



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
INGENIERÍA CIVIL – ANÁLISIS Y DISEÑO DE CIMENTACIONES

CARACTERIZACIÓN DE LAS ARCILLAS DEL LAGO DE TEXCOCO, MEDIANTE
MEDICIÓN DE VELOCIDADES DE TRANSMISIÓN DE ONDA

TESIS
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:
JOSÉ MANUEL CERVANTES RUIZ

TUTOR PRINCIPAL
DR. EFRAÍN OVANDO SHELLEY

CIUDAD UNIVERSITARIA CD. MX., ENERO DE 2017

JURADO ASIGNADO:

Presidente: DR. OSVALDO FLORES CASTELLÓN

Secretario: DR. MARIO FLORES GUZMÁN

Vocal: DR. EFRAÍN OVANDO SHELLEY

1 er. Suplente: M.C. MIGUEL RODRÍGUEZ GONZÁLEZ

2 do. Suplente: DR. CELESTINO VALLE MOLINA

**Lugar o lugares donde se realizó la tesis: INSTITUTO DE INGENIERÍA
UNAM**

TUTOR DE TESIS:

DR. EFRAÍN OVANDO SHELLEY

FIRMA

Agradezco a la Universidad Nacional Autónoma de México y al Instituto de Ingeniería UNAM por los recursos destinados a mi formación académica y el apoyo brindado para la realización del presente trabajo, así como al CONACyT por el estímulo económico recibido.

A mi director de tesis, el Dr. Efraín Ovando Shalley, por alentarme y guiarme en todo momento para llevar a buen término mi investigación.

De la misma manera, agradezco sinceramente las aportaciones realizadas por cada uno de los miembros del jurado durante la elaboración y revisión de la tesis; al Dr. Osvaldo Flores Castellón, al Dr. Celestino Valle Molina, al M.C. Miguel Rodríguez Gonzáles, y en especial al Dr. Mario Flores Guzmán.

Finalmente, quienes trabajaron conmigo y a mi lado en el laboratorio, por su apoyo y colaboración dentro y fuera del Laboratorio de Mecánica de Suelos.

Agradezco

A mis padres y hermana
por todo el apoyo brindado
quienes formaron la persona que soy
siempre estaré en deuda

A ti, que siempre estás en mi corazón

EMB

RESUMEN

Una de las propiedades más estudiadas por la ingeniería es el módulo de rigidez al cortante (G), el cual es un parámetro elástico que permite describir el comportamiento de un material cuando es sometido a esfuerzos de corte. Para determinar el valor del módulo G en suelos, pueden efectuarse pruebas en sitio o pruebas en laboratorio, sin embargo en todas ellas se calcula el módulo de rigidez al cortante a partir de la medición de la velocidad de transmisión de onda de corte.

En este trabajo se utilizó una cámara triaxial instrumentada con cristales piezoeléctricos, los cuales permiten medir las velocidades de transmisión de ondas de cuerpo: de compresión (V_p) y de cortante (V_s). El análisis de los datos obtenidos mediante transductores piezoeléctricos, permite obtener el parámetro de la rigidez del suelo (utilizando V_s) y la saturación de la probeta (utilizando V_p).

La principal aportación de esta investigación es la medición de ondas de cortante a lo largo de la etapa de falla, con el objetivo de observar el comportamiento de las propiedades elásticas del suelo al aplicarle carga hasta llevarlo a la falla.

Como parte del análisis de resultados, se realizó la observación de la variación de V_p con respecto del grado de saturación en el que se encuentra la probeta en cada incremento de la etapa de saturación. De la misma manera, se analizó el comportamiento de la velocidad de cortante V_s en cada uno de los incrementos de la etapa de consolidación, y en distintos puntos de la etapa de falla. Por otro lado, también se realizó una comparación de los resultados de la velocidad de transmisión de onda con valores obtenidos en ensayos de columna resonante y ensayos de campo empleando el equipo de sonda suspendida.

ÍNDICE

RESUMEN	4
LISTA DE FIGURAS.....	7
LISTA DE TABLAS.....	9
SÍMBOLOS Y NOTACIÓN	10
CAPÍTULO 1: Introducción.....	12
1.1 Objetivo.....	13
1.2 Alcance	13
CAPÍTULO 2: Conceptos generales.....	13
2.1 Introducción al problema de transmisión de ondas sísmicas	13
2.1.1 Ondas P.....	13
2.1.2 Ondas S.....	14
2.1.3 Parámetros de medición de una onda	14
2.1.4 Propagación de ondas en una barra elástica	15
2.2 Piezoelectricidad	18
2.3 Resistencia al esfuerzo cortante en suelos	18
2.3.1 Teoría de falla de Mohr-Coulomb	18
2.3.2 Trayectoria de esfuerzos de Cambridge (Teoría de falla del estado crítico).....	19
2.4 Propiedades elásticas de los suelos	20
CAPÍTULO 3: Descripción de equipo de laboratorio	21
3.1 Equipo triaxial neumático	21
3.1.1 Calibración de transductores	23
3.2 Instrumentación de cabezal y pedestal con cristales piezoeléctricos	23
3.2.1 Elementos de flexión (Bender).....	24
3.2.2 Elementos de compresión (discos)	25
3.2.3 Procedimiento de instrumentación	25
3.2.4 Tiempo de retardo de arribo de la onda debido al equipo.....	28
3.3 Equipo para adquisición de datos de velocidad de transmisión de onda.....	29
3.3.1 Generador de funciones y amplificador.....	29
3.3.2 Osciloscopio digital y software.....	29
CAPÍTULO 4: Descripción de muestras y procedimiento de ensayos	30
4.1. Descripción de las muestras utilizadas.....	30

4.2. Procedimiento de ensaye.....	32
4.2.1 Antecedentes	32
4.2.2 Preparación de la muestra y labrado de probeta	33
4.2.3 Montaje de probeta	34
4.2.4 Etapa de saturación por contrapresión y medición de B de Skempton.....	35
4.2.5 Etapa de consolidación.....	35
4.2.6 Etapa de falla.....	36
4.2.7 Obtención de k_0 a partir de pruebas triaxiales.....	37
CAPÍTULO 5: Resultados de los ensayos.....	38
5.1 Resultados de pruebas triaxiales.....	38
5.1.1 Gráficas de compresibilidad	38
5.1.2 Trayectorias de esfuerzos.....	40
5.2 Velocidades de transmisión de onda	42
5.2.1 Tiempo de arribo de las ondas	42
5.2.2 Frecuencia fundamental del sistema	45
5.2.3 Comportamiento de velocidades de transmisión de onda	50
5.3 Obtención de k_0 a partir de pruebas triaxiales	54
CAPÍTULO 6: Comparación de resultados con otros métodos de obtención de velocidades de transmisión de onda.....	56
6.1 Columna resonante	56
6.2 Sonda suspendida	57
6.3 Gráficas de comparación.....	58
CAPÍTULO 7: Conclusiones	60
REFERENCIAS.....	61

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1 Movimiento de excitación debido a onda P.....	13
Figura 2 Movimiento de excitación debida a onda S	14
Figura 3 Partes de una onda periódica.....	15
Figura 4 Barra de sección circular (ondas de compresión)	16
Figura 5 Barra de sección circular (ondas de cortante).....	17
Figura 6 Comportamiento de un cristal piezoeléctrico con la aplicación de un voltaje (Piezo Systems, Inc., 2015)	18
Figura 7 Gráfica esquemática de trayectoria de esfuerzo de Cambridge.....	19
Figura 8 Cámara triaxial neumática con probeta montada	21
Figura 9 Vista de transductores de cámara triaxial neumática.....	22
Figura 10 Esquema de cámara triaxial neumática (Valderrama A., 2013).....	22
Figura 11 Esquema de los componentes de elementos Bender	24
Figura 12 Flexión de un elemento Bender al aplicar un voltaje (Piezo Systems, Inc., 2015)	24
Figura 13 Equipo y material para instrumentación de cristales piezoeléctricos	26
Figura 14 Equipo para instrumentación de cristales piezoeléctricos.....	26
Figura 15 Punto de soldadura en disco de compresión	26
Figura 16 Disco encapsulado con resina UV.....	26
Figura 17 Extracción de núcleo de alambre de cobre galvanizado	27
Figura 18 Elemento de flexión con mica auto-adherible	27
Figura 19 Equipo para medir tiempo de arribo de ondas	29
Figura 20 Generadores de funciones	29
Figura 21 Osciloscopio digital.....	29
Figura 22 Vista satelital del sitio de estudio, NAICM	30
Figura 23 Ubicación de sitio de estudio en mapa de zonificación geotécnica (Normas Técnicas Complementarias para diseño y construcción Cimentaciones, Reglamento de Construcción del Distrito Federal, 2004)	31
Figura 24 Rejilla de papel filtro para cubrir la probeta	34
Figura 25 Mezcla de caolín para hacer contacto cristales-suelo	34
Figura 26 Diagrama p' - q de una consolidación anisótropa.....	36
Figura 27 Diagrama de esfuerzo-deformación en etapa de falla.....	37
Figura 28 Diagrama p' - q con la trayectoria de esfuerzo de la prueba completa	37
Figura 29 Curva de compresibilidad (M-7 SS-01) $k=0.4$	39
Figura 30 Curva de compresibilidad (M-6 SS-03) $k=0.5$	39
Figura 31 Curva de compresibilidad (M-10Bis SM-23) $k=0.6$	39
Figura 32 Curva de compresibilidad (M-65 SM-07) $k=1$	40
Figura 33 Diagrama p' - q , trayectoria de esfuerzo (M-7 SS-1).....	40
Figura 34 Diagrama p' - q , trayectoria de esfuerzo (M-6 SS-03).....	41
Figura 35 Diagrama p' - q , trayectoria de esfuerzo (SM-23 M-10Bis)	41
Figura 36 Diagrama p' - q , trayectoria de esfuerzo (SM-07 M-65)	42

