formando una discontinuidad lateral, el cual puede representar una falla o fractura abierta o bien una veta o un dique como se muestra en el diagrama de la Fig. 4.5.

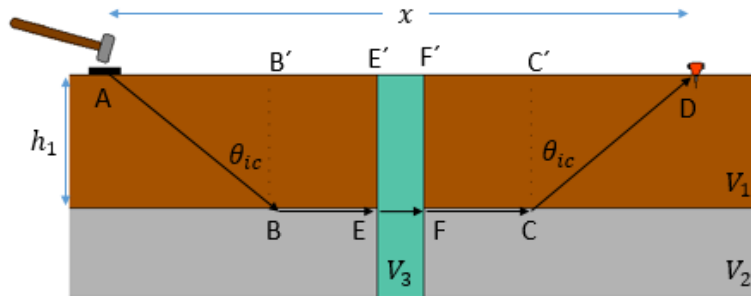


Fig. 4.5 Diagrama con simbología para la derivación del tiempo de tránsito en un medio ortorrómbico.

Por lo que el tiempo de tránsito total ahora será:

$$t = \frac{AB}{V_1} + \frac{BE}{V_2} + \frac{EF}{V_3} + \frac{FC}{V_2} + \frac{CD}{V_1} \quad (4.17)$$

Ya que también existe simetría $AB = CD$, $AB' = C'D$ y $BE = FC$, y las ecuaciones (4.4), (4.5) y (4.6) siguen siendo válidas, además:

$$BC = BE + EF + FC \quad (4.18)$$

$$EF = x_e \quad (4.19)$$

Por lo tanto

$$t = \frac{h_1}{V_1 \cos \theta_{ic}} + \frac{x - 2(h_1 \tan \theta_{ic}) - x_e}{V_2} + \frac{x_e}{V_3} + \frac{h_1}{V_1 \cos \theta_{ic}} \quad (4.20)$$

Al reorganizar términos y utilizando identidades trigonométricas podemos reducirla a la expresión siguiente:

$$t = \frac{2h_1(V_2^2 - V_1^2)^{1/2}}{V_2V_1} + \frac{x_e}{V_3} + \frac{x - x_e}{V_2} \quad (4.21)$$

Derivando respecto a x la ecuación anterior obtenemos una ecuación similar a la (4.2) y (4.9):

$$\frac{dt}{dx} = \frac{1}{V_2} + \frac{1}{V_3} \quad (4.22)$$

La Fig. 4.6 muestra el esquema general para el medio ortorrómbico (ORT) más sencillo, con una interface horizontal sencilla y una discontinuidad vertical.

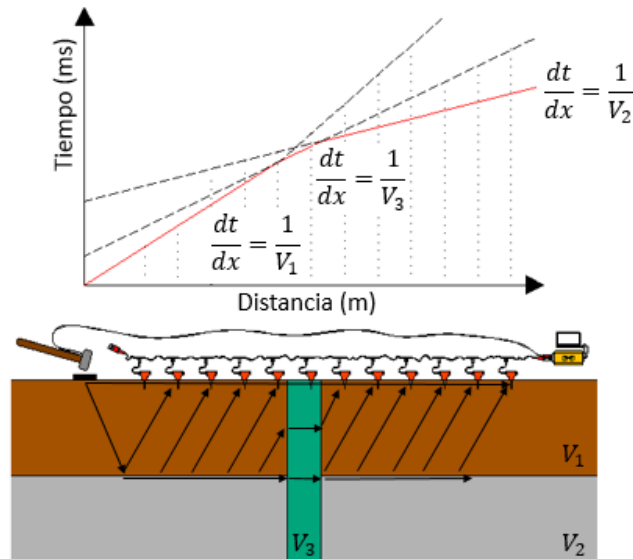


Fig. 4.6 Esquema general y curva trayectoria-tiempo en un medio con ortorrómbico simple (ORT).

De manera análoga se pueden deducir las ecuaciones para obtener el espesor de las capas, tiempo de intercepto, distancia de cruce y distancia crítica, además aumentar las variables para medios con múltiples capas y múltiples discontinuidades verticales.

Sin embargo en la realidad no siempre se presentan medios con planos de simetría, lo que complica los procedimientos de análisis. Pueden existir variaciones como irregularidades en las interfaces, cambios graduales tanto horizontales como laterales, capas con inclinaciones no paralelas, topografía discontinua, entre otras. Lo que resulta en una infinidad de probabilidades de condiciones y resulta impráctico intentar deducirlas, por lo que en esos casos el medio se considera totalmente anisotrópico y el apoyo de software especializado es esencial.

4.2. Sismogramas sintéticos para un medio de rocas cristalinas fracturadas

Un sismograma sintético es aquel generado de manera inversa al obtenido en campo, por medio del espesor, la velocidad de onda de compresión y de corte, y densidad de cada capa del modelo. El cual nos permite observar el comportamiento de la propagación de ondas en un modelo multicapa ideal y diferenciar las ondas en diferentes condiciones que nos ayudan a interpretar los sismogramas reales.

Utilizando el software Modeling Geogiga Seismic Pro 8.0 se generaron sismogramas sintéticos con el objetivo de observar el comportamiento de la propagación de los diferentes tipos de ondas en diferentes condiciones de acuerdo a las características de los modelos empleados como los espesores y características de las capas, además la eliminación del ruido ambiental.

Primeramente se presenta un modelo sencillo de dos capas, la Tabla 4.1 presenta las características del medio, y las Fig. 4.7 y Fig. 4.8 muestran los sismogramas generados para un modelo de dos capas en suelos y rocas blandas respectivamente, con y sin el efecto de divergencia (atenuación de la onda) y modos de vibrar, además se van eliminando tipos de onda conforme se avanza hacia la derecha en las figuras. Los parámetros de adquisición consisten en una serie de 24 geófonos a una distancia de tres metros entre ellos con una distancia entre la fuente y el primer geófono de seis metros.

Tabla 4.1 Características de dos medios de dos capas cada uno ($V_1 < V_2$).

Modelo	Capa	Espesor (m)	V_p (m/s)	V_s (m/s)	ρ (gr/cm ³)
Suelos	1	5 m	250	125	1.1
	2	Indefinido	480	240	1.6
Rocas blandas	1	5 m	540	270	1.8
	2	Indefinido	920	460	2.3

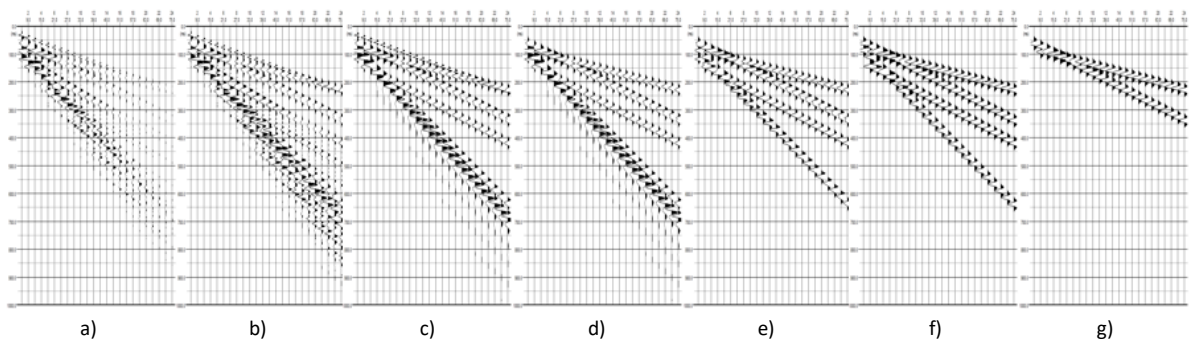


Fig. 4.7 Sismogramas sintéticos de un modelo de dos capas en suelos.

Modificado de: (Zhao, 2012).

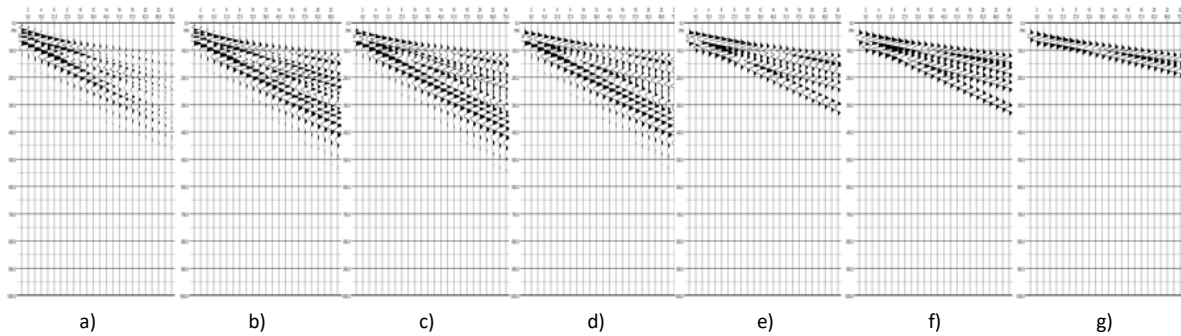


Fig. 4.8 Sismogramas sintéticos de un modelo de dos capas en rocas blandas.
Modificado de: (Zhao, 2012).

Nótese que la Fig. 4.8 presenta el paquete de ondas más compacto, esto se debe simplemente a que las velocidades son más altas, requieren menos tiempo, pero dificulta más su interpretación pues se empalman unas con otras. Ahora obsérvese ambas figuras, haciendo notar que: [1] el primer sismograma representa lo más cercano a un sismograma real, [2] el segundo es el que se presenta en un medio sin pérdida de energía, la herramienta de la normalización en un sismograma real nos genera el proceso inverso, [3] al tercero se le elimino el ruido por lo que se distinguen mucho más fácilmente ciertos patrones de propagación y representa un medio ideal, [4] el cuarto no presenta la onda directa producida por la vibración del aire la cual tiene una velocidad de 343 m/s y puede llegar a enmascarar la onda P en aquellos materiales que tengan velocidades por debajo de esta, [5] al quinto sismograma se le suprimió las ondas de superficie, [6] el sexto no presenta las ondas reflejadas, [7] y el ultimo prescinde de las ondas de corte, por lo que únicamente se observan las ondas de compresión refractadas, definiéndose claramente dos patrones de los cuales se obtiene el espesor y velocidad de cada capa como se describió en el tema anterior.

Ahora en la Fig. 4.9 y en la Fig. 4.10 se presentan los modelos anteriores (suelos y rocas blandas) de las Fig. 4.7b y Fig. 4.8b incluyendo sismogramas con una cantidad de geófonos menor (12) en el inciso b y se reduce la separación entre geófonos a un metro en el inciso c.

La reducción de la cantidad de geófonos y la distancia entre ellos, afecta directamente en la longitud y profundidad de alcance del estudio, pues se reduce considerablemente el tiempo de tránsito, sin embargo también se adquiere precisión, por lo que dependiendo del método sísmico que se emplee y las exigencias del estudio es importante definir estos parámetros.

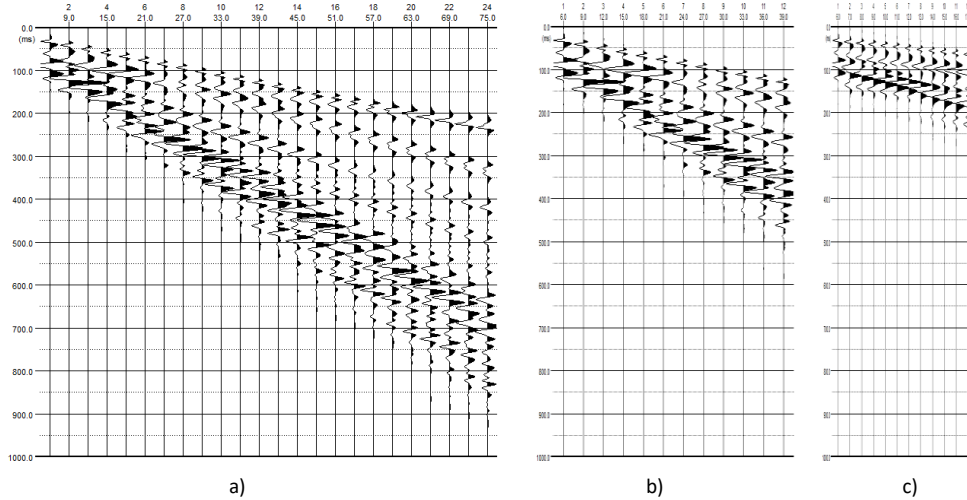


Fig. 4.9 Sismogramas sintéticos de un modelo de dos capas en suelos con diferentes parámetros de adquisición.

Modificado de: (Zhao, 2012).

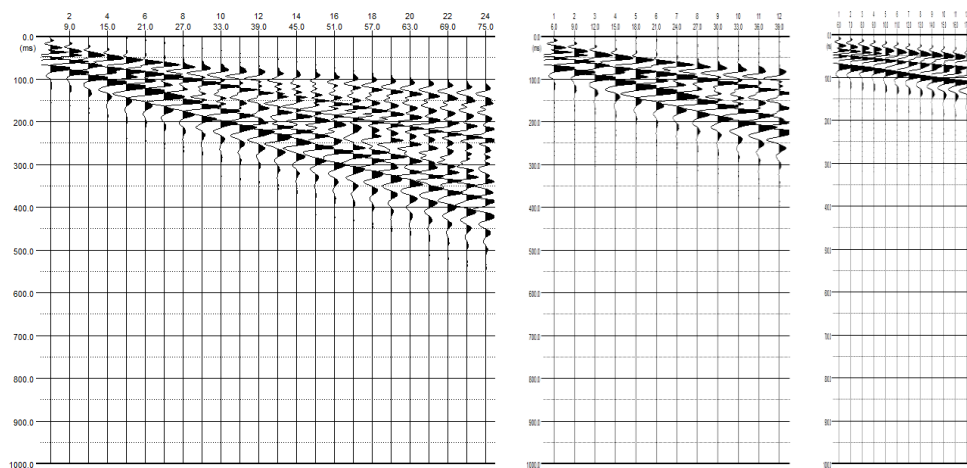


Fig. 4.10 Sismogramas sintéticos de un modelo de dos capas en rocas blandas con diferentes parámetros de adquisición.

Modificado de: (Zhao, 2012).

En cuanto a la distinción de ondas dentro del paquete, existe otro factor importante, se trata de la distancia entre la fuente y el primer receptor (off set), la Fig. 4.11 y la Fig. 4.12 presentan ambos modelos con 24 geófonos y tres metros de separación entre ellos pero con distintas distancias entre la fuente y el primer receptor (1, 3, 6 y 10 metros).

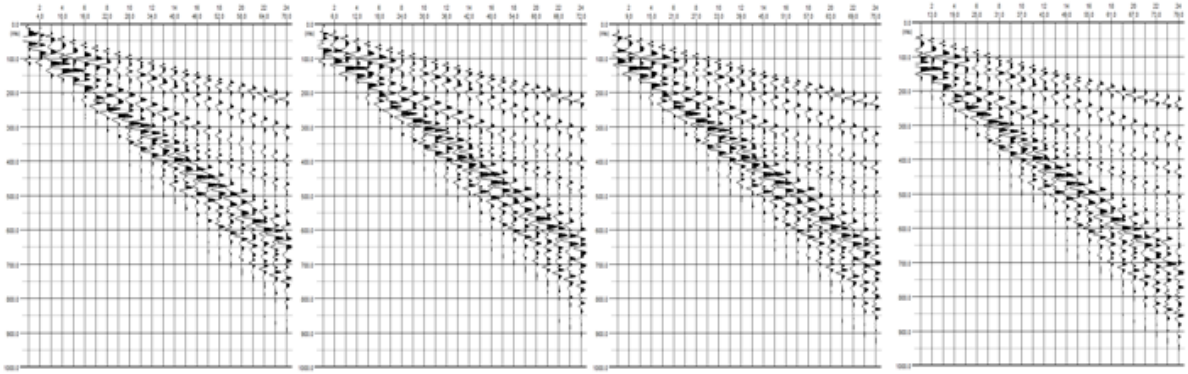


Fig. 4.11 Sismogramas sintéticos de un modelo de dos capas en suelos con diferentes "off sets".
Modificado de: (Zhao, 2012).

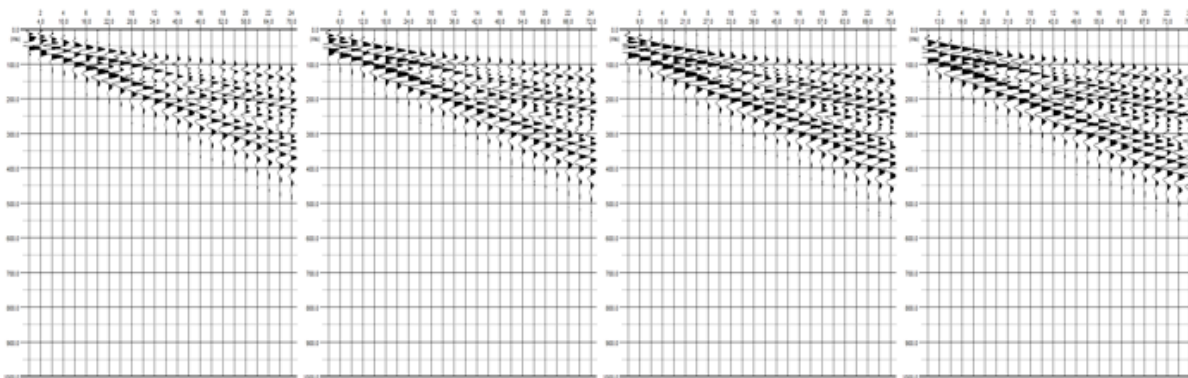


Fig. 4.12 Sismogramas sintéticos de un modelo de dos capas en rocas blandas con diferentes "off sets".
Modificado de: (Zhao, 2012).

4.2.1. Influencia del espesor de capas en la propagación de ondas

Ahora en la Fig. 4.13 se muestran sismogramas sintéticos de un modelo de tres capas en los que se varía el espesor de la capa central (1, 3, 6 y 10 metros) manteniendo constante los parámetros de adquisición, con el fin de observar el comportamiento de la propagación de ondas en capas de espesor diferente en un modelo simple que cumple ($V_1 < V_2 < V_3$), el cual representa una serie de estratos horizontales con un comportamiento típico. Las propiedades usadas para el modelo se presentan en la Tabla 4.2.

Tabla 4.2 Características de un medio de tres capas ($V_1 < V_2 < V_3$).

Capa	Espesor (m)	V_p (m/s)	V_s (m/s)	ρ (gr/cm ³)
1	5 m	400	200	1.5
2	1, 3, 6 y 10 m	540	270	1.75
3	Indefinido	700	350	2.0

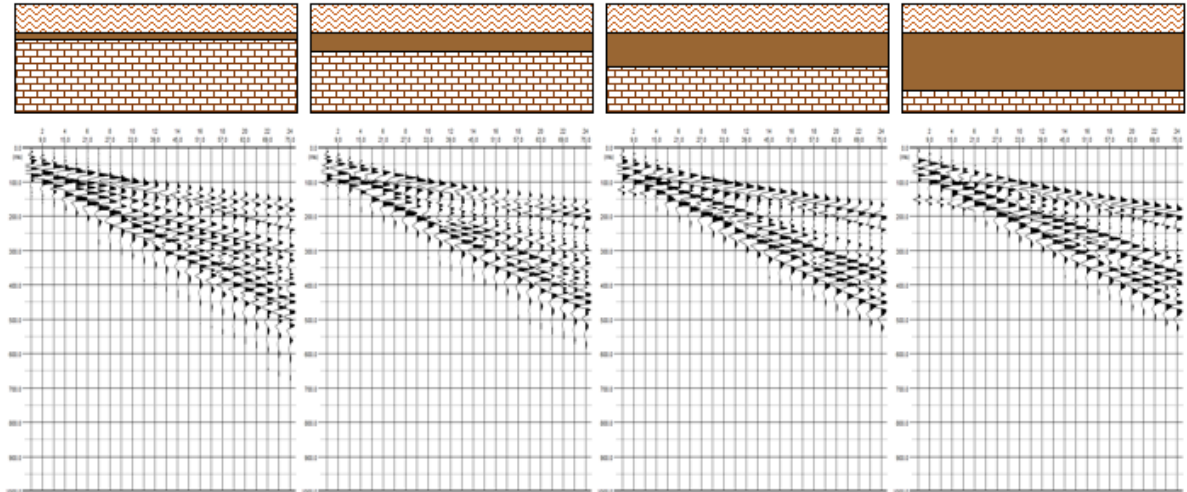


Fig. 4.13 Sismogramas sintéticos de un modelo de tres capas ($V_1 < V_2 < V_3$) con diferentes espesores en la capa intermedia.
Modificado de: (Zhao, 2012).

Se observa un paquete de ondas más extenso en las capas con espesores menores pero también aumenta la dificultad de interpretación; cuando se presentan espesores mayores las ondas se definen de manera más clara y sencilla.

4.2.2. Influencia del relleno de fracturas en la propagación de ondas

No siempre el modelo anterior es válido, algunas veces se presentan estratos con velocidades mayores confinados en estratos de velocidades menores, o viceversa. Además este modelo puede representar una discontinuidad vertical rellena, en un material homogéneo si se rotase el eje. La Fig. 4.14 presenta el caso en el que la capa intermedia tiene mayor velocidad que las que lo confinan ($V_1 < V_2 > V_3$) y la Fig. 4.15 el caso en el que la capa intermedia tiene una velocidad menor a las que lo confinan ($V_1 > V_2 < V_3$), en ambas se varia el espesor de la capa intermedia (1, 3, 6 y 10 metros). La Tabla 4.3 muestra las propiedades empleadas para los modelos presentados.

Tabla 4.3 Características de un medio de tres capas con ($V_1 < V_2 > V_3$) y ($V_1 > V_2 < V_3$).

Modelo	Capa	Espesor (m)	V_p (m/s)	V_s (m/s)	ρ (gr/cm ³)
$(V_1 < V_2 > V_3)$	1	5 m	400	200	1.5
	2	1, 3, 6 y 10 m	540	270	1.75
	3	Indefinido	400	200	1.5
$(V_1 > V_2 < V_3)$	1	5 m	400	200	1.5
	2	1, 3, 6 y 10 m	250	125	1.1
	3	Indefinido	400	200	1.5

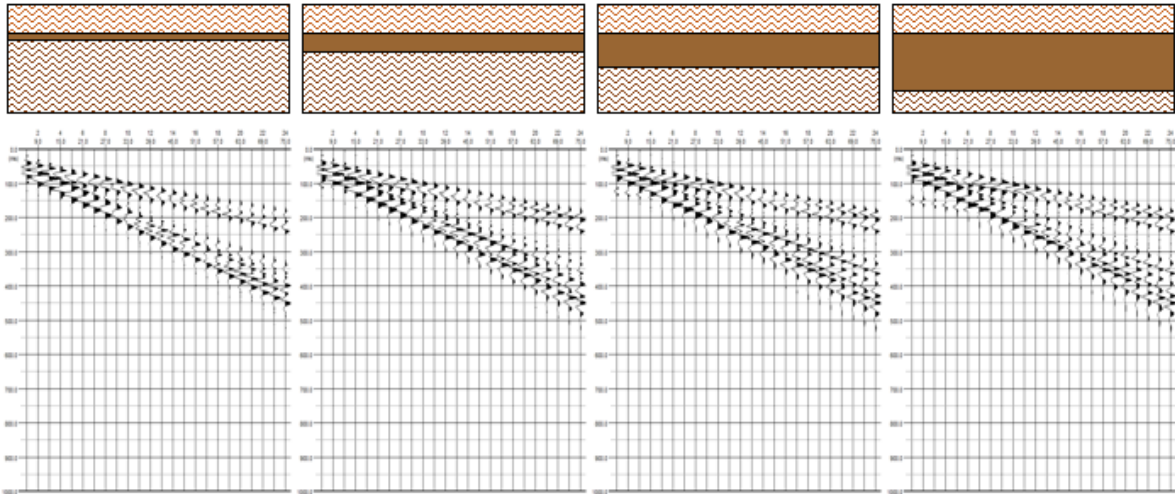


Fig. 4.14 Sismogramas sintéticos de un modelo de tres capas ($V_1 < V_2 > V_3$) con diferentes espesores en la capa intermedia. Modificado de: (Zhao, 2012).

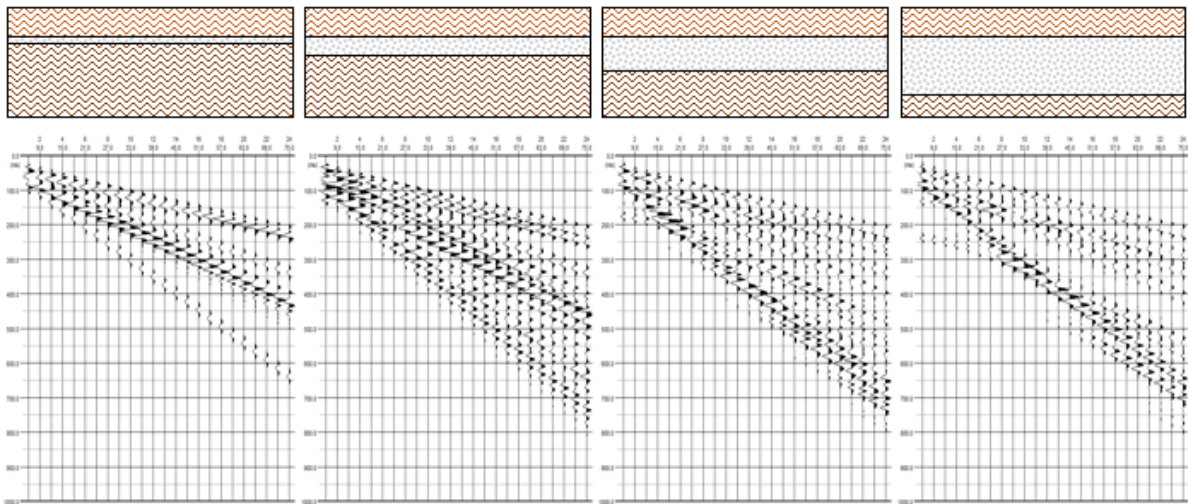


Fig. 4.15 Sismogramas sintéticos de un modelo de tres capas ($V_1 > V_2 < V_3$) con diferentes espesores en la capa intermedia. Modificado de: (Zhao, 2012).

Es evidente que en ambos casos existe una variación clara respecto al espesor, sin embargo en el segundo caso, en el que la velocidad intermedia es menor, es más probable que se enmascaren dichas capas si tienen un espesor relativamente pequeño, pudiendo no ser notadas en un sismograma real.



Capítulo 5

5. Metodología: Ensayes de propagación de ondas en laboratorio y campo

5.1. Experimentación preliminar (diseño de experimentos de laboratorio)

Para cumplir el objetivo de la presente investigación antes de iniciar la experimentación directa en campo fue necesario reconocer el fenómeno a analizar en un ambiente controlado mediante ciertos experimentos a escala de laboratorio. Por lo que se diseñaron tres diferentes experimentos los cuales se describen a continuación.

5.1.1. Análisis experimental a escala de laboratorio

5.1.1.1. Objetivo y descripción del experimento

El objetivo del experimento a escala de laboratorio es observar y analizar el comportamiento anisótropo de la velocidad de propagación de la onda de compresión en suelos con presencia de discontinuidades inducidas artificialmente.

El experimento consiste en una serie de mediciones del tiempo de arribo de la onda P en tres suelos distintos con la inclusión de placas en diferentes configuraciones (variando la cantidad y orientación). La Fig. 5.1 muestra el esquema general del experimento para la medición de tiempos de arribo, con los cuales se deducen las velocidades de onda P en cada configuración, al conocer la distancia entre la fuente y el receptor.

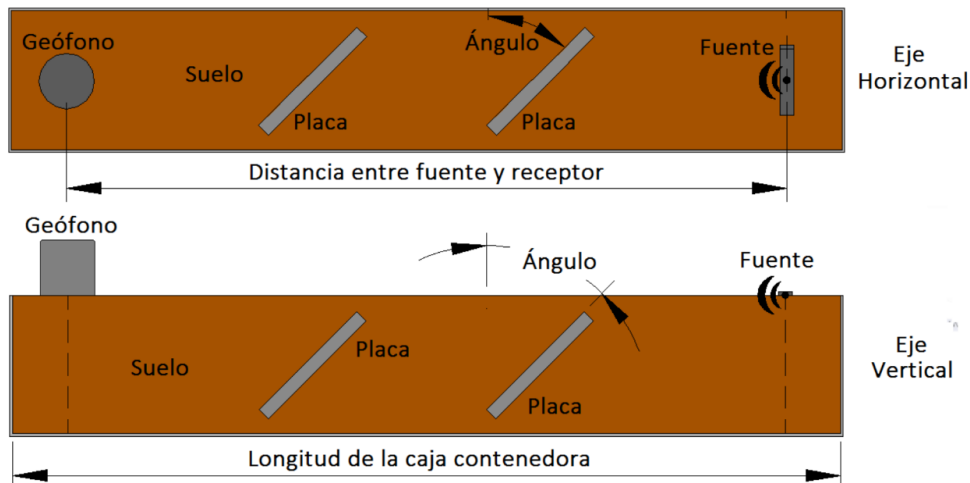


Fig. 5.1 Esquema general del experimento para la medición de tiempos de arribo de la onda P.

La Fig. 5.2 presenta el diagrama de variables del experimento, en el cual se diferencian seis variables independientes las cuales son: [1] distancia entre receptor y fuente (el cual depende de la longitud de la caja), [2] características y tipo de suelo (material de relleno), [3] características de las discontinuidades (material de las placas), [4] cantidad de discontinuidades (cantidad de placas), [5] características del receptor (frecuencia del geófono) y por ultimo [6] orientación de las discontinuidades (dividida en orientación y ángulo de giro de las placas). Además existen dos factores considerados como variables no controlables las

cuales son: [7] condiciones ambientales como la humedad, la temperatura y el ruido; y [8] el factor humano el cual puede desencadenar diversas perturbaciones como variaciones en la humedad y el grado de compactación, o bien, variaciones durante la generación de la onda (fuente) y variaciones en la apreciación de la respuesta (tiempo de arribo de la onda P).



Fig. 5.2 Diagrama de variables del modelo experimental.

Durante el desarrollo del experimento se decidió ir complementándolo agregando cambios por lo que se optó por separarlo en tres etapas para su descripción. En la Tabla 5.1 se presentan las variables de entrada (independientes) consideradas en cada una de las etapas.

Tabla 5.1 Variables de entrada consideradas en cada etapa del desarrollo.

ETAPA	VARIABLES DE ENTRADA						
	1	2	3	4	5	6	
	Longitud de la caja	Material de relleno	Material de las placas	Cantidad de placas	Frecuencia del geófono	Orientación del giro	Ángulo de giro
1ª	30 cm	Arcilla (M1)	Concreto (C1)	3 / 4	55 KHz	Horizontal	0° / 30° / 45°
2ª		Limo (M2)		3	100 Hz		60° / 90°
3ª	60 cm	Arena (M3)	Concreto (C1) Cartón (C2)	2 / 4 / 6	55 KHz	Horizontal Vertical	0° / 45° / 90° 135° / 180°

5.1.1.2. Caracterización de materiales utilizados

- Materiales de relleno

Se utilizaron tres tipos de suelo como material de relleno y se les hace referencia como M1, M2 y M3 (proporcionados por el Dr. Mauricio Barrera Bucio en forma de muestras inalteradas). Se les realizó las pruebas índice requeridas para su caracterización de acuerdo al Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS) y a las normas técnicas vigentes, la Tabla 5.2 enlista las pruebas realizadas.

Tabla 5.2 Pruebas realizadas con su respectiva norma técnica vigente.

Prueba	Norma
Peso específico relativo de sólidos	ASTM D 854-10
Granulometría vía seca (tamices)	ASTM D 2487-93
Granulometría vía hidrómetro	ASTM D 422-90
Límites de consistencia	ASTM D 4318-10
Peso específico	ASTM D 4531-92
Humedad natural	ASTM D 2216-10
Compactación Proctor estándar	ASTM D 698-12

*ASTM (American Society for Testing and Materials).

Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 5.3 y la clasificación SUCS de los materiales es la siguiente: (M1) arcilla de alta compresibilidad, (M2) limo de alta compresibilidad, y (M3) arena limosa ausente de plasticidad. La Fig. 5.3 muestra las curvas granulométricas.

Tabla 5.3 Propiedades índice de las muestras M1, M2 y M3.

PROPIEDADES	M1	M2	M3
Humedad natural (ω), %	24.52	32.15	8.91
Grava (G), %	1.95	2.02	0.00
Arena (A), %	15.59	10.85	76.28
Finos (F), %	82.46	87.13	23.72
Coefficiente de uniformidad (C_u)	-	-	30.0
Coefficiente de curvatura (C_c)	-	-	1.2
Módulo de finura	-	-	2.85
Límite líquido (LL), %	83.76	62.86	-
Límite plástico (LP), %	34.25	40.76	-
Índice plástico (IP), %	49.51	22.10	-
Contracción lineal (CL), %	21.66	16.07	-
Límite de contracción (LC), %	11.46	15.67	-
Peso específico natural (γ_m), gr/cm^3	1.82	1.55	-
Peso específico seco suelto (γ_s), gr/cm^3	-	-	0.95
Peso específico relativo de sólidos (S_s), gr/cm^3	2.53	2.45	2.11
Humedad optima Proctor estándar (ω_p), %	30.83	36.88	-
Clasificación SUCS	CH	MH	SM

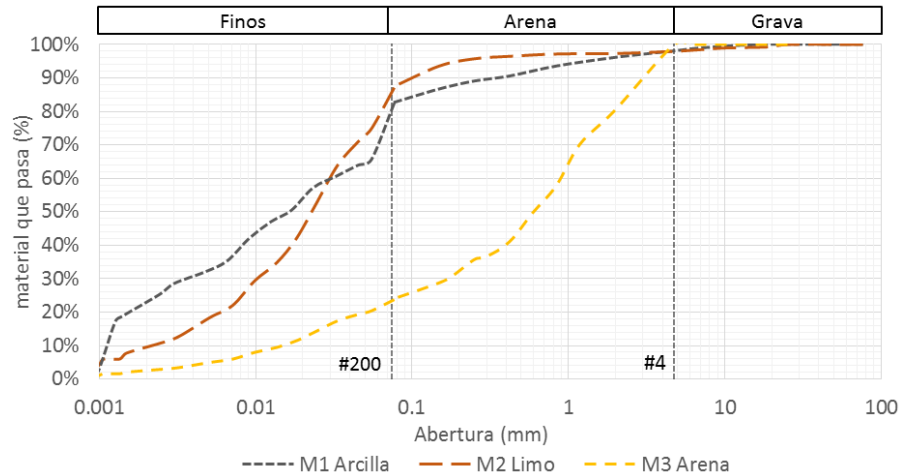


Fig. 5.3 Curvas granulométricas completas de las muestras M1, M2 y M3.

La humedad y el grado de compactación de cada material se eligieron de manera que se obtuviesen materiales fácilmente manipulables, que permitan una compactación adecuada dentro del molde de medición y puedan extraerse, disgregarse y remoldearse sin necesidad de herramientas o procesos complicados. Sin embargo es entendible y aceptable la existencia de variaciones por lo que fue necesario obtener testigos de humedad en distintas fases del desarrollo para garantizar que dicha variable no influirá en los resultados de la velocidad de onda, de manera similar fue necesario mantener un peso específico constante en cada material, controlando la cantidad de material utilizado y el grado de compactación por lo que fue evaluado el peso del material de relleno y el volumen ocupado, en cada configuración del modelo.

- Materiales de las placas

En lo que respecta a las placas utilizadas, se emplearon dos materiales distintos (concreto y cartón). A las placas de concreto se les hace referencia como C1 y están construidas de concreto hidráulico (mezcla de cemento, agua y arena), se utilizó cemento gris Portland convencional marca Tolteca (CEMEX) tipo CPC30R y como agregado arena a la cual se le hará referencia como M4. La mezcla se coló en moldes cuadrados de 10 cm por lado y un cm de alto, se curó a temperatura y humedad controlada durante 28 días, también se colaron 3 moldes cilíndricos de 5 cm de diámetro y 10 cm de alto y un molde de 10 cm de diámetro y 20 cm de alto con el objetivo de caracterizar la mezcla desde el punto de vista de su resistencia a la compresión de acuerdo a la norma ASTM C39 / C39M - 12. La Tabla 5.4 presenta los resultados de las pruebas índice del agregado el cual de acuerdo al SUCS es una arena bien graduada con limo de baja compresibilidad.

Tabla 5.4 Propiedades índice del agregado M4.

PROPIEDADES	M4
Tamaño del agregado máximo, mm	4.76
Humedad natural (ω), %	10.53
Grava (G), %	0.00
Arena (A), %	89.3
Finos (F), %	10.7
Coefficiente de uniformidad (C_u)	10.0
Coefficiente de curvatura (C_c)	1.3
Módulo de finura	2.7
Peso específico seco suelto (γ_s), gr/cm ³	1.19
Peso específico relativo de sólidos (S_s), gr/cm ³	2.16
Clasificación SUCS	SW-ML

El segundo tipo de placas se realizó mediante del apilamiento de capas de cartón de 3.5mm de espesor recubiertas con cinta adhesiva para ductos la cual cuenta con respaldo de tela plastificada de alta calidad y adhesivo sensible a la presión y se hace referencia a ellas como C2. La Tabla 5.5 presenta las propiedades de los dos tipos de placas.

Tabla 5.5 Propiedades de las placas C1 y C2.

PROPIEDADES		
C1	Resistencia a la compresión ($f'c$), kg/cm ²	≈ 250
	Peso específico (γ), gr/cm ³	1.76
	Relación Agua/Cemento	0.79
C2	Grosor, mm	3.5
	Peso específico (γ), gr/cm ³	0.21

5.1.1.3. Sistema de medición

El sistema de medición empleado consiste en un osciloscopio digital marca Uni-Trend modelo UT2025C de 25 MHz de dos canales en modo de trazo único, en uno de los canales es conectado un dispositivo generador de pulso, el cual es disparado por la percusión de un martillo de punta metálica (fuente) y una pequeña placa de aluminio colocada en la muestra a estudiar; en el segundo de los canales es conectado un geófono electromagnético (receptor). Dicho sistema fue implementado por Escalante González et al. (2013) para la medición de velocidad de ondas de cuerpo en muestras cilíndricas de roca (núcleos de barrenación a diamante) y posteriormente utilizado por Cid Villegas et al. (2013) para la estimación de módulos elásticos dinámicos.

La Fig. 5.4 muestra el esquema del sistema utilizado en la primera y segunda etapa.

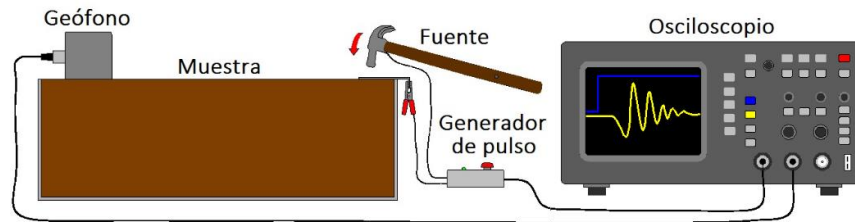


Fig. 5.4 Esquema del sistema de medición utilizado en la 1ª y 2ª etapas.

La Fig. 5.5 ilustra el esquema utilizado en la tercera etapa al cual se le adiciono un mecanismo de percusión automático que mantiene constante la fuerza y el lugar del golpe (fuente).

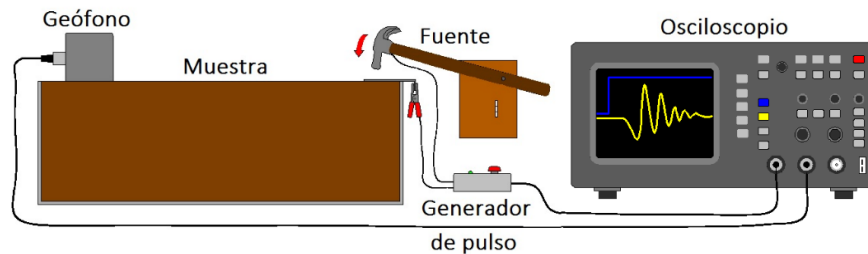


Fig. 5.5 Esquema del sistema de medición utilizado en la 3ª etapa.

Los geófonos utilizados durante la experimentación fueron de 55KHz y 100Hz esto con el fin de percibir las variaciones o errores que acarrea el hecho de una mala elección de las características del equipo. Los geófonos adecuados para las pruebas en laboratorio son los de altas frecuencias esto debido a las distancias tan cortas entre la fuente y el receptor, de manera que las frecuencias bajas son percibidas como ruido ya que el frente de onda no alcanza a desarrollarse cuando se presentan longitudes de onda muy grandes.

5.1.1.4. Procedimiento de análisis

Se dimensionaron y pesaron las cajas y placas a utilizar (se emplearon cajas y placas distintas para cada tipo de suelo), posteriormente se realizaron los siguientes pasos en cada configuración:

1. Se calcula en peso la cantidad de material necesaria para obtener el peso específico proyectado, y se pesa esta cantidad en una bolsa plástica. Se coloca la caja de cartón dentro del molde de madera el cual evita la deformación lateral y permite en mayor compactación. Se colocan las placas en la posición determinada y se introduce poco a poco el suelo dentro de la caja, generando presión manualmente con la ayuda de

un pequeño pisón metálico. Al terminar de colocar el material, se desarma el molde de madera para retirar la caja de cartón y pesarla con el fin de calcular el peso específico real.

2. Se posiciona la placa metálica y el geófono a los extremos del espécimen y se procede a utilizar el martillo de punta metálica para generar una perturbación (onda), obtener su registro mediante el osciloscopio y por ultimo determinar el tiempo del primer arribo (La Fig. 5.6 muestra las pantallas del osciloscopio durante el procedimiento de registro y la obtención del tiempo de arribo). Lo anterior representa una sola medición, se borra el historial y se procede con la siguiente medición.
3. Se realizan siete mediciones de las cuales a priori se descarta el valor más alto y el más bajo, por lo que finalmente solo se registran cinco valores. Se retira la placa metálica y el geófono, y se procede a retirar y disgregar el material, por último se toma una testigo de humedad como medida de control y se procede con la siguiente configuración.

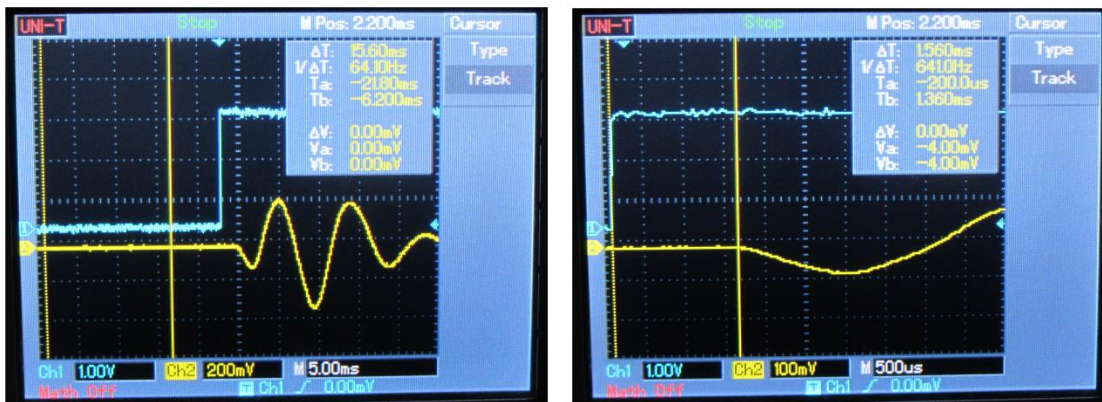


Fig. 5.6 Pantalla del osciloscopio al momento de registrar la onda y al realizar la lectura del tiempo de arribo de la onda de compresión.

Se recopilaron y organizaron los datos en hojas de cálculo de Microsoft Office Excel 2013, se calculó la desviación estándar y el promedio a cada grupo de datos, con el promedio del tiempo de arribo se obtuvo la velocidad de onda promedio. Se realizaron gráficos de dispersión mostrando velocidad de onda P (m/s) en el eje y y ángulo de las placas ($^{\circ}$) en el eje x, y gráficos polares de la velocidad de onda P (m/s). Estos gráficos se diferenciaron para cada tipo de suelo y para cada etapa del experimento. Además se calcularon los parámetros de anisotropía para cada serie y se presentan en una tabla resumen para cada etapa.

Además se generaron gráficos de control con los datos de peso específico y humedad. Posteriormente se organizaron adecuadamente el total de datos (1400) para su análisis

estadístico en el software Minitab 17. Se realizaron gráficos de efectos principales y de interacción para cada etapa.

La Fig. 5.7 muestra fotografías durante las mediciones efectuadas de las tres etapas.



Fig. 5.7 Fotografías de diferentes configuraciones durante el desarrollo en las tres etapas.

5.1.2. Ensayes de propagación de ondas en laboratorio

5.1.2.1. Objetivo y descripción del ensayo

El objetivo del ensayo es observar y analizar el comportamiento de la velocidad de propagación onda de compresión en suelos ante las condiciones generadas al alcanzar el estado límite (falla).

El ensaye consiste en la medición de tiempos de arribo de la onda P en especímenes cilíndricos de dos tipos de suelo antes y después de someterlos a ensayes triaxiales rápidos (UU) en distintas condiciones y diferentes presiones de confinamiento. Adicionalmente se analizan las relaciones esfuerzo-deformación durante los ensayes triaxiales. La Fig. 5.8 muestra el esquema general del desarrollo del ensaye.

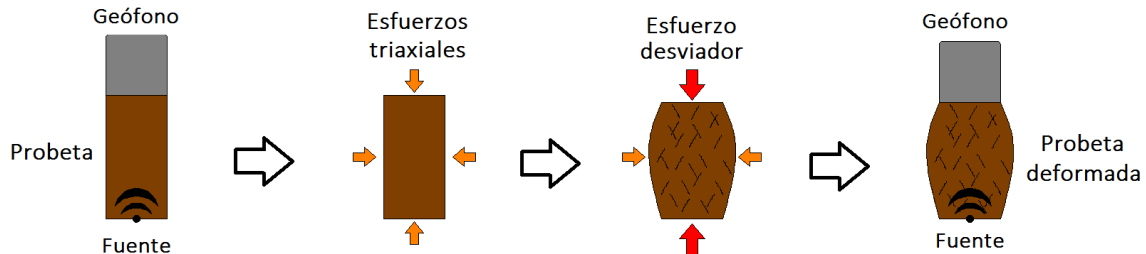


Fig. 5.8 Esquema general del desarrollo del ensaye.

5.1.2.2. Materiales utilizados

Se utilizaron los suelos M1 y M2 caracterizados anteriormente, remoldeados en especímenes cilíndricos de 3.8 cm de diámetro aproximadamente y una relación de esbeltez ligeramente superior a dos, con humedad y peso específico naturales.

5.1.2.3. Sistema de medición

El sistema de medición empleado es el mismo que se mencionó anteriormente, sin embargo el posicionamiento de la muestra (probeta) para la medición es diferente. La Fig. 5.9 ilustra el esquema del sistema empleado, el cual básicamente es igual al que utilizaron Cid Villegas et al. (2013) y Escalante González et al. (2013) en cilindros de roca.

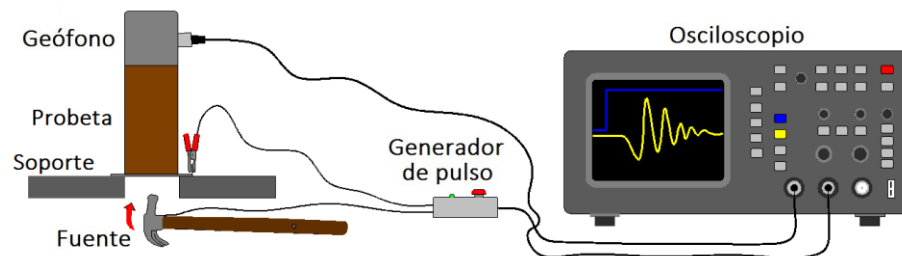


Fig. 5.9 Esquema del sistema de medición.

5.1.2.4. Procedimiento de análisis

Se dimensiono el molde y se calculó la cantidad de material necesario en peso para obtener el peso específico natural de cada material con una relación de esbeltez de 2.05 y la humedad natural de cada suelo. Se construyeron cuatro especímenes de cada material, se

dimensionaron y pesaron, luego se procedió a la medición de velocidad de onda de manera similar al procedimiento descrito en el experimento anterior.

Posteriormente, la primer probeta fue sometida al ensaye triaxial rápido (UU) en condición saturada a una presión efectiva de confinamiento de 200 KPa, las siguientes tres probetas fueron sometidas al ensaye en condición no saturada a distintas presiones de confinamiento (50, 100 y 200 KPa). Se concluyeron los ensayos una vez que fallaron o excedieron el 20% de deformación axial como lo indica la norma ASTM D 2850-03a.

Nuevamente se procedió al dimensionamiento y pesaje de los especímenes, después al procedimiento de medición de velocidad. Por último se colocaron las muestras en el horno para su pesaje posterior, y obtener la humedad y grado de saturación. La Fig. 5.10 muestra fotografías durante el desarrollo del experimento.

Se recopilaron y organizaron los datos en hojas de cálculo de Microsoft Office Excel 2013, se calculó la desviación estándar y el promedio a cada grupo de datos, con el promedio del tiempo de arribo se obtuvo la velocidad de onda promedio. Se realizaron gráficos de barras combinadas mostrando velocidad de onda P (m/s) antes y después de someterlos al ensaye.

Además se realizaron gráficos de la relación esfuerzo-deformación para cada material y con ellos se realizó un análisis de reducción de módulos como lo presenta Benz (2007), y se realizaron gráficos similares.



Fig. 5.10 Fotografías del desarrollo del experimento.

5.1.3. Micrografía electrónica de barrido

5.1.3.1. Objetivo y descripción del experimento

El objetivo del experimento consiste en observar e identificar una posible orientación preferencial en la microestructura del suelo en estado natural mediante la utilización la técnica de detección de electrones retro dispersados. El experimento consiste en la observación minuciosa de las imágenes obtenidas mediante el uso del microscopio electrónico de barrido en muestras inalteradas de suelo.

5.1.3.2. Materiales utilizados

Se utilizaron muestras inalteradas labradas especialmente en forma de pastilla de 1.5 cm de diámetro y un espesor no mayor a un centímetro con los suelos M1 y M2 caracterizados anteriormente. Esto fue posible ya que el equipo permite la observación directa sin necesidad de metalizar la superficie, posteriormente en el documento se describe el procedimiento de preparación de las muestras.

5.1.3.3. Sistema de medición

Se utilizó un microscopio electrónico de barrido modelo TM-1000 marca Hitachi de 15Kv proporcionado por la Dra. Marina Vega González responsable de dicho equipo en el Centro de Geociencias de la Universidad Nacional Autónoma de México.

El microscopio emite un haz de electrones hacia la superficie de la muestra, la cual tiene que ser conductora, ya sea por medio del recubrimiento superficial con oro o mediante la adhesión de una delgada placa de carbón, para lo cual mediante el barrido de una serie de sensores a base de electroimanes se detecta la intensidad de electrones que devuelve la muestra y con ello genera una imagen de alta resolución.

5.1.3.4. Procedimiento de análisis

Primeramente se realizó el labrado de las muestras inalteradas, un labrado especial en forma de pastilla para poder colocarlas en el portamuestras con una cinta adhesiva de carbón fijándola y garantizando que sea conductora. Una vez preparada la muestra se introduce en el microscopio, se le induce un vacío y posteriormente se inicia con el barrido y la generación de imágenes, se ubica un punto en específico que cumpla con el objetivo propuesto y se guardan las imágenes con diferentes acercamientos. La Fig. 5.11 muestra fotografías durante el experimento.



Fig. 5.11 Fotografías durante las micrografías electrónicas de barrido.

5.2. Experimentación dirigida (diseño de experimento en campo)

Una vez observado y analizado el fenómeno en condiciones controladas en la experimentación en laboratorio fue posible una mejor determinación y diseño de la experimentación en campo la cual está dirigida a la problemática real de la ingeniería geotécnica práctica.

5.2.1. Ensayes de propagación de ondas en campo

5.2.1.1. Objetivo y descripción del experimento

El objetivo del experimento en campo es observar, analizar y evidenciar la influencia de las discontinuidades y facies en suelos y rocas en el comportamiento anisotrópico de la velocidad de propagación de ondas sísmicas, particularmente en la aplicación geotécnica.

El experimento consiste en una serie de mediciones mediante sondeos sísmicos en superficie en diferentes orientaciones y en sitios con distintas características.

5.2.1.2. Ubicación de los sitios de estudio

Con base en trabajos previos, reconocimiento en campo y disponibilidad de realizar las mediciones necesarias *in situ*, se seleccionaron cinco sitios de estudio, dos de ellos en la zona metropolitana de la ciudad de Santiago de Querétaro, y tres de ellos en la zona Este del estado de Guanajuato. Dichos sitios se eligieron pues presentan algún tipo de discontinuidad o característica distintiva que hace viable su estudio en la presente investigación. La Tabla 5.6 presenta las coordenadas UTM de referencia y la Fig. 5.12 muestra la ubicación de los sitios de estudio.

Tabla 5.6 Coordenadas UTM de los puntos de referencia de los sitio de estudio (S1-S5).

ID	Coordenadas UTM (14Q)		Poblado/Fraccionamiento	Municipio	Estado
	N	E			
S1	339017	2331241	Poblado Tres Palmas	San Miguel de Allende	Gto
S2	332985	2331252	Poblado El Paredón	San Miguel de Allende	Gto
S3	346956	2327872	Poblado La Fragua	San José Iturbide	Gto
S4	348793	2272394	Fracc. Pirámides	Corregidora	Qro
S5	357883	2278429	Fracc. Milenio III	Santiago de Querétaro	Qro

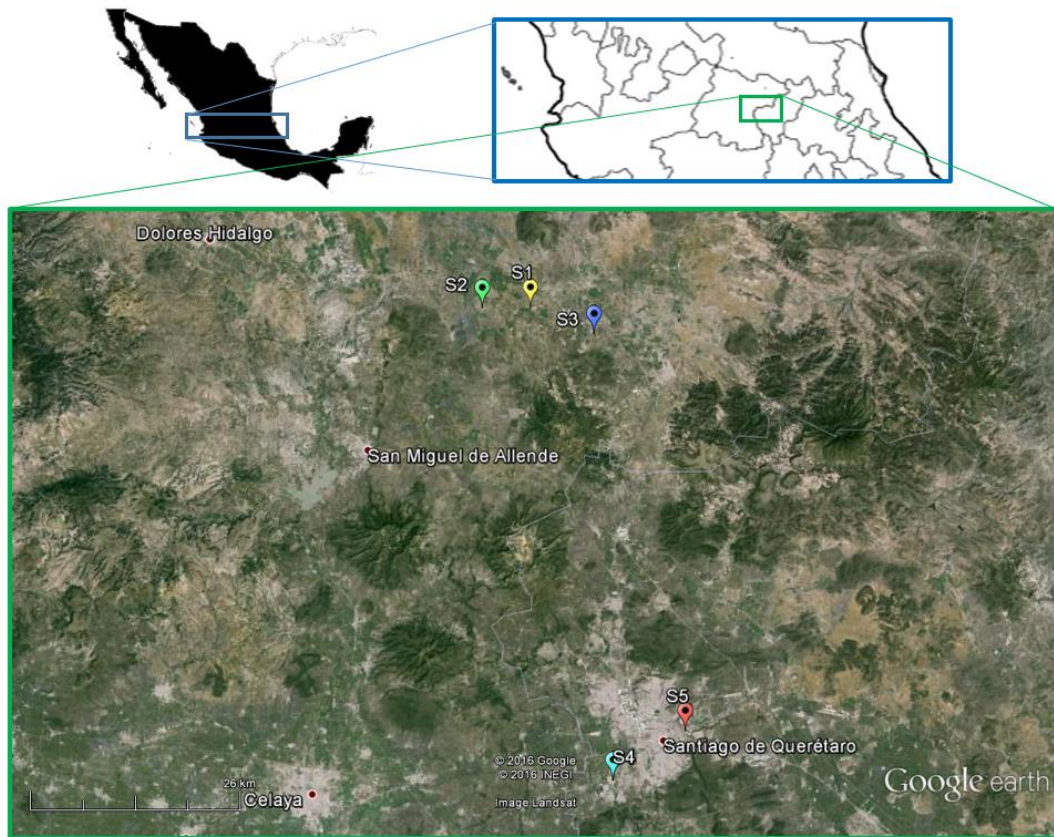


Fig. 5.12 Ubicación de los sitios de estudio (S1-S5).

5.2.1.3. Procedimiento de adquisición de datos

El procedimiento de adquisición de datos en campo consistió en realizar sondeos sísmicos en superficie mediante tendidos lineales perpendiculares entre sí. La Fig. 5.13 muestra un esquema simple del tendido sísmico utilizado.

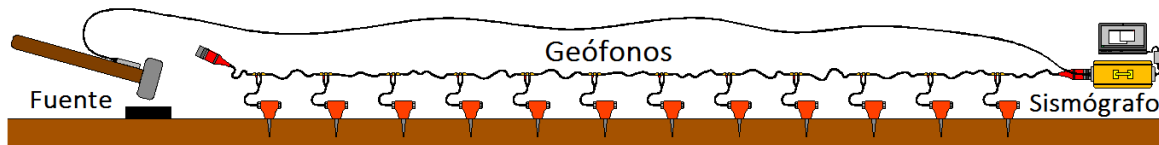


Fig. 5.13 Esquema simple del tendido sísmico utilizado.

El cual puede dividirse en tres partes principales: fuente, receptores y registro. La fuente es la generadora de la onda, mediante el golpe de un marro de 12 libras sobre una placa metálica colocada sobre la superficie del suelo a una distancia determinada del primer receptor (geófono); los receptores son una serie de 12 geófonos electromagnéticos de 4Hz de componente vertical insertados firmemente en la superficie del suelo de manera equidistante, estos emiten cualquier vibración del suelo en forma de señal eléctrica a través del cable al cual

son conectados al sismógrafo; por último el registro se lleva a cabo mediante un sismógrafo GEODE marca Geometrics de hasta 24 geófonos y una computadora portátil en la cual se registran los datos mediante el software Geometrics Seismodule Controller versión 11.1.69.0, obteniendo como resultado un sismograma por cada disparo.

Se realizaron disparos en ambos extremos del tendido con la misma separación, además entre algunos de los geófonos. La geometría del tendido es decir el posicionamiento de la fuente, la cantidad de disparos, la separación de los geófonos, la orientación y cantidad de tendidos fue determinado particularmente para cada sitio con base en las características del mismo. Sin embargo en todos ellos se realizaron al menos dos tendidos perpendiculares entre sí en cruz o en forma de “L” o “T”.

A continuación se hace una breve descripción de cómo se realiza la elección de las características del equipo a emplear. La elección de la frecuencia nominal de los geófonos se basa principalmente en la técnica empleada por lo que la decisión se torna a la técnica.

Existen 3 técnicas de prospección sísmica basadas cada una de ellas en diferentes principios; primeramente los sondeos de reflexión, basados en el análisis de ondas reflejadas en el subsuelo, en esta técnica las señales coherentes se presentan a altas frecuencias por lo que geófonos de aproximadamente 100Hz son los empleados; los sondeos de refracción se basan en el análisis de ondas refractadas y las señales coherentes para este tipo de propagación se presenta en un rango aproximado de 20 a 60Hz correspondiente a frecuencias intermedias; por último los sondeos realizados mediante la propagación de ondas superficiales, en esta técnica las señales coherentes se presentan ante frecuencias bajas para permitir que se desarrolle el frente de onda de manera adecuada, se utilizan geófonos de entre 0.1 y 8 Hz.

La separación de los geófonos, posicionamiento de la fuente y cantidad de disparos están en función del objetivo del proyecto, principalmente en la profundidad máxima que se desea estudiar y el detalle que se pretende obtener, una separación entre geófonos pequeña con gran cantidad de disparos da como resultado mayor detalle pero menor profundidad, o bien, pocos disparos y una separación entre geófonos mayor, resulta en una gran profundidad pero poco detalle.

5.2.1.4. Descripción de la geometría en los sitios de estudio

La Tabla 5.7 presenta las características de la geometría de cada tendido en los cinco sitios de estudio.

Tabla 5.7 Geometría de los tendidos en cada sitio.

ID Sitio	ID Tendido	Distancia entre geófonos	Longitud	Disparos	Orientación aprox.
S1	2000	3mts	33/45mts	4 Exteriores 11 Interiores	W-E
	2050				S-N
	1000				W-E
	1050				S-N
	1075				S-N
S2	4000	3mts	33/45mts	4 Exteriores 11 Interiores	W-E
	4300				S-N
S3	1000	3mts	33/45mts	4 Exteriores 11 Interiores	SW-NE
	2000				NW-SE
S4	3000	3mts	33/45mts	4 Exteriores 11 Interiores	SE-NW
	3050				SW-NE
	4000	4mts	44/60mts	4 Exteriores 5 Interiores	SE-NW
	4050				SW-NE
	1000	3mts	33/45mts	4 Exteriores 3 Interiores	SW-NE
	1050				SE-NW
S5	100	2mts	22/26mts	2 Exteriores 11 Interiores	SW-NE
	200				SE-NW

La Fig. 5.14 muestra el esquema de los tendidos en campo, donde se puede hacer notar que todos ellos vienen en esquemas perpendiculares con el fin de obtener resultados en los cuales podamos analizar el comportamiento anisótropo, influenciado por discontinuidades o facies en el terreno.

Los tendidos en los primeros dos sitios se orientaron a lo largo de una grieta de tensión previamente observada y perpendicular a ella, además en el primer sitio se realizaron tendidos en ambos lados. En los sitios siguientes se realizaron dos tendidos formando una cruz simple, sin embargo en el cuarto sitio también se realizó una serie de tendidos en forma de "L" y en forma de "T". El espaciamiento entre geófonos se mantuvo generalmente en 3 metros sin embargo se realizó el ejercicio de colocarlos a 4 y 2 metros en el sitio S4 y S5 respectivamente.

La Fig. 5.15 muestra fotografías de los trabajos realizados en campo en cada sitio estudiado.

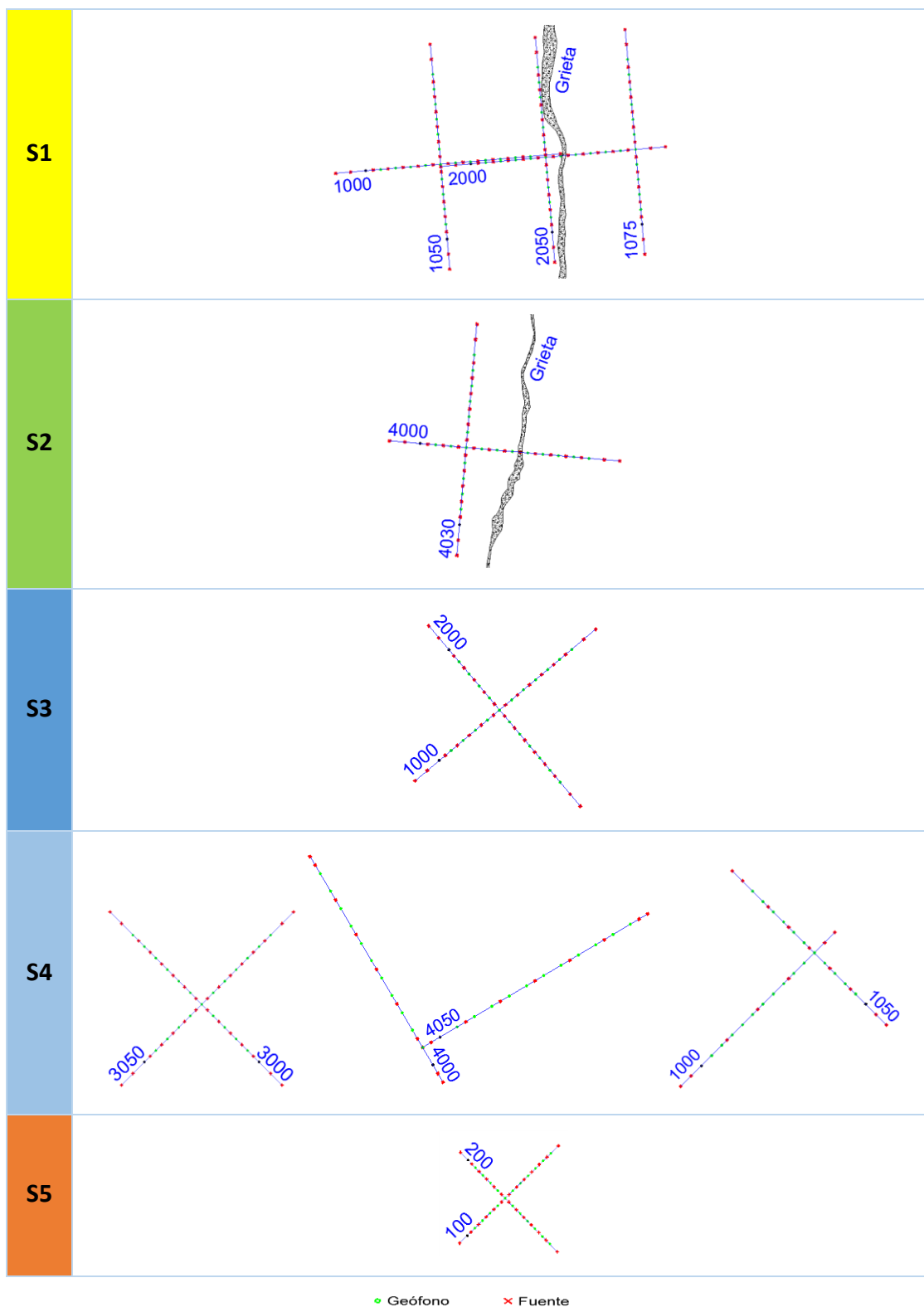


Fig. 5.14 Esquemas de cada tendido en los sitios de estudio.



Fig. 5.15 Fotografías de los trabajos realizados en los sitios de estudio.

5.2.1.5. Procedimiento de análisis

Una vez recopilados los sismogramas en campo en formato “.dat”, se continuo con el procesamiento especializado de dichos datos, el primer paso consistió en la revisión de la geometría disposición de estaciones (geófonos) y posición del disparo (fuente) así como la normalización de los registros, corrección del retardo de disparo o bien la aplicación de algún filtro en uno o varios trazos de ser necesario por medio del software Geogiga Seismic Pro Front End versión 8.0 el cual convierte los registros en formato “.sg2”.

Posteriormente por medio del software Geogiga Seismic Pro Surface Plus versión 8.01 se realizó para cada serie de sismogramas correspondientes a cada tendido su procesamiento mediante el método del Análisis Multicanal de Ondas Superficiales “MASW” con el fin de obtener un perfil de velocidades de corte aparentes, se le denomina aparentes ya que se derivan a partir de las ondas superficiales. Para facilitar la visualización en tres dimensiones de los perfiles obtenidos, el software Geogiga Seismic Pro Seismapper versión 8.0 los posiciona en esquemas 3D que nos servirán en la presentación de resultados. Los parámetros de anisotropía en la experimentación dirigida son poco prácticos, por lo que simplemente se presentan y comparan las distribuciones de velocidades para su interpretación.

Para la serie de sismogramas de los tendidos centrales de cada sitio, también se les analizo mediante el software Geogiga Seismic Pro Tomo DW versión 8.0 con el método de tomografía sísmica de ondas “diving” el cual utiliza las primeras llegadas de las ondas refractadas para obtener el perfil de velocidades de compresión. Una vez obtenida la distribución de velocidades de corte y compresión, se consideró un modelo multicapa ideal (estratos horizontales y continuos) para el inicio de cada tendido, con ellos se crearon sismogramas sintéticos con el software Geogiga Seismic Pro Modeling versión 8.0, los cuales se compararon con los sismogramas reales correspondientes.



Capítulo 6

6. Resultados y discusión

6.1. Experimentación preliminar

6.1.1. Análisis experimental a escala de laboratorio

6.1.1.1. Control de humedad y peso específico

Con el objetivo de intentar aminorar las variables ambientales o por el factor humano se llevaron a cabo procedimientos simples de monitoreo de humedad y peso específico en cada configuración y con ello evidenciar que no son una variable significativa.

Las Fig. 6.1 y Fig. 6.2 muestran los porcentajes de humedad y los valores de peso específico respectivamente durante las mediciones haciendo distinción en cada etapa.

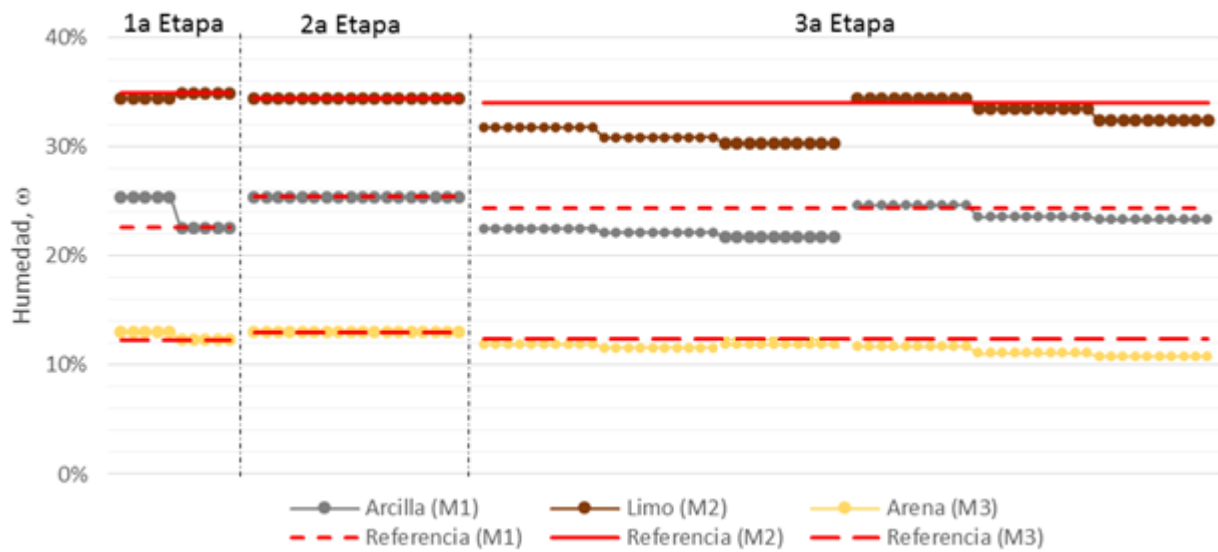


Fig. 6.1 Porcentajes de humedad de cada material durante las tres etapas.

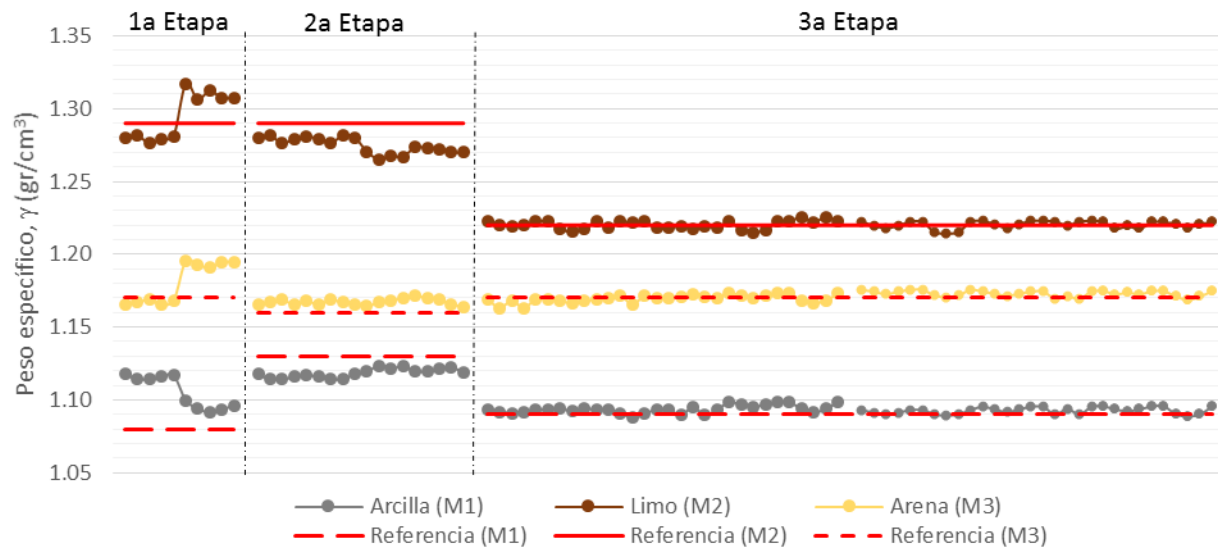


Fig. 6.2 Valores de peso específico de cada material durante las tres etapas.

Obviamente cada material presenta un rango de humedad muy distinto, como se muestra en la Fig. 6.1, las humedades presentan variaciones principalmente en la primera y tercera etapas, sin embargo se encuentran en un rango aceptable siendo menores al 4% en el limo M2 el cual presenta los porcentajes mayores; y variaciones menores a 3% en la arcilla M1; siendo prácticamente nulas en la arena M3. Con base en lo anterior, se puede descartar la humedad como una variable dentro del modelo experimental presentado, al menos de manera individual.

Como es de esperarse al manejar materiales de diferentes características con humedades distintas, los pesos específicos resultantes son diferentes a pesar de mantener el proceso de compactación idéntico en cada medición, sin embargo es completamente normal que se presenten variaciones, como se pueden observar en la Fig. 6.2, esto puede deberse por diversos factores como la temperatura y humedad ambientales o incluso pérdida de material durante la manipulación en la preparación de la muestra, o más precisamente las variaciones en el grado de compactación presentes por el factor humano ya que dicho proceso se realizó completamente a criterio del operador, únicamente controlando el peso del material utilizado en cada muestra. Dichas variaciones son mayores durante la primera etapa, reduciéndose significativamente para la segunda y tercera etapas, lo cual puede explicarse por la experiencia adquirida del operador.

6.1.1.2. Resultados y análisis

Como ya se mencionó en el capítulo anterior, el presente experimento es parte de un análisis preliminar con el objetivo de reconocer el fenómeno de la anisotropía por causa de discontinuidades inducidas de manera controlada con el fin de mejorar el diseño del experimento en campo el cual está dirigido directamente a la problemática real.

Por la complejidad adquirida al ir adicionando variables durante el desarrollo de cada etapa, los resultados son presentados de manera independiente, además en esta sección únicamente se exponen los gráficos de velocidad de onda P - ángulo y los gráficos polares con la discusión pertinente, en el anexo C se incluyen gráficos estadísticos, tanto de interacción de variables como de efectos principales y las tablas de los parámetros de anisotropía obtenidos.

En la Fig. 6.3 se expone el comportamiento anisótropo de los tres materiales utilizados con la inclusión de tres y cuatro placas de concreto correspondientes a las primeras dos etapas, en donde se puede observar una tendencia típica anisotrópica mostrando consistencia en los tres materiales y en las configuraciones con tres y cuatro placas, inclusive con los diferentes geófonos utilizados, se destaca en general una velocidad mayor con la inclusión de cuatro placas incluso por encima de la velocidad del medio de referencia (sin placas), lo cual resulta

obvio si se considera que las placas son de un material más denso (concreto) y presento velocidades muy por encima de los tres materiales. Las series con tres placas en la arcilla (M1) y el limo (M2) se presentan exactamente en el rango medio de la velocidad de referencia, en lo que respecta a la arena (M3) existe mayor diferencia entre sus series, esto se puede deber a que su estructura es mucho más suelta y a la ausencia de plasticidad en sus partículas, representándose en una respuesta sísmica mucho más lenta, presentando desviaciones estándar mayores, además pudiese haber afectado el factor humano ya que fue más difícil realizar las mediciones en este material.

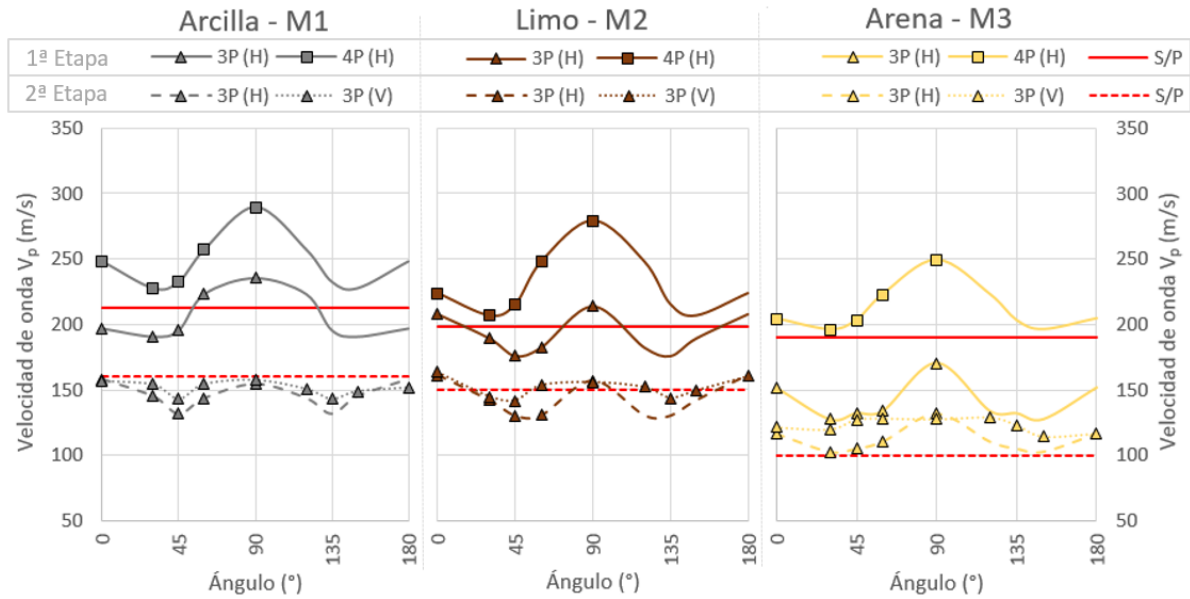


Fig. 6.3 Gráfico: Velocidad de onda P – Ángulo de la 1ª y 2ª etapa.

Puede observarse que las líneas discontinuas correspondientes a las velocidades medidas en la segunda etapa se presentan muy por debajo de las primeras mediciones y además el rango anisotrópico fue mucho menor esto se debe a la diferencia en la frecuencia nominal de los geófonos empleados, lo cual resultase tal y como se esperaba ya que los geófonos de 100Hz no son los adecuados para su uso a escalas pequeñas demostrando que la elección de las características del equipo es fundamental para realizar mediciones adecuadas y precisas.

Además en esta segunda etapa se incorporó un dispositivo de percusión automática, para uniformizar el golpeteo de la fuente al generar la onda, sin embargo este se descarta como variable.

Las curvas presentadas pueden ser comparadas con las publicadas por Ding et al. (2014), el cual es el estudio con características más parecidas a las que se presentan en el presente experimento, mostrando tendencias similares pero inversas pues en este caso las

discontinuidades inducidas generaron una reducción en el tiempo de propagación de la onda de compresión. También se pudiesen mostrar los resultados de anisotropía en rocas de varios investigadores sin embargo dicha comparación no tendría mucho sentido pues las características inherentes son distintas.

La Fig. 6.4 muestra gráficos polares con las velocidades de las primeras dos etapas, en los que se observa claramente una tendencia elíptica o rómbica indicando las mayores velocidades de propagación de la onda en sentido paralelo a las placas, resultando obvio puesto que la onda toma el camino más rápido, en este caso a lo largo de las placas las cuales generan una mejor continuidad en el trayecto. Obteniendo un comportamiento anisótropo representado por una variación promedio del 25.1% en la primera etapa y un 15.9% en la segunda etapa.

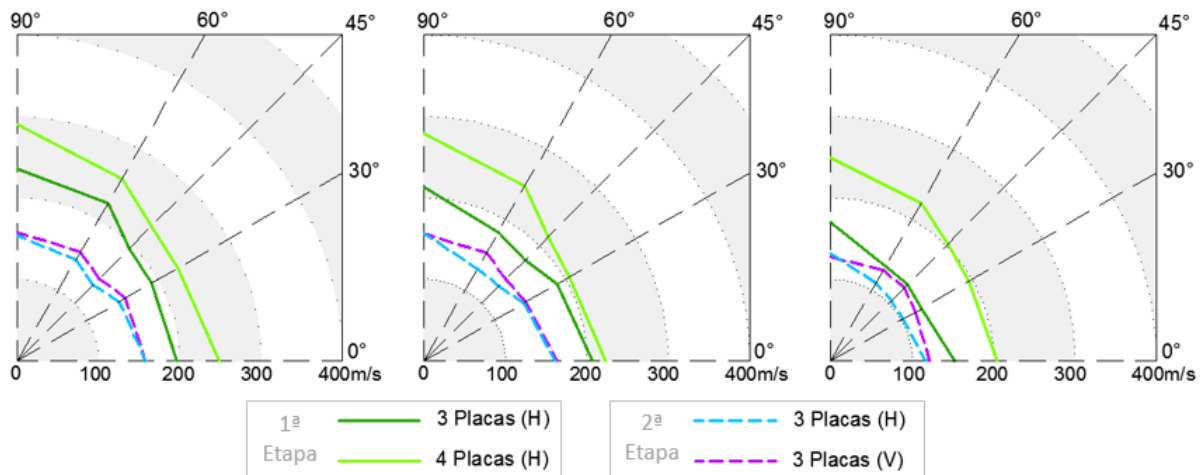


Fig. 6.4 Gráfico polar de la velocidad de onda P (m/s) en la 1ª y 2ª etapa.

Desde el punto de vista estadístico se observaron en general desviaciones estándar del tiempo de arribo menores a 0.084 ms representando valores relativamente pequeños, dándole cierta certidumbre a los resultados. Ahora bien con el fin de observar los efectos de cada variable respecto a la velocidad de onda P se presenta el gráfico de interacción de variables en la Fig. C.1 y en la Fig. C.3. Además de lo anteriormente mencionado se observa que el material con mayor velocidad es la arcilla (M1), seguida del limo (M2), dejando claramente por debajo a la arena (M3), siendo mucho más claro este comportamiento en la primera etapa.

En la Fig. C.2 y Fig. C.4 se presentan los gráficos de efectos principales en los que se observa de manera general que tanto el material de relleno, la cantidad de placas y el ángulo de giro tienen un rango de variación o influencia sobre la velocidad de onda de compresión muy similares, siendo el material de relleno una propiedad inherente pues los tres materiales

son de naturaleza y características muy distintas y evidenciando que la orientación del giro no tiene gran significancia.

Por último se incluyen en la Tabla C.1 y la Tabla C.2 los parámetros de anisotropía de la velocidad de onda P, se observa un parámetro de anisotropía (ε) positivo el cual corrobora que la velocidad mayor se presenta a lo largo del eje de las placas, un porcentaje de anisotropía (%) muy similar entre las series de tres y cuatro placas y valores variables negativos en el parámetro de elipticidad (δ) observables de manera directa en la forma de las curvas en el grafico polar, además se observa claramente en el porcentaje de anisotropía la diferencia mencionada anteriormente entre la primera y segunda etapa causada en gran medida por la falta de precisión de los geófonos utilizados en la segunda etapa.

La etapa final del experimento tuvo cambios significativos respecto a las primeras dos etapas, en este caso se amplió la longitud de la muestra al doble, se realizaron configuraciones con dos, cuatro y seis placas con dos materiales distintos y dos orientaciones de giro (horizontal y vertical), de manera que fue necesario dividirla en dos partes para presentar los resultados más ordenadamente y realizar una discusión más clara.

La primera parte fue realizada con placas de concreto, la Fig. 6.5 presenta los resultados, observándose comportamientos similares en los tres materiales, donde las velocidades máximas son a lo largo de las placas principalmente en los suelos M1 y M2, la arena presenta valores similares en ambos sentidos. Prácticamente todas las mediciones se presentan en un rango similar a la velocidad del material sin placas (referencia).

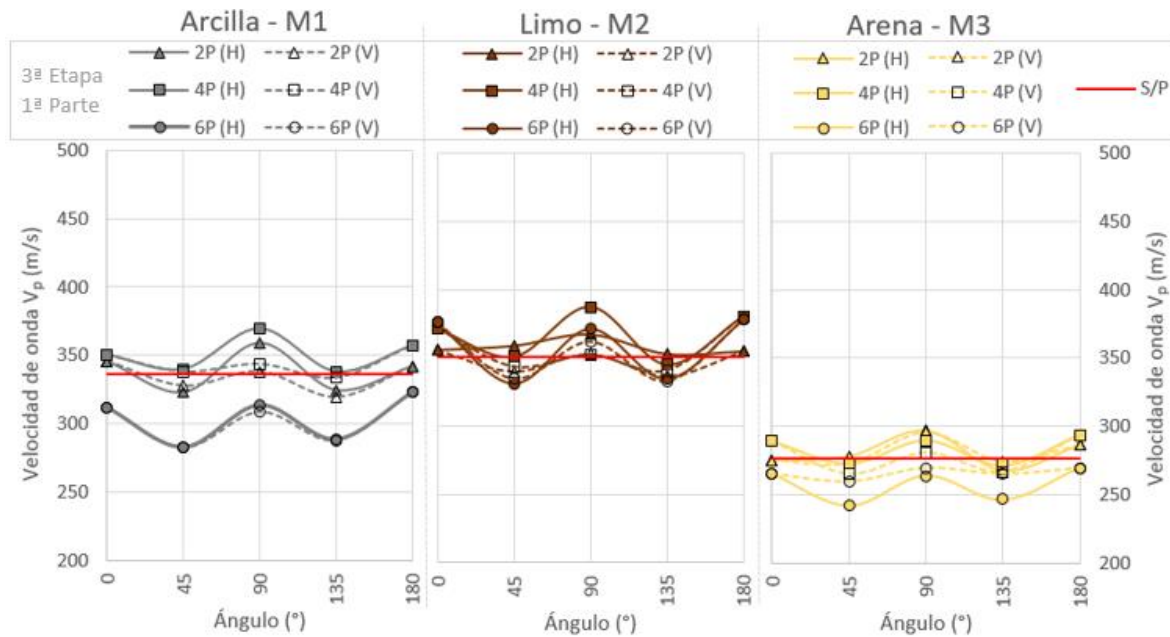


Fig. 6.5 Gráfico: Velocidad de onda P – Ángulo en la 2ª etapa / 1ª parte.

La Fig. 6.6 presenta gráficos polares, indicando valores ligeramente menores en ángulos de 45°.

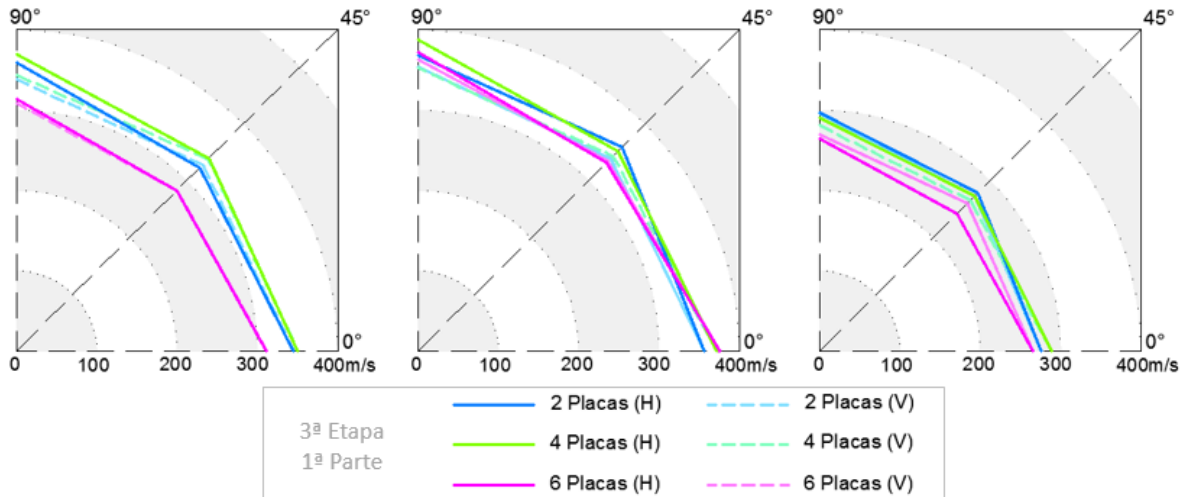


Fig. 6.6 Gráfico polar de la velocidad de onda P (m/s) en la 2ª etapa / 1ª parte.

Dando continuidad con la presentación de resultados de la tercera etapa, se exponen los resultados de la segunda parte en la Fig. 6.7 y la Fig. 6.8 en un gráfico de dispersión y un gráfico polar respectivamente en donde se utilizaron placas de cartón. La primera aclaración es que inicialmente se esperaba que el cartón tuviera una velocidad menor a la del concreto y no muy superior a las de los otros tres materiales, sin embargo al realizar las mediciones en el bloque de referencia se observó un comportamiento muy distante, donde se obtuvieron velocidades mayores, aun así se optó por continuar el experimento para corroborar los resultados antes presentados.

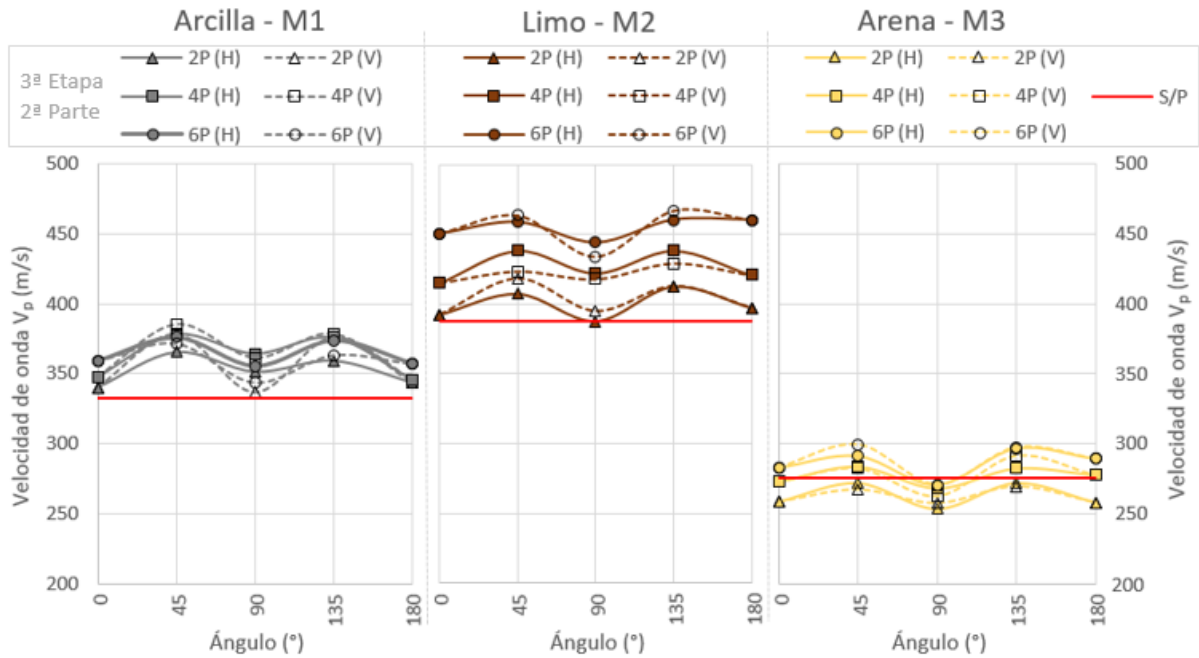


Fig. 6.7 Gráfico: Velocidad de onda P – Ángulo en la 3ª etapa / 2ª parte.

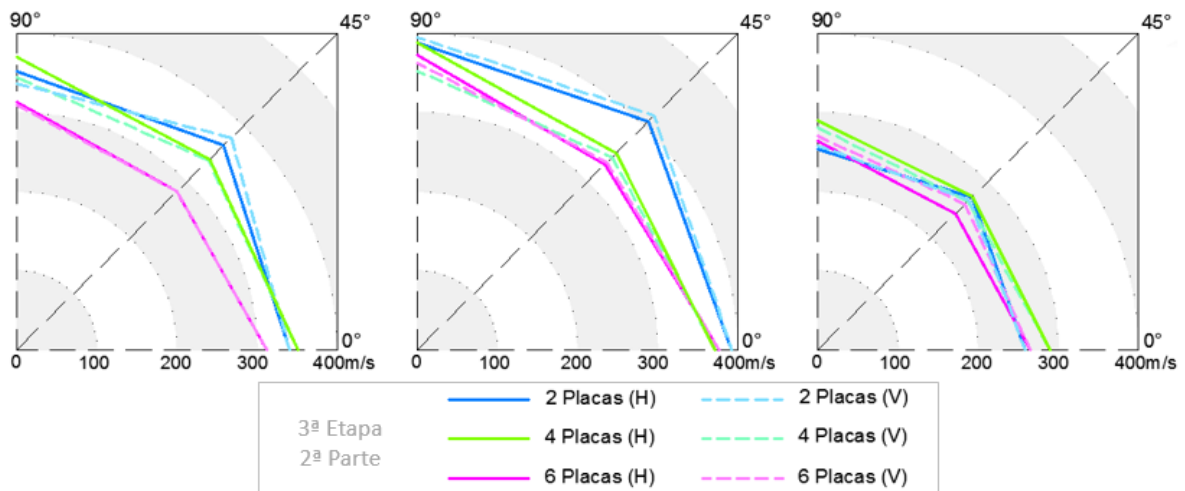


Fig. 6.8 Gráfico polar de la velocidad de onda P (m/s) en la 3ª etapa / 2ª parte.

En este caso también el limo M2 expone velocidades mayores, además en este material se percibe una variación mayor respecto a las series con diferentes cantidades de placas. Los materiales M1 y M2 muestran velocidades por encima del valor de referencia, en cambio la arena M3 muestra un rango intermedio con el valor referencia, esta diferencia es asumida por una mejor adherencia de las placas con los materiales finos estableciéndose una continuidad aparente. Otro aspecto interesante es que las velocidades máximas no se presentan a los 90° como se observó en las placas de concreto, en este caso se presentan en

ángulos de 45° por lo que los gráficos presentan curvaturas inversas a las de la primera parte de esta etapa.

En ambos gráficos es evidente el desfase de los valores con seis placas respecto al cumulo de datos, inclusive por debajo de los valores con dos placas, en los tres materiales (más evidente en la arcilla M1), esto indica que la inclusión de dos y cuatro placas en la matriz inducen una velocidad mayor dejando de lado que propiamente son discontinuidades y por naturaleza afectan negativamente la propagación de las ondas, y con la inclusión de seis placas la cantidad de discontinuidades generadas contrarresta la inducción de velocidad por el material con mayor respuesta sísmica, también existe la posibilidad de atribuir cierta parte de esta variación al error humano en cuanto a la manipulación del material ya que fue la configuración que presento mayor dificultad para la compactación entre placas.

Mediante el grafico de interacción de variables en la Fig. C.5 y la Fig. C.7, y el grafico de efectos principales en la Fig. C.6 y Fig. C.8 podemos destacar un comportamiento similar en ambas partes de la etapa en cuanto a la significancia de la cantidad de placas y el ángulo de giro, confirmando lo establecido en las primeras dos etapas, que la orientación de giro no es significativa y que el tipo de material es la variable con mayor influencia tanto el de la matriz como el de las placas.

El parámetro de anisotropía de la onda P (ε) y el porcentaje de anisotropía (%) presentados en la Tabla C.3 y Tabla C.4 se muestran prácticamente a la mitad que en las etapas anteriores (el porcentaje de anisotropía promedio se reduce al 9.4% en la primera parte y a 7.3% en la segunda parte), significa que la longitud de la muestra y la separación de las placas presentan claramente una variable en el modelo.

Además en la segunda parte se muestran los valores más pequeños indicando que la adherencia o rugosidad también juega un papel importante. Por otro lado, los valores máximos en los ángulos de 45° se ven reflejados en valores positivos en el parámetro de elipticidad (δ).

6.1.2. Ensayes de propagación de ondas en laboratorio

6.1.2.1. Ensayes triaxiales

En la Fig. 6.10 se presenta el gráfico esfuerzo - deformación con las curvas obtenidas de las probetas sometidas a ensayes triaxiales rápidos de ambos materiales. Los cuales presentan comportamientos típicos, en condición saturada se detuvo la prueba al exceder el 20% de deformación axial y presenta un esfuerzo relativamente pequeño por la misma condición de saturación y una deformación en forma de barril bastante común, la Fig. 6.9 muestra las probetas deformadas después de ser sometidas al ensaye triaxial.



Fig. 6.9 Fotografías de las probetas deformadas y agrietadas después del ensaye triaxial.

La Fig. 6.11 muestra las curvas de reducción de módulos. Los resultados que se presentan tienen un mejor ajuste en el limo M2 pero ambas presentan la tendencia general expuesta por Benz (2007), pero en un rango de deformación muy corto (mayores a 1×10^{-3}), común en las pruebas convencionales sin medidores especializados. Mediante la ecuación hiperbólica presentada por Stokoe et al. (1999):

$$\frac{G}{G_0} = \frac{1}{\left(1 + \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_r}\right)^\alpha\right)} \quad (6.1)$$

Donde ε_r representa el valor en donde la relación de módulos es de 0.5 y α un factor de curvatura, es posible realizar la curva de reducción de módulos en cada material, utilizando $\alpha = 2.2$.

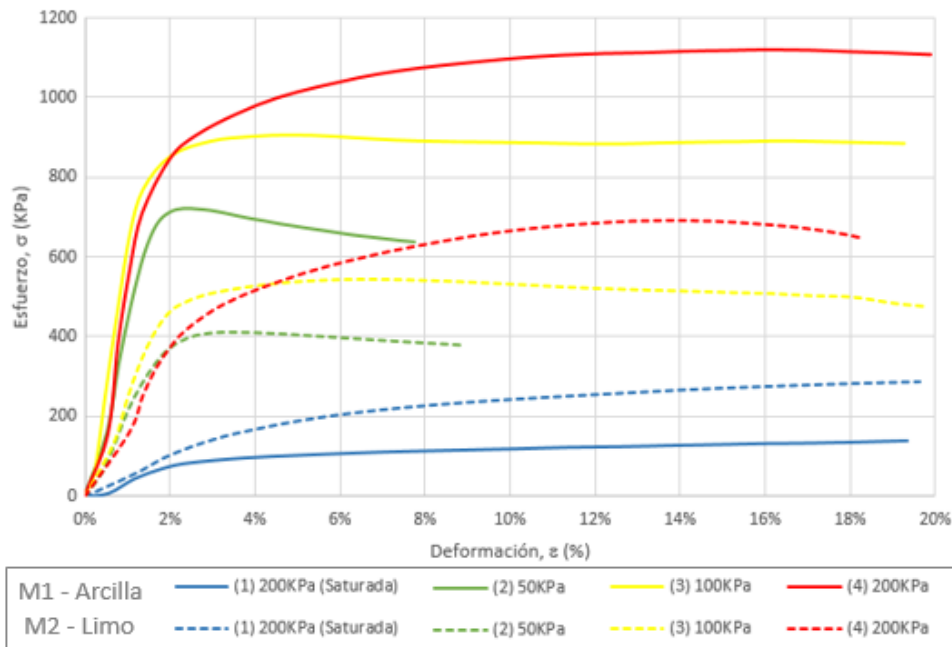


Fig. 6.10 Gráficos del esfuerzo – deformación en los materiales M1 y M2.

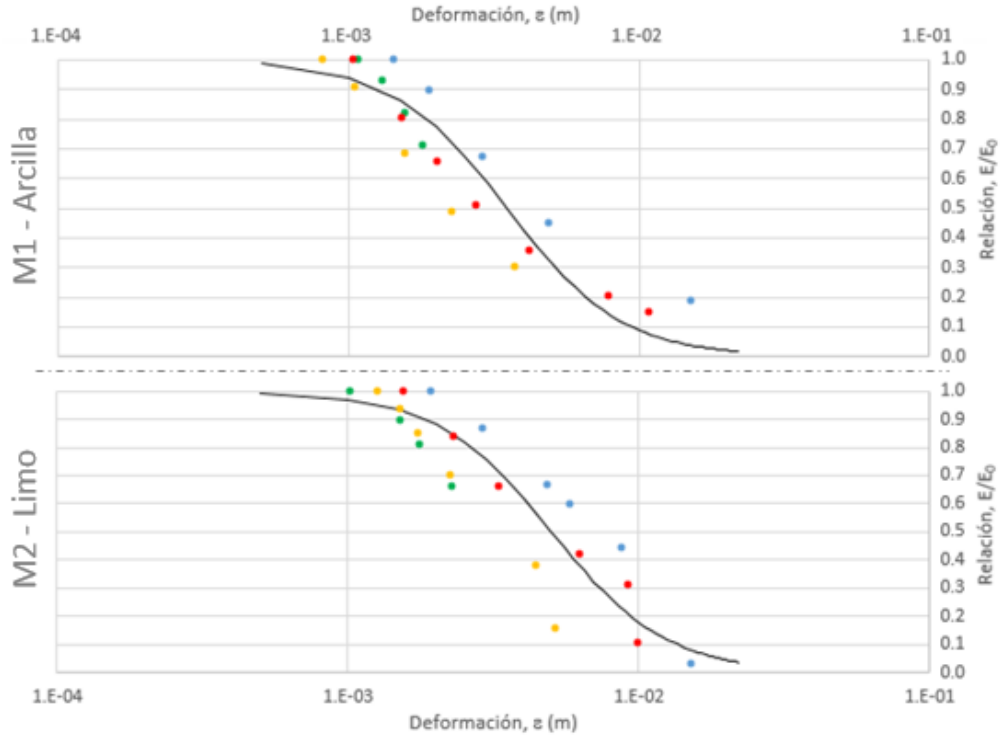


Fig. 6.11 Curva de reducción de módulos en materiales M1 y M2.

6.1.2.2. Análisis de la propagación de ondas

En cuanto a la velocidad de propagación de la onda de compresión en las probetas ensayadas, la Fig. 6.12 ilustra los resultados de las mediciones con el geófono de 55KHz en un gráfico de barras, mientras que la Fig. 6.13 ilustra las mediciones con el geófono de 100Hz, mostrando líneas discontinuas con el promedio de las velocidades en las cuatro probetas, antes y después del estado límite.

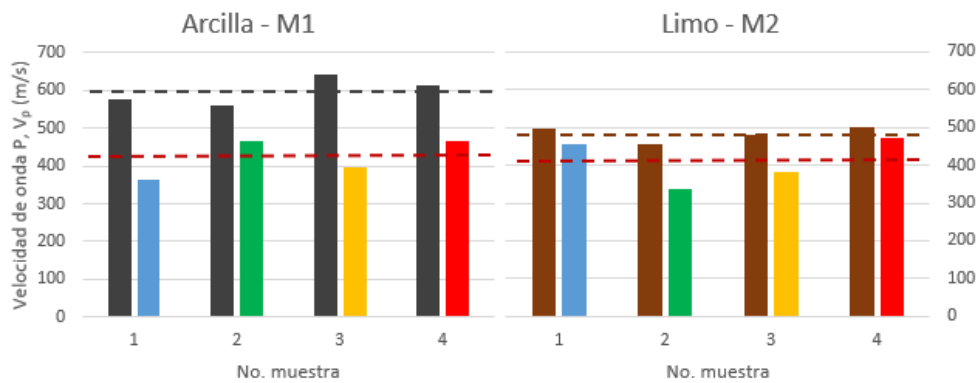


Fig. 6.12 Velocidad de onda P medida con geófono de 55KHz antes y después de la falla.

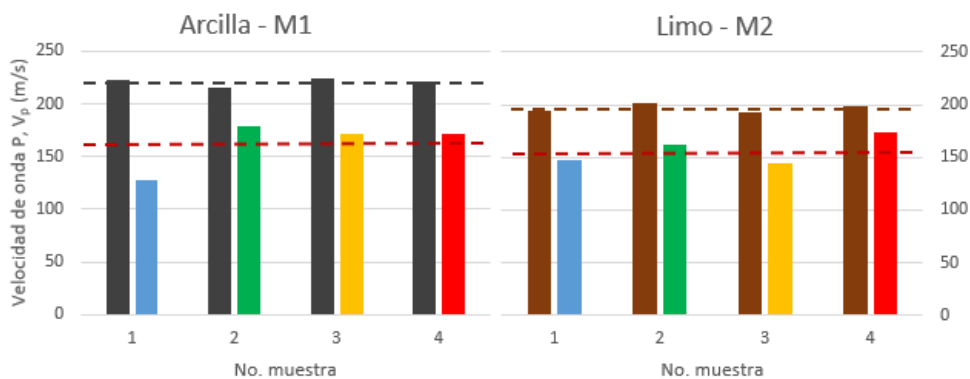


Fig. 6.13 Velocidad de onda P medida con geófono de 100Hz antes y después de la falla.

Utilizando el geófono de 55KHz en el primer material se obtuvo una velocidad inicial de 598m/s y una velocidad final de 424m/s que representa una reducción del 29%, en cuanto al segundo material una velocidad inicial de 483m/s y una velocidad final de 411m/s equivalentes a una reducción del 15%. Estas reducciones son obvias pues la estructura del suelo fue debilitada por la deformación volumétrica y el agrietamiento generado al someterse al esfuerzo desviador.

Ahora bien, utilizando el geófono de 100Hz en la arcilla M1 se obtuvo una velocidad inicial de 221m/s y una velocidad final de 162m/s representando una reducción del 27%, una reducción de velocidad muy similar pero en valores menores. En el limo M2 se obtuvo una velocidad inicial de 197m/s y una velocidad final de 157m/s siendo una reducción del 20%, también una disminución similar pero en valores menores.

Estas diferencias tan significativas en la magnitud de la velocidad de onda son como ya se mencionó en la segunda etapa del experimento de laboratorio porque la distancia entre fuente y receptor es muy corta y las únicas señales coherentes que se alcanzan a desarrollar son las de alta frecuencia por lo que el geófono adecuado es el de 55KHz, para el geófono de 100Hz se perciben señales indeseables que perturban la lectura, de manera que se confirma la importancia que tiene la elección del equipo adecuado para obtener resultados aceptables.

No se observa una relación de la velocidad de propagación con el esfuerzo desviador o con la condición de saturación, en este caso las condiciones de humedad, peso específico y naturaleza del material son las características que afectan la variación de velocidades.

6.1.3. Micrografía electrónica de barrido

Se realizaron micrografías electrónicas de barrido en muestras inalteradas de arcilla M1 y limo M2, la arena M3 simplemente fue descartada por su estructura suelta, ya que el

objetivo de este procedimiento es identificar alguna orientación preferencial en la estructura del suelo.

La Fig. 6.14 y la Fig. 6.15 muestra las fotografías obtenidas de la muestra de arcilla y limo respectivamente a seis diferentes acercamientos (40x, 500x, 1000x, 2500x, 5000x y 10000x) lo que nos permite observar claramente zonas extremadamente pequeñas conforme avanzamos (aproximadamente longitudes mayores a 2mm, 200 μ m, 100 μ m, 30 μ m, 20 μ m y hasta 10 μ m).

En las micrografías de la muestra de arcilla se observan líneas semi paralelas verticales aparentando un alineamiento, sin embargo se cree que son las líneas de tallado generadas durante el labrado de las pastillas al prepararlas. De igual manera en las micrografías de la muestra de limo se observa un patrón de líneas paralelas semi horizontales, sin embargo estas si son observables prácticamente en todas las fotografías lo que nos indica que efectivamente son las líneas de tallado, las cuales son más evidentes puesto que el tamaño de partículas de limo es mayor a las partículas de arcilla.

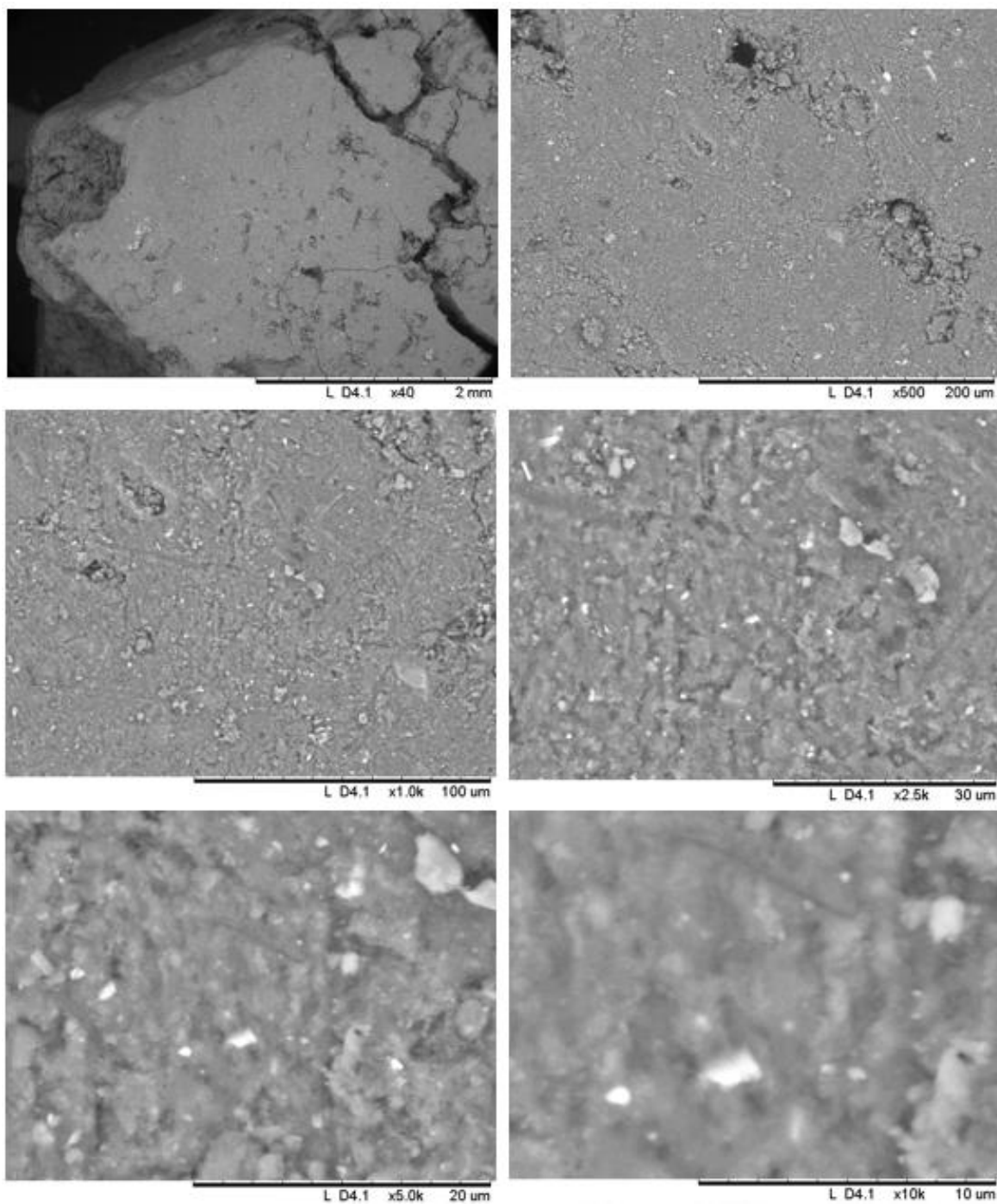


Fig. 6.14 Micrografías electrónicas de barrido de una muestra de arcilla M1 (40x – 10000x).

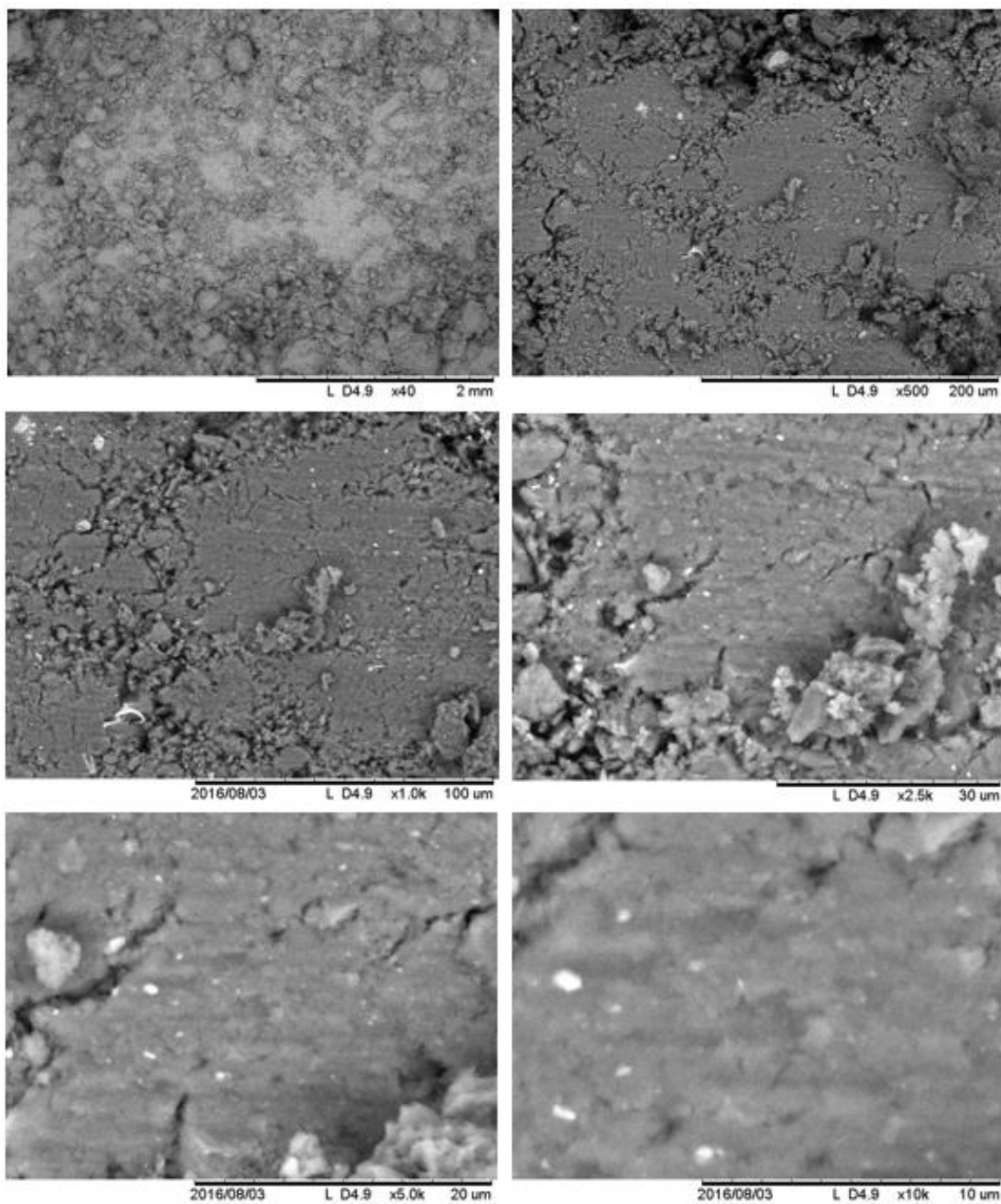


Fig. 6.15 Micrografías electrónicas de barrido de una muestra de limo M2 (40x – 10000x).

6.2. Experimentación dirigida

La experimentación dirigida, se refiere a aquella que ataca directamente la problemática mencionada en esta investigación, y consiste en el análisis de datos obtenidos en campo mediante la metodología propuesta.

6.2.1. Ensayes de propagación de ondas en campo

Como se mencionó anteriormente se realizaron trabajos en cinco lugares con características distintas por lo que cada uno de estos sitios se expone por separado para describir y discutir de manera más detallada cada caso.

6.2.1.1. Resultados y análisis del primer sitio de estudio (S1)

El primer sitio estudiado se trata de un terreno utilizado para el cultivo agrícola por lo que corresponde a suelos arcillosos y limosos con gran cantidad de materia orgánica en una disposición aparentemente horizontal, sin embargo el interés en este lugar se debe a una grieta de tensión de gran dimensión con desnivel que pasa por un costado del campo de cultivo, causada por la sobre explotación de los mantos acuíferos de esta zona. En este lugar se realizó un sondeo perpendicular a la grieta conformado por dos tendidos independientes que corren de Oeste a Este, y 3 sondeos paralelos a la grieta de Sur a Norte, el primero de ellos sobre el campo de cultivo, el segundo a un costado cercano a la grieta y el ultimo sobre el camino en terreno más firme.

La Fig. 6.16 y la Fig. 6.17 muestran los perfiles de velocidades de corte y de compresión respectivamente los cuales presentan una semejanza en sus tendencias, donde se puede destacar que en la parte central del perfil existe una anomalía con velocidades menores y evidenciando la presencia de una discontinuidad, en este caso es obvio que se trata de la grieta de tensión que ya fue reconocida en campo, además se denota en la parte superior del perfil velocidades menores del lado Oeste en donde se encuentra el campo de cultivo y velocidades mayores en el lado Este correspondiente al camino.

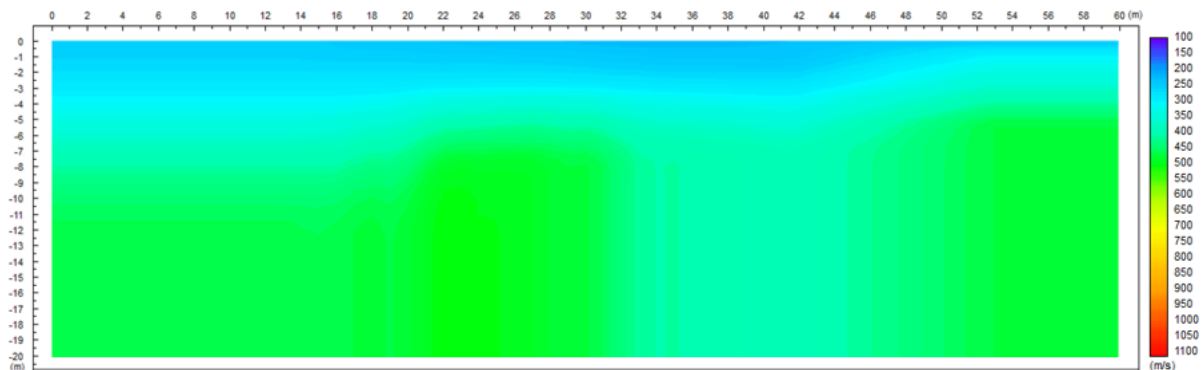


Fig. 6.16 Perfil de velocidades de corte aparentes del tendido 1000-2000 en el primer sitio S1.

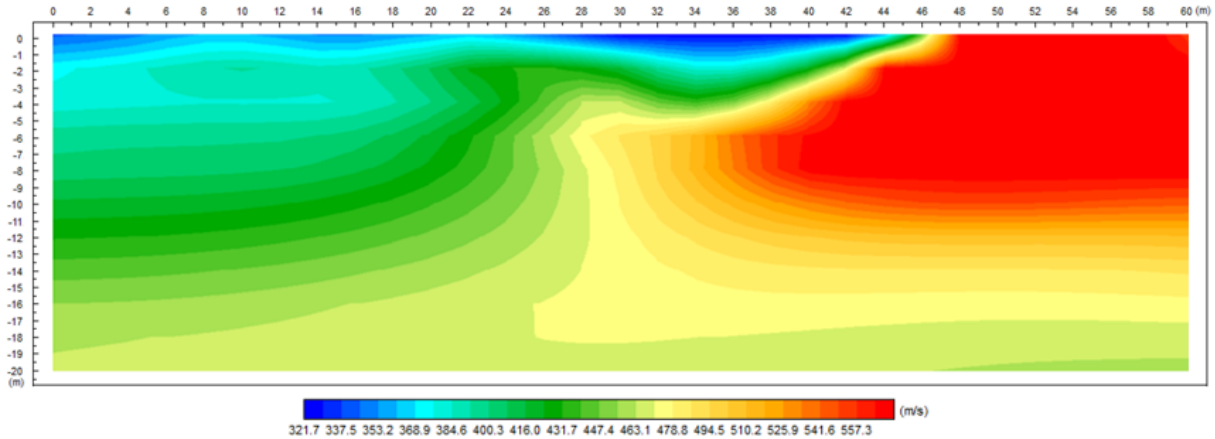


Fig. 6.17 Perfil de velocidades de compresión del tendido 1000-2000 en el primer sitio S1.

La Fig. 6.18 y la Fig. 6.19 por su parte muestran los perfiles de velocidades de corte y de compresión del tendido central, si bien estos perfiles no ilustran tendencias similares, este fenómeno puede ser explicado por la cercanía del tendido con la grieta y las irregularidades que esta conlleva, tanto en su geometría como en los materiales que contiene (relleno de materiales heterogéneos y poco compactos con presencia de huecos y raíces), puesto que se realizó el tendido paralelo a ella y a menos de un metro de su evidencia en superficie, lo que de manera genera se representa con velocidades de propagación de onda relativamente menores y anomalías.

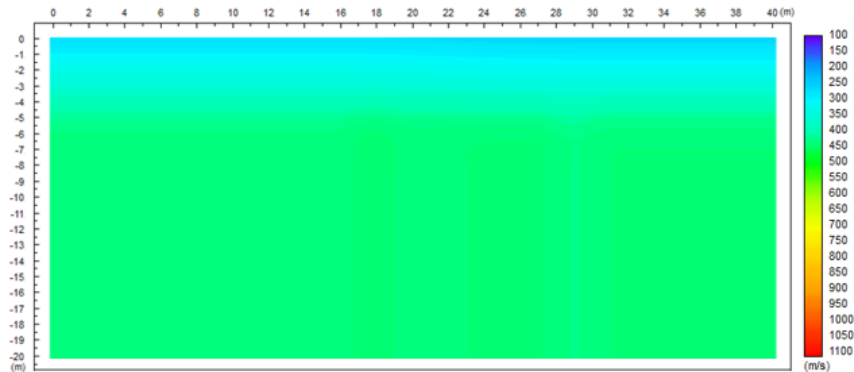


Fig. 6.18 Perfil de velocidades de corte aparentes del tendido 2050 en el primer sitio S1.

Ahora bien la Fig. 6.20 presenta el perfil de velocidades de corte aparentes en el tendido sobre el campo agrícola y como era de esperarse se evidencio un espesor considerable con bajas velocidades y ligeras diferencias que nos representan rigideces diferentes en un extremo y otro del tendido realizado.

Capítulo 6 – Resultados y discusión

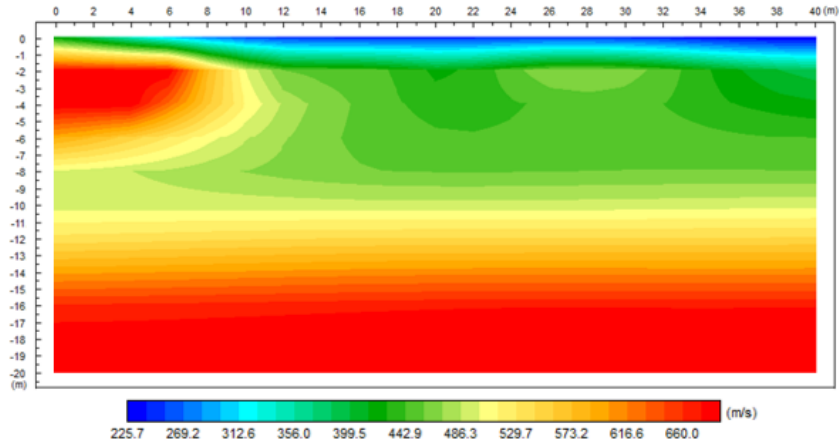


Fig. 6.19 Perfil de velocidades de compresión del tendido 2050 en el primer sitio S1.

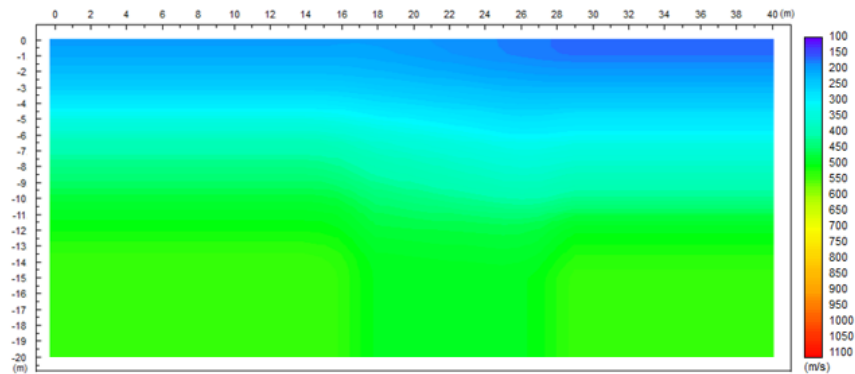


Fig. 6.20 Perfil de velocidades de corte aparentes del tendido 1050 en el primer sitio S1.

De manera análoga al tendido anterior, la Fig. 6.21 muestra el perfil de velocidades de corte aparentes en el tendido al Este de la grieta sobre el camino de terracería con rigidez relativa evidente la cual se demuestra al comparar la figura anterior con esta.

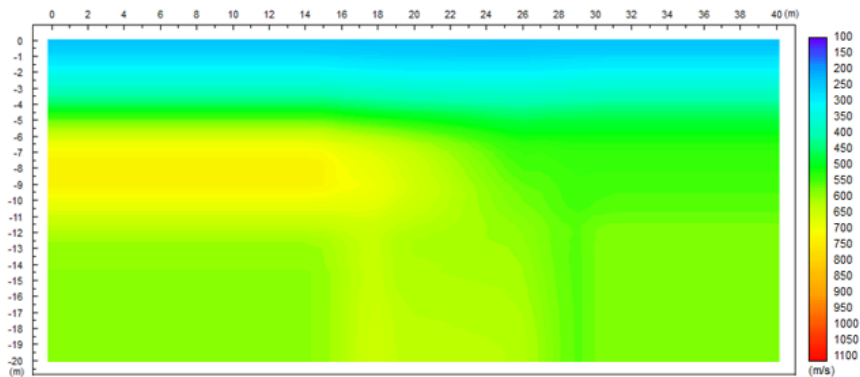


Fig. 6.21 Perfil de velocidades de corte aparentes del tendido 1075 en el primer sitio S1.

De manera general para facilitar la comprensión de la distribución de velocidades o bien puede decirse que de rigideces se muestra en la Fig. 6.22 un diagrama en tres dimensiones con los perfiles de velocidad de corte previamente mostrados. Puede observarse que en distancias cortas pueden cambiar drásticamente las propiedades de los materiales geológicos así como en una u otra dirección.

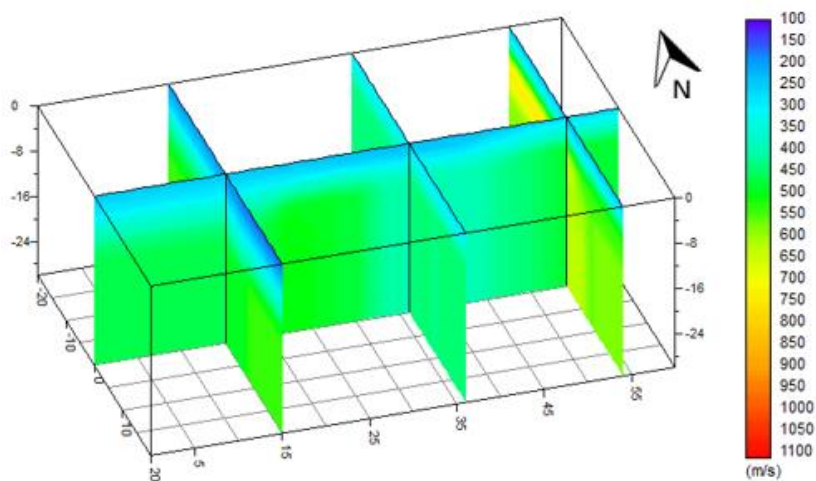


Fig. 6.22 Diagrama 3D de las velocidades de corte aparentes en el primer sitio S1.

La Fig. 6.23 y la Fig. 6.24 comparan un registro sísmico real obtenido en campo con un sismograma sintético creado considerando una serie de estratos de diferente espesor y velocidad extraídos de los perfiles obtenidos por las dos diferentes técnicas de análisis sísmico. La primera figura muestra el correspondiente al primer disparo del tendido (1000-2000) perpendicular a la grieta y el segundo corresponde al primer disparo del tendido central (2050) paralelo a la grieta.

Se puede observar una apariencia general bastante similar en el comparativo de cada figura, sin embargo, al comparar más detalladamente la secuencia de ondas se pueden resaltar varias diferencias. Los sismogramas sintéticos tienen una armonía clara y no presentan registros de altas frecuencias, de manera general se ven más limpios (ideales), estas diferencias pudieran ser justificadas por el ruido ambiental, sin embargo, no es suficiente, estos cambios o anomalías registradas son evidencia de la heterogeneidad del terreno y la presencia de discontinuidades graduales o drásticas. Además al comparar ambas figuras evidentemente se revela una diferencia significativa en la tendencia general representando propiedades y espesores de los materiales geológicos completamente distintos en una y otra dirección, es decir un comportamiento anisotrópico.

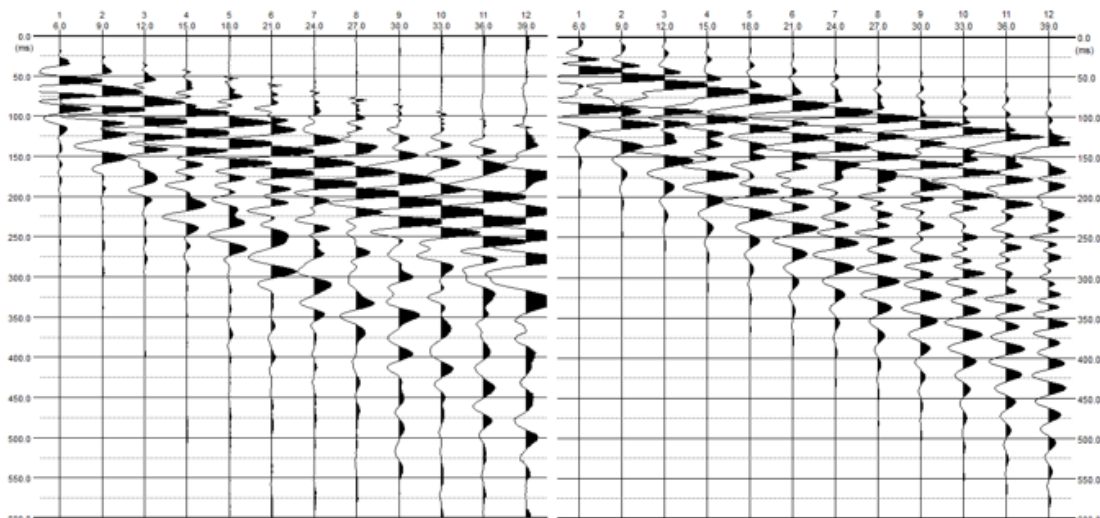


Fig. 6.23 Sismograma real y sintético respectivamente, correspondientes al primer disparo del tendido 1000-2000 en el primer sitio S1.

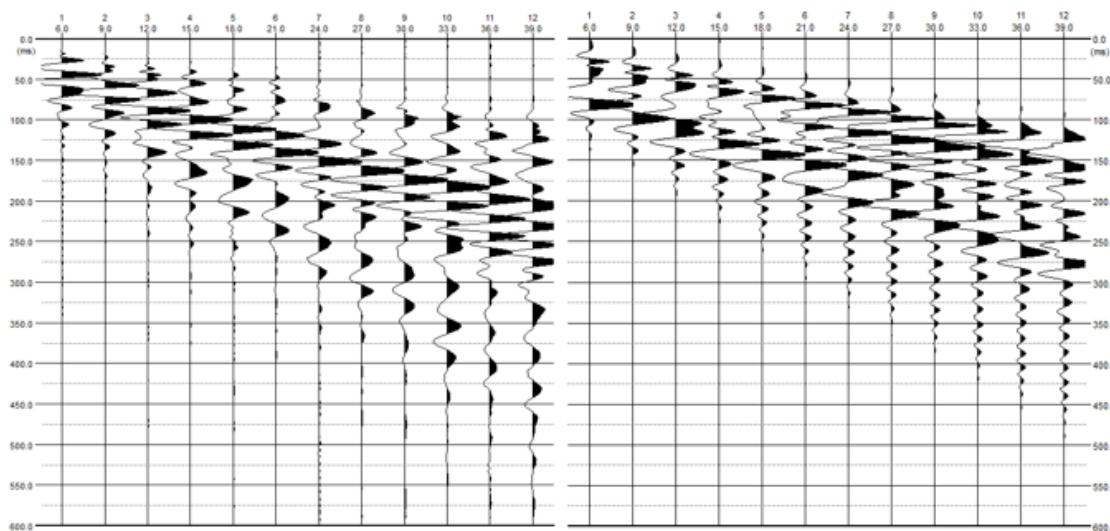


Fig. 6.24 Sismograma real y sintético respectivamente, correspondientes al primer disparo del tendido 2050 en el primer sitio S1.

6.2.1.2. Resultados y análisis del segundo sitio de estudio (S2)

El segundo sitio estudiado también se trata de una secuencia de suelos aparentemente horizontales con una grieta de tensión por sobre explotación de los mantos acuíferos perfectamente localizada en superficie, en este caso no existe un desnivel, solo el agrietamiento con diferentes espesores y una profundidad desconocida ya se encuentra azolvada y en algunos lugares con rellenos antropogénicos.

La Fig. 6.25 y la Fig. 6.26 muestran los perfiles de velocidad de corte y de compresión respectivamente del tendido (4000) perpendicular a la grieta en dirección Oeste – Este, en ambas figuras existe una anomalía en la parte central sin embargo por las características de los materiales y las diferentes técnicas empleadas dicha anomalía se presenta de manera distinta, en el primer perfil se observa una zona de menor velocidad a partir de tres o cuatro metros de profundidad, por lo que respecta al segundo perfil se observa una depresión en las capas intermedias entre dos y siete metros, si bien en este caso no se logra caracterizar de manera precisa la anomalía, es claro que se logra presenciar una discontinuidad y es perfectamente relacionable con lo observado en campo.

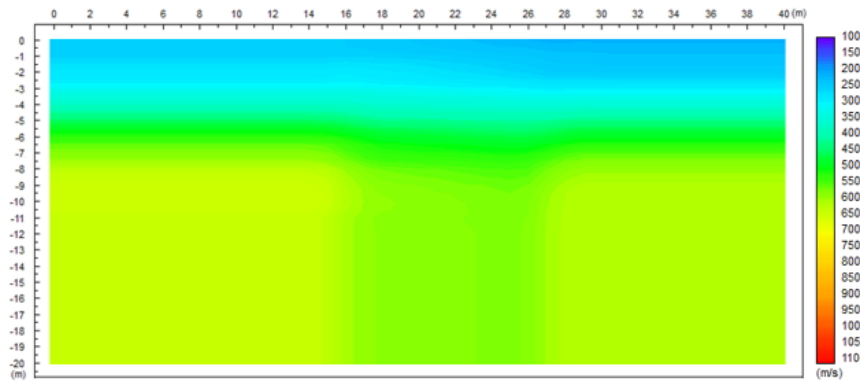


Fig. 6.25 Perfil de velocidades de corte aparentes del tendido 4000 en el segundo sitio S2.

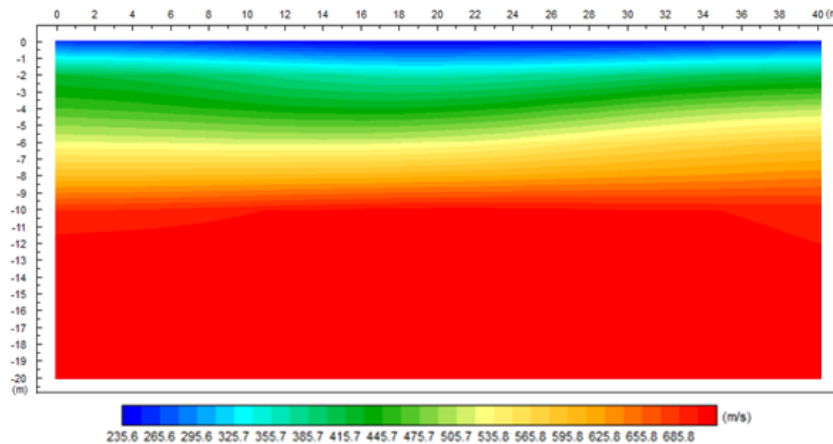


Fig. 6.26 Perfil de velocidades de compresión del tendido 4000 en el segundo sitio S2.

La Fig. 6.27 y la Fig. 6.28 muestran análogamente los perfiles correspondientes al tendido 4300 paralelo a la grieta a pocos metros al Oeste de esta. Estos perfiles muestran un espesor similar con bajas velocidades el cual se potencializa ligeramente hacia el Norte y una distribución irregular en las capas posteriores esto es perfectamente justificable como en el sitio anterior por la cercanía a la grieta y las irregularidades que conlleva.

Capítulo 6 – Resultados y discusión

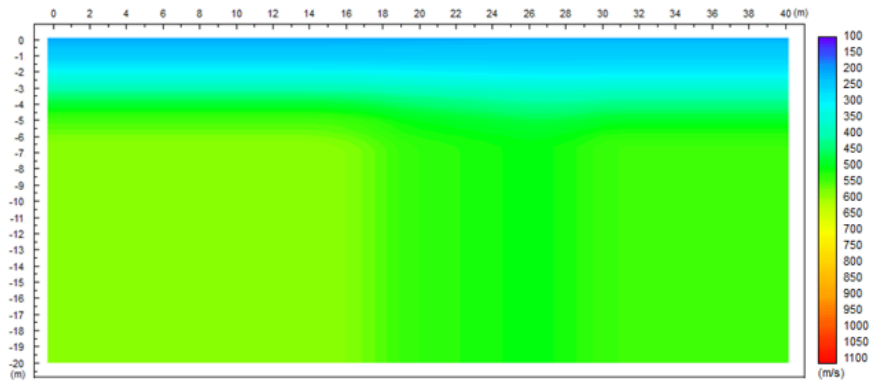


Fig. 6.27 Perfil de velocidades de corte aparentes del tendido 4300 en el segundo sitio S2.

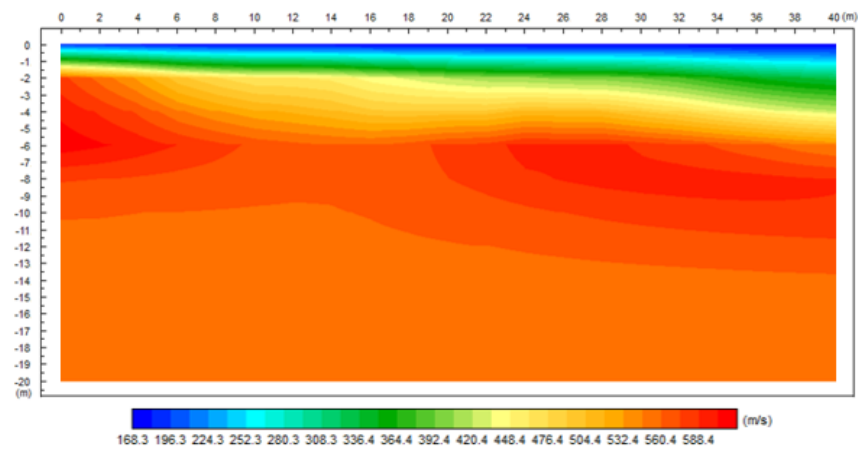


Fig. 6.28 Perfil de velocidades de compresión del tendido 4300 en el segundo sitio S2.

Para visualizar las anomalías descritas anteriormente de una mejor manera se presenta en la Fig. 6.29 un diagrama en tres dimensiones con los perfiles de velocidad de corte.

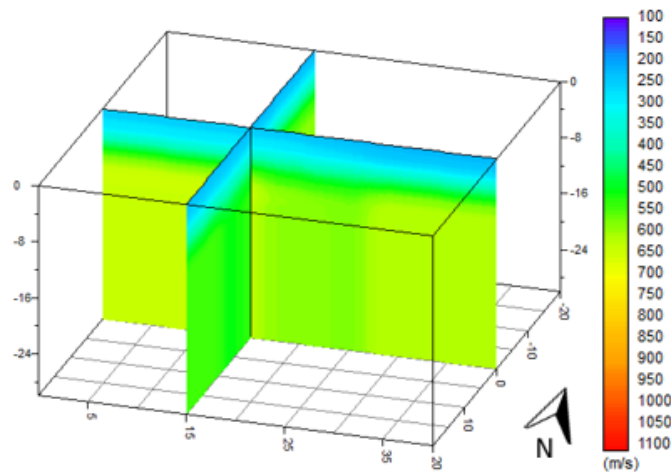


Fig. 6.29 Diagrama 3D de las velocidades de corte aparentes en el segundo sitio S2.

Dando continuidad a la presentación de resultados de los análisis realizados la Fig. 6.30 presenta un sismograma real correspondiente al primer disparo del tendido Oeste – Este y un sismograma sintético elaborado a partir de los perfiles de velocidades considerando una serie de estratos ideales y la Fig. 6.31 compara los sismogramas en el tendido en la otra dirección.

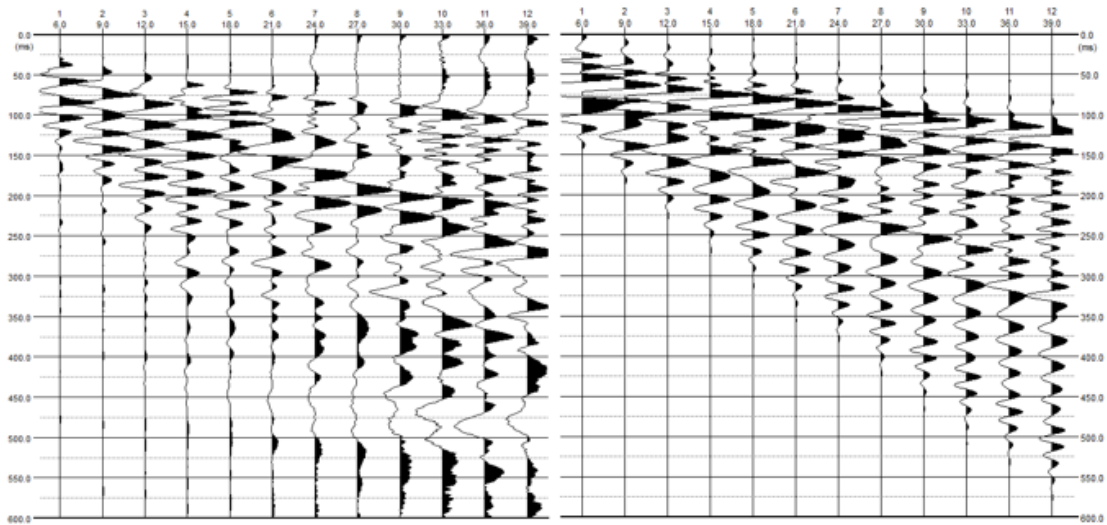


Fig. 6.30 Sismograma real y sintético respectivamente, correspondientes al primer disparo del tendido 4000 en el segundo sitio S2.

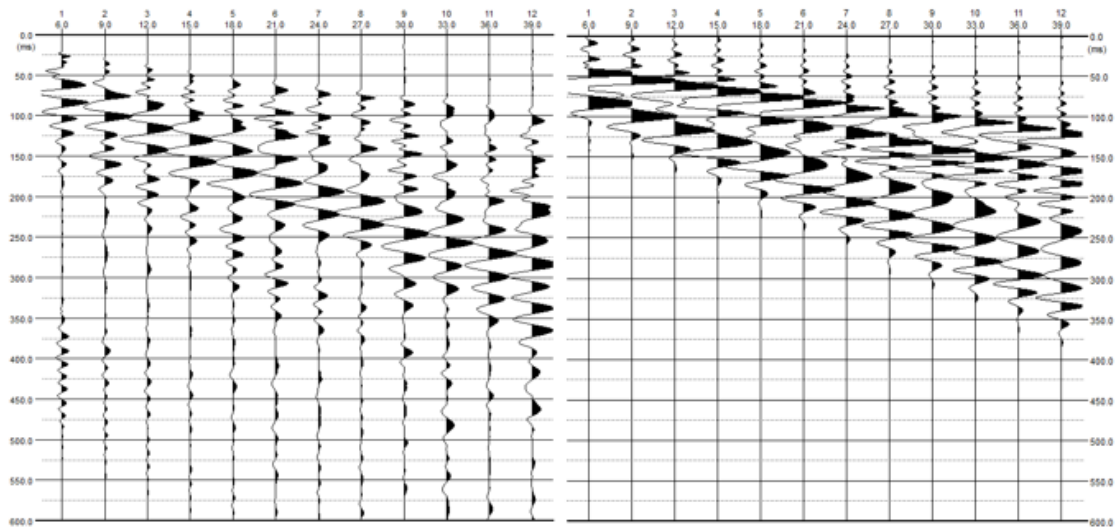


Fig. 6.31 Sismograma real y sintético respectivamente, correspondientes al primer disparo del tendido 4300 en el segundo sitio S2.

Existen claras diferencias en estas figuras, nótese que en los sismogramas reales específicamente en los geófonos 7-12 en la primera figura y del 1-4 en la segunda figura, existen registros fuera del paquete de ondas sísmicas típicas que no corresponden, y

claramente son debido al ruido ambiental, sin embargo las demás diferencias que se observan son causa de las discontinuidades y naturaleza heterogénea de los materiales. Y al comparar una figura con otra, perfectamente se destaca un comportamiento anisótropo pues los sismogramas no presentan similitud.

6.2.1.3. Resultados y análisis del tercer sitio de estudio (S3)

El tercer sitio estudiado corresponde a una secuencia aparentemente horizontal de suelos finos sin ninguna discordancia evidente. La Fig. 6.32 y la Fig. 6.33 presentan los perfiles de velocidad de corte en ambos tendidos perpendiculares entre sí, en las que se observa una capa semi horizontal de entre tres y cuatro metros con velocidades bajas en ambas figuras, pero se destacan dos puntos importantes, el espesor no es continuo y en la primer figura aparecen velocidades ligeramente mayores a profundidad.

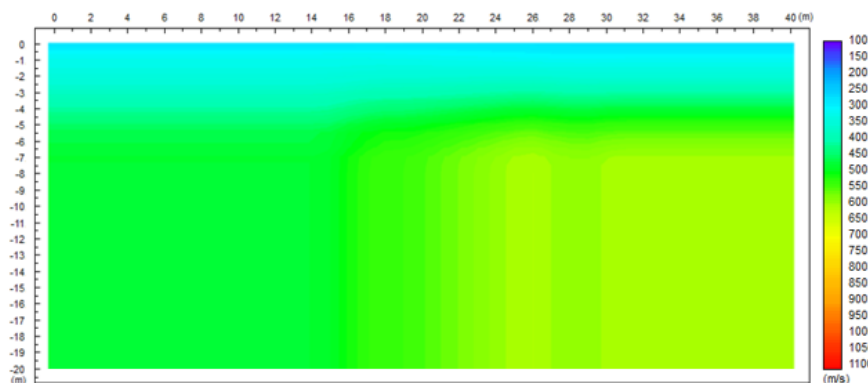


Fig. 6.32 Perfil de velocidades de corte aparentes del tendido 1000 en el tercer sitio S3.

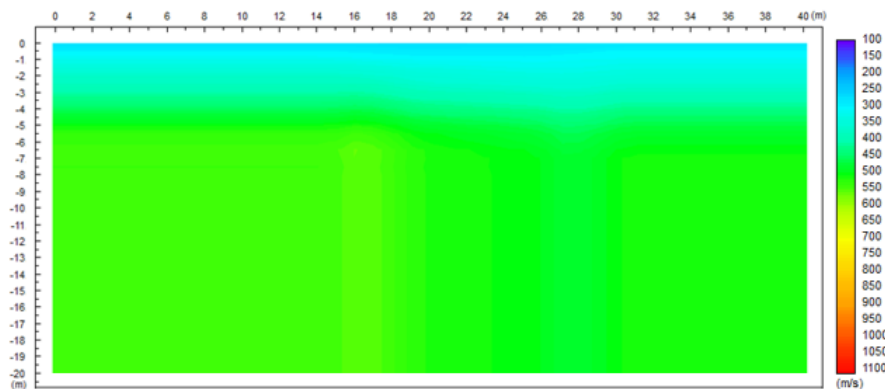


Fig. 6.33 Perfil de velocidades de corte aparentes del tendido 2000 en el tercer sitio S3.

Corroborando estas similitudes y diferencias en los perfiles anteriores, se muestran los perfiles de velocidad de compresión en la Fig. 6.34 y la Fig. 6.35, mostrando características similares y siendo más clara la diferencia de rigideces en las capas superiores.

Capítulo 6 – Resultados y discusión

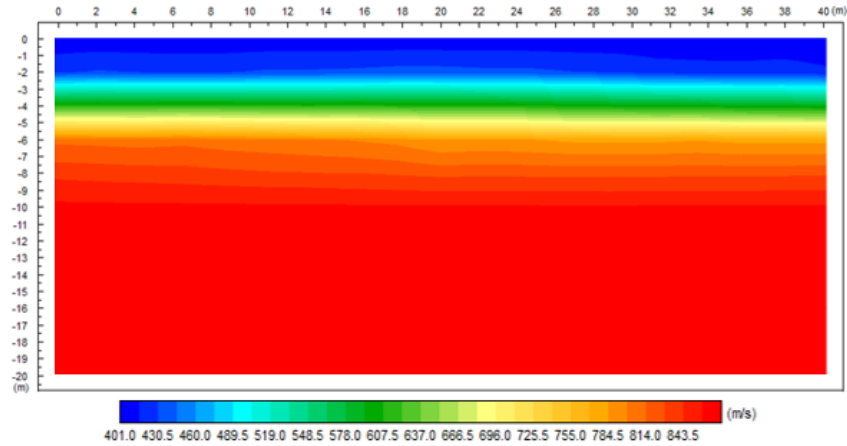


Fig. 6.34 Perfil de velocidades de compresión del tendido 1000 en el tercer sitio S3.

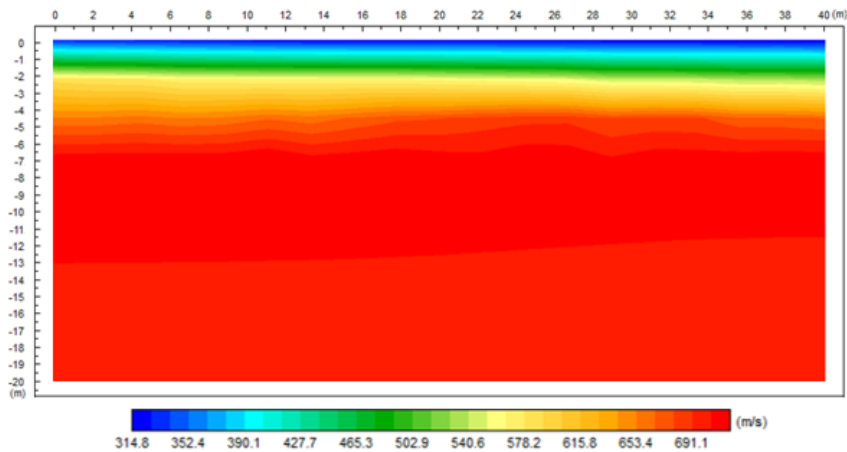


Fig. 6.35 Perfil de velocidades de compresión del tendido 2000 en el tercer sitio S3.

La Fig. 6.36 muestra el diagrama en tres dimensiones evidenciando estas diferencias.

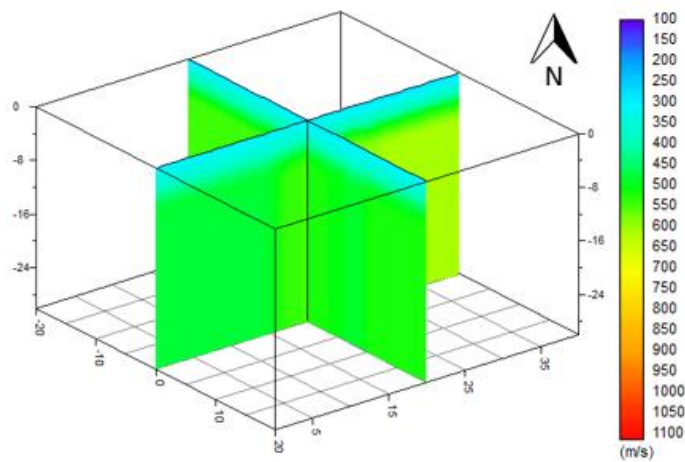


Fig. 6.36 Diagrama 3D de las velocidades de corte aparentes en el tercer sitio S3.

Realizando una comparativa en los sismogramas en diferentes direcciones tanto en el real como en el sintético se observan tendencias o secuencias ligeramente diferentes, mostrados en la Fig. 6.37 y la Fig. 6.38 demostrando que existe un comportamiento anisotrópico en el medio, el cual no hubiera sido contemplado de no haberse realizado dos tendidos perpendiculares.

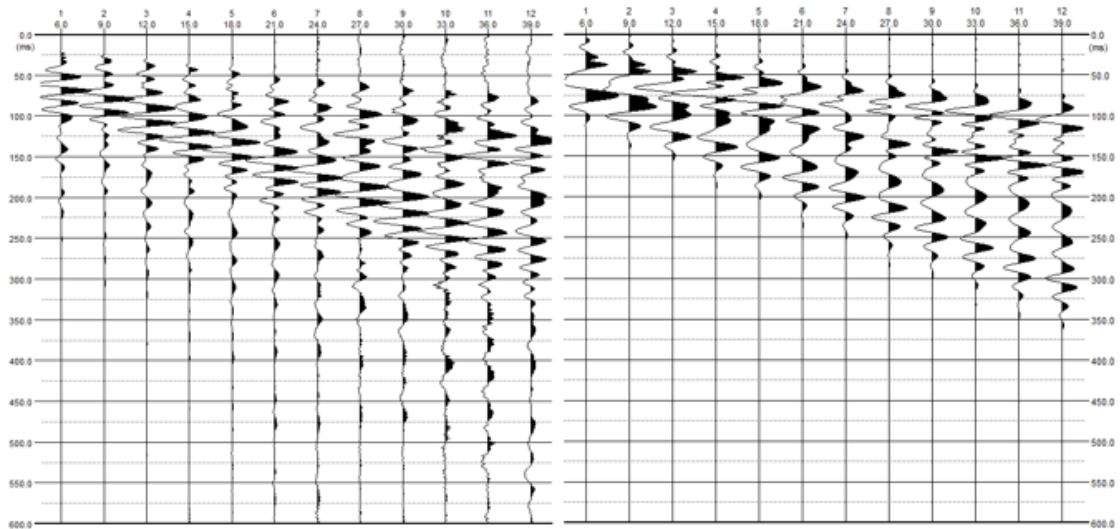


Fig. 6.37 Sismograma real y sintético respectivamente, correspondientes al primer disparo del tendido 1000 en el tercer sitio S3.

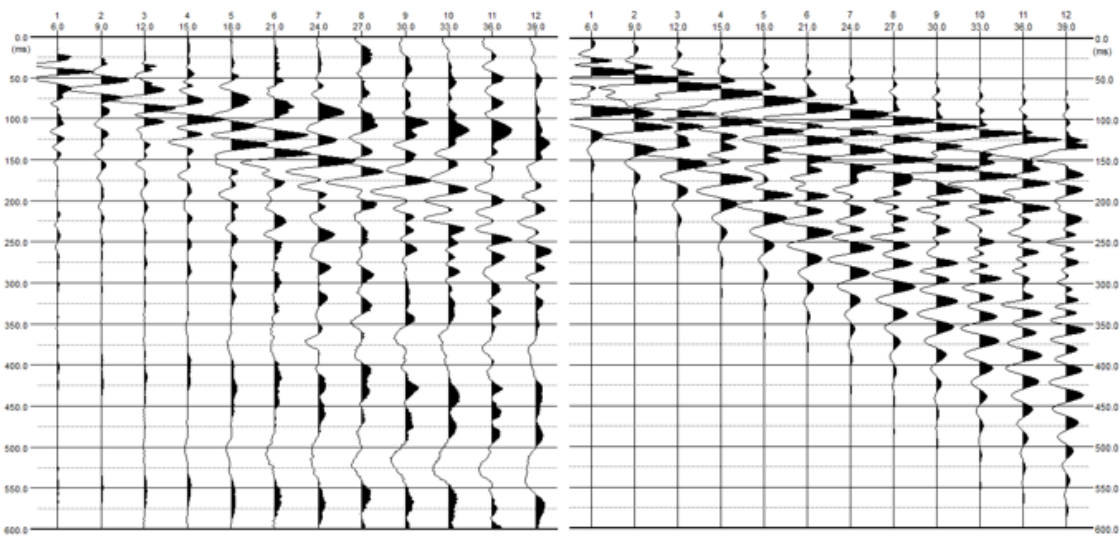


Fig. 6.38 Sismograma real y sintético respectivamente, correspondientes al primer disparo del tendido 2000 en el tercer sitio S3.

Adicionalmente a la metodología propuesta, con el fin de predecir discordancias drásticas como grietas de tensión comunes en esa zona, y corroborar el comportamiento

anisótropo que se presentó en los perfiles de velocidad, se realizaron tres tendidos más en disposición circular contiguos uno del otro con geófonos equidistantes a la fuente la cual fue localizada al centro.

La Fig. 6.39 muestra una fotografía durante el desarrollo en campo, la Fig. 6.40 muestra un sismograma de cada círculo, en donde se aprecia que el tiempo de arribo de la onda P fue prácticamente el mismo para cada geófono (las pequeñas diferencias son debido a la irregularidad topográfica del terreno) lo que nos indica que no existen discontinuidades drásticas como fallas o grietas, sin embargo la velocidad promedio que se obtuvo para cada círculo fue diferente, es decir existe una pequeña diferencia al comparar los sismogramas entre sí.



Fig. 6.39 Fotografía durante el desarrollo de los tendidos circulares en el tercer sitio S3.

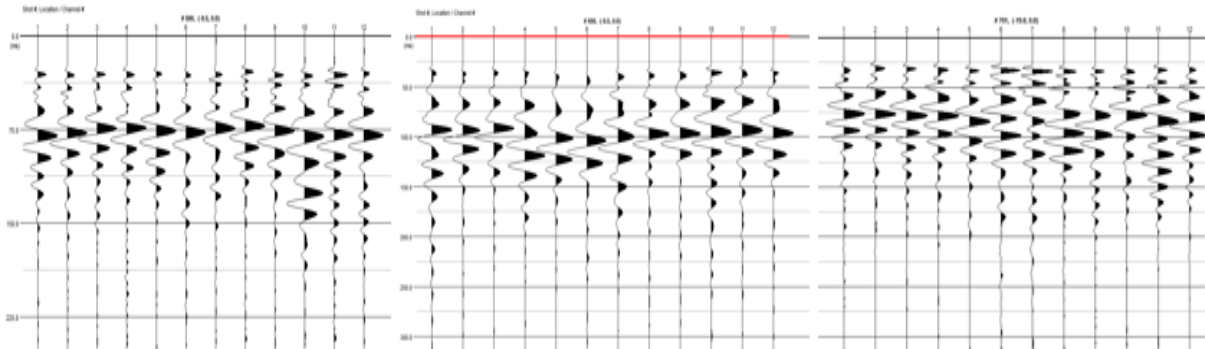


Fig. 6.40 Sismogramas de los tendidos circulares en el tercer sitio S3.

La Fig. 6.41 presenta las velocidades de compresión promedio para cada círculo en las que se puede evidenciar la diferencia entre ellas ($21 \leq V_p \leq 57\text{m/s}$), la cual se puede interpretar como una elipse de anisotropía.

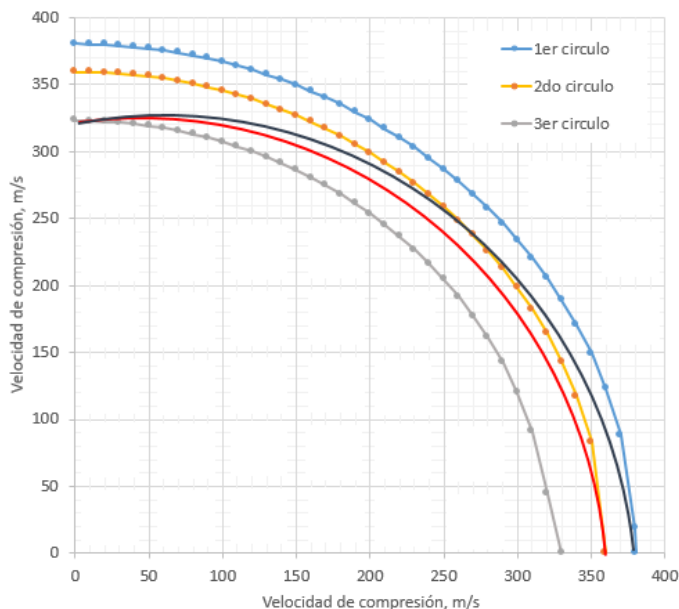


Fig. 6.41 Velocidad de compresión promedio en los tendidos circulares en el tercer sitio S3.

6.2.1.4. Resultados y análisis del cuarto sitio de estudio (S4)

El cuarto sitio evaluado también corresponde a una secuencia de suelos finos aparentemente homogéneos, isotropos y horizontales. La Fig. 6.42 y Fig. 6.43 muestra los perfiles de velocidades de corte aparentes resultado del análisis de los tendidos perpendiculares en forma de cruz, en los cuales se observa una capa de características similares con ligeras variaciones en los primeros cuatro metros aproximadamente, por debajo se presencian velocidades relativamente mayores en el primer tendido.

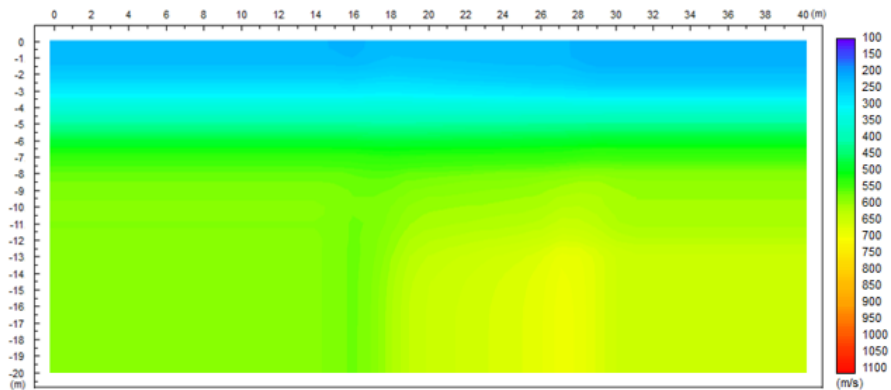


Fig. 6.42 Perfil de velocidades de corte aparentes del tendido 3000 en el cuarto sitio S4.

Capítulo 6 – Resultados y discusión

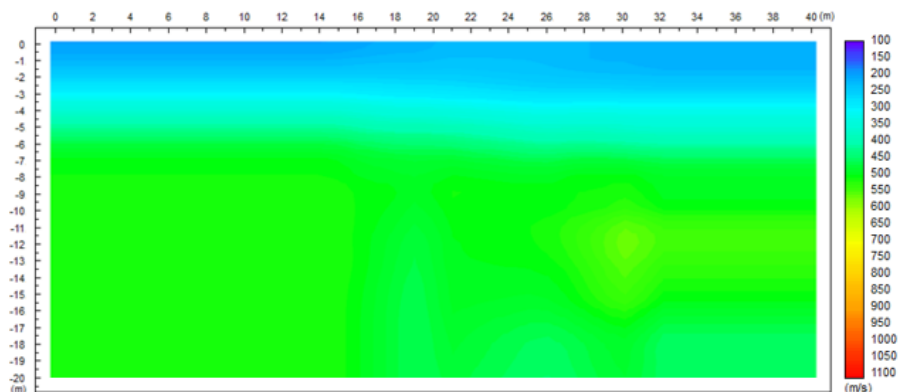


Fig. 6.43 Perfil de velocidades de corte aparentes del tendido 3050 en el cuarto sitio S4.

Corroborando las observaciones anteriores se presentan los perfiles de velocidades de compresión de ambos tendidos en la Fig. 6.44 y Fig. 6.45 demostrando la tendencia similar con velocidades menores en el segundo tendido por debajo de los cuatro metros.

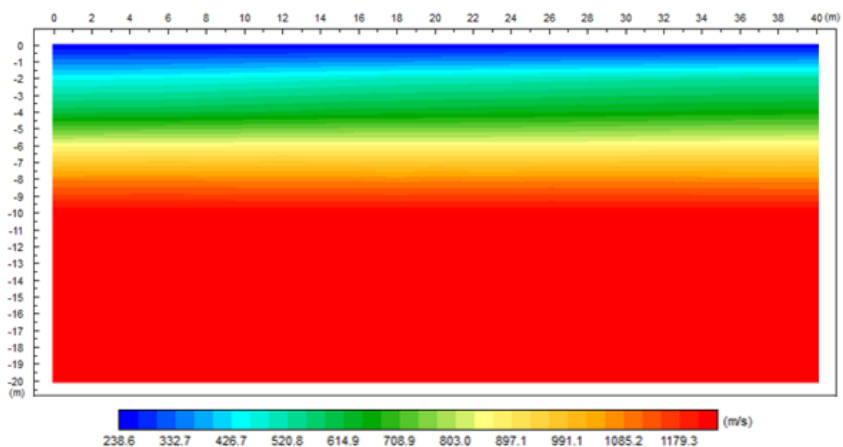


Fig. 6.44 Perfil de velocidades de compresión del tendido 3000 en el segundo sitio S4.

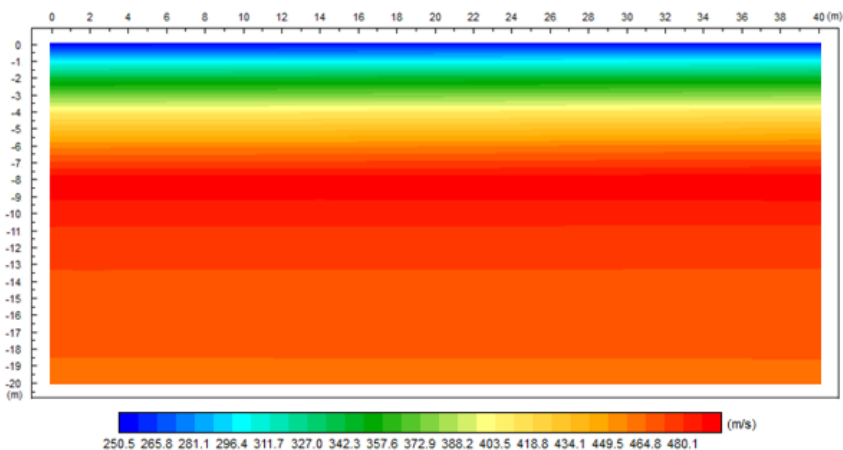


Fig. 6.45 Perfil de velocidades de compresión del tendido 3050 en el cuarto sitio S4.

Mediante el diagrama en tres dimensiones de la Fig. 6.46 es posible visualizar el entorno de mejor manera.

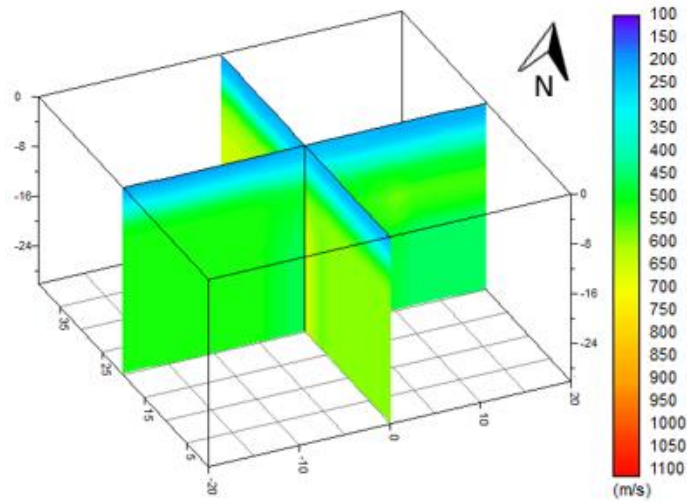


Fig. 6.46 Diagrama 3D de las velocidades de corte aparentes en el cuarto sitio S4.

Comparando los sismogramas reales en las dos direcciones mostrados en la Fig. 6.47 y la Fig. 6.48, se observa una tendencia bastante similar con pequeñas diferencias y más ruido ambiental en el segundo tendido, ahora bien si se hace la comparación correspondiente con el sismograma sintético generado a partir del modelo resumido de los perfiles de velocidad, se evidencian diferencias claras que indican la irregularidad y variabilidad del subsuelo.

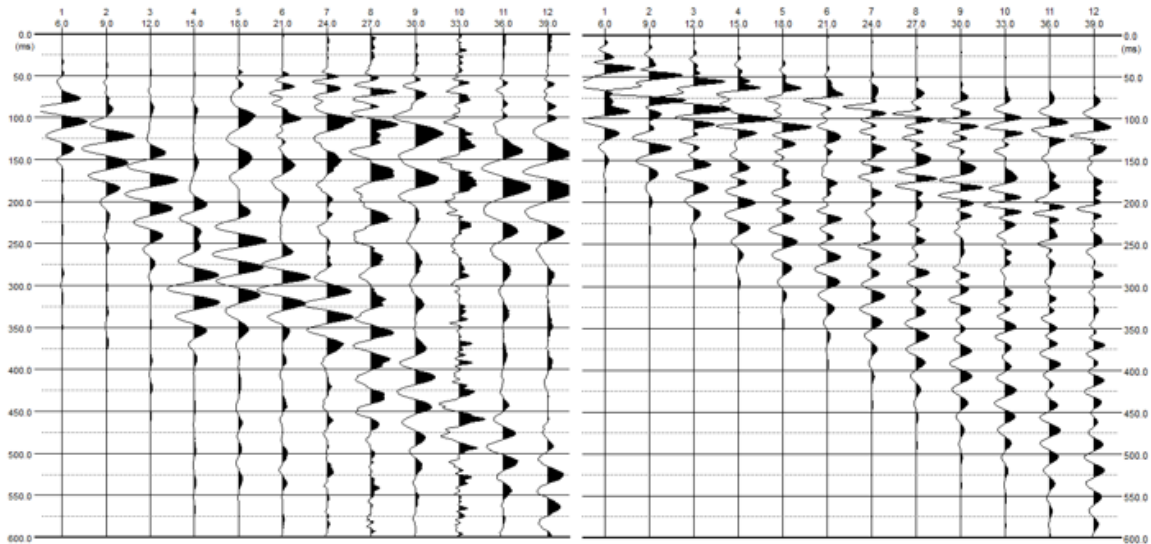


Fig. 6.47 Sismograma real y sintético respectivamente, correspondientes al primer disparo del tendido 3000 en el cuarto sitio S4.

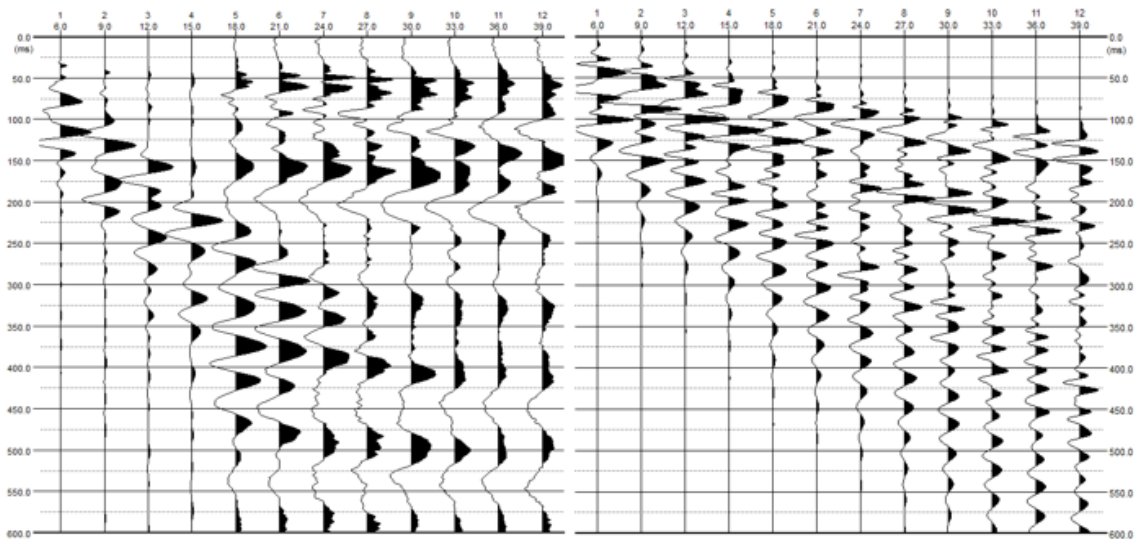


Fig. 6.48 Sismograma real y sintético respectivamente, correspondientes al primer disparo del tendido 3050 en el cuarto sitio S4.

En este sitio se experimentó con dos disposiciones diferentes pero ambas con dos tendidos perpendiculares entre sí, la primera de ellas es en forma de “L” unos metros al Este de la primera disposición en forma de cruz, además se empleó una separación mayor entre geófonos. La Fig. 6.49 y la Fig. 6.50 muestra los perfiles de velocidades de corte aparentes y la Fig. 6.51 muestra el diagrama en tres dimensiones para apreciar las diferencias y similitudes entre ambos perfiles, en donde se observa el fenómeno de inversión por un lente o estrato de mayor velocidad a los subyacentes, mucho más evidente en el segundo tendido junto con una zona del lado Noroeste con menor velocidad en capas someras.

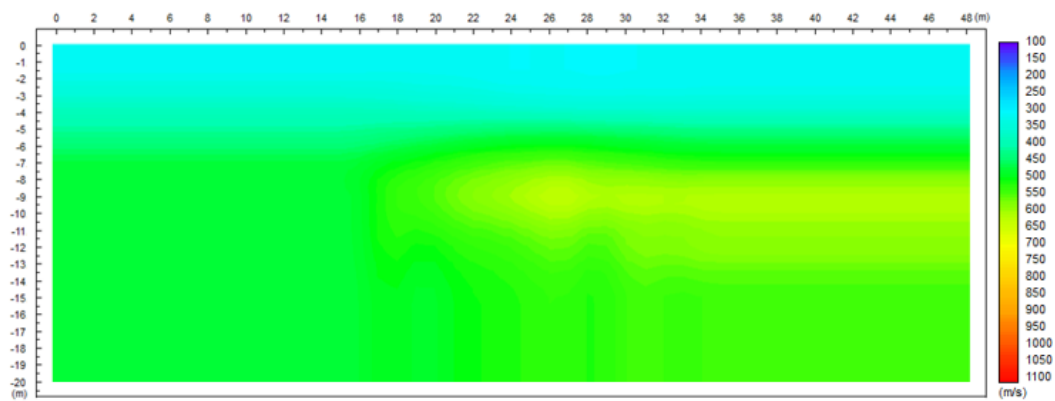


Fig. 6.49 Perfil de velocidades de corte aparentes del tendido 4000 en el cuarto sitio S4.

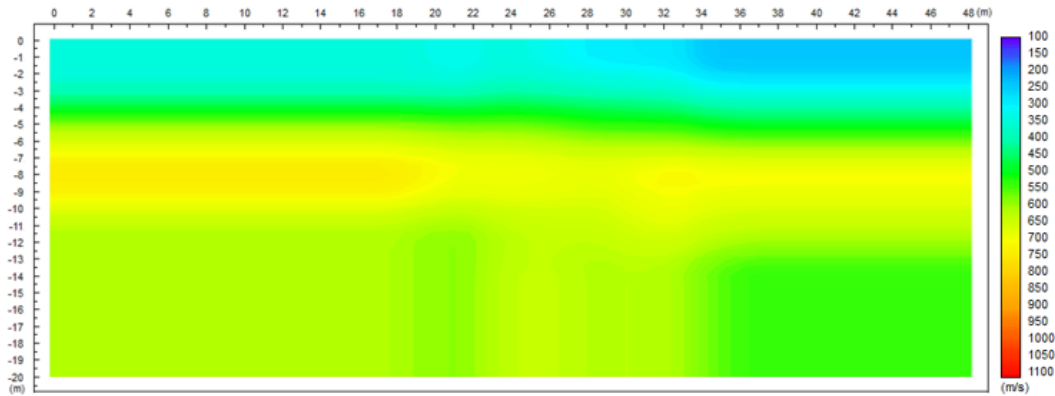


Fig. 6.50 Perfil de velocidades de corte aparentes del tendido 4050 en el cuarto sitio S4.

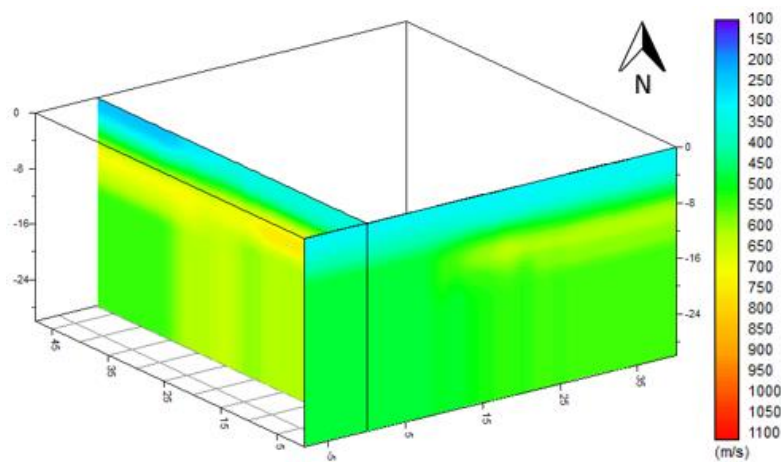


Fig. 6.51 Diagrama 3D de las velocidades de corte aparentes en el cuarto sitio S4.

La segunda disposición diferente se realizó en forma de “T” unos metros más al Este que la segunda evaluación, dentro del mismo terreno con características aparentemente idénticas. La Fig. 6.52 y la Fig. 6.53 muestran los perfiles de velocidades de corte aparentes, en ambos se observa un cuerpo central con mayor rigidez y en el primero de los tendidos una capa de velocidad y espesor similares a las presentes en ambos tendidos de la disposición anteriormente mencionada. En la Fig. 6.54 se muestra el diagrama en tres dimensiones de ambos perfiles.

Capítulo 6 – Resultados y discusión

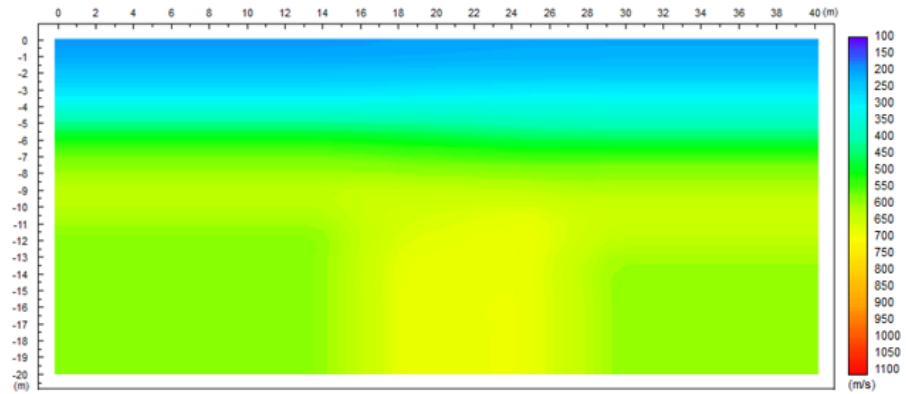


Fig. 6.52 Perfil de velocidades de corte aparentes del tendido 1000 en el cuarto sitio S4.

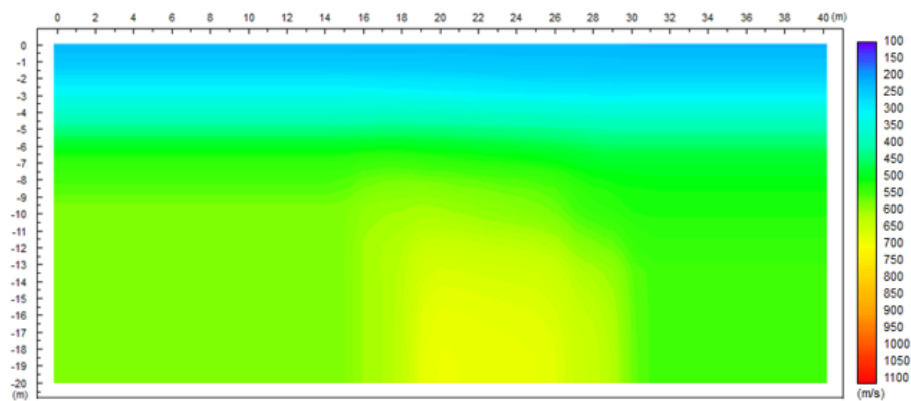


Fig. 6.53 Perfil de velocidades de corte aparentes del tendido 1050 en el cuarto sitio S4.

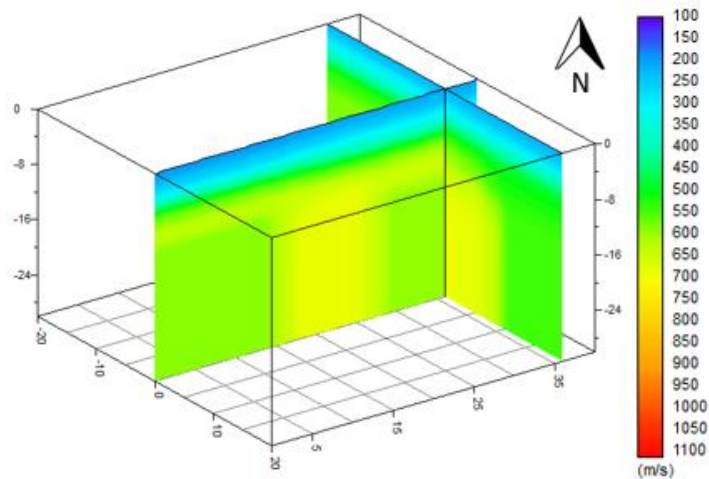


Fig. 6.54 Diagrama 3D de las velocidades de corte aparentes en el cuarto sitio S4.

6.2.1.5. Resultados y análisis del quinto sitio de estudio (S5)

La importancia del quinto sitio estudiado estriba en que corresponde a un macizo rocoso fracturado compuesto de rocas volcánicas extrusivas de composición intermedia depositadas en pseudoestratos semi horizontales, por lo que se esperan velocidades mayores pero un comportamiento anisotrópico evidente.

La Fig. 6.55 muestra los perfiles de velocidades de corte aparentes de ambas direcciones perpendiculares entre sí, y la Fig. 6.56 ilustra un diagrama en tres dimensiones. En dichas figuras se observa una zona somera de entre tres y cinco metros con velocidades relativamente menores las cuales indicarían hasta donde el macizo rocoso se encuentra alterado disminuyendo considerablemente su rigidez.

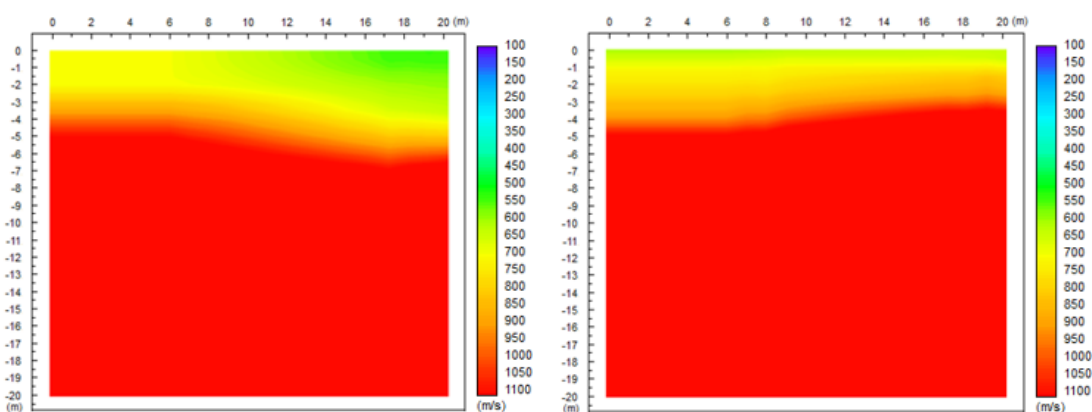


Fig. 6.55 Perfil de velocidades de corte aparentes del tendido 100 y 200 en el quinto sitio S5.

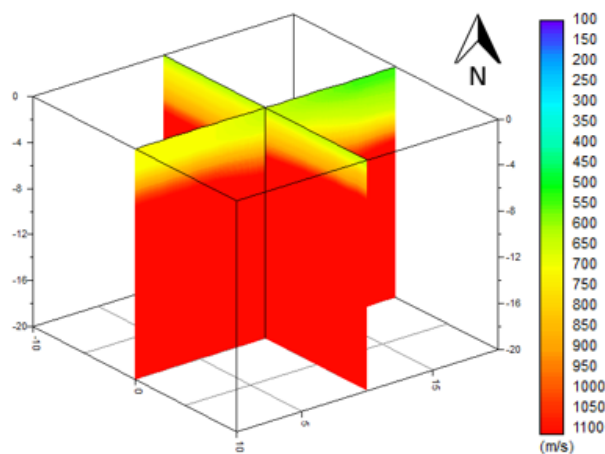


Fig. 6.56 Diagrama 3D de las velocidades de corte aparentes en el quinto sitio S5.

La Fig. 6.57 muestra el perfil de velocidades de compresión donde existe una diferencia mucho mayor entre los dos perfiles en diferente dirección, lo cual podría indicar el paralelismo con el patrón de fracturamiento principal y el primer tendido.

Capítulo 6 – Resultados y discusión

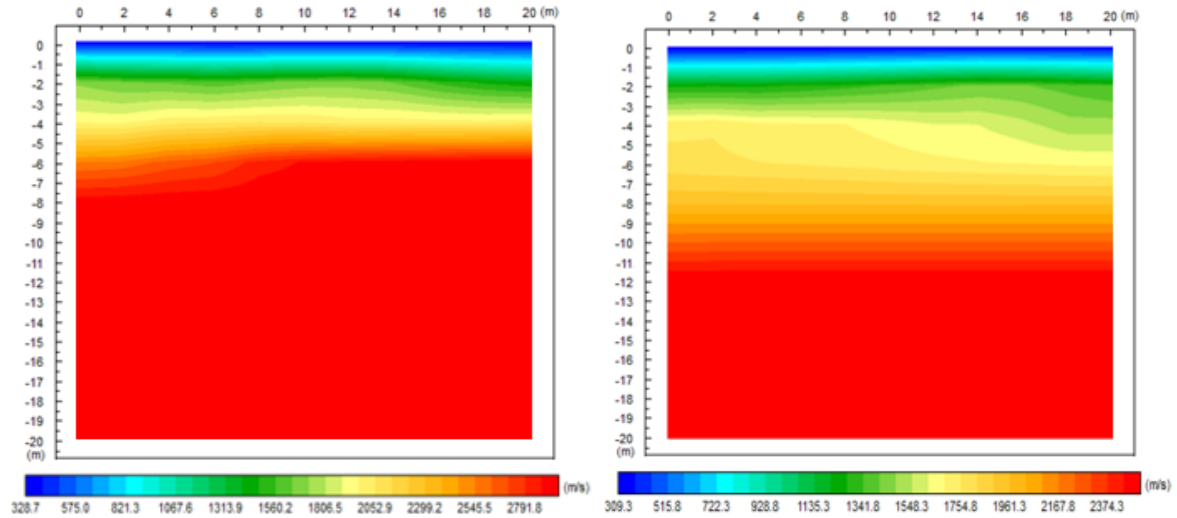


Fig. 6.57 Perfil de velocidades de compresión del tendido 100 y 200 en el quinto sitio S5.

Por último se muestran las comparativas de los sismogramas reales y sintéticos en ambos tendidos perpendiculares, en la Fig. 6.58 y la Fig. 6.59. En los que se aprecian tendencias similares con frecuencias más altas a los sismogramas vistos anteriormente y más compactos pues el tiempo de arribo es mucho menor que en suelos, distinguiéndose nuevamente en los sismogramas sintéticos registros más limpios en los que se aprecian secuencias fácilmente ya que representa un modelo ideal estratificado el cual difiere de la realidad.

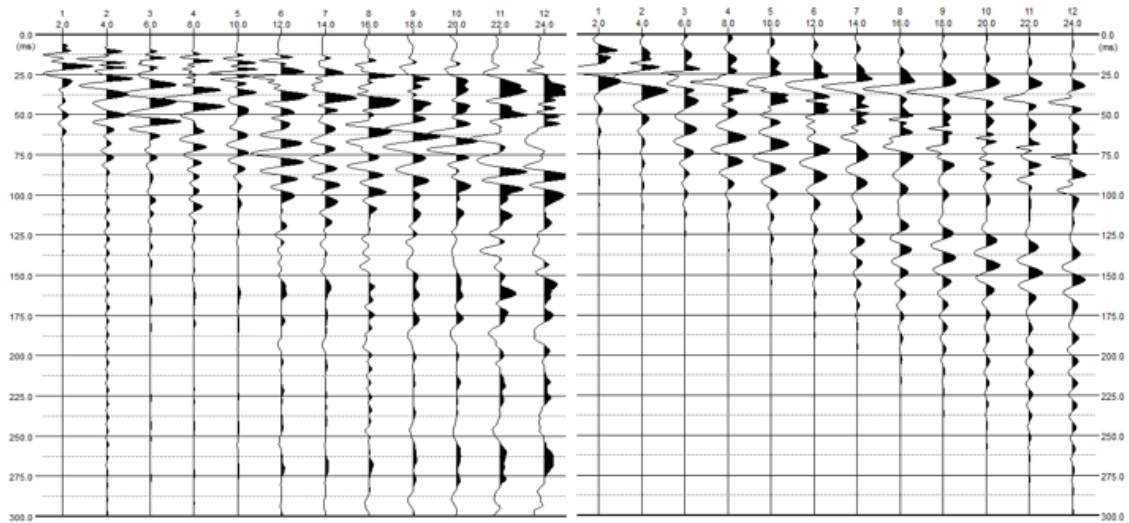


Fig. 6.58 Sismograma real y sintético respectivamente, correspondientes al primer disparo del tendido 100 en el quinto sitio S5.

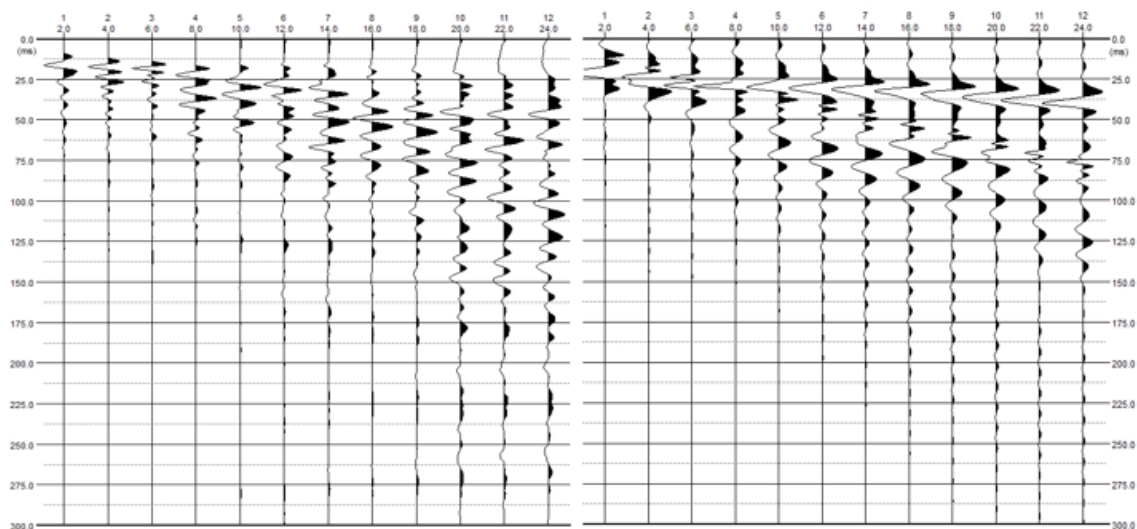


Fig. 6.59 Sismograma real y sintético respectivamente, correspondientes al primer disparo del tendido 200 en el quinto sitio S5.

6.2.2. Algunos casos prácticos reales

Adicionalmente a la experimentación dirigida realizada en campo, el M.C. Alfonso Alvarez Manilla Aceves compartió información sobre tres casos reales en los que la metodología empleada en esta investigación fue o sería útil. Por las condiciones de confidencialidad con el cliente no se presentan datos precisos, nombres ni lugares, sin embargo son suficientemente claros para describir el tipo de problemas prácticos que se pueden abordar con la metodología propuesta.

6.2.2.1. Resultados y análisis del primer caso real (C1)

El primero caso se trata de depósitos fluviales empacados en materiales arcillo-arenosos divididos en dos cuerpos por el tamaño de los fragmentos de roca redondeados, estos a su vez cubiertos por casi tres metros de rellenos antropogénicos tirados a volteo, la Fig. 6.60 muestra una fotografía de uno de los cortes durante la construcción del proyecto.

La estratigrafía del lugar pudo ser configurada mediante análisis multicanal de ondas superficiales (AMOS) con tres tendidos paralelos y un tendido perpendicular en conjunto con exploración directa (pozos a cielo abierto). La Fig. 6.61 muestra dos de los perfiles (paralelos) de velocidades de corte aparentes, en este caso es notable la compatibilidad y a la vez la diferencia entre un perfil y otro, lo que nos indica variabilidad en la distribución de velocidades debido a las facies durante el depósito, el aumento de la presión de confinamiento y la inclinación en la tendencia por la pendiente del talud del paleo cauce, además fue posible la evaluación de la extensión del relleno antropogénico para su correcta sustracción y adecuada toma de decisiones para el diseño del proyecto.



Fig. 6.60 Fotografía del primer caso C1 (relleno antropogénico sobre depósitos aluviales).

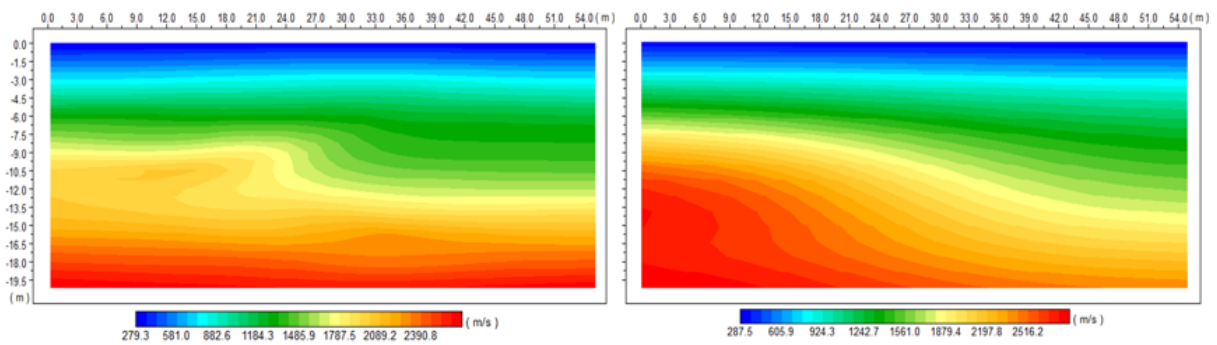


Fig. 6.61 Perfiles (paralelos) de velocidades de compresión (Tomo-DW) del primer caso C1.

6.2.2.2. Resultados y análisis del segundo caso real (C2)

El segundo caso involucra una excavación en suelos estratificados horizontales rellena con materiales antropogénicos, la Fig. 6.62 muestra una fotografía durante la exploración directa.



Fig. 6.62 Fotografía del segundo caso C2 (excavación rellena por materiales antropogénicos).

La Fig. 6.63 muestra el perfil de velocidades de corte aparentes y la Fig. 6.64 muestra el perfil de velocidades de compresión, se observa claramente una zona somera de muy bajas velocidades con una discontinuidad abrupta en ambos perfiles corroborando la presencia de una excavación rellena por materiales antropogénicos los cuales tienen comportamientos indeseables en los proyectos constructivos.

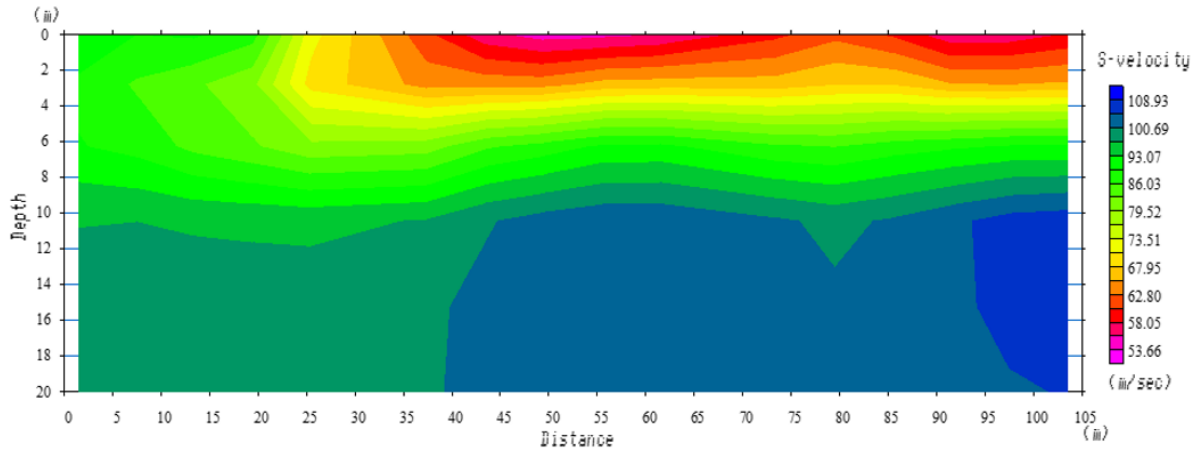


Fig. 6.63 Perfil de velocidades de corte aparentes del caso C2.

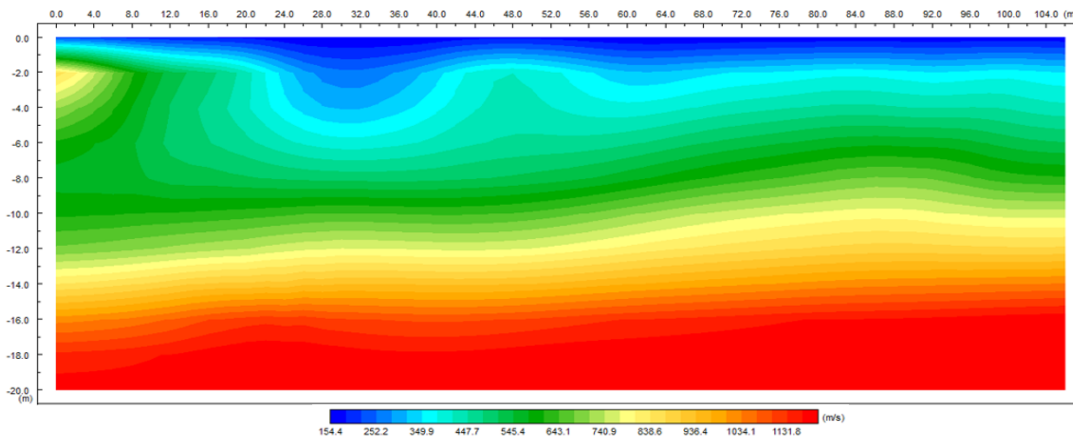


Fig. 6.64 Perfil de velocidades de compresión (Tomo-DW) del caso C2.

En este caso en especial debe destacarse que el material antropogénico no fue detectado inicialmente y que este trabajo se realizó como medida de corrección ya que se presentaron asentamientos diferenciales que estaban dañando la estructura civil, el no detectar dicha discordancia da indicios de una exploración deficiente o inadecuada, representando pérdidas económicas de gran magnitud.

6.2.2.3. Resultados y análisis del tercer caso real (C3)

El tercer caso corresponde a un macizo rocoso de basalto masivo con una estructura brechoide que lo atraviesa conformando claramente una discontinuidad, este trabajo consistió en la evaluación de materiales para su corte o “ripabilidad” por lo que el análisis de velocidad de propagación de las ondas sísmicas y la aplicación de esta metodología son una herramienta bastante útil para determinar el tipo de material y su volumetría.

La Fig. 6.65 muestra fotografías de dos de los cortes realizados durante la excavación pudiendo identificar el basalto masivo en la fotografía del lado izquierdo y la estructura brechoide en contacto con el basalto en la fotografía del lado derecho.



Fig. 6.65 Fotografías del tercer caso C3 (macizo rocoso con estructura brechoide).

Para este caso, la correcta evaluación de los materiales puede representar una variante significativa en la cuantificación de la volumetría de un tipo de material y otro, siendo un tema de gran interés económico para el cliente y el contratista.



Capítulo 7

7. Conclusiones y recomendaciones

7.1. Conclusiones

A partir de los resultados de la experimentación previa hemos sido capaces de extraer una serie de conclusiones, las cuales fueron parte importante para el diseño adecuado de la metodología propuesta para la experimentación en campo, dirigida directamente a la problemática que establece esta investigación y se exponen a continuación:

- La inducción de fracturamiento relleno mediante placas de concreto y cartón en suelos induce un incremento de velocidad de manera general, debido a la densidad y rigidez relativamente altos de ambos materiales respecto al medio (suelo), con ello se origina que los gráficos presenten tendencias exactamente inversas a las típicas en medios fracturados o discontinuos.
- Las características inherentes del material es decir el tipo de material es la variable más significativa en cuanto a la variación de velocidad de onda de compresión, lo que resulta obvio y no está en cuestión en esta investigación. Dejando de lado el tipo de material la variable más significativa es la cantidad de placas utilizadas (discontinuidades inducidas), ligeramente por debajo, el ángulo de giro (anisotropía) representa una variación considerable y por ningún motivo puede ser despreciada. También se concluye que la orientación del giro no es una variable significativa.
- El parámetro de anisotropía de onda P (ε) y el porcentaje de anisotropía (%) resultan tener una relación directa, de manera general en las tres etapas se obtienen valores promedio de 0.12 y 11.4% respectivamente. Valores similares a los que presenta Watanabe et al. (1996) en pruebas en campo y mayores a los que presenta Ding et al. (2014) en muestras sintéticas.
- La determinación de las características del equipo necesario dependen directamente de la escala del estudio, específicamente de la distancia entre la fuente y el receptor, además de la técnica que se pretende utilizar. La diferencia en los resultados represento un 23% en las mediciones en el diseño experimental y un 62% en las mediciones en las probetas, claramente más desfavorable conforme se reduce la distancia.
- Las deformaciones y agrietamiento causado por los esfuerzos a los que se sometieron las probetas en los ensayos triaxiales rápidos (UU) y que llevan al estado limite, son daños irreversibles en la estructura del suelo que generan una evidente reducción de la velocidad de propagación de ondas de compresión, en el material M1 representó una reducción promedio del 29% y en el material M2 del 15%.

Capítulo 7 – Conclusiones y recomendaciones

- No se observó una tendencia o relación clara de la velocidad de propagación de onda de compresión con la condición de saturación ni con la presión de confinamiento, probablemente por el número reducido de probetas empleadas.
- Mediante las microscopias electrónicas de barrido no se logró observar ninguna tendencia preferencial en la estructura de los suelos empleados en los experimentos de laboratorio.

Por su parte los resultados e interpretaciones de la experimentación en campo nos permitieron hacer ciertas distinciones relevantes las cuales se enlistan a continuación:

- La estratificación no es el único factor que genera anisotropía sísmica en el subsuelo, la densificación por el aumento de presión de confinamiento genera cambios graduales en la velocidad de propagación de las ondas, sin embargo estos factores generalmente son irregulares, además están acompañados de varios factores más que generan la falta de continuidad y por ende mayor anisotropía.
- Los factores que generan anisotropía en medios geológicos y que generalmente son despreciados durante los estudios geotécnicos son las “facies”, estas corresponden a variaciones laterales graduales y pueden presentarse de manera común en cualquier depósito de sedimentos como se observó en los primeros cuatro sitios estudiados (facies en depósitos lacustres) y el primer caso real presentado (facies en depósitos fluviales).
- Además de las características mencionadas, en ciertas condiciones se puede presentar agrietamiento en suelos, y es un evidente factor causante de anisotropía en suelos estratificados.
- El factor humano también interviene en la generación de discontinuidades (anisotropía) en el subsuelo, cualquier excavación rellena genera una discontinuidad drástica, sin embargo frecuentemente estas son realizadas con fines geotécnicos por lo que favorecen a la estabilidad. Por otro lado, los rellenos antropogénicos, los cuales no están regulados (se desconoce su ubicación y extensión) presentan discontinuidades drásticas en la rigidez del subsuelo bastante evidentes mediante las técnicas sísmicas empleadas en esta investigación, como se percibió en los primeros dos casos reales expuestos.
- Los macizos rocosos comúnmente concebidos como basamentos competentes también presentan factores que afectan la rigidez en algún sentido preferente y

Capítulo 7 – Conclusiones y recomendaciones

ponen en riesgo la estabilidad. Estos factores son patrones de fracturamiento como se determinó en el quinto sitio de estudio o zonas de debilidad causadas por alguna discontinuidad de gran espesor como diques o brechas, como se expuso en el tercer caso real, además estructuras geológicas como fallas o pliegues.

De lo anterior se concluye que cualquier discontinuidad o variación en la rigidez del subsuelo afecta la velocidad de propagación de ondas sísmicas y difieren según la orientación en las que son evaluadas.

Los tendidos perpendiculares en superficie mediante técnicas sísmicas en dos dimensiones nos permiten generar un diagrama en tres dimensiones de la configuración de las velocidades de propagación de ondas y con ello la estimación de las propiedades mecánicas en un área de influencia mayor y a cierta profundidad con mayor precisión y logrando identificar variaciones tanto verticales como laterales. Por lo que en conjunto con la exploración directa se obtendrá una caracterización geotécnica más apegada a la realidad, para optimizar el diseño y garantizar estabilidad y seguridad.

Se destacan las ventajas de las técnicas sísmicas empleadas (Análisis Multicanal de Ondas Superficiales y Tomografía Sísmica) las cuales permiten detectar capas de velocidades inferiores empacadas en capas de velocidades mayores, son métodos no invasivos, relativamente menos costosos y fáciles de aplicar.

7.2. Recomendaciones

Para finalizar se hacen ciertas recomendaciones que deberán tomarse en cuenta para investigaciones futuras en esta área del conocimiento.

Se sugiere profundizar con la experimentación tanto en laboratorio como en campo. En el diseño experimental a escala de laboratorio se recomienda reducir las variables, concentrando tiempo y esfuerzo en una variable a la vez. Se recomienda mejorar el diseño del modelo cambiando el material de las placas y mecanizando la preparación de los especímenes, además realizar la evaluación la velocidad de ondas de corte en conjunto con la velocidad de compresión. Esto revelara de manera más precisa la influencia que tienen las discontinuidades y su orientación en la velocidad de propagación de ondas en materiales geológicos.

En cuanto a los ensayos de propagación a escala de laboratorio se recomienda incrementar el número de probetas, utilizando probetas labradas (muestras inalteradas) en diferentes condiciones de saturación y presiones de confinamiento, enfocándose en un solo tipo de suelo de manera inicial, realizando mediciones de velocidad de onda de compresión y de corte para poder evaluar los módulos elásticos dinámicos y estáticos, y realizar comparaciones y/o correlaciones adecuadas.

Sin embargo la problemática expuesta en esta investigación requiere experimentación adicional dirigida directamente a campo ya que los resultados tienen mayor peso e importancia al ser casos reales con condiciones similares a los que se pretende resolver. Es por ello que se recomienda desarrollar más estudios en sitios con características distintivas e inclusive sitios sin problemas aparentes, aplicando la metodología propuesta con el objetivo de realizar caracterizaciones geotécnicas más precisas y enfatizar la importancia de la anisotropía evidenciando los errores que puede acarrear no contemplarla y las ventajas que conlleva tomarla en cuenta.

Se sugiere aplicar la metodología de tendidos perpendiculares no solo en las técnicas sísmicas aquí expuestas, sino también en otros métodos geofísicos como el radar de penetración terrestre, sondeos eléctricos verticales, técnicas sísmicas de fuente pasiva entre otras, es decir cualquier técnica no invasiva en dos dimensiones. No es determinante la forma de los tendidos, se recomienda mantener la formación típica en cruz, pero otras formaciones con tendidos perpendiculares (en forma de “L” o “T”) son útiles, en caso de requerir mayor precisión se puede optar por una formación radial.



Referencias

- Akinbinu, V. A.** 2015. Increasing effect of metamorphism on rock properties. *Int. J. Min. Sci. Technol.* 25:205–211.
- Ali, A., y M. Jakobsen.** 2011. Seismic characterization of reservoirs with multiple fracture sets using velocity and attenuation anisotropy data. *J. Appl. Geophys.* 75:590–602.
- Alvarez Manilla Aceves, A., P. Garnica A., y A. Pérez S.** 2003. Evaluación indirecta de los módulos elásticos de rigidez in situ y la relación entre V_p / V_s y el ángulo de fricción interna. *Publ. Tec. Inst. Mex. del Transp.*:26.
- Alvarez Manilla Aceves, A., P. Garnica Anguas, y G. E. I. Martínez Peña.** 2001. Metodología para determinar la influencia de la extracción de agua subterránea en la infraestructura del transporte. *Publicación Técnica No. 172.*
- Amadei, B.** 1996. Importance of anisotropy when estimating and measuring in situ stresses in rock. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr.* 33:293–325.
- Anandarajah, A.** 2008. Multi-mechanism anisotropic model for granular materials. *Int. J. Plast.* 24:804–846.
- Anderson, B., I. Bryant, M. Lüling, B. Spies, y K. Helbig.** 1994. Oilfield Anisotropy : Its Origins and Electrical Characteristics. *Oilf. Rev.* 6:48–56.
- Anderson, D. L., B. Minister, y D. Cole.** 1974. The effect of oriented cracks on seismic velocities. *J. Geophys. Res.* 79:4011–4015.
- Asadi, M., y M. H. Bagheripour.** 2015. Modified criteria for sliding and non-sliding failure of anisotropic jointed rocks. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 73:95–101.
- Atkinson, J. H.** 2000. Non-linear soil stiffness in routine design. *Geotechnique* 50:487–508.
- Auvinet, G., y A. Arias.** 1991. Propagación de grietas. In: *Agrietamiento de Suelos.* p. 109.
- Barla, G.** 1974. Rock anisotropy: theory and laboratory testing. *Rock Mech.*:131–169.
- Barton, N., y E. Quadros.** 2014. Anisotropy is Everywhere, to See, to Measure, and to Model. *Rock Mech. Rock Eng.*
- Behera, L., P. Khare, y D. Sarkar.** 2011. Anisotropic P-wave velocity analysis and seismic imaging in onshore Kutch sedimentary basin of India. *J. Appl. Geophys.* 74:215–228.
- Benz, T.** 2007. Small-Strain Stiffness of Soils and its Numerical Consequences.
- Best, A. I., J. Sothcott, y C. McCann.** 2007. A laboratory study of seismic velocity and attenuation anisotropy in near-surface sedimentary rocks. *Geophys. Prosp.* 55: 609–625.



- Biot, M. A.** 1956a. Theory of Propagation of Elastic Waves in a Fluid-Saturated Porous Solid. I. Low-Frequency Range. *J. Acoust. Soc. Am.* 28.
- Biot, M. A.** 1956b. Theory of Propagation of Elastic Waves in a Fluid-Saturated Porous Solid. II. Higher Frequency Range. *J. Acoust. Soc. Am.* 28.
- Boggs Jr., S.** 2006. Principles of sedimentology and stratigraphy.
- Burger, H. R.** 1992. Exploration Geophysics of the Shallow Subsurface.
- Calderón Macías, C., J. Ramos Martínez, T. Kerdan, R. Cabrera garzón, y A. González Ibarra.** 2003. Procesamiento en Tiempo de Datos Sísmicos de Reflexión de Ondas P en Medios con Isotropía Transversal con Eje de Simetría Vertical (ITV). *Open Trans. Geosci.* 23:302–309.
- Calvet, M., S. Chevrot, y A. Souriau.** 2006. P-wave propagation in transversely isotropic media. I. Finite-frequency theory. *Phys. Earth Planet. Inter.* 156:12–20.
- Cardarelli, E., y R. de Nardis.** 2001. Seismic refraction , isotropic anisotropic seismic tomography on an ancient monument (Antonino and Faustina temple ad 141). *Geophys. Prospect.*:228–240.
- Chan, J., y D. R. Schmitt.** 2014. Elastic Anisotropy of a Metamorphic Rock Sample of the Canadian Shield in Northeastern Alberta. *Rock Mech. Rock Eng.*
- Chen, C., E. Pan, y B. Amadei.** 1998. Determination of deformability and tensile strength of anisotropic rock using Brazilian Tests. *Int. J. rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr.* 35:43–61.
- Chi, S., X. Tang, y Z. Zhu.** 2001. Inversion of Anisotropic Parameters in Strongly Anisotropic Formations. :1–25.
- Chichinina, T. I., I. R. Obolentseva, y G. Ronquillo-Jarillo.** 2009. Anisotropy of Seismic Attenuation in Fractured Media: Theory and Ultrasonic Experiment. *Transp. Porous Media* 79:1–14.
- Cho, J. W., H. Kim, S. Jeon, y K. B. Min.** 2012. Deformation and strength anisotropy of Asan gneiss, Boryeong shale, and Yeoncheon schist. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 50:158–169.
- Christensen, N. I., y D. Stanley.** 2003. Seismic Velocities and Densities of Rocks. In: *International Handbook of Earthquake and Engineering Seismology*. Vol. 81B. p. 1587–1594.
- Cid Villegas, G., M. Cerca, F. R. Zúñiga Dávila-m, y J. A. Escalante González.** 2013. Estimación de módulos elásticos en muestra de roca a partir de la medición de las velocidades de ondas de cuerpo en laboratorio. *Reun. Anu. Union Geofis. Mex. A.C.*
- Cortes Gómez, D. M., W. M. Agudelo Zambrano, y L. A. Montes Vides.** 2013. Estimation of density and fracture orientation in HTI media through azimuthal analysis of P-waves.



Ciencia, Tecnol. y Futur. 5:5–18.

- Cortes Gómez, D. M.** 2012. Estimación de densidad y tendencia de las fracturas utilizando ondas P. Universidad Nacional de Colombia.
- Dai, F., y K. W. Xia.** 2013. Laboratory measurements of the rate dependence of the fracture toughness anisotropy of Barre granite. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 63:113–121.
- Dai, F., K. Xia, J. P. Zuo, R. Zhang, y N. W. Xu.** 2013. Static and Dynamic Flexural Strength Anisotropy of Barre Granite. *Rock Mech. Rock Eng.* 46:1589–1602.
- Danek, T., A. Lesniak, y A. Pieta.** 2010. Numerical modeling of seismic wave propagation in selected anisotropic media. :77.
- Delbecq, F., J. Downton, y M. Letizia.** 2013. A Math-free Look at Azimuthal Surface Seismic Techniques. *CSEG Rec.:*21–31.
- Diaz-Rodríguez, J. A., P. Moreno-carrizales, y L. López-Flores.** 2001. a Study of Soil Microstructure Using Bender Element Tests. *Fourth Int. Conf. Recent Adv. Geotechnical Earthq. Eng. Soil Dyn.:*2–6.
- Ding, P., B. Di, D. Wang, J. Wei, y X. Li.** 2014. P and S wave anisotropy in fractured media: Experimental research using synthetic samples. *J. Appl. Geophys.* 109:1–6.
- Eitzenberger, A.** 2012. Wave Propagation in Rock and the Influence of Discontinuities. Lulea University of Technology.
- Ekanem, A. M., J. Wei, X. Y. Li, M. Chapman, y I. G. Main.** 2013. P-wave attenuation anisotropy in fractured media: A seismic physical modelling study. *Geophys. Prospect.* 61:420–433.
- Escalante González, J. A., G. Cid Villegas, M. Cerca, y R. Zúñiga.** 2013. Implementación de un sistema para la medición de ondas de cuerpo Vp y Vs en muestras geológicas. *Reun. Anu. Union Geofis. Mex. A.C.*
- Fan, L. F., y H. Y. Sun.** 2015. Seismic wave propagation through an in-situ stressed rock mass. *J. Appl. Geophys.* 121:13–20.
- Farmer, I. W.** 1968. Engineering Properties of Rocks. In: *Engineering Properties of Rocks.* Londres.
- Fens, T. W.** 2000. Petrophysical Properties from small rock samples using Image Analysis techniques.
- Foti, S., C. G. Lai, y R. Lancellotta.** 2002. Porosity of fluid-saturated porous media from measured seismic wave velocities. *Géotechnique.*
- Foti, S., y R. Lancellotta.** 2004. Soil porosity from seismic velocities. *Géotechnique* 54:551–554.
- Fu, Y., M. Iwata, W. Ding, F. Zhang, y A. Yashima.** 2012. An elastoplastic model for soft



- sedimentary rock considering inherent anisotropy and confining-stress dependency. *Soils Found.* 52:575–589.
- Gao, Q., J. Tao, J. Hu, y X. (Bill) Yu.** 2015. Laboratory study on the mechanical behaviors of an anisotropic shale rock. *J. Rock Mech. Geotech. Eng.* 7:213–219.
- Garagon, M., y T. Çan.** 2010. Predicting the strength anisotropy in uniaxial compression of some laminated sandstones using multivariate regression analysis. *Mater. Struct.* 43:509–517.
- García Flores, M., y J. A. Maza Álvarez.** 1998. Origen y propiedades de los sedimentos. In: *Manual de Ingeniería de Rios.* p. 111.
- Gaviglio, P.** 1989. Longitudinal Waves Propagation in a Limestone: The relationship Between Velocity and Density. *Rock Mech. Rock Eng.* 22:299–306.
- Gonzaga, G. G., M. H. Leite, y R. Corthésy.** 2008. Determination of anisotropic deformability parameters from a single standard rock specimen. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 45:1420–1438.
- Grammatikopoulou, A., F. C. Schroeder, A. Gasparre, N. Kovacevic, y V. Germano.** 2013. The Influence of Stiffness Anisotropy on the Behaviour of a Stiff Natural Clay. *Geotech. Geol. Eng.* 32:1377–1387.
- Gutierrez, M., y D.-J. Youn.** 2015. Effects of fracture distribution and length scale on the equivalent continuum elastic compliance of fractured rock masses. *J. Rock Mech. Geotech. Eng.* 7:626–637.
- Hakala, M., H. Kuula, y J. a. Hudson.** 2007. Estimating the transversely isotropic elastic intact rock properties for in situ stress measurement data reduction: A case study of the Olkiluoto mica gneiss, Finland. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 44:14–46.
- Hardin, B. O., y W. L. Black.** 1968. Vibration modulus of normally consolidated clays. *J. soil Mech. Found. Div.* 94:353–369.
- Hardin, B. O., y W. L. Black.** 1969. Closure to vibration modulus of normally consolidated clays. *J. soil Mech. Found. Div.* 95:1531–1537.
- Hardin, B. O., y V. P. Drnevich.** 1972. Shear modulus and damping in soils. Design equations and curves. *J. soil Mech. Found. Div.* 98:667–692.
- Hardin, B. O., y F. E. Richart Jr.** 1963. Elastic wave velocities in granular soils. *J. soil Mech. Found. Div.* 89:33–65.
- Heiland, G. D.** 1963. *Geophysical Exploration.* Hafner Publishing Co.
- Holtz, R. D., y W. D. Kovacs.** 2011. Chapter 1. In: *An Introduction to Geotechnical Engineering.*
- Hunt, R. E.** 1984. *Geotechnical Engineering Investigation Manual.* McGraw Hil.



- Imhof, A. L., C. A. Calvo, y A. Martín.** 2012. Determinación de Heterogeneidad y anisotropía en aluvión por micro-tomografía sísmica en cross-hole. Publicación la Asoc. Argentina Geofísicos y Geod. 37:5–17.
- Jiménez González, C. O.** 2008. Modelación Matemática de la Propagación de Ondas Sísmicas en Anisótropos y Heterogéneos. Instituto Politecnico Nacional.
- Jing, L., E. Nordlund, y O. Stephansson.** 1992. An experimental study on the anisotropy and stress-dependency of the strength and deformability of rock joints. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 29:535–542.
- Juárez Badillo, E., y A. Rico Rodríguez.** 2005a. Mecánica de Suelos. Tomo 1: Fundamentos de la Mecánica de Suelos. Limusa.
- Juárez Badillo, E., y A. Rico Rodríguez.** 2005b. Mecanica de Suelos. Tomo 3: Flujo de Agua en Suelos.
- Juárez Badillo, E.** 1959. Teoria de grietas en tensión. In: Primer Congreso Panamericano de Mecánica de Suelos y Cimentaciones. México D.F.
- Jung, Y.-H., y C.-K. Chung.** 2008. Role of micromechanics features on stress-level dependency of cross-anisotropic elastic moduli in granular soils. *Comput. Geotech.* 35:265–277.
- Kahraman, S.** 2002. The effects of fracture roughness on P-wave velocity. *Eng. Geol.* 63:347–350.
- Kelter, A. C.** 2005. Estimation of Thomsen’s anisotropy parameters from compressional and converted wave surface seismic travelttime data using NMO equations, neural networks and regridding inversion.
- Kern, H., T. I. Ivankina, A. N. Nikitin, T. Lokajčiek, y Z. Pros.** 2008. The effect of oriented microcracks and crystallographic and shape preferred orientation on bulk elastic anisotropy of a foliated biotite gneiss from Outokumpu. *Tectonophysics* 457:143–149.
- Kern, H.** 1993. P- and S-wave anisotropy and shear-wave splitting at pressure and temperature in possible mantle rocks and their relation to the rock fabric. *Phys. Earth Planet. Inter.* 78:245–256.
- Kim, H., J.-W. Cho, I. Song, y K. B. Min.** 2012. Anisotropy of elastic moduli, P-wave velocities, and thermal conductivities of Asan Gneiss, Boryeong Shale, and Yeoncheon Schist in Korea. *Eng. Geol.* 147-148:68–77.
- Kuila, U., D. N. Dewhurst, A. F. Siggins, y M. D. Raven.** 2011. Stress anisotropy and velocity anisotropy in low porosity shale. *Tectonophysics* 503:34–44.
- Leaney, S., C. Chapman, y T. Ulrych.** 2011. Microseismic Source Inversion in Anisotropic Media. CSEG GeoConvention:1–6.
- Lee, J., H. Lee, y H. Jeong.** 2016. Numerical analysis of SH wave field calculations for various



types of a multilayered anisotropic inclusion. *Eng. Anal. Bound. Elem.* 64:38–67.

- Madadi, M., M. Pervukhina, y B. Gurevich.** 2013. Modelling elastic anisotropy of dry rocks as a function of applied stress. *Geophys. Prospect.* 61:391–403.
- Marrett, R., S. E. Laubach, y J. E. Olson.** 2007. Anisotropy and beyond: Geologic perspectives on geophysical prospecting for natural fractures. *Lead. edge.*
- Mašín, D., y J. Rott.** 2014. Small strain stiffness anisotropy of natural sedimentary clays: review and a model. *Acta Geotech.* 9:299–312.
- Morland, L. W.** 1976. Elastic Anisotropy of Regularly Jointed Media. *Rock Mech.* 8:35–48.
- Nishizawa, O.** 1982. Seismic velocity anisotropy in a medium containing oriented cracks - transversely isotropic case. *J. Phys. Earth:*331–347.
- Nunes, A. L. L. S.** 2002. A new method for determination of transverse isotropic orientation and the associated elastic parameters for intact rock. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 39:257–273.
- Ozkan, U., H. F. Nied, y A. C. Kaya.** 2010. Fracture analysis of anisotropic materials using enriched crack tip elements. *Eng. Fract. Mech.* 77:1191–1202.
- Pachano Peláez, K. L.** 2008. Metodología para caracterizar un sistema de fracturas, utilizando inversión de datos de ondas P y S.
- Pal, P. C., S. Kumar, y S. Bose.** 2014. Propagation of Rayleigh waves in anisotropic layer overlying a semi-infinite sandy medium. *Ain Shams Eng. J.:*0–6.
- Petružálek, M., J. Vilhelm, V. Rudajev, T. Lokajíček, y T. Svitek.** 2013. Determination of the anisotropy of elastic waves monitored by a sparse sensor network. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 60:208–216.
- Peyras, L., P. Rivard, P. Breul, A. Millet, y G. Ballivy.** 2014. Characterization of rock discontinuity openings using acoustic wave amplitude - Application to a metamorphic rock mass. *Eng. Geol.* 193:402–411.
- Quintero Valero, N. E.** 2008. Determinacion de Parametros Anisotropos en Medios Fracturados a Escala de Yacimiento con Datos Sismicos de Reflexion.
- Rueda, J., H. Madero, Z. Calderón, N. Saavedra, G. Ojeda, A. Ortiz, y C. Piedrahita.** 2010. Metodología para determinar densidad de microfisuras en rocas, a partir de parámetros anisótropos. Una aproximación en núcleos sintéticos. *Boletín Geol.* 32.
- Saenger, E. H., O. S. Krüger, y S. A. Shapiro.** 2004. Effective elastic properties of randomly fractured soils: 3D numerical experiments. *Geophys. Prospect.* 52:183–195.
- Santamarina, J. C., y G. Cascante.** 1996. Stress anisotropy and wave propagation: a micromechanical view. *Can. Geotech. J.* 33:770–782.



- Santamarina, J. C., A. Klein, y M. A. Fam.** 2001. Soils and waves: Particulate materials behavior, characterization and process monitoring. *J. Soils Sediments* 1:130.
- Santamarina, J. C., y H. Shin.** 2009. Discontinuities in granular materials: Particle-level mechanisms. *Mech. Nat. Solids*:223–237.
- Santamarina, J. C.** 2004. Soil Behavior at the Microscale Particle Forces. *Soil Behav. Soft Gr. Constr.*
- Santos, J. E., R. Corredor Martinez, y J. M. Carcione.** 2014. Seismic velocity and Q anisotropy in fractured poroelastic media. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 70:212–218.
- Sauter, F.** 1989. *Fundamentos de Ingeniería Sísmica: Introducción a la Sismología.* 1a ed. (E. T. de C. Rica, editor.).
- Sayers, C. M.** 2005. Seismic anisotropy of shales. *Geophys. Prospect.* 53:667–676.
- Seed, H. B., y I. M. Idriss.** 1970. Soil moduli and damping factors for dynamic response analysis. EERC 70.
- Sellés-Martínez, J.** 2005. ¿Qué nos cuentan las ondas sísmicas? *Enseñanza las Ciencias la Tierra* 13:20–36.
- Sheriff, R. E.** 2002. *Encyclopedic dictionary of applied geophysics.* Society of exploration geophysicists Tulsa, OK.
- Shin, K.** 2005. Simplified Method for the Assessment of the Stiffness Anisotropy of Rocks at Small Strains. *Rock Mech. Rock Eng.* 38:41–58.
- Sinha, B. K.** 2011. Estimation of rock anisotropic constants using sonic data from deviated wellbores. *IEEE Int. Ultrason. Symp. Proc.*:2061–2064.
- Song, I., y M. Suh.** 2014. Effects of foliation and microcracks on ultrasonic anisotropy in retrograde ultramafic and metamorphic rocks at shallow depths. *J. Appl. Geophys.* 109:27–35.
- Stokoe, K. H., M. B. II Darandelli, R. D. Andrus, y L. T. Brown.** 1999. Dynamic soil properties: Laboratory, field and correlation studies. In: 2nd Internacional conference on Earthquake Geotechnical Engineering Vol. 3. p. 811–845.
- Sun, Y., H. Liu, G. Yang, y Y. Xiao.** 2013. Formulation of cross-anisotropic failure criterion for soils. *Water Sci. Eng.* 6:456–468.
- Tarback, E. J., F. K. Lutgens, y D. Tasa.** 2005. *Ciencias de la Tierra: Una introducción a la Geología Física.* Prentice hall.
- Telford, W. M., L. P. Geldart, y R. E. Sheriff.** 1990. *Seismic methods.* In: Applied Geophysics. Second. Cambridge University Press.
- Thomsen, L.** 1986. Weak elastic anisotropy. *Geophysics* 51:1954.



- Thomsen, L.** 2002. Understanding Seismic Anisotropy in Exploration and Exploitation. Soc. Explor. Geophys.
- Toomey, A., y S. Nakagawa.** 2000. Seismic monitoring of shear stress on fractures / faults.
- Trigubov, A. V, y S. B. Gorshkalev.** 1988. Seismic observations of the anisotropy of sediments. Phys. Earth Planet. Inter. 51:93–100.
- Tsvankin, I., J. Gaiser, V. Grechka, M. van der Baan, y L. Thomsen.** 2010. Seismic anisotropy in exploration and reservoir characterization: An overview. Geophysics 75:75A15.
- Tsvankin, I.** 1997. Anisotropic parameters and P-wave velocity for orthorhombic media. Geophysics 62:1292.
- Ullemeyer, K., S. Siegesmund, P. N. J. Rasolofosaon, y J. H. Behrmann.** 2006. Experimental and texture-derived P-wave anisotropy of principal rocks from the TRANSALP traverse: An aid for the interpretation of seismic field data. Tectonophysics 414:97–116.
- Vasquez Paredes, T. T.** 2008. Aplicacion de Metodos Sismicos: Vibraciones Naturales y Refraccion de Microtremores para Caracterizacion de Sitio en Estudios de Ingenieria Civil. Universidad Simon Bolivar.
- Vautier, P.** 2012. A Micromechanical Analysis of Stress Waves travelling through Sand under Anisotropic Loading. 1st Civ. Enviromental Eng. Student Conf.
- Watanabe, T., T. Hirai, y K. Sassa.** 1996. Seismic travelttime tomography in anisotropic heterogeneous media. J. Appl. Geophys. 35:133–143.
- Watanabe, T., y K. Sassa.** 1995. Velocity and Amplitude of P-Waves transmitted through fractured zones composed of multiple thin low-velocity layers. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr. 32:313–324.
- Wu, W., J. C. Li, y J. Zhao.** 2013. Seismic response of adjacent filled parallel rock fractures with dissimilar properties. J. Appl. Geophys. 96:33–37.
- Yilmaz, I., y Ö. Yucel.** 2014. Use of the core strangle test for determining strength anisotropy of rocks. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. 66:57–63.
- Yun, T. S., Y. J. Jeong, K. Y. Kim, y K.-B. Min.** 2013. Evaluation of rock anisotropy using 3D X-ray computed tomography. Eng. Geol. 163:11–19.
- Zhao, D.** 2012. Comparison of FV, FP and FK for dispersion analysis of surface. In: SAGEEP.



Anexos

A. Caracterización de los materiales para los experimentos de laboratorio

A.1 Peso específico relativo de solidos

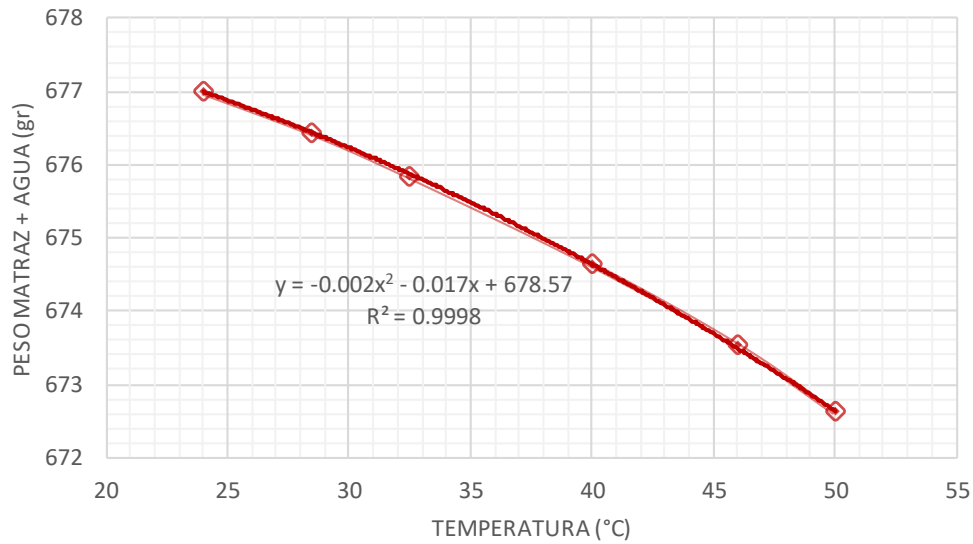


Fig. A.1 Curva de calibración del matraz aforado.

Tabla A.1 Factor de corrección al utilizar agua común.

Volumen de Aforo	Peso del Agua	Densidad del Agua	Temperatura	Factor de Corrección α	Error Relativo
(cm ³)	(gr)	(gr/cm ³)	(°C)		
500	499.33	0.99866	24	0.9991	0.0013418

Tabla A.2 Peso específico relativo de solidos de las muestras M1, M2, M3 y M4.

ID	Temperatura (°C)	Peso			Peso Específico Relativo de Sólidos	
		Suelo seco (gr)	Matraz + Agua + Suelo (gr)	Matraz + Agua (gr)	Ss (gr/cm ³)	α Ss (gr/cm ³)
M1	47.0	50.00	704.72	674.95	2.471	2.469
	42.0	50.00	706.14	675.76	2.549	2.547
	35.0	50.00	707.12	676.72	2.552	2.549
	32.0	50.00	707.44	677.07	2.548	2.545
M2	49.0	50.00	703.87	674.60	2.412	2.410
	40.0	50.00	705.69	676.05	2.456	2.454
	34.0	50.00	706.62	676.84	2.473	2.471
	31.0	50.00	706.98	677.18	2.476	2.474
M3	55.0	50.00	699.39	673.46	2.078	2.076
	44.5	50.00	701.49	675.37	2.094	2.092
	35.5	50.00	702.83	676.65	2.099	2.097
	27.5	50.00	704.50	677.53	2.172	2.170
M4	51.5	50.00	700.66	674.14	2.129	2.127
	44.0	50.00	702.03	675.45	2.135	2.133
	34.0	50.00	704.01	676.84	2.190	2.189
	28.0	50.00	704.75	677.48	2.200	2.198

Anexos

A.2 Granulometría

Tabla A.3 Granulometría vía seca (tamices) y vía húmeda (hidrómetro) de la muestra M1.

Granulometría con tamices										
Testigo de humedad que pasa la no. 4						Malla o Tamiz		Material		
No.	Wf	Wf + Wh	Wf + Ws	Ww	Humedad	No.	Abertura	Retenido	Acumulado	Que pasa
	(gr)	(gr)	(gr)	(gr)	ω (%)	#	(mm)	(gr)	(%)	(%)
10	122.31	210.70	200.80	9.90	12.61%	3"	76.20	0.00	0.00%	100.00%
						2"	50.80	0.00	0.00%	100.00%
						1 1/2"	38.10	0.00	0.00%	100.00%
						1"	25.40	0.00	0.00%	100.00%
						3/4"	19.10	0.00	0.00%	100.00%
						1/2"	12.70	13.74	0.31%	99.69%
						3/8"	9.52	15.06	0.64%	99.36%
						1/4"	6.35	27.03	1.24%	98.76%
						No. 4	4.76	31.66	1.95%	98.05%
						No. 10	2.00	5.30	3.88%	96.12%
						No. 20	0.84	7.07	6.46%	93.54%
						No. 40	0.42	8.21	9.45%	90.55%
						No. 60	0.25	4.07	10.94%	89.06%
						No. 100	0.149	6.53	13.32%	86.68%
						No. 200	0.074	11.58	17.54%	82.46%
						Pasa No. 200		226.12	100.00%	0.00%
						Total		268.88		

Muestra	Retenido en No. 4	Pasa No. 4	Total
Peso Humedo (gr)	88.76	4952.92	5041.68
Peso Seco (gr)	88.76	4398.18	4486.94
Muestra húmeda (gr)	-	302.79	302.79
Muestra seca (gr)	-	268.88	268.88

	Grava	1.95%
	Arena	15.59%
	Finos	82.46%
D ₁₀ (mm)	-	
D ₃₀ (mm)	-	
D ₆₀ (mm)	-	
Coeficiente de uniformidad		Cu
Coeficiente de curvatura		Cc

Granulometría vía hidrómetro														
Probeta		Hidrometro		Suelo	Correcciones		Defloculante: Na ₆ P ₆ O ₁₈							
H (cm)	38.2	ASTM 152H		Peso Seco	Menisco	Densidad	Hexametafosfato de Sodio							
V (cm ³)	1000	Identif #	No. 1	(gr)	C _m	C _D	gr	ml	%					
A (cm ²)	26.18	V _H (ml)	70	50.00	-1	5	5.0	125.0	4.0%					
Fecha	Hora	Tiempo	Temp (°C)	Lectura						% mas Fino	Prof. Efectiva L (cm)	K	Diametro D (mm)	% Mas Fino al Total
				Aparente			Corregida							
				R _{real}	R _c	R	R _c	R	R					
19/10/15	13:00	20 seg	20.0	41	44	45	40.00	39.00	100.00%	9.90	0.0141	0.07673	82.46%	
		40 seg	20.0	39	42	44	39.00	38.00	79.56%	10.10	0.0141	0.05480	65.60%	
		60 seg	20.0	38	41	43	38.00	37.00	77.52%	10.20	0.0141	0.04497	63.92%	
		2 min	20.0	35	39	41	36.00	35.00	73.44%	10.60	0.0141	0.03241	60.56%	
		4 min	20.0			39	34.00	33.00	69.36%	10.90	0.0141	0.02324	57.19%	
		8 min	20.0			35	30.00	29.00	61.20%	11.50	0.0141	0.01688	50.46%	
		15 min	20.0			33	28.00	27.00	57.12%	11.90	0.0141	0.01254	47.10%	
		30 min	20.0			30	25.00	24.00	51.00%	12.40	0.0141	0.00905	42.05%	
		1 hr	20.0			26	21.00	20.00	42.84%	13.00	0.0141	0.00655	35.32%	
		2 hr	20.0			24	19.00	18.00	38.76%	13.30	0.0141	0.00469	31.96%	
		5 hr	20.0			22	17.00	16.00	34.68%	13.70	0.0141	0.00301	28.60%	
		8 hr	20.0			20	15.00	14.00	30.60%	14.00	0.0141	0.00240	25.23%	
20/10/15	13:00	24 hr	21.0			16	11.20	10.20	22.85%	14.70	0.0139	0.00141	18.84%	
		30 hr	21.0			15	10.20	9.20	20.81%	14.80	0.0139	0.00126	17.16%	
21/10/15	13:00	48 hr	21.0			8	3.20	2.20	6.53%	16.00	0.0139	0.00104	5.38%	
		56 hr	21.0			6	1.20	0.20	2.45%	16.30	0.0139	0.00097	2.02%	
22/10/15	13:00	72 hr	21.0			6	1.20	0.20	2.45%	16.30	0.0139	0.00085	2.02%	

Anexos

Tabla A.4 Granulometría vía seca (tamices) y vía húmeda (hidrómetro) de la muestra M2.

Granulometría con tamices										
Testigo de humedad que pasa la no. 4					Malla o Tamiz		Material			
No.	Wf (gr)	Wf + Wh (gr)	Wf + Ws (gr)	Ww (gr)	Humedad ω (%)	No.	Abertura (mm)	Retenido (gr)	Acumulado (%)	Que pasa (%)
1	125.26	208.64	192.26	16.38	24.45%	3"	76.20	0.00	0.00%	100.00%
						2"	50.80	0.00	0.00%	100.00%
						1 1/2"	38.10	0.00	0.00%	100.00%
						1"	25.40	0.00	0.00%	100.00%
						3/4"	19.10	28.83	0.70%	99.30%
						1/2"	12.70	8.54	0.91%	99.09%
						3/8"	9.52	6.75	1.08%	98.92%
						1/4"	6.35	24.22	1.67%	98.33%
						No. 4	4.76	14.31	2.02%	97.98%
						No. 10	2.00	1.64	2.68%	97.32%
						No. 20	0.84	0.36	2.83%	97.17%
						No. 40	0.42	1.70	3.52%	96.48%
						No. 60	0.25	1.83	4.26%	95.74%
						No. 100	0.149	5.38	6.44%	93.56%
						No. 200	0.074	15.87	12.87%	87.13%
						Pasa No. 200		215.03	100.00%	0.00%
						Total		241.81		

Muestra	Retenido en No. 4	Pasa No. 4	Total
Peso Humedo (gr)	83.16	4994.54	5077.70
Peso Seco (gr)	83.16	4013.36	4096.52
Muestra húmeda (gr)	-	300.93	300.93
Muestra seca (gr)	-	241.81	241.81

	Grava	2.02%
	Arena	10.85%
	Finos	87.13%
	D ₁₀ (mm)	-
	D ₃₀ (mm)	-
	D ₆₀ (mm)	-
	Coefficiente de uniformidad	Cu -
	Coefficiente de curvatura	Cc -

Granulometría vía hidrómetro													
Probeta		Hidrometro		Suelo	Correcciones		Defloculante: Na ₆ P ₆ O ₁₈						
H (cm)	38.2	ASTM 152H		Peso Seco	Menisco	Densidad	Hexametáfosfato de Sodio						
V (cm ³)	1000	Identif #	No. 1	(gr)	C _m	C _D	gr	ml	%				
A (cm ²)	26.18	V _H (ml)	70	50.00	-1	5	5.0	125.0	4.0%				
Fecha	Hora	Tiempo	Temp (°C)	Lectura					% mas Fino	Prof. Efectiva L (cm)	K	Diametro D (mm)	% Mas Fino al Total
				Aparente			Corregida						
				R _{real}	R _c	R	R _c	R					
19/10/15	13:00	20 seg	20.0	44	46	48	43.00	42.00	100.00%	9.40	0.0146	0.07732	87.13%
		40 seg	20.0	42	43	46	41.00	40.00	86.10%	9.70	0.0146	0.05554	75.02%
		60 seg	20.0	40	41	44	39.00	38.00	81.90%	10.10	0.0146	0.04627	71.36%
		2 min	20.0	35	36	40	35.00	34.00	73.50%	10.70	0.0146	0.03368	64.04%
		4 min	20.0			34	29.00	28.00	60.90%	11.70	0.0146	0.02490	53.06%
		8 min	20.0			28	23.00	22.00	48.30%	12.70	0.0146	0.01835	42.08%
		15 min	20.0			24	19.00	18.00	39.90%	13.30	0.0146	0.01371	34.77%
		30 min	20.0			21	16.00	15.00	33.60%	13.80	0.0146	0.00988	29.28%
		1 hr	20.0			17	12.00	11.00	25.20%	14.50	0.0146	0.00716	21.96%
		2 hr	20.0			15	10.00	9.00	21.00%	14.80	0.0146	0.00511	18.30%
		5 hr	20.0			12	7.00	6.00	14.70%	15.30	0.0146	0.00329	12.81%
		8 hr	20.0			11	6.00	5.00	12.60%	15.50	0.0146	0.00262	10.98%
20/10/15	13:00	24 hr	21.0			9	4.20	3.20	8.82%	15.80	0.0144	0.00151	7.68%
		30 hr	21.0			8	3.20	2.20	6.72%	16.00	0.0144	0.00136	5.86%
21/10/15	13:00	48 hr	21.0			8	3.20	2.20	6.72%	16.00	0.0144	0.00107	5.86%
		56 hr	21.0			7	2.20	1.20	4.62%	16.10	0.0144	0.00100	4.03%
22/10/15	13:00	72 hr	21.0			6	1.20	0.20	2.52%	16.30	0.0144	0.00088	2.20%

Anexos

Tabla A.5 Granulometría vía seca (tamices) y vía húmeda (hidrómetro) de la muestra M3.

Granulometría con tamices										
Testigo de humedad que pasa la no. 4						Malla o Tamiz		Material		
No.	Wf (gr)	Wf + Wh (gr)	Wf + Ws (gr)	Ww (gr)	Humedad ω (%)	No.	Abertura (mm)	Retenido (gr)	Acumulado (%)	Que pasa (%)
7	128.55	217.78	192.26	25.52	40.06%	1"	25.40	0.00	0.00%	100.00%
						3/4"	19.10	0.00	0.00%	100.00%
						1/2"	12.70	0.00	0.00%	100.00%
						3/8"	6.35	0.00	0.00%	100.00%
						No. 4	4.76	0.00	0.00%	100.00%
						No. 10	2.00	46.37	19.58%	80.42%
						No. 14	1.19	24.23	29.82%	70.18%
						No. 20	0.84	29.27	42.18%	57.82%
						No. 30	0.59	19.63	50.47%	49.53%
						No. 40	0.42	20.33	59.06%	40.94%
						No. 50	0.30	10.32	63.42%	36.58%
						No. 60	0.25	2.21	64.35%	35.65%
						No. 80	0.18	11.88	69.37%	30.63%
						No. 100	0.149	4.52	71.28%	28.72%
						No. 200	0.074	11.85	76.28%	23.72%
						Pasa No. 200		56.16	100.00%	0.00%
						Total		236.77		

Muestra	Retenido en No. 4	Pasa No. 4	Total
Peso Humedo (gr)	0.00	5000.00	5000.00
Peso Seco (gr)	0.00	3569.99	3569.99
Muestra humeda (gr)	-	331.61	331.61
Muestra seca (gr)	-	236.77	236.77

	Grava	0.00%	
	Arena	76.28%	
	Finos	23.72%	
D ₁₀ (mm)	0.03		
D ₃₀ (mm)	0.18		
D ₆₀ (mm)	0.90		
Coeficiente de uniformidad		Cu	30.0
Coeficiente de curvatura		Cc	1.2

Granulometría vía hidrómetro													
Probeta		Hidrometro		Suelo	Correcciones		Defloculante: Na ₆ P ₆ O ₁₈						
H (cm)	38.2	ASTM 152H		Peso Seco	Menisco	Densidad	Hexametafosfato de Sodio						
V (cm ³)	1000	Identif #	No. 1	(gr)	C _m	C _d	gr	ml	%				
A (cm ²)	26.18	V _H (ml)	70	50.00	-1	5	5.0	125.0	4.0%				
Fecha	Hora	Tiempo	Temp (°C)	Lectura			% mas Fino	Prof. Efectiva L (cm)	K	Diametro D (mm)	% Mas Fino al Total		
				Aparente		Corregida							
				R _{real}	R _c	R							
19/10/15	13:00	20 seg	20.0	44	46	48	43.00	42.00	100.00%	9.40	0.0146	0.07732	23.72%
		40 seg	20.0	42	43	46	41.00	40.00	86.10%	9.70	0.0146	0.05554	20.42%
		60 seg	20.0	40	41	44	39.00	38.00	81.90%	10.10	0.0146	0.04627	19.43%
		2 min	20.0	35	36	40	35.00	34.00	73.50%	10.70	0.0146	0.03368	17.43%
		4 min	20.0			34	29.00	28.00	60.90%	11.70	0.0146	0.02490	14.44%
		8 min	20.0			28	23.00	22.00	48.30%	12.70	0.0146	0.01835	11.46%
		15 min	20.0			24	19.00	18.00	39.90%	13.30	0.0146	0.01371	9.46%
		30 min	20.0			21	16.00	15.00	33.60%	13.80	0.0146	0.00988	7.97%
		1 hr	20.0			17	12.00	11.00	25.20%	14.50	0.0146	0.00716	5.98%
		2 hr	20.0			15	10.00	9.00	21.00%	14.80	0.0146	0.00511	4.98%
		5 hr	20.0			12	7.00	6.00	14.70%	15.30	0.0146	0.00329	3.49%
		8 hr	20.0			11	6.00	5.00	12.60%	15.50	0.0146	0.00262	2.99%
20/10/15	13:00	24 hr	21.0			9	4.20	3.20	8.82%	15.80	0.0144	0.00151	2.09%
		30 hr	21.0			8	3.20	2.20	6.72%	16.00	0.0144	0.00136	1.59%
21/10/15	13:00	48 hr	21.0			8	3.20	2.20	6.72%	16.00	0.0144	0.00107	1.59%
		56 hr	21.0			7	2.20	1.20	4.62%	16.10	0.0144	0.00100	1.10%
22/10/15	13:00	72 hr	21.0			6	1.20	0.20	2.52%	16.30	0.0144	0.00088	0.60%

Anexos

Tabla A.6 Granulometría vía seca (tamices) de la muestra M4.

Granulometría con tamices					
Testigo de humedad que pasa la no. 4					
No.	Wf (gr)	Wf + Wh (gr)	Wf + Ws (gr)	Ww (gr)	Humedad ω (%)
66	117.02	271.79	257.05	14.74	10.53%

Muestra	Retenido en No. 4	Pasa No. 4	Total
Peso Humedo (gr)	0.00	5000.00	5000.00
Peso Seco (gr)	0.00	4523.81	4523.81
Muestra humeda (gr)	-	381.02	381.02
Muestra seca (gr)	-	344.73	344.73

Malla o Tamiz	Material			
No. #	Abertura (mm)	Retenido (gr)	Acumulado (%)	Que pasa (%)
2"	50.80	0.00	0.00%	100.00%
1"	25.40	0.00	0.00%	100.00%
3/4"	19.10	0.00	0.00%	100.00%
1/2"	12.70	0.00	0.00%	100.00%
3/8"	6.35	0.00	0.00%	100.00%
No. 4	4.76	0.00	0.00%	100.00%
No. 10	2.00	52.93	15.35%	84.65%
No. 20	0.84	56.78	31.82%	68.18%
No. 30	0.59	42.32	44.10%	55.90%
No. 40	0.42	13.28	47.95%	52.05%
No. 50	0.30	42.15	60.18%	39.82%
No. 60	0.25	18.68	65.60%	34.40%
No. 80	0.18	30.27	74.38%	25.62%
No. 100	0.149	15.37	78.84%	21.16%
No. 200	0.074	36.13	89.32%	10.68%
Pasa No. 200		36.82	100.00%	0.00%
Total		344.73		

Grava	0.00%
Arena	89.32%
Finos	10.68%
D ₁₀ (mm)	0.07
D ₃₀ (mm)	0.25
D ₆₀ (mm)	0.70
Coeficiente de uniformidad Cu 10.0	
Coeficiente de curvatura Cc 1.3	

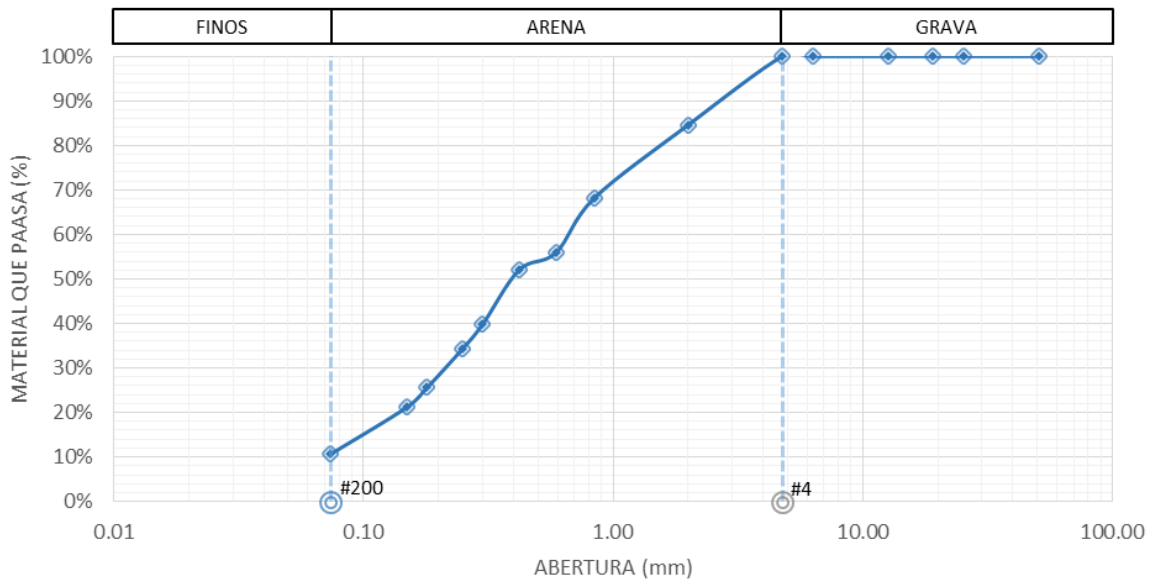


Fig. A.2 Curva granulométrica de la muestra M4.

Anexos

A.3 Peso específico

Tabla A.7 Peso específico de las muestras M1 y M2 por medio del método del mercurio desplazado.

Peso específico del suelo (Mercurio desplazado)							
ID	Flanera		Flanera + Suelo	Mercurio desplazado	Suelo		Peso Específico de la muestra
	No.	Wf (gr)	Wf + Wm (gr)	Whg (gr)	Wm (gr)	Vm (cm ³)	γ_m (gr/cm ³)
M1	-	0.00	135.00	1004.56	135.00	74.08	1.822
M2	-	0.00	129.96	1138.45	129.96	83.96	1.548

Tabla A.8 Peso específico seco suelto de las muestras M3 y M4 por medio de un volumen conocido.

Peso específico seco suelto (Volumen conocido)							
ID	Molde			Molde + Suelo	Suelo		Peso Específico de la muestra
	No.	Wm (gr)	Vm (ml)	Wm + Wh (gr)	Ws (gr)	Vs (cm ³)	γ_m (gr/cm ³)
M3	-	2267.67	2379.00	4530.00	2262.33	2379.00	0.951
M4	-	1876.66	2800.00	5220.00	3343.34	2800.00	1.194

A.4 Humedad natural

Tabla A.9 Humedades naturales de las muestras M1, M2, M3 y M4.

ID	Flanera		Flanera + Suelo Humedo	Flanera + Suelo Seco	Suelo Humedo	Suelo Seco	Agua	Humedad Natural
	No.	Wf (gr)	Wf + Wh (gr)	Wf + Ws (gr)	Wh (gr)	Ws (gr)	Ww (gr)	ω (%)
M1	1	125.26	248.20	223.99	122.94	98.73	24.21	24.52%
M2	2	120.94	261.50	227.30	140.56	106.36	34.20	32.15%
M3	3	125.26	237.54	228.35	112.28	103.09	9.19	8.91%
M4	66	117.02	271.79	257.05	154.77	140.03	14.74	10.53%

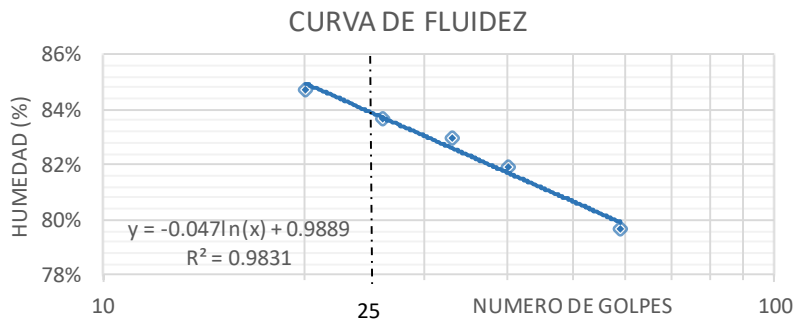
Anexos

A.5 Límites de consistencia

Tabla A.10 Límites de consistencia de la muestra M1.

Limite líquido (Copa de Casagrande)								
Flanera		Flanera + Suelo Humedo	Flanera + Suelo Seco	Suelo Humedo	Suelo Seco	Agua	Humedad	No. de Golpes
No.	Wf (gr)	Wf + Wh (gr)	Wf + Ws (gr)	Wh (gr)	Ws (gr)	Ww (gr)	ω (%)	#
3	120.90	152.59	138.54	31.69	17.64	14.05	79.65%	59
4	128.55	168.70	150.62	40.15	22.07	18.08	81.92%	40
5	142.02	184.90	165.46	42.88	23.44	19.44	82.94%	33
6	121.44	168.22	146.91	46.78	25.47	21.31	83.67%	26
7	119.6	160.54	141.76	40.94	22.16	18.78	84.75%	20

Limite Plástico								
Flanera		Flanera + Suelo Humedo	Flanera + Suelo Seco	Suelo Humedo	Suelo Seco	Agua	Humedad	Descripción
No.	Wf (gr)	Wf + Wh (gr)	Wf + Ws (gr)	Wh (gr)	Ws (gr)	Ww (gr)	ω (%)	
8	8.58	17.65	15.34	9.07	6.76	2.31	34.17%	Facil de formar
9	8.64	19.36	16.62	10.72	7.98	2.74	34.34%	



Limite líquido LL (%)	83.76%
-----------------------	---------------

Limite Plástico LP (%)	34.25%
------------------------	---------------

Índice plástico Ip (%)	49.51%
------------------------	---------------

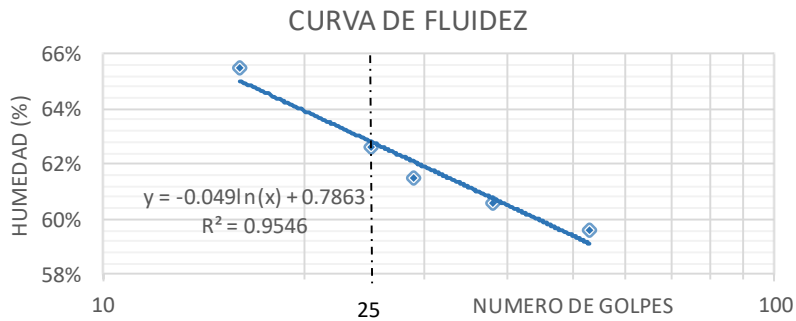
Contracción lineal		Limite de contracción			
Longitud Inicial (mm)	99.83	Caja Petri (gr)	18.30	Caja + Mercurio (gr)	445.70
	100.06	Caja + Suelo Humedo (gr)	64.47	Mercurio (gr)	427.40
Longitud Final (mm)	99.88	Caja + Suelo Seco (gr)	43.54	Volumen inicial (cm ³)	31.52
	78.14	Suelo Humedo (gr)	46.17	Mercurio desplazado (gr)	182.82
	77.16	Suelo Seco (gr)	25.24	Volumen final (cm ³)	13.48
Contracción Lineal CL (%)	21.66%			Limite de Contracción LC (%)	11.46%

Anexos

Tabla A.11 Límites de consistencia de la muestra M2.

Limite líquido (Copa de Casagrande)								
Flanera		Flanera + Suelo Humedo	Flanera + Suelo Seco	Suelo Humedo	Suelo Seco	Agua	Humedad	No. de Golpes
No.	Wf (gr)	Wf + Wh (gr)	Wf + Ws (gr)	Wh (gr)	Ws (gr)	Ww (gr)	ω (%)	#
4	125.23	189.02	165.19	63.79	39.96	23.83	59.63%	53
5	115.97	179.28	155.39	63.31	39.42	23.89	60.60%	38
6	124.89	186.79	163.22	61.90	38.33	23.57	61.49%	29
7	124.15	183.11	160.41	58.96	36.26	22.70	62.60%	25
8	120.76	175.84	154.04	55.08	33.28	21.80	65.50%	16

Limite Plástico								
Flanera		Flanera + Suelo Humedo	Flanera + Suelo Seco	Suelo Humedo	Suelo Seco	Agua	Humedad	Descripción
No.	Wf (gr)	Wf + Wh (gr)	Wf + Ws (gr)	Wh (gr)	Ws (gr)	Ww (gr)	ω (%)	
1	58.65	66.54	64.23	7.89	5.58	2.31	41.40%	Facil de formar
2	58.71	68.00	65.34	9.29	6.63	2.66	40.12%	



Limite líquido LL (%)	62.86%
-----------------------	---------------

Limite Plástico LP (%)	40.76%
------------------------	---------------

Índice plástico Ip (%)	22.10%
------------------------	---------------

Contracción lineal		Limite de contracción			
Longitud Inicial (mm)	101.72	Caja Petri (gr)	25.58	Caja + Mercurio (gr)	421.31
	101.53	Caja + Suelo Humedo (gr)	71.34	Mercurio (gr)	395.73
	101.77	Caja + Suelo Seco (gr)	53.79	Volumen inicial (cm ³)	29.18
Longitud Final (mm)	85.37	Suelo Humedo (gr)	45.76	Mercurio desplazado (gr)	217.70
	85.43	Suelo Seco (gr)	28.21	Volumen final (cm ³)	16.05
	85.19			Limite de Contracción LC (%)	15.67%
Contracción Lineal CL (%)	16.07%				

Anexos

A.6 Compactación

Tabla A.12 Cálculo de la energía de compactación para el ensaye Proctor estándar.

Altura del Pisón, h (cm)	30.8	Numero de Capas, n (#)	3	Área del Molde, A (cm ²)	80.54
Peso del Pisón, W (kg)	2.51928	Diámetro del Molde, D (cm)	10.1266	Volumen del Molde, Vm (cm ³)	936.83
Numero de Golpes, N (#)	25	Altura del Molde, H (cm)	11.6317	Peso del Molde, Wm (gr)	2026.68
Identificación del Molde	# ..	Energía de Compactación, E (kg*cm/cm ³)			6.21

Tabla A.13 Ensaye de compactación Proctor estándar de la muestra M1.

Peso Molde + Suelo Humedo	Peso Suelo Humedo	No. de Flanera	Peso de Flanera	Peso Flanera + Suelo Humedo	Peso Flanera + Suelo Seco	Humedad	Peso Específico		Grado de Compactación	Compactación Relativa
							Suelo Húmedo	Suelo Seco		
Wm+Wh (gr)	Wm+Ws (gr)	#	Wf (gr)	Wf+Wh (gr)	Wf+Ws (gr)	ω (%)	γ _h (gr/cm ³)	γ _s (gr/cm ³)	Gc (%)	CR (%)
3579.10	1552.42	24	126.96	192.52	179.50	24.78%	1.66	1.328	95.38%	0.00%
3687.87	1661.19	37	123.81	191.49	176.74	27.87%	1.77	1.387	99.60%	91.28%
3733.24	1706.56	10	129.55	195.92	180.28	30.83%	1.82	1.392	100.00%	100.00%
3743.01	1716.33	18	123.20	192.62	175.03	33.94%	1.83	1.368	98.24%	61.90%
3722.92	1696.24	3	131.15	194.44	177.62	36.20%	1.81	1.329	95.48%	2.21%

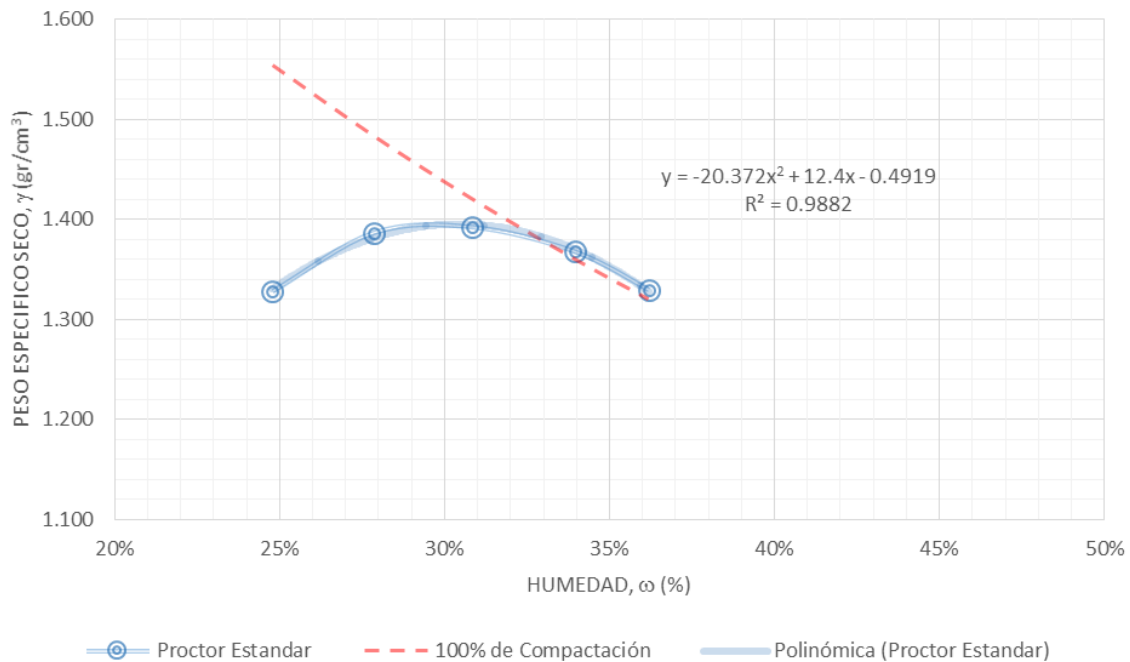


Fig. A.3 Curva de compactación Proctor estándar de la muestra M1.

Anexos

Tabla A.14 Ensaye de compactación Proctor estándar de la muestra M2.

Peso Molde + Suelo Humedo	Peso Suelo Humedo	No. de Flanera	Peso de Flanera	Peso Flanera + Suelo Humedo	Peso Flanera + Suelo Seco	Humedad	Peso Específico		Grado de Compactación	Compactación Relativa
							Suelo Húmedo	Suelo Seco		
Wm+Wh (gr)	Wm+Ws (gr)	#	Wf (gr)	Wf+Wh (gr)	Wf+Ws (gr)	ω (%)	γ_h (gr/cm ³)	γ_s (gr/cm ³)	Gc (%)	CR (%)
3480.19	1453.51	6	119.59	196.24	178.61	29.87%	1.55	1.195	94.96%	0.00%
3557.45	1530.77	23	122.57	200.01	181.15	32.20%	1.63	1.236	98.25%	65.27%
3614.29	1587.61	66	117.18	191.18	172.04	34.89%	1.69	1.256	99.86%	97.28%
3639.96	1613.28	7	128.52	212.10	189.58	36.88%	1.72	1.258	100.00%	100.00%
3676.90	1650.22	37	123.80	203.79	180.70	40.58%	1.76	1.253	99.60%	92.04%
3628.97	1602.29	20	116.00	201.30	175.17	44.16%	1.71	1.186	94.30%	-13.02%

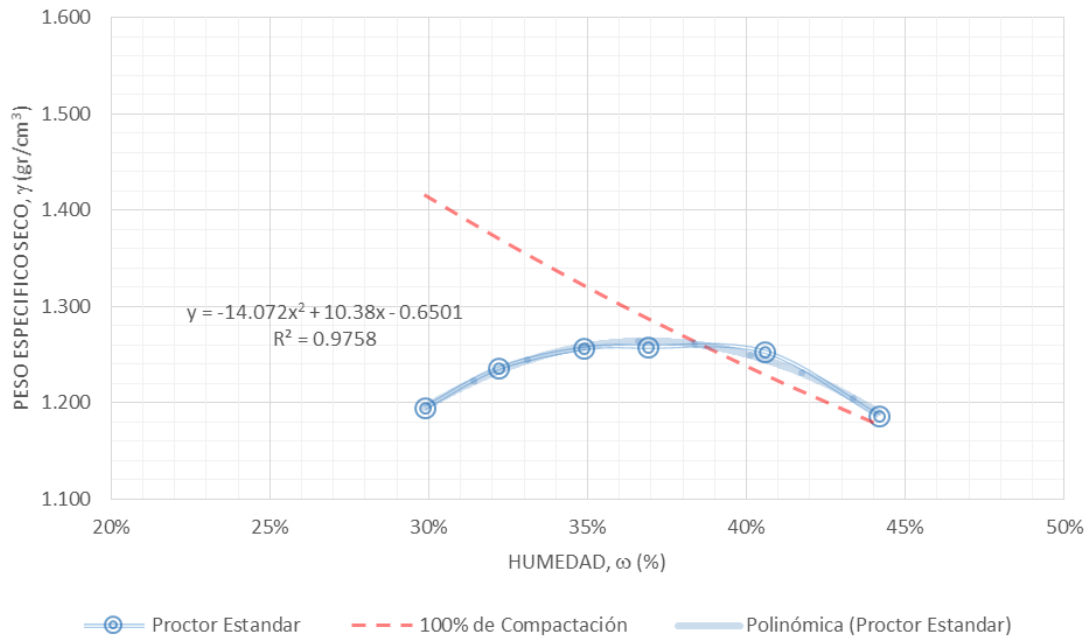






Fig. A.4 Curva de compactación Proctor estándar de la muestra M2.

Anexos

A.7 Resistencia a la compresión

Tabla A.15 Ensaye de resistencia a la compresión simple en especímenes de concreto C1.

DIMENSIONAMIENTO											
ID	Diámetro (cm)			Altura (cm)			Relación Altura / Diámetro	Area (cm ²)	Volumen (cm ³)	Peso (gr)	Peso Especifico (gr/cm ³)
#	Superior	Inferior	Promedio	Interior	Exterior	Promedio					
1A	10.088	10.067	10.078	20.433	20.461	20.447	2.0	79.76	1630.89	2905.54	1.78
1	5.033	5.038	5.036	9.997	10.018	10.008	2.0	19.91	199.30	352.65	1.77
2	5.053	5.046	5.050	10.034	10.085	10.060	2.0	20.03	201.45	352.02	1.75
3	5.094	5.072	5.083	10.201	10.213	10.207	2.0	20.29	207.12	362.94	1.75
											1.76

ENSAYE DE COMPRESIÓN					
ID	Edad Nominal	Carga Maxima		Resistencia a la Compresión	Diagrama de la Falla
#	dias	KN	kg	kg/cm ²	
1A	28	208.136	21224	266	
1	28	47.77	4871.18	245	
2	28	52.03	5305.58	265	
3	28	42.65	4349.09	214	
				247	

A.8 Volumetría y pesos de bloques, placas y cajas empleadas.

Tabla A.16 Pesos y volúmenes de las cajas contenedoras utilizadas.

CAJAS CONTENEDORAS						
ID	Peso	Dimensiones (cm)			Volumen	Para utilizar en
#	gr	Alto	Ancho	Largo	cm ³	
1	80.6	9.5	10.0	30.0	2850	ARCILLA (M1)
1.1	324.7	9.5	10.0	60.0	5700	
2	80.4	9.5	10.0	30.0	2850	LIMO (M2)
2.1	317.8	9.5	10.0	60.0	5700	
3	80.6	9.5	10.0	30.0	2850	ARENA (M3)
3.1	318.8	9.5	10.0	60.0	5700	

Anexos

Tabla A.17 Pesos y volúmenes de los bloques de materiales de referencia C1 y C2.

BLOQUES DE MATERIAL DE REFERENCIA							
ID	Peso	Dimensiones (cm)			Area	Volumen	Peso específico
		Ancho	Alto	Largo			
#	gr	Promedio	Promedio	Promedio	cm ²	cm ³	gr/cm ³
C1	5156.0	10.020	10.067	29.975	100.88	3023.82	1.71
C2	759.3	10.000	9.500	60.000	95.00	5700.00	0.13

Tabla A.18 Pesos y volúmenes de las placas de concreto C1 y cartón C2 empleadas.

PLACAS DE CONCRETO (C1)					
ID	Peso	Area	Volumen	Peso específico	Para utilizar en
#	gr	cm ²	cm ³	gr/cm ³	
1	176.1	97.81	103.77	1.70	ARCILLA (M1)
2	174.6	97.53	105.94	1.65	
3	150.1	97.36	89.64	1.67	
4	155.1	98.41	93.37	1.66	
13	164.5	97.83	99.37	1.66	
14	153.3	98.38	91.05	1.68	
5	152.2	97.91	90.67	1.68	LIMO (M2)
7	177.9	97.81	103.58	1.72	
8	172.3	99.11	98.61	1.75	
15	180.3	97.67	105.68	1.71	
16	164.8	98.88	97.13	1.70	
19	155.5	98.54	98.12	1.58	
6	162.0	97.75	93.16	1.74	ARENA (M3)
9	156.0	98.23	95.33	1.64	
10	168.5	98.50	100.45	1.68	
11	164.7	97.94	99.77	1.65	
12	165.6	97.72	98.72	1.68	
17	149.5	97.92	90.03	1.66	
18	158.7	98.51	93.34	1.70	

PLACAS DE CARTÓN (C2)					
ID	Peso	Area	Volumen	Peso específico	Para utilizar en
#	gr	cm ²	cm ³	gr/cm ³	
6	22.3	96.04	105.64	0.21	ARCILLA (M1)
5	22.2	96.04	105.64	0.21	
4	22.3	96.04	105.64	0.21	
3	23.0	96.04	105.64	0.22	
2	22.6	96.04	105.64	0.21	
1	22.5	96.04	105.64	0.21	
12	22.1	96.04	105.64	0.21	LIMO (M2)
11	22.5	96.04	105.64	0.21	
10	22.6	96.04	105.64	0.21	
9	23.0	96.04	105.64	0.22	
8	23.1	96.04	105.64	0.22	
7	22.4	96.04	105.64	0.21	
18	22.5	96.04	105.64	0.21	ARENA (M3)
17	22.7	96.04	105.64	0.21	
16	23.0	96.04	105.64	0.22	
15	22.3	96.04	105.64	0.21	
14	22.7	96.04	105.64	0.21	
13	22.8	96.04	105.64	0.22	



B. Mediciones de propagación de ondas en el experimento a escala de laboratorio

Anexos

B.1 Mediciones de propagación de ondas en materiales de referencia

Tabla B.1 Mediciones obtenidas en los materiales de referencia en las primeras dos etapas.

PROPIEDADES	1a Etapa				2a Etapa			
	CONCRETO (C1)	ARCILLA (M1)	LIMO (M2)	ARENA (M3)	CONCRETO (C1)	ARCILLA (M1)	LIMO (M2)	ARENA (M3)
Cantidad de placas	Sin Placas				Sin Placas			
Distancia entre fuente y sensor, ℓ (m)	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24
Tiempo de Arribo, Δt_1 (ms)	0.202	1.112	1.200	1.304	0.332	1.480	1.680	2.380
Tiempo de Arribo, Δt_2 (ms)	0.174	1.128	1.168	1.248	0.324	1.420	1.600	2.420
Tiempo de Arribo, Δt_3 (ms)	0.208	1.136	1.216	1.248	0.336	1.500	1.660	2.280
Tiempo de Arribo, Δt_4 (ms)	0.190	1.152	1.248	1.240	0.344	1.540	1.500	2.520
Tiempo de Arribo, Δt_5 (ms)	0.198	1.128	1.216	1.288	0.300	1.560	1.580	2.420
Tiempo de arribo promedio, Δt_{prom} (ms)	0.194	1.131	1.210	1.266	0.327	1.500	1.604	2.404
Desviación estándar (ms)	0.012	0.013	0.026	0.025	0.015	0.049	0.064	0.077
Velocidad de onda, V_p (m/s)	1234.6	212.2	198.4	189.6	733.5	160.0	149.6	99.8
Peso caja + Muestra + Placas, W_T (gr)	5156.0	3158.6	3767.6	3428.9	5156.0	3305.1	3755.9	3387.9
Peso específico, γ (gr/cm ³)	1.71	1.08	1.29	1.17	1.71	1.13	1.29	1.16
Humedad, ω (%)	-	22.6%	34.9%	12.3%	-	25.4%	34.4%	13.0%

Tabla B.2 Mediciones obtenidas en los materiales de referencia en la tercera etapa.

PROPIEDADES	3a Etapa							
	CONCRETO (C1)	ARCILLA (M1)	LIMO (M2)	ARENA (M3)	CARTÓN (C2)	ARCILLA (M1)	LIMO (M2)	ARENA (M3)
Cantidad de placas	Sin Placas				Sin Placas			
Distancia entre fuente y sensor, ℓ (m)	0.24	0.51	0.51	0.51	0.51	0.51	0.51	0.51
Tiempo de Arribo, Δt_1 (ms)	0.180	1.500	1.500	1.900	0.400	1.500	1.300	1.900
Tiempo de Arribo, Δt_2 (ms)	0.180	1.460	1.460	1.780	0.360	1.460	1.380	1.860
Tiempo de Arribo, Δt_3 (ms)	0.160	1.540	1.380	1.860	0.320	1.580	1.300	1.860
Tiempo de Arribo, Δt_4 (ms)	0.200	1.540	1.460	1.860	0.320	1.580	1.340	1.820
Tiempo de Arribo, Δt_5 (ms)	0.160	1.540	1.460	1.820	0.360	1.540	1.260	1.820
Tiempo de arribo promedio, Δt_{prom} (ms)	0.176	1.516	1.452	1.844	0.352	1.532	1.316	1.852
Desviación estándar (ms)	0.015	0.032	0.039	0.041	0.030	0.047	0.041	0.030
Velocidad de onda, V_p (m/s)	1363.6	336.4	351.2	276.6	1448.9	332.9	387.5	275.4
Peso caja + Muestra + Placas, W_T (gr)	5156.0	6533.1	7257.1	6972.0	759.3	6522.1	7247.2	6992.1
Peso específico, γ (gr/cm ³)	1.71	1.09	1.22	1.17	0.13	1.09	1.22	1.17
Humedad, ω (%)	-	24.4%	34.0%	12.4%	-	24.4%	34.0%	12.4%

Anexos

B.2 Mediciones de propagación de ondas en diferentes configuraciones

Tabla B.3 Mediciones en M1, M2 y M3 en la 1ª etapa.

PROPIEDADES	ARCILLA (M1)					ARCILLA (M1)				
Cantidad de Placas	3 Placas (Concreto)					4 Placas (Concreto)				
Eje de Giro	Horizontal					Horizontal				
Ángulo de las placas, θ (°)	0	30	45	60	90	0	30	45	60	90
Distancia entre fuente y sensor, ℓ (m)	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24
Tiempo de arribo, Δt_1 (ms)	1.220	1.300	1.220	1.140	1.000	0.976	1.080	1.088	0.968	0.824
Tiempo de arribo, Δt_2 (ms)	1.180	1.160	1.200	1.060	1.040	0.960	1.064	0.984	0.928	0.832
Tiempo de arribo, Δt_3 (ms)	1.180	1.160	1.260	1.060	1.000	0.976	1.064	1.000	0.960	0.832
Tiempo de arribo, Δt_4 (ms)	1.280	1.360	1.260	1.040	1.020	0.984	1.016	1.040	0.920	0.832
Tiempo de arribo, Δt_5 (ms)	1.240	1.320	1.200	1.080	1.040	0.936	1.040	1.040	0.888	0.824
Tiempo de arribo promedio, Δt_{prom} (ms)	1.220	1.260	1.228	1.076	1.020	0.966	1.053	1.030	0.933	0.829
Desviación estándar (ms)	0.038	0.084	0.027	0.034	0.018	0.017	0.022	0.036	0.029	0.004
Velocidad de onda, V_p (m/s)	196.7	190.5	195.4	223.0	235.3	248.3	228.0	232.9	257.3	289.6
Peso caja + Muestra + Placas, W_T (gr)	3432.7	3424.6	3423.8	3428.5	3431.0	3387.8	3372.8	3366.4	3371.5	3378.1
Peso específico total, γ_T (gr/cm ³)	1.18	1.17	1.17	1.17	1.18	1.16	1.16	1.15	1.15	1.16
Peso específico de la matriz, γ_m (gr/cm ³)	1.12	1.11	1.11	1.12	1.12	1.10	1.09	1.09	1.09	1.10
Humedad, ω (%)	25.4%	25.4%	25.4%	25.4%	25.4%	22.6%	22.6%	22.6%	22.6%	22.6%

PROPIEDADES	LIMO (M2)					LIMO (M2)				
Cantidad de Placas	3 Placas (Concreto)					4 Placas (Concreto)				
Eje de Giro	Horizontal					Horizontal				
Ángulo de las placas, θ (°)	0	30	45	60	90	0	30	45	60	90
Distancia entre fuente y sensor, ℓ (m)	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24
Tiempo de arribo, Δt_1 (ms)	1.160	1.280	1.420	1.280	1.160	1.096	1.192	1.096	1.032	0.832
Tiempo de arribo, Δt_2 (ms)	1.140	1.320	1.340	1.340	1.100	1.048	1.136	1.088	1.024	0.928
Tiempo de arribo, Δt_3 (ms)	1.180	1.220	1.320	1.320	1.180	1.064	1.136	1.128	0.880	0.856
Tiempo de arribo, Δt_4 (ms)	1.120	1.240	1.380	1.260	1.120	1.064	1.184	1.144	1.016	0.856
Tiempo de arribo, Δt_5 (ms)	1.180	1.280	1.360	1.380	1.060	1.096	1.160	1.120	0.896	0.832
Tiempo de arribo promedio, Δt_{prom} (ms)	1.156	1.268	1.364	1.316	1.124	1.074	1.162	1.115	0.970	0.861
Desviación estándar (ms)	0.023	0.035	0.034	0.043	0.043	0.019	0.023	0.021	0.067	0.035
Velocidad de onda, V_p (m/s)	207.6	189.3	176.0	182.4	213.5	223.5	206.6	215.2	247.5	278.8
Peso caja + Muestra + Placas, W_T (gr)	3863.1	3866.8	3852.9	3860.9	3865.2	3957.0	3929.9	3945.5	3932.2	3933.3
Peso específico total, γ_T (gr/cm ³)	1.33	1.33	1.32	1.33	1.33	1.36	1.35	1.36	1.35	1.35
Peso específico de la matriz, γ_m (gr/cm ³)	1.28	1.28	1.28	1.28	1.28	1.32	1.31	1.31	1.31	1.31
Humedad, ω (%)	34.4%	34.4%	34.4%	34.4%	34.4%	34.9%	34.9%	34.9%	34.9%	34.9%

PROPIEDADES	ARENA (M3)					ARENA (M3)				
Cantidad de Placas	3 Placas (Concreto)					4 Placas (Concreto)				
Eje de Giro	Horizontal					Horizontal				
Ángulo de las placas, θ (°)	0	30	45	60	90	0	30	45	60	90
Distancia entre fuente y sensor, ℓ (m)	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24
Tiempo de arribo, Δt_1 (ms)	1.600	1.880	1.800	1.720	1.440	1.136	1.216	1.160	1.112	0.920
Tiempo de arribo, Δt_2 (ms)	1.540	1.860	1.860	1.820	1.400	1.192	1.232	1.176	1.064	1.024
Tiempo de arribo, Δt_3 (ms)	1.600	1.840	1.820	1.820	1.380	1.144	1.216	1.208	1.096	0.976
Tiempo de arribo, Δt_4 (ms)	1.520	1.880	1.800	1.780	1.400	1.192	1.208	1.200	1.048	0.960
Tiempo de arribo, Δt_5 (ms)	1.640	1.920	1.780	1.800	1.420	1.208	1.248	1.168	1.064	0.936
Tiempo de arribo promedio, Δt_{prom} (ms)	1.580	1.876	1.812	1.788	1.408	1.174	1.224	1.182	1.077	0.963
Desviación estándar (ms)	0.044	0.027	0.027	0.037	0.020	0.029	0.014	0.019	0.024	0.036
Velocidad de onda, V_p (m/s)	151.9	127.9	132.5	134.2	170.5	204.4	196.1	203.0	222.9	249.2
Peso caja + Muestra + Placas, W_T (gr)	3553.5	3556.6	3560.9	3552.6	3559.4	3628.8	3622.4	3617.0	3627.3	3627.2
Peso específico total, γ_T (gr/cm ³)	1.22	1.22	1.22	1.22	1.22	1.25	1.24	1.24	1.24	1.24
Peso específico de la matriz, γ_m (gr/cm ³)	1.17	1.17	1.17	1.17	1.17	1.20	1.19	1.19	1.19	1.19
Humedad, ω (%)	13.0%	13.0%	13.0%	13.0%	13.0%	12.3%	12.3%	12.3%	12.3%	12.3%

Anexos

Tabla B.4 Mediciones en M1, M2 y M3 con eje de giro horizontal en la 2ª etapa.

PROPIEDADES	ARCILLA (M1)								
Cantidad de Placas	3 Placas (Concreto)								
Eje de Giro	Horizontal								
Ángulo de las placas, θ (°)	0	30	45	60	90	120	135	150	180
Distancia entre fuente y sensor, ℓ (m)	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24
Tiempo de arribo, Δt_1 (ms)	1.460	1.580	1.880	1.620	1.500	1.620	1.880	1.580	1.460
Tiempo de arribo, Δt_2 (ms)	1.500	1.560	1.860	1.700	1.600	1.700	1.860	1.560	1.500
Tiempo de arribo, Δt_3 (ms)	1.560	1.620	1.800	1.660	1.520	1.660	1.800	1.620	1.560
Tiempo de arribo, Δt_4 (ms)	1.520	1.720	1.760	1.640	1.540	1.640	1.760	1.720	1.520
Tiempo de arribo, Δt_5 (ms)	1.560	1.800	1.800	1.740	1.620	1.740	1.800	1.800	1.560
Tiempo de arribo promedio, Δt_{prom} (ms)	1.520	1.656	1.820	1.672	1.556	1.672	1.820	1.656	1.520
Desviación estándar (ms)	0.038	0.091	0.044	0.043	0.046	0.043	0.044	0.091	0.038
Velocidad de onda, V_p (m/s)	157.9	144.9	131.9	143.5	154.2	143.5	131.9	144.9	157.9
Peso caja + Muestra + Placas, W_T (gr)	3432.7	3424.6	3423.8	3428.5	3431.0	3428.5	3423.8	3424.6	3432.7
Peso específico total, γ_T (gr/cm ³)	1.18	1.17	1.17	1.17	1.18	1.17	1.17	1.17	1.18
Peso específico de la matriz, γ_m (gr/cm ³)	1.12	1.11	1.11	1.12	1.12	1.12	1.11	1.11	1.12
Humedad, ω (%)	25.4%	25.4%	25.4%	25.4%	25.4%	25.4%	25.4%	25.4%	25.4%

PROPIEDADES	LIMO (M2)								
Cantidad de Placas	3 Placas (Concreto)								
Eje de Giro	Horizontal								
Ángulo de las placas, θ (°)	0	30	45	60	90	120	135	150	180
Distancia entre fuente y sensor, ℓ (m)	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24
Tiempo de arribo, Δt_1 (ms)	1.420	1.620	1.860	1.900	1.520	1.900	1.860	1.620	1.420
Tiempo de arribo, Δt_2 (ms)	1.480	1.700	1.840	1.840	1.500	1.840	1.840	1.700	1.480
Tiempo de arribo, Δt_3 (ms)	1.540	1.680	1.820	1.780	1.560	1.780	1.820	1.680	1.540
Tiempo de arribo, Δt_4 (ms)	1.520	1.720	1.880	1.820	1.520	1.820	1.880	1.720	1.520
Tiempo de arribo, Δt_5 (ms)	1.500	1.740	1.820	1.860	1.560	1.860	1.820	1.740	1.500
Tiempo de arribo promedio, Δt_{prom} (ms)	1.492	1.692	1.844	1.840	1.532	1.840	1.844	1.692	1.492
Desviación estándar (ms)	0.041	0.041	0.023	0.040	0.024	0.040	0.023	0.041	0.041
Velocidad de onda, V_p (m/s)	160.9	141.8	130.2	130.4	156.7	130.4	130.2	141.8	160.9
Peso caja + Muestra + Placas, W_T (gr)	3863.1	3866.8	3852.9	3860.9	3865.2	3860.9	3852.9	3866.8	3863.1
Peso específico total, γ_T (gr/cm ³)	1.33	1.33	1.32	1.33	1.33	1.33	1.32	1.33	1.33
Peso específico de la matriz, γ_m (gr/cm ³)	1.28	1.28	1.28	1.28	1.28	1.28	1.28	1.28	1.28
Humedad, ω (%)	34.4%	34.4%	34.4%	34.4%	34.4%	34.4%	34.4%	34.4%	34.4%

PROPIEDADES	ARENA (M3)								
Cantidad de Placas	3 Placas (Concreto)								
Eje de Giro	Horizontal								
Ángulo de las placas, θ (°)	0	30	45	60	90	120	135	150	180
Distancia entre fuente y sensor, ℓ (m)	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24
Tiempo de arribo, Δt_1 (ms)	1.940	2.340	2.360	2.140	1.940	2.140	2.360	2.340	1.940
Tiempo de arribo, Δt_2 (ms)	2.000	2.320	2.300	2.220	1.780	2.220	2.300	2.320	2.000
Tiempo de arribo, Δt_3 (ms)	2.060	2.300	2.240	2.180	1.820	2.180	2.240	2.300	2.060
Tiempo de arribo, Δt_4 (ms)	2.160	2.340	2.280	2.080	1.800	2.080	2.280	2.340	2.160
Tiempo de arribo, Δt_5 (ms)	2.140	2.380	2.240	2.240	1.780	2.240	2.240	2.380	2.140
Tiempo de arribo promedio, Δt_{prom} (ms)	2.060	2.336	2.284	2.172	1.824	2.172	2.284	2.336	2.060
Desviación estándar (ms)	0.083	0.027	0.045	0.057	0.060	0.057	0.045	0.027	0.083
Velocidad de onda, V_p (m/s)	116.5	102.7	105.1	110.5	131.6	110.5	105.1	102.7	116.5
Peso caja + Muestra + Placas, W_T (gr)	3553.5	3556.6	3560.9	3552.6	3559.4	3552.6	3560.9	3556.6	3553.5
Peso específico total, γ_T (gr/cm ³)	1.22	1.22	1.22	1.22	1.22	1.22	1.22	1.22	1.22
Peso específico de la matriz, γ_m (gr/cm ³)	1.17	1.17	1.17	1.17	1.17	1.17	1.17	1.17	1.17
Humedad, ω (%)	13.0%	13.0%	13.0%	13.0%	13.0%	13.0%	13.0%	13.0%	13.0%

Anexos

Tabla B.5 Mediciones en M1, M2 y M3 con eje de giro vertical en la 2ª etapa.

PROPIEDADES		ARCILLA (M1)								
Cantidad de Placas		3 Placas (Concreto)								
Eje de Giro		Vertical								
Ángulo de las placas, θ (°)		0	30	45	60	90	120	135	150	180
Distancia entre fuente y sensor, ℓ (m)		0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24
Tiempo de arribo, Δt_1 (ms)		1.520	1.520	1.760	1.640	1.580	1.640	1.740	1.700	1.500
Tiempo de arribo, Δt_2 (ms)		1.580	1.560	1.640	1.520	1.420	1.560	1.600	1.580	1.560
Tiempo de arribo, Δt_3 (ms)		1.480	1.540	1.660	1.580	1.560	1.600	1.740	1.560	1.580
Tiempo de arribo, Δt_4 (ms)		1.500	1.600	1.600	1.520	1.540	1.560	1.620	1.620	1.660
Tiempo de arribo, Δt_5 (ms)		1.560	1.560	1.740	1.500	1.500	1.600	1.700	1.600	1.600
Tiempo de arribo promedio, Δt_{prom} (ms)		1.528	1.556	1.680	1.552	1.520	1.592	1.680	1.612	1.580
Desviación estándar (ms)		0.037	0.027	0.061	0.052	0.057	0.030	0.059	0.048	0.052
Velocidad de onda, V_p (m/s)		157.1	154.2	142.9	154.6	157.9	150.8	142.9	148.9	151.9
Peso caja + Muestra + Placas, W_T (gr)		3437.3	3448.1	3442.1	3447.2	3437.3	3438.0	3442.2	3445.5	3435.3
Peso específico total, γ_T (gr/cm ³)		1.18	1.18	1.18	1.18	1.18	1.18	1.18	1.18	1.18
Peso específico de la matriz, γ_m (gr/cm ³)		1.12	1.12	1.12	1.12	1.12	1.12	1.12	1.12	1.12
Humedad, ω (%)		25.4%	25.4%	25.4%	25.4%	25.4%	25.4%	25.4%	25.4%	25.4%

PROPIEDADES		LIMO (M2)								
Cantidad de Placas		3 Placas (Concreto)								
Eje de Giro		Vertical								
Ángulo de las placas, θ (°)		0	30	45	60	90	120	135	150	180
Distancia entre fuente y sensor, ℓ (m)		0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24
Tiempo de arribo, Δt_1 (ms)		1.560	1.660	1.640	1.520	1.540	1.520	1.580	1.580	1.480
Tiempo de arribo, Δt_2 (ms)		1.460	1.760	1.700	1.600	1.600	1.540	1.660	1.600	1.520
Tiempo de arribo, Δt_3 (ms)		1.440	1.580	1.620	1.600	1.620	1.580	1.660	1.560	1.500
Tiempo de arribo, Δt_4 (ms)		1.420	1.680	1.640	1.560	1.400	1.640	1.760	1.600	1.440
Tiempo de arribo, Δt_5 (ms)		1.460	1.620	1.880	1.540	1.540	1.620	1.700	1.700	1.540
Tiempo de arribo promedio, Δt_{prom} (ms)		1.468	1.660	1.696	1.564	1.540	1.580	1.672	1.608	1.496
Desviación estándar (ms)		0.048	0.061	0.096	0.032	0.077	0.046	0.059	0.048	0.034
Velocidad de onda, V_p (m/s)		163.5	144.6	141.5	153.5	155.8	151.9	143.5	149.3	160.4
Peso caja + Muestra + Placas, W_T (gr)		3838.5	3825.0	3830.7	3829.5	3846.1	3844.7	3842.0	3836.7	3837.0
Peso específico total, γ_T (gr/cm ³)		1.32	1.31	1.32	1.32	1.32	1.32	1.32	1.32	1.32
Peso específico de la matriz, γ_m (gr/cm ³)		1.27	1.27	1.27	1.27	1.27	1.27	1.27	1.27	1.27
Humedad, ω (%)		34.4%	34.4%	34.4%	34.4%	34.4%	34.4%	34.4%	34.4%	34.4%

PROPIEDADES		ARENA (M3)								
Cantidad de Placas		3 Placas (Concreto)								
Eje de Giro		Vertical								
Ángulo de las placas, θ (°)		0	30	45	60	90	120	135	150	180
Distancia entre fuente y sensor, ℓ (m)		0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24
Tiempo de arribo, Δt_1 (ms)		2.000	2.080	1.880	1.800	1.980	1.860	1.960	2.080	1.980
Tiempo de arribo, Δt_2 (ms)		1.960	1.960	1.900	1.860	1.920	1.900	1.920	2.140	2.080
Tiempo de arribo, Δt_3 (ms)		1.980	2.080	1.840	1.900	1.860	1.860	2.000	2.080	2.060
Tiempo de arribo, Δt_4 (ms)		1.940	1.960	1.960	1.840	1.840	1.900	1.900	2.140	2.020
Tiempo de arribo, Δt_5 (ms)		2.000	1.920	1.840	1.960	1.800	1.780	1.960	2.040	2.140
Tiempo de arribo promedio, Δt_{prom} (ms)		1.976	2.000	1.884	1.872	1.880	1.860	1.948	2.096	2.056
Desviación estándar (ms)		0.023	0.067	0.045	0.055	0.063	0.044	0.035	0.039	0.054
Velocidad de onda, V_p (m/s)		121.5	120.0	127.4	128.2	127.7	129.0	123.2	114.5	116.7
Peso caja + Muestra + Placas, W_T (gr)		3549.7	3556.3	3560.3	3563.0	3569.0	3563.3	3561.0	3553.5	3548.3
Peso específico total, γ_T (gr/cm ³)		1.22	1.22	1.22	1.22	1.22	1.22	1.22	1.22	1.22
Peso específico de la matriz, γ_m (gr/cm ³)		1.16	1.17	1.17	1.17	1.17	1.17	1.17	1.17	1.16
Humedad, ω (%)		13.0%	13.0%	13.0%	13.0%	13.0%	13.0%	13.0%	13.0%	13.0%

Anexos

Tabla B.6 Mediciones en Arcilla M1 con placas de concreto C1 en la 3ª etapa.

PROPIEDADES	ARCILLA (M1)									
Cantidad de Placas	2 Placas (Concreto)									
Eje de Giro	Horizontal					Vertical				
Ángulo de las placas, θ (°)	0	45	90	135	180	0	45	90	135	180
Distancia entre fuente y sensor, ℓ (m)	0.51	0.51	0.51	0.51	0.51	0.51	0.51	0.51	0.51	0.51
Tiempo de arribo, Δt_1 (ms)	1.460	1.580	1.420	1.620	1.500	1.460	1.540	1.480	1.620	1.500
Tiempo de arribo, Δt_2 (ms)	1.460	1.540	1.380	1.540	1.540	1.460	1.500	1.500	1.660	1.540
Tiempo de arribo, Δt_3 (ms)	1.500	1.580	1.420	1.540	1.500	1.500	1.540	1.520	1.580	1.500
Tiempo de arribo, Δt_4 (ms)	1.460	1.620	1.460	1.580	1.460	1.460	1.580	1.500	1.580	1.460
Tiempo de arribo, Δt_5 (ms)	1.500	1.580	1.420	1.580	1.460	1.500	1.620	1.540	1.540	1.460
Tiempo de arribo promedio, Δt_{prom} (ms)	1.476	1.580	1.420	1.572	1.492	1.476	1.556	1.508	1.596	1.492
Desviación estándar (ms)	0.020	0.025	0.025	0.030	0.030	0.020	0.041	0.020	0.041	0.030
Velocidad de onda, V_p (m/s)	345.5	322.8	359.2	324.4	341.8	345.5	327.8	338.2	319.5	341.8
Peso caja + Muestra + Placas, W_T (gr)	6677.9	6670.2	6664.8	6670.2	6677.9	6677.9	6682.7	6672.7	6682.7	6677.9
Peso específico total, γ_T (gr/cm ³)	1.11	1.11	1.11	1.11	1.11	1.11	1.12	1.11	1.12	1.11
Peso específico de la matriz, γ_m (gr/cm ³)	1.09	1.09	1.09	1.09	1.09	1.09	1.09	1.09	1.09	1.09
Humedad, ω (%)	22.5%	22.5%	22.5%	22.5%	22.5%	22.5%	22.5%	22.5%	22.5%	22.5%

PROPIEDADES	ARCILLA (M1)									
Cantidad de Placas	4 Placas (Concreto)									
Eje de Giro	Horizontal					Vertical				
Ángulo de las placas, θ (°)	0	45	90	135	180	0	45	90	135	180
Distancia entre fuente y sensor, ℓ (m)	0.51	0.51	0.51	0.51	0.51	0.51	0.51	0.51	0.51	0.51
Tiempo de arribo, Δt_1 (ms)	1.460	1.500	1.380	1.460	1.420	1.460	1.500	1.460	1.540	1.420
Tiempo de arribo, Δt_2 (ms)	1.420	1.500	1.300	1.540	1.500	1.420	1.460	1.500	1.580	1.500
Tiempo de arribo, Δt_3 (ms)	1.500	1.460	1.340	1.500	1.380	1.500	1.500	1.540	1.480	1.380
Tiempo de arribo, Δt_4 (ms)	1.420	1.500	1.500	1.540	1.500	1.420	1.540	1.500	1.540	1.500
Tiempo de arribo, Δt_5 (ms)	1.480	1.540	1.380	1.500	1.340	1.480	1.540	1.420	1.500	1.340
Tiempo de arribo promedio, Δt_{prom} (ms)	1.456	1.500	1.380	1.508	1.428	1.456	1.508	1.484	1.528	1.428
Desviación estándar (ms)	0.032	0.025	0.067	0.030	0.064	0.032	0.030	0.041	0.035	0.064
Velocidad de onda, V_p (m/s)	350.3	340.0	369.6	338.2	357.1	350.3	338.2	343.7	333.8	357.1
Peso caja + Muestra + Placas, W_T (gr)	6783.6	6768.6	6756.9	6768.6	6783.6	6783.6	6763.6	6792.0	6763.6	6783.6
Peso específico total, γ_T (gr/cm ³)	1.13	1.13	1.13	1.13	1.13	1.13	1.13	1.13	1.13	1.13
Peso específico de la matriz, γ_m (gr/cm ³)	1.09	1.09	1.09	1.09	1.09	1.09	1.09	1.09	1.09	1.09
Humedad, ω (%)	22.1%	22.1%	22.1%	22.1%	22.1%	22.1%	22.1%	22.1%	22.1%	22.1%

PROPIEDADES	ARCILLA (M1)									
Cantidad de Placas	6 Placas (Concreto)									
Eje de Giro	Horizontal					Vertical				
Ángulo de las placas, θ (°)	0	45	90	135	180	0	45	90	135	180
Distancia entre fuente y sensor, ℓ (m)	0.51	0.51	0.51	0.51	0.51	0.51	0.51	0.51	0.51	0.51
Tiempo de arribo, Δt_1 (ms)	1.660	1.820	1.620	1.780	1.580	1.660	1.820	1.660	1.740	1.580
Tiempo de arribo, Δt_2 (ms)	1.620	1.780	1.660	1.820	1.620	1.620	1.820	1.660	1.780	1.620
Tiempo de arribo, Δt_3 (ms)	1.620	1.820	1.620	1.720	1.580	1.620	1.780	1.660	1.740	1.580
Tiempo de arribo, Δt_4 (ms)	1.620	1.780	1.620	1.740	1.540	1.620	1.820	1.620	1.820	1.540
Tiempo de arribo, Δt_5 (ms)	1.660	1.820	1.620	1.780	1.580	1.660	1.780	1.660	1.780	1.580
Tiempo de arribo promedio, Δt_{prom} (ms)	1.636	1.804	1.628	1.768	1.580	1.636	1.804	1.652	1.772	1.580
Desviación estándar (ms)	0.020	0.020	0.016	0.035	0.025	0.020	0.020	0.016	0.030	0.025
Velocidad de onda, V_p (m/s)	311.7	282.7	313.3	288.5	322.8	311.7	282.7	308.7	287.8	322.8
Peso caja + Muestra + Placas, W_T (gr)	6918.5	6911.6	6902.2	6911.6	6918.5	6918.5	6895.8	6881.8	6895.8	6918.5
Peso específico total, γ_T (gr/cm ³)	1.16	1.16	1.15	1.16	1.16	1.16	1.15	1.15	1.15	1.16
Peso específico de la matriz, γ_m (gr/cm ³)	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.09	1.09	1.09	1.10
Humedad, ω (%)	21.7%	21.7%	21.7%	21.7%	21.7%	21.7%	21.7%	21.7%	21.7%	21.7%

Anexos

Tabla B.7 Mediciones en Limo M2 con placas de concreto C1 en la 3ª etapa.

PROPIEDADES	LIMO (M2)									
Cantidad de Placas	2 Placas (Concreto)									
Eje de Giro	Horizontal					Vertical				
Ángulo de las placas, θ (°)	0	45	90	135	180	0	45	90	135	180
Distancia entre fuente y sensor, ℓ (m)	0.51	0.51	0.51	0.51	0.51	0.51	0.51	0.51	0.51	0.51
Tiempo de arribo, Δt_1 (ms)	1.460	1.300	1.420	1.460	1.440	1.460	1.580	1.460	1.460	1.440
Tiempo de arribo, Δt_2 (ms)	1.400	1.500	1.360	1.460	1.400	1.400	1.540	1.460	1.540	1.400
Tiempo de arribo, Δt_3 (ms)	1.500	1.300	1.420	1.460	1.420	1.500	1.460	1.420	1.540	1.420
Tiempo de arribo, Δt_4 (ms)	1.380	1.540	1.360	1.380	1.380	1.380	1.420	1.420	1.500	1.380
Tiempo de arribo, Δt_5 (ms)	1.420	1.460	1.380	1.460	1.540	1.420	1.500	1.460	1.540	1.540
Tiempo de arribo promedio, Δt_{prom} (ms)	1.432	1.420	1.388	1.444	1.436	1.432	1.500	1.444	1.516	1.436
Desviación estándar (ms)	0.043	0.101	0.027	0.032	0.056	0.043	0.057	0.020	0.032	0.056
Velocidad de onda, V_p (m/s)	356.1	359.2	367.4	353.2	355.2	356.1	340.0	353.2	336.4	355.2
Peso caja + Muestra + Placas, W_T (gr)	7378.9	7367.3	7359.6	7367.3	7378.9	7378.9	7350.4	7339.9	7350.4	7378.9
Peso específico total, γ_T (gr/cm ³)	1.24	1.24	1.24	1.24	1.24	1.24	1.23	1.23	1.23	1.24
Peso específico de la matriz, γ_m (gr/cm ³)	1.22	1.22	1.22	1.22	1.22	1.22	1.22	1.22	1.22	1.22
Humedad, ω (%)	31.8%	31.8%	31.8%	31.8%	31.8%	31.8%	31.8%	31.8%	31.8%	31.8%

PROPIEDADES	LIMO (M2)									
Cantidad de Placas	4 Placas (Concreto)									
Eje de Giro	Horizontal					Vertical				
Ángulo de las placas, θ (°)	0	45	90	135	180	0	45	90	135	180
Distancia entre fuente y sensor, ℓ (m)	0.51	0.51	0.51	0.51	0.51	0.51	0.51	0.51	0.51	0.51
Tiempo de arribo, Δt_1 (ms)	1.380	1.460	1.320	1.580	1.300	1.380	1.500	1.460	1.540	1.300
Tiempo de arribo, Δt_2 (ms)	1.380	1.380	1.260	1.500	1.380	1.380	1.420	1.300	1.520	1.380
Tiempo de arribo, Δt_3 (ms)	1.340	1.500	1.300	1.460	1.380	1.340	1.500	1.480	1.420	1.380
Tiempo de arribo, Δt_4 (ms)	1.380	1.460	1.400	1.380	1.300	1.380	1.500	1.460	1.460	1.300
Tiempo de arribo, Δt_5 (ms)	1.380	1.460	1.300	1.460	1.340	1.380	1.500	1.540	1.540	1.340
Tiempo de arribo promedio, Δt_{prom} (ms)	1.372	1.452	1.316	1.476	1.340	1.372	1.484	1.448	1.496	1.340
Desviación estándar (ms)	0.016	0.039	0.046	0.065	0.036	0.016	0.032	0.080	0.048	0.036
Velocidad de onda, V_p (m/s)	371.7	351.2	387.5	345.5	380.6	371.7	343.7	352.2	340.9	380.6
Peso caja + Muestra + Placas, W_T (gr)	7457.9	7481.6	7475.9	7481.6	7457.9	7457.9	7466.3	7456.5	7466.3	7457.9
Peso específico total, γ_T (gr/cm ³)	1.25	1.26	1.26	1.26	1.25	1.25	1.25	1.25	1.25	1.25
Peso específico de la matriz, γ_m (gr/cm ³)	1.22	1.22	1.22	1.22	1.22	1.22	1.22	1.22	1.22	1.22
Humedad, ω (%)	30.9%	30.9%	30.9%	30.9%	30.9%	30.9%	30.9%	30.9%	30.9%	30.9%

PROPIEDADES	LIMO (M2)									
Cantidad de Placas	6 Placas (Concreto)									
Eje de Giro	Horizontal					Vertical				
Ángulo de las placas, θ (°)	0	45	90	135	180	0	45	90	135	180
Distancia entre fuente y sensor, ℓ (m)	0.51	0.51	0.51	0.51	0.51	0.51	0.51	0.51	0.51	0.51
Tiempo de arribo, Δt_1 (ms)	1.340	1.580	1.380	1.500	1.300	1.340	1.540	1.380	1.580	1.300
Tiempo de arribo, Δt_2 (ms)	1.380	1.500	1.420	1.540	1.380	1.380	1.500	1.300	1.540	1.380
Tiempo de arribo, Δt_3 (ms)	1.340	1.620	1.380	1.540	1.380	1.340	1.540	1.460	1.540	1.380
Tiempo de arribo, Δt_4 (ms)	1.380	1.420	1.340	1.500	1.420	1.380	1.540	1.480	1.540	1.420
Tiempo de arribo, Δt_5 (ms)	1.340	1.580	1.340	1.540	1.260	1.340	1.500	1.420	1.460	1.260
Tiempo de arribo promedio, Δt_{prom} (ms)	1.356	1.540	1.372	1.524	1.348	1.356	1.524	1.408	1.532	1.348
Desviación estándar (ms)	0.020	0.072	0.030	0.020	0.059	0.020	0.020	0.064	0.039	0.059
Velocidad de onda, V_p (m/s)	376.1	331.2	371.7	334.6	378.3	376.1	334.6	362.2	332.9	378.3
Peso caja + Muestra + Placas, W_T (gr)	7563.4	7533.6	7525.1	7533.6	7563.4	7563.4	7579.5	7560.7	7579.5	7563.4
Peso específico total, γ_T (gr/cm ³)	1.27	1.27	1.26	1.27	1.27	1.27	1.27	1.27	1.27	1.27
Peso específico de la matriz, γ_m (gr/cm ³)	1.22	1.22	1.22	1.22	1.22	1.22	1.23	1.22	1.23	1.22
Humedad, ω (%)	30.3%	30.3%	30.3%	30.3%	30.3%	30.3%	30.3%	30.3%	30.3%	30.3%

Anexos

Tabla B.8 Mediciones en Arena M3 con placas de concreto C1 en la 3ª etapa.

PROPIEDADES	ARENA (M3)									
Cantidad de Placas	2 Placas (Concreto)									
Eje de Giro	Horizontal					Vertical				
Ángulo de las placas, θ (°)	0	45	90	135	180	0	45	90	135	180
Distancia entre fuente y sensor, ℓ (m)	0.51	0.51	0.51	0.51	0.51	0.51	0.51	0.51	0.51	0.51
Tiempo de arribo, Δt_1 (ms)	1.900	1.800	1.780	1.920	1.800	1.900	1.940	1.700	1.900	1.800
Tiempo de arribo, Δt_2 (ms)	1.940	1.840	1.660	1.900	1.740	1.940	1.860	1.740	1.780	1.740
Tiempo de arribo, Δt_3 (ms)	1.820	1.760	1.660	1.940	1.780	1.820	1.940	1.740	1.780	1.780
Tiempo de arribo, Δt_4 (ms)	1.860	1.880	1.740	1.900	1.780	1.860	1.800	1.700	1.940	1.780
Tiempo de arribo, Δt_5 (ms)	1.740	1.880	1.740	1.860	1.800	1.740	1.800	1.740	1.900	1.800
Tiempo de arribo promedio, Δt_{prom} (ms)	1.852	1.832	1.716	1.904	1.780	1.852	1.868	1.724	1.860	1.780
Desviación estándar (ms)	0.069	0.047	0.048	0.027	0.022	0.069	0.063	0.020	0.067	0.022
Velocidad de onda, V_p (m/s)	275.4	278.4	297.2	267.9	286.5	275.4	273.0	295.8	274.2	286.5
Peso caja + Muestra + Placas, W_T (gr)	7079.7	7045.7	7073.8	7045.7	7079.7	7079.7	7070.9	7065.3	7070.9	7079.7
Peso específico total, γ_T (gr/cm ³)	1.19	1.18	1.19	1.18	1.19	1.19	1.18	1.18	1.18	1.19
Peso específico de la matriz, γ_m (gr/cm ³)	1.17	1.16	1.17	1.16	1.17	1.17	1.17	1.17	1.17	1.17
Humedad, ω (%)	11.9%	11.9%	11.9%	11.9%	11.9%	11.9%	11.9%	11.9%	11.9%	11.9%

PROPIEDADES	ARENA (M3)									
Cantidad de Placas	4 Placas (Concreto)									
Eje de Giro	Horizontal					Vertical				
Ángulo de las placas, θ (°)	0	45	90	135	180	0	45	90	135	180
Distancia entre fuente y sensor, ℓ (m)	0.51	0.51	0.51	0.51	0.51	0.51	0.51	0.51	0.51	0.51
Tiempo de arribo, Δt_1 (ms)	1.820	1.840	1.760	1.840	1.720	1.820	1.960	1.800	1.920	1.720
Tiempo de arribo, Δt_2 (ms)	1.760	1.800	1.760	1.840	1.800	1.760	1.880	1.800	1.920	1.800
Tiempo de arribo, Δt_3 (ms)	1.720	1.820	1.760	1.940	1.760	1.720	1.920	1.940	1.880	1.760
Tiempo de arribo, Δt_4 (ms)	1.720	1.920	1.800	1.880	1.720	1.720	1.960	1.740	1.960	1.720
Tiempo de arribo, Δt_5 (ms)	1.800	1.960	1.720	1.880	1.680	1.800	1.900	1.800	1.880	1.680
Tiempo de arribo promedio, Δt_{prom} (ms)	1.764	1.868	1.760	1.876	1.736	1.764	1.924	1.816	1.912	1.736
Desviación estándar (ms)	0.041	0.061	0.025	0.037	0.041	0.041	0.032	0.066	0.030	0.041
Velocidad de onda, V_p (m/s)	289.1	273.0	289.8	271.9	293.8	289.1	265.1	280.8	266.7	293.8
Peso caja + Muestra + Placas, W_T (gr)	7182.3	7188.9	7158.8	7188.9	7182.3	7182.3	7184.1	7193.4	7184.1	7182.3
Peso específico total, γ_T (gr/cm ³)	1.20	1.21	1.20	1.21	1.20	1.20	1.20	1.21	1.20	1.20
Peso específico de la matriz, γ_m (gr/cm ³)	1.17	1.17	1.17	1.17	1.17	1.17	1.17	1.17	1.17	1.17
Humedad, ω (%)	11.6%	11.6%	11.6%	11.6%	11.6%	11.6%	11.6%	11.6%	11.6%	11.6%

PROPIEDADES	ARENA (M3)									
Cantidad de Placas	6 Placas (Concreto)									
Eje de Giro	Horizontal					Vertical				
Ángulo de las placas, θ (°)	0	45	90	135	180	0	45	90	135	180
Distancia entre fuente y sensor, ℓ (m)	0.51	0.51	0.51	0.51	0.51	0.51	0.51	0.51	0.51	0.51
Tiempo de arribo, Δt_1 (ms)	1.940	2.100	1.900	2.060	1.900	1.940	2.020	1.860	1.900	1.900
Tiempo de arribo, Δt_2 (ms)	1.940	2.120	1.860	2.020	1.860	1.940	1.980	1.900	1.900	1.860
Tiempo de arribo, Δt_3 (ms)	1.900	2.140	1.980	2.060	1.940	1.900	1.900	1.900	1.940	1.940
Tiempo de arribo, Δt_4 (ms)	1.980	2.060	1.940	2.100	1.860	1.980	1.980	1.940	1.980	1.860
Tiempo de arribo, Δt_5 (ms)	1.860	2.100	1.980	2.100	1.900	1.860	1.940	1.860	1.900	1.900
Tiempo de arribo promedio, Δt_{prom} (ms)	1.924	2.104	1.932	2.068	1.892	1.924	1.964	1.892	1.924	1.892
Desviación estándar (ms)	0.041	0.027	0.047	0.030	0.030	0.041	0.041	0.030	0.032	0.030
Velocidad de onda, V_p (m/s)	265.1	242.4	264.0	246.6	269.6	265.1	259.7	269.6	265.1	269.6
Peso caja + Muestra + Placas, W_T (gr)	7291.8	7284.1	7274.7	7284.1	7291.8	7291.8	7264.8	7257.2	7264.8	7291.8
Peso específico total, γ_T (gr/cm ³)	1.22	1.22	1.22	1.22	1.22	1.22	1.22	1.22	1.22	1.22
Peso específico de la matriz, γ_m (gr/cm ³)	1.17	1.17	1.17	1.17	1.17	1.17	1.17	1.17	1.17	1.17
Humedad, ω (%)	11.9%	11.9%	11.9%	11.9%	11.9%	11.9%	11.9%	11.9%	11.9%	11.9%

Anexos

Tabla B.9 Mediciones en Arcilla M1 con placas de cartón C2 en la 3ª etapa.

PROPIEDADES	ARCILLA (M1)									
Cantidad de Placas	2 Placas (Cartón)									
Eje de Giro	Horizontal					Vertical				
Ángulo de las placas, θ (°)	0	45	90	135	180	0	45	90	135	180
Distancia entre fuente y sensor, ℓ (m)	0.51	0.51	0.51	0.51	0.51	0.51	0.51	0.51	0.51	0.51
Tiempo de arribo, Δt_1 (ms)	1.500	1.380	1.380	1.460	1.500	1.500	1.380	1.500	1.300	1.500
Tiempo de arribo, Δt_2 (ms)	1.540	1.460	1.380	1.380	1.420	1.540	1.300	1.500	1.340	1.420
Tiempo de arribo, Δt_3 (ms)	1.460	1.340	1.500	1.300	1.500	1.460	1.380	1.540	1.340	1.500
Tiempo de arribo, Δt_4 (ms)	1.460	1.420	1.500	1.460	1.500	1.460	1.300	1.460	1.380	1.500
Tiempo de arribo, Δt_5 (ms)	1.540	1.380	1.500	1.500	1.500	1.540	1.380	1.580	1.420	1.500
Tiempo de arribo promedio, Δt_{prom} (ms)	1.500	1.396	1.452	1.420	1.484	1.500	1.348	1.516	1.356	1.484
Desviación estándar (ms)	0.036	0.041	0.059	0.072	0.032	0.036	0.039	0.041	0.041	0.032
Velocidad de onda, V_p (m/s)	340.0	365.3	351.2	359.2	343.7	340.0	378.3	336.4	376.1	343.7
Peso caja + Muestra + Placas, W_T (gr)	6369.0	6359.0	6353.2	6359.0	6369.0	6369.0	6352.5	6347.8	6352.5	6369.0
Peso específico total, γ_T (gr/cm ³)	1.06	1.06	1.06	1.06	1.06	1.06	1.06	1.06	1.06	1.06
Peso específico de la matriz, γ_m (gr/cm ³)	1.09	1.09	1.09	1.09	1.09	1.09	1.09	1.09	1.09	1.09
Humedad, ω (%)	24.6%	24.6%	24.6%	24.6%	24.6%	24.6%	24.6%	24.6%	24.6%	24.6%

PROPIEDADES	ARCILLA (M1)									
Cantidad de Placas	4 Placas (Cartón)									
Eje de Giro	Horizontal					Vertical				
Ángulo de las placas, θ (°)	0	45	90	135	180	0	45	90	135	180
Distancia entre fuente y sensor, ℓ (m)	0.51	0.51	0.51	0.51	0.51	0.51	0.51	0.51	0.51	0.51
Tiempo de arribo, Δt_1 (ms)	1.420	1.380	1.320	1.260	1.420	1.420	1.340	1.380	1.420	1.420
Tiempo de arribo, Δt_2 (ms)	1.460	1.300	1.500	1.420	1.420	1.460	1.300	1.380	1.300	1.420
Tiempo de arribo, Δt_3 (ms)	1.500	1.340	1.300	1.380	1.540	1.500	1.340	1.380	1.340	1.540
Tiempo de arribo, Δt_4 (ms)	1.500	1.380	1.460	1.380	1.540	1.500	1.300	1.460	1.380	1.540
Tiempo de arribo, Δt_5 (ms)	1.460	1.340	1.420	1.340	1.460	1.460	1.340	1.460	1.300	1.460
Tiempo de arribo promedio, Δt_{prom} (ms)	1.468	1.348	1.400	1.356	1.476	1.468	1.324	1.412	1.348	1.476
Desviación estándar (ms)	0.030	0.030	0.078	0.054	0.054	0.030	0.020	0.039	0.047	0.054
Velocidad de onda, V_p (m/s)	347.4	378.3	364.3	376.1	345.5	347.4	385.2	361.2	378.3	345.5
Peso caja + Muestra + Placas, W_T (gr)	6194.9	6185.5	6175.7	6185.5	6194.9	6194.9	6166.0	6188.2	6166.0	6194.9
Peso específico total, γ_T (gr/cm ³)	1.03	1.03	1.03	1.03	1.03	1.03	1.02	1.03	1.02	1.03
Peso específico de la matriz, γ_m (gr/cm ³)	1.10	1.09	1.09	1.09	1.10	1.10	1.09	1.09	1.09	1.10
Humedad, ω (%)	23.6%	23.6%	23.6%	23.6%	23.6%	23.6%	23.6%	23.6%	23.6%	23.6%

PROPIEDADES	ARCILLA (M1)									
Cantidad de Placas	6 Placas (Cartón)									
Eje de Giro	Horizontal					Vertical				
Ángulo de las placas, θ (°)	0	45	90	135	180	0	45	90	135	180
Distancia entre fuente y sensor, ℓ (m)	0.51	0.51	0.51	0.51	0.51	0.51	0.51	0.51	0.51	0.51
Tiempo de arribo, Δt_1 (ms)	1.500	1.340	1.420	1.300	1.460	1.500	1.420	1.580	1.420	1.460
Tiempo de arribo, Δt_2 (ms)	1.420	1.340	1.460	1.380	1.340	1.420	1.380	1.460	1.380	1.340
Tiempo de arribo, Δt_3 (ms)	1.420	1.380	1.420	1.380	1.500	1.420	1.380	1.500	1.460	1.500
Tiempo de arribo, Δt_4 (ms)	1.380	1.340	1.380	1.380	1.420	1.380	1.300	1.460	1.380	1.420
Tiempo de arribo, Δt_5 (ms)	1.380	1.380	1.500	1.380	1.420	1.380	1.380	1.420	1.380	1.420
Tiempo de arribo promedio, Δt_{prom} (ms)	1.420	1.356	1.436	1.364	1.428	1.420	1.372	1.484	1.404	1.428
Desviación estándar (ms)	0.044	0.020	0.041	0.032	0.053	0.044	0.039	0.054	0.032	0.053
Velocidad de onda, V_p (m/s)	359.2	376.1	355.2	373.9	357.1	359.2	371.7	343.7	363.2	357.1
Peso caja + Muestra + Placas, W_T (gr)	6010.2	5999.1	5993.6	5999.1	6010.2	6010.2	5982.6	5975.3	5982.6	6010.2
Peso específico total, γ_T (gr/cm ³)	1.00	1.00	0.99	1.00	1.00	1.00	0.99	0.99	0.99	1.00
Peso específico de la matriz, γ_m (gr/cm ³)	1.10	1.09	1.09	1.09	1.10	1.10	1.09	1.09	1.09	1.10
Humedad, ω (%)	23.3%	23.3%	23.3%	23.3%	23.3%	23.3%	23.3%	23.3%	23.3%	23.3%

Anexos

Tabla B.10 Mediciones en Limo M2 con placas de cartón C2 en la 3ª etapa.

PROPIEDADES		LIMO (M2)									
Cantidad de Placas		2 Placas (Cartón)									
Eje de Giro		Horizontal					Vertical				
Ángulo de las placas, θ (°)		0	45	90	135	180	0	45	90	135	180
Distancia entre fuente y sensor, ℓ (m)		0.51	0.51	0.51	0.51	0.51	0.51	0.51	0.51	0.51	0.51
Tiempo de arribo, Δt_1 (ms)		1.300	1.180	1.300	1.180	1.300	1.300	1.260	1.260	1.220	1.300
Tiempo de arribo, Δt_2 (ms)		1.260	1.180	1.380	1.220	1.340	1.260	1.180	1.340	1.260	1.340
Tiempo de arribo, Δt_3 (ms)		1.300	1.300	1.260	1.300	1.300	1.300	1.220	1.260	1.220	1.300
Tiempo de arribo, Δt_4 (ms)		1.340	1.340	1.300	1.260	1.220	1.340	1.180	1.260	1.260	1.220
Tiempo de arribo, Δt_5 (ms)		1.300	1.260	1.340	1.220	1.260	1.300	1.260	1.340	1.220	1.260
Tiempo de arribo promedio, Δt_{prom} (ms)		1.300	1.252	1.316	1.236	1.284	1.300	1.220	1.292	1.236	1.284
Desviación estándar (ms)		0.025	0.064	0.041	0.041	0.041	0.025	0.036	0.039	0.020	0.041
Velocidad de onda, V_p (m/s)		392.3	407.3	387.5	412.6	397.2	392.3	418.0	394.7	412.6	397.2
Peso caja + Muestra + Placas, W_T (gr)		7071.8	7056.5	7047.6	7056.5	7071.8	7071.8	7033.1	7027.5	7033.1	7071.8
Peso específico total, γ_T (gr/cm ³)		1.18	1.18	1.18	1.18	1.18	1.18	1.18	1.18	1.18	1.18
Peso específico de la matriz, γ_m (gr/cm ³)		1.22	1.22	1.22	1.22	1.22	1.22	1.22	1.21	1.22	1.22
Humedad, ω (%)		34.4%	34.4%	34.4%	34.4%	34.4%	34.4%	34.4%	34.4%	34.4%	34.4%

PROPIEDADES		LIMO (M2)									
Cantidad de Placas		4 Placas (Cartón)									
Eje de Giro		Horizontal					Vertical				
Ángulo de las placas, θ (°)		0	45	90	135	180	0	45	90	135	180
Distancia entre fuente y sensor, ℓ (m)		0.51	0.51	0.51	0.51	0.51	0.51	0.51	0.51	0.51	0.51
Tiempo de arribo, Δt_1 (ms)		1.220	1.180	1.220	1.140	1.140	1.220	1.220	1.220	1.260	1.140
Tiempo de arribo, Δt_2 (ms)		1.220	1.100	1.260	1.140	1.220	1.220	1.260	1.180	1.180	1.220
Tiempo de arribo, Δt_3 (ms)		1.260	1.220	1.160	1.220	1.180	1.260	1.220	1.220	1.140	1.180
Tiempo de arribo, Δt_4 (ms)		1.180	1.180	1.180	1.140	1.220	1.180	1.140	1.260	1.180	1.220
Tiempo de arribo, Δt_5 (ms)		1.260	1.140	1.220	1.180	1.300	1.260	1.180	1.220	1.180	1.300
Tiempo de arribo promedio, Δt_{prom} (ms)		1.228	1.164	1.208	1.164	1.212	1.228	1.204	1.220	1.188	1.212
Desviación estándar (ms)		0.030	0.041	0.035	0.032	0.053	0.030	0.041	0.025	0.039	0.053
Velocidad de onda, V_p (m/s)		415.3	438.1	422.2	438.1	420.8	415.3	423.6	418.0	429.3	420.8
Peso caja + Muestra + Placas, W_T (gr)		6861.9	6849.7	6836.2	6849.7	6861.9	6861.9	6859.9	6845.7	6859.9	6861.9
Peso específico total, γ_T (gr/cm ³)		1.15	1.15	1.14	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15
Peso específico de la matriz, γ_m (gr/cm ³)		1.22	1.22	1.22	1.22	1.22	1.22	1.22	1.22	1.22	1.22
Humedad, ω (%)		33.5%	33.5%	33.5%	33.5%	33.5%	33.5%	33.5%	33.5%	33.5%	33.5%

PROPIEDADES		LIMO (M2)									
Cantidad de Placas		6 Placas (Cartón)									
Eje de Giro		Horizontal					Vertical				
Ángulo de las placas, θ (°)		0	45	90	135	180	0	45	90	135	180
Distancia entre fuente y sensor, ℓ (m)		0.51	0.51	0.51	0.51	0.51	0.51	0.51	0.51	0.51	0.51
Tiempo de arribo, Δt_1 (ms)		1.140	1.060	1.140	1.100	1.140	1.140	1.140	1.220	1.100	1.140
Tiempo de arribo, Δt_2 (ms)		1.140	1.140	1.180	1.100	1.060	1.140	1.100	1.180	1.060	1.060
Tiempo de arribo, Δt_3 (ms)		1.100	1.180	1.140	1.060	1.100	1.100	1.100	1.180	1.140	1.100
Tiempo de arribo, Δt_4 (ms)		1.220	1.080	1.140	1.180	1.100	1.220	1.060	1.120	1.100	1.100
Tiempo de arribo, Δt_5 (ms)		1.060	1.100	1.140	1.100	1.140	1.060	1.100	1.180	1.060	1.140
Tiempo de arribo promedio, Δt_{prom} (ms)		1.132	1.112	1.148	1.108	1.108	1.132	1.100	1.176	1.092	1.108
Desviación estándar (ms)		0.053	0.043	0.016	0.039	0.030	0.053	0.025	0.032	0.030	0.030
Velocidad de onda, V_p (m/s)		450.5	458.6	444.3	460.3	460.3	450.5	463.6	433.7	467.0	460.3
Peso caja + Muestra + Placas, W_T (gr)		6644.7	6621.5	6630.5	6621.5	6644.7	6644.7	6638.5	6625.7	6638.5	6644.7
Peso específico total, γ_T (gr/cm ³)		1.11	1.11	1.11	1.11	1.11	1.11	1.11	1.11	1.11	1.11
Peso específico de la matriz, γ_m (gr/cm ³)		1.22	1.22	1.22	1.22	1.22	1.22	1.22	1.22	1.22	1.22
Humedad, ω (%)		32.4%	32.4%	32.4%	32.4%	32.4%	32.4%	32.4%	32.4%	32.4%	32.4%

Anexos

Tabla B.11 Mediciones en Arena M3 con placas de cartón C2 en la 3ª etapa.

PROPIEDADES	ARENA (M3)									
Cantidad de Placas	2 Placas (Cartón)									
Eje de Giro	Horizontal					Vertical				
Ángulo de las placas, θ (°)	0	45	90	135	180	0	45	90	135	180
Distancia entre fuente y sensor, ℓ (m)	0.51	0.51	0.51	0.51	0.51	0.51	0.51	0.51	0.51	0.51
Tiempo de arribo, Δt_1 (ms)	1.980	1.940	2.060	1.940	1.980	1.980	1.900	2.060	1.980	1.980
Tiempo de arribo, Δt_2 (ms)	1.940	1.900	1.980	1.900	1.980	1.940	1.900	1.980	1.940	1.980
Tiempo de arribo, Δt_3 (ms)	1.980	1.860	1.980	1.940	1.940	1.980	1.980	1.940	1.860	1.940
Tiempo de arribo, Δt_4 (ms)	1.980	1.820	2.020	1.820	2.000	1.980	1.860	1.980	1.800	2.000
Tiempo de arribo, Δt_5 (ms)	1.980	1.860	2.020	1.780	1.980	1.980	1.900	1.940	1.880	1.980
Tiempo de arribo promedio, Δt_{prom} (ms)	1.972	1.876	2.012	1.876	1.976	1.972	1.908	1.980	1.892	1.976
Desviación estándar (ms)	0.016	0.041	0.030	0.065	0.020	0.016	0.039	0.044	0.063	0.020
Velocidad de onda, V_p (m/s)	258.6	271.9	253.5	271.9	258.1	258.6	267.3	257.6	269.6	258.1
Peso caja + Muestra + Placas, W_T (gr)	6816.6	6809.7	6800.2	6809.7	6816.6	6816.6	6795.7	6788.5	6795.7	6816.6
Peso específico total, γ_T (gr/cm ³)	1.14	1.14	1.14	1.14	1.14	1.14	1.14	1.14	1.14	1.14
Peso específico de la matriz, γ_m (gr/cm ³)	1.18	1.17	1.17	1.17	1.18	1.18	1.17	1.17	1.17	1.18
Humedad, ω (%)	11.7%	11.7%	11.7%	11.7%	11.7%	11.7%	11.7%	11.7%	11.7%	11.7%

PROPIEDADES	ARENA (M3)									
Cantidad de Placas	4 Placas (Cartón)									
Eje de Giro	Horizontal					Vertical				
Ángulo de las placas, θ (°)	0	45	90	135	180	0	45	90	135	180
Distancia entre fuente y sensor, ℓ (m)	0.51	0.51	0.51	0.51	0.51	0.51	0.51	0.51	0.51	0.51
Tiempo de arribo, Δt_1 (ms)	1.860	1.820	1.860	1.860	1.900	1.860	1.780	1.940	1.700	1.900
Tiempo de arribo, Δt_2 (ms)	1.860	1.860	1.900	1.820	1.820	1.860	1.820	1.980	1.740	1.820
Tiempo de arribo, Δt_3 (ms)	1.900	1.780	1.900	1.780	1.820	1.900	1.820	1.980	1.740	1.820
Tiempo de arribo, Δt_4 (ms)	1.900	1.780	1.940	1.780	1.860	1.900	1.820	1.900	1.780	1.860
Tiempo de arribo, Δt_5 (ms)	1.820	1.740	1.900	1.780	1.780	1.820	1.780	1.900	1.780	1.780
Tiempo de arribo promedio, Δt_{prom} (ms)	1.868	1.796	1.900	1.804	1.836	1.868	1.804	1.940	1.748	1.836
Desviación estándar (ms)	0.030	0.041	0.025	0.032	0.041	0.030	0.020	0.036	0.030	0.041
Velocidad de onda, V_p (m/s)	273.0	284.0	268.4	282.7	277.8	273.0	282.7	262.9	291.8	277.8
Peso caja + Muestra + Placas, W_T (gr)	6607.4	6598.8	6592.3	6598.8	6607.4	6607.4	6580.8	6590.9	6580.8	6607.4
Peso específico total, γ_T (gr/cm ³)	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10
Peso específico de la matriz, γ_m (gr/cm ³)	1.17	1.17	1.17	1.17	1.17	1.17	1.17	1.17	1.17	1.17
Humedad, ω (%)	11.0%	11.0%	11.0%	11.0%	11.0%	11.0%	11.0%	11.0%	11.0%	11.0%

PROPIEDADES	ARENA (M3)									
Cantidad de Placas	6 Placas (Cartón)									
Eje de Giro	Horizontal					Vertical				
Ángulo de las placas, θ (°)	0	45	90	135	180	0	45	90	135	180
Distancia entre fuente y sensor, ℓ (m)	0.51	0.51	0.51	0.51	0.51	0.51	0.51	0.51	0.51	0.51
Tiempo de arribo, Δt_1 (ms)	1.860	1.760	1.840	1.740	1.700	1.860	1.700	1.880	1.740	1.700
Tiempo de arribo, Δt_2 (ms)	1.820	1.780	1.900	1.740	1.740	1.820	1.700	1.840	1.700	1.740
Tiempo de arribo, Δt_3 (ms)	1.820	1.760	1.920	1.720	1.740	1.820	1.680	1.880	1.700	1.740
Tiempo de arribo, Δt_4 (ms)	1.780	1.740	1.840	1.720	1.820	1.780	1.740	1.940	1.720	1.820
Tiempo de arribo, Δt_5 (ms)	1.740	1.720	1.920	1.680	1.820	1.740	1.700	1.880	1.720	1.820
Tiempo de arribo promedio, Δt_{prom} (ms)	1.804	1.752	1.884	1.720	1.764	1.804	1.704	1.884	1.716	1.764
Desviación estándar (ms)	0.041	0.020	0.037	0.022	0.048	0.041	0.020	0.032	0.015	0.048
Velocidad de onda, V_p (m/s)	282.7	291.1	270.7	296.5	289.1	282.7	299.3	270.7	297.2	289.1
Peso caja + Muestra + Placas, W_T (gr)	6406.1	6395.0	6400.9	6395.0	6406.1	6406.1	6387.2	6375.5	6387.2	6406.1
Peso específico total, γ_T (gr/cm ³)	1.07	1.07	1.07	1.07	1.07	1.07	1.06	1.06	1.06	1.07
Peso específico de la matriz, γ_m (gr/cm ³)	1.17	1.17	1.17	1.17	1.17	1.17	1.17	1.17	1.17	1.17
Humedad, ω (%)	10.8%	10.8%	10.8%	10.8%	10.8%	10.8%	10.8%	10.8%	10.8%	10.8%



C. Resultados del análisis experimental a escala de laboratorio

Anexos

C.1 1ª Etapa

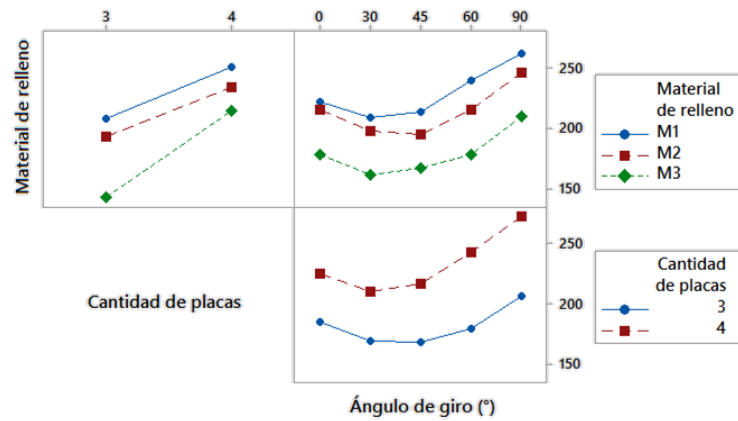


Fig. C.1 Gráfico de interacción de variables para la velocidad de onda P (m/s) en la 1ª etapa.

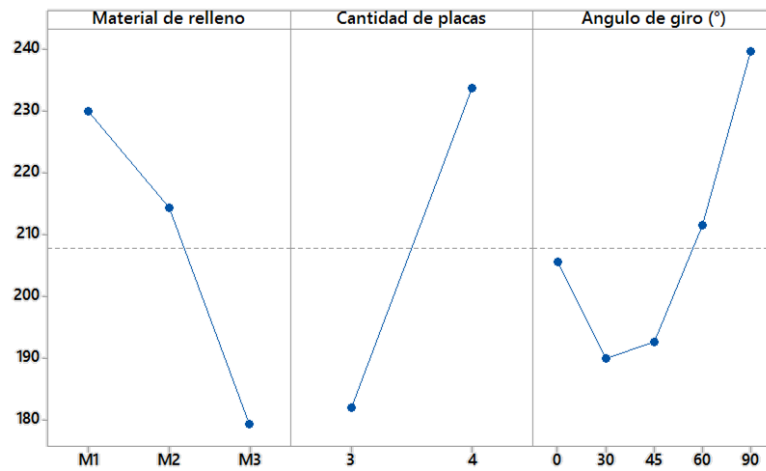


Fig. C.2 Grafico de efectos principales para la velocidad de onda P (m/s) en la 1ª etapa.

Tabla C.1 Parámetros de anisotropía en la 1ª etapa.

Material	Placas	Velocidad (m/s)			ε	δ	%
		V_{prom}	V_{max}	V_{min}			
M1	3	208.2	235.3	190.5	0.24	-0.22	21.5
	4	251.2	289.6	228.0	0.27	-0.41	24.5
M2	3	193.7	213.5	176.0	0.21	-0.64	19.4
	4	234.3	278.8	206.6	0.35	-0.40	30.8
M3	3	143.4	170.5	127.9	0.33	-0.63	29.7
	4	215.1	249.2	196.1	0.27	-0.25	24.7

C.2 2ª Etapa

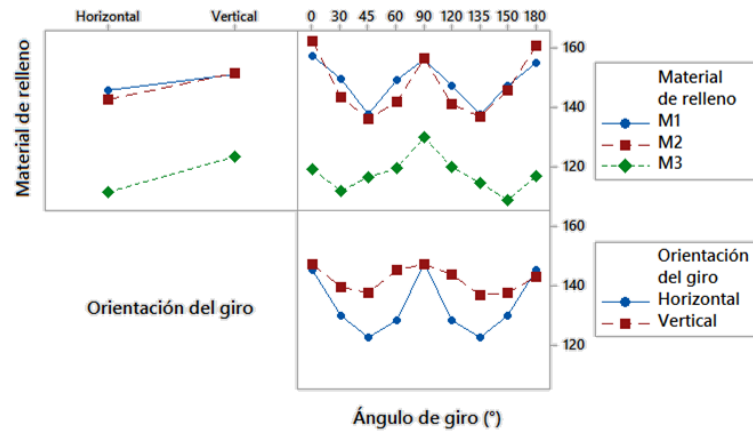


Fig. C.3 Gráfico de interacción de variables para la velocidad de onda P (m/s) en la 2ª etapa.

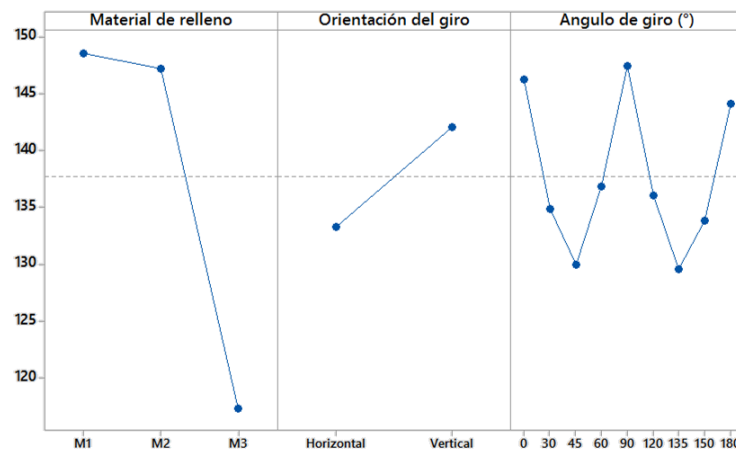


Fig. C.4 Grafico de efectos principales para la velocidad de onda P (m/s) en la 2ª etapa.

Tabla C.2 Parámetros de anisotropía en la 2ª etapa.

Material	Orientación de giro	Velocidad (m/s)			ε	δ	%
		V_{prom}	V_{max}	V_{min}			
M1	Horizontal	146.5	157.9	131.9	0.20	-0.64	17.8%
	Vertical	153.3	157.9	142.9	0.11	-0.37	9.8%
M2	Horizontal	144.0	160.9	130.2	0.24	-0.74	21.3%
	Vertical	151.8	163.5	141.5	0.16	-0.49	14.5%
M3	Horizontal	113.3	131.6	102.7	0.28	-0.52	25.5%
	Vertical	124.9	128.2	120.0	0.07	0.14	6.6%

C.3 3ª Etapa

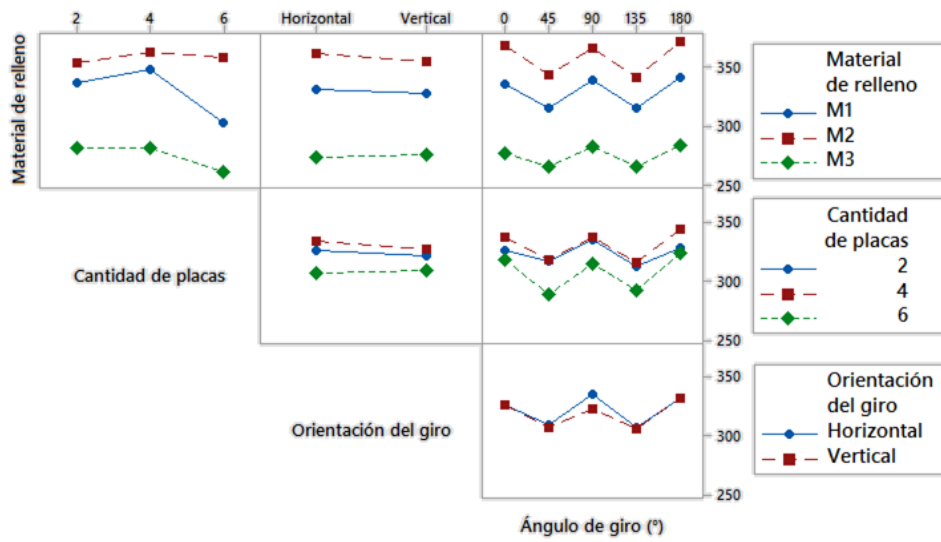


Fig. C.5 Gráfico de interacción de variables para la velocidad de onda P (m/s) en la 3ª etapa 1ª parte.

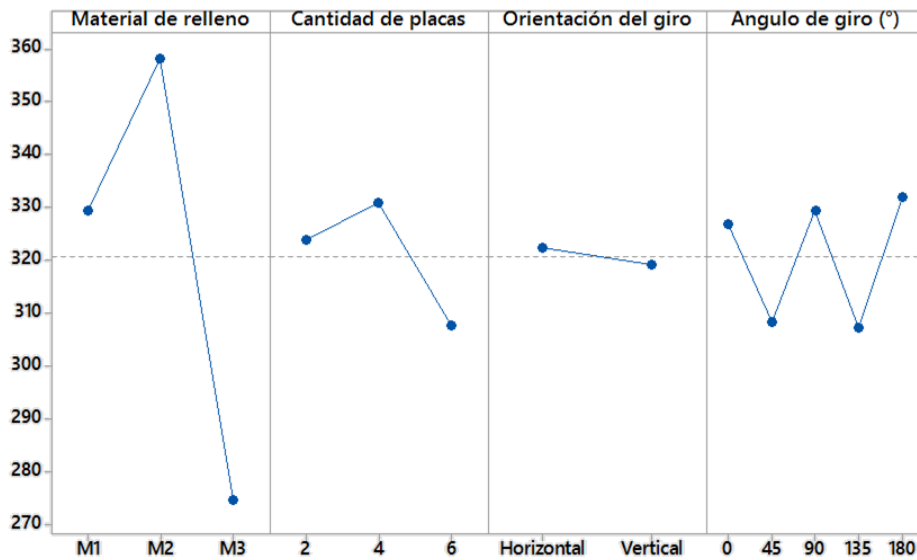


Fig. C.6 Grafico de efectos principales para la velocidad de onda P (m/s) en la 3ª etapa 1ª parte.

Anexos

Tabla C.3 Parámetros de anisotropía en la 3ª etapa 1ª parte.

Material	Cantidad de placas	Orientación de giro	Velocidad (m/s)			ε	δ	%
			V_{prom}	V_{max}	V_{min}			
M1	2	Horizontal	338.7	359.2	322.8	0.11	-0.30	10.7%
		Vertical	334.6	345.5	319.5	0.08	-0.18	7.8%
	4	Horizontal	351.0	369.6	338.2	0.09	-0.17	8.9%
		Vertical	344.6	357.1	333.8	0.07	-0.12	6.8%
	6	Horizontal	303.8	322.8	282.7	0.14	-0.38	13.2%
		Vertical	302.8	322.8	282.7	0.14	-0.36	13.2%
M2	2	Horizontal	358.2	367.4	353.2	0.04	0.00	4.0%
		Vertical	348.2	356.1	336.4	0.06	-0.17	5.7%
	4	Horizontal	367.3	387.5	345.5	0.12	-0.26	11.4%
		Vertical	357.8	380.6	340.9	0.12	-0.25	11.1%
	6	Horizontal	358.4	378.3	331.2	0.14	-0.47	13.2%
		Vertical	356.8	378.3	332.9	0.14	-0.40	12.7%
M3	2	Horizontal	281.1	297.2	267.9	0.11	-0.04	10.4%
		Vertical	281.0	295.8	273.0	0.08	-0.11	8.1%
	4	Horizontal	283.5	293.8	271.9	0.08	-0.22	7.7%
		Vertical	279.1	293.8	265.1	0.11	-0.30	10.3%
	6	Horizontal	257.5	269.6	242.4	0.11	-0.34	10.5%
		Vertical	265.8	269.6	259.7	0.04	-0.10	3.7%

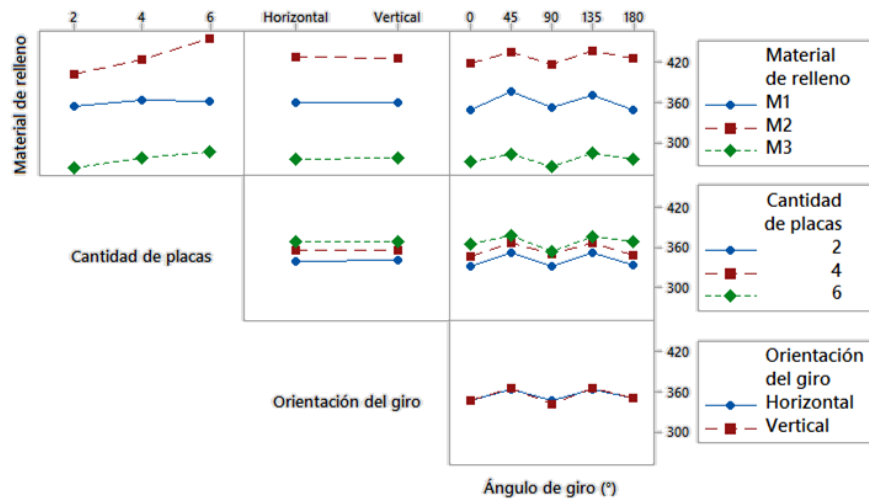


Fig. C.7 Gráfico de interacción de variables para la velocidad de onda P (m/s) en la 3ª etapa 2ª parte.

Anexos

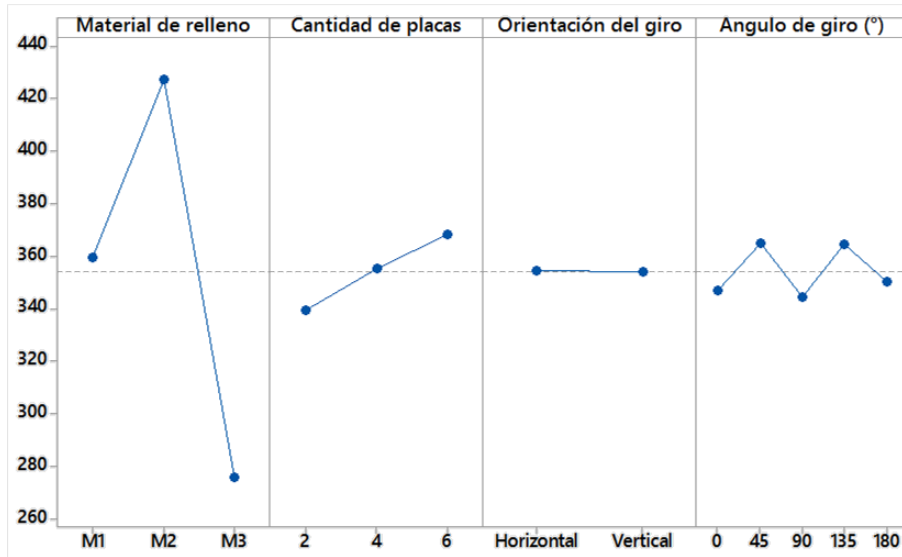


Fig. C.8 Grafico de efectos principales para la velocidad de onda P (m/s) en la 3ª etapa 2ª parte.

Tabla C.4 Parámetros de anisotropía en la 3ª etapa 2ª parte.

Material	Cantidad de placas	Orientación de giro	Velocidad (m/s)			ε	δ	%
			V_{prom}	V_{max}	V_{min}			
M1	2	Horizontal	351.9	365.3	340.0	0.07	0.26	7.2%
		Vertical	354.9	378.3	336.4	0.12	0.46	11.8%
	4	Horizontal	362.3	378.3	345.5	0.09	0.31	9.1%
		Vertical	363.5	385.2	345.5	0.11	0.40	10.9%
	6	Horizontal	364.3	376.1	355.2	0.06	0.20	5.8%
		Vertical	359.0	371.7	343.7	0.08	0.18	7.8%
M2	2	Horizontal	399.4	412.6	387.5	0.06	0.17	6.3%
		Vertical	403.0	418.0	392.3	0.07	0.26	6.4%
	4	Horizontal	426.9	438.1	415.3	0.05	0.20	5.3%
		Vertical	421.4	429.3	415.3	0.03	0.07	3.3%
	6	Horizontal	454.8	460.3	444.3	0.04	0.09	3.5%
		Vertical	455.0	467.0	433.7	0.08	0.15	7.3%
M3	2	Horizontal	262.8	271.9	253.5	0.07	0.22	7.0%
		Vertical	262.2	269.6	257.6	0.05	0.14	4.6%
	4	Horizontal	277.2	284.0	268.4	0.06	0.18	5.6%
		Vertical	277.6	291.8	262.9	0.11	0.18	10.4%
	6	Horizontal	286.0	296.5	270.7	0.10	0.16	9.0%
		Vertical	287.8	299.3	270.7	0.11	0.28	9.9%



D. Ensayes triaxiales y mediciones de propagación de ondas en laboratorio

Anexos

D.1 Dimensionamiento de probetas

Tabla D.1 Datos de las probetas sometidas a ensayos triaxiales de los materiales M1 y M2.

PROPIEDADES	M1				M2			
	1	2	3	4	1	2	3	4
# Muestra								
Diámetro promedio, (cm)	3.782	3.783	3.786	3.778	3.777	3.776	3.778	3.779
Área, A_0 (cm ²)	11.232	11.238	11.258	11.208	11.204	11.200	11.208	11.214
Altura inicial promedio, (cm)	7.791	7.710	7.695	7.779	7.740	7.797	7.718	7.750
Volumen, (cm ³)	87.51	86.64	86.63	87.19	86.72	87.33	86.51	86.91
Peso suelo húmedo, (gr)	153.30	149.69	152.70	152.33	131.38	131.40	132.30	131.03
Peso específico, (gr/cm ³)	1.75	1.73	1.76	1.75	1.51	1.50	1.53	1.51
Identificación de flanera	29	35	38	2	s/n	33	38	<>>
Peso flanera (gr)	121.01	129.69	125.56	119.50	133.66	121.24	120.55	123.32
Peso flanera + suelo deformado, (gr)	289.33	281.36	279.95	271.74	283.63	253.08	255.98	255.07
Peso flanera + suelo seco, (gr)	254.14	261.67	258.87	253.11	243.24	231.62	230.33	232.49
Humedad inicial, ω_i (%)	15.2%	13.4%	14.5%	14.0%	19.9%	19.0%	20.5%	20.0%
Humedad final, ω_f (%)	26.4%	14.9%	15.8%	13.9%	36.9%	19.4%	23.4%	20.7%
Grado de saturación inicial, (%)	57.8%	51.4%	57.1%	54.5%	51.9%	49.7%	54.0%	51.6%
Grado de saturación final, (%)	100.9%	57.1%	62.1%	54.2%	96.2%	50.8%	61.5%	53.3%
Esbeltez (L/D)	2.06	2.04	2.03	2.06	2.05	2.06	2.04	2.05
Contrapresión aplicada, (KPa)	50	0	0	0	50	0	0	0
Esfuerzo confinante aplicado, (KPa)	250	50	100	200	250	50	100	200
Esfuerzo confinante efectivo, (KPa)	200	50	100	200	200	50	100	200

D.2 Ensayos triaxiales

Tabla D.2 Resultados del ensaye triaxial en condición saturada a 200KPa en arcilla M1.

(1) 200KPa (Saturada)							
Tiempo	Deformación	Deformación unitaria	Area corregida	Fuerza Aplicada	Esfuerzo desviador	Presión de poro	Esfuerzo desviador efectivo
min	mm	%	cm ²	N	Pa	KPa	Kpa
0	0.000	0.00%	11.208	0.0	0	0.0	0.0
5	0.443	0.57%	11.272	5.0	8,436	0.0	8.4
10	0.909	1.17%	11.341	50.7	44,706	0.9	43.8
15	1.425	1.83%	11.417	79.8	69,893	0.8	69.1
20	1.905	2.45%	11.490	95.9	83,467	0.7	82.8
30	2.906	3.74%	11.643	111.4	95,678	0.7	95.0
40	3.893	5.00%	11.799	120.9	102,469	0.9	101.6
50	4.894	6.29%	11.961	129.1	107,937	0.9	107.0
60	5.867	7.54%	12.123	136.2	112,353	1.0	111.4
70	6.86	8.82%	12.292	142.1	115,601	1.1	114.5
80	7.855	10.10%	12.467	148.1	118,792	1.2	117.6
90	8.814	11.33%	12.640	154.6	122,306	1.2	121.1
100	9.817	12.62%	12.827	159.6	124,425	1.4	123.0
110	10.835	13.93%	13.022	166.2	127,630	1.5	126.1
120	11.755	15.11%	13.203	171.6	129,966	1.4	128.6
130	12.452	16.01%	13.344	176.3	132,117	1.5	130.6
140	13.293	17.09%	13.518	180.3	133,375	1.5	131.9
150	14.122	18.15%	13.694	186.1	135,896	1.6	134.3
160	15.036	19.33%	13.894	193.2	139,055	1.6	137.5

Anexos

Tabla D.3 Resultados del ensaye triaxial en condición no saturada a 50KPa en arcilla M1.

(2) 50KPa							
Tiempo	Deformación	Deformación unitaria	Area corregida	Fuerza Aplicada	Esfuerzo desviador	Presión de poro	Esfuerzo desviador efectivo
min	mm	%	cm ²	N	Pa	KPa	Kpa
0.0	0.000	0.00%	11.232	1.0	890	0.0	0.9
0.5	0.410	0.53%	11.291	181.5	160,742	0.0	160.7
0.8	0.621	0.80%	11.322	372.0	328,557	0.0	328.6
1.0	0.848	1.09%	11.356	543.7	478,795	0.0	478.8
1.3	1.085	1.39%	11.391	688.7	604,621	0.0	604.6
1.5	1.316	1.69%	11.425	776.8	679,915	0.0	679.9
1.8	1.558	2.00%	11.461	815.0	711,096	0.1	711.0
2.0	1.813	2.33%	11.500	828.4	720,374	0.0	720.4
2.3	2.060	2.64%	11.537	829.4	718,903	0.0	718.9
2.5	2.287	2.94%	11.572	828.5	715,973	0.1	715.9
2.8	2.546	3.27%	11.611	823.6	709,301	0.1	709.2
3.0	2.797	3.59%	11.650	817.7	701,875	0.1	701.8
3.3	3.051	3.92%	11.690	812.1	694,711	0.0	694.7
3.5	3.297	4.23%	11.728	808.1	689,017	0.0	689.0
3.8	3.565	4.58%	11.771	802.8	682,040	0.1	681.9
4.0	3.805	4.88%	11.809	799.4	676,959	0.1	676.9
4.3	4.049	5.20%	11.848	795.7	671,607	0.1	671.5
4.5	4.297	5.52%	11.888	792.4	666,576	0.0	666.6
4.8	4.539	5.83%	11.927	789.0	661,534	0.1	661.4
5.0	4.806	6.17%	11.970	785.2	655,952	0.1	655.9
5.3	5.032	6.46%	12.008	782.7	651,842	0.1	651.7
5.5	5.303	6.81%	12.052	780.5	647,593	0.1	647.5
5.8	5.537	7.11%	12.091	778.5	643,851	0.1	643.8
6.0	5.778	7.42%	12.132	776.1	639,729	0.0	639.7
6.3	6.041	7.75%	12.176	774.8	636,329	0.1	636.2

Anexos

Tabla D.4 Resultados del ensaye triaxial en condición no saturada a 100KPa en arcilla M1.

(3) 100KPa							
Tiempo	Deformación	Deformación unitaria	Area corregida	Fuerza Aplicada	Esfuerzo desviador	Presión de poro	Esfuerzo desviador efectivo
min	mm	%	cm ²	N	Pa	KPa	Kpa
0.0	0.000	0.00%	11.238	1.0	890	0.0	0.9
0.3	0.182	0.24%	11.265	70.4	62,497	0.0	62.5
0.5	0.384	0.50%	11.294	299.1	264,827	0.0	264.8
0.8	0.614	0.80%	11.328	547.7	483,486	0.0	483.5
1.0	0.819	1.06%	11.359	749.4	659,766	0.1	659.7
1.3	1.058	1.37%	11.394	878.7	771,176	0.0	771.2
1.8	1.558	2.02%	11.470	980.7	855,036	0.0	855.0
2.5	2.285	2.96%	11.581	1033.3	892,226	0.0	892.2
3.3	3.038	3.94%	11.699	1057.8	904,188	0.0	904.2
4.0	3.763	4.88%	11.815	1072.7	907,948	0.0	907.9
4.8	4.507	5.85%	11.936	1079.4	904,350	0.0	904.4
5.5	5.251	6.81%	12.059	1082.7	897,818	0.1	897.7
6.3	6.002	7.78%	12.187	1088.7	893,357	0.1	893.3
7.0	6.730	8.73%	12.313	1096.9	890,870	0.0	890.9
7.8	7.477	9.70%	12.445	1107.2	889,689	0.1	889.6
8.5	8.192	10.63%	12.574	1116.8	888,187	0.1	888.1
9.3	8.932	11.58%	12.710	1126.2	886,045	0.1	885.9
10.0	9.668	12.54%	12.849	1137.9	885,584	0.1	885.5
10.8	10.419	13.51%	12.994	1154.0	888,112	0.1	888.0
11.5	11.153	14.47%	13.138	1169.6	890,209	0.1	890.1
12.3	11.887	15.42%	13.286	1184.4	891,440	0.1	891.3
13.0	12.647	16.40%	13.443	1201.0	893,400	0.1	893.3
13.8	13.378	17.35%	13.597	1212.0	891,357	0.1	891.3
14.5	14.112	18.30%	13.756	1222.9	889,014	0.1	888.9
15.3	14.852	19.26%	13.919	1234.2	886,687	0.1	886.6

Anexos

Tabla D.5 Resultados del ensaye triaxial en condición no saturada a 200KPa en arcilla M1.

(4) 200KPa							
Tiempo	Deformación	Deformación unitaria	Area corregida	Fuerza Aplicada	Esfuerzo desviador	Presión de poro	Esfuerzo desviador efectivo
min	mm	%	cm ²	N	Pa	KPa	Kpa
0.0	0.000	0.00%	11.258	1.0	888	0.0	0.9
0.5	0.420	0.55%	11.320	176.3	155,749	0.0	155.7
0.8	0.603	0.78%	11.347	435.6	383,902	0.0	383.9
1.0	0.817	1.06%	11.379	649.9	571,163	0.1	571.1
1.3	1.037	1.35%	11.412	810.4	710,159	0.1	710.1
1.8	1.537	2.00%	11.487	972.5	846,596	0.1	846.5
2.3	2.013	2.62%	11.560	1047.7	906,303	0.2	906.1
3.0	2.753	3.58%	11.675	1121.4	960,477	0.1	960.4
3.8	3.475	4.52%	11.790	1179.2	1,000,155	0.1	1000.1
4.5	4.222	5.49%	11.911	1224.8	1,028,270	0.1	1028.2
5.3	4.957	6.44%	12.033	1264.8	1,051,120	0.1	1051.0
6.0	5.678	7.38%	12.155	1298.9	1,068,649	0.3	1068.3
6.8	6.416	8.34%	12.282	1328.2	1,081,440	0.2	1081.2
7.5	7.153	9.30%	12.411	1355.2	1,091,894	0.2	1091.7
8.3	7.878	10.24%	12.542	1381.0	1,101,123	0.2	1100.9
9.0	8.635	11.22%	12.681	1405.1	1,108,061	0.2	1107.9
9.8	9.379	12.19%	12.820	1425.9	1,112,217	0.3	1111.9
10.5	10.125	13.16%	12.963	1444.3	1,114,132	0.3	1113.8
11.3	10.868	14.12%	13.109	1465.4	1,117,840	0.3	1117.5
12.0	11.591	15.06%	13.254	1484.4	1,119,945	0.3	1119.6
12.8	12.345	16.04%	13.409	1504.5	1,122,015	0.3	1121.7
13.5	13.083	17.00%	13.564	1520.3	1,120,846	0.3	1120.5
14.3	13.826	17.97%	13.724	1532.8	1,116,915	0.3	1116.6
15.0	14.561	18.92%	13.885	1546.5	1,113,777	0.3	1113.5
15.8	15.310	19.90%	14.054	1559.2	1,109,442	0.3	1109.1

Anexos

Tabla D.6 Resultados del ensaye triaxial en condición saturada a 200KPa en limo M2.

(1) 200KPa (Saturada)							
Tiempo	Deformación	Deformación unitaria	Area corregida	Fuerza Aplicada	Esfuerzo desviador	Presión de poro	Esfuerzo desviador efectivo
min	mm	%	cm ²	N	Pa	KPa	Kpa
0	0.000	0.00%	11.214	0.0	0	0.0	0.0
10	0.945	1.22%	11.353	67.2	59,194	0.3	58.9
15	1.436	1.85%	11.426	109.8	96,098	0.3	95.8
20	1.924	2.48%	11.500	141.7	123,221	0.3	122.9
25	2.408	3.11%	11.574	167.5	144,724	0.3	144.4
30	2.912	3.76%	11.652	188.8	162,033	0.4	161.6
40	3.896	5.03%	11.808	222.6	188,520	0.4	188.1
50	4.870	6.28%	11.966	248.7	207,837	0.5	207.3
60	5.838	7.53%	12.128	269.2	221,970	0.5	221.5
70	6.836	8.82%	12.299	286.7	233,108	0.5	232.6
80	7.819	10.09%	12.473	302.3	242,373	0.5	241.9
90	8.822	11.38%	12.655	316.8	250,342	0.6	249.7
100	9.793	12.64%	12.836	330.7	257,632	0.8	256.8
110	10.767	13.89%	13.024	345.3	265,136	1.0	264.1
120	11.763	15.18%	13.221	358.9	271,465	1.2	270.3
130	12.752	16.45%	13.423	371.0	276,396	1.2	275.2
140	13.733	17.72%	13.629	383.0	281,013	1.3	279.7
150	14.713	18.98%	13.842	394.1	284,713	1.2	283.5
155	15.208	19.62%	13.952	399.6	286,411	1.2	285.2

Anexos

Tabla D.7 Resultados del ensaye triaxial en condición no saturada a 50KPa en limo M2.

(2) 50KPa							
Tiempo	Deformación	Deformación unitaria	Area corregida	Fuerza Aplicada	Esfuerzo desviador	Presión de poro	Esfuerzo desviador efectivo
min	mm	%	cm ²	N	Pa	KPa	Kpa
0.0	0.000	0.00%	11.204	0.0	0	0.0	0.0
0.5	0.322	0.42%	11.251	70.0	62,216	0.0	62.2
0.8	0.561	0.72%	11.286	154.5	136,894	0.0	136.9
1.0	0.779	1.01%	11.318	241.9	213,727	0.0	213.7
1.3	1.023	1.32%	11.354	316.8	279,012	0.0	279.0
1.5	1.282	1.66%	11.393	378.9	332,573	0.0	332.6
1.8	1.513	1.95%	11.428	421.4	368,754	0.1	368.7
2.0	1.773	2.29%	11.467	447.6	390,339	0.0	390.3
2.3	2.007	2.59%	11.503	463.1	402,607	0.0	402.6
2.5	2.275	2.94%	11.544	471.7	408,626	0.0	408.6
2.8	2.499	3.23%	11.578	475.7	410,862	0.0	410.9
3.0	2.773	3.58%	11.621	477.6	410,994	0.0	411.0
3.3	3.025	3.91%	11.660	478.4	410,292	0.0	410.3
3.5	3.258	4.21%	11.697	478.2	408,836	0.0	408.8
3.8	3.51	4.53%	11.737	478.1	407,361	0.0	407.4
4.0	3.767	4.87%	11.777	477.4	405,350	0.0	405.3
4.3	4.026	5.20%	11.819	476.0	402,740	0.0	402.7
4.5	4.254	5.50%	11.856	475.4	400,982	0.0	401.0
4.8	4.506	5.82%	11.897	474.1	398,508	0.0	398.5
5.0	4.738	6.12%	11.935	473.1	396,402	0.0	396.4
5.3	4.994	6.45%	11.977	472.0	394,087	0.0	394.1
5.5	5.244	6.78%	12.019	471.2	392,060	0.1	392.0
5.8	5.489	7.09%	12.060	470.0	389,734	0.1	389.6
6.0	5.738	7.41%	12.101	469.3	387,806	0.1	387.7
6.3	5.967	7.71%	12.140	468.3	385,743	0.0	385.7
6.5	6.225	8.04%	12.184	467.7	383,858	0.1	383.8
6.8	6.487	8.38%	12.229	466.9	381,790	0.0	381.8
7.0	6.718	8.68%	12.269	466.1	379,895	0.0	379.9
7.2	6.864	8.87%	12.295	465.1	378,297	0.1	378.2

Anexos

Tabla D.8 Resultados del ensaye triaxial en condición no saturada a 100KPa en limo M2.

(3) 100KPa							
Tiempo	Deformación	Deformación unitaria	Area corregida	Fuerza Aplicada	Esfuerzo desviador	Presión de poro	Esfuerzo desviador efectivo
min	mm	%	cm ²	N	Pa	KPa	Kpa
0.0	0.000	0.00%	11.200	0.0	0	0.0	0.0
0.8	0.529	0.68%	11.277	149.7	132,750	0.0	132.8
1.0	0.776	1.00%	11.313	275.9	243,881	0.0	243.9
1.3	1.016	1.30%	11.348	381.0	335,736	0.0	335.7
1.5	1.262	1.62%	11.385	462.7	406,427	0.1	406.3
1.8	1.510	1.94%	11.422	520.2	455,456	0.0	455.5
2.0	1.756	2.25%	11.458	551.3	481,132	0.1	481.0
2.5	2.250	2.89%	11.533	584.3	506,627	0.1	506.5
3.3	3.006	3.86%	11.649	611.9	525,261	0.1	525.2
4.0	3.720	4.77%	11.761	631.0	536,498	0.2	536.3
4.8	4.461	5.72%	11.880	644.4	542,423	0.1	542.3
5.5	5.173	6.63%	11.996	652.6	544,004	0.1	543.9
6.3	5.934	7.61%	12.123	657.9	542,689	0.1	542.6
7.0	6.681	8.57%	12.250	660.8	539,429	0.1	539.3
7.8	7.410	9.50%	12.377	661.8	534,721	0.2	534.5
8.5	8.155	10.46%	12.509	662.4	529,555	0.2	529.4
9.3	8.879	11.39%	12.640	662.6	524,222	0.2	524.0
10.0	9.622	12.34%	12.777	664.7	520,228	0.2	520.0
10.8	10.343	13.27%	12.913	667.7	517,063	0.2	516.9
11.5	11.107	14.25%	13.061	672.1	514,590	0.3	514.3
12.3	11.851	15.20%	13.208	675.0	511,060	0.2	510.9
13.0	12.588	16.14%	13.357	679.2	508,508	0.2	508.3
13.8	13.347	17.12%	13.514	679.5	502,827	0.3	502.5
14.5	14.080	18.06%	13.669	682.7	499,465	0.2	499.3
15.3	14.836	19.03%	13.832	669.7	484,156	0.3	483.9
15.9	15.390	19.74%	13.955	664.5	476,181	0.3	475.9

Anexos

Tabla D.9 Resultados del ensaye triaxial en condición no saturada a 200KPa en limo M2.

(4) 200KPa							
Tiempo	Deformación	Deformación unitaria	Area corregida	Fuerza Aplicada	Esfuerzo desviador	Presión de poro	Esfuerzo desviador efectivo
min	mm	%	cm ²	N	Pa	KPa	Kpa
0.0	0.000	0.00%	11.208	0.0	0	0.0	0.0
1.0	0.812	1.05%	11.327	183.0	161,555	0.1	161.5
1.3	1.046	1.36%	11.362	283.7	249,687	0.0	249.7
1.5	1.286	1.67%	11.398	364.3	319,613	0.0	319.6
1.8	1.552	2.01%	11.438	427.0	373,309	0.0	373.3
2.0	1.808	2.34%	11.477	474.2	413,171	0.0	413.2
2.5	2.308	2.99%	11.554	536.3	464,179	0.1	464.1
3.0	2.805	3.63%	11.631	580.6	499,186	0.1	499.1
3.5	3.309	4.29%	11.710	617.1	526,972	0.2	526.8
4.3	4.057	5.26%	11.830	665.0	562,126	0.3	561.8
5.0	4.786	6.20%	11.949	704.4	589,495	0.3	589.2
5.8	5.525	7.16%	12.072	740.0	612,966	0.3	612.7
6.5	6.280	8.14%	12.201	772.4	633,062	0.3	632.8
7.3	7.005	9.08%	12.327	802.3	650,845	0.3	650.5
8.0	7.736	10.02%	12.457	828.1	664,776	0.3	664.5
8.8	8.486	11.00%	12.593	850.7	675,543	0.3	675.2
9.5	9.211	11.93%	12.727	869.3	683,028	0.4	682.6
10.3	9.944	12.88%	12.866	886.3	688,875	0.4	688.5
11.0	10.685	13.84%	13.009	898.5	690,661	0.3	690.4
11.8	11.412	14.79%	13.153	905.7	688,584	0.3	688.3
12.5	12.143	15.73%	13.301	907.5	682,284	0.3	682.0
13.3	12.891	16.70%	13.456	906.5	673,694	0.3	673.4
14.0	13.618	17.64%	13.610	898.0	659,830	0.4	659.4
14.5	14.077	18.24%	13.709	887.2	647,187	0.3	646.9

D.3 Mediciones de propagación de ondas

Tabla D.10 Mediciones en probetas de arcilla M1 y Limo M2.

PROPIEDADES	M1				M2			
	1	2	3	4	1	2	3	4
# Muestra	1	2	3	4	1	2	3	4
Esfuerzo confinante efectivo, (KPa)	200	50	100	200	200	50	100	200
Esfuerzo desviador máximo, (KPa)	137.5	720.4	907.9	1121.7	285.2	411.0	543.9	690.4
Altura inicial promedio, (cm)	7.791	7.710	7.695	7.779	7.740	7.797	7.718	7.750
Tiempo de Arribo, Δt_1 (ms)	0.132	0.131	0.123	0.133	0.159	0.167	0.158	0.162
Tiempo de Arribo, Δt_2 (ms)	0.130	0.141	0.118	0.132	0.158	0.169	0.161	0.155
Tiempo de Arribo, Δt_3 (ms)	0.132	0.143	0.114	0.122	0.154	0.174	0.161	0.152
Tiempo de Arribo, Δt_4 (ms)	0.138	0.134	0.115	0.123	0.154	0.167	0.165	0.156
Tiempo de Arribo, Δt_5 (ms)	0.144	0.140	0.126	0.124	0.155	0.174	0.162	0.150
Tiempo de arribo promedio, Δt_{prom} (ms)	0.135	0.138	0.120	0.127	0.156	0.170	0.161	0.155
Desviación estándar (ms)	0.005	0.005	0.005	0.005	0.002	0.003	0.002	0.004
Velocidad de onda inicial, V_p (m/s)	576	560	644	613	495	458	479	500
Altura final promedio, (cm)	6.125	7.323	6.182	6.164	6.160	7.227	6.351	6.517
Tiempo de Arribo, Δt_1 (ms)	0.170	0.150	0.150	0.133	0.136	0.222	0.174	0.153
Tiempo de Arribo, Δt_2 (ms)	0.160	0.160	0.160	0.146	0.138	0.222	0.150	0.146
Tiempo de Arribo, Δt_3 (ms)	0.173	0.161	0.161	0.134	0.136	0.200	0.166	0.135
Tiempo de Arribo, Δt_4 (ms)	0.174	0.155	0.155	0.119	0.133	0.202	0.168	0.131
Tiempo de Arribo, Δt_5 (ms)	0.162	0.157	0.157	0.127	0.132	0.230	0.174	0.127
Tiempo de arribo promedio, Δt_{prom} (ms)	0.168	0.156	0.156	0.132	0.135	0.215	0.166	0.138
Desviación estándar (ms)	0.006	0.004	0.004	0.009	0.002	0.012	0.009	0.009
Velocidad de onda final, V_p (m/s)	365	468	395	467	457	336	382	471

Tabla D.11 Mediciones en probetas falladas de arcilla M1 y limo M2.

PROPIEDADES	M1				M2			
	1	2	3	4	1	2	3	4
# Muestra	1	2	3	4	1	2	3	4
Esfuerzo confinante efectivo, (KPa)	200	50	100	200	200	50	100	200
Esfuerzo desviador máximo, (KPa)	137.5	720.4	907.9	1121.7	285.2	411.0	543.9	690.4
Altura inicial promedio, (cm)	7.791	7.710	7.695	7.779	7.740	7.797	7.718	7.750
Tiempo de Arribo, Δt_1 (ms)	0.348	0.354	0.352	0.350	0.402	0.398	0.406	0.378
Tiempo de Arribo, Δt_2 (ms)	0.356	0.360	0.334	0.358	0.396	0.384	0.404	0.402
Tiempo de Arribo, Δt_3 (ms)	0.350	0.358	0.342	0.342	0.392	0.382	0.408	0.388
Tiempo de Arribo, Δt_4 (ms)	0.338	0.352	0.338	0.352	0.416	0.380	0.392	0.384
Tiempo de Arribo, Δt_5 (ms)	0.352	0.368	0.352	0.356	0.380	0.394	0.396	0.398
Tiempo de arribo promedio, Δt_{prom} (ms)	0.349	0.358	0.344	0.352	0.397	0.388	0.401	0.390
Desviación estándar (ms)	0.006	0.006	0.007	0.006	0.012	0.007	0.006	0.009
Velocidad de onda inicial, V_p (m/s)	223	215	224	221	195	201	192	199
Altura final promedio, (cm)	6.125	7.323	6.182	6.164	6.160	7.227	6.351	6.517
Tiempo de Arribo, Δt_1 (ms)	0.472	0.408	0.362	0.352	0.420	0.440	0.448	0.374
Tiempo de Arribo, Δt_2 (ms)	0.492	0.408	0.350	0.360	0.432	0.444	0.428	0.370
Tiempo de Arribo, Δt_3 (ms)	0.468	0.396	0.368	0.380	0.420	0.468	0.440	0.378
Tiempo de Arribo, Δt_4 (ms)	0.500	0.420	0.342	0.360	0.408	0.460	0.432	0.370
Tiempo de Arribo, Δt_5 (ms)	0.476	0.410	0.380	0.350	0.412	0.416	0.448	0.382
Tiempo de arribo promedio, Δt_{prom} (ms)	0.482	0.408	0.360	0.360	0.418	0.446	0.439	0.375
Desviación estándar (ms)	0.012	0.008	0.013	0.011	0.008	0.018	0.008	0.005
Velocidad de onda final, V_p (m/s)	127	179	172	171	147	162	145	174



E. Registros sísmicos del experimento en campo

E.1 Sismogramas registrados en campo

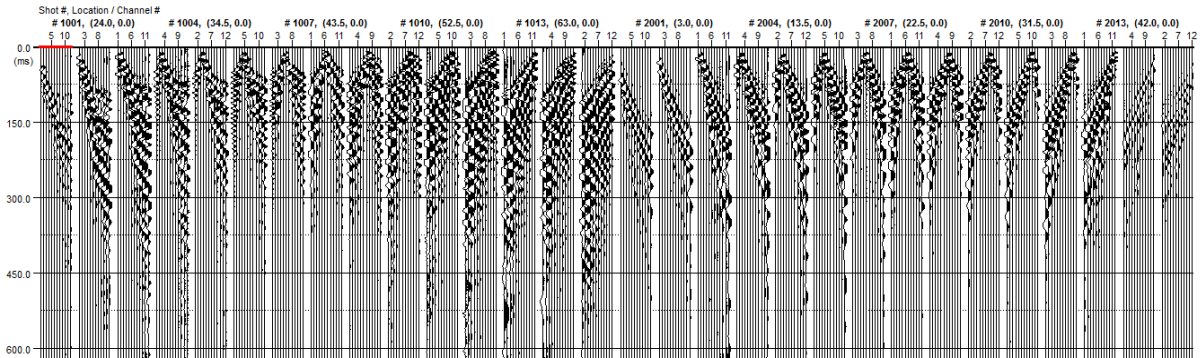


Fig. E.1 Sismograma registrado en campo en el primer sitio S1 (1000-2000).

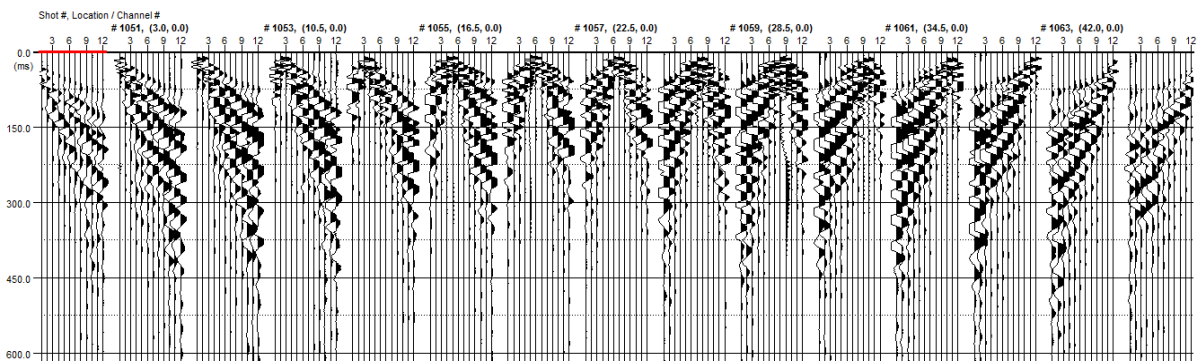


Fig. E.2 Sismograma registrado en campo en el primer sitio S1 (1050).

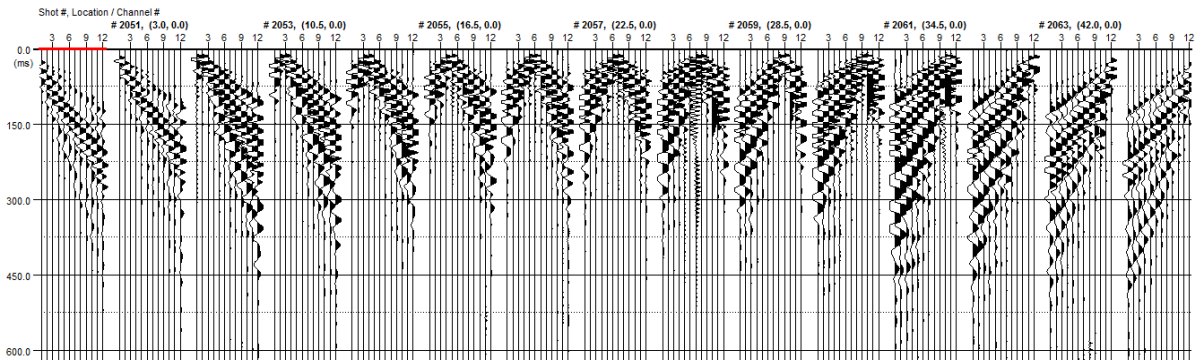


Fig. E.3 Sismograma registrado en campo en el primer sitio S1 (2050).

Anexos

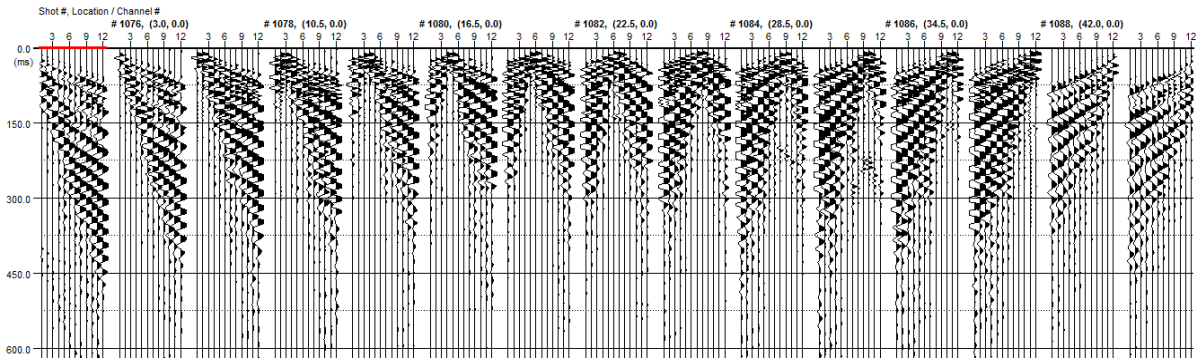


Fig. E.4 Sismograma registrado en campo en el primer sitio S1 (1075).

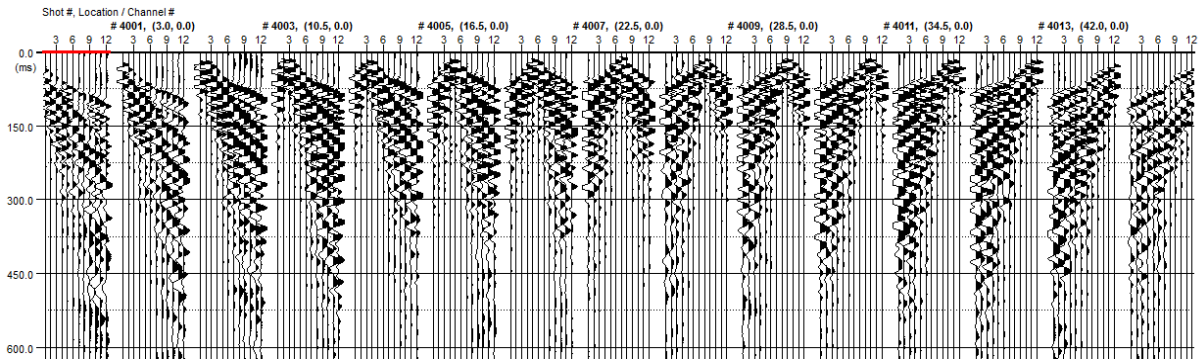


Fig. E.5 Sismograma registrado en campo en el segundo sitio S2 (4000).

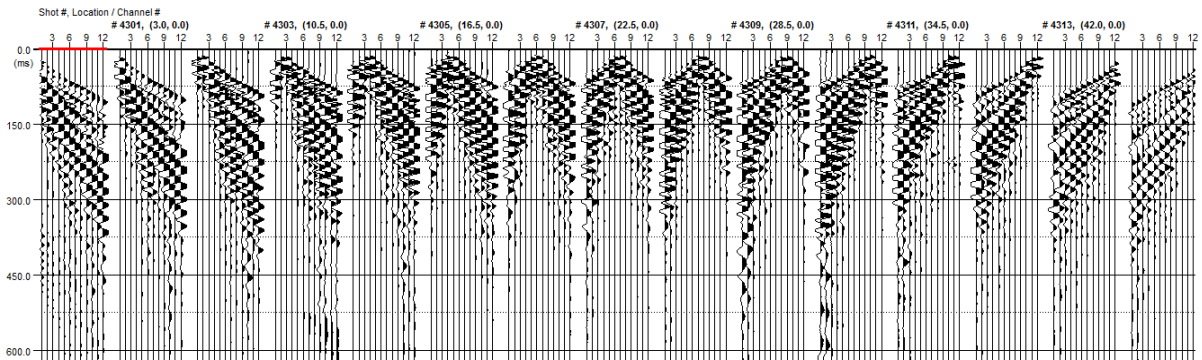


Fig. E.6 Sismograma registrado en campo en el segundo sitio S2 (4300).

Anexos

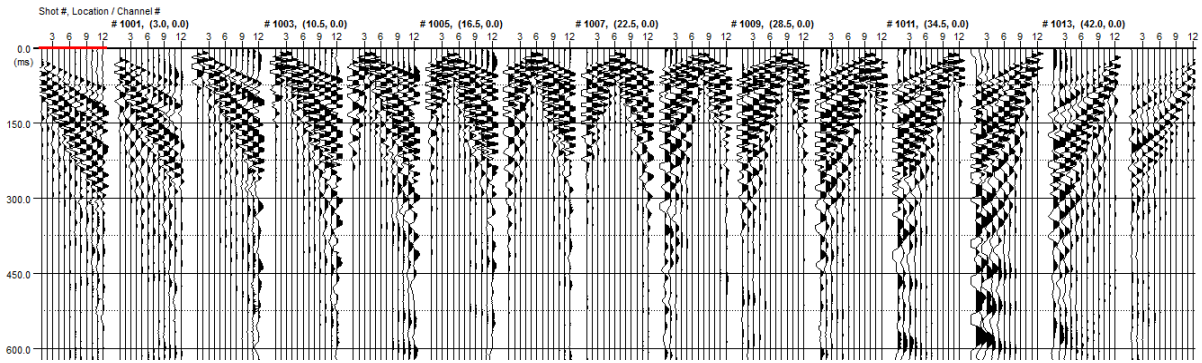


Fig. E.7 Sismograma registrado en campo en el tercer sitio S3 (1000).

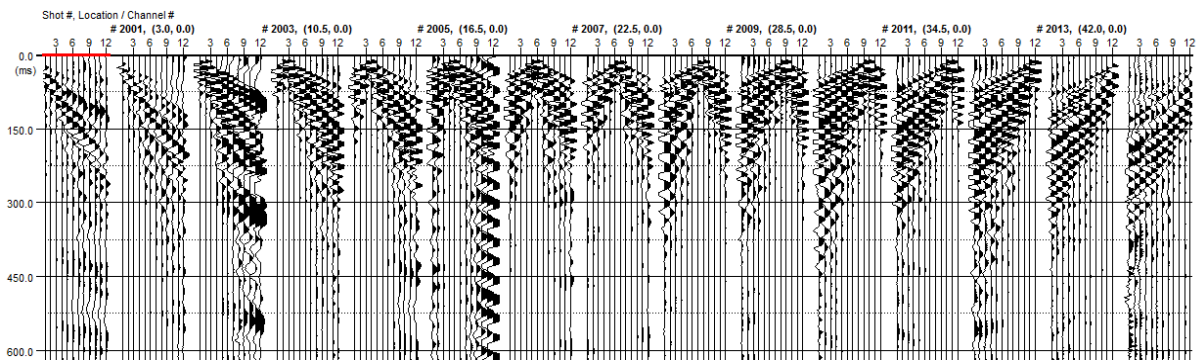


Fig. E.8 Sismograma registrado en campo en el tercer sitio S3 (2000).

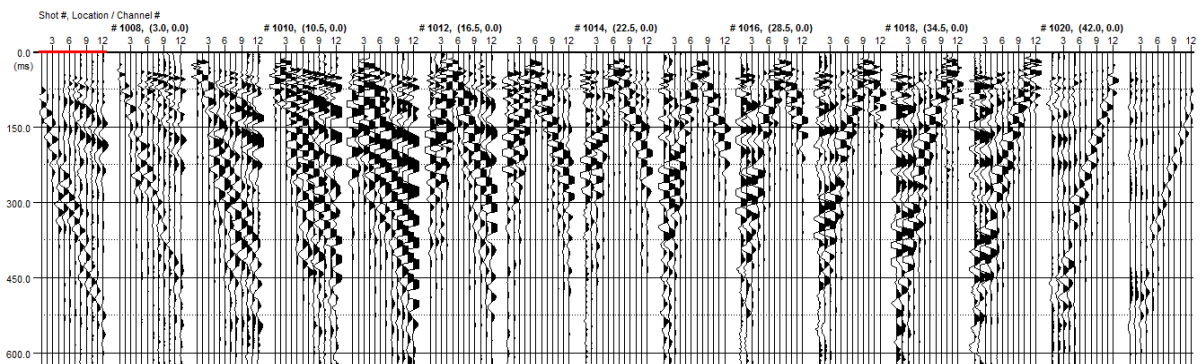


Fig. E.9 Sismograma registrado en campo en el cuarto sitio S4 (3000).

Anexos

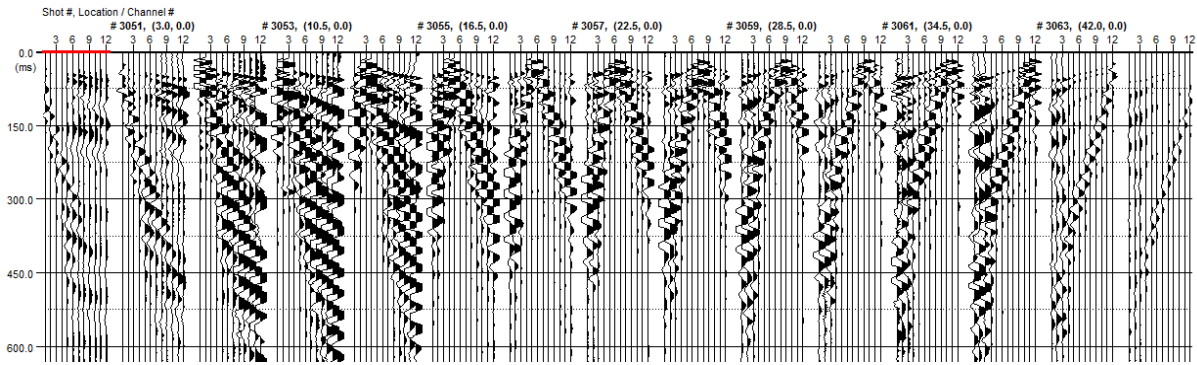


Fig. E.10 Sismograma registrado en campo en el cuarto sitio S4 (3050).

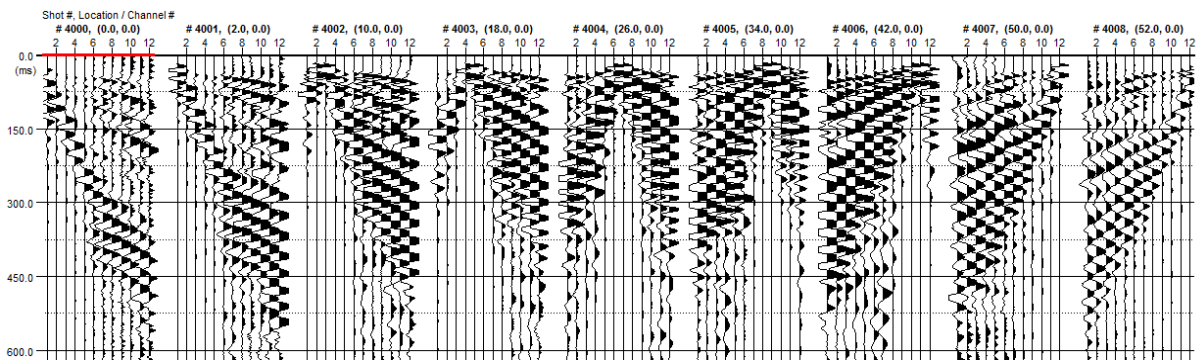


Fig. E.11 Sismograma registrado en campo en el cuarto sitio S4 (4000).

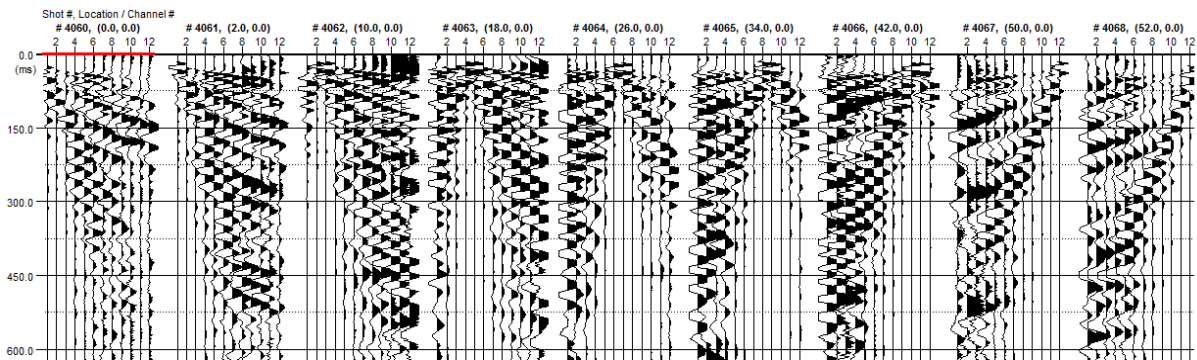


Fig. E.12 Sismograma registrado en campo en el cuarto sitio S4 (4050).

Anexos

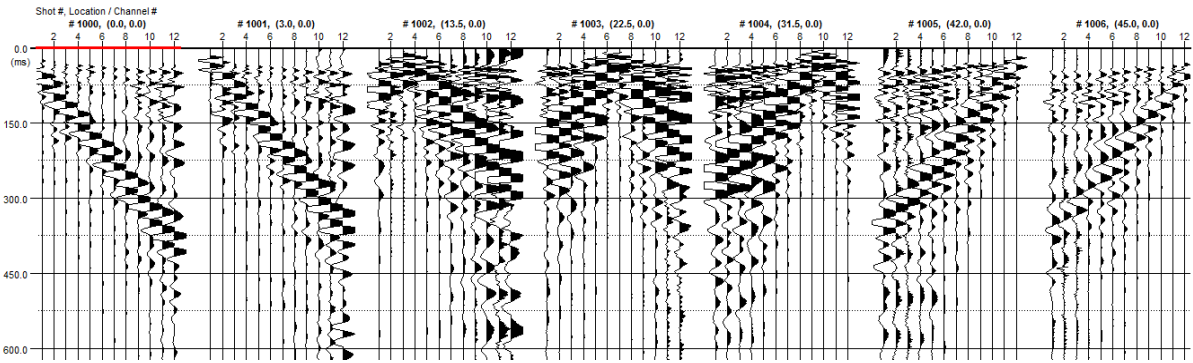


Fig. E.13 Sismograma registrado en campo en el cuarto sitio S4 (1000).

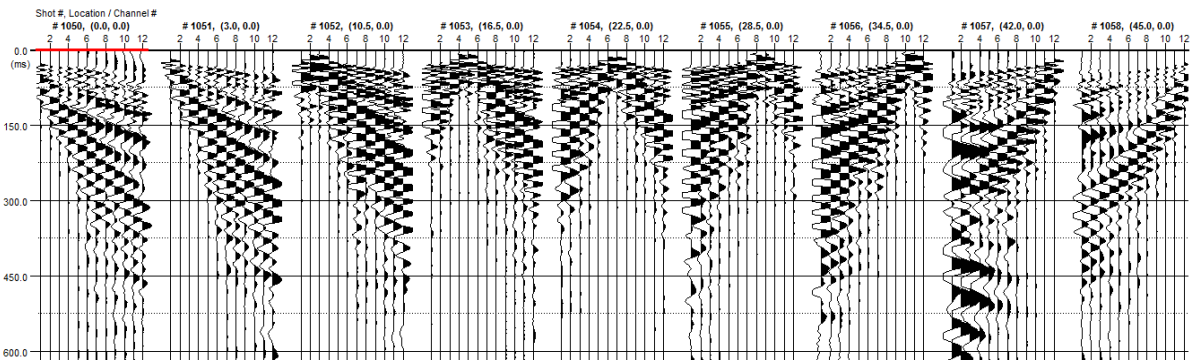


Fig. E.14 Sismograma registrado en campo en el cuarto sitio S4 (1050).

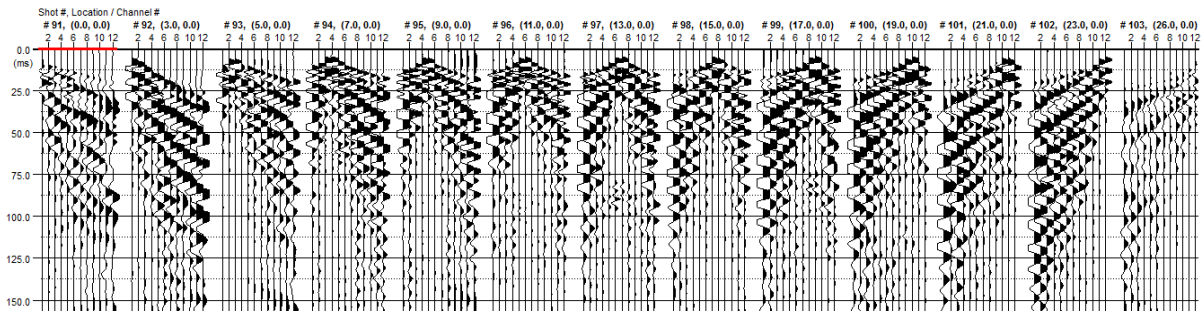


Fig. E.15 Sismograma registrado en campo en el cuarto sitio S4 (100).

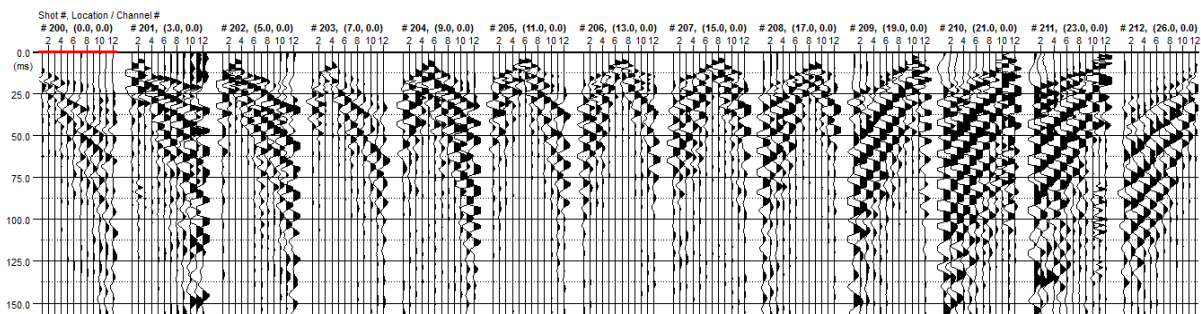


Fig. E.16 Sismograma registrado en campo en el cuarto sitio S4 (200).