



Universidad de San Carlos de Guatemala  
Facultad de Ingeniería  
Escuela de Ingeniería Civil

**COMPARACIÓN DEL MÉTODO GEOFÍSICO DE ONDAS DE SUPERFICIE CONTRA TRES  
MÉTODOS USADOS EN MECÁNICA DE SUELOS PARA EL CÁLCULO DE LOS MÓDULOS  
ELÁSTICOS**

**Ramiro Alfonso González Negreros**

Asesorado por el Ing. Luis Felipe López Aguilar

Guatemala, septiembre de 2018

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**COMPARACIÓN DEL MÉTODO GEOFÍSICO DE ONDAS DE SUPERFICIE CONTRA TRES  
MÉTODOS USADOS EN MECÁNICA DE SUELOS PARA EL CÁLCULO DE LOS MÓDULOS  
ELÁSTICOS**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
POR

**RAMIRO ALFONSO GONZÁLEZ NEGREROS**  
ASESORADO POR EL ING. LUIS FELIPE LÓPEZ AGUILAR

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

**INGENIERO CIVIL**

GUATEMALA, SEPTIEMBRE DE 2018

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE INGENIERÍA



**NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA**

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL I	Ing. Angel Roberto Sic García
VOCAL II	Ing. Pablo Christian de León Rodríguez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Oscar Humberto Galicia Núñez
VOCAL V	Br. Carlos Enrique Gómez Donis
SECRETARÍA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

**TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO**

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
EXAMINADOR	Ing. Alfredo Enrique Beber Aceituno
EXAMINADOR	Ing. Claudio César Castañón Contreras
EXAMINADOR	Ing. Daniel Alfredo Cruz Pineda
SECRETARÍA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

## **HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR**

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

### **COMPARACIÓN DEL MÉTODO GEOFÍSICO DE ONDAS DE SUPERFICIE CONTRA TRES MÉTODOS USADOS EN MECÁNICA DE SUELOS PARA EL CÁLCULO DE LOS MÓDULOS ELÁSTICOS**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería civil, con fecha 09 de mayo de 2016.

**Ramiro Alfonso González Negreros**

Guatemala, 30 de abril de 2018

Ingeniero  
**José Gabriel Ordoñez Morales**  
Coordinador del área de materiales y construcciones civiles  
Escuela de Ingeniería Civil  
Facultad de Ingeniería  
UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
Presente

Estimado Ingeniero Ordoñez

Por medio de la presente, me permito informarle que revisé y corregí el trabajo de graduación realizado por el estudiante de la carrera de Ingeniería Civil, RAMIRO ALFONSO GONZÁLEZ NEGREROS que se titula "**COMPARACIÓN DEL MÉTODO GEOFÍSICO DE ONDAS DE SUPERFICIE CONTRA TRES METODOS USADOS EN MECANICA DE SUELOS PARA EL CALCULO DE LOS MÓDULOS ELÁSTICOS**".

El trabajo se efectuó de forma muy satisfactoria y cumplió ampliamente con los objetivos planteados. Para mí es un gusto recomendar su aprobación.

Agradezco su atención a la presente y me suscribo,

Muy atentamente



**Luis Felipe López Aguilar**  
Ingeniero Civil  
Geofísico (B.Sc. y M.Sc.)  
Colegiado No. 2177

Luis Felipe López Aguilar  
Ingeniero Civil y Geofísico (B. Sc. M. Sc)  
Colegiado No.2177



**USAC**  
TRICENTENARIA  
Universidad de San Carlos de Guatemala  
FACULTAD DE INGENIERÍA

<http://civil.ingenieria.usac.edu.gt>

**ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL**



Guatemala,  
25 de julio de 2018

Ingeniero  
Hugo Leonel Montenegro Franco  
Director Escuela Ingeniería Civil  
Facultad de Ingeniería  
Universidad de San Carlos


Estimado Ingeniero Montenegro.

Le informo que he revisado el trabajo de graduación **COMPARACIÓN DEL MÉTODO GEOFÍSICO DE ONDAS DE SUPERFICIE CONTRA TRES MÉTODOS USADOS EN MECÁNICA DE SUELOS PARA EL CÁLCULO DE LOS MÓDULOS ELÁSTICOS** desarrollado por el estudiante de Ingeniería Civil Ramiro Alfonso González Negreros quien contó con la asesoría del Ing. Luis Felipe López Aguilar.

Considero este trabajo bien desarrollado y representa un aporte para la comunidad del área y habiendo cumplido con los objetivos del referido trabajo doy mi aprobación al mismo solicitando darle el trámite respectivo.

Atentamente,

ID Y ENSEÑAD A TODOS

  
Ing. Civil José Gabriel Ordóñez Morales  
Coordinador del Área de Materiales y  
Construcciones Civiles



FACULTAD DE INGENIERIA  
AREA DE MATERIALES Y  
CONSTRUCCIONES CIVILES  
**USAC**

/mrrm.

*Mas de 137 años de Trabajo y Mejora Continua*





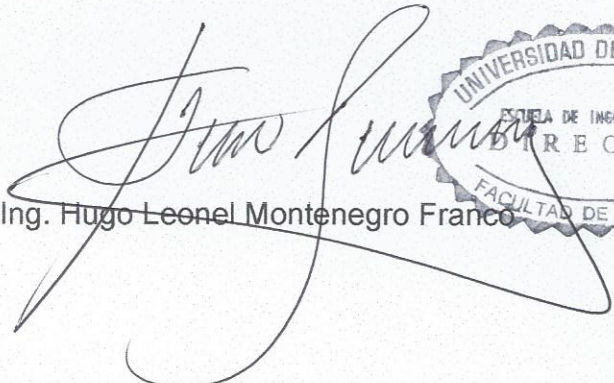
**USAC**  
TRICENTENARIA  
Universidad de San Carlos de Guatemala  
FACULTAD DE INGENIERÍA


<http://civil.ingenieria.usac.edu.gt>

**ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL**



El director de la Escuela de Ingeniería Civil, después de conocer el dictamen del Asesor Ing. Luis Felipe López Aguilar y Coordinador del Departamento de Materiales y Construcciones Civiles Ing. José Gabriel Ordóñez Morales, al trabajo de graduación del estudiante Ramiro Alfonso González Negreros **COMPARACIÓN DEL MÉTODO GEOFÍSICO DE ONDAS DE SUPERFICIE CONTRA TRES MÉTODOS USADOS EN MECÁNICA DE SUELOS PARA EL CÁLCULO DE LOS MÓDULOS ELÁSTICOS** da por este medio su aprobación a dicho trabajo.

  
Ing. Hugo Leonel Montenegro Franco



Guatemala, septiembre 2018

/mmm.



*Más de 138 años de Trabajo y Mejora Continua*

Universidad de San Carlos  
de Guatemala



Facultad de Ingeniería  
Decanato

DTG. 316.2018

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Civil, al Trabajo de Graduación titulado: **COMPARACIÓN DEL MÉTODO GEOFÍSICO DE ONDAS DE SUPERFICIE CONTRA TRES MÉTODOS USADOS EN MECÁNICA DE SUELOS PARA EL CÁLCULO DE LOS MÓDULOS ELÁSTICOS**, presentado por el estudiante universitario: **Ramiro Alfonso González Negreros**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:

  
Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco  
Decano

Guatemala, septiembre de 2018

/gdech





## **ACTO QUE DEDICO A:**

### **Mis padres**

Héctor Hugo González Moncada y Brenda Iris Negreros Hidalgo, por su sacrificio, amor y entrega.

### **Mi hermano**

Héctor Hugo González Negreros, por ser mi ejemplo siempre.

### **Mi abuela**

Rosalía Hidalgo Figueroa, por todo el tiempo que me regaló y el amor que me dio siempre.

### **Mi familia**

Por el apoyo y el cariño dado durante toda mi vida.

### **Mis amigos**

A cada uno de mis amigos que estuvo pendiente de mí, apoyándome y aconsejándome tanto en los momentos difíciles como en los buenos.

## **AGRADECIMIENTOS A:**

<b>La Universidad de San Carlos de Guatemala</b>	Por permitirme realizar mis estudios superiores en tan prestigiosa casa de estudios.
<b>Facultad de Ingeniería</b>	Por darme el conocimiento y las herramientas necesarias para convertirme en ingeniero.
<b>Mis padres</b>	Por apoyarme siempre en todo lo que quise hacer y siempre sacrificarse por verme feliz.
<b>Mi abuela</b>	Rosalía, por estar siempre pendiente de mí y apoyarme durante toda mi vida.
<b>Mi abuela</b>	Rosa, por brindarme su apoyo a pesar de la distancia.
<b>Mi hermano</b>	Por apoyarme y aconsejarme durante toda mi vida y mi carrera universitaria.
<b>Mi familia</b>	A todos los integrantes de mi familia por aportar sus granos de arena en mi formación como hombre de bien y por el amor demostrado durante toda mi vida.
<b>Ing. Luis Felipe López</b>	Por aceptar ser mi asesor y brindarme sus conocimientos para elaborar este trabajo.

- Ing. Juan Pablo Ligorria** Por ayudarme con la elaboraci3n de este trabajo de graduaci3n brind3ndome sus conocimientos.
- Ing. H3ctor Valdez** Por aportar sus conocimientos en la elaboraci3n de este trabajo de graduaci3n.
- Dr. Rodolfo Semrau** Por brindarme sus conocimientos y proporcionarme informaci3n vital para la elaboraci3n de este trabajo de graduaci3n.
- Geociencia Aplicada, S. A.** Por darme la oportunidad de realizar este trabajo y proporcionarme la ayuda necesaria en cada etapa de la investigaci3n.
- Mis amigos de la facultad** Brian Anleu y Erick Mor3n, por siempre haber luchado hombro con hombro durante toda la carrera universitaria y ser de gran apoyo durante la misma.
- Mis amigos** Mario, Dean, Alberto y Mar3a Jos3, por ser parte importante de mi vida, aconsej3ndome y apoy3ndome en todo momento.

## ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES .....	V
LISTA DE SÍMBOLOS .....	IX
GLOSARIO .....	XI
RESUMEN .....	XIII
OBJETIVOS.....	XV
INTRODUCCIÓN .....	XVII
1. ANTECEDENTES .....	1
1.1. Caracterización de suelos arenosos mediante análisis de ondas de superficie. México 2007 .....	1
1.2. Métodos geofísicos aplicados a la caracterización de suelos: estado del arte. Colombia 2011 .....	2
1.3. Cálculo del valor portante del suelo mediante geofísica y métodos convencionales en el puente del río Maicito. Ecuador 2012 .....	3
1.4. Uso de refracción sísmica y análisis multicanal de ondas superficiales para la determinación de módulos elásticos, en la finca Viento Blanco, San Vicente Pacaya. Guatemala 2015 .....	5
2. MÓDULOS ELÁSTICOS DEL SUELO .....	7
2.1. Módulo de elasticidad.....	7
2.2. Módulo de <i>Poisson</i> .....	8
2.3. Módulo de corte.....	8
2.4. Módulo de compresibilidad.....	9
2.5. Aplicaciones de los módulos elásticos del suelo en la ingeniería civil.....	11

2.5.1.	Cálculo de asentamientos y deformaciones .....	11
2.5.2.	Cálculo de compresibilidad del suelo .....	12
2.5.3.	Cálculo de coeficiente del módulo de rasante o balasto.....	13
3.	MÉTODOS TRADICIONALES DE GEOTECNIA PARA EL CÁLCULO DE LOS MÓDULOS ELÁSTICOS DEL SUELO.....	15
3.1.	Ensayo de penetración estándar (SPT) .....	15
3.1.1.	Descripción general del método .....	15
3.1.2.	Normalización del método, ASTM D1586.....	19
3.1.3.	Cálculo de módulos elásticos .....	20
3.2.	Ensayo triaxial.....	22
3.2.1.	Descripción general del método .....	22
3.2.2.	Normalización del método .....	24
3.2.3.	Cálculo de los módulos elásticos .....	26
3.3.	Valor soporte california CBR.....	28
3.3.1.	Descripción general del método .....	28
3.3.2.	Normalización del método ASTM D1883-07 .....	29
3.3.3.	Cálculo de los módulos elásticos .....	31
4.	MÉTODO GEOFÍSICO DE ONDAS DE SUPERFICIE PARA EL CÁLCULO DE LOS MÓDULOS ELÁSTICOS DEL SUELO.....	33
4.1.	Descripción del método.....	33
4.1.1.	Tipos de ondas sísmicas.....	35
4.1.1.1.	Ondas profundas.....	36
4.1.1.2.	Ondas de superficie .....	37
4.2.	Metodología para estimar onda de corte.....	39
4.3.	Metodología para encontrar onda de compresión.....	43
4.4.	Aplicaciones del método MASW a la ingeniería.....	46
4.5.	Normalización del método.....	47
4.6.	Cálculo de los módulos elásticos .....	48

5.	ANÁLISIS TEÓRICO DE LOS MÉTODOS.....	53
5.1.	Consideraciones generales .....	53
5.2.	Relación entre los métodos .....	59
6.	DESARROLLO EXPERIMENTAL .....	63
6.1.	Comparación SPT contra MASW .....	63
6.1.1.	Ensayo de penetración estándar SPT .....	65
6.1.1.1.	Equipo de ensayo .....	65
6.1.1.2.	Procedimiento de ensayo .....	66
6.1.1.3.	Aplicación de resultados.....	68
6.1.2.	Método de ondas de superficie.....	72
6.1.2.1.	Equipo de ensayo .....	72
6.1.2.2.	Procedimiento de ensayo .....	74
6.1.2.3.	Aplicación de resultados.....	77
6.2.	Comparación triaxial y CBR contra MASW.....	83
6.2.1.	Ensayo triaxial .....	85
6.2.1.1.	Muestra de ensayo .....	85
6.2.1.2.	Equipo de ensayo .....	86
6.2.1.3.	Procedimiento de ensayo .....	87
6.2.1.4.	Aplicación de resultados.....	87
6.2.2.	Ensayo CBR .....	92
6.2.2.1.	Muestra de ensayo .....	92
6.2.2.2.	Equipo de ensayo .....	92
6.2.2.3.	Procedimiento de ensayo .....	94
6.2.2.4.	Aplicación de resultados.....	95
6.2.3.	Método de ondas de superficie.....	98
6.2.3.1.	Aplicación de resultados.....	98
6.3.	Análisis práctico de los métodos .....	102
6.3.1.	Análisis de datos obtenidos SPT contra MASW ...	102

6.3.1.1.	Análisis de resultados obtenidos de SPT .....	103
6.3.1.2.	Análisis de resultados obtenidos de MASW fase 1 .....	103
6.3.2.	Análisis de datos de triaxial y CBR contra MASW.	103
6.3.2.1.	Análisis de resultados obtenidos de triaxial.....	103
6.3.2.2.	Análisis de resultados obtenidos de CBR.....	104
6.3.2.3.	Análisis de resultados obtenidos de MASW fase 2 .....	104
6.3.3.	Comparación de resultados.....	105
6.3.3.1.	Comparación de resultados SPT contra MASW .....	105
6.3.3.2.	Comparación de resultados triaxial y CBR contra MASW.....	108
CONCLUSIONES.....		113
RECOMENDACIONES.....		117
BIBLIOGRAFÍA.....		119
APÉNDICES .....		123

## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

### FIGURAS

1.	Mecanismo de golpeo para ensayo SPT.....	19
2.	Diagrama de un equipo de prueba triaxial.....	23
3.	Curvas esfuerzo-deformación producidas en diferentes pruebas triaxiales.....	27
4.	Principio de <i>Huygens</i> .....	34
5.	Ley de <i>Snell</i> .....	35
6.	Modelo de propagación de onda de compresión .....	36
7.	Modelo de propagación de onda de corte .....	37
8.	Modelo de propagación de onda <i>Rayleigh</i> .....	38
9.	Modelo de propagación de onda <i>Love</i> .....	38
10.	Esquema de configuración de ensayo MASW .....	40
11.	Gráfico de dispersión .....	41
12.	Sismograma .....	42
13.	a) Gráfico de inversión, b) Perfil de onda de corte .....	43
14.	Dromócrona .....	44
15.	Interpretación de dromócrona .....	45
16.	Ubicación de la finca Viento Blanco .....	64
17.	Mapa de localización de torres aerogeneradoras .....	64
18.	Equipo de ensayo SPT.....	66
19.	Proceso de ensamblaje de motor para SPT.....	67
20.	Extracción de muestras de cuchara SPT .....	68
21.	Sismógrafo, batería y computadora .....	73
22.	Geófonos de onda P y onda S .....	73



23.	Disparador y cable .....	74
24.	Vista del tendido de geófonos.....	75
25.	Golpeo para provocar ondas sísmicas.....	76
26.	Sismograma del golpeo al inicio del arreglo .....	77
27.	Sismograma del golpeo al centro el arreglo.....	78
28.	Sismograma del golpeo al final del arreglo .....	78
29.	Dromócrona de la línea sísmica de onda P en el punto 4.....	79
30.	Gráfico de dispersión del punto 4 .....	80
31.	Mapa de ubicación de la zona de ensayo .....	84
32.	Mapa de localización de puntos de ensayo de la zona 2 fase 2 .....	85
33.	Equipo de ensayo triaxial.....	86
34.	Gráfica de esfuerzo-deformación para la muestra 4 del ensayo triaxial (UU).....	89
35.	Máquina de penetración CBR.....	93
36.	Equipo de ensayo CBR.....	93
37.	Gráfica de esfuerzo-deformación para cilindro de 10 golpes en ensayo CBR.....	96
38.	Gráfico comparativo del módulo de elasticidad entre SPT y MASW...	106
39.	Gráfico comparativo del módulo de <i>Poisson</i> entre SPT y MASW.....	106
40.	Gráfico comparativo del módulo de corte entre SPT y MASW .....	107
41.	Gráfico comparativo del módulo de compresibilidad entre SPT y MASW .....	107
42.	Gráfico comparativo del módulo de elasticidad entre MASW y el ensayo triaxial .....	109
43.	Gráfico comparativo del módulo de <i>Poisson</i> entre MASW y ensayo triaxial .....	109
44.	Gráfico comparativo del módulo de corte entre MASW y ensayo triaxial .....	110

45.	Gráfico comparativo del módulo de compresibilidad entre MASW y ensayo triaxial .....	110
-----	--	-----

## TABLAS

I.	Parámetros elásticos para varios tipos de suelo .....	10
II.	Aplicaciones del ensayo SPT según su factibilidad .....	15
III.	Corrección por martillo .....	17
IV.	Corrección por profundidad.....	17
V.	Corrección por diámetro de perforación.....	18
VI.	Corrección por diámetro del toma muestra .....	18
VII.	Valores de S1 y S2.....	21
VIII.	Resistencia de patrón CBR.....	29
IX.	Clasificación sísmica de sitio basada en la onda de corte ponderada para Guatemala .....	46
X.	Coordenadas UTM de los puntos de SPT.....	65
XI.	Tabla de resumen de datos obtenidos de SPT .....	68
XII.	Tabla de datos obtenidos del SPT para el punto 4 .....	69
XIII.	Resumen de módulos elásticos calculados por SPT.....	72
XIV.	Velocidades de onda P en el punto 4.....	79
XV.	Velocidades de onda S en el punto 4.....	80
XVI.	Resumen de módulos elásticos calculados por MASW fase 1.....	83
XVII.	Datos obtenidos del ensayo triaxial (UU) para la muestra 4 .....	89
XVIII.	Resultados de los módulos elásticos para el ensayo triaxial.....	91
XIX.	Datos de ensayo CBR para cilindro de 10 golpes.....	96
XX.	Resultados de los módulos elásticos para el ensayo CBR .....	98
XXI.	Velocidades de onda P para el perfil sísmico 6.....	99
XXII.	Velocidades de onda S para el perfil sísmico 6.....	99
XXIII.	Resumen de módulos elásticos calculados por MASW fase 2.....	102

XXIV.	Comparación de resultados SPT contra MASW .....	105
XXV.	Comparación triaxial contra MASW .....	108
XXVI.	Comparación de CBR 10 golpes contra MASW.....	111
XXVII.	Comparación de CBR 30 golpes contra MASW.....	112

## LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
$\emptyset$	Ángulo de fricción interna
$q$	Capacidad de soporte del suelo
<b>cm</b>	Centímetro
<b>C</b>	Cohesión
$\varepsilon$	Deformación unitaria
<b>B</b>	Diámetro del pistón CBR
$\Delta$	Diferencia
<b>CD</b>	Ensayo triaxial consolidado drenado
<b>CU</b>	Ensayo triaxial consolidado no drenado
<b>UU</b>	Ensayo triaxial no consolidado no drenado
$\sigma$	Esfuerzo
$\tau$	Esfuerzo cortante
$\sigma_1$	Esfuerzo desviador
$I_p$	Factor de forma
<b>kg</b>	Kilogramo
<b>MN</b>	Mega Newton
<b>MPa</b>	Mega Pascales
<b>m</b>	Metro
<b>mm</b>	Milímetro
<b>K</b>	Módulo de compresibilidad
<b>G</b>	Módulo de corte

$\nu$	Módulo de <i>Poisson</i>
<b>E</b>	Módulo de <i>Young</i> o elasticidad
<b>Pa</b>	Pascales
<b>%CBR</b>	Porcentaje de CBR
$\sigma_3$	Presión de confinamiento
$\sigma_2$	Presión de poro
<b>Pulg</b>	Pulgada
$N_{spt}$	Resistencia a la penetración estándar
$V_s$	Velocidad de onda de corte
$V_{p_s}$	Velocidad de onda de corte ponderada
$V_p$	Velocidad de onda de compresión

## GLOSARIO

<b>AGIES</b>	Asociación Guatemalteca de Ingeniería Estructural y Sísmica.
<b>ASTM</b>	Sociedad Americana de Ensayos y Materiales. ( <i>American Society for Testing and Materials</i> ).
<b>CBR</b>	Valor Soporte California ( <i>California Bearing Ratio</i> ).
<b>Dromócrona</b>	Se le denomina así al diagrama en el cual se grafican los tiempos de llegada de las ondas sísmicas refractadas.
<b>Dúctil</b>	Se le denomina así a los materiales que presentan grandes deformaciones plásticas antes de romperse o quebrarse.
<b>Geofísica</b>	Es la ciencia que estudia la tierra por medio de la física, integra la geología, las matemáticas y la física para entender cómo trabaja el subsuelo y determinar sus características físicas y mecánicas.
<b>Geófono</b>	Los geófonos son transductores de desplazamiento, velocidad o aceleración que convierten el movimiento del suelo en una señal eléctrica.

<b>Geotecnia</b>	Es la ciencia y práctica de aquella parte de la ingeniería civil que involucra materiales naturales encontrados cerca de la superficie de la tierra.
<b>IBC</b>	Código Internacional de Construcción. ( <i>International Building Code</i> ).
<b>In situ</b>	Es una expresión latina que significa en el sitio y que suele utilizarse para designar un fenómeno observado en el lugar o una manipulación realizada en el lugar.
<b>MASW</b>	Análisis Multicanal de Ondas de Superficie. ( <i>Multi-Channel Analysis of Surface Waves</i> ).
<b>Probeta</b>	Es una pieza generalmente de dimensiones normalizadas, constituida por un determinado material cuyas características se desean estudiar.
<b>Sismógrafo</b>	Instrumento para registrar la intensidad, duración y otras características de los sismos de la tierra.
<b>Sismograma</b>	Gráfico en el que se registran la intensidad, duración y otras características de un movimiento sísmico.
<b>SPT</b>	Ensayo de penetración estándar. ( <i>Standard Penetration Test</i> ).
<b>Trigger</b>	Disparador.

## RESUMEN

El presente trabajo es una comparación teórico-práctica entre los métodos geotécnicos SPT, triaxial no consolidado, no drenado y CBR, contra el método geofísico de ondas de superficie MASW para encontrar los módulos elásticos del suelo. El trabajo se dividió en dos partes. La primera parte presenta la teoría donde se definieron los módulos elásticos y sus aplicaciones. También se describen los ensayos SPT, triaxial y CBR y cómo encontrar los módulos elásticos del suelo mediante estos métodos. Adicionalmente, se describió el método de ondas de superficie MASW, sus aplicaciones y cómo encontrar los módulos elásticos del suelo por medio de este método. Como parte de la teoría también se definieron las ventajas, desventajas y limitaciones, teóricas y prácticas, de los métodos descritos.

La segunda parte del trabajo consistió en la comparación práctica de los métodos. Esta parte se dividió en dos fases. En la primera fase se compararon los resultados del ensayo SPT contra el ensayo geofísico de ondas de superficie con los resultados de los estudios realizados en la finca Viento Blanco, Escuintla, donde se realizaron siete SPT y siete perfiles geofísicos para la construcción de torres eólicas en el año 2014. De este estudio se seleccionó el punto 4 y se compararon los resultados para las profundidades de 1,00, 10,00 y 35,00 metros. Con los resultados de esta comparación se llegó a la conclusión de que el cálculo de los módulos elásticos por medio del ensayo MASW es acertado y confiable.

La fase dos de la comparación práctica consistió en la comparación de los métodos triaxial no consolidado, no drenado y CBR, contra el método geofísico



de ondas de superficie. Esta comparación se realizó con los resultados de un estudio realizado en la finca Cumbres de Vista Hermosa, en la Ciudad de Guatemala, donde se realizaron 48 pozos geotécnicos y 11 perfiles geofísicos para el desarrollo de un proyecto residencial en el año 2015. De este estudio se seleccionaron los pozos 18, 18A y el perfil geofísico 6. Del pozo 18 se extrajeron muestras inalteradas para la ejecución de ensayos triaxiales no consolidados y no drenados para las profundidades de 1,10, 2,30, 3,90 y 6,00 metros y del pozo 18A se extrajo una muestra de suelo del intervalo de 0,20 a 1,20 metros para la realización del ensayo CBR.

Los resultados de la comparación entre el triaxial y el método geofísico presentaron variaciones significativas para las profundidades menores que 6,00 metros. Los resultados del ensayo triaxial presentan valores mayores a los del ensayo geofísico. Sin embargo, se realizaron gráficas comparativas de los resultados y se observó que los resultados poseían una tendencia similar y convergían para las profundidades mayores que 6,00 metros. Se llegó a la conclusión hipotética de que los resultados eran afectados por la presión de confinamiento de la cámara triaxial para las muestras cercanas a la superficie. Se necesita investigar esta diferencia.

La comparación hecha entre el ensayo CBR y el ensayo de ondas de superficie arrojó que para el cilindro de 10 golpes de compactación los resultados entre ambos métodos son acertados, debido a que no presentan variaciones significativas. Sin embargo, para el cilindro de 30 golpes de compactación los resultados son mucho mayores en el CBR que en el MASW. Se concluye que para el cilindro de 30 golpes las condiciones naturales del suelo fueron afectadas de gran manera, aumentando su densidad y por consiguiente sus valores de módulos elásticos.

## **OBJETIVOS**

### **General**

Realizar un estudio comparativo teórico-práctico del cálculo de los módulos elásticos del suelo mediante el método sísmico de ondas de superficie (MASW) y los métodos tradicionales de geotecnia, con el fin de determinar la conveniencia del método sísmico y así proporcionar una herramienta a los profesionales de la ingeniería civil que los ayude a tomar mejores decisiones en el momento de elegir los tipos de estudios que se deben efectuar en el suelo y subsuelo.

### **Específicos**

1. Determinar cuáles son las ventajas y desventajas de la utilización de los diferentes métodos desde el punto de vista técnico.
2. Realizar una comparación entre los resultados de los módulos elásticos del suelo obtenidos mediante los métodos SPT y MASW.
3. Realizar una comparación entre los resultados de los módulos elásticos del suelo obtenidos mediante los métodos triaxial y MASW.
4. Realizar una comparación entre los resultados de los módulos elásticos del suelo obtenidos mediante los métodos CBR y MASW.

5. Determinar las situaciones en particular para las que sea más adecuado cada uno de los métodos considerados, método de ondas de superficie y métodos tradicionales de geotecnia.

## INTRODUCCIÓN

El conocimiento de las propiedades geotécnicas del suelo, como los módulos elásticos, es esencial en la mayoría de proyectos de ingeniería civil, porque relaciona al comportamiento del suelo bajo cargas aplicadas y la respuesta sísmica del suelo. Los módulos elásticos pueden ser determinados mediante pruebas *in situ* o con pruebas de laboratorio. Anteriormente en Guatemala estos estudios se realizaban por medio de métodos tradicionales de geotecnia como: el ensayo de penetración estándar SPT, el ensayo de valor soporte california CBR y el ensayo de compresión triaxial. Pero desde hace unos cinco años aproximadamente se ha comenzado a implementar el cálculo de los módulos elásticos por medio del método geofísico de ondas de superficie o MASW, por sus siglas en inglés. Por tal razón se decidió realizar el presente trabajo con el fin de efectuar una comparación entre los métodos.

Para poder realizar este trabajo se realizó una investigación bibliográfica, con el objetivo de describir teóricamente los métodos y posteriormente se realizaron comparaciones de resultados reales de cada uno de los métodos para determinar cuáles son las variaciones de los mismos. Con este trabajo se desea determinar cuáles son las características y las principales diferencias en su ejecución y en los resultados obtenidos de cada uno de los métodos. Similarmente se espera obtener parámetros que permitan analizar la viabilidad y eficacia de los diferentes métodos. Todo lo anterior se realizará con el objetivo principal de dar a conocer el método geofísico de ondas de superficie para el cálculo de los módulos elásticos del suelo, sus características principales, ventajas y desventajas.



# 1. ANTECEDENTES

## 1.1. Caracterización de suelos arenosos mediante análisis de ondas de superficie. México 2007

Esta investigación fue realizada por el maestro en ciencias en el área de geotecnia Salvador Lazcano Díaz del Castillo, con la meta de realizar una caracterización de los suelos arenosos de Guadalajara, la costa de Jalisco y Nayarit, en México. En estos lugares se utilizó el método geofísico de ondas de superficie y también el método de ensayo de penetración estándar (SPT por sus siglas en inglés), con el objetivo de determinar las velocidades de onda de corte ( $V_s$ ) del suelo. A partir de esa información se caracterizó el comportamiento sísmico de los suelos y se estimaron magnitudes de asentamientos de zapatas.

Para la realización de esta investigación se utilizaron ocho puntos de análisis para la zona metropolitana de Guadalajara y cuatro puntos de análisis para la costa de Jalisco y Nayarit. Únicamente se realizó la estimación de asentamiento de zapatas para un punto de la zona metropolitana de Guadalajara: la catedral de Guadalajara.

- Resultados y conclusiones

Dentro de los resultados principales se encontró que para dos de los puntos estudiados existía riesgo de licuefacción según las velocidades de onda  $V_s$ , las cuales rondaban los 120 a 170 metros por segundo y el nivel freático se encontraba muy cercano.

El análisis de asentamiento de cimentación se realizó para la catedral de Guadalajara que está cimentada mediante una losa de mampostería, tiene una cota de cimentación de 4 metros y un área de 126 metros cuadrados. Para el cálculo del asentamiento fue necesario primero calcular el módulo de rigidez y el módulo de elasticidad, para cada uno de los estratos identificados. Una vez encontrados los módulos se encontró el asentamiento estimado mediante el método de Schmertmann, que dio como resultado un asentamiento de 6 centímetros.

A partir de los resultados se concluyó que la velocidad de onda de corte ( $V_s$ ) es un parámetro de gran utilidad para caracterizar suelos, debido a que con este valor se puede determinar directamente el módulo de rigidez al cortante para pequeñas deformaciones. De igual manera, se concluyó que los métodos de onda de superficie son una interesante alternativa para determinar ( $V_s$ ) de manera rápida y confiable.

Una de las conclusiones más importantes a las que se llegó en la realización de este trabajo fue determinar que una de las principales ventajas de los métodos de onda de superficie es que son pruebas no invasivas. Se puede evaluar la estructura natural de los suelos sin producir deformaciones en los mismos, contrariamente a lo que ocurre con las pruebas de penetración y la mayoría de las pruebas de campo.

## **1.2. Métodos geofísicos aplicados a la caracterización de suelos: estado del arte. Colombia 2011**

Este estudio fue realizado como trabajo de graduación para optar al título de ingeniero civil por parte del estudiante José David Jaimes Villamizar, de la Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia.

El trabajo se realizó con el objetivo principal de identificar y analizar los diferentes métodos geofísicos utilizados para la caracterización de suelos, para luego comparar los diferentes métodos entre si y contrastarlos con los métodos geotécnicos tradicionales desde un punto de vista teórico.

- Resultados y conclusiones

La principal conclusión a la que se llegó en la investigación fue determinar que la principal ventaja de la caracterización de suelos mediante métodos geofísicos sobre los métodos mecánicos es evitar la manipulación de suelos por medio de perforaciones o sondajes. Esto proporciona información sin alteraciones de las muestras. Adicionalmente, permite abarcar grandes extensiones de terreno haciéndolo un método viable que optimiza costos y tiempos.

### **1.3. Cálculo del valor portante del suelo mediante geofísica y métodos convencionales en el puente del río Maicito. Ecuador 2012**

Este estudio fue realizado por los ingenieros Héctor Naranjo Aguay y Tatiana Dranichinkov, por parte de la Universidad Politécnica Salesiana de Ecuador en diciembre de 2012, con el objetivo de realizar un análisis comparativo teórico y práctico del cálculo de la capacidad de soporte del suelo para el cálculo de la cimentación de un puente con base en un método geofísico y los métodos tradicionales de geotecnia. Se buscó deducir la conveniencia o no del método geofísico desde los puntos de vista técnico-prácticos y económicos. Los métodos convencionales de geotecnia utilizados en la realización de este trabajo fueron: el ensayo triaxial y el ensayo de penetración estándar (SPT).



- Resultados y conclusiones

Con base en la información topográfica y geológica-geotécnica obtenida en el ensayo geofísico se determinaron los parámetros para el diseño de las cimentaciones. Se analizaron dos alternativas de cimentación para el margen izquierdo del río y una únicamente para el margen derecho.

Para realizar el cálculo de la capacidad de soporte del suelo mediante el ensayo de penetración estándar (SPT) se utilizó la técnica basada en la ecuación propuesta por Bowles (1977). Se calculó una alternativa de cimentación superficial para el estribo izquierdo del puente y para el estribo derecho se calcularon dos, una superficial y otra profunda.

El último ensayo realizado fue el ensayo triaxial, que fue ejecutado únicamente en el margen derecho del río a una profundidad de 5 metros. El cálculo de la capacidad de soporte del suelo fue realizado mediante el método de Meyerhof (1963).

Los resultados obtenidos a partir de los tres ensayos fueron muy cercanos. Para una profundidad de 6,5 metros en el margen izquierdo del río, el ensayo geofísico arrojó una capacidad de soporte del suelo de 6,90 kg/cm<sup>2</sup> y el ensayo de penetración estándar dio como resultado 6,10 kg/cm<sup>2</sup>; para el margen derecho del río a una profundidad de 5 metros, el ensayo geofísico dio como resultado una capacidad de soporte del suelo de 2,4 kg/cm<sup>2</sup>, el ensayo de penetración estándar dio como resultado una capacidad de soporte de 2,18 kg/cm<sup>2</sup> y el ensayo triaxial dio como resultado una capacidad de soporte del suelo igual a 2,13 kg/cm<sup>2</sup>.

Al observar que los resultados no presentaban variaciones importantes se llegó a la conclusión de que el ensayo geofísico es aceptable, confiable y recomendable para los cálculos de capacidades de soporte para diferentes tipos de obras, debido a que no se presentaron variaciones significativas en los resultados. Además se presentan resultados de los terrenos *in situ* sin provocar ningún tipo de cambios de las características y propiedades del mismo.

Del análisis económico se obtuvo como resultado que para el ensayo geofísico el gasto fue de \$ 2 160,00, para el ensayo triaxial fue de \$ 2 205,00 y para el ensayo SPT el gasto fue de \$ 2 652,00. Por lo que se concluyó que resulta más económico y eficiente realizar pocos ensayos geofísicos complementados con ensayos geotécnicos que únicamente ensayos geotécnicos, debido a que se necesitarían muchos para tener una muestra significativa de un terreno.

#### **1.4. Uso de refracción sísmica y análisis multicanal de ondas superficiales para la determinación de módulos elásticos, en la finca Viento Blanco, San Vicente Pacaya. Guatemala 2015**

Esta investigación fue realizada por el estudiante Julio Nery Mendoza Santa María, al optar por el título de ingeniero geológico por parte de la Escuela de Geología del Centro Universitario del Norte de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

La investigación consistió en la aplicación de siete ensayos de refracción sísmica y siete de análisis multicanal de ondas de superficie (MASW), con el fin de estimar los módulos elásticos del subsuelo hasta una profundidad máxima de treinta metros, con la finalidad de determinar parámetros de soporte para la edificación de torres de aeroturbinas generadoras de energía eólica

- Resultados y conclusiones

Para la estimación de los módulos elásticos del suelo se realizó una estratigrafía de tres capas para cada sitio de estudio, por medio del comportamiento y tiempo de viaje de ondas en el subsuelo. Para cada capa del subsuelo se calcularon los módulos elásticos en los siete puntos de estudio. El estudio dio como resultado que los módulos elásticos estimados caracterizaban suelos compactos y arenosos, adecuados para la edificación y cimentación de torres. A partir de los resultados obtenidos se concluyó que los ensayos geofísicos permiten caracterizar las propiedades elásticas dinámicas del suelo con valores variables a diferentes profundidades. De igual manera se llegó a la conclusión de que la aplicación de los ensayos geofísicos en la determinación de módulos elásticos a través del comportamiento y viaje de las ondas sísmicas en el subsuelo es muy recomendable, debido a que, además de su bajo costo, son eficientes, eficaces y proporcionan resultados de alta confiabilidad.

## 2. MÓDULOS ELÁSTICOS DEL SUELO

Los módulos elásticos representan las características propias de los materiales que conforman el subsuelo. Estos parámetros constituyen una representación de la respuesta elástica de dichos materiales a esfuerzos provocados por cargas aplicadas o por sismos en su condición natural estable.

### 2.1. Módulo de elasticidad

El módulo de elasticidad ( $E$ ), también conocido como el módulo de *Young*, es la relación que existe entre un esfuerzo axial y la deformación unitaria que presenta un material sometido a este esfuerzo dentro del rango elástico de la curva esfuerzo-deformación, es decir hasta el límite elástico del material. El módulo de *Young* es una constante de proporcionalidad elástica intrínseca de todos los materiales y es una medida de la capacidad de deformarse del material. Si se tienen dos materiales A y B, A es más dúctil que B si se deforma elásticamente más que B al aplicarles a ambos la misma fuerza. El módulo de elasticidad está representado por la siguiente ecuación:

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} \quad (2.1)$$

Donde:  $E$  = Módulo de elasticidad

$\sigma$  = Esfuerzo axial

$\epsilon$  = Deformación unitaria

## 2.2. Módulo de *Poisson*

En todos los materiales de ingeniería, la deformación axial que se produce por la aplicación de una fuerza se acompaña de una deformación en el sentido transversal, cuya dirección depende del sentido de la aplicación de la fuerza axial. Cuando la fuerza axial a la que está sometido el material es de compresión, en el sentido axial se experimentará una contracción, mientras que en el sentido transversal existirá una expansión del material, en cambio, si la fuerza axial es de tensión en el sentido axial se experimentará una expansión y en el sentido transversal habrá una contracción.

El módulo de *Poisson* ( $\nu$ ) es la relación que existe entre la deformación transversal y la deformación axial y está representado por la siguiente ecuación:

$$\nu = -\frac{\epsilon_y}{\epsilon_x} \quad (2.2)$$

Donde:  $\nu$  = Módulo de *Poisson*  
 $\epsilon_y$  = Deformación unitaria transversal  
 $\epsilon_x$  = Deformación unitaria axial

## 2.3. Módulo de corte

El módulo de corte (G) o módulo de rigidez es una constante de elasticidad que indica la relación que existe entre un esfuerzo tangencial cortante y la deformación angular unitaria formada por las caras bajo el esfuerzo dentro del rango elástico del material. El módulo de rigidez mide la facilidad o dificultad que se presenta para deformar por corte un material determinado. Un material con un módulo de corte bajo es un material fácil de

deformar por esfuerzos cortantes. El módulo de corte de cualquier material dado es menos de la mitad pero más de la tercera parte del módulo de elasticidad de ese material. Las ecuaciones matemáticas que representan al módulo de corte son las siguientes:

$$G = \frac{\tau}{\gamma} \quad (2.3)$$

Donde:  $G$  = Módulo de corte  
 $\tau$  = Esfuerzo cortante  
 $\gamma$  = Deformación unitaria angular

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)} \quad (2.4)$$

Donde:  $G$  = Módulo de corte  
 $E$  = Módulo de elasticidad  
 $\nu$  = Módulo de *Poisson*

#### **2.4. Módulo de compresibilidad**

El módulo de compresibilidad ( $K$ ), también conocido como el módulo de Bulk, es la relación entre una presión hidrostática aplicada a un material y el cambio de volumen presentado por el material. Este módulo indica la resistencia de un material al cambio de su volumen cuando le son aplicadas cargas distribuidas en todas las caras o lados del material.

El módulo de compresibilidad ( $K$ ) está representado por las siguientes ecuaciones:

$$K = -\frac{p}{e} \quad (2.5)$$

Donde:  $K$  = Módulo de compresibilidad  
 $p$  = Presión  
 $e$  = Cambio de volumen unitario

$$K = \frac{E}{3(1 - 2\nu)} \quad (2.6)$$

Donde:  $K$  = Módulo de compresibilidad  
 $E$  = Módulo de elasticidad  
 $\nu$  = Módulo de *Poisson*

Tabla I. **Parámetros elásticos para varios tipos de suelo**

Tipo de suelo	Módulo de elasticidad $E$ (MN/m <sup>2</sup> )	Coefficiente de <i>Poisson</i> $\mu$	Módulo de corte $G$ (MN/m <sup>2</sup> )	Módulo de compresibilidad $K$ (MN/m <sup>2</sup> )
Arena suelta	10 - 25	0,20 - 0,40	4,20 - 9,00	5,60 - 41,80
Arena semi-densa	15 - 30	0,25 - 0,40	6,00 - 10,80	10,00 - 50,00
Arena densa	35 - 55	0,30 - 0,45	13,50 - 19,00	30,00 - 183,40
Arena limosa	10 - 20	0,20 - 0,45	4,20 - 6,90	5,60 - 66,70
Arena y grava	70 - 170	0,15 - 0,35	30,50 - 63,00	33,40 - 188,90
Arcilla blanda	4 - 20			
Arcilla media	20 - 40	0,20 - 0,50	8,40 - 13,40	11,20 - 660,00
Arcilla dura	40 - 100			
Limo	2 - 20	0,30 - 0,35	0,70 - 7,40	1,67 - 22,22

Fuente: elaboración propia, con base en: BRAJA M., Das. *Fundamentos de ingeniería geotécnica*; BOWLES, Joseph. *Foundation analysis and design*. Consulta: 2018.

## 2.5. Aplicaciones de los módulos elásticos del suelo en la ingeniería civil

Los módulos elásticos del suelo son útiles para una variedad de aplicaciones dentro de la ingeniería civil, especialmente en el área de geotecnia. Las principales aplicaciones de los módulos elásticos son el cálculo de asentamientos y deformaciones en el suelo y la determinación de la compresibilidad del suelo. Estos dos parámetros son de gran importancia para el diseño de cimentaciones superficiales y cimentaciones profundas de estabilidad de taludes, diseño de estructuras de contención, selección de rasantes, bases y sub-bases de carreteras.

### 2.5.1. Cálculo de asentamientos y deformaciones

En el diseño de cimentaciones los módulos elásticos son utilizados para la determinación de los asentamientos elásticos en el suelo provocados por las cargas actuantes. El asentamiento elástico es causado por la deformación elástica del suelo y sucede justo en el momento en el que una carga se aplica al suelo sin cambiar de humedad. La magnitud de este asentamiento dependerá de la flexibilidad de la cimentación y del tipo de suelo que soporta a la misma. Este cálculo es de suma importancia, ya que antes que una cimentación falle por corte del suelo esta puede presentar un asentamiento lo suficientemente grande para causar daño a una estructura y hacerla disfuncional para el fin para el que estaba diseñada. Este cálculo se realiza por medio del módulo de *Young* y el módulo de *Poisson* mediante la siguiente ecuación:

$$S_e = q_0(\alpha B') \frac{1 - \nu_s^2}{E_s} I_s I_f \quad [mm] \quad (2.7)^1$$

---

<sup>1</sup> BRAJA M., Das. *Fundamentos de ingeniería geotécnica*. 4ta edición. P. 246.



Donde:

- $S_e$  = Asentamiento
- $q_0$  = Presión neta aplicada a la cimentación [N/m<sup>2</sup>]
- $\nu_s$  = Módulo de *Poisson* del suelo
- $E_s$  = Módulo de *Young* promedio debajo de la cimentación [N/m<sup>2</sup>]
- $B'$  = Base/2 para el centro y base para la esquina [m]
- $I_s$  = Factor de forma (Steinbrenner 1948)
- $I_f$  = Factor de profundidad (Fox 1948)
- $\alpha$  = 4 si el cálculo es al centro de la zapata y 1 si es en la esquina

### 2.5.2. Cálculo de compresibilidad del suelo

La compresibilidad es una propiedad de los materiales que permite que los mismos disminuyan su volumen al someterlos a una presión o carga determinada. Las gravas y las arenas son prácticamente incompresibles, ya que aunque se comprima una masa húmeda de estos materiales no se produce ningún cambio significativo en sus volúmenes. Las arcillas y los limos son altamente compresibles, si se comprime una masa húmeda de estos materiales la humedad y el aire son expulsados, lo que trae como resultado una reducción de volumen que no se recupera inmediatamente después de eliminar la carga.

Esta compresibilidad del suelo afecta de gran manera a las cimentaciones, por lo que Vesic, en 1973, propuso la modificación de la ecuación de capacidad de carga de Meyerhof agregando los factores de compresibilidad  $F_{cc}$ ,  $F_{qc}$ ,  $F_{\gamma c}$ .

Un suelo no es compresible cuando el índice de rigidez es mayor al índice de rigidez crítico. Si el índice de rigidez es menor al crítico se deben hacer correcciones a la ecuación general de capacidad de carga mediante los factores de compresibilidad  $F_{cc}$ ,  $F_{qc}$ ,  $F_{\gamma c}$ .

La ecuación que representa el índice de rigidez es la siguiente:

$$I_r = \frac{G_s}{c' + q' \tan \phi} \quad (2.8)^2$$

Donde:  $I_r$  = Índice de rigidez  
 $G_s$  = Módulo de corte del suelo  
 $c'$  = Cohesión  
 $q'$  = Presión efectiva  
 $\phi$  = Ángulo de fricción interna

### 2.5.3. Cálculo de coeficiente del módulo de rasante o balasto

El coeficiente del módulo de rasante es la relación que existe entre la presión ejercida sobre el suelo y la deformación que esta provoca. Este coeficiente es ampliamente utilizado en el análisis y diseño estructural de cimentaciones como: zapatas continuas, losas de cimentación y varios tipos de pilotes. El coeficiente del módulo de rasante puede ser descrito por las siguientes ecuaciones:

$$k = 0,65 \sqrt[12]{\frac{E_s B^4}{E_F I_F}} \frac{E_s}{B(1 - \mu^2)} \quad (2.9)^3$$

O en su forma más simplificada como:

$$k = \frac{E_s}{B(1 - \mu^2)} \quad (2.10)$$

<sup>2</sup> BRAJA M., Das. *Fundamentos de ingeniería de cimentaciones*. 7ma edición. P. 153

<sup>3</sup> BOWLES, Joseph. *Foundation analysis and design*. 5ta edición. P. 503

Donde:  $E_s$  = módulo de elasticidad del suelo  
B = ancho de la cimentación  
 $E_F$  = módulo de elasticidad del material de la cimentación  
 $I_F$  = momento de inercia de la sección transversal de la  
          cimentación  
 $\mu$  = módulo de *Poisson* del suelo

### 3. MÉTODOS TRADICIONALES DE GEOTECNIA PARA EL CÁLCULO DE LOS MÓDULOS ELÁSTICOS DEL SUELO

#### 3.1. Ensayo de penetración estándar (SPT)

##### 3.1.1. Descripción general del método

El ensayo de penetración estándar o por sus siglas en inglés SPT (Standard Penetration Test), es un método de prueba *in situ* usado para determinar propiedades geotécnicas del suelo tales como: capacidad de soporte, módulos elásticos, densidad relativa y estimación de asentamientos. A continuación se presenta una tabla con las aplicaciones del ensayo:

Tabla II. Aplicaciones del ensayo SPT según su factibilidad

Aplicación	Factibilidad
Tipo de suelo	Moderada
Perfil estratigráfico	Moderada
Densidad relativa	Moderada
Angulo de fricción	Limitada
Resistencia al corte	Limitada
Módulos elásticos	Limitada
Compresibilidad	Limitada
Resistencia a la licuefacción	Alta

Fuente: NARANJA, Héctor; DRANICHNIKOV, Tatiana. *Cálculo de capacidad portante basado en geofísica y método convencional*. P. 63

La metodología del ensayo se basa en la penetración dinámica de un elemento llamado cuchara o toma muestras que extrae muestras alteradas representativas del suelo en estudio. El ensayo consiste en hincar un toma

muestras colocado al extremo de una varilla de acero macizo que se utiliza para transmitir la energía provocada por el impacto de un martillo al ser dejado caer libremente desde una altura determinada. Se cuenta el número de golpes (N) necesarios para hincar la cuchara 15 centímetros y seguidamente se contabiliza los golpes necesarios para hincar la cuchara 30 centímetros ( $N_{15-30}$ ). Seguidamente se contabiliza los golpes necesarios para llegar a una profundidad de 45 centímetros ( $N_{30-45}$ ) a partir de la superficie en un intervalo de 15 centímetros.

El resultado del ensayo es el golpeo SPT o resistencia a la penetración estándar:

$$N_{SPT} = N_{15-30} + N_{30-45} \quad (3.1)$$

Donde:  $N_{SPT}$ : Resistencia a la penetración estándar

$N_{15-30}$ : Número de golpes para hincar el toma muestras de 15 a 30 cm.

$N_{30-45}$ : Número de golpes para hincar el toma muestras de 30 a 45 cm.

El conteo para los primeros 15 centímetros es tomado para propósitos de referencia, pero no es usado para el cálculo de N debido a que el suelo podría estar alterado por efectos del proceso utilizado durante la ejecución del sondeo, originando suelo suelto en la superficie. Si el número de golpes requerido para profundizar en cualquiera de las fases del ensayo supera los 50, el resultado del ensayo no es válido y se convierte en un rechazo.

En algunos casos el valor de  $N_{SPT}$  debe ser corregido debido a factores que pueden afectar a la prueba como:

- El uso de equipo de diferentes fabricantes.
- El tipo de martillo utilizado.
- El sistema de caída del martillo, ya sea automático por medio de una máquina o motor o ya sea manual.
- Diámetro del toma muestras.
- Presión de sobrecarga.
- La profundidad del ensayo.

Los factores de corrección más utilizados son:  $N_{60}$ ,  $N_{55}$  y  $N_{70}$

$$N_{60} = N_{spt} * C_N * n_1 * n_2 * n_3 * n_4 \quad (3.2)$$

Donde:  $N_{60}$  = Número de golpes corregidos

$N_{spt}$  = Número de golpes contabilizados según la ecuación 3.1

$$C_N = \sqrt{\frac{95,76 \text{ KPa}}{\text{Presión KPa}}}$$

$$n_1 = \frac{\text{Energía promedio del martillo}}{60 \text{ (energía estandarizada)}}$$

Tabla III. **Corrección por martillo**

Energía promedio para el martillo	
Mecanismo manual	Mecanismo automático
70 – 80	80 - 100

Fuente: BOWLES, Joseph. *Foundation analysis and design*. P. 159

$n_2$  = Corrección por profundidad.

Tabla IV. **Corrección por profundidad**

Profundidad (m)	$n_2$
>10	1,00
6-10	0,95
4-6	0,85
0-4	0,75

Fuente: BOWLES, Joseph. *Foundation analysis and design*. P. 159

$n_3$  = Factor por diámetro de la perforación.

Tabla V. **Corrección de diámetro de perforación**

Diámetro (mm)	$n_3$
60-120	1,00
150	1,05
200	1,15

Fuente: BOWLES, Joseph. *Foundation analysis and design*. P. 159.

$n_4$  = Factor del diámetro interno del toma muestras.

Tabla VI. **Corrección del diámetro del toma muestra**

Condición	$n_4$
Toma muestras sin guía	1,00
Toma muestra con guía en arena densa	0,80
Toma muestra con guía en arena suelta	0,90

Fuente: BOWLES, Joseph. *Foundation analysis and design*. P. 159.

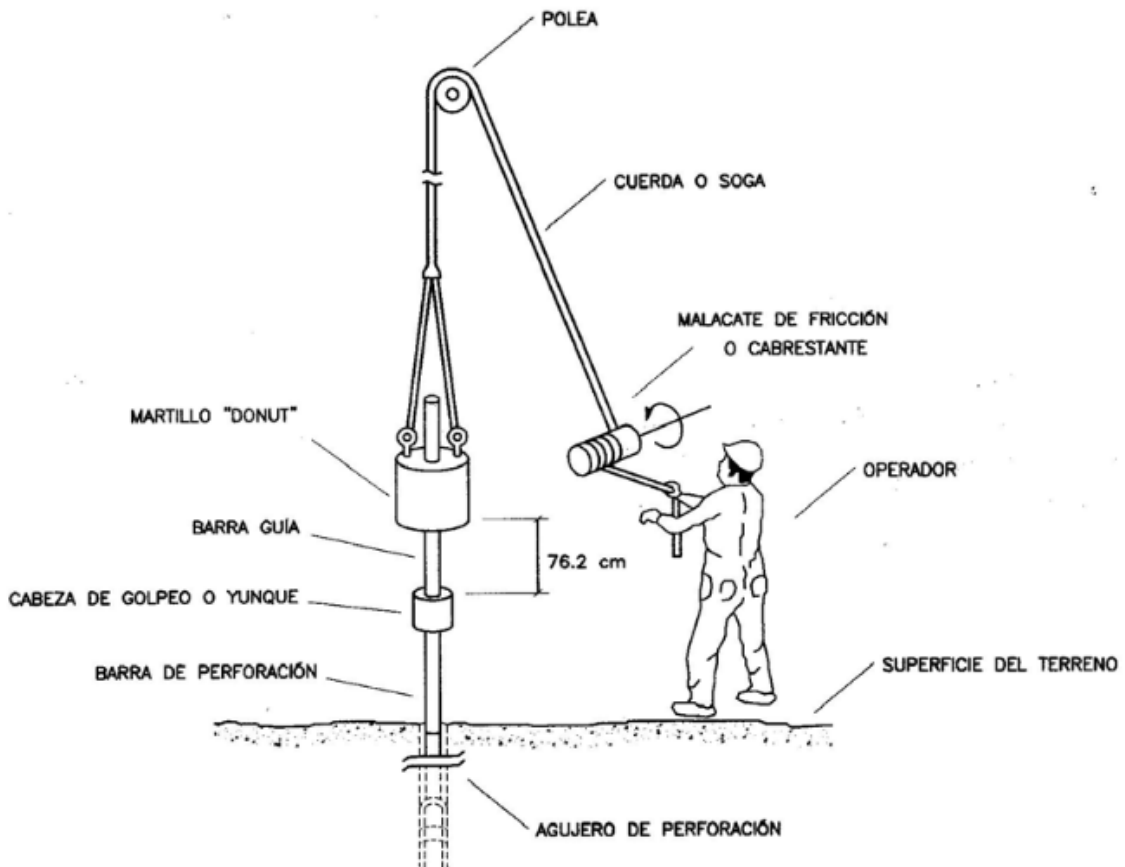
Para encontrar las demás correcciones basta con emplear la siguiente ecuación:

$$N_n = \frac{m}{n} * N_m \quad (3.3)$$

Donde:  $N_n$  = Número de golpes de la corrección que se desea conocer.  
 $n$  = Número correspondiente al subíndice de la corrección que se desea conocer.  
 $m$  = Número correspondiente al subíndice de la corrección que sí se conoce.  
 $N_m$  = Número de golpes según la corrección conocida.

Debido a la sencillez del ensayo este es el método más económico y tradicional más utilizado para la exploración de suelos.

Figura 1. **Mecanismo de golpeo para ensayo SPT**



Fuente: NIJ, Jéser. *Guía práctica para el cálculo de capacidad de carga en cimentaciones superficiales, losas de cimentación, pilotes y pilas perforadas*. Figura 18. Consulta: 2018.

### 3.1.2. Normalización del método, ASTM D1586

Esta norma lleva por nombre método estándar de ensayo de penetración y muestreo de suelos con toma muestras hendido longitudinalmente. La norma fue emitida por ASTM en el año 2011. Los elementos y las características más importantes de la norma son los siguientes:



- El martillo o masa de impacto debe poseer una masa de 63,5 kg.
- La altura de caída de la masa debe ser de 76 cm.
- El toma muestras debe poseer un diámetro externo de 50 mm.
- El toma muestras debe poseer un diámetro interno de 35 mm.
- El ensayo debe realizarse con barras de sondeo.
- Debe existir una cabeza de golpeo para transmitir la energía del martillo a las barras de sondeo.
- Se considera rechazada la prueba si se excede de 50 golpes en cualquiera de las fases del ensayo.
- Se considera rechazada la prueba si se han acumulado 100 golpes en toda la prueba.
- Se considera rechazada la prueba si no se observa ningún avance del toma muestras durante la aplicación de 10 golpes consecutivos.

### 3.1.3. Cálculo de módulos elásticos

Este método se limita al cálculo del módulo de elasticidad (E) en terrenos granulares. Para la determinación de los demás módulos es necesario hacer uso de los valores mostrados en la tabla I según el tipo de suelo, para luego usar las ecuaciones descritas en el capítulo 2. En el libro de *Foundation analysis and design* se menciona que se debe utilizar el valor de  $N_{55}$  para calcular el valor del módulo elasticidad.

Las relaciones entre  $N_{spt}$  y (E) pueden expresarse de forma general por medio de la ecuación empírica de Denver (1982):

$$E = S_1 N_{spt} + S_2 \quad [MPa] \quad (3.4)$$

Donde:  $E$  = módulo de elasticidad  
 $N_{spt}$  = resistencia a la penetración estándar  
 $S_1$  y  $S_2$  son coeficientes que dependen del tipo de suelo, los cuales están representados en la siguiente tabla:

Tabla VII. Valores de  $S_1$  y  $S_2$

$S_1$ [MPa]	$S_2$ [MPa]	Descripción
0,756	10,75	Arena normalmente consolidada
1,043	36,79	Arena pre-consolidada
0,478	7,17	Arena saturada
0,316	1,58	Arcilla arenosa

Fuente: NARANJO, Héctor; DRANICHNIKOV, Tatiana. *Cálculo de capacidad portante basado en geofísica y método convencional*. P. 70.

Denver (1982) también propuso otra relación para determinar el módulo de Young ( $E$ ) para arenas normalmente consolidadas, la cual está descrita por la siguiente ecuación:

$$E = 0,7\sqrt{N_{spt}} \quad [MPa] \quad (3.5)$$

Donde:  $E$  = módulo de Young  
 $N_{spt}$  = Resistencia a la penetración estándar.

Para capas superficiales de arena, en el libro de *Foundation analysis and design*, Bowles propone la siguiente ecuación para la determinación del módulo de elasticidad:

$$E = 0,5N_{spt} + 7,5 \quad [MPa] \quad (3.6)$$

Donde:  $E$  = módulo de Young

$N_{spt}$  = resistencia a la penetración estándar

## 3.2. Ensayo triaxial

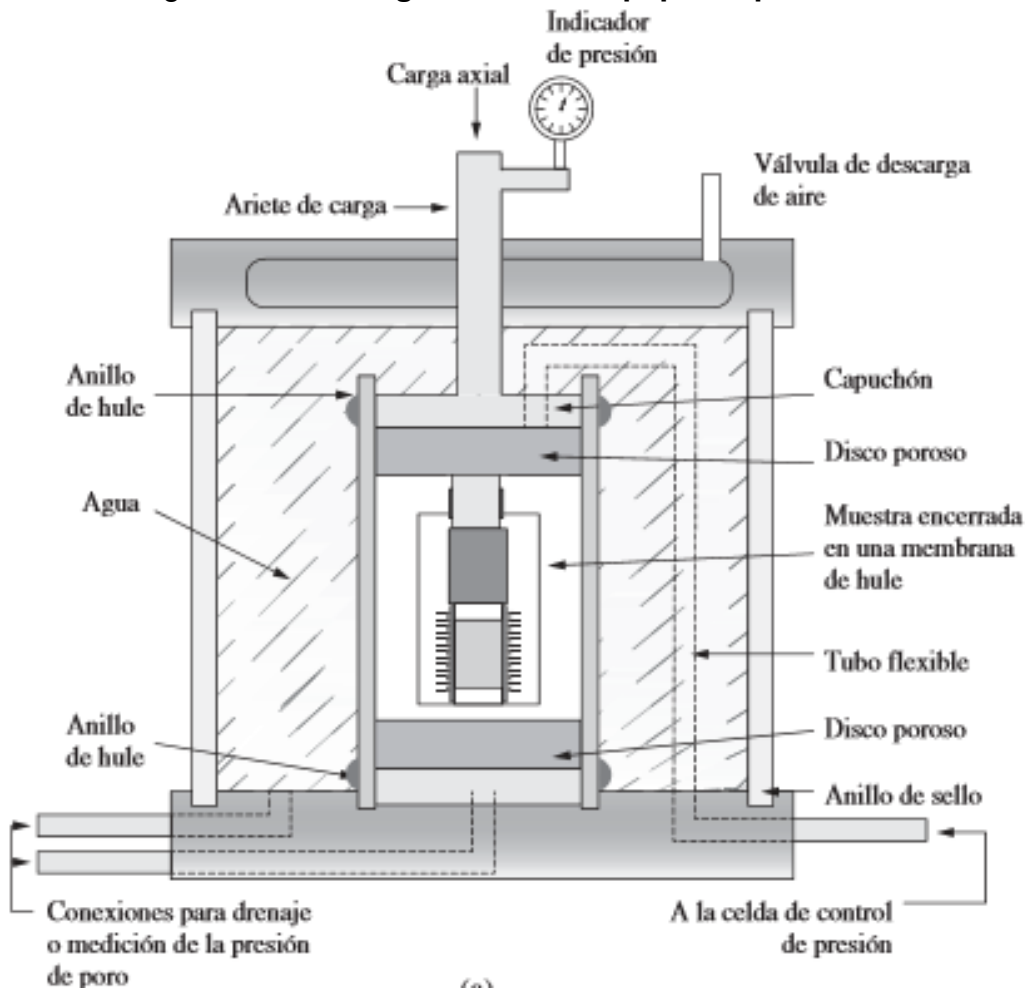
### 3.2.1. Descripción general del método

El ensayo triaxial de corte es el método convencional más común y confiable en el estudio de las propiedades esfuerzo-deformación de los suelos. Esta prueba consiste en colocar una muestra inalterada cilíndrica de suelo dentro de una membrana impermeable que se introduce a una cámara cuyas bases son cabezas sólidas provistas de piedras porosas que sirven de filtro. En la cámara se aplica presión igual en los tres ejes del cilindro. En el eje axial del cilindro la carga ( $\sigma_1$ ) se aplica por medio de una prensa hidráulica, la cual va generando deformación axial a una velocidad constante. La carga axial aplicada por el pistón de carga corresponde a una deformación axial dada que se mide por medio de un anillo de prueba o célula de carga unida al pistón. En los ejes laterales del cilindro, la carga ( $\sigma_3$ ) es aplicada por medio de agua o glicerina mediante la compresión del fluido usando aire.

Cuando las presiones han alcanzado un estado de equilibrio, se aumenta la presión axial o esfuerzo desviador ( $\sigma_1$ ) sin modificar la presión lateral aplicada o presión de confinamiento ( $\sigma_3$ ), hasta que se produzca la falla. Se realizan por los menos tres pruebas con presiones laterales diferentes ( $\sigma_3$ ). Posteriormente en un gráfico se dibujan los círculos de Mohr que representan los esfuerzos de falla de cada muestra.

Dependiendo del tipo de suelo y las condiciones en que se trabajará, existen alternativas para realizar el ensayo:

Figura 2. Diagrama de un equipo de prueba triaxial



Fuente: BRAJA, M. Das. *Fundamentos de ingeniería geotécnica*. Cuarta edición. Figura 10. Consulta: 2018.

- Ensayo no consolidado – no drenado (UU): también conocido como ensayo rápido. En este ensayo se aplica una presión hidrostática al espécimen que actúa sobre la membrana impermeable. Las válvulas de drenaje se cierran antes de aplicar la presión al agua y permanecen cerradas cuando se comienza a aplicar carga axial a la muestra hasta que se presenta la falla. Esta generalmente se presenta a lo largo de un plano inclinado. Un micrómetro marca las deformaciones longitudinales del espécimen.

- Ensayo consolidado-drenado (CD): también conocido como ensayo lento. Esta prueba triaxial permite la consolidación completa del suelo bajo la presión hidrostática con la válvula de drenaje abierta al aplicar la carga axial sobre la muestra. La aplicación de la carga axial se realiza en incrementos pequeños efectuados a intervalos de tiempo suficientemente largos para que la presión de poro generada por el incremento anterior se disipe de manera completa antes de aplicar el siguiente. Bajo las condiciones anteriores puede asegurarse que los esfuerzos aplicados a la muestra son siempre esfuerzos efectivos o intergranulares. Debido a esto la presión de poro puede considerarse nula durante todo el proceso.
- Ensayo consolidado-no drenado (CU): en este ensayo el primer paso es consolidar la muestra bajo la presión hidrostática para que el esfuerzo principal menor llegue a ser efectivo. Luego la muestra es llevada a la falla por un rápido incremento de la carga axial de manera que no se permita el cambio de volúmenes. La clave principal de esta prueba es no permitir ninguna consolidación adicional durante el período de falla. La carga axial para este tipo de ensayo se aplica con la llave de la válvula de drenaje cerrada.

### **3.2.2. Normalización del método**

Los ensayos de compresión triaxial están normados por las normas ASTM D4767 y D2850. La norma ASTM D4767 trata acerca del método estándar de la prueba de compresión triaxial consolidada de no drenado (CU) para suelos cohesivos, y la norma ASTM D2850 trata el método estándar de compresión triaxial no consolidada y no drenada para suelos cohesivos. Ambas normas exigen los mismos requisitos en cuanto al equipo de ensayo y el espécimen de prueba. Difieren únicamente en el procedimiento de ensayo.

Como se explicó en el capítulo anterior, para el ensayo (CU) es necesario consolidar la muestra primero antes de aplicar la carga axial.

El equipo de ensayo requerido es el siguiente:

- Dispositivo de carga axial
- Dispositivo de medición de carga axial
- Dispositivo de mantenimiento y medición de la presión
- Celda de compresión triaxial: esta debe ser cilíndrica, encerrada por una membrana sellada en la tapa y en la base del espécimen.
- Indicador de deformación: el indicador de deformación deberá ser un dial indicador graduado a 0,001 pulgadas.
- Membrana de caucho: la membrana de caucho utilizada para encerrar el espécimen deberá proveer una protección confiable contra fugas.
- Cronometro: un dispositivo de regulación de tiempo indicando el tiempo de prueba transcurrido con aproximación a un segundo.

Especímen de prueba:

- Tamaño de espécimen: los especímenes deberán tener un diámetro mínimo de 1,3 pulgadas o 3,30 centímetros y la partícula más grande contenida dentro del espécimen deberá ser menor que un décimo del diámetro del espécimen.

Tipo de espécimen:

- Especímenes inalterados
- Especímenes remodelados

- Especímenes compactados

### 3.2.3. Cálculo de los módulos elásticos

Mediante este método es posible encontrar los cuatro módulos elásticos mencionados en este trabajo de graduación y los procedimientos se describen a continuación:

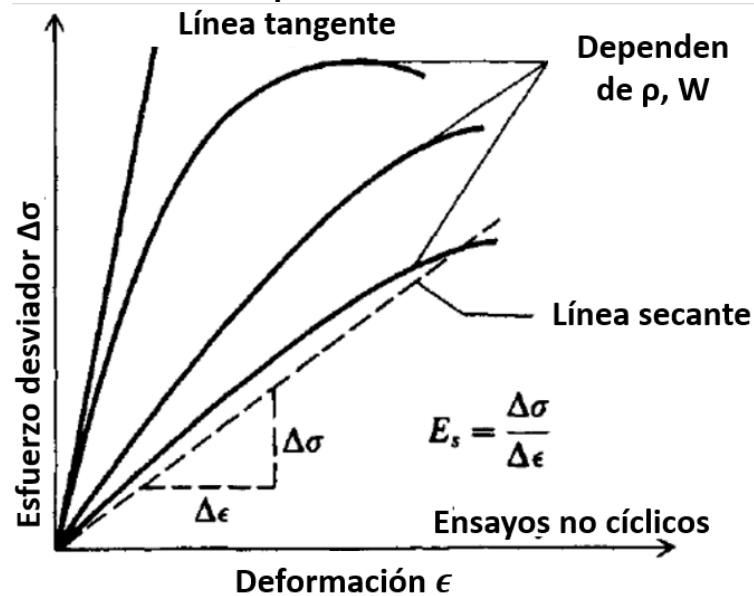
- Módulo de elasticidad (E)

Para realizar el cálculo del módulo de elasticidad es necesario medir las deformaciones axiales que presenta la probeta durante el ensayo, junto con las cargas correspondientes a cada deformación. Esto con el fin de realizar la curva esfuerzo-deformación y determinar la pendiente de la recta secante o tangente a la curva. Se utilizan rectas secantes o tangentes debido a que la curva esfuerzo-deformación producida por un ensayo triaxial no es lineal.

- Módulo de *Poisson* ( $\nu$ )

Para encontrar el módulo de *Poisson* es necesario medir las dimensiones de la probeta en sentido longitudinal y transversal antes y después del ensayo. A partir de estos datos se puede determinar la relación entre la deformación axial y la deformación transversal sufrida por la probeta y con esto el módulo de *Poisson*.

Figura 3. **Curvas esfuerzo-deformación producidas en diferentes pruebas triaxiales**



Fuente: BOWLES, Joseph. *Foundation analysis and design*. 5ta ed. McGraw-Hill 1997. P.122

- Módulo de corte (G)

Para encontrar el módulo de corte es necesario conocer el módulo de elasticidad y el módulo de *Poisson* y aplicar la ecuación 2.4 descrita en el inciso 2.3.

- Módulo de compresibilidad (K)

De igual manera que para el módulo de corte, para determinar el módulo de compresibilidad es necesario conocer los módulos de elasticidad y de *Poisson* y aplicar la ecuación 2.6 descrita en el inciso 2.4, o bien se puede obtener midiendo el cambio de volumen que sufrió la probeta y aplicar la ecuación 2.5.



### **3.3. Valor soporte california CBR**

#### **3.3.1. Descripción general del método**

El ensayo CBR (California Bearing Ratio) por sus siglas en inglés, mide la resistencia al corte de un suelo bajo condiciones de humedad y densidad controladas. El ensayo determina la capacidad de soporte de suelos y agregados compactados en laboratorio. Este permite obtener un porcentaje de la relación de soporte. Sin embargo, este porcentaje no es constante para un suelo específico si no que varía según las condiciones de humedad y densidad que el suelo posea durante el ensayo.

El porcentaje obtenido es “%CBR” que se define como la fuerza requerida para que un pistón normalizado de tres pulgadas cuadradas penetre a una profundidad determinada una muestra compactada de suelo a un contenido de humedad y densidad dadas con respecto a la fuerza necesaria para que el pistón penetre a esa misma profundidad y con igual velocidad una probeta con una muestra estándar de material. El ensayo fue desarrollado por la división de carreteras de California, con el propósito de clasificar y evaluar la capacidad de un suelo para ser utilizado como sub-base o material de base en la construcción de carreteras.

El ensayo CBR consiste en penetrar de tres a cinco muestras de suelo previamente compactadas y saturadas en cilindros normados por medio de un pistón metálico hasta lograr una penetración de 0,3 pulgadas con una velocidad constante de 0,05 pulgadas por minuto. Cabe mencionar que la compactación de las muestras debe realizarse con base en la humedad óptima del suelo, la cual debe ser obtenida mediante la prueba de compactación Proctor y cada muestra debe ser compactada con diferentes porcentajes de compactación

entre los rangos de 90 % y 100 % de la compactación óptima. Durante la penetración de la muestra en ensayo se deben anotar las cargas correspondientes a 0,025, 0,05, 0,075, 0,100, 0,150, 0,200, 0,300 pulgadas de penetración. Para calcular el % CBR normalmente se utilizan los valores de carga correspondientes a 0,100 y 0,200 pulgadas de penetración.

Para el cálculo del %CBR se aplica la siguiente formula:

$$\%CBR = \frac{\text{Resistencia de penetración en suelo ensayado}}{\text{Resistencia patron de penetración}} * 100 \quad (3.7)$$

Los valores estándar de resistencia patrón de acuerdo a su penetración son:

Tabla VIII. **Resistencia patrón CBR**

Penetración		Resistencia	
Pulgadas	mm.	PSI	Kg/cm <sup>2</sup>
0,1	2,54	1 000	70
0,2	5,08	1 500	105
0,3	7,62	1 900	133
0,4	10,16	2 300	161
0,5	12,70	2 600	182

Fuente: RAMOS, Lorenzo. *Diseño de pavimento de adoquín y línea de conducción de agua potable para el cantón la caridad, San Vicente Pacaya*. Consulta: 2018.

### 3.3.2. Normalización del método ASTM D1883-07

La norma lleva por nombre método estándar de ensayo CBR de laboratorio para suelos compactados y establece los siguientes lineamientos para realizar el ensayo:

- La prensa de ensayo debe tener una capacidad mínima de 10 000 libras equipada con una base movable a razón de 0,05 pulgadas por minuto.
- La máquina de ensayo debe estar equipada con indicadores de carga, legibles cada 10 libras.
- El pistón de penetración metálico debe tener 1,92 pulgadas de diámetro y no menos de 4 pulgadas de longitud.
- Se debe contar con un micrómetro de reloj con sensibilidad legible 0,001 pulgadas para medir la penetración.
- Los cilindros en los cuales se encuentra la muestra deben ser metálicos con diámetro interno de  $6 \pm 0,03$  pulgadas y con una altura de  $7 \pm 0,004$  pulgadas, provistos de collar de extensión de 2 pulgadas de altura y una plancha de base perforada de  $3/8$  pulgada de espesor.
- Se debe contar con discos separadores de  $5-15/16$  pulgadas de diámetro y 2,416 pulgadas de espesor.
- Cada cilindro debe poseer en el momento de la saturación un aparato medidor de expansión, compuesto por una placa metálica provista de un vástago ajustable de metal con perforación de diámetro menor o igual a 1,6mm y un trípode metálico para sujetar el micrómetro de reloj para medir el hinchamiento.
- Anillos de peso, una metálica anular y varias metálicas ranuradas de 5 libras.
- Un martillo de compactación de 10 libras de peso con guía para 18 pulgadas de caída.

### **3.3.3. Cálculo de los módulos elásticos**

Este método, al igual que el SPT, se limita únicamente al cálculo del módulo de elasticidad. Sin embargo, los demás módulos se pueden calcular de forma indirecta como se describió anteriormente en el método de SPT. El cálculo del módulo de elasticidad (E) por medio del ensayo CBR se realiza de la misma manera que en el ensayo triaxial, es decir realizando la curva esfuerzo-deformación y midiendo la pendiente de la recta secante trazada a la curva.



## 4. MÉTODO GEOFÍSICO DE ONDAS DE SUPERFICIE PARA EL CÁLCULO DE LOS MÓDULOS ELÁSTICOS DEL SUELO

### 4.1. Descripción del método

El análisis multicanal de ondas de superficie, o MASW por sus siglas en inglés (Multichannel Analysis of Surface Waves), es una técnica de exploración sísmica no destructiva introducida a la geofísica por el Dr. Choon Park en 1999. Este método se utiliza particularmente en estudios de geotecnia para determinar la profundidad de la roca dura y para establecer la interface entre los estratos con diferentes propiedades físicas.

El método evalúa la condición elástica del suelo mediante la medición de la diferencia de velocidad de propagación de las ondas sísmicas a través de los diferentes estratos del suelo. Mediante medios artificiales se realizan perturbaciones en el suelo para originar diferentes tipos de onda: las ondas de compresión o longitudinales, las ondas de corte o transversales y las ondas *Rayleigh* de superficie, que son de interés fundamental en la ejecución del método.

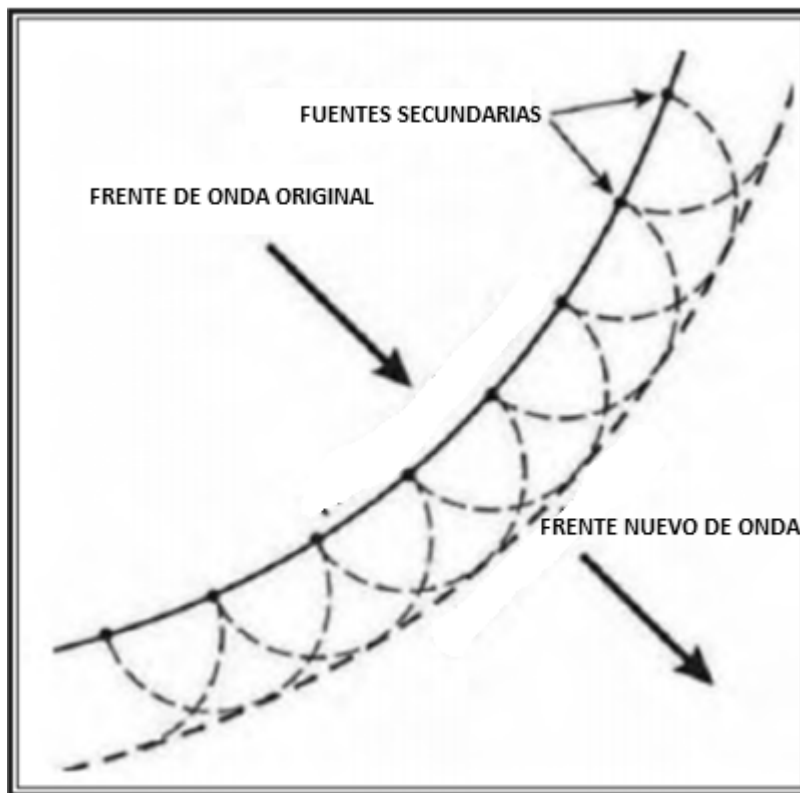
El método MASW se basa en las teorías físicas de propagación de rayos de luz que se enmarcan en el principio de Fermat, el principio de *Huygens* y la ley de *Snell*.

- Principio de Fermat: establece que un rayo luminoso que va de un punto A a un punto B sigue una trayectoria tal que, comparada con las demás

trayectorias cercanas, el tiempo que requiere para recorrerla es el mínimo.

- Principio de *Huygens*: establece que todos los puntos de un frente de onda actúan como puntos de origen para la creación de nuevos frentes de onda que se extienden en todas direcciones.

Figura 4. Principio de *Huygens*



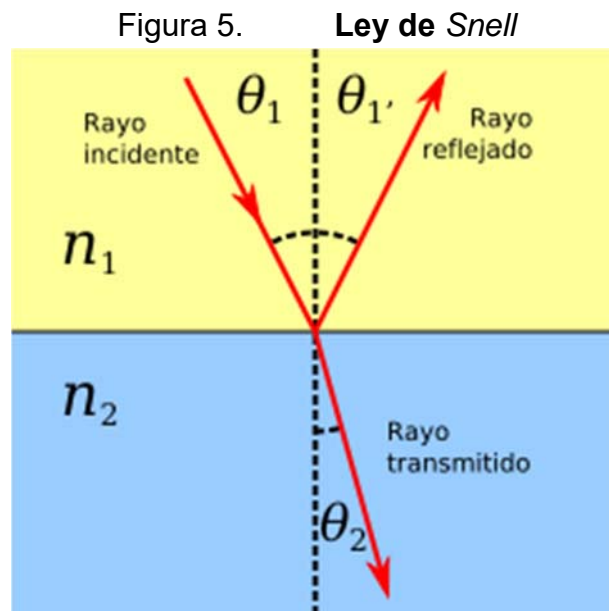
Fuente: NARANJO AGUAY, Héctor; DRANICHNIKOV, Tatiana. ***Cálculo de capacidad portante basado en geofísica y método convencional***. P. 21.

- Ley de *Snell*: a partir del principio de *Huygens* y del principio de Fermat establece que la relación entre el seno del ángulo de incidencia de onda (estrato superior) y el seno del ángulo de la onda transmitida (estrato inferior) es igual a la relación entre la

velocidad de onda de incidencia y la velocidad de la onda transmitida:

$$\frac{\text{sen}\theta_1}{\text{sen}\theta_2} = \frac{V_1}{V_2} \quad (4.1)$$

Donde:  $\theta_1$  = ángulo de incidencia  
 $\theta_2$  = ángulo de transmisión  
 $V_1$  = velocidad de incidencia  
 $V_2$  = velocidad de onda transmitida



Fuente: **Ley de Snell**. <http://ingenieroz.blogspot.com/2007/10/la-ley-de-snell.html>. Consulta: marzo de 2017.

#### 4.1.1. Tipos de ondas sísmicas

Un movimiento sísmico genera varios tipos de onda que se propagan a través del suelo y a lo largo de su superficie. Estas ondas se pueden clasificar en dos grandes grupos: ondas profundas y ondas de superficie.



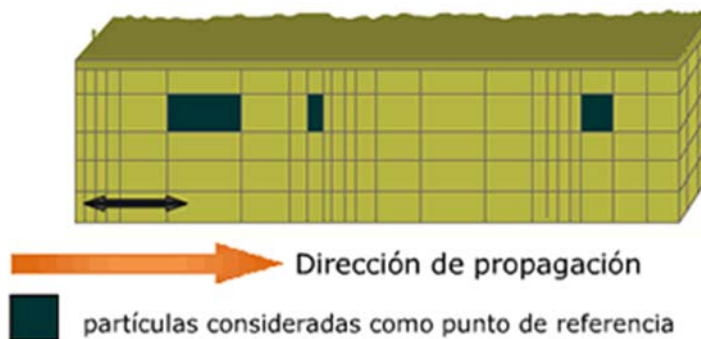
#### 4.1.1.1. Ondas profundas

Las ondas profundas son transmitidas a través del interior del suelo y consisten en la onda de compresión o longitudinal (P) y la onda de corte o transversal (S)

- Onda de compresión

Este tipo de onda mecánica se caracteriza por poseer un sentido de movimiento paralelo a la dirección de movimiento de la propagación. Las partículas alcanzadas por la onda se desplazan en la misma dirección de la propagación, lo que provoca que estas se choquen unas contra otras y esto da como resultado una compresión entre partículas.

Figura 6. **Modelo de propagación de onda de compresión**



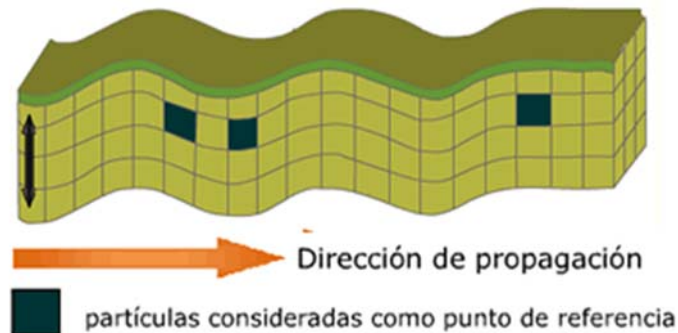
Fuente: **Modelo de onda de compresión.**

[http://www.cienciasfera.com/materiales/biologiageologia/cienciatierra/tema11/ondas\\_sismicas\\_vib.gif](http://www.cienciasfera.com/materiales/biologiageologia/cienciatierra/tema11/ondas_sismicas_vib.gif). Consultado: 29/11/2017.

- Onda de corte

Las ondas de corte u ondas (S) son ondas mecánicas cuyas partículas se desplazan perpendicularmente a la dirección de propagación de la onda, lo que provoca que exista cortante entre las partículas.

Figura 7. **Modelo de propagación de onda de corte**



Fuente: **Modelo de ondas de corte.**

[http://www.cienciasfera.com/materiales/biologiageologia/cienciatierra/tema11/ondas\\_sismicas\\_vib.gif](http://www.cienciasfera.com/materiales/biologiageologia/cienciatierra/tema11/ondas_sismicas_vib.gif). Consultado: 29/11/2017.

#### 4.1.1.2. **Ondas de superficie**

Las ondas de superficie se propagan en la interface entre dos diferentes tipos de material. Existen dos tipos de onda de superficie, los cuales son de interés para la ingeniería: las ondas *Rayleigh* y las ondas *Love*.

- *Ondas Rayleigh*

Estas ondas son el resultado de la interacción en la superficie de la incidencia de ondas P y ondas S y viajan paralelas a la superficie. Las ondas de *Rayleigh* viajan a lo largo de la superficie con un movimiento de partícula elíptico retrógrado, es decir, las partículas del material se mueven describiendo una elipse en dirección opuesta a la dirección de propagación de la energía.

- *Ondas Love*

Son ondas que se crean por la interacción de ondas S de baja velocidad con una capa superficial suave. Se propagan de forma similar que las ondas S haciendo vibrar las partículas horizontalmente en sentido perpendicular al de la

propagación, pero sin movimiento vertical. Estas se generan solo cuando un medio elástico se encuentra estratificado.

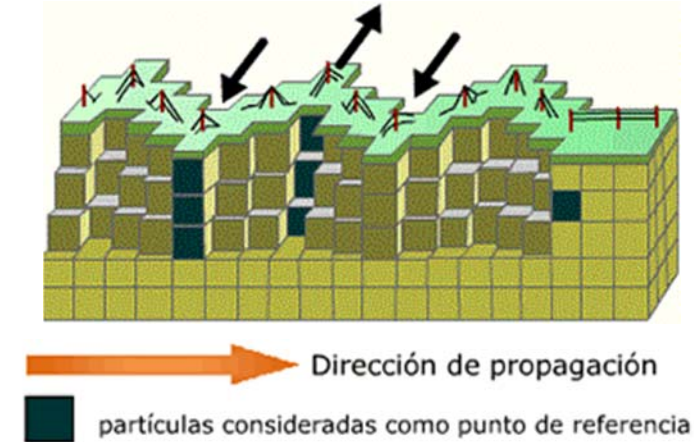
Figura 8. **Modelo de propagación de onda Rayleigh**



Fuente: **Modelo de onda Rayleigh.**

[http://www.cienciasfera.com/materiales/biologiageologia/cienciatierra/tema11/ondas\\_sismicas\\_vib.gif](http://www.cienciasfera.com/materiales/biologiageologia/cienciatierra/tema11/ondas_sismicas_vib.gif). Consultado: 29/11/2017.

Figura 9. **Modelo de propagación de onda Love**



Fuente: **Modelo de onda Love.**

[http://www.cienciasfera.com/materiales/biologiageologia/cienciatierra/tema11/ondas\\_sismicas\\_vib.gif](http://www.cienciasfera.com/materiales/biologiageologia/cienciatierra/tema11/ondas_sismicas_vib.gif). Consultado: 29/11/2017.

Para poder encontrar los módulos elásticos del suelo es necesario encontrar las velocidades de onda de corte ( $V_s$ ) y las velocidades de onda de compresión ( $V_p$ ), por lo que el método utiliza dos tipos de ensayo para poder

encontrar ambas velocidades. A continuación se detallan las metodologías utilizadas para encontrarlas.

#### **4.2. Metodología para estimar onda de corte**

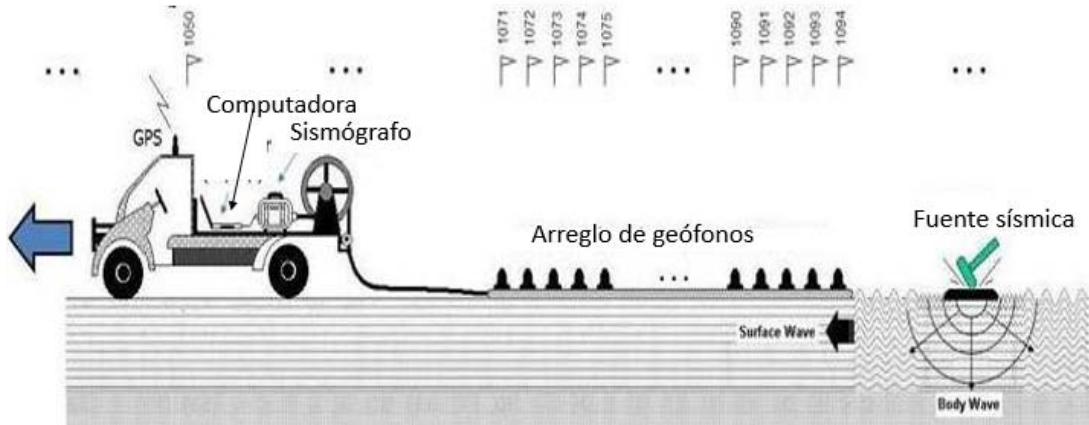
El método MASW utiliza un sistema de registro multicanal para estimar la velocidad de la onda de corte cerca de la superficie del suelo, utilizando los registros de ondas de superficie de alta frecuencia (*Rayleigh*). Esta técnica está basada en los siguientes puntos:

1. La adquisición de ondas superficiales de alta frecuencia (ondas Rayleigh) utilizando un sismógrafo multicanal de banda ancha.
2. Creación de algoritmos organizados, eficaces y precisos en una sencilla secuencia de procesamiento de datos diseñada para extraer y analizar la curva de dispersión de las ondas superficiales, según los datos obtenidos por el sismógrafo.
3. El desarrollo de algoritmos de inversión estable y eficiente para obtener los perfiles de la velocidad de la onda de corte a partir de la gráfica de dispersión de la onda superficial.

El método consiste en provocar una perturbación en el suelo en un punto determinado por medio de fuentes activas (5-50Hz), como lo pueden ser explosiones, impacto de un mazo, máquinas vibratorias o fuentes pasivas (0,2-10Hz), como lo es el ruido ambiental. En la zona a explorar se colocan sensores de ondas llamados geófonos, separados entre sí equidistantemente cuya función es recibir la onda provocada por la perturbación, para luego transmitir las ondas amplificadas a un sismógrafo. Estos geófonos detectan las ondas que viajan en el sentido vertical o perpendicular a la superficie del suelo. El

sismógrafo, al interceptar la llegada de las ondas, proporciona los sismogramas donde se recogen los tiempos de llegada de la onda a cada geófono.

Figura 10. **Esquema de configuración de ensayo MASW**



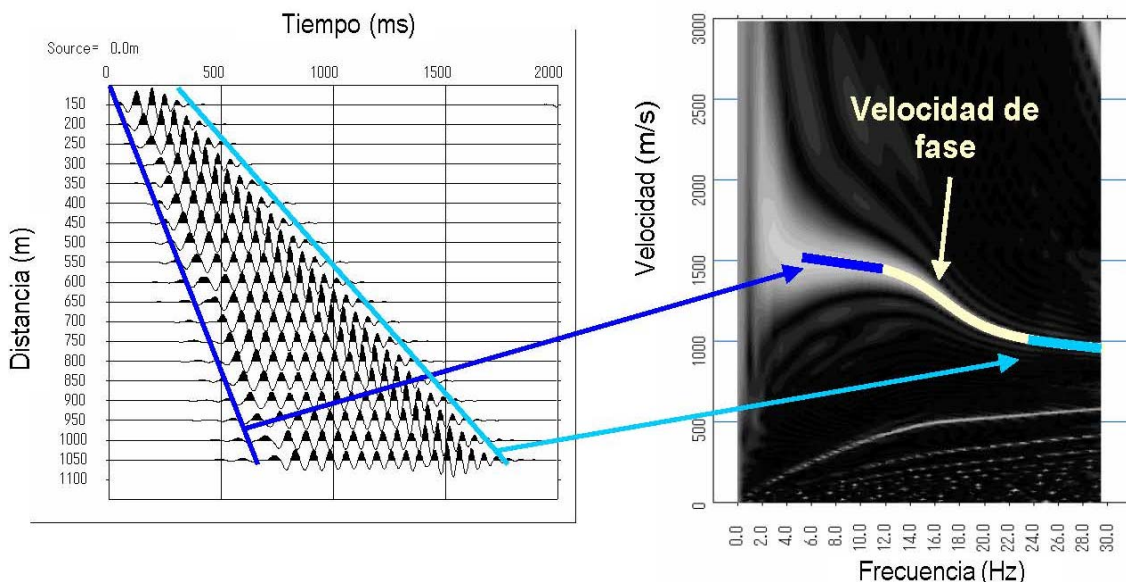
Fuente: **Esquema MASW**. <http://MASW.com/WhatisMASW.html>. Consulta: marzo de 2017.

Los sismogramas grafican el tiempo de llegada, la amplitud y frecuencia de onda que arriba a cada uno de los geófonos colocados en el arreglo, según la distancia que tengan al punto de golpeo. Como se observa en la figura 11, estos sismogramas no son uniformes, es decir no poseen una única amplitud, frecuencia, longitud, ni velocidad en todo el trayecto de la onda, esto se debe a que en un medio no homogéneo estratificado como lo es el suelo, la rigidez varía con la profundidad y existe un cambio de la velocidad de onda para cada estrato que conforma el suelo estudiado.

A partir de los sismogramas se derivan las velocidades de onda de corte ( $V_s$ ) del suelo según sus estratos. Para lograr realizar un perfil de velocidad de onda de corte ( $V_s$ ), este método analiza el fenómeno de la dispersión. Lo utiliza para estimar la distribución de velocidades en el medio estratificado por el que se propagan las ondas de superficie. Como se explicó anteriormente, las ondas presentan cambios en sus características según el estrato por que se propagan.

Para realizar este análisis se debe examinar el sismograma y determinar en qué partes del mismo las frecuencias son iguales junto con sus velocidades de fase, luego se grafican las mismas para dar origen a la gráfica de dispersión.

Figura 11. Gráfico de dispersión



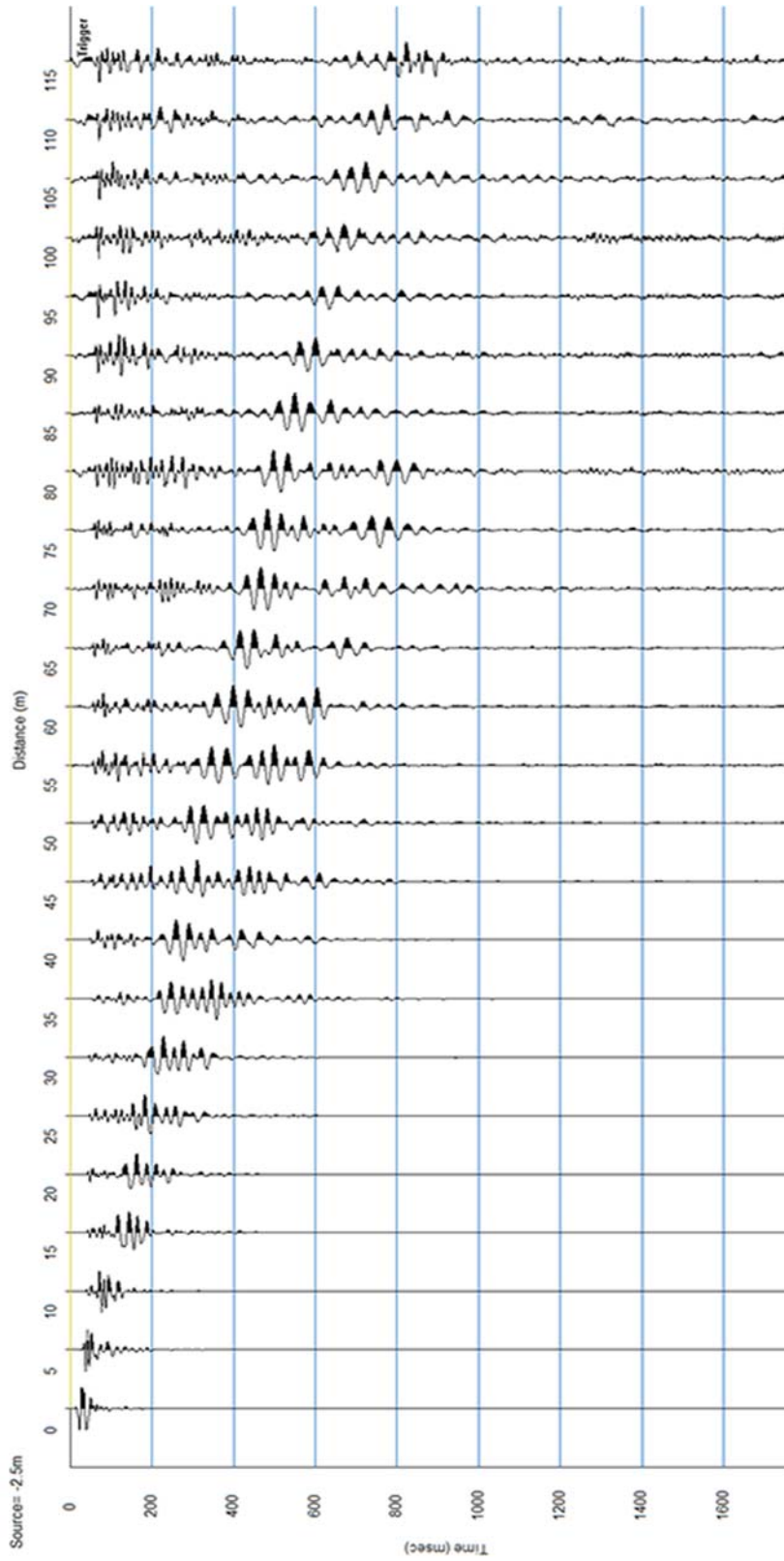
Fuente: **UNDERWOOD**, Deborah; **HAYASHI**, Koichi. **Overview of surface waves**. P. 9

Una vez hecho el grafico de dispersión se procede a realizar la inversión de la gráfica para encontrar las longitudes de onda en función de las velocidades de fase. Debido a que la velocidad de onda de corte corresponde a 1,09 veces la velocidad de fase de onda *Rayleigh* en la frecuencia donde la longitud de onda encaje perfectamente. Además la longitud de onda está relacionada de forma directamente proporcional al espesor del estrato por el que se propaga mediante la siguiente ecuación:

$$z = \alpha \lambda \tag{4.2}$$

- Donde:
- $z$  = profundidad del estrato
  - $\alpha$  = coeficiente de proporcionalidad
  - $\lambda$  = longitud de onda

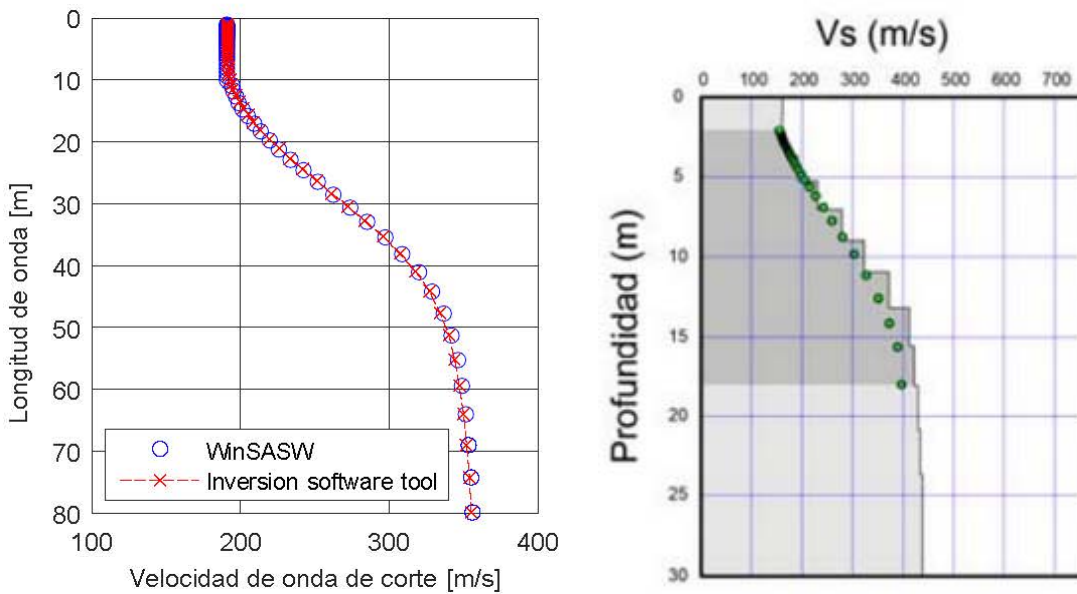
Figura 12. Sismograma



Fuente: Sismograma. <http://www.egyes.mx/geofisica-aplicada-la-geotecnia/>. Consulta: 14/11/2017.

A partir de la gráfica invertida se realiza el perfil de onda de corte, el cual indica las diferentes velocidades de onda según cada estrato que conforma el suelo estudiado:

Figura 13. a) Gráfico de inversión, b) Perfil de onda de corte



a)

b)

Fuente: a) ÓLASFSDOTTIR, Elín. *Multichannel analysis of surface waves for assessing soil stiffness*. P. 93. b) Geociencia Aplicada, S.A.

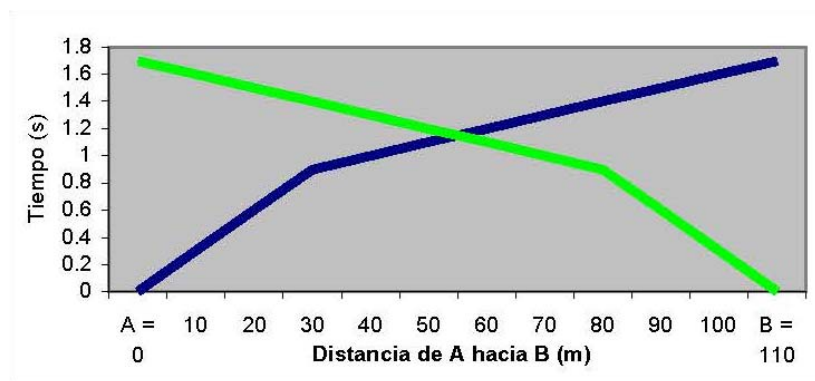
### 4.3. Metodología para encontrar onda de compresión

Para encontrar la velocidad de onda de compresión ( $V_p$ ) el método se complementa con el ensayo de refracción sísmica. Este ensayo utiliza los mismos principios y métodos analíticos explicados anteriormente para la medición de velocidad de onda de corte ( $V_s$ ). La diferencia radica en el uso de sensores de componente horizontal, los cuales registran mejor la llegada de las ondas P y la otra diferencia es el análisis que se realiza al sismograma.



Como se explicó en el párrafo anterior, el método usa el mismo procedimiento hasta obtener el sismograma. Con base en el sismograma y la distancia entre los geófonos se construye una gráfica llamada dromócrona, que relaciona la distancia del geófono al punto donde se originó la perturbación, con el tiempo que tardó en registrarse el primer arribo de onda en ese geófono. La identificación de las dromócronas es la parte más importante de la interpretación de los datos de la refracción sísmica.

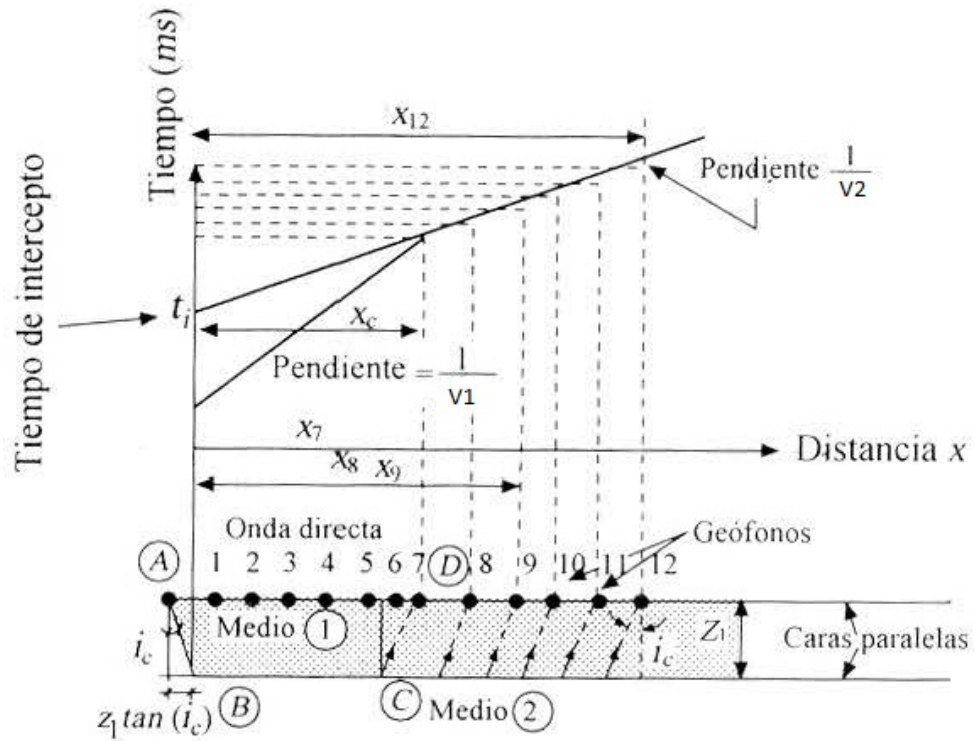
Figura 14. **Dromócrona**



Fuente: **Dromócrona**. <http://www.osso.org.co/docu/tesis/2001/comportamiento/refraccion.pdf>.  
Consulta: 19/11/2017.

Creada la gráfica se procede a realizar su interpretación. En la figura 14 se observa una dromócrona creada a partir del golpeo en los extremos del tendido, lo que devuelve dos gráficos. En la primera sección de cada gráfica se identifica la velocidad de onda P directa y donde la gráfica cambia de pendiente se identifica la velocidad de onda P refractada, es decir la velocidad de onda del segundo estrato. En cada tramo, la pendiente corresponde al inverso de la velocidad,  $v_1$  para la capa superior y  $v_2$  para la capa inferior. La proyección del primer tramo en el eje de las distancias se conoce como  $x_c$ , que es la distancia entre el punto de disparo y el sitio en superficie donde emerge la primera onda refractada, y  $t_i$  es el tiempo transcurrido.

Figura 15. Interpretación de dromócrona



Fuente: **Interpretación de dromócrona.**

<http://www.osso.org.co/docu/tesis/2001/comportamiento/refraccion.pdf>. Consulta: 19/11/2017.

Encontradas las velocidades para los estratos se procede a encontrar los espesores de los estratos, según el tiempo transcurrido de la onda refractada y las velocidades de onda para los estratos mediante la siguiente ecuación:

$$z = \frac{t_i}{2} \frac{V2 * V1}{\sqrt{(V2)^2 - (V1)^2}} \quad [m] \quad (4.3)$$

Donde:

$z$  = profundidad hasta el siguiente estrato

$t_i$  = tiempo transcurrido de onda refractada [s]

$V1$  = velocidad de onda en el primer estrato [m/s]

$V2$  = velocidad de onda en el segundo estrato [m/s]

#### 4.4. Aplicaciones del método MASW a la ingeniería

El método MASW posee muchas aplicaciones en la ingeniería civil, principalmente en las ramas de ingeniería estructural y geotecnia. Las aplicaciones principales son las siguientes:

- Se utiliza para hallar las velocidades de ondas de corte ( $V_s$ ) del suelo y poder clasificar la zona de estudio de acuerdo a los diferentes códigos sísmicos existentes, tanto en Guatemala (AGIES NSE 2-10) como códigos extranjeros (IBC). A continuación se presenta la clasificación para Guatemala:

Tabla IX. **Clasificación sísmica de sitio basada en la onda de corte ponderada para Guatemala**

Clase de sitio		$V_{p_s}$ (m/s)
AB	Roca	750
C	Suelo muy denso o roca suave	750 a 360
D	Suelo firme y rígido	360 a 180
E	Suelo suave	< 180
F	Suelo con problemas especiales	<180 y condiciones especiales

Fuente: AGIES, NSE 2-10. P. 21

La velocidad de onda de corte ponderada se encuentra mediante la siguiente ecuación:

$$V_{p_s} = \frac{\sum_{i=1}^n d_i}{\sum_{i=1}^n \frac{d_i}{V_{si}}} \quad [m/s] \quad (4.4)$$

Donde:  $V_{p_s}$  = velocidad de onda de corte ponderada

$d_i$  = profundidad de estrato [m]

$V_{si}$  = velocidad de onda de corte del estrato [m/s]

$\sum_{i=1}^n d_i \geq 30$  m por debajo de la cimentación [m]

- Estimación de los módulos elásticos del suelo y con estos la deformación que presentará el suelo al ser sometido a cargas.
- Permite detectar estratos de suelo blandos entre estratos más rígidos.
- Determinación de morfologías y espesores de las capas del subsuelo.
- Determinar el estado de compactación y fracturación del suelo.
- Determinación de la compacidad de los estratos para definir la profundidad de cimentación.
- Microzonificación sísmica de ciudades.

#### 4.5. Normalización del método

Este método, por ser relativamente nuevo, aún no posee una estandarización propia. Sin embargo, la fase de medición de la onda de compresión ( $V_p$ ) del ensayo sí se encuentra normada mediante la norma ASTM D5777, la cual rige el procedimiento de ensayo para el uso de la refracción sísmica para la exploración del subsuelo. A continuación se describen las partes más importantes de las normas descritas en la literatura consultada para la realización del método MASW:

- Para medir las condiciones del subsuelo mediante este método se requiere contar con una fuente de energía sísmica, cable “cero” o disparador, geófonos, cable transmisor de las señales de los geófonos y un sismógrafo multicanal de 6 a 48 geófonos, capaz de grabar información simultánea en todos los geófonos.

- La fuente de energía sísmica y los geófonos deben estar colocados firmemente en el suelo o en la roca.
- Los geófonos deben estar colocados de forma lineal y en superficies relativamente planas. No se permite colocar geófonos en zonas donde la topografía sea muy quebrada, irregular o con pendientes muy pronunciadas, debido a que esto puede afectar la medición de la propagación de las ondas sísmicas.
- La fuente sísmica puede ser una almágana, un dispositivo mecánico que pueda golpear el suelo o algún explosivo. El uso de explosivos es permitido cuando es necesario profundizar más en las mediciones o cuando existen condiciones especiales en el suelo que requieran más energía.
- Durante el proceso de generación de las ondas sísmicas debe evitarse la interferencia de otras fuentes de energía como pasos, tránsito vehicular, maquinaria, vibraciones, etc.

#### **4.6. Cálculo de los módulos elásticos**

Por medio del MASW se pueden calcular los cuatro módulos elásticos y es el único método en el cual se calculan de forma directa. Cabe resaltar que el método calcula módulos elásticos dinámicos, por lo que se requiere una correlación para convertirlos en estáticos, debido a que existe una diferencia entre los módulos encontrados mediante exploración sísmica y los encontrados mediante ensayos de carga estática. Para rocas duras esta diferencia es relativamente pequeña: no mayor a 10-15 %. Sin embargo, para los suelos sueltos puede alcanzar hasta más de 10 veces. Las principales razones que generan diferencias entre el módulo estático y el dinámico son:

- La diferencia de presiones bajo las cuales se determinan los módulos.

- Tiempos de acción de las cargas.
  - Los suelos son materiales heterogéneos.
  - Diferencia de las dimensiones de las muestras de suelos que participan en cada medición.
- Módulo de elasticidad dinámico ( $E_d$ )

El módulo de elasticidad dinámico se determina a partir de la siguiente ecuación:

$$E_d = \rho V_s^2 \left( \frac{3V_p^2 - 4V_s^2}{V_p^2 - V_s^2} \right) [Pa] \quad (4.5)$$

Donde:  $E_d$  = módulo de elasticidad dinámico  
 $\rho$  = densidad del estrato [ $kg/m^3$ ]  
 $V_s$  = velocidad de onda S [m/s]  
 $V_p$  = velocidad de onda P [m/s]

- Módulo de elasticidad estático

El módulo de elasticidad estático se determina mediante la siguiente ecuación:

$$E = 0,09346E_d + 4,0 \left[ \frac{kg}{cm^2} \right] \quad (4.6)^4$$

Donde:  $E$  = modulo elástico estático  
 $E_d$  = módulo elástico dinámico [ $kg/cm^2$ ]

---

<sup>4</sup> NARANJO AGUAY, Héctor; DRANICHNIKOV, Tatiana. *Cálculo de capacidad portante basado en geofísica y método convencional*. P. 36

- Módulo de *Poisson* ( $\nu$ )

El módulo de *Poisson* no presenta variación para ensayos estáticos y de exploración sísmica y se encuentra por medio de la siguiente ecuación:

$$\nu = \frac{V_p^2 - 2V_s^2}{2(V_p^2 - V_s^2)} \quad (4.7)$$

Donde:  $\nu$  = módulo de *Poisson*  
 $V_p$  = velocidad de onda P [m/s]  
 $V_s$  = velocidad de onda S [m/s]

- Módulo de corte dinámico

El módulo de corte se determina a partir de la siguiente ecuación:

$$G_d = \rho V_s^2 \quad [Pa] \quad (4.8)$$

Donde:  $G_d$  = módulo de corte dinámico  
 $\rho$  = densidad del estrato [kg/m<sup>3</sup>]  
 $V_s$  = velocidad de onda S [m/s]

- Módulo de corte estático

Para encontrar el módulo de corte estático se debe hacer uso de la ecuación 2.4 con el valor encontrado de E en la ecuación 4.5.

- Módulo de compresibilidad dinámico

El módulo de compresibilidad se determina mediante la ecuación descrita a continuación:

$$K_d = \frac{\rho}{3} (3V_p^2 - 4V_s^2) \quad [Pa] \quad (4.9)$$

Donde:  $K_d$  = módulo de compresibilidad dinámico

$\rho$  = densidad del estrato [ $\text{kg/m}^3$ ]

$V_s$  = velocidad de onda S [m/s]

$V_p$  = velocidad de onda P [m/s]

- Módulo de compresibilidad estático

El módulo de compresibilidad estático se encuentra mediante la ecuación 2.6 utilizando el valor de E encontrado en la ecuación 4.5. Como se puede observar, la mayoría de las ecuaciones requiere valores de densidad de estratos. Con el método MASW propiamente dicho no se pueden extraer valores de densidad de los estratos del suelo. Por lo tanto, es necesario realizar pozos geotécnicos o ensayos SPT como complemento al método para extraer muestras de suelo y determinar las densidades de las mismas.





## 5. ANÁLISIS TEÓRICO DE LOS MÉTODOS

### 5.1. Consideraciones generales

- SPT

El ensayo de penetración estándar es un método de exploración semidirecta y es el método de penetración dinámica más usado en nuestro medio. Se utiliza para evaluar la rigidez del suelo y su capacidad para deformarse.

El SPT constituye un método sencillo para determinar la consistencia del suelo, forzando la penetración de un elemento y relacionando la resistencia del suelo a la penetración del elemento. El tiempo de ejecución del método varía en función de la profundidad del ensayo y el tipo de suelo en el cual se realice el mismo.

A continuación se enumeran las principales ventajas del método SPT:

- Es un método sencillo y de bajo costo.
- Se extraen muestras del suelo durante la penetración desde la superficie hasta la profundidad deseada.
- Realización de perfiles estratigráficos.
- Existen varias correlaciones de  $N_{spt}$  para varias propiedades mecánicas de los suelos.
- El ensayo se puede realizar en cualquier tipo de topografía.
- Se pueden realizar perforaciones mayores a 30 metros.

- El ensayo se realiza en menos de un día.
- Por ser un ensayo *in situ* las propiedades del suelo en la penetración no se ven alteradas.

Las principales desventajas del método son las siguientes:

- El tiempo de ensayo puede ser muy largo si la penetración requerida es mayor a 5 metros o si el terreno posee estratos muy rígidos.
- Existe mucho riesgo de rechazo de la prueba al encontrar rocas o estratos muy rígidos, lo que provocaría repetir la penetración en otro sitio.
- Puede ser muy difícil trasladar el equipo al punto de ensayo si las condiciones del terreno son difíciles (árboles, topografía quebrada, etc.)
- Un solo ensayo no es representativo de un terreno.
- El ensayo altera las muestras que son extraídas.
- Puede llegar a ser un ensayo costoso si se requiere más de una penetración.

- Triaxial

El ensayo de laboratorio triaxial es una prueba que se realiza después de una exploración directa para la determinación de las propiedades geotécnicas del suelo, como parte de las técnicas de reconocimiento geotécnico. Este ensayo se realiza sobre muestras inalteradas de suelo que permiten evaluar cuantitativamente las características mecánicas de los suelos. La extracción de la muestra se hace por medio de un pozo a cielo abierto, donde la muestra se saca de la pared del mismo a la profundidad de interés.

El tiempo de ejecución del ensayo es bastante largo debido a que, por ser un ensayo de laboratorio, este se divide en dos partes: la extracción de la muestra en campo y luego la ejecución del ensayo en el laboratorio. Para la extracción de la muestra se tiene que excavar hasta la profundidad deseada, luego retirar la muestra y posteriormente envolverla en parafina para que esta conserve su humedad real. Una vez extraída la muestra se procede a trasladarla al laboratorio donde se ejecutará el ensayo como tal.

Las ventajas de la aplicación del ensayo triaxial son:

- El ensayo se realiza con muestras inalteradas.
- Las condiciones del ensayo simulan las condiciones reales a la cuales está sometido el suelo.
- Se obtiene parámetros de resistencia al corte.
- No existe limitación de topografía para la extracción de las muestras.

Desventajas del uso del ensayo triaxial:

- Dependiendo las condiciones del suelo, puede llegar a ser muy complicado extraer la muestra de suelo debido a que esta se puede destruir.
- No se puede garantizar que la muestra extraída conserve sus propiedades naturales.
- El transporte de la muestra requiere mucho cuidado debido a que la misma se puede arruinar si no se transporta adecuadamente.
- Es muy difícil la extracción de muestras cuando se requieren a profundidades muy grandes.

- Dependiendo de la accesibilidad del laboratorio, la finalización del ensayo puede tomar varios días.
  - El ensayo de una sola muestra no es representativo de un terreno.
  - Su costo es muy relativo, ya que dependerá de la profundidad a la cual se extrae la muestra y el tipo de triaxial a realizar.
- CBR

El ensayo CBR es un ensayo de penetración utilizado únicamente en la construcción de carreteras para evaluar las condiciones del suelo con el que se elaborarán las diferentes capas que conforman una carretera. Este ensayo se realiza sobre muestras alteradas de suelo tomadas de bancos de materiales o del terreno natural donde pasará la carretera, para evaluar si este es apto para ser usado como sub-rasante.

El tiempo de ejecución del ensayo es bastante largo debido a que previo a la realización de la prueba se realiza otro ensayo llamada Proctor. El tiempo de realización de CBR como tal puede tomar más de cuatro días, debido a que existe una preparación previa de la muestra antes de ser ensayada.

El desarrollo del método en todas sus partes debe ser realizado por personal altamente calificado y con experiencia, debido a que el método posee procedimientos muy complejos de realizar. De igual manera la interpretación del mismo debe ser realizada por personal capacitado y con experiencia, debido a que los resultados suelen ser muy difíciles de entender si no se cuenta con la experiencia y conocimiento adecuado

Algunas de las principales ventajas del método son las siguientes:

- La extracción de las muestras se realiza con bastante facilidad.
- El ensayo se realiza bajo las condiciones óptimas del suelo.

Desventajas del método:

- El tiempo para la realización del ensayo desde que se obtiene la muestra puede ser de más de 4 días.
- Un solo ensayo no se puede tomar como absoluto de un terreno o de un solo banco de materiales.
- Únicamente existe aplicación del método para carreteras.

- MASW

El método MASW es una técnica de exploración indirecta utilizada para la investigación de estratos profundos, con la finalidad de obtener parámetros mecánicos del suelo basados en la medición de la velocidad de propagación de ondas sísmicas, principalmente las ondas de compresión (P) y las ondas de corte (S). Estas permiten calcular propiedades dinámicas y definir la estratigrafía de un lugar en específico.

Este método tiene importancia porque permite la evaluación rápida y relativamente económica de grandes extensiones de terreno o alineaciones de gran longitud entre sondeos que se encuentran alejados en comparación a los tradicionales puntos de ensayo. Es una técnica indirecta y por lo tanto de carácter no destructivo.

Los trabajos de campo e interpretación de los resultados deben estar realizados por personal altamente capacitado y con experiencia en la ejecución y procesamiento de los datos. Los datos obtenidos de campo suelen ser muy

complejos de interpretar y el procesamiento de los mismos conlleva un procedimiento altamente matemático.

Algunas de las ventajas de la aplicación del método son las siguientes:

- Permite la optimización de los esquemas de diseño de edificaciones.
- Se puede obtener una descripción estratigráfica sísmica y la profundidad de los estratos más rígidos por medio de la comparación de ondas de corte.
- Permite cubrir grandes áreas de estudio en un corto tiempo.
- Por ser un ensayo *in situ*, las propiedades del suelo no se ven alteradas.
- Constituye una alternativa muy económica para la determinación de los parámetros elásticos del suelo de cimentación.
- El ensayo se realiza en menos de un día.

A continuación se presentan algunas de las desventajas del método:

- Presenta limitaciones impuestas por la física de propagación de ondas, como lo es la interferencia provocada por ruidos externos muy cercanos como personas caminando, tránsito de vehículos, etc., lo que provoca una mala calidad de datos.
- La práctica del método está limitada a profundidades de 25 m a 40 m.
- El método está limitado por la disponibilidad de zonas con suficiente extensión para instalar los geófonos. La longitud del tendido en la superficie está directamente relacionada con el alcance de la profundidad de la exploración.

- El ensayo no puede realizarse en zonas con topografía muy quebrada, es decir debe realizarse en una zona relativamente plana.
- Por ser método indirecto, se debe complementar mediante perforaciones u otros ensayos directos.
- Posee un costo relativamente elevado.

## 5.2. Relación entre los métodos

El método geofísico junto con el SPT son métodos *in situ* de exploración del subsuelo. Los métodos triaxial y CBR son métodos directos de laboratorio. Los primeros tres métodos mencionados se utilizan para conocer la calidad y las características tanto físicas como mecánicas del suelo sobre el cual se planea construir alguna obra, mientras que el ensayo CBR se utiliza para conocer las características del material con el cual se planea construir las diferentes capas que constituyen una carretera.

Entre los métodos geofísico, SPT y triaxial existen muchas correlaciones entre sus resultados finales, debido a que son los más utilizados y con el pasar de los años se han modelado ecuaciones para relacionar unos con otros. A continuación se presentan algunas ecuaciones que relacionan los tres métodos según la tesis de Héctor Naranjo Aguay y Tatiana Dranichnikov, titulada: *Cálculo de capacidad portante basado en geofísica y método convencional*.

La siguiente ecuación representa la relación que existe entre el  $N_{spt}$  y la velocidad de onda  $V_p$ :

$$V_p = 35,734N_{spt} + 89,306 \text{ [m/s]} \quad (5.1)$$



Relación entre  $V_s$  y  $N_{spt}$

$$V_s = 56N_{spt}^{1/2} \text{ [m/s]} \quad (5.2)$$

Relación entre el ángulo de fricción interna y  $V_s$  y  $V_p$ :

$$\phi = 46,4 - 9,65 \frac{V_p}{V_s} \quad (5.3)$$

Relación entre la cohesión y  $V_s$  y  $V_p$ :

$$C = 0,908 - 0,168 \frac{V_p}{V_s} \quad (5.4)$$

Donde:  $V_p$  = velocidad de onda de compresión

$V_s$  = velocidad de onda de corte

$N_{spt}$  = resistencia a la penetración estándar

$\phi$  = ángulo de fricción interna

C = cohesión del suelo

Cabe destacar que todas las relaciones fueron determinadas a partir de ensayos realizados en suelos saprolíticos de los Urales en Rusia.

El ensayo CBR no posee ninguna correlación con los ensayos MASW ni triaxial, debido a que este ensayo es de uso exclusivo para la construcción de carreteras. Sin embargo, un estudio realizado en Andalucía, España, por la Universidad de Granada, demostró una correlación entre el índice CBR y el  $N_{spt}$  con el cien por ciento de compactación del proctor normal. A continuación se presenta la relación entre los métodos:

$$CBR = 0,0739N_{spt} + 2,386 \quad (5.5)$$

Donde:      CBR = valor soporte california  
               $N_{spt}$  = resistencia a la penetración estándar



## **6. DESARROLLO EXPERIMENTAL**

Para realizar el desarrollo experimental se tomaron datos de pruebas reales realizadas en Guatemala. El desarrollo experimental se divide en dos partes: la primera consiste en la comparación del ensayo SPT con el ensayo geofísico de ondas de superficie, y la segunda parte consiste en la comparación de los métodos triaxial y CBR contra el método geofísico de ondas de superficie.

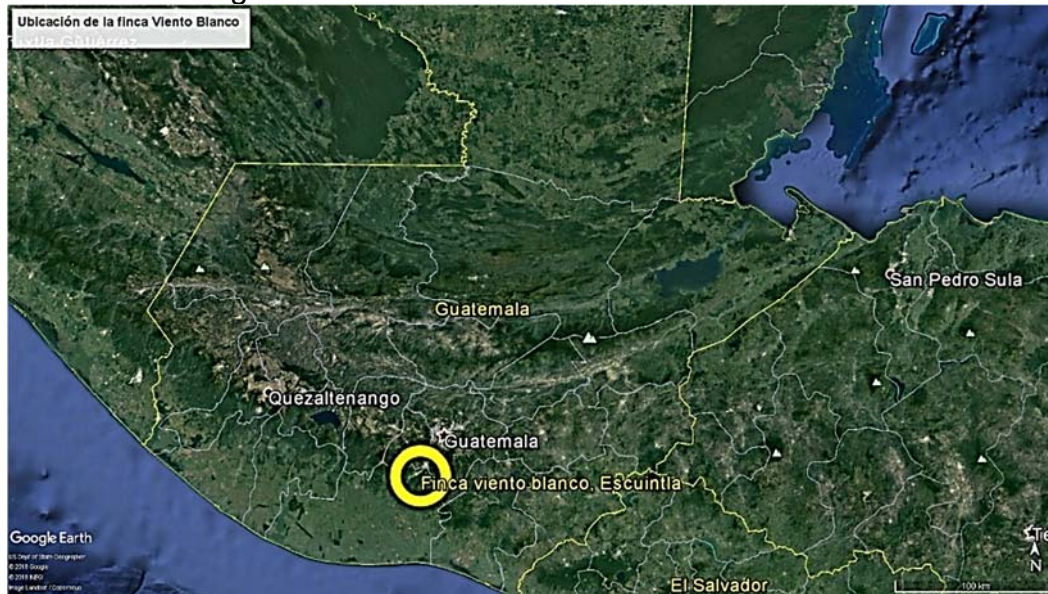
Para la primera parte del desarrollo experimental se tomaron los datos de un estudio realizado en la finca Viento Blanco en San Vicente Pacaya, del Departamento de Escuintla, en el año 2014. En este sitio se realizaron 7 SPT con una profundidad de 40 m y se realizaron 7 perfiles sísmicos con un alcance de 36 m. Para la segunda parte del desarrollo experimental se tomaron los datos de un estudio realizado en la ciudad de Guatemala durante el 2015, en el cual se realizaron 48 pozos geotécnicos y 11 perfiles sísmicos.

### **6.1. Comparación SPT contra MASW**

En el año 2014 se realizaron estudios geotécnicos y geofísicos para la construcción de torres de aeroturbinas generadoras de energía eléctrica en la finca Viento Blanco, ubicada en San Vicente Pacaya, Escuintla. En 7 diferentes puntos de la finca se realizaron ensayos de penetración estándar de 40 m de profundidad y perfiles sísmicos MASW de 55 m de largo, con un alcance de 36,43 m de profundidad con el fin de reconocer las condiciones del subsuelo en el sitio. El estudio geotécnico y el estudio geofísico fueron realizados por empresas privadas.

La finca se encuentra ubicada aproximadamente en las coordenadas UTM 15P 752 175 m Este, 1 592 280 m Norte. A continuación se presenta un mapa ilustrando los puntos en los cuales se realizarán ambas pruebas:

Figura 16. **Ubicación de la finca Viento Blanco**



Fuente: elaboración propia.

Figura 17. **Mapa de localización de torres aerogeneradoras**



Fuente: Geociencia Aplicada S.A:

Tabla X. **Coordenadas UTM de los puntos de SPT**

<b>Punto</b>	<b>Este (m)</b>	<b>Norte (m)</b>
1	751 702	1 592 171
2	751 856	1 592 118
3	751 994	1 592 072
4	752 139	1 592 054
5	752 367	1 592 153
6	752 532	1 592 132
7	752 747	1 592 214

Fuente: elaboración propia.

Para los fines de este trabajo se tomarán los datos obtenidos en el punto número 4 para las profundidades de 1, 10 y 35 metros, y se compararán los resultados que se obtienen calculando los módulos elásticos mediante los datos adquiridos por el ensayo SPT y por el método geofísico de ondas de superficie para esta profundidad.

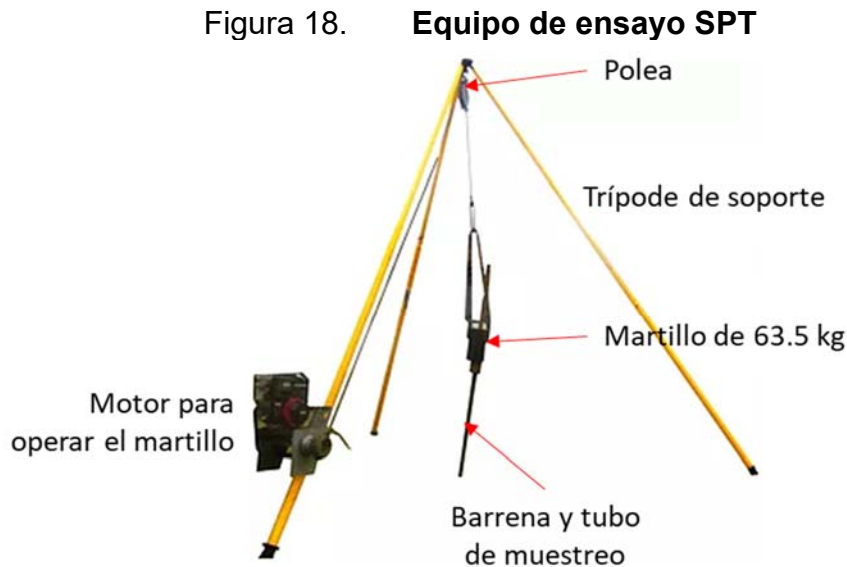
### **6.1.1. Ensayo de penetración estándar SPT**

A continuación se describe el equipo utilizado para realizar el ensayo, los pasos a seguir y los cálculos correspondientes de los módulos elásticos.

#### **6.1.1.1. Equipo de ensayo**

- Trípode con polea: el trípode debe poseer una altura que permita que el martillo caiga desde una altura de 76 centímetros.
- Martillo de 63,5kg.
- Soga.
- Motor.
- Tubos de transmisión.

- Cuchara toma muestras.



Fuente: Geociencia Aplicada, S.A.

### 6.1.1.2. Procedimiento de ensayo

1. El primer paso que se realiza es armar el trípode, levantarlo y estabilizarlo en el suelo enterrando la punta de sus patas.
2. El paso siguiente es ensamblar el motor a la pata más ancha del trípode, amarrar el martillo a la soga para luego enrollar la soga en el eje giratorio del motor.
3. Seguidamente se procede a conectar la varilla de transmisión al martillo y de igual manera se conecta la cuchara toma muestras a la varilla.
4. Completados los pasos anteriores, el equipo está listo para proceder a la penetración del suelo, por lo que se procede a tirar de la soga con el fin de levantar el martillo con la ayuda del motor, para luego soltar la soga y permitir que el martillo tenga una caída libre e impacte la varilla de transmisión, la cual trasladará la fuerza del

impacto a la cuchara toma muestras para poder así comenzar la penetración.

Figura 19. **Proceso de ensamblaje de motor para SPT**



Fuente: Geociencia Aplicada, S.A.

5. La penetración se realiza en tramos de 30 centímetros. Cuando se finaliza un tramo se retira la cuchara y se extraen las muestras en su interior, luego se vuelve a colocar la cuchara y, dependiendo de la profundidad, se le añade un tramo más a la varilla de transmisión para poder continuar la penetración bajo el mismo procedimiento hasta alcanzar la profundidad deseada. Durante la penetración el operador debe ir anotando la cantidad de golpes necesarios para penetrar cada 15 centímetros de suelo.



Figura 20. **Extracción de muestras de cuchara SPT**



Fuente: Geociencia Aplicada, S.A.

### 6.1.1.3. **Aplicación de resultados**

En la tabla XI se muestra el resumen de los datos obtenidos en el SPT realizado en el punto 4 del estudio ejecutado en la finca Viento Blanco (ver apéndice C). Como se mencionó en el apartado 6.1, se usarán las profundidades de 1, 10 y 35 metros para comparar los resultados. Se observa en la tabla XI que para las profundidades antes mencionadas los datos obtenidos son los siguientes:

Tabla XI. **Tabla de resumen de datos obtenidos de SPT**

<b>Prof. (m)</b>	<b>Nspt</b>	<b>Densidad (kN/m<sup>3</sup>)</b>	<b>N60</b>	<b>N55</b>	<b>N60</b>	<b>Descripción</b>
1	4	18,0	6,80	7,42	5,83	Arena limosa negra
10	10	17,9	9,83	10,73	8,43	Arena pómez beige mica
35	47	18,0	24,51	26,93	21,01	Arena limosa café veteadada

Fuente: elaboración propia.

Tabla XII. Tabla de datos obtenidos del SPT para el punto 4

Prof. (m)	Golpes			N (N2+N3)	peso suelo humedo kN/m <sup>3</sup>	N60	N55	N70	Descripción	COMPASIDAD Dr.
	N1	N2	N3							
1	2	1	3	4	18.00	6.80	7.42	5.83	Arena limosa negra	SUELTA
2	8	7	7	14	18.00	22.83	24.91	19.57	Limo arenoso café	
3	5	6	7	13	18.00	17.31	18.89	14.84	arena gruesa	MEDIA
4	3	3	4	7	17.00	9.21	10.05	7.90	Arcilla café poca arena	
5	2	2	3	5	17.00	5.91	6.45	5.07		
6	2	2	3	5	17.00	5.41	5.90	4.64		
7	2	2	3	5	17.00	5.61	6.12	4.81		
8	3	3	4	7	18.10	7.33	8.00	6.28	Limo arcilloso café	
9	4	4	5	9	18.10	8.87	9.68	7.60	beteado	
10	3	4	6	10	17.90	9.83	10.73	8.43	Arena pomez beige mica	
11	4	5	6	11	18.00	10.30	11.24	8.83	Limo arenoso café	
12	6	7	7	14	17.90	12.55	13.69	10.75	Arena pomez beige poca gravilla	
13	7	8	12	20	17.90	17.21	18.77	14.75		
14	8	12	15	27	17.90	22.38	24.41	19.18	Limo arenoso café	
15	13	15	19	34	18.00	27.21	29.68	23.32		
16	16	18	15	33	18.00	25.56	27.88	21.91		
17	7	13	14	27	18.20	20.27	22.11	17.38		
18	10	12	14	26	18.00	18.96	20.69	16.25	Limo arenoso café	
19	11	16	20	36	18.00	25.55	27.87	21.90		
20	13	16	19	35	18.00	24.20	26.40	20.75		
21	11	18	20	38	18.00	25.64	27.97	21.98		
22	16	21	16	37	18.00	24.38	26.60	20.90		
23	13	19	20	39	18.00	25.13	27.42	21.54		
24	12	14	13	27	18.00	17.03	18.58	14.60		
25	10	13	16	29	18.00	17.92	19.55	15.36		
26	13	16	21	37	18.00	22.41	24.45	19.21		
27	14	15	16	31	18.00	18.42	20.10	15.79		
28	16	20	18	38	18.00	22.17	24.19	19.01		
29	13	15	16	31	18.00	17.77	19.39	15.23		
30	15	34	29	63	18.00	35.50	38.73	30.43		
31	13	16	14	30	18.00	16.63	18.14	14.25		
32	14	14	13	27	18.00	14.73	16.07	12.63		
33	12	14	15	29	18.00	15.58	16.99	13.35	Limo arenoso café beteado	
34	14	13	18	31	18.20	16.40	17.89	14.06	Limo arenoso amarillo beteado	
35	16	28	19	47	18.00	24.51	26.73	21.01	Arena limosa fina café beteada	
36	17	18	28	46	18.00	23.65	25.80	20.27		
37	19	19	22	31	18.00	15.72	17.15	13.47		
38	21	23	31	54	18.00	27.02	29.47	23.16		
39	20	21	29	50	18.00	24.69	26.93	21.16		
40	26	27	37	64	18.20	30.81	33.61	26.41	Arena limosa beige beteada	

Fuente: PALA.

A continuación se presenta una muestra de cálculo para la profundidad de 10 metros donde se demuestran los resultados y se calcularán los módulos elásticos con base en el apartado 3.1.3.

- Cálculo de N corregidos

- **N<sub>60</sub>**

Ecuación 3.2

$$C_N = \sqrt{\frac{95,76 \text{ KPa}}{(18*3+17*4+18,10*2+17,90*1)\text{KPa}}} = 0,7374$$

$$n_1 = \frac{80 \text{ (martillo con motor)}}{60} = 1,3333$$

$$n_2 = 1 \text{ (profundidad 10 m)}$$

$$n_3 = 1 \text{ (diametro 60 – 120mm)}$$

$$n_4 = 1 \text{ (sin guia)}$$

$$N_{60} = 0,7374 * 10 * 1,3333 * 1 * 1 * 1 = \mathbf{9,83}$$

- **N<sub>55</sub>**

Ecuación 3.3

$$N_{55} = \frac{60}{55} * 9,83 = \mathbf{10,73}$$

- **N<sub>70</sub>**

Ecuación 3.3

$$N_{70} = \frac{60}{70} * 9,83 = \mathbf{8,43}$$

- Cálculo de módulos elásticos
  - Módulo de elasticidad (E)

Según la descripción de la tabla XI, a los 10 metros de profundidad se encuentra una unidad de arena pómez *beige* mica, por lo que se utilizará la ecuación 3.5 y la corrección  $N_{55}$  del valor de N.

$$E = 7\sqrt{10,73} = 22,92 \text{ MPa}$$

- Módulo de *Poisson* ( $\nu$ )

La descripción de la tabla XI dice que a 10 metros de profundidad se encuentra una unidad de arena pómez *beige* mica con compacidad media. Según la tabla I para arenas semidensas los valores del módulo de *Poisson* varían entre 0,25 y 0,40, por lo que se utilizará el valor de 0,30.

$$\nu = 0,30$$

- Módulo de corte (G)

El módulo de corte será calculado según la ecuación 2.4 a partir de los datos de los módulos de elasticidad y *Poisson*.  $E = 22,92 \text{ MPa}$ ,  $\nu = 0,30$ .

$$G = \frac{22,92 \text{ MPa}}{2(1 + 0,30)} = 8,81 \text{ MPa}$$

- Módulo de compresibilidad (K)

El módulo de compresibilidad será calculado con la ecuación 2.5 con los datos de los módulos de elasticidad y *Poisson*.  $E = 22,92 \text{ MPa}$ ,  $\nu = 0,30$ .

$$K = \frac{22,92 \text{ MPa}}{3[1 - 2(0,30)]} = 19,1 \text{ MPa}$$

A continuación se presenta una tabla con los resultados para las profundidades de 1, 10 y 35 metros respectivamente.

Tabla XIII. **Resumen de módulos elásticos calculados por SPT**

<b>Prof. (m)</b>	<b>E (MPa)</b>	<b><math>\nu</math></b>	<b>G (MPa)</b>	<b>K (Mpa)</b>
1	11,21	0,25	4,48	7,47
10	22,92	0,30	8,81	19,1
35	36,19	0,35	13,40	40,21

Fuente: elaboración propia.

### 6.1.2. Método de ondas de superficie

A continuación se describe el equipo utilizado para realizar el ensayo, los pasos a seguir para realizar el ensayo y los cálculos correspondientes de los módulos elásticos.

#### 6.1.2.1. Equipo de ensayo

El equipo utilizado para realizar los ensayos de medición de ondas de superficie es el que se presenta a continuación:

- Sismógrafo digital *Geometrics* ES-3000 de 12 canales.
- Batería de 12 voltios para alimentar al equipo.

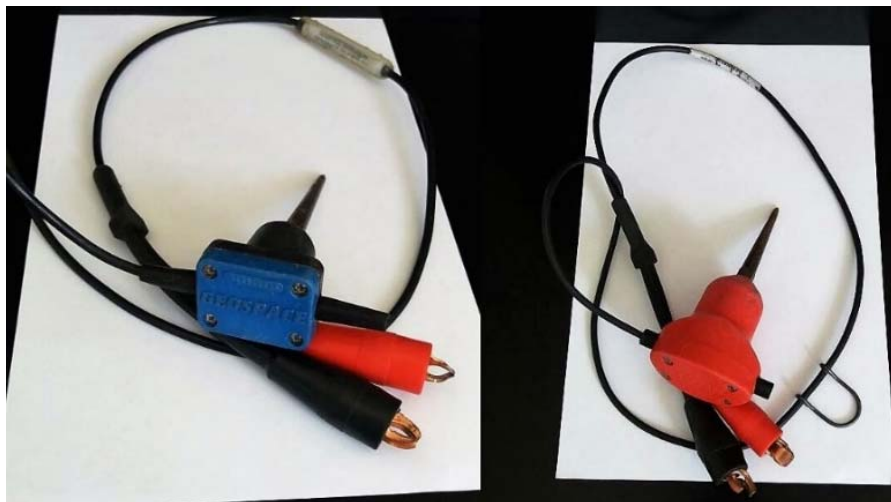
- Computadora portátil.
- Geófonos de onda S y geófonos de onda P
- Cable de refracción: transmite la señal de los geófonos al sismógrafo.
- Fuente sísmica: almágana de 10 libras.

Figura 21. **Sismógrafo, batería y computadora**



Fuente: Geociencia Aplicada, S. A.

Figura 22. **Geófonos de onda P y onda S**

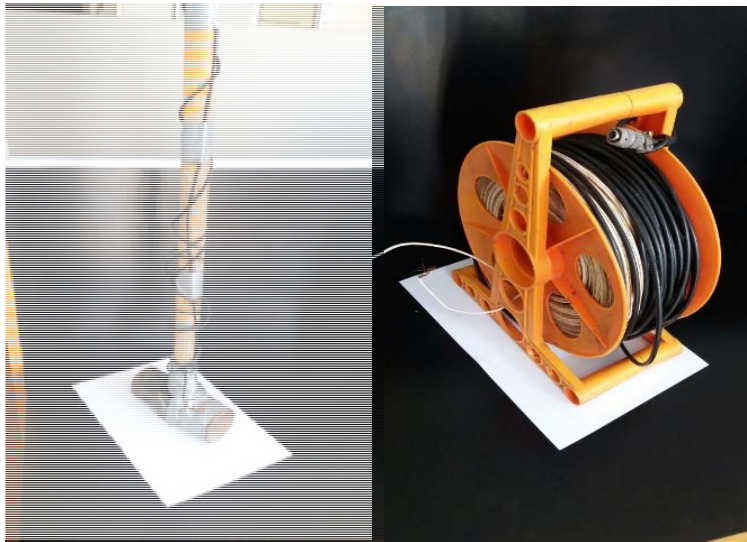


Azul: geófono de onda P. Rojo: geófono de onda S.  
Fuente: Geociencia Aplicada, S.A.

- Cable disparador (*trigger*)

Representa el disparador de la señal del sismógrafo para que comience a grabar; es un cable conectado a la fuente sísmica de manera tal que, en el instante en que se genere el impacto, el sismógrafo comience a grabar las señales provenientes de los geófonos y establezca el tiempo cero.

Figura 23. **Disparador y cable**



Fuente: Geociencia Aplicada, S.A.

#### 6.1.2.2. Procedimiento de ensayo

El procedimiento de ensayo se divide en dos partes: la primera consiste en medir las ondas P mediante la refracción sísmica y la siguiente consiste en medir las ondas S.

1. El primer paso consiste en marcar en campo los puntos en los cuales se colocarán los geófonos mediante una cinta métrica y pintura. Una vez marcados los puntos se procede a enterrar los geófonos de onda P en los lugares marcados.

2. Enterrados los geófonos, el siguiente paso es extender el cable de refracción y conectar cada geófono a la terminal correspondiente del cable, para luego conectar el cable al sismógrafo.

Figura 24. **Vista del tendido de geófonos**



Fuente: Geociencia Aplicada, S.A.

3. El siguiente paso es conectar el sismógrafo al equipo de cómputo y conectar el cable *trigger* al mazo para luego ser conectado al sismógrafo.
4. Cumplidos los pasos anteriores, el equipo está listo para comenzar la parte de refracción del ensayo, por lo tanto se procede a iniciar el golpeo en el primer punto, el cual se localiza a 5 metros por detrás del primer geófono.
5. Durante el golpeo se registran en la computadora los sismogramas correspondientes y se golpea el número de veces que sea necesario para tener un sismograma claro donde se diferencie las



perturbaciones provocadas por el entorno natural y el golpe del mazo.

Figura 25. **Golpeo para provocar ondas sísmicas**



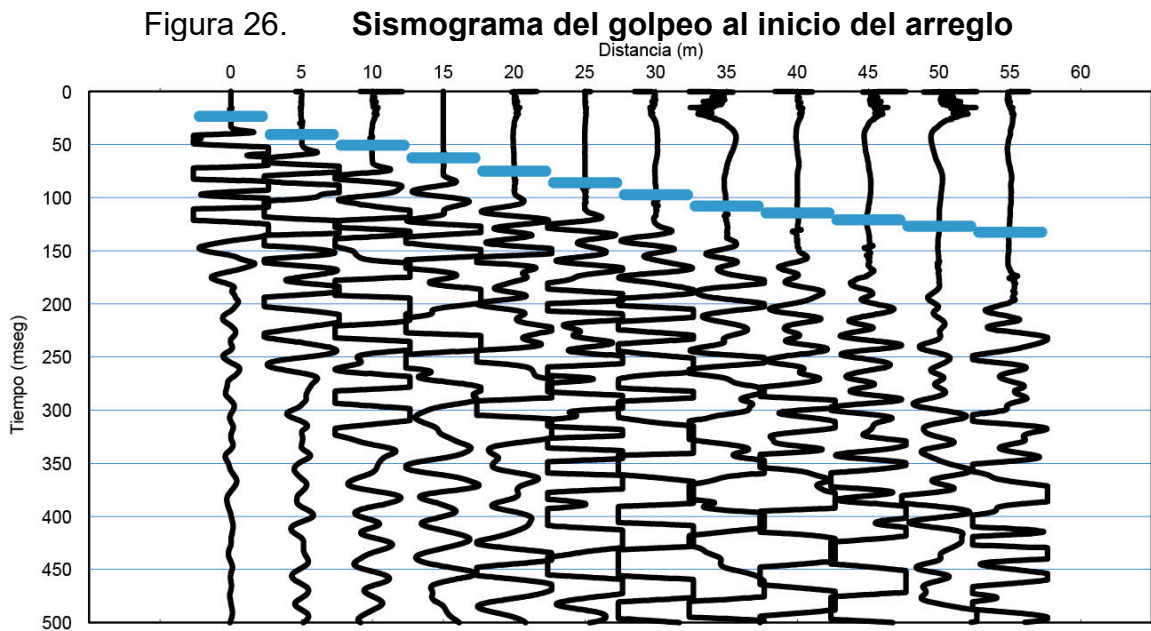
Fuente: Geociencia Aplicada, S.A.

6. El paso 5 se debe repetir al centro del arreglo de geófonos y al extremo contrario donde se empezó el golpeo para poder completar tres puntos de golpeo.
7. Completada la medición de las ondas P, se procede a medir las ondas S, sacando los geófonos azules e insertando los geófonos rojos en los lugares que corresponde.
8. Se procede a realizar los mismos pasos que para la medición de ondas P.
9. Completado el golpeo se procede a registrar las ondas producidas por el ambiente (ruido, vehículos, peatones, etc.), esto se logra registrando 20 intervalos de 60 segundos de datos.

### 6.1.2.3. Aplicación de resultados

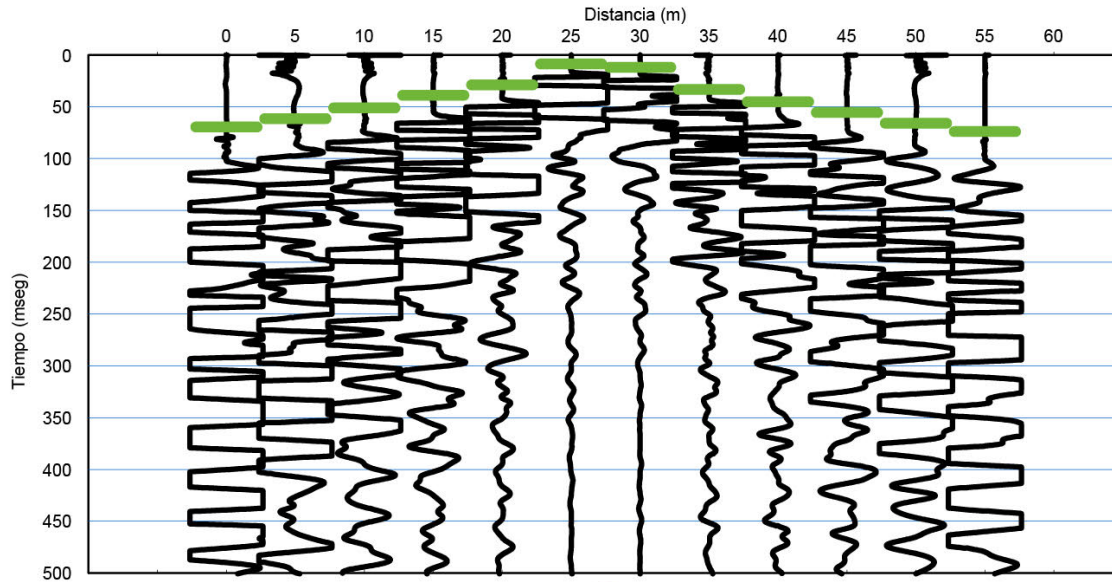
Como se describió en la sección 6.1, los cálculos que se presentan a continuación pertenecen al punto 4. En el apéndice B se muestra la ubicación y dirección de la línea sísmica trabajada en el punto antes mencionado.

A continuación se muestran los datos obtenidos mediante el ensayo MASW y el respectivo cálculo de los módulos elásticos del suelo. Para realizar el procesamiento de los datos se utilizaron las herramientas *Pickwin* y *WaveEq* (*Geometrics*). En la fase de medición de ondas P los datos obtenidos fueron los siguientes:



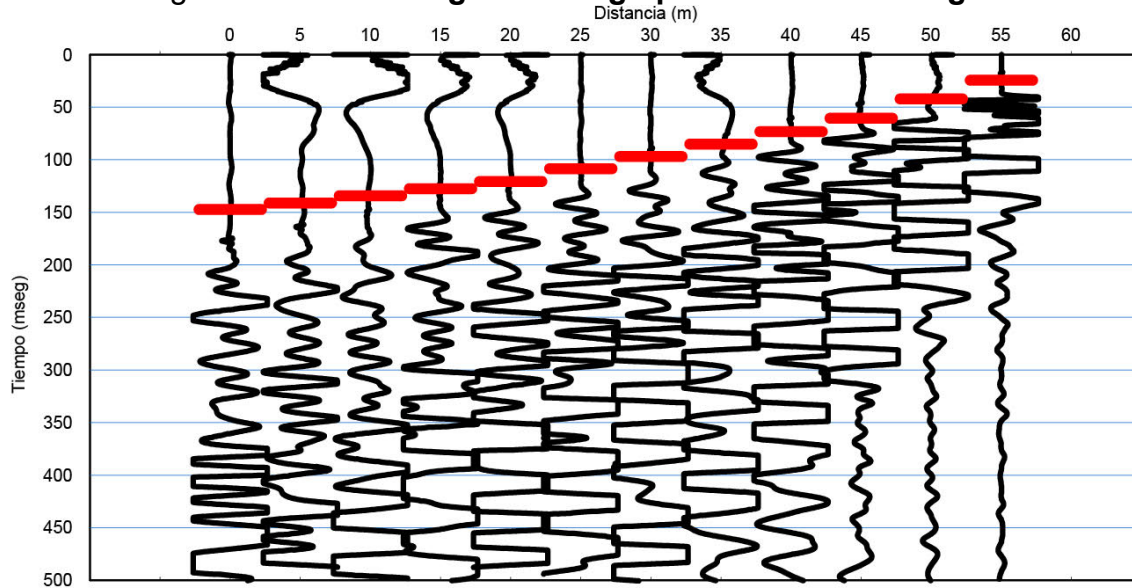
Fuente: Geociencia Aplicada S.A.

Figura 27. **Sismograma del golpeo al centro el arreglo**



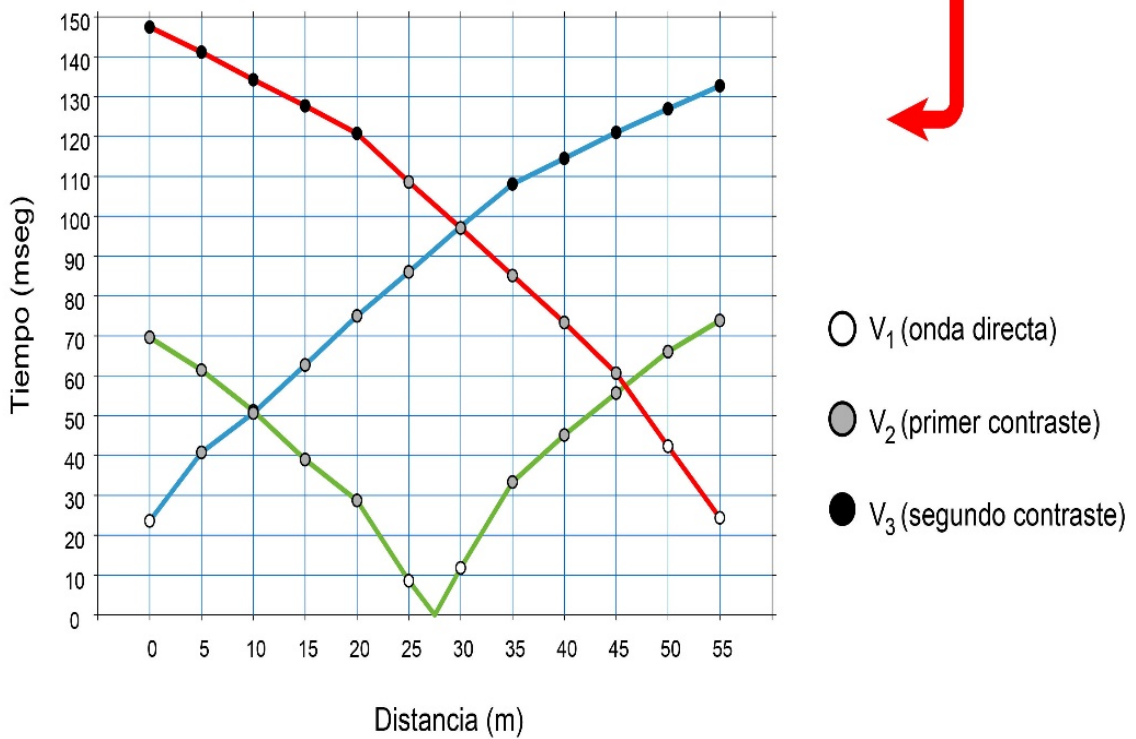
Fuente: Geociencia Aplicada S.A.

Figura 28. **Sismograma del golpeo al final del arreglo**



Fuente: Geociencia Aplicada S.A.

Figura 29. **Dromócrona de la línea sísmica de onda P en el punto 4**



Fuente: Geociencia Aplicada, S.A.

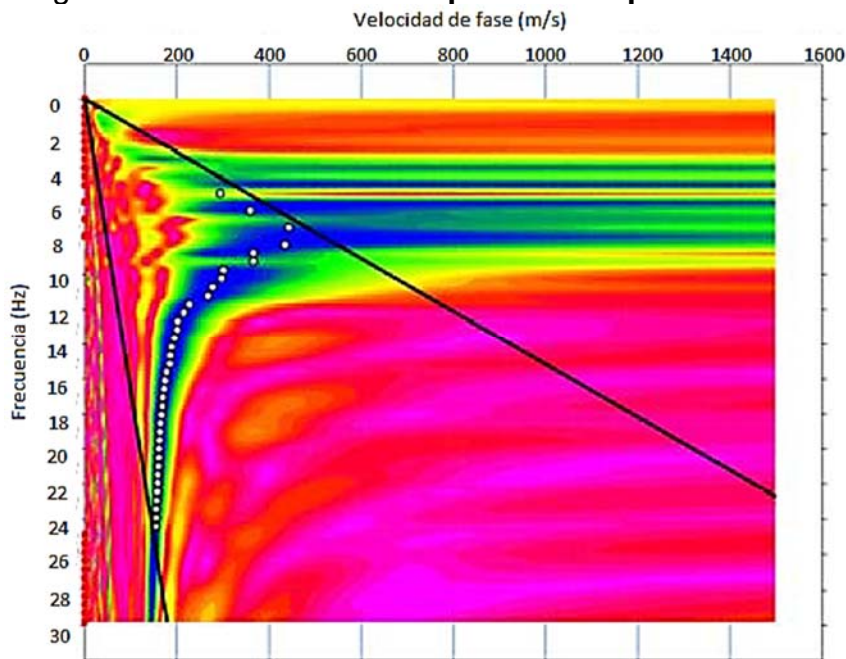
A partir del análisis de los sismogramas se determinaron los primeros arribos de onda, los cuales fueron ploteados para crear la dromócrona. Examinando la dromócrona mediante el software *Pickwin* se determinaron tres capas con velocidades marcadas, las cuales se presentan a continuación (ver apéndice D). De igual manera se determinó con el análisis del sismograma el gráfico de dispersión.

Tabla XIV. **Velocidades de onda P en el punto 4**

Intervalo de profundidad (m)	Velocidad (m/s)
0 – 3,5	300,00
3,5 - 12	435,80
12 – 36	622,48

Fuente: elaboración propia.

Figura 30. **Gráfico de dispersión del punto 4**



Fuente: Geociencia Aplicada, S.A.

A partir del análisis de los datos y las gráficas obtenidas se determinaron las siguientes velocidades de onda S para el punto 4:

Tabla XV. **Velocidades de onda S en el punto 4**

Profundidad (m)	Velocidad (m/s)
0,00	170,61
1,07	173,66
2,31	193,42
3,71	199,87
5,27	188,50
7,01	195,82
8,90	225,21
10,96	235,55
13,19	241,39
15,58	262,28
18,13	273,75
20,85	274,90
23,74	276,17
26,79	276,17
36,43	290,42

Fuente: elaboración propia.

- Determinación de clase de sitio según AGIES NSE 2-10

Para determinar la clase de sitio se usará la ecuación 4.4 con los datos de la tabla XV:

$$Vp_s = \frac{1,07 + 2,31 + 3,71 + \dots + 36,43 \text{ m}}{\frac{1,07}{173,66} + \frac{2,31}{193,42} + \frac{3,71}{199,87} + \dots + \frac{36,43}{290,42} \text{ m/s}} = \frac{193,94 \text{ m}}{0,75099s}$$

$$= 258,44 \frac{m}{s}$$

Según la tabla IX la velocidad de onda de corte de 258,44 m/s corresponde a un sitio tipo D con suelo firme y rígido.

- Cálculo de los módulos elásticos

A continuación se presenta una muestra de cálculo para la profundidad de 10 metros, en que se calcularán los módulos elásticos con base en el apartado 4.6.

Según los datos de la tabla XIV la velocidad de onda P (Vp) es igual a 435,80 m/s. En la tabla XV no se muestra una velocidad para la profundidad exacta de 10 m, por lo que se realizó una interpolación y se determinó que la velocidad de onda S (Vs) es igual a 230,73 m/s para una profundidad de 10 m.

- Módulo de elasticidad dinámico (Ed)

Para el cálculo del módulo de elasticidad dinámico se usará la ecuación 4.5. Con Vp = 435,80 m/s, Vs = 230,73 m/s y ρ = 17,90 kN/m³ = 1 825,29 kg/m³ (tabla XI).

$$E_d = 1\,825,29 \frac{kg}{m^3} * \left(230,73 \frac{m}{s}\right)^2 \left( \frac{3(435,80 \frac{m}{s})^2 - 4(230,73 \frac{m}{s})^2}{(435,80 \frac{m}{s})^2 - (230,73 \frac{m}{s})^2} \right)$$

$$E_d = 253,66 MPa$$

- Módulo de elasticidad estático (E)

Para el cálculo del módulo de elasticidad estático se utilizará la ecuación 4.6.  $E_d = 253,66 MPa = 2\,586,61 kg/cm^2$

$$E = 0,09346 \left(2\,586,61 \frac{kg}{cm^2}\right) + 4,0 = 245,74 kg/cm^2$$

$$E = 24,1 MPa$$

- Módulo de *Poisson* ( $\nu$ )

El módulo de *Poisson* será calculado mediante la ecuación 4.7.  $V_p = 435,80 m/s$ ,  $V_s = 230,73 m/s$ .

$$\nu = \frac{(435,80 \frac{m}{s})^2 - 2(230,73 \frac{m}{s})^2}{2 \left( (435,80 m/s)^2 - (230,73 \frac{m}{s})^2 \right)}$$

$$\nu = 0,31$$

- Módulo de rigidez (G)

El módulo de rigidez será calculado por medio de la ecuación 2.4.

$$E = 24,1 \text{ MPa}, \nu = 0,31$$

$$G = \frac{24,1 \text{ MPa}}{2(1 + 0,31)} = 9,19 \text{ MPa}$$

- Módulo de compresibilidad (K)

El módulo de compresibilidad será calculado por medio de la ecuación 2.5. E = 24,1 MPa,  $\nu = 0,31$ .

$$K = \frac{24,1 \text{ MPa}}{3[1 - 2(0,31)]} = 21,14 \text{ MPa}$$

A continuación se presenta una tabla con los resultados para las profundidades de 1, 10 y 35 metros, respectivamente.

Tabla XVI. **Resumen de módulos elásticos calculados por MASW fase 1**

Prof. (m)	E (MPa)	$\nu$	G (MPa)	K (Mpa)
1	13,30	0,25	5,33	8,79
10	24,1	0,31	9,19	21,14
35	39,75	0,36	14,60	47,62

Fuente: elaboración propia.

## 6.2. Comparación triaxial y CBR contra MASW

En el año 2015 se realizaron estudios geotécnicos y geofísicos en la finca Cumbres de Vista Hermosa, ubicada en la Ciudad de Guatemala, para un proyecto de desarrollo residencial. Dentro de los estudios geotécnicos se



realizaron 48 pozos a cielo abierto de 85 cm de diámetro con profundidades entre 1,5 y 15 metros. De los pozos se tomaron muestras inalteradas en bloque para la ejecución de ensayos triaxiales rápidos (UU) y de los pozos de menor profundidad se tomaron muestras alteradas para la realización del ensayo CBR. Entre de los estudios geofísicos se realizaron 11 perfiles sísmicos de ondas de superficie MASW, los cuales fueron distribuidos en 3 zonas. Los estudios geotécnicos y los estudios geofísicos fueron realizados por empresas privadas.

La finca se encuentra centrada aproximadamente en las coordenadas UTM 15P 773 653 m Este, 1 614 096 m Norte. A continuación se presenta un mapa ilustrando los puntos en los cuales se realizaron ambas pruebas:

Figura 31. **Mapa de ubicación de la zona de ensayo**

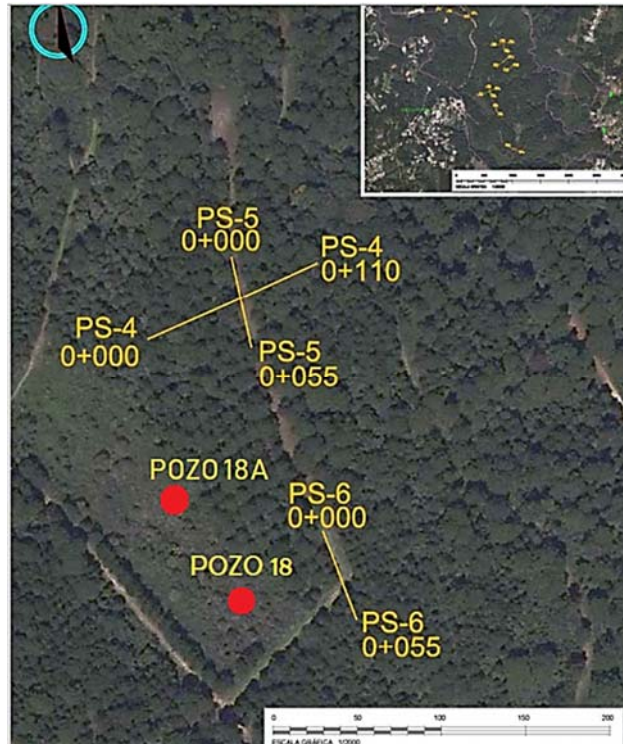


Fuente: elaboración propia.

Para el desarrollo experimental se utilizaron los datos de los pozos 18 y 18A y la línea sísmica 6, la cual corresponde a la zona 2. Del pozo 18 se utilizarán los datos obtenidos de los triaxiales (UU) a las profundidades de 1,10, 2,30, 3,90 y 6,00 metros con presión de confinamiento igual a 0,5 kg/cm<sup>2</sup>. Del pozo 18A se

utilizaron los datos de los ensayos CBR de 10 y 30 golpes realizados para muestras extraídas en el intervalo de profundidad de 0,20 a 1,20 metros.

Figura 32. **Mapa de localización de puntos de ensayo de la zona 2 fase 2**



Fuente: Geociencia Aplicada, S.A.

### 6.2.1. Ensayo triaxial

A continuación se describe el equipo utilizado para realizar el ensayo triaxial no consolidado y no drenado (UU), así como los pasos a seguir y los cálculos correspondientes de los módulos elásticos.

#### 6.2.1.1. Muestra de ensayo

La muestra para realizar el ensayo triaxial debe ser extraída de la pared de un pozo geotécnico. La muestra debe tener la forma de cubo y una

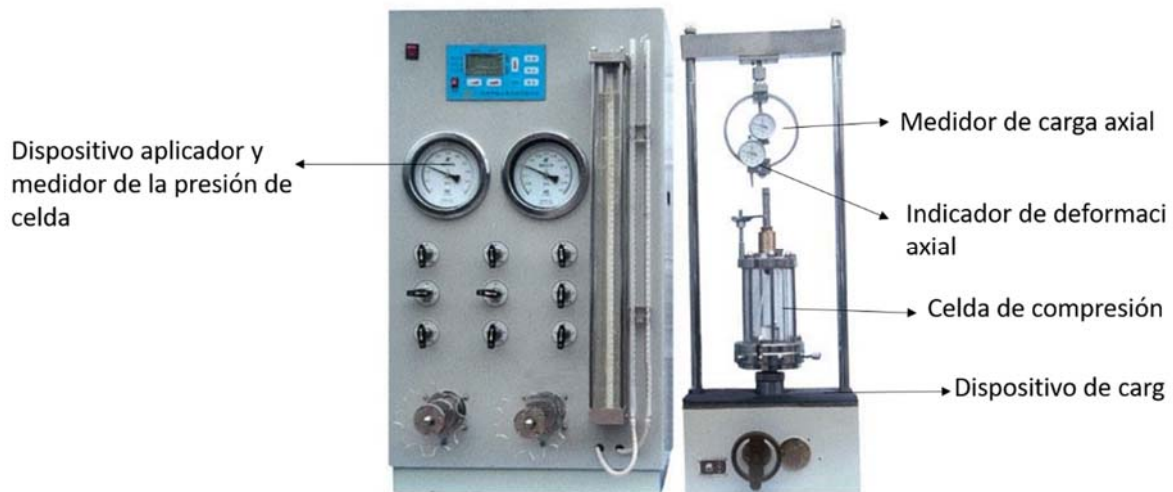
dimensión de 1 pie cubico. A la muestra se le debe aplicar parafina para que mantenga sus propiedades naturales y se considere inalterada.

### 6.2.1.2. Equipo de ensayo

El equipo que se utilizará para realizar el ensayo es el siguiente:

- Dispositivo de carga axial
- Dispositivo de medición de carga axial
- Dispositivo de medición de presión de celda
- Celda de compresión
- Tapa y base del espécimen
- Indicador de deformación
- Membranas de caucho

Figura 33. **Equipo de ensayo triaxial**



Fuente: elaboración propia.

### **6.2.1.3. Procedimiento de ensayo**

1. El primer paso que se realiza es tallar o modelar una probeta cilíndrica de 1,3 pulgadas como mínimo a partir del cubo de suelo inalterado, el cual fue extraído en el trabajo de campo.
2. Obtenida la probeta se procede a encerrarla en la membrana de caucho, sellándola a la base por medio de hules.
3. El siguiente paso es colocar la probeta sellada en la celda de compresión y luego ensamblar la celda al dispositivo de carga.
4. Ensamblada la celda al dispositivo se procede a llevar el pistón de carga axial en contacto con la tapa de la probeta sin aplicar ninguna carga.
5. Cumplido el paso anterior se procede a llenar la celda con líquido hasta llenarla al nivel predeterminado.
6. Llenada la cámara se procede a aplicar presión de celda o presión de confinamiento. Cuando la presión de celda es estable se procede con la aplicación de la carga sin drenar el líquido.
7. Cuando se aplica la carga se deben anotar las lecturas del anillo de carga para las lecturas del deformímetro de 10 en 10 hasta que falle la probeta.

### **6.2.1.4. Aplicación de resultados**

A continuación se presentan los resultados del cálculo de los módulos elásticos del suelo por medio del ensayo triaxial no consolidado y no drenado (UU) en el pozo 18, para las muestras 1, 2, 3 y 4 que corresponden a 1,10, 2,30, 3,90 y 6 metros respectivamente.

En el apéndice G se muestra el perfil respectivo del pozo, junto con la descripción del suelo y los resultados de los ensayos triaxiales. De igual manera se presenta una muestra de cálculo de la muestra 4, la cual corresponde a una profundidad de 6 metros donde se demuestra el procedimiento para encontrar módulos elásticos del suelo.

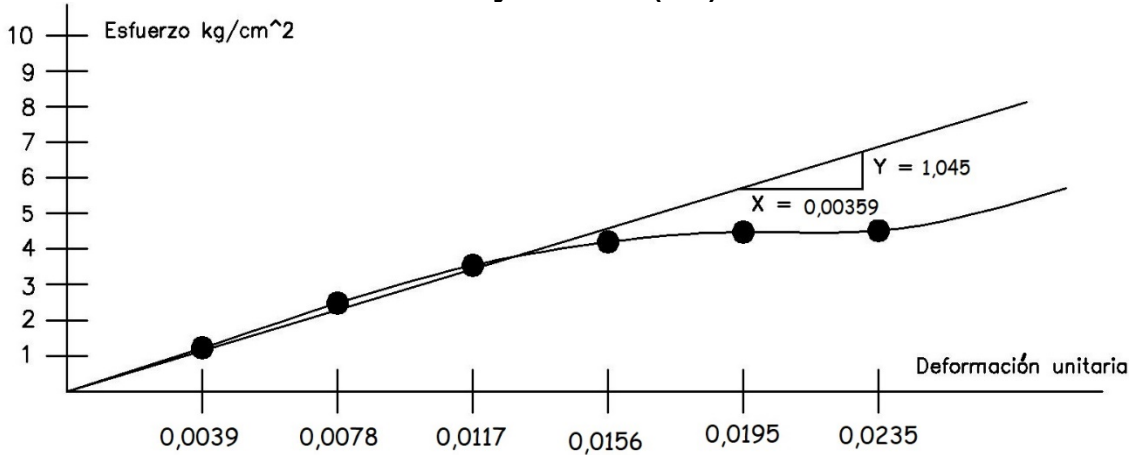
- **Construcción de gráfica de esfuerzo-deformación**

Los datos obtenidos del ensayo triaxial (UU) efectuado a la muestra 4, la cual fue extraída a la profundidad de 6 metros, son los siguientes: (ver apéndice N);

- Diámetro inicial = 6,21 cm
- Longitud inicial = 6,44 cm
- Área inicial = 30,28 cm<sup>2</sup>
- Volumen inicial = 195,05 cm<sup>3</sup>
- Constante del anillo de carga = 0,545 kg/div

A partir de los datos de la tabla XVII se dibujó la figura 34, la cual corresponde a la gráfica de esfuerzo de deformación de la muestra 4, tomando únicamente en cuenta las deformaciones y esfuerzos hasta la falla para la presión de confinamiento de 0,5 kg/cm<sup>2</sup>.

Figura 34. Gráfica de esfuerzo-deformación para la muestra 4 del ensayo triaxial (UU)



Fuente: elaboración propia.

Tabla XVII. Datos obtenidos del ensayo triaxial (UU) para la muestra 4

Lectura deformimetro 0,001"	Lectura anillo 0,0001"	Deformación $\Delta L$ en cm	$\epsilon = \frac{\Delta L}{L_0}$	$1-\epsilon$	Área corregida $cm^2$ $A_c = \frac{A_0}{1-\epsilon}$	Carga P en kg	Esfuerzo $Kg/cm^2$	Presión de confinamiento $kg/cm^2$
10,00	68,00	0,03	0,00	1,00	30,41	37,06	1,22	0,50
20,00	139,00	0,05	0,01	0,99	30,53	75,76	2,48	0,50
30,00	199,00	0,08	0,01	0,99	30,65	108,46	3,54	0,50
40,00	237,00	0,10	0,02	0,98	30,77	129,17	4,20	0,50
50,00	254,00	0,13	0,02	0,98	30,90	138,43	4,48	0,50
60,00	257,00	0,15	0,02	0,98	31,02	140,07	4,51	0,50
70,00	294,00	0,18	0,03	0,97	31,15	160,23	5,14	1,00
80,00	305,00	0,20	0,03	0,97	31,27	166,23	5,31	1,00
90,00	313,00	0,23	0,04	0,96	31,40	170,59	5,43	1,00
100,00	320,00	0,25	0,04	0,96	31,53	174,40	5,53	1,00
110,00	325,00	0,28	0,04	0,96	31,66	177,13	5,59	1,00
120,00	329,00	0,30	0,05	0,95	31,79	179,31	5,64	1,00
130,00	0,00	0,33	0,05	0,95	31,93			2,00
140,00	368,00	0,36	0,06	0,94	32,06	200,56	6,26	2,00
150,00	380,00	0,38	0,06	0,94	32,19	207,10	6,43	2,00
160,00	389,00	0,41	0,06	0,94	32,33	212,01	6,56	2,00
170,00	395,00	0,43	0,07	0,93	32,46	215,28	6,63	2,00
180,00	400,00	0,46	0,07	0,93	32,60	218,00	6,69	2,00
190,00	405,00	0,48	0,07	0,93	32,74	220,73	6,74	2,00
200,00	408,00	0,51	0,08	0,92	32,88	222,36	6,76	2,00

Fuente: elaboración propia.

- Cálculo de los módulos elásticos

- Módulo de elasticidad (E)

Para determinar el módulo de elasticidad se trazó una recta secante a la curva de esfuerzo-deformación y se encontró la pendiente de la misma, la cual corresponde directamente al módulo de elasticidad.

$$E = \frac{1,045 \text{ kg/cm}^2}{0,00359} = 291,08 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} = \mathbf{28,54 \text{ MPa}}$$

- Módulo de *Poisson* ( $\nu$ )

Para encontrar el módulo de *Poisson* se dividió la deformación transversal y la deformación axial sufrida por la probeta. La deformación transversal fue despejada del área corregida.  $A_0 = 31,02 \text{ cm}^2$   $\Delta L = 0,1524 \text{ cm}$

$$\text{Diametro final} = \sqrt{\frac{4 * 31,02 \text{ cm}^2}{\pi}} = 6,28 \text{ cm}$$

$$\Delta D = 6,28 - 6,21 = 0,07 \text{ cm}$$

$$\nu = \frac{0,07 \text{ cm}}{0,1524 \text{ cm}} = \mathbf{0,46}$$

- Módulo de corte (G)

El módulo de corte será encontrado por medio de la ecuación 2.4. Con los datos de módulo de elasticidad y *Poisson*,  $E = 28,54 \text{ MPa}$ ,  $\nu = 0,46$ .

$$G = \frac{28,54 \text{ MPa}}{2(1 + 0,46)} = 9,77 \text{ MPa}$$

- Módulo de compresibilidad (K)

El módulo de compresibilidad será calculado con la ecuación 2.5 con los datos de los módulos de elasticidad y *Poisson*.  $E = 28,54 \text{ MPa}$ ,  $\nu = 0,46$ .

$$K = \frac{28,54 \text{ MPa}}{3[1 - 2(0,46)]} = 118,92 \text{ MPa}$$

A continuación se muestra una tabla con los resultados de los módulos elásticos para las muestras 1, 2, 3 y 4, que corresponden a las profundidades de 1,10, 2,30, 3,90 y 6,00 metros, respectivamente.

Tabla XVIII. **Resultados de los módulos elásticos para el ensayo triaxial**

<b>Prof. (m)</b>	<b>E (MPa)</b>	<b><math>\nu</math></b>	<b>G (MPa)</b>	<b>K (MPa)</b>
1,10	24,47	0,47	8,32	135,94
2,30	29,22	0,47	9,94	162,36
3,90	16,61	0,49	5,58	276,90
6,00	28,54	0,46	9,77	118,92

Fuente: elaboración propia.



## **6.2.2. Ensayo CBR**

A continuación se describe el equipo utilizado para realizar el ensayo, los pasos a seguir para realizarlo y los cálculos correspondientes de los módulos elásticos.

### **6.2.2.1. Muestra de ensayo**

La muestra del ensayo puede ser tomada de material extraído en la excavación de un pozo o puede ser extraída de un banco de materiales. Si el material es tomado de un banco de materiales no se puede realizar la comparación de los métodos, debido a que se desconocería el origen del material y no existirían parámetros de comparación.

### **6.2.2.2. Equipo de ensayo**

El equipo necesario para poder realizar el ensayo es el siguiente:

- Prensa de ensayo según normalización
- Tres moldes cilíndricos metálicos según la norma
- Tres discos separadores
- Trípode para medir el hinchamiento del material
- Sobrecargas metálicas.
- Martillo de compactación de 10 libras.
- Balanzas con capacidad de cien kilogramos y un kilogramo respectivamente.

Figura 35. **Máquina de penetración CBR**



Fuente: *Manual de laboratorio de mecánica de suelos*, Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala.

Figura 36. **Equipo de ensayo CBR**



Fuente: *Manual de laboratorio de mecánica de suelos*, Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala.

### **6.2.2.3. Procedimiento de ensayo**

1. El primer paso para realizar el ensayo es realizar la prueba de compactación de Proctor estándar para definir el porcentaje de humedad óptimo para la compactación de la muestra.
2. Obtenidos los datos de humedad óptima se procede a calcular la cantidad de agua a agregar al suelo para poder obtener esa humedad óptima requerida.
3. Se toman 15 kilogramos de material y se taran e identifican 3 moldes cilíndricos.
4. A los 15 kilogramos de material se les coloca la cantidad de agua obtenida en el inciso 2 y se procede a mezclarlo para que todo el material cuente con la misma humedad.
5. Una vez mezclado el material se realiza el llenado y compactado de los moldes cilíndricos en 5 capas, cada cilindro fue compactado con distinta energía de compactación, el primero fue compactado con 65 golpes por capa, el segundo con 30 y el tercero con 10 respectivamente.
6. Terminada la compactación se procede a colocar los filtros correspondientes a cada cilindro para luego pesarlos, tomar la humedad de compactación y calcular el porcentaje de compactación de los mismos.
7. Completados los pasos anteriores se colocan los collarines y una placa metálica perforada provista de un vástago, así como sobrecargas con un peso de 10 libras a cada uno de los cilindros.
8. Seguidamente se colocan los trípodes con los diales de medición a cada uno de los cilindros y se sumergen los cilindros en agua durante 96 horas.

9. Transcurrido el tiempo de saturación de los cilindros se procede a sacarlos del agua y dejarlos escurrir durante 15 minutos para luego prepararlos para la penetración.
10. Se coloca uno de los cilindros en el equipo de penetración y se apoya el pistón con una carga pequeña, se colocan los diales de lectura de tensión y deformación en cero y se comienza la penetración con una velocidad de 0,05 pulgadas por minuto.
11. Durante el proceso de penetración se anotan las lecturas de la carga en los niveles de penetración de 0,025, 0,050, 0,075, 0,1, 0,2 y 0,3 pulgadas.

#### **6.2.2.4. Aplicación de resultados**

A continuación se presentan los datos obtenidos para los cilindros compactados con 10 y 30 golpes, respectivamente, y el cálculo de los módulos elásticos del suelo para el pozo 18A (ver apéndice S).

- Construcción de gráfica esfuerzo-deformación

Los datos obtenidos del ensayo del cilindro de 10 golpes son los siguientes (ver apéndice U):

- Cilindro de 10 golpes
- Densidad máxima 1 404 kg/m<sup>3</sup>(ver apéndice O)
- Densidad de la muestra 1 336,90 kg/m<sup>3</sup>
- Humedad 33,6 %
- Porcentaje de compactación 84,84 %

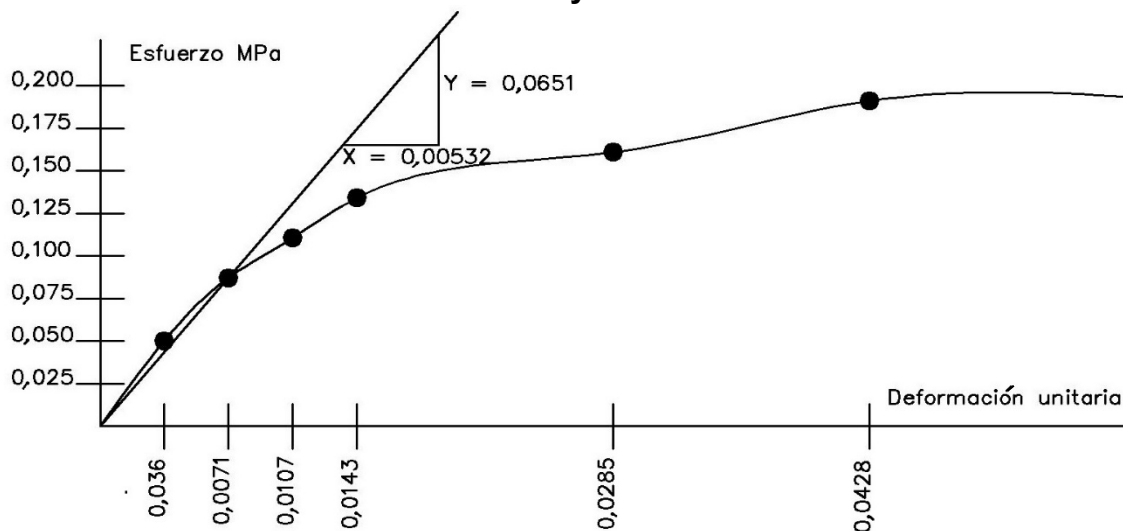
Tabla XIX. Datos de ensayo CBR para cilindro de 10 golpes

Deformación (in)	Deformación (m)	Def unitaria	Carga (lb)	Carga (N)	$\sigma$ (MPa)
0	0,000000	0,0000	0	0,00	0,000
0,025	0,000635	0,0036	22,2	98,75	0,050
0,05	0,001270	0,0071	38,48	171,16	0,087
0,075	0,001905	0,0107	48,84	217,24	0,111
0,1	0,002540	0,0143	59,2	263,32	0,134
0,2	0,005080	0,0285	71,04	315,99	0,161
0,3	0,007620	0,0428	84,36	375,23	0,191

Fuente: elaboración propia.

A partir de los datos tomados del ensayo se construyó la tabla XX donde se calcularon los esfuerzos a los que estaba sometida la probeta según las cargas y las deformaciones que presentó. De igual manera se calculó la deformación unitaria para poder realizar la gráfica de esfuerzo-deformación que se presenta a continuación.

Figura 37. Gráfica de esfuerzo-deformación para cilindro de 10 golpes en ensayo CBR



Fuente: elaboración propia.

- Cálculo de módulos elásticos

- Módulo de elasticidad (E)

Para determinar el módulo de elasticidad se trazó una recta secante a la curva de esfuerzo-deformación y se encontró la pendiente de la misma, la cual corresponde directamente al módulo de elasticidad.

$$E = \frac{0,0651\text{MPa}}{0,00532} = \mathbf{12,23\text{MPa}}$$

- Módulo de *Poisson* ( $\nu$ )

La descripción del apéndice O dice que la muestra extraída corresponde a una unidad de limo café, plástico con traza de arena fina, por lo que se escogió el valor del módulo de *Poisson* igual 0,4.

$$\nu = \mathbf{0,40}$$

- Módulo de corte (G)

El módulo de corte será encontrado por medio de la ecuación 2.4. Con los datos de módulo de elasticidad y *Poisson*,  $E = 12,23 \text{ Mpa}$ ,  $\nu = 0,40$

$$G = \frac{12,23 \text{ MPa}}{2(1 + 0,40)} = \mathbf{4,37 \text{ MPa}}$$

- Módulo de compresibilidad (K)

El módulo de compresibilidad será calculado con la ecuación 2.5 con los datos de los módulos de elasticidad y *Poisson*.  $E = 28,54 \text{ MPa}$ ,  $\nu = 0,46$ .

$$K = \frac{12,23 \text{ MPa}}{3[1 - 2(0,40)]} = 20,38 \text{ MPa}$$

A continuación se muestra una tabla con los resultados de los módulos elásticos para los cilindros de 10 y 30 golpes que corresponden a la profundidad de 1,1 metros.

Tabla XX. **Resultados de los módulos elásticos para el ensayo CBR**

Cilindro	E (MPa)	$\nu$	G (MPa)	K (MPa)
10 golpes	12,23	0,40	4,37	20,38
30 golpes	33,97	0,40	12,13	56,61

Fuente: elaboración propia.

### 6.2.3. Método de ondas de superficie

A continuación se describen los cálculos correspondientes de los módulos elásticos. El procedimiento de ensayo y el equipo es el mismo que el descrito en los apartados 6.1.2.1 y 6.1.2.2

#### 6.2.3.1. Aplicación de resultados

Como se describió en la sección 6.2, los cálculos que se presentan a continuación pertenecen al perfil sísmico 6. En la figura 31 se muestra la ubicación y dirección de la línea sísmica trabajada en el punto antes mencionado.

A continuación se muestran los datos obtenidos mediante el ensayo MASW y el respectivo cálculo de los módulos elásticos del suelo. Para realizar el procesamiento de los datos se utilizaron las herramientas *Pickwin* y *WaveEq* (*Geometrics*).

La siguiente tabla presenta los datos correspondientes a la medición de ondas P en la línea sísmica 6.

**Tabla XXI. Velocidades de onda P para el perfil sísmico 6**

<b>Intervalo de profundidad (m)</b>	<b>Velocidad (m/s)</b>
0,00 - 1,91	300,0
1,91 – 14,54	741,8
14,54 – 36,00	1 397,9

Fuente: Geociencia Aplicada, S.A.

En la fase de medición de ondas S las velocidades encontradas fueron las siguientes:

**Tabla XXII. Velocidades de onda S para el perfil sísmico 6**

<b>Profundidad (m)</b>	<b>Velocidad S (m/s)</b>
0	186,09
1,07	187,84
2,31	163,69
3,71	160,01
5,27	213,82
7,01	252,90
8,90	273,26
10,96	279,32
13,19	286,12
15,58	315,96
18,13	337,83
20,85	393,00
23,74	446,78
26,79	473,77
36,43	478,92

Fuente: elaboración propia.



- Determinación de clase de sitio según AGIES NSE 2-10

Para determinar la clase de sitio se usará la ecuación 4.4 con los datos de la tabla XV.

$$V_{p_s} = \frac{1,07 + 2,31 + 3,71 + \dots + 36,43 \text{ m}}{\frac{1,07}{187,84} + \frac{2,31}{163,69} + \frac{3,71}{160,01} + \dots + \frac{36,43 \text{ m}}{478,92 \text{ m/s}}} = \frac{193,94 \text{ m}}{0,75099 \text{ s}}$$

$$= 349,13 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Según la tabla IX la velocidad de onda de corte de 349,13 m/s corresponde a un sitio tipo D con suelo firme y rígido.

- Cálculo de los módulos elásticos

A continuación se presenta una muestra de cálculo para la profundidad de 6 metros, en que se calcularán los módulos elásticos con base en el apartado 4.6.

Según los datos de la tabla XXII la velocidad de onda P ( $V_p$ ) es igual a 741,8 m/s. En la tabla XXIII no se muestra una velocidad para la profundidad exacta de 6 m, por lo que se realizó una interpolación y se determinó que la velocidad de onda S ( $V_s$ ) es igual a 230,22 m/s para una profundidad de 6 m.

- Módulo de elasticidad dinámico ( $E_d$ )

Para el cálculo del módulo de elasticidad dinámico se usará la ecuación 4.5. Con  $V_p = 741,8 \text{ m/s}$ ,  $V_s = 230,22 \text{ m/s}$  y  $\rho = 1,71 \text{ ton/m}^3 = 1710 \text{ kg/m}^3$

$$E_d = 1\,710 \frac{kg}{m^3} * \left(230,22 \frac{m}{s}\right)^2 \left( \frac{3(741,8 \frac{m}{s})^2 - 4(230,22 \frac{m}{s})^2}{(741,8 \frac{m}{s})^2 - (230,22 \frac{m}{s})^2} \right)$$

$$E_d = 262,24 MPa$$

- Módulo de elasticidad estático (E)

Para el cálculo del módulo de elasticidad estático se utilizará la ecuación 4.6.  $E_d = 262,24 MPa = 2\,674,10 kg/cm^2$

$$E = 0,09346 \left(2\,674,10 \frac{kg}{cm^2}\right) + 4,0 = 253,92 kg/cm^2$$

$$E = 24,90 MPa$$

- Módulo de *Poisson* ( $\nu$ )

El módulo de *Poisson* será calculado mediante la ecuación 4.7.  $V_p = 741,8 m/s$ ,  $V_s = 230,22 m/s$ .

$$\nu = \frac{(741,8 \frac{m}{s})^2 - 2(230,22 \frac{m}{s})^2}{2 \left( (741,8 m/s)^2 - (230,22 \frac{m}{s})^2 \right)}$$

$$\nu = 0,45$$

- Módulo de rigidez (G)

El módulo de rigidez será calculado por medio de la ecuación 2.4.

$E = 24,1 \text{ MPa}$ ,  $\nu = 0,31$

$$G = \frac{24,90 \text{ MPa}}{2(1 + 0,45)} = 8,59 \text{ MPa}$$

- Módulo de compresibilidad (K)

El módulo de compresibilidad será calculado por medio de la ecuación 2.5.  $E = 24,1 \text{ MPa}$ ,  $\nu = 0,31$ .

$$K = \frac{24,90 \text{ MPa}}{3[1 - 2(0,45)]} = 83,00 \text{ MPa}$$

A continuación se presenta una tabla con los resultados para las profundidades de 1,10, 2,30, 3,90 y 6,00 metros respectivamente.

Tabla XXIII. **Resumen de módulos elásticos calculados por MASW fase 2**

<b>Prof. (m)</b>	<b>E (MPa)</b>	<b><math>\nu</math></b>	<b>G (MPa)</b>	<b>K (MPa)</b>
1,10	14,47	0,18	6,13	7,56
2,30	11,69	0,47	3,96	76,13
3,90	8,96	0,47	3,04	56,18
6,00	24,90	0,45	8,59	83,00

Fuente: elaboración propia.

### 6.3. Análisis práctico de los métodos

#### 6.3.1. Análisis de datos obtenidos SPT contra MASW

#### **6.3.1.1. Análisis de resultados obtenidos de SPT**

En la tabla XII se observa que los resultados obtenidos de los módulos elásticos mediante el ensayo SPT coinciden con los parámetros dados por la tabla I para arena semidensa. De igual manera se aprecia que los módulos poseen una tendencia normal, ya que aumentan sus valores en función de la profundidad, lo que indica que, a mayor profundidad, los estratos son más resistentes tanto a la deformación como al corte y al cambio de volumen.

#### **6.3.1.2. Análisis de resultados obtenidos de MASW fase 1**

Analizando la tabla XVI se observa que los resultados obtenidos de los módulos elásticos mediante el ensayo MASW coinciden con los parámetros dados por la tabla I para arena semidensa. De igual manera se aprecia que los módulos poseen una tendencia normal, ya que aumentan sus valores en función de la profundidad, lo que indica que a mayor profundidad los estratos son más resistentes tanto a la deformación como al corte y al cambio de volumen. De igual manera se determinó mediante la velocidad de onda de corte ponderada que el sitio se clasifica como tipo D con suelo firme y rígido, según la clasificación de la norma NSE 2-10 de AGIES.

### **6.3.2. Análisis de datos de triaxial y CBR contra MASW**

#### **6.3.2.1. Análisis de resultados obtenidos de triaxial**

Analizando los resultados de la tabla XVIII se observa que para las 4 profundidades estudiadas los datos obtenidos entran dentro de la categoría de arcilla media según la tabla I. De igual manera se observa que a la profundidad de 3,90 metros se encuentra un estrato de menor resistencia comparado con

los demás estratos. Se observan también altos valores del módulo de *Poisson* cercanos a 0,5, lo que coincide perfectamente con los valores teóricos de la arcilla.

#### **6.3.2.2. Análisis de resultados obtenidos de CBR**

Examinando los resultados compilados en la tabla XX se puede notar que existe una diferencia marcada entre los módulos elásticos obtenidos mediante el cilindro de 10 golpes de compactación y el cilindro de 30 golpes de compactación. Los valores obtenidos en el cilindro de 30 golpes son mucho mayores a los obtenidos con el cilindro de 10 golpes. Esto se debe a que el cilindro de 30 golpes corresponde al 95,22 % de la compactación máxima obtenida en el ensayo de Proctor, es decir que las condiciones del suelo son óptimas, ya que la densidad del suelo es mayor a la densidad natural del mismo, lo que representa resistencias mayores a la deformación, al corte y al cambio de volumen. Sin embargo, el módulo de *Poisson* es el mismo, lo que indica que la relación entre las deformaciones transversales y axiales se mantiene igual.

#### **6.3.2.3. Análisis de resultados obtenidos de MASW fase 2**

Estudiando la tabla XXIII se observa que los resultados obtenidos coinciden con los parámetros dados por la tabla I para arcilla blanda. También se observó dos estratos de menor resistencia en función de sus módulos elásticos, ya que a las profundidades de 2,30 y 3,90 metros se encontraron valores menores que los encontrados para la profundidad de 1,10 metros. De igual manera se observó que para la profundidad de 1,10 metros el módulo de *Poisson* fue mucho menor, lo que provocó que el módulo de compresibilidad fuera menor también.

De igual manera se determinó mediante la velocidad de onda de corte ponderada que el sitio se clasifica como tipo D con suelo firme y rígido, según la clasificación de la norma NSE 2-10 de AGIES.

### 6.3.3. Comparación de resultados

#### 6.3.3.1. Comparación de resultados SPT contra MASW

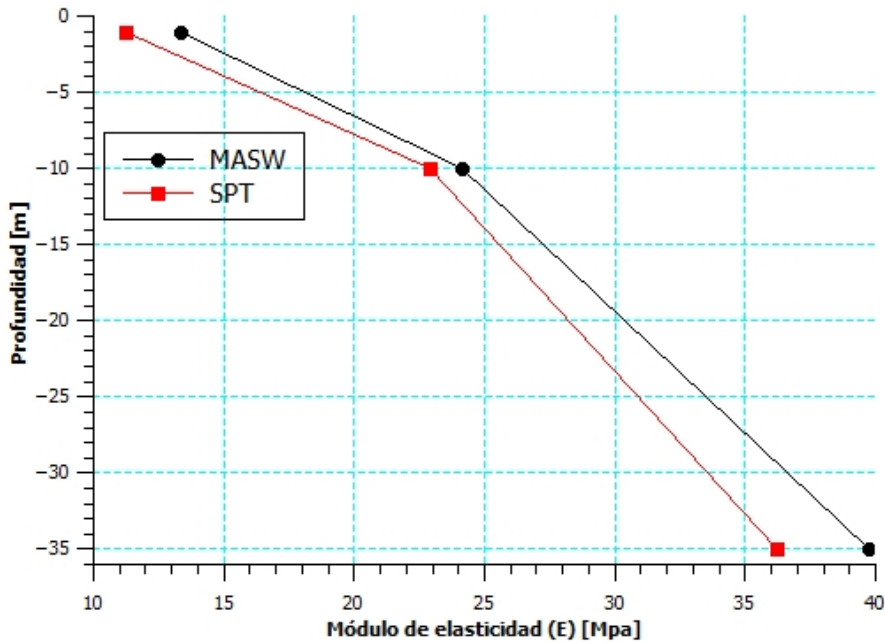
A continuación se presenta una tabla comparativa con los resultados obtenidos y gráficas comparativas de los datos:

Tabla XXIV. **Comparación de resultados SPT contra MASW**

Prof. (m)	Módulo	SPT (MPa)	MASW (MPa)	Variación	
				Absoluta (MPa)	%
1	Elasticidad	11,21	13,3	2,09	15,71
	Poisson	0,25	0,25	0	0,00
	Corte	4,48	5,33	0,85	15,95
	Compresibilidad	7,47	8,79	1,32	15,02
10	Elasticidad	22,92	24,1	1,18	4,90
	Poisson	0,3	0,31	0,01	3,23
	Corte	8,81	9,19	0,38	4,13
	Compresibilidad	19,1	21,14	2,04	9,65
35	Elasticidad	36,19	39,75	3,56	8,96
	Poisson	0,35	0,36	0,01	2,78
	Corte	13,4	14,6	1,2	8,22
	Compresibilidad	40,21	47,62	7,41	15,56

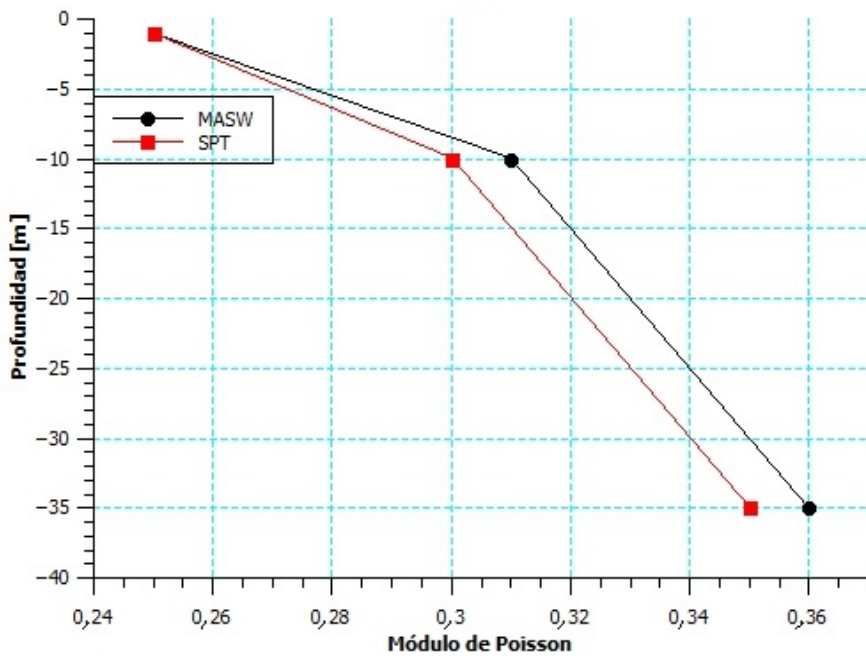
Fuente: elaboración propia.

Figura 38. **Gráfico comparativo del módulo de elasticidad entre SPT y MASW**



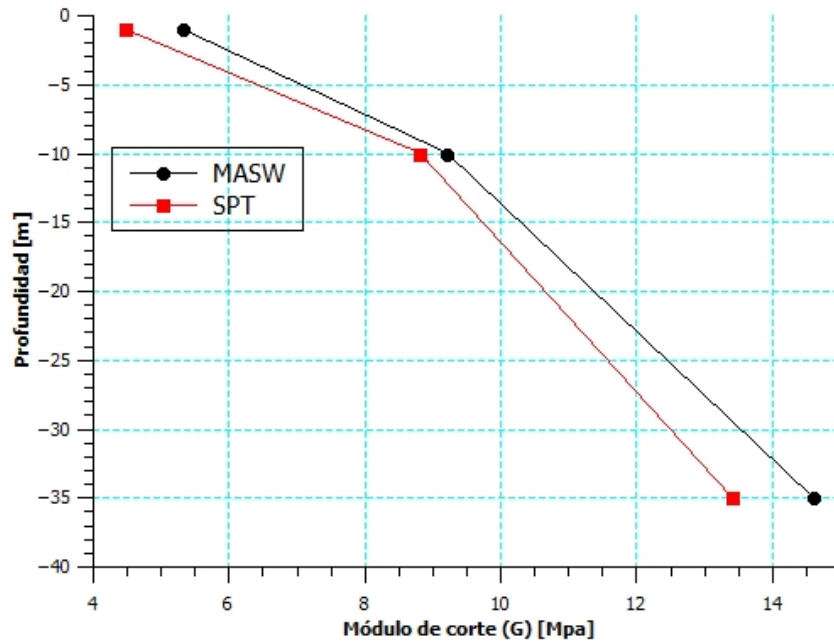
Fuente: elaboración propia.

Figura 39. **Gráfico comparativo del módulo de *Poisson* entre SPT y MASW**



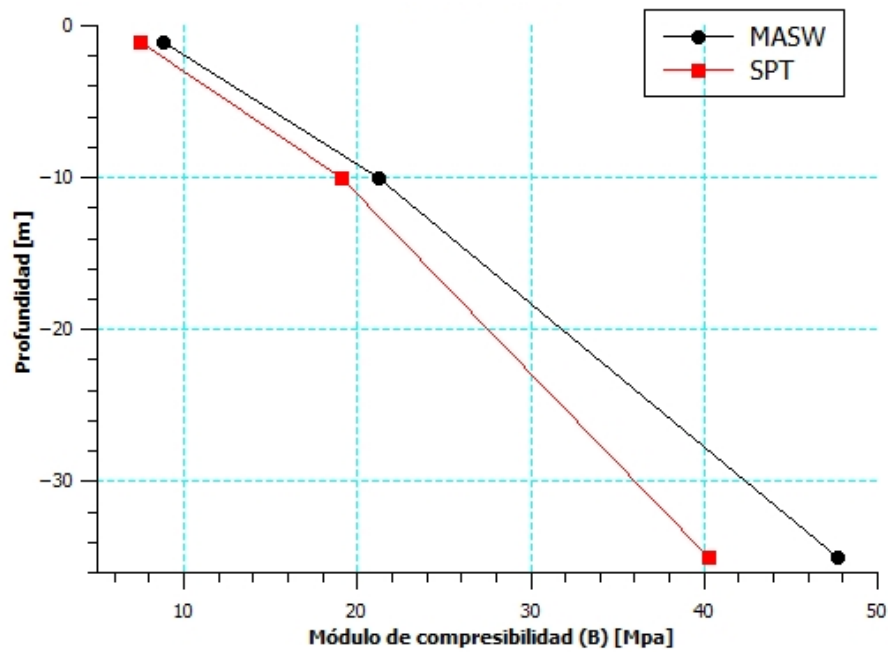
Fuente: elaboración propia.

Figura 40. **Gráfico comparativo del módulo de corte entre SPT y MASW**



Fuente; elaboración propia.

Figura 41. **Gráfico comparativo del módulo de compresibilidad entre SPT y MASW**



Fuente: elaboración propia.



A partir de la tabla y de las gráficas se puede apreciar que no existen diferencias significativas entre ambos métodos, ya que las variaciones se mantuvieron debajo de 5 MPa, excluyendo la variación del módulo de compresibilidad del suelo a los 35 metros, la cual presentó una variación de 7,41 MPa, sin embargo, ambos valores se encuentran en el rango de la tabla I. De igual manera se observó que los resultados de ambos ensayos poseen tendencias similares según se puede apreciar en las gráficas, por lo que se puede decir que los resultados son correctos y válidos para ambos métodos.

### 6.3.3.2. Comparación de resultados triaxial y CBR contra MASW

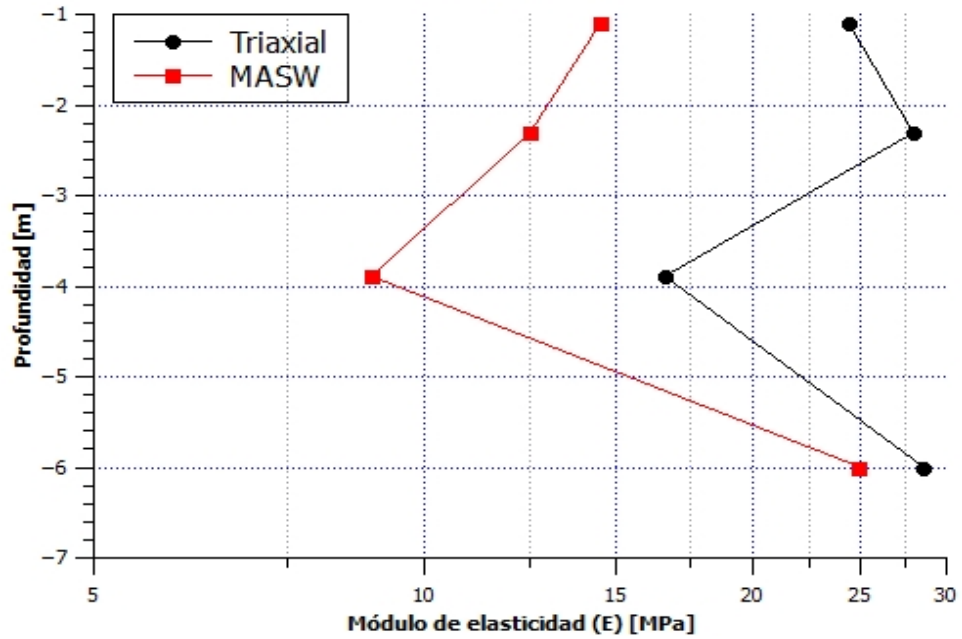
A continuación se presentan tablas comparativas con los resultados obtenidos y gráficas comparativas de los datos:

Tabla XXV. Comparación triaxial contra MASW

Prof. (m)	Módulo	Triaxial (MPa)	MASW (MPa)	Variación	
				Absoluta (MPa)	%
1,10	Elasticidad	24,47	14,47	-10	-40,87
	Poisson	0,47	0,18	-0,29	-61,70
	Corte	8,32	6,13	-2,19	-26,32
	Compresibilidad	135,94	7,56	-128,38	-94,44
2,30	Elasticidad	29,22	11,69	-17,53	-59,99
	Poisson	0,47	0,47	0	0,00
	Corte	9,94	3,96	-5,98	-60,16
	Compresibilidad	162,36	76,13	-86,23	-53,11
3,90	Elasticidad	16,61	8,96	-7,65	-46,06
	Poisson	0,49	0,47	-0,02	-4,08
	Corte	5,58	3,04	-2,54	-45,52
	Compresibilidad	276,9	56,18	-220,72	-79,71
6,00	Elasticidad	28,54	24,9	-3,64	-12,75
	Poisson	0,46	0,45	-0,01	-2,17
	Corte	9,77	8,59	-1,18	-12,08
	Compresibilidad	118,92	83,00	-35,92	-30,21

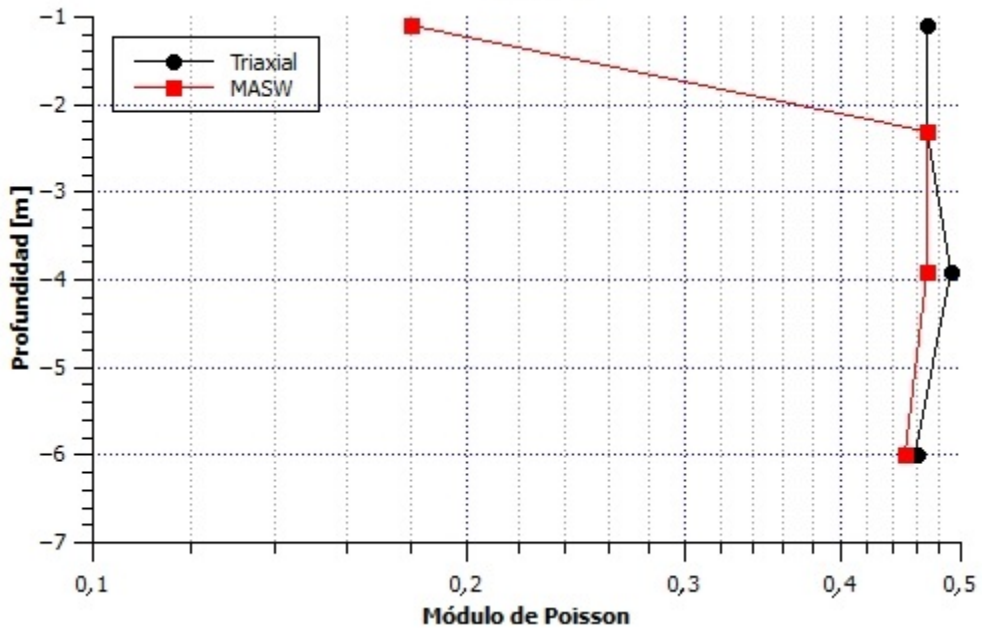
Fuente: elaboración propia.

Figura 42. Gráfico comparativo del módulo de elasticidad entre MASW y el ensayo triaxial



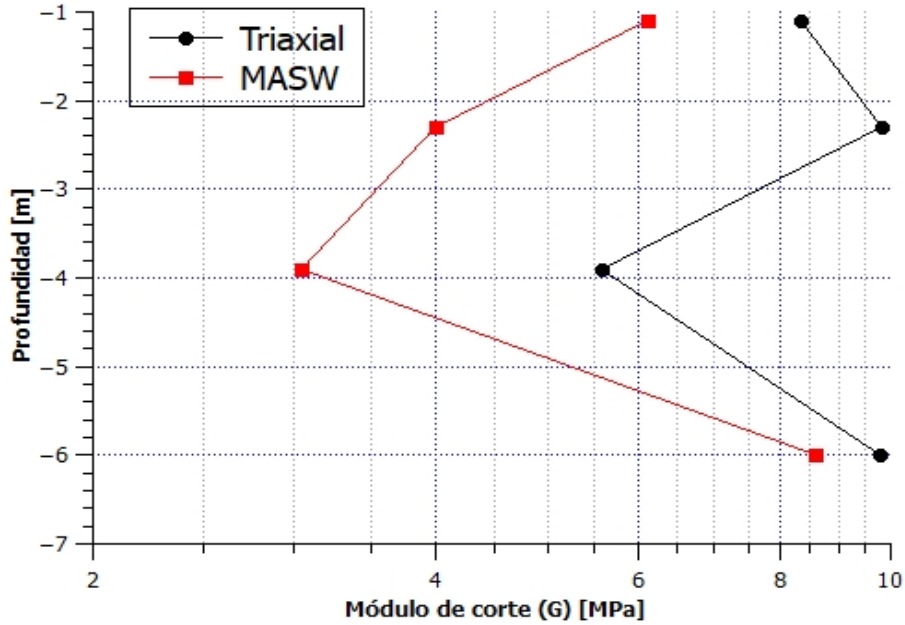
Fuente: elaboración propia.

Figura 43. Gráfico comparativo del módulo de Poisson entre MASW y ensayo triaxial



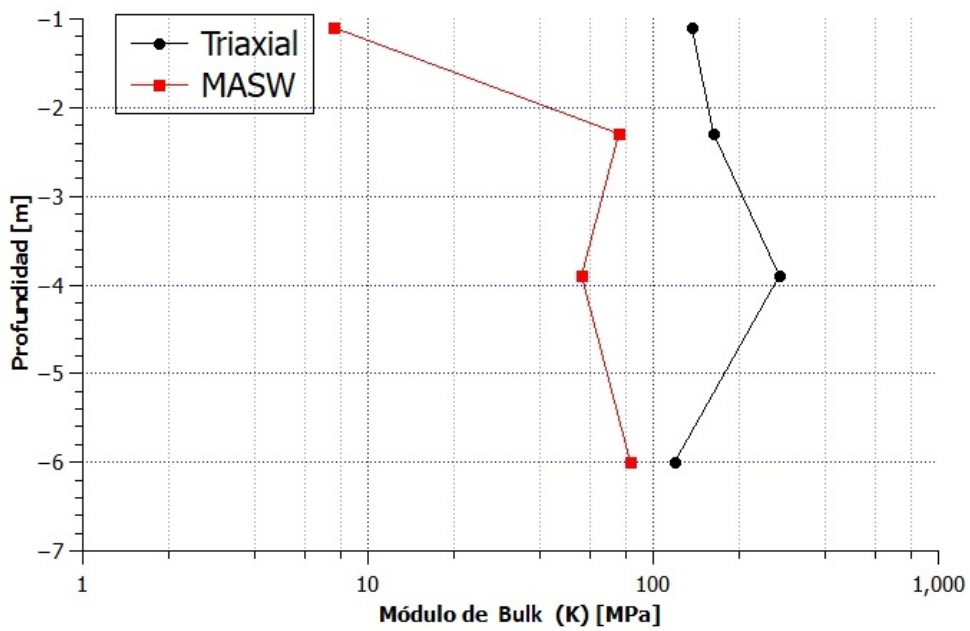
Fuente: elaboración propia.

Figura 44. **Gráfico comparativo del módulo de corte entre MASW y ensayo triaxial**



Fuente: elaboración propia.

Figura 45. **Gráfico comparativo del módulo de compresibilidad entre MASW y ensayo triaxial**



Fuente: elaboración propia.

Comparando los resultados adquiridos por medio del ensayo triaxial y los datos adquiridos por el ensayo MASW compilados en la tabla XXV y graficados en las figuras 42, 43, 44, 45, se puede observar que existe una diferencia en los valores obtenidos mediante ambos métodos. Se observó que esta diferencia es muy marcada dando valores mucho mayores en los resultados obtenidos por el ensayo triaxial. Sin embargo se pudo apreciar con las gráficas comparativas que ambos métodos poseían una tendencia similar y los resultados se acercaban a la profundidad de 6 metros, lo cual se respalda en el análisis de las variaciones, las cuales presentaron valores más bajos.

A pesar de la diferencia grande de los valores por ambos métodos se encontró que a la profundidad de 3,90 metros se encontraba un estrato más débil según sus módulos de elasticidad. De igual manera se observó que los módulos de compresibilidad obtenidos mediante el ensayo triaxial tuvieron valores mucho más altos que los encontrados mediante el MASW, y desde que el módulo de compresibilidad indica la resistencia de un material al cambio de volumen se llegó a la conclusión hipotética de que la presión de confinamiento de la cámara triaxial influyó en los resultados obtenidos, ya que al estar confinados aumentan las resistencias a la deformación, al corte y al cambio de volumen.

**Tabla XXVI. Comparación CBR de 10 golpes contra MASW**

Prof. (m)	Módulo	CBR 10 golpes (MPa)	MASW (MPa)	Variación	
				Absoluta (MPa)	%
1,10	Elasticidad	12,23	14,47	2,24	15,48
	Poisson	0,4	0,18	-0,22	-55,00
	Corte	4,37	6,13	1,76	28,71
	Compresibilidad	20,38	7,56	-12,82	-62,90

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXVII. Comparación CBR de 30 golpes contra MASW

Prof. (m)	Módulo	CBR 30 golpes (MPa)	MASW (MPa)	Variación	
				Absoluta (MPa)	%
1,10	Elasticidad	33,97	14,47	-19,50	-57,40
	Poisson	0,4	0,18	-0,22	-55,00
	Corte	12,13	6,13	-6,00	-49,46
	Compresibilidad	56,61	7,56	-49,05	-86,65

Fuente: elaboración propia.

Contrastando los resultados obtenidos de los módulos elásticos mediante el ensayo CBR y el MASW se encontraron diferencias considerables entre los resultados. Para el cilindro de 30 golpes de compactación se encontraron diferencias muy marcadas, según se puede apreciar en la tabla XXVII, en que se observan diferencias de hasta 49 MPa. Sin embargo, se puede observar que no existen diferencias significativas en los resultados obtenidos por el ensayo CBR con el cilindro de 10 golpes de compactación y el ensayo MASW, únicamente se observa una diferencia considerable para el módulo de compresibilidad, el cual dio una diferencia de 12,82 MPa.

## CONCLUSIONES

1. Desde el punto de vista técnico la principal ventaja que poseen los métodos tradicionales de geotecnia sobre el método geofísico es que no presentan limitación del terreno para ser realizados, es decir se pueden realizar en cualquier topografía y no se necesita mucho terreno libre para realizarlos. Sin embargo, las desventajas que poseen son muy significativas, como el hecho de que estos ensayos solo devuelven resultados del punto exacto donde se realizan. Por el contrario, el método geofísico devuelve un perfil en dos dimensiones con velocidades de ondas sísmicas con las cuales se pueden realizar varias correlaciones y así tener resultados de una zona más amplia en comparación con los métodos tradicionales.
2. Comparando los resultados obtenidos de los módulos elásticos calculados por medio del ensayo de penetración estándar SPT y el ensayo geofísico de ondas de superficie MASW, se concluye que los resultados obtenidos por el método geofísico son válidos y confiables, debido a que no presentaron diferencias significativas respecto a los resultados del método SPT y se encuentran dentro de los rangos dados por la tabla I para arena semidensa.
3. Analizando los resultados de la tabla XXV se observa que existen variaciones significativas entre los resultados de los métodos triaxial y MASW. Sin embargo, al analizar las gráficas de las figuras 35, 36, 37 y 38 se observa que ambos resultados poseen una tendencia similar y las variaciones disminuyen drásticamente para la profundidad de 6 metros.

Otro dato que llama la atención es que el módulo de compresibilidad (K) encontrado mediante el ensayo triaxial es mucho más grande que el encontrado por el MASW. Tomando en cuenta que el módulo de compresibilidad indica la resistencia de un material al cambio de volumen, se llegó a la conclusión hipotética que los resultados obtenidos por medio del ensayo triaxial son afectados por la presión de confinamiento de la cámara, aumentando los valores de los módulos elásticos para muestras tomadas cerca de la superficie, debido a que la presión de confinamiento es mayor a la presión natural que ejerce el suelo para estratos cercanos a la superficie. Esto se respalda en el hecho de que para la profundidad de 6 metros los valores de los módulos elásticos presentaron variaciones aceptables.

4. Al observar el resultado del ensayo CBR respecto al MASW se obtuvo que para el cilindro de 10 golpes, el cual corresponde al 84,84 % de la compactación óptima de la muestra, los resultados no presentan variaciones significativas a pesar de que las condiciones naturales del suelo han sido cambiadas mediante la saturación y compactación del suelo. Sin embargo, la compactación no ha sido suficiente para aumentar de manera considerable la densidad de la muestra respecto a la densidad natural de la misma. Por lo tanto se concluye que los resultados del ensayo MASW son válidos y correctos. En cambio, el cilindro de 30 golpes que corresponde al 95,22 % de la compactación óptima del material, sí presenta grandes variaciones respecto a los resultados obtenidos por el ensayo MASW. Estas variaciones se dan debido a que las condiciones naturales del suelo han sido alteradas de manera considerable mediante la compactación del suelo, aumentando el número de golpes de compactación y consiguientemente aumentando la densidad el material, lo que provoca que los módulos elásticos del

suelo sean mayores. Se concluye que no puede realizarse una comparación entre el CBR a 95,22 % de compactación óptima contra el ensayo MASW, debido a que las propiedades del suelo ya son muy diferentes. Sin embargo, el método MASW sí puede ser utilizado para verificar si alguna de las capas que conforman una carretera cumple con los requerimientos establecidos según el ensayo CBR.

5. A partir de la teoría y de los resultados se determinó que el método de ondas de superficie es adecuado para terrenos amplios con topografía no muy quebrada. Este ensayo puede utilizarse para explorar el subsuelo y para determinar propiedades geotécnicas del mismo, por medio de correlaciones o para verificar el grado de compactación del suelo en un relleno controlado o en alguna de las capas de una carretera. Su costo es relativamente alto pero lo compensa el hecho de poder obtener muchos datos a partir de correlaciones y el campo que abarcan los resultados. El ensayo SPT es adecuado para cualquier tipo de terreno sin rocas y para exploraciones de mucha profundidad. Puede ser utilizado para la exploración del subsuelo y para determinar propiedades geotécnicas del suelo por medio de correlaciones. Este es el ensayo más económico pero su costo puede llegar a ser muy elevado si se requiere más de una perforación y la profundidad de las mismas. El ensayo triaxial es adecuado únicamente para determinar parámetros geotécnicos y las muestras se pueden extraer de cualquier terreno, su costo no es muy alto pero únicamente devuelve valores de un solo punto y profundidad. El ensayo CBR es adecuado únicamente para carreteras debido a que fue diseñado únicamente para esos fines.





## RECOMENDACIONES

1. Se recomienda complementar el ensayo MASW mediante el ensayo SPT o la excavación de pozos para determinar la densidad de los estratos estudiados.
2. Se recomienda siempre realizar una visita de campo antes elegir cualquier método a realizar para cualquier estudio, para visualizar las condiciones del terreno en función de las ventajas y desventajas de cada método.
3. Si se desea encontrar los módulos elásticos del suelo en condiciones naturales por medio del ensayo CBR, se recomienda usar el cilindro que contenga el menor porcentaje de compactación.
4. Se recomienda investigar la teoría planteada en este trabajo de graduación sobre los resultados del ensayo triaxial para calcular si los módulos elásticos son afectados por la presión de confinamiento de la cámara triaxial en las muestras cercanas a la superficie.
5. Se recomienda evaluar el efecto de la compactación del ensayo CBR en el cálculo de los módulos elásticos.



## BIBLIOGRAFÍA

1. Asociación Guatemalteca de Ingeniería Estructural y Sísmica. *Normas de seguridad estructural de edificios y obras de infraestructura para la República de Guatemala NSE 2-10*. Guatemala: AGIES, 2010. 63 p.
2. BOWLES, Joseph. *Foundation analysis and design*. 5ta ed. McGraw-Hill 1997.1207p.
3. BRAJA M. Das. *Fundamento de ingeniería geotécnica*. 4ta ed. Cengage Learning, 2015. 658 p.
4. *Correlaciones geotécnicas (5) y ensayos in situ: el SPT y el módulo de deformación*. En: *Estudios geotécnicos*. GEOSUPPORT, 2014. [en línea]. <http://www.estudiosgeotecnicos.info/index.php/spt-modulo-de-deformacion-correlacion/>. [Consulta: 10 de mayo de 2017].
5. GARCÍA VALDÉS, Oscar Andrés. *Comparación del material de desecho procedente de arcilla cocida y material selecto para la utilización de subbases en carreteras*. Trabajo de graduación de Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala, 2013. 84 p.
6. HERNANDEZ J.C.; OCETE, I. *Propuesta de correlación entre propiedades geotécnicas de materiales de edad triásica en las cordilleras béticas*. España: Universidad de Granada. [en línea].

<http://www.geotecnicadelsur.com/wp-content/uploads/2012/10/Ponencia-C.B.R.pdf>. [Consulta: 5 de mayo de 2017].

7. MENDOZA SANTA MARÍA, Julio Nery. *Uso de refracción sísmica y análisis multicanal de ondas superficiales para la determinación de módulos elásticos, en la finca Viento Blanco, San Vicente Pacaya, Escuintla*. Trabajo de graduación de Ingeniero Geólogo, Universidad de San Carlos de Guatemala, Centro Universitario del Norte, 2015, 78p
8. *Multichannel Analysis of Surface Waves (MASW)*. [en línea]. <http://www.MASW.com/index.html>. [Consulta: 18 de mayo de 2017].
9. NARANJO AGUAY, Héctor; DRANICHNIKOV, Tatiana. *Cálculo de capacidad portante basado en geofísica y método convencional*. Universidad Politécnica Salesiana, 2012. 200 p.
10. NIJ PATZÁN, Jéser Esau de Jesús. *Guía práctica para el cálculo de capacidad de carga en cimentaciones superficiales, losas de cimentación, pilotes y pilas perforadas*. Trabajo de graduación de Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala, 2009. 386 p.
11. ÓLAFSDÓTTIR, Elín. *Multichannel Analysis of Surface Waves for assessing soil stiffness*. Trabajo de graduación de Msc. en Ingeniería Civil, Escuela de ingeniería y Ciencias Naturales, Universidad de Islandia, 2016. 174p.

12. PIERRI PALMA, Ileana Felicia. *Evaluación de los parámetros de corte en suelos cohesivos saturados, mediante pruebas de compresión triaxial: consolidado no drenado y consolidado drenado*. Trabajo de graduación de Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala, 2011. 95 p.
13. RAMOS SOBERANIS, Lorenzo Joel. *Diseño de pavimento de adoquín y línea de conducción de agua potable para el Cantón La Caridad, San Vicente Pacaya*. Trabajo de graduación de Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala, 2003. 112 p.
14. UNDERWOOD, Deborah; HAYASHI, Koichi. *Overview of surface waves*. 16 p. [Consulta: 2018].



# APÉNDICES

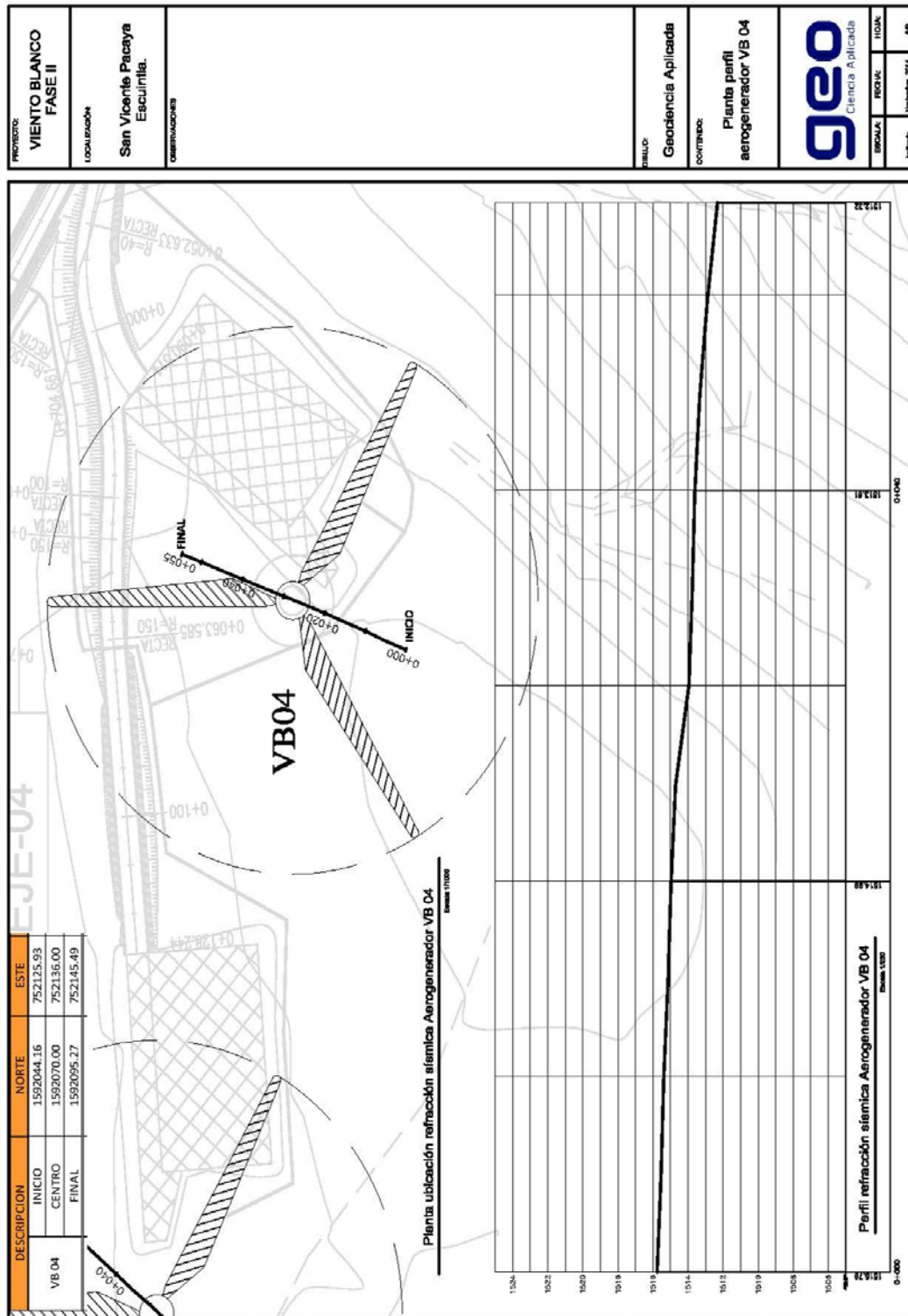
Apéndice A. Localización de puntos de sonde en la finca Viento Blanco, Escuintla.



Fuente: Geociencia Aplicada S.A.



Apéndice B. Planta y perfil del punto 4 finca Viento Blanco, Escuintla.

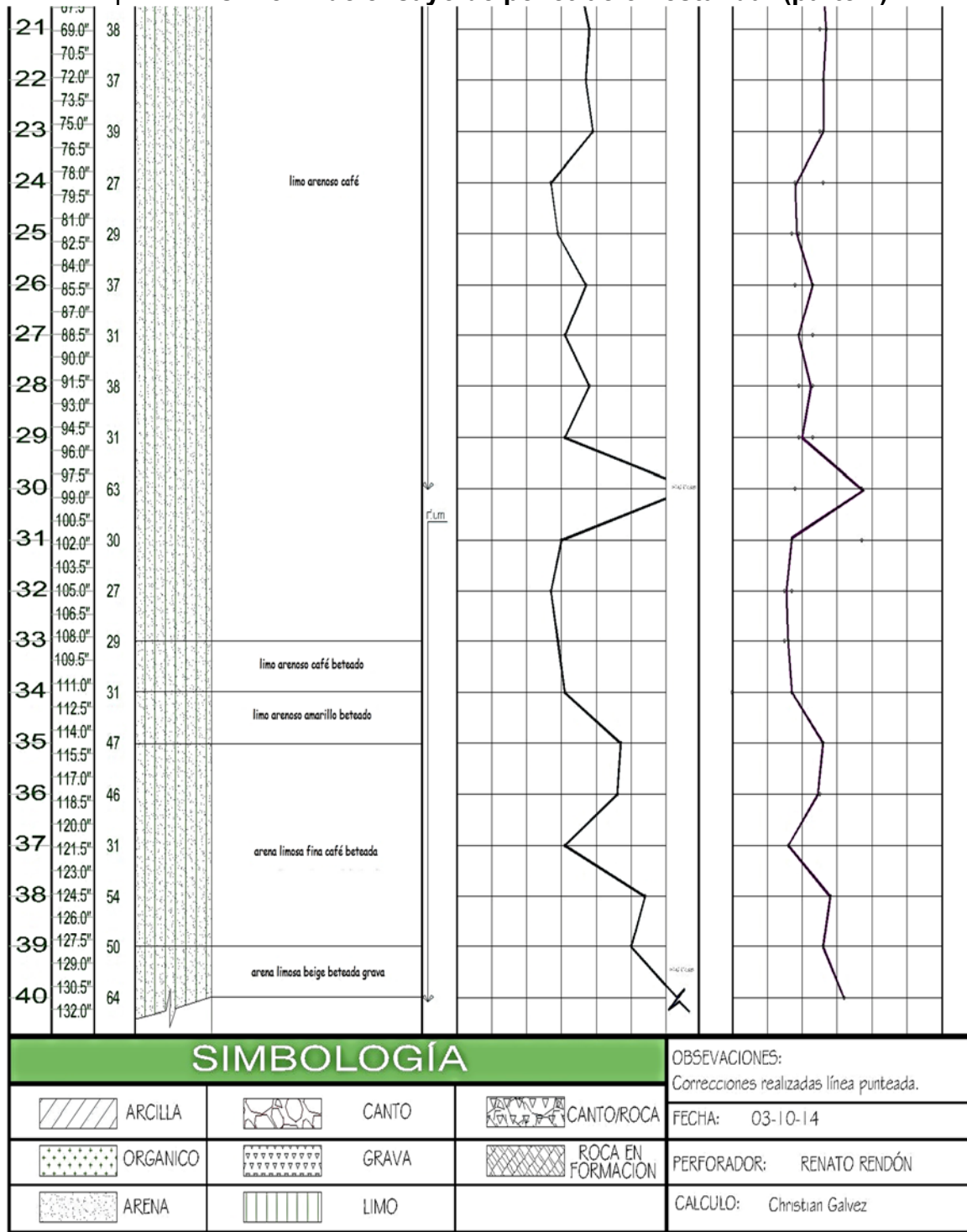


PROYECTO: <b>VIENTO BLANCO FASE II</b>						
LOCALIZACIÓN: <b>San Vicente Pacaya Escuintla.</b>						
CONSTRUCCIONES						
FINALEO: <b>Geociencia Aplicada</b>						
CONTENIDO: <b>Planta perfil aerogenerador VB 04</b>						
 Geociencia Aplicada						
<table border="1"> <tr> <td>BRANCA:</td> <td>PROYECTO:</td> <td>HOJA:</td> </tr> <tr> <td>Instituto:</td> <td>Fecha:</td> <td>04</td> </tr> </table>	BRANCA:	PROYECTO:	HOJA:	Instituto:	Fecha:	04
BRANCA:	PROYECTO:	HOJA:				
Instituto:	Fecha:	04				

Fuente: Geociencia Aplicada S.A



### Apéndice C. Perfil de ensayo de penetración estándar (parte 2)



Fuente: PALA

**Apéndice D. Compilación de velocidades de onda P para los diferentes sitios de ensayo en la finca Viento Blanco, Escuintla**

Sitio	Profundidad 1 (m)	Profundidad 2 (m)	Velocidad 1 (m/s)	Velocidad 2 (m/s)	Velocidad 3 (m/s)
1	3.93 ± 1.46	10.43 ± 0.62	300.00	404.33	594.86
2	3.09 ± 0.94	8.00 ± 1.10	300.00	447.26	611.45
3	4.24 ± 0.82	9.09 ± 1.42	300.00	441.41	607.16
4	3.52 ± 0.78	11.98 ± 0.81	300.00	435.80	622.88
5	1.88 ± 1.29	6.93 ± 1.93	300.00	412.32	520.16
6	3.33 ± 0.73	7.41 ± 1.96	300.00	473.29	628.13
7	4.56 ± 0.66	10.86 ± 0.81	300.00	525.01	700.06
<b>Promedio General</b>	<b>3.51 ± 1.26 (Var. 36%)</b>	<b>9.24 ± 2.19 (Var. 24%)</b>	<b>300.00 ± 0.00 (Var. 0%)</b>	<b>448.49 ± 40.71 (Var. 9%)</b>	<b>612.10 ± 53.05 Var. (9%)</b>

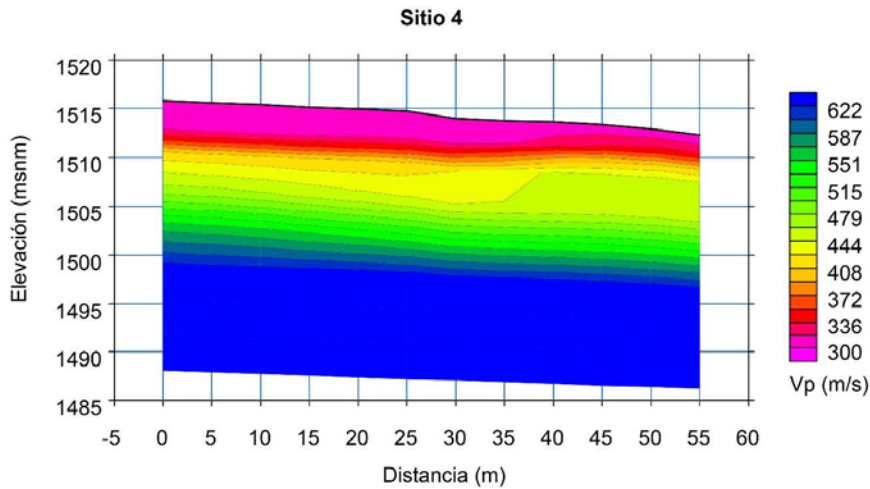
Fuente: Geociencia Aplicada, S.A.

**Apéndice E. Resultados de velocidades de onda S para los diferentes sitios de ensayo en la finca Viento Blanco, Escuintla**

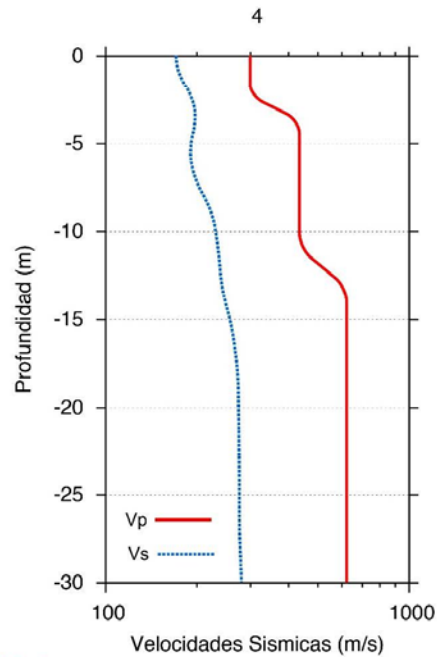
Profundidad (m)	Vs (m/s) para cada Sitio							Vs General
	1	2	3	4	5	6	7	
0.00	196.80	149.70	178.51	170.61	170.52	171.18	173.05	172.91 ± 13.9
1.07	194.70	149.54	177.90	173.66	175.50	170.65	174.73	173.81 ± 13.3
2.31	199.28	169.73	185.37	193.42	200.23	180.18	184.73	187.56 ± 10.9
3.71	239.16	203.59	189.82	199.87	200.92	192.56	173.71	199.95 ± 20.0
5.27	270.88	216.37	258.08	188.50	173.50	219.87	162.53	212.82 ± 41.1
7.01	264.95	236.70	247.01	195.82	166.87	215.88	169.52	241.29 ± 38.2
8.90	258.72	263.11	234.88	225.21	178.63	213.13	194.95	224.09 ± 31.3
10.96	233.80	262.42	300.16	235.55	191.99	215.55	210.37	235.69 ± 36.1
13.19	246.78	253.92	263.94	241.39	216.04	234.59	229.72	240.91 ± 15.9
15.58	282.39	271.49	257.66	262.28	245.83	274.00	252.16	263.69 ± 13.0
18.13	320.19	286.47	267.35	273.75	267.90	311.84	259.10	283.80 ± 23.6
20.85	345.34	293.53	284.97	274.90	275.62	331.96	262.46	295.54 ± 31.2
23.74	338.59	295.40	287.94	276.17	278.78	339.11	263.66	297.09 ± 30.2
26.79	309.27	262.85	279.42	276.17	276.95	310.81	262.65	282.59 ± 19.9
36.43	354.82	306.50	358.30	290.42	284.58	351.13	265.50	315.89 ± 38.3
<b>Vps - AGIES</b>	<b>291.64</b>	<b>261.11</b>	<b>274.45</b>	<b>249.29</b>	<b>235.53</b>	<b>271.08</b>	<b>229.82</b>	<b>240.01 ± 52.4</b>

Fuente: Geociencia Aplicada, S.A.

Apéndice F. Perfil de ondas P y ondas S en el sitio 4 finca Viento Blanco, Escuintla



Tomografía Sísmica ↑



Perfiles de Velocidades ↑

Estudio de Geofísica Viento Blanco Fase II – San Vicente Pacaya, Escuintla		Sísmica de Refracción y MASW – Perfil 4 Resultados	
Noviembre 2014	Escala: indicada		<b>Figura B4</b>

Fuente: Geociencia Aplicada, S.A.

Apéndice G. Perfil de pozo 18

A-21

Dr. Rodolfo Semrau Lago

GEOTECNIA Y CIMENTACIONES

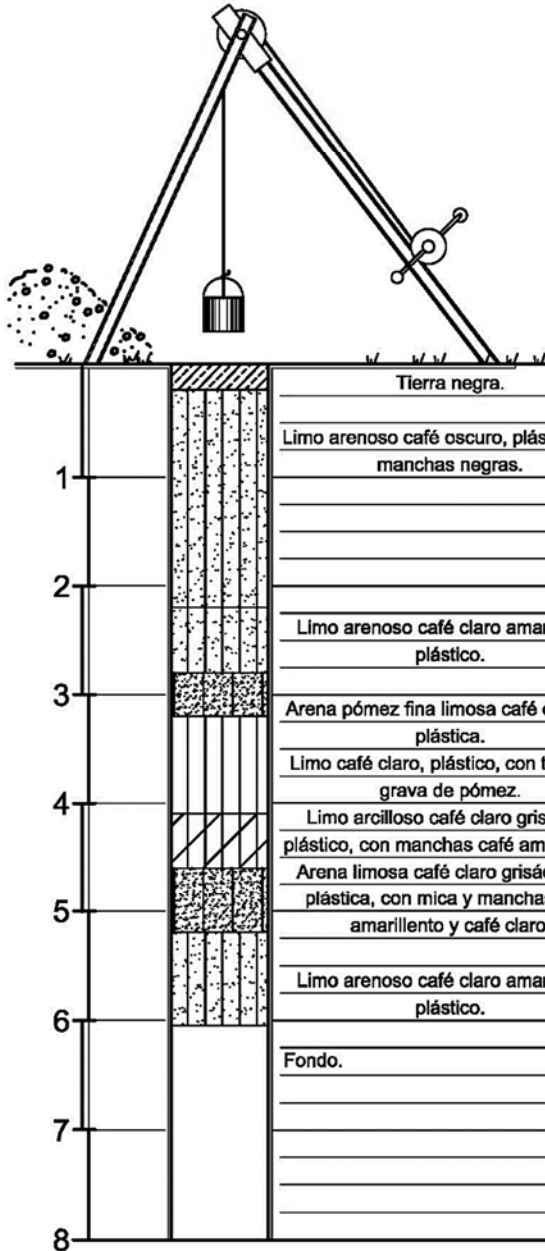
POZO 18

REGISTRO DE POZO

PROYECTO LEGADO DEL BOSQUE

LUGAR FINCA CUMBRES DE VISTA HERMOSA

FECHA 23 de marzo de 2015



CLASIFICACIÓN	ENSAYOS					
	HUM %	LL / IP %	PASA 200 %	$\gamma$ ton/m <sup>3</sup>	C / $\phi$ ton/m <sup>2</sup> grados	P <sub>c</sub> ton/m <sup>2</sup>
MH	26	53/21	83	1.82	26/26°	60
MH	54	53/16	83	1.53	9/22°	60
MH	68	74/18	91	1.12	6/18°	---
MH	35	73/19	83	1.71	12/25°	---

Fuente: Laboratorio del Dr. Rodolfo Semrau Lago.

Apéndice H. Hoja de datos de ensayo triaxial pozo 18 muestra 1

**Dr. Rodolfo Semrau Lago**


$C = 25,8 \frac{kg}{cm^2}$   
 $\theta = 26^\circ$

ENSAYO DE COMPRESION TRIAXIAL

PROYECTO: Cumbres FECHA: 24/3/15 POZO PERFORACION: 18 MUESTRA: 1  
DESCRIPCION: Árrolla arenosa capa plástica PROFUNDIDAD: 1.10 m PROBETA: \_\_\_\_\_

TIPO DE ENSAYO (UU)(C-U)(D) PRESION DEL CONFINAMIENTO \_\_\_\_\_ Kg/cm<sup>2</sup> CONSTANTE DEL ANILLO 0.545 Kg/div

HUMEDAD	INICIAL VERIFICACION	INICIAL PROBETA	FINAL PROBETA
TARRO	<u>01-57</u>	<u>01-35</u>	
PBH (gr)	<u>212.2</u>	<u>442.0</u>	
PBS (gr)	<u>171.2</u>	<u>361.7</u>	
TARA (gr)	<u>50.1</u>	<u>54.0</u>	
DIF. (gr)			
PNH (gr)			
PNS (gr)			
W %	<u>33.9</u>	<u>26.1</u>	

DATOS DE LA MUESTRA		FALLA
Do	<u>6.48</u> cm	PLASTICA: _____
Lo	<u>6.48</u> cm	FRAGIL: _____
Ao	_____ cm <sup>2</sup>	
Vo	_____ cm <sup>3</sup>	
PNHo	<u>388.0</u> gr	
$\delta$	<u>1.82</u> ton/m <sup>3</sup>	
$\delta_D$	<u>1.44</u> ton/m <sup>3</sup>	wopt _____ %

LECTURA DEFORMIMETRO 0.001"	LECTURA ANILLO 0.0001"	DEFORMACION $\Delta L$	$\epsilon = \frac{\Delta L}{L_0}$	1 - $\epsilon$	AREA CORREGIDA $A_c = \frac{A_0}{1 - \epsilon}$	CARGA P en Kg	ESFUERZO $\frac{P}{A_c}$ en $\frac{Kg}{cm^2}$
10	75		30				
20	233		40				
30	427		50				
40	544		60				
50	581		70				
60	590		80				
70	584		90				
80	612		+100				
90	615		10				
+100			20				
10			30				
20			40				
30			50				
40			60				
50			70				
60			80				
70			90				
80			+500				
90			10				
+200			20				
10			30				
20			40				
30			50				
40							
50							
60							
70							
80							
90							
+300							
10							
20							

Fuente: Laboratorio del Dr. Rodolfo Semrau Lago.

**Dr. Rodolfo Semrau Lago**

Geotecnia y Cimentaciones

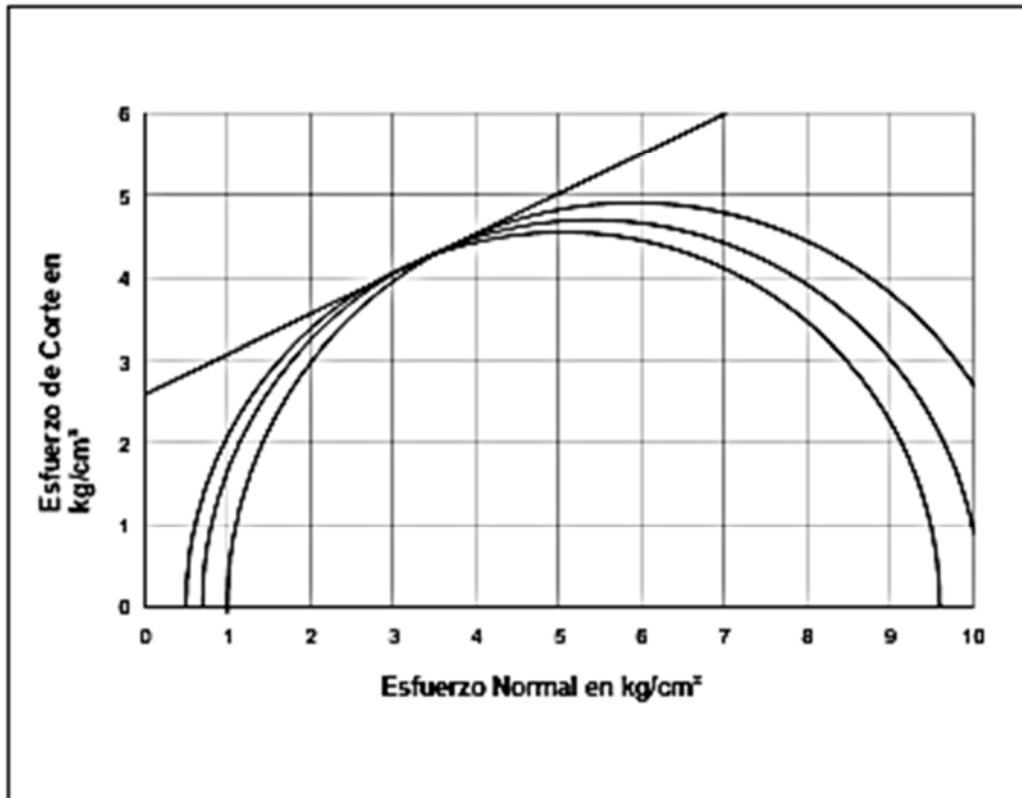
**ENSAYO DE COMPRESION TRIAXIAL TX/UU**  
**CIRCULOS DE MOHR**

PROYECTO: LEGADO DEL BOSQUE LUGAR: FINCA CUMBRES DE VISTA HERMOSA  
 POZO No. 18 MUESTRA No. 1 PROF: 1.10 metros  
 DESCRIPCIÓN: Limo arenoso café, plástico

---

P.U.H.: 1.82 Ton/m<sup>3</sup> CONTENIDO DE HUMEDAD %: 26.1 %  
 Gs: ... e<sub>s</sub>: ... SATURACIÓN: ...

FECHA: 24 de marzo de 2015



Cohesión	2.58 kg/cm <sup>2</sup>	∅	28 Grados
----------	-------------------------	---	-----------

Fuente: Laboratorio del Dr. Rodolfo Semrau Lago.



Apéndice J. Hoja de datos de ensayo triaxial pozo 18 muestra 2  
**Dr. Rodolfo Semrau Lago**


$C = 8.9 \text{ t/m}^2$   
 $\theta = 29^\circ$

**ENSAYO DE COMPRESION TRIAXIAL**

PROYECTO: Cumbres FECHA: 24/3/15 POZO PERFORACION: 18 MUESTRA: 2  
 DESCRIPCION: Arcilla arenosa capé de plástica PROFUNDIDAD: 2.30 m PROBETA: \_\_\_\_\_

TIPO DE ENSAYO (UU)(C-U)(D) PRESION DEL CONFINAMIENTO \_\_\_\_\_  $\text{Kg/cm}^2$  CONSTANTE DEL ANILLO \_\_\_\_\_  $\text{Kg/div}$

HUMEDAD	INICIAL VERIFICACION	INICIAL PROBETA	FINAL PROBETA
TARRO	CL-453	CL-10	
PBH (gr)	130.3	357.7	
PBS (gr)	95.9	250.7	
TARA (gr)	50.1	52.9	
DIF. (gr)			
PNH (gr)			
PNS (gr)			
W %	52.8	54.1	

DATOS DE LA MUESTRA		FALLA
Do	6.31 cm	PLASTICA: _____
Lo	6.38 cm	FRAGIL: _____
Ao	_____ $\text{cm}^2$	
Vo	_____ $\text{cm}^3$	
PNHo	304.8 gr	
$\delta$	1.53 $\text{ton/m}^3$	$\delta_{\text{max}}$ _____ $\text{ton/m}^3$
$\delta_D$	0.99 $\text{ton/m}^3$	wopt _____ %

LECTURA DEFORMIMETRO 0.001"	LECTURA ANILLO 0.0001"	DEFORMACION $\Delta L$	$\epsilon = \frac{\Delta L}{L_0}$	1 - $\epsilon$	AREA CORREGIDA $A_c = \frac{A_0}{1 - \epsilon}$	CARGA P en Kg	ESFUERZO $\frac{P}{A_c}$ en $\frac{\text{Kg}}{\text{cm}^2}$
10	73		30				
20	78		40				
30	87		50				
40	235		60				
50	237		70				
60	268		80				
70	280		90				
80	295		+400				
90	299		10				
+100			20				
10			30				
20			40				
30			50				
40			60				
50			70				
60			80				
70			90				
80			+500				
90			10				
+200			20				
10			30				
20			40				
30			50				
40							
50							
60							
70							
80							
90							
+300							
10							
20							

Fuente: Laboratorio del Dr. Rodolfo Semrau Lago.

Apéndice K. Resultados del ensayo triaxial del pozo 18 muestra 2

A-244

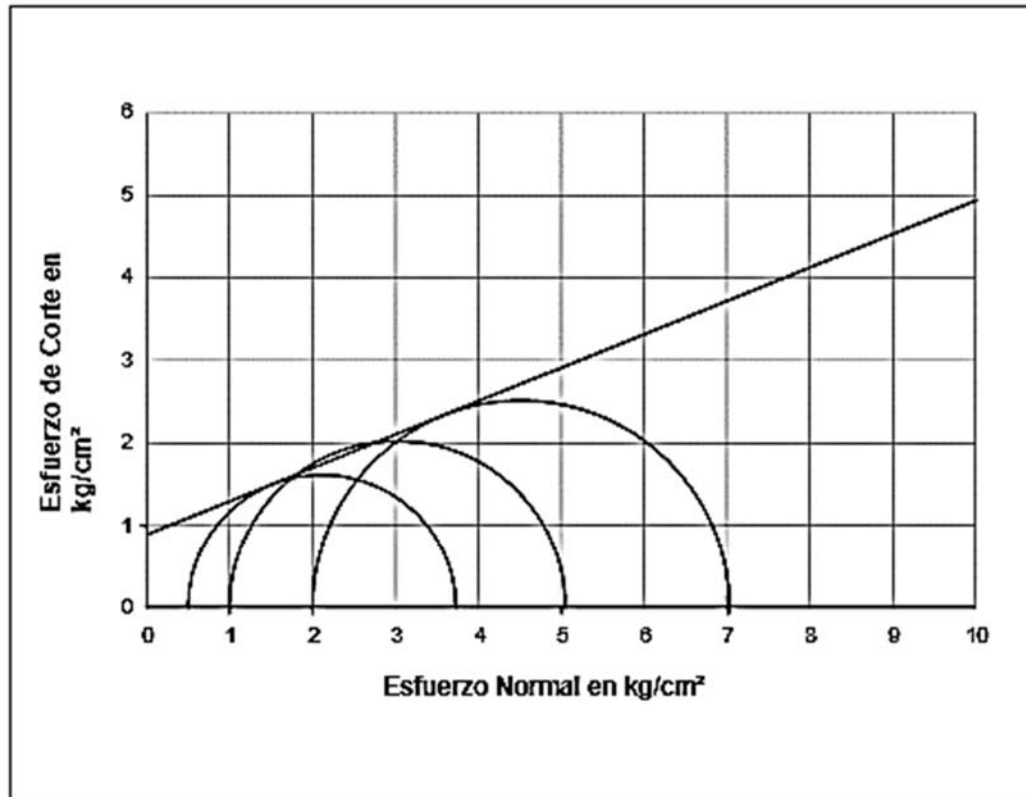
**Dr. Rodolfo Semrau Lago**

Geotecnia y Cimentaciones

**ENSAYO DE COMPRESION TRIAXIAL TX/UU**  
**CIRCULOS DE MOHR**

PROYECTO: LEGADO DEL BOSQUE LUGAR: FINCA CUMBRES DE VISTA HERMOSA  
 POZO No. 18 MUESTRA No. 2 PROF: 2.30 metros  
 DESCRIPCIÓN: Limo arenoso café, plástico

P.U.H.: 1.53 Ton/m<sup>2</sup> CONTENIDO DE HUMEDAD %: 54.1 %  
 Gs: — es: — SATURACIÓN: —  
 FECHA: 24 de marzo de 2015



Cohesión	0.89 kg/cm <sup>2</sup>	∅	22 Grados
----------	-------------------------	---	-----------

Fuente: Laboratorio del Dr. Rodolfo Semrau Lago.

Apéndice L. Hoja de datos de ensayo triaxial pozo 18 muestra 3  
**Dr. Rodolfo Semrau Lago**


$C = 5.5 \text{ t/m}^2$   
 $\theta = 18^\circ$

**ENSAYO DE COMPRESION TRIAXIAL**

PROYECTO: Cumbres FECHA: 3/6/15 POZO PERFORACION: 18 MUESTRA: 3  
 DESCRIPCION: Arquilla arenosa cape duro plastica PROFUNDIDAD: 3.90 m PROBETA: \_\_\_\_\_

TIPO DE ENSAYO (UU)(C-U)(D) PRESION DEL CONFINAMIENTO \_\_\_\_\_ Kg/cm<sup>2</sup> CONSTANTE DEL ANILLO \_\_\_\_\_ Kg/div

HUMEDAD	INICIAL VERIFICACION	INICIAL PROBETA	FINAL PROBETA
TARRO	CL-16	T-1	
PBH (gr)	209.0	282.5	
PBS (gr)	145.3	188.7	
TARA (gr)	54.3	51.2	
DIF. (gr)			
PNH (gr)			
PNS (gr)			
W %	70.0	68.2	

DATOS DE LA MUESTRA		FALLA
Do	6.37 cm	PLASTICA: _____
Lo	6.46 cm	FRAGIL: _____
Ao	cm <sup>2</sup>	
Vo	cm <sup>3</sup>	
PNHo	231.3 gr	
$\delta$	1.12 ton/m <sup>3</sup>	$\delta$ max. _____ ton/m <sup>3</sup>
$\delta_D$	0.67 ton/m <sup>3</sup>	wopt _____ %

LECTURA DEFORMIMETRO 0.001"	LECTURA ANILLO 0.0001"	DEFORMACION $\Delta L$	$\epsilon = \frac{\Delta L}{L_0}$	1 - $\epsilon$	AREA CORREGIDA $A_c = \frac{A_0}{1 - \epsilon}$	CARGA P en Kg	ESFUERZO $\frac{P}{A_c}$ en Kg/cm <sup>2</sup>
10	92		30				
20	81		40				
30	102		50				
40	111		60				
50	115		70				
60	117		80				
70			90				
80	138		+100				
90	145		10				
+100	150		20				
10	154		30				
20			40				
30			50				
40	167		60				
50	178		70				
60	185		80				
70	192		90				
80	199		+500				
90	205		10				
+200	209		20				
10			30				
20			40				
30			50				
40							
50							
60							
70							
80							
90							
+300							
10							
20							

Fuente: Laboratorio del Dr. Rodolfo Semrau Lago.

Apéndice M. Resultados del ensayo triaxial del pozo 18 muestra 3

A-245

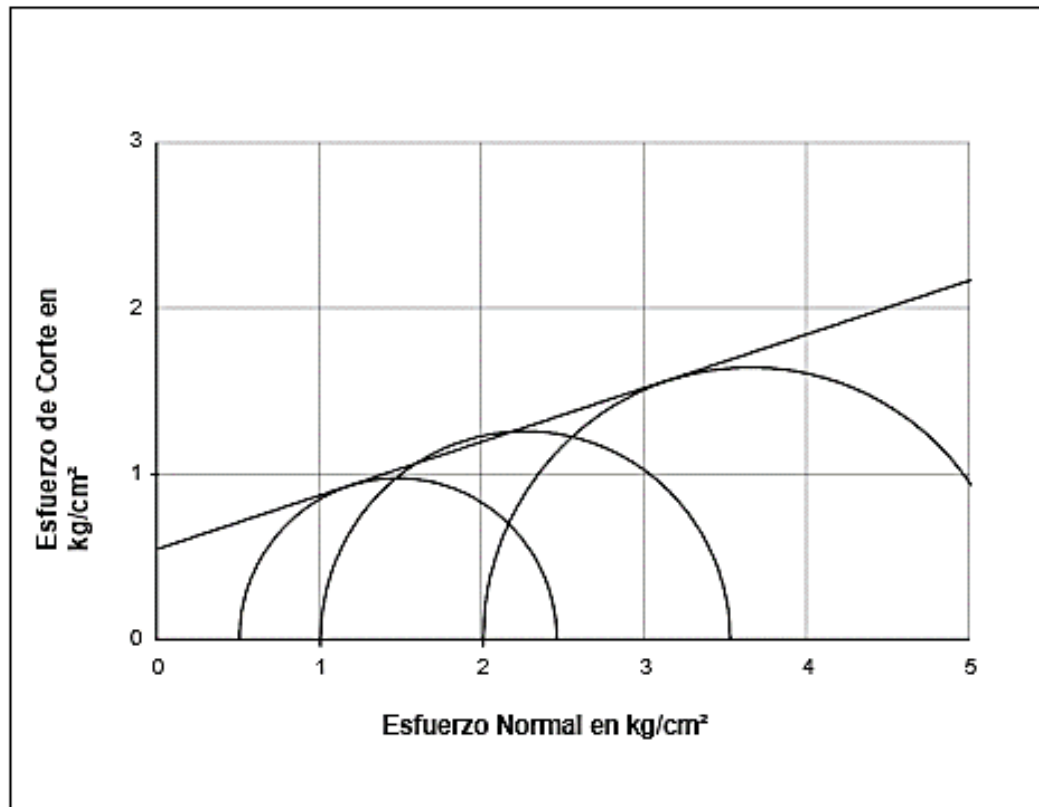
**Dr. Rodolfo Semrau Lago**

Geotecnia y Cimentaciones

**ENSAYO DE COMPRESION TRIAXIAL TX/UU**  
**CIRCULOS DE MOHR**

PROYECTO: LEGADO DEL BOSQUE LUGAR: FINCA CUMBRES DE VISTA HERMOSA  
POZO No. 18 MUESTRA No. 3 PROF: 3.90 metros  
DESCRIPCIÓN: Limo café claro, plástico, con traza de grava de pómez

P.U.H.: 1.12 Ton/m<sup>3</sup> CONTENIDO DE HUMEDAD %: 68.2 %  
Gs: — e: — SATURACIÓN: —  
FECHA: 3 de junio de 2015



Cohesión	0.55 kg/cm <sup>2</sup>	∅	18 Grados
----------	-------------------------	---	-----------

Fuente: Laboratorio del Dr. Rodolfo Semrau Lago.

Apéndice N. Hoja de datos de ensayo triaxial pozo 18 muestra 4  
**Dr. Rodolfo Semrau Lago**


$C = 12.04$   
 $\sigma = 25.30$

**ENSAYO DE COMPRESION TRIAXIAL**

PROYECTO: Cumbres FECHA: 4/6/15 POZO PERFORACION: 18 MUESTRA: 4  
 DESCRIPCION: Argilla café plástica con traza de arena PROFUNDIDAD: 6.00 m PROBETA: \_\_\_\_\_

TIPO DE ENSAYO (UU)(C-U)(D) PRESION DEL CONFINAMIENTO \_\_\_\_\_ Kg/cm<sup>2</sup> CONSTANTE DEL ANILLO \_\_\_\_\_ Kg/div

HUMEDAD	INICIAL VERIFICACION	INICIAL PROBETA	FINAL PROBETA
TARRO	CL-67	CL-13	
PBH (gr)	246.1	386.6	
PBS (gr)	195.1	301.2	
TARA (gr)	49.7	54.0	
DIF. (gr)			
PNH (gr)			
PNS (gr)			
W %	35.1	34.5	

DATOS DE LA MUESTRA		FALLA
Do	6.21 cm	PLASTICA: _____
Lo	6.44 cm	FRAGIL: _____
Ao	cm <sup>2</sup>	
Vo	cm <sup>3</sup>	
PNHo	332.6 gr	
$\delta$	1.71 ton/m <sup>3</sup>	$\delta$ max. _____ ton/m <sup>3</sup>
$\delta_D$	1.27 ton/m <sup>3</sup>	wopt _____ %

LECTURA DEFORMIMETRO 0.001"	LECTURA ANILLO 0.0001"	DEFORMACION $\Delta L$	$\epsilon = \frac{\Delta L}{L_0}$	1 - $\epsilon$	AREA CORREGIDA $A_c = \frac{A_0}{1 - \epsilon}$	CARGA P en Kg	ESFUERZO $\frac{P}{A_c}$ en $\frac{Kg}{cm^2}$
10	62		30				
20	138		40				
30	199		50				
40	237		60				
50	254		70				
60	257		80				
70	294		90				
80	305		+400				
90	313		10				
+100	320		20				
10	325		30				
20	329		40				
30			50				
40	368		60				
50	380		70				
60	389		80				
70	395		90				
80	400		+500				
90	405		10				
+200	408		20				
10			30				
20			40				
30			50				
40							
50							
60							
70							
80							
90							
+300							
10							
20							

Fuente: Laboratorio del Dr. Rodolfo Semrau Lago.

Apéndice O. Resultados del ensayo triaxial del pozo 18 muestra 4

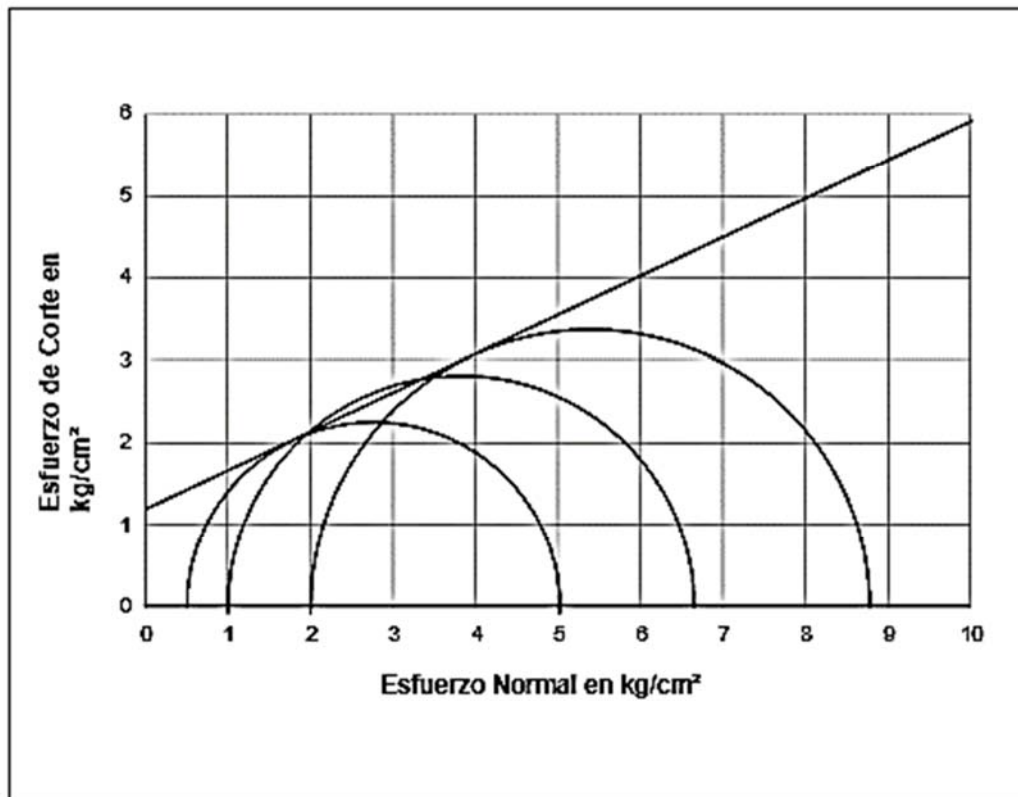
A-246

**Dr. Rodolfo Semrau Lago**

Geotecnia y Cimentaciones

**ENSAYO DE COMPRESION TRIAXIAL TX/UU  
CIRCULOS DE MOHR**

PROYECTO: LEGADO DEL BOSQUE LUGAR: FINCA CUMBRES DE VISTA HERMOSA  
 POZO No. 18 MUESTRA No. 4 PROF: 8.00 metros  
 DESCRIPCIÓN: Limo arenoso café, plástico  
 P.U.H.: 1.71 Ton/m<sup>3</sup> CONTENIDO DE HUMEDAD %: 34.5 %  
 Gs: — e: — SATURACIÓN: —  
 FECHA: 4 de junio de 2015

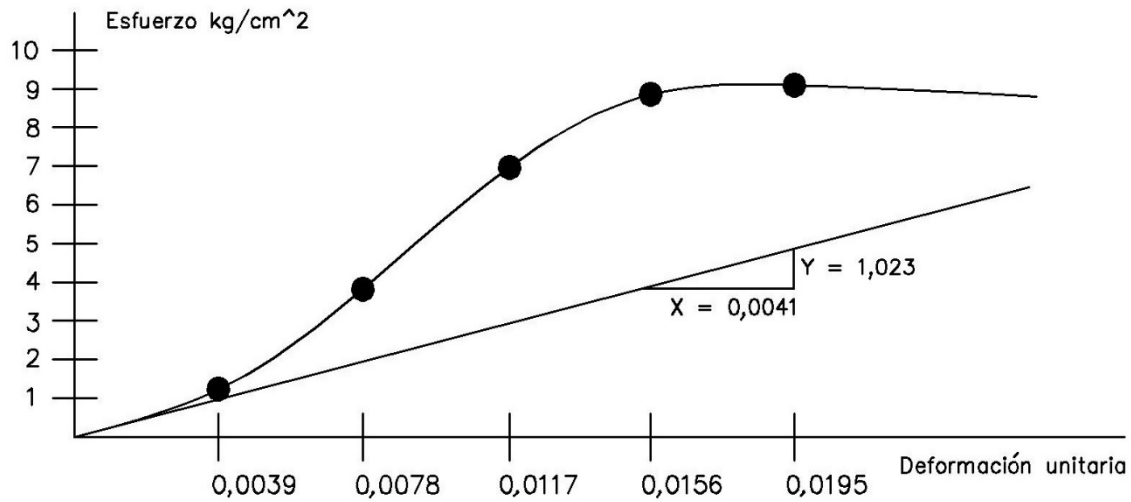


Cohesión	1.20 kg/cm <sup>2</sup>	∅	25 Grados
----------	-------------------------	---	-----------

Fuente: Laboratorio del Dr. Rodolfo Semrau Lago.

### Apéndice P. Datos y gráfica de la muestra 1 del ensayo triaxial

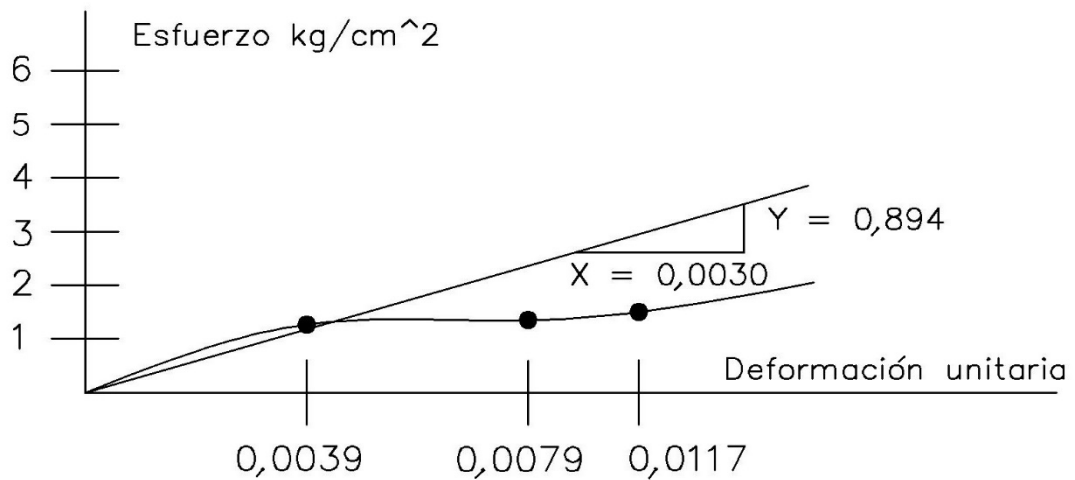
Lectura deformimetro 0,001"	Lectura anillo 0,0001"	Deformación $\Delta L$ en cm	$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0}$	$1-\varepsilon$	Área corregida $cm^2$ $A_c = \frac{A_0}{1-\varepsilon}$	Carga P en kg	Esfuerzo $Kg/cm^2$	Presión de confinamiento $kg/cm^2$
10	75	0,025	0,00392	0,9961	33,11	40,88	1,23	0,5
20	233	0,051	0,00784	0,9922	33,24	126,99	3,82	0,5
30	427	0,076	0,01176	0,9882	33,37	232,72	6,97	0,5
40	544	0,102	0,01568	0,9843	33,50	296,48	8,85	0,5
50	561	0,127	0,01960	0,9804	33,64	305,75	9,09	0,5
60	580	0,152	0,02352	0,9765	33,77	316,10	9,36	0,7
70	584	0,178	0,02744	0,9726	33,91	318,28	9,39	0,7
80	612	0,203	0,03136	0,9686	34,05	333,54	9,80	1
90	615	0,229	0,03528	0,9647	34,19	335,18	9,80	1



Fuente: elaboración propia.

### Apéndice Q. Datos y gráfica de la muestra 2 del ensayo triaxial

Lectura deformimetro 0,001"	Lectura anillo 0,0001"	Deformación $\Delta L$ en cm	$\epsilon = \frac{\Delta L}{L_0}$	$1-\epsilon$	Área corregida $cm^2$ $A_c = \frac{A_0}{1-\epsilon}$	Carga P en kg	Esfuerzo Kg/cm <sup>2</sup>	Presión de confinamiento kg/cm <sup>2</sup>
10	73	0,0254	0,0040	0,9960	31,40	39,79	1,27	0,5
20	78	0,0508	0,0080	0,9920	31,52	42,51	1,35	0,5
25	87	0,0635	0,0100	0,9900	31,59	47,42	1,50	0,5
40	235	0,1016	0,0159	0,9841	31,78	128,08	4,03	1
50	237	0,127	0,0199	0,9801	31,91	129,17	4,05	1
60	268	0,1524	0,0239	0,9761	32,04	146,06	4,56	1
70	288	0,1778	0,0279	0,9721	32,17	156,96	4,88	1
80	295	0,2032	0,0318	0,9682	32,30	160,78	4,98	2
90	299	0,2286	0,0358	0,9642	32,43	162,96	5,02	2

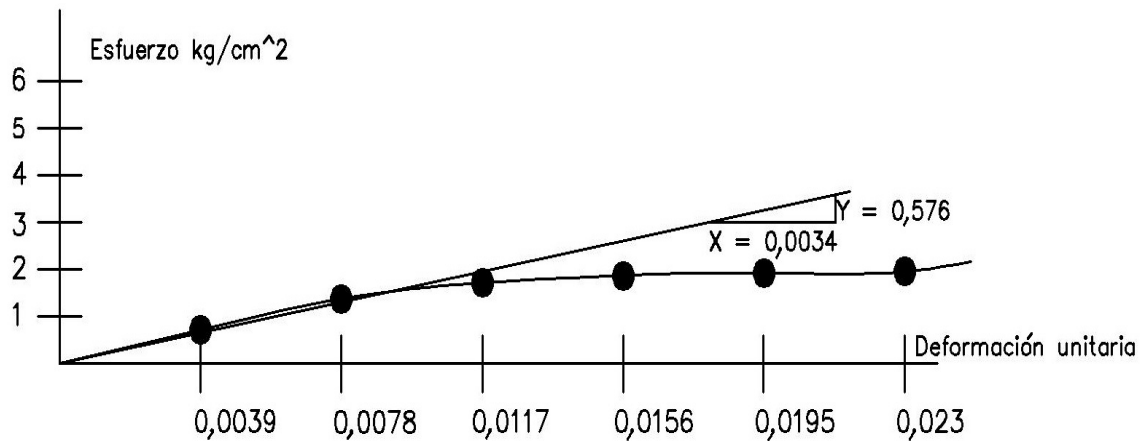


Fuente: elaboración propia.



### Apéndice R. Datos y gráfica de la muestra 3 del ensayo triaxial

Lectura deformimetro 0.001"	Lectura anillo 0.0001"	Deformación $\Delta L$ en cm	$\epsilon = \frac{\Delta L}{L_o}$	1- $\epsilon$	Área corregida $cm^2$ $A_c = \frac{A_o}{1-\epsilon}$	Carga P en kg	Esfuerzo $Kg/cm^2$	Presión de confinamiento $kg/cm^2$
10	42	0,0254	0,00393	0,99607	31,99	22,89	0,72	0,5
20	81	0,0508	0,00786	0,99214	32,12	44,145	1,37	0,5
30	102	0,0762	0,01180	0,98820	32,25	55,59	1,72	0,5
40	111	0,1016	0,01573	0,98427	32,38	60,495	1,87	0,5
50	115	0,1270	0,01966	0,98034	32,51	62,675	1,93	0,5
60	117	0,1524	0,02359	0,97641	32,64	63,765	1,95	0,5
70	0	0,1778	0,02752	0,97248	32,77			1
80	138	0,2032	0,03146	0,96854	32,90	75,21	2,29	1
90	145	0,2286	0,03539	0,96461	33,04	79,025	2,39	1
100	150	0,2540	0,03932	0,96068	33,17	81,75	2,46	1
110	154	0,2794	0,04325	0,95675	33,31	83,93	2,52	1
120		0,3048	0,04718	0,95282	33,45			2
130		0,3302	0,05111	0,94889	33,59			2
140	167	0,3556	0,05505	0,94495	33,73	91,015	2,70	2
150	178	0,3810	0,05898	0,94102	33,87	97,01	2,86	2
160	185	0,4064	0,06291	0,93709	34,01	100,825	2,96	2
170	192	0,4318	0,06684	0,93316	34,15	104,64	3,06	2
180	199	0,4572	0,07077	0,92923	34,30	108,455	3,16	2
190	205	0,4826	0,07471	0,92529	34,44	111,725	3,24	2
200	209	0,5080	0,07864	0,92136	34,59	113,905	3,29	2



Fuente: elaboración propia.



Apéndice T. Resultados del ensayo Proctor estándar

A-377

**Dr. Rodolfo Semrau Lago**

Geotecnia y Cimentaciones

**ENSAYO DE COMPACTACION**

PROYECTO: LEGADO DEL BOSQUE  
 LUGAR: FINCA CUMBRES DE VISTA HERMOSA, SANTA CATARINA PINULA  
 POZO No.: 18 MUESTRA: A PROFUNDIDAD 0.20 - 1.20 metros  
 DESCRIPCION DEL MATERIAL: Limo café, plástico, con traza de arena fina

No. DE CAPAS 3 PESO DEL MARTILLO 5.5 libras No. DE GOLPES 25  
 FECHA 29 de mayo de 2015

	1	2	3	4	5
P.B.H.	4.680	4.940	5.150	5.080	5.030
TARA	3.400	3.400	3.400	3.400	3.400
P.N.H.	1.280	1.540	1.750	1.680	1.630
P.U.H.	1355.9	1631.4	1853.8	1779.7	1726.7

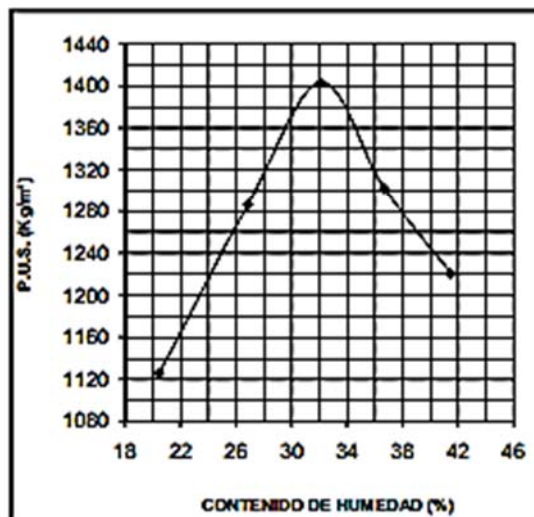
TARRO	H-78	H-41	L-56	L-60	H-52	L-45	L-16	H-63	H-72	L-39
P.B.H.	138.6	127.0	108.2	116.3	151.2	156.4	140.0	147.7	149.5	137.2
P.B.S.	120.4	110.9	91.7	98.1	121.9	125.8	111.1	116.0	114.5	106.2
TARA	31.6	32.1	30.3	30.2	30.6	30.6	32.0	29.9	30.0	31.6
DIF	18.2	16.1	16.5	18.2	29.3	30.6	28.9	31.7	35.0	31.0
P.N.S.	88.8	78.8	61.4	67.9	91.3	95.2	79.1	86.1	84.5	74.6
% HUM	20.5	20.4	26.9	26.8	32.1	32.1	36.5	36.8	41.4	41.6
PROMEDIO	20.5		26.8		32.1		36.7		41.5	
P.U.S.	1126		1286		1403		1302		1220	

P.U.S. Max 1404 Kg/m<sup>3</sup>  
87.6 Lbs/p<sup>3</sup>  
 HUM. OPTIMA 32 %

SUB RASANTE X BASE \_\_\_\_\_  
 SUB-BASE \_\_\_\_\_  
 RELLEND \_\_\_\_\_  
 OTRO \_\_\_\_\_

PROCTOR NORMAL X  
 PROCTOR MODIFICADO \_\_\_\_\_  
 TIPO DE PROCTOR "A" ASTM  
 VOL. CILINDRO .000944 m<sup>3</sup>  
 CANTIDAD DE SUELO 2.5 kg  
 AGUA INICIAL 100 cc  
 SEGUIDO CON 100 cc

OBSERVACIONES:  
Proctor efectuado por puntos separados.-



Fuente: Laboratorio del Dr. Rodolfo Semrau Lago.

Apéndice U. Resultado de ensayo CBR en el pozo 18 A para cilindro de 10 golpes

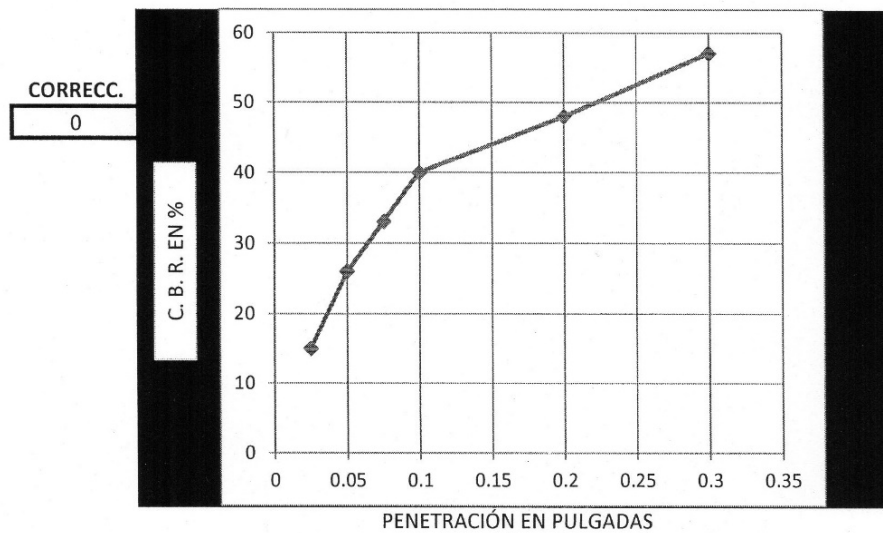
ENSAYO DE RAZÓN SOPORTE CALIFORNIA  
(CBR)

PROYECTO \_\_\_\_\_ CUMBRES \_\_\_\_\_ POZO: 18 A \_\_\_\_\_  
 PROFUNDIDAD 0.20-1.20 \_\_\_\_\_ FECHA 22 de junio de 2015 \_\_\_\_\_

CILINDRO DE 10 GOLPES

CILINDRO	3	(LIBRAS)	CAPACIDAD	0.00212398	0.0750076	DENSIDAD	87.65
P. B. H.	10.48	23.10	P. U. H.	1591.35	99.34	MAXIMA	1404
TARA	7.1	15.65	P. U. S.	1191.13	74.36	% $\omega$	33.6
P. N. H.	3.38	7.45	% COMPACTACION			84.84%	

CONSTANTE DEL ANILLO	1	1) 1.48 Lb/div	2) 10.20 Lb/div	3) 7.42 Lb/div		
PENETRACION (IN)	0.025	0.05	0.075	0.1	0.2	0.3
LECTURA DEL ANILLO	15	26	33	40	48	57
CARGA EN LIBRAS	22.2	38.48	48.84	59.2	71.04	84.36



A 0.01", Y 84.84% DE COMPACTACIÓN, 1.6% DE C.B.R.

A 0.02", Y 84.84% DE COMPACTACIÓN, 1.5% DE C.B.R.

Fuente: Laboratorio del Dr. Rodolfo Semrau Lago.

Apéndice V. **Resultado de ensayo CBR en el pozo 18 A para cilindro de 30 golpes**

ENSAYO DE RAZÓN SOPORTE CALIFORNIA  
(CBR)

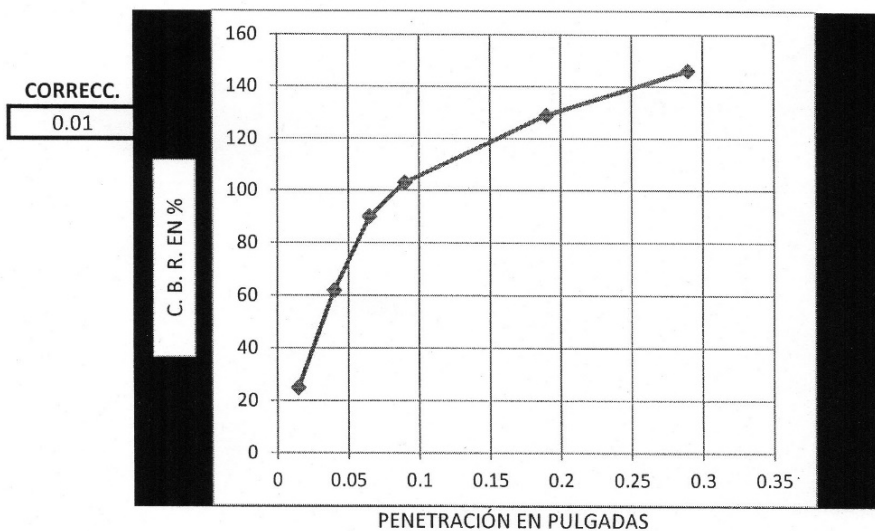
PROYECTO CUMBRES POZO: 18 A

PROFUNDIDAD 0.20-1.20 FECHA 22 de junio de 2015

CILINDRO DE 30 GOLPES

CILINDRO	2	(LIBRAS)	CAPACIDAD	0.00212398	0.0750076	DENSIDAD	87.65
P. B. H.	10.92	24.07	P. U. H.	1791.45	111.83	MAXIMA	1404
TARA	7.115	15.69	P. U. S.	1336.90	83.46	% ω	34.0
P. N. H.	3.805	8.39	% COMPACTACION			95.22%	

CONSTANTE DEL ANILLO	1	1) 1.48 Lb/div	2) 10.20 Lb/div	3) 7.42 Lb/div		
PENETRACION (IN)	0.025	0.05	0.075	0.1	0.2	0.3
LECTURA DEL ANILLO	25	62	90	103	129	146
CARGA EN LIBRAS	37	91.76	133.2	152.44	190.92	216.08



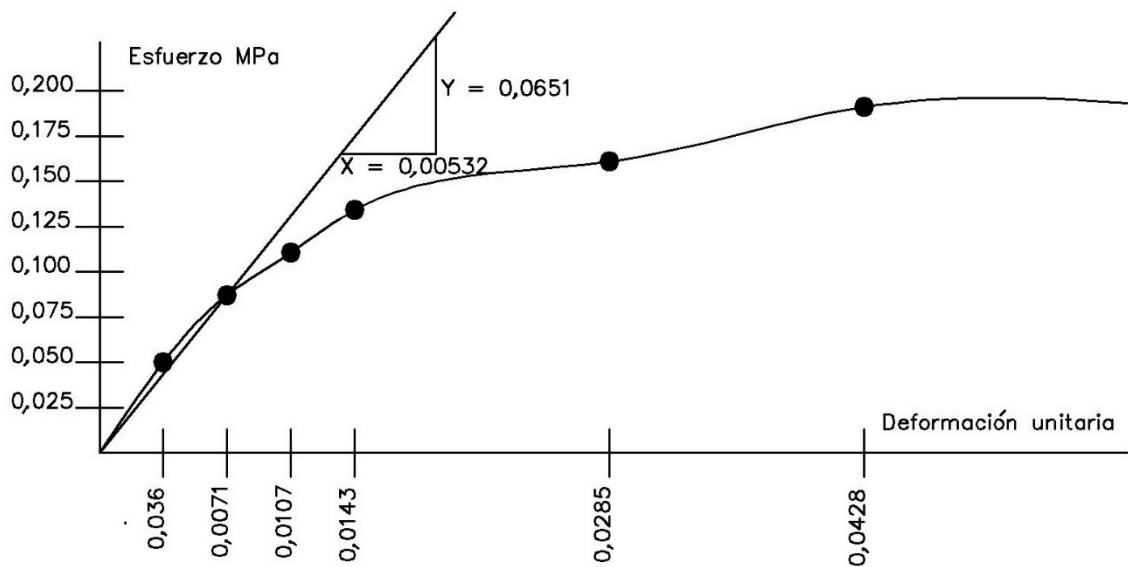
A 0.01", Y 95.22% DE COMPACTACIÓN, 4.3% DE C.B.R.

A 0.02", Y 95.22% DE COMPACTACIÓN, 4.1% DE C.B.R.

Fuente: Laboratorio del Dr. Rodolfo Semrau Lago.

Apéndice W. Datos y gráfica del cilindro de 10 golpes del ensayo CBR

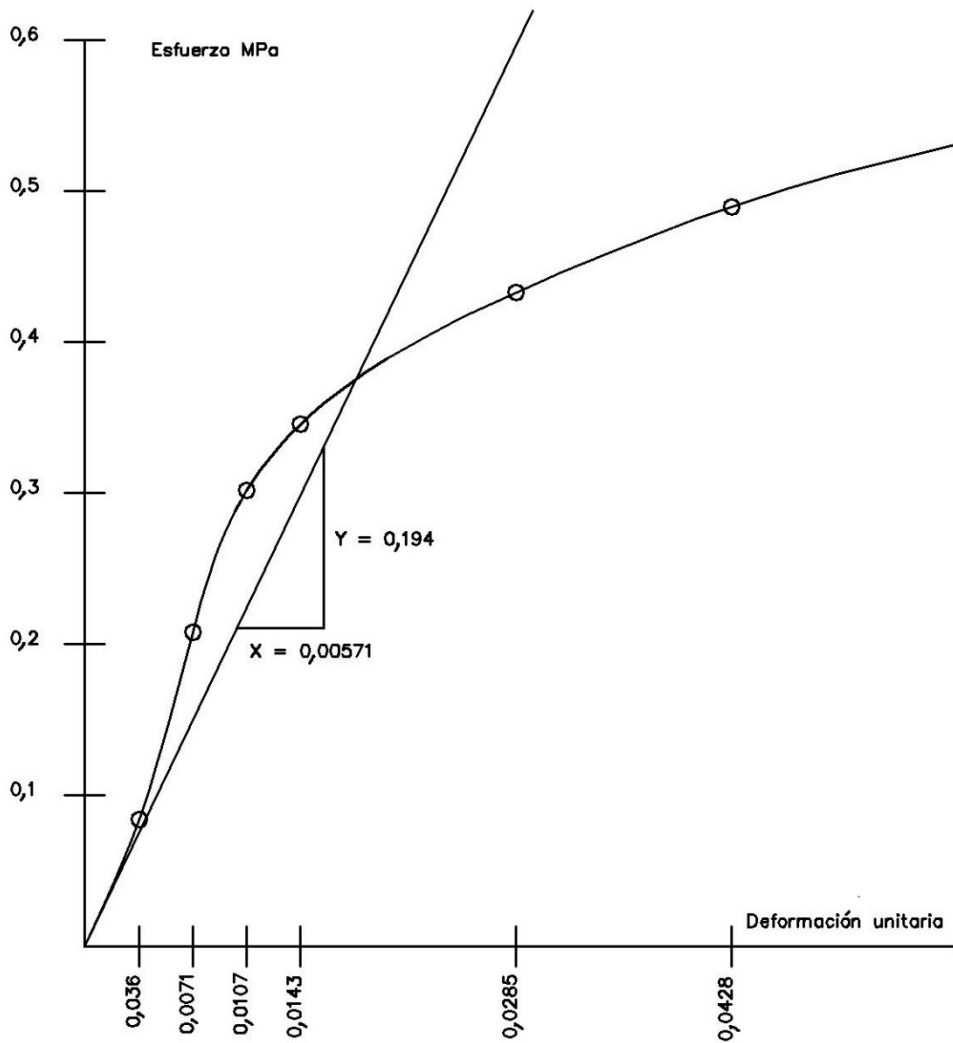
Deformación (in)	Deformación (m)	Def unitaria	Carga (lb)	Carga (N)	$\sigma$ (MPa)
0	0,000000	0,0000	0	0,00	0,000
0,025	0,000635	0,0036	22,2	98,75	0,050
0,05	0,001270	0,0071	38,48	171,16	0,087
0,075	0,001905	0,0107	48,84	217,24	0,111
0,1	0,002540	0,0143	59,2	263,32	0,134
0,2	0,005080	0,0285	71,04	315,99	0,161
0,3	0,007620	0,0428	84,36	375,23	0,191



Fuente: elaboración propia.

Apéndice X. Datos y gráfica del cilindro de 30 golpes del ensayo CBR

Deformación (in)	Deformación (m)	Unitaria	Carga (lb)	Carga (N)	$\sigma$ (MPa)
0	0	0	0	0	0
0,025	0,000635	0,003567416	37	164,576	0,08381787
0,05	0,00127	0,007134831	91,76	408,14848	0,20786831
0,075	0,001905	0,010702247	133,2	592,4736	0,30174433
0,1	0,00254	0,014269663	152,44	678,05312	0,34532962
0,2	0,00508	0,028539326	190,92	849,21216	0,4325002
0,3	0,00762	0,042808989	216,08	961,12384	0,48949635



Fuente: elaboración propia.

## Apéndice Y. Velocidades de onda P para la zona 2

Cuadro 3.2.

Resumen de resultados de refracción sísmica ( $V_p$ ) de los perfiles sísmicos de la Zona 2

Perfil	Profundidad 1 (m)	Profundidad 2 (m)	Velocidad 1 (m/s)	Velocidad 2 (m/s)	Velocidad 3 (m/s)
4	2.91 ± 0.5	13.65 ± 1.5	300.0	661.1	977.3
5	3.69 ± 1.7	16.12 ± 4.2	300.0	827.1	1,403.2
6	1.91 ± 0.7	14.54 ± 1.7	300.0	741.8	1,397.9
<b>Promedios</b>	<b>2.84 ± 1.3</b>	<b>14.74 ± 2.8</b>	<b>300.0 ± 0 %</b>	<b>745.0 ± 11%</b>	<b>1,259.5 ± 19%</b>

Fuente: Geociencia Aplicada, S.A.

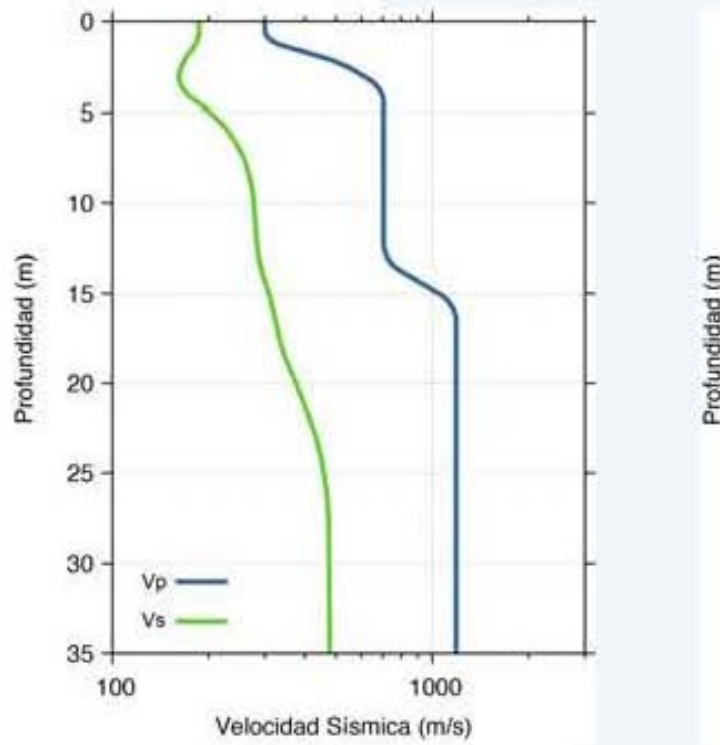
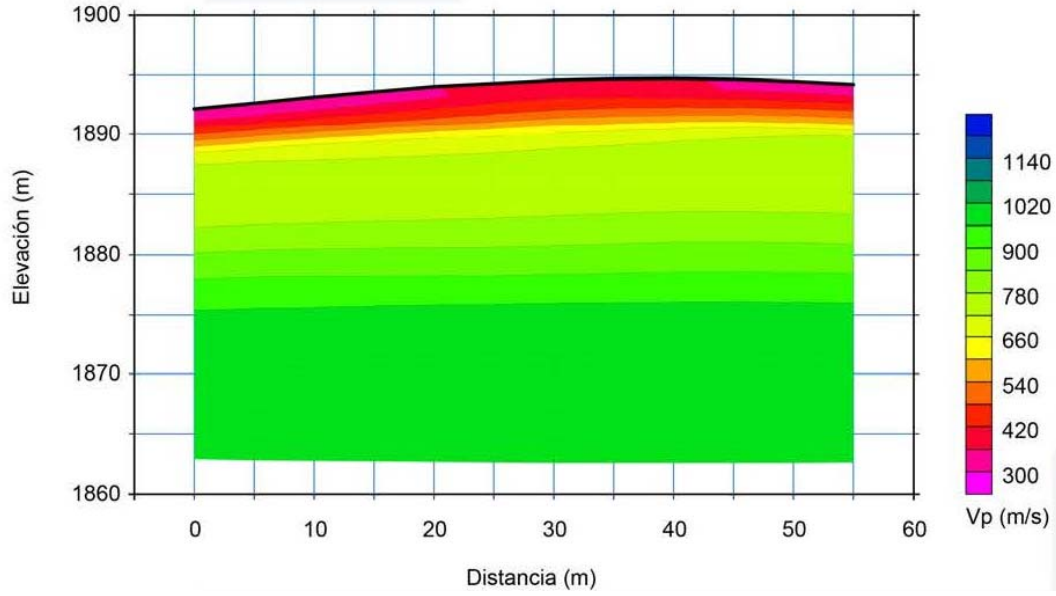
## Apéndice Z. Velocidades de onda S para la zona 2

Profundidad (m)	$V_s$ (m/s)
-	186.09
1.07	187.87
2.31	163.69
3.71	160.10
5.27	213.82
7.01	252.90
8.90	273.26
10.96	279.32
13.19	286.12
15.58	315.96
18.13	337.83
20.85	393.00
23.74	446.78
26.79	473.77
36.43	478.92

Fuente: Geociencia Aplicada, S.A.



Apéndice AA. Perfil de ondas P y ondas S en el perfil 6 de la zona 2



Fuente: Geociencia Aplicada, S.A.