Figura 37 Trayectorias de esfuerzos normalizadas con respecto al esfuerzo efectivo medio.....	42
Figura 38 Señales sinusoidal (emisora y receptora) típica para medir velocidad de onda de corte (Vázquez A., 2016)	43
Figura 39 Efecto de campo cercano representado (Díaz P. M. , 2014).....	43
Figura 40 Gráfica de R_d contra frecuencia (SS-01-M-7).....	45
Figura 41 Impresión de pantalla del programa Degtra A4 utilizado para obtener la función de transferencia.....	46
Figura 42 Gráfica de cocientes espectrales contra frecuencia, etapa de saturación, incremento 1 (SM-07 M-65).....	47
Figura 43 Gráfica de cocientes espectrales contra frecuencia, etapa de saturación, incremento 2 (SM-07 M-65).....	47
Figura 44 Gráfica de cocientes espectrales contra frecuencia, etapa de saturación, incremento 3 (SM-07 M-65).....	47
Figura 45 Gráfica de cocientes espectrales contra frecuencia, etapa de consolidación, incremento 1 (SM-07 M-65).....	48
Figura 46 Gráfica de cocientes espectrales contra frecuencia, etapa de consolidación, incremento 2 (SM-07 M-65).....	48
Figura 47 Gráfica de cocientes espectrales contra frecuencia, etapa de consolidación, incremento 3 (SM-07 M-65).....	48
Figura 48 Gráfica de cocientes espectrales contra frecuencia, etapa de consolidación, incremento 4 (SM-07 M-65).....	49
Figura 49 Gráfica de cocientes espectrales contra frecuencia, etapa de consolidación, incremento 5 (SM-07 M-65).....	49
Figura 50 Gráfica de cocientes espectrales contra frecuencia, etapa de consolidación, incremento 6 (SM-07 M-65).....	49
Figura 51 Gráfica de comportamiento de frecuencia dominante f_0 contra esfuerzo efectivo en etapa de consolidación anisótropa.....	50
Figura 52 Gráfica de comportamiento de frecuencia dominante f_0 contra esfuerzo efectivo en etapa de consolidación.....	50
Figura 53 Comportamiento de velocidad de compresión en etapa de saturación.....	51
Figura 54 Comportamiento de la velocidad de corte en la etapa de saturación (M-7 SS-01)	51
Figura 55 Velocidades de cortante en distintos incrementos de etapa de consolidación (M-7 SS-01)	52
Figura 56 Comportamiento de la velocidad de corte con respecto del esfuerzo efectivo promedio en etapa de consolidación anisótropa.....	52
Figura 57 Gráficas de esfuerzo-deformación y comportamiento de V_s en etapa de falla (M-7 SS-1)	53
Figura 58 Gráfica de comportamiento de V_s en etapa de falla (M-7 SS-1).....	53
Figura 59 Gráfica de comportamiento de V_s en etapa de falla (semi-logarítmica) (M-7 SS-1)	54
Figura 60 Variación de la velocidad de cortante con respecto del esfuerzo desviador en etapa de falla	54

Figura 61 Variación de la velocidad de cortante con respecto del esfuerzo efectivo promedio (p') en la etapa de falla.....	54
Figura 62 Deformación axial contra deformación volumétrica durante la etapa de consolidación.	55
Figura 63 Cociente de deformaciones contra esfuerzo efectivo durante la etapa de consolidación	55
Figura 64 Cociente de esfuerzos (k) contra cociente de deformaciones.....	56
Figura 65 Esquema de columna resonante (Flores, 1996).....	57
Figura 66 Esquema de funcionamiento de sonda suspendida (Juárez, 2014)	58
Figura 67 Gráfica comparativa esfuerzo efectivo contra velocidad de corte (M-7 SS-01 $k=0.4$).....	59
Figura 68 Gráfica comparativa esfuerzo efectivo contra velocidad de corte (M-6 SS-03 $k=0.5$).....	59
Figura 69 Gráfica comparativa esfuerzo efectivo contra velocidad de corte (M-10Bis SM-23 $k=0.6$)	59

LISTA DE TABLAS

Tabla 1 Especificaciones de elementos de flexión (Piezo Systems, Inc., 2015)	24
Tabla 2 Especificaciones de discos de compresión (Piezo Systems, Inc., 2015)	25
Tabla 3 Rangos de capacitancia de cristales piezoeléctricos	27
Tabla 4 Productos y proveedores de materiales para instrumentación de cristales piezoeléctricos (Flores Guzmán, 2013).....	28
Tabla 5 Resumen de identificación y propiedades de muestras ensayadas.....	31
Tabla 6 Esfuerzos de preconsolidación de las muestras	40

SÍMBOLOS Y NOTACIÓN

A	Amplitud, volts
A_p	Velocidad de onda de compresión a 1 atm (100 kPa), m/s
A_s	Velocidad de onda de corte a 1 atm (100 kPa), m/s
a	Aceleración
B	Parámetro B de Skempton
C	Ciclo
CD	Ensaye triaxial consolidado - drenado
CH	Arcilla de alta compresibilidad
CU	Ensaye triaxial consolidado - no drenado
γ	Deformación angular, %
γ	Peso volumétrico, kN/m ³
E	Módulo de elasticidad, MPa
e	Relación de vacíos
ε_a	Deformación axial
ε_l	Deformación longitudinal
ε_t	Deformación transversal
ε_v	Deformación volumétrica
F	Fuerza
FFT	Transformada rápida de Fourier
FT	Función de transferencia
f	Frecuencia, Hz
f_{crit}	Frecuencia crítica, Hz
f_0	Frecuencia fundamental del sistema, Hz
G	Módulo de rigidez al corte, MPa
G_{max}	Módulo de rigidez al corte máximo, MPa
G_s	Densidad de sólidos
g	Aceleración de la gravedad
H_0	Altura inicial, m
$H(\omega)$	Amplitud del cociente espectral
k	Relación de esfuerzos principales
k_0	Coefficiente de tierras en reposo
LI	Índice de liquidez
L_{EFFECT}	Distancia efectiva que viaja la onda de corte, m
L_{ESP}	Longitud del espécimen, m
L_{INF}	Longitud del elemento de flexión inferior, m
L_{SUP}	Longitud del elemento de flexión superior, m
λ	Longitud de onda
M	Pendiente de la envolvente de falla en el diagrama p' - q
m	Masa
ν	Relación de Poisson, adimensional
P	Onda de compresión
P_a	Presión atmosférica, 100 kPa
PI	Índice de plasticidad, %
p'	Esfuerzo octaédrico (promedio), kPa
p_0	Presión efectiva de confinamiento, kPa
q	Esfuerzo desviador, kPa

ρ	Densidad del material
R_d	Parámetro de relación entre L_{EFFECT} y λ
R_d^*	Valor constante de R_d
S	Onda de corte
σ'	Esfuerzo efectivo, kPa
σ_p	Esfuerzo de preconsolidación, kPa
σ_1	Esfuerzo principal mayor, kPa
σ_2	Esfuerzo principal menor, kPa
σ_3	Esfuerzo principal menor, kPa
T	Periodo, s
t	Tiempo, s
t_p	Primer tiempo pico a pico, s
t_r	Tiempo de retraso, s
t_0	Primer tiempo de llegada, s
τ_{oct}	Esfuerzo cortante octaédrico, kPa
u	Desplazamiento
V_c	Velocidad de propagación de onda de compresión no confinada, m/s
V_p	Velocidad de propagación de onda de compresión, m/s
V_{pp}	Voltaje pico a pico, volts
V_s	Velocidad de propagación de onda de corte, m/s
V_0	Volumen inicial, cm ³
w	Contenido de agua, %
w_L	Límite líquido, %
w_P	Límite plástico, %
$X(t)$	Señal de entrada al sistema en el dominio del tiempo
$Xn(t)$	Señal de entrada al sistema normalizada
$X(\omega)$	Señal de entrada al sistema en el dominio de la frecuencia
$Y(t)$	Señal de salida del sistema en el dominio del tiempo
$Yn(t)$	Señal de salida del sistema normalizada
$Y(\omega)$	Señal de salida del sistema en el dominio de la frecuencia
ϕ'	Angulo de fricción interna
ω	Frecuencia circular

CAPÍTULO 1: Introducción

Una de las propiedades más estudiadas por la ingeniería es el módulo de rigidez al cortante (G), el cual es un parámetro que permite describir el comportamiento de un material cuando es sometido a esfuerzos de corte. Para determinar el valor del módulo G en suelos, pueden efectuarse pruebas en sitio o pruebas en laboratorio, sin embargo en todas ellas se calcula el módulo de rigidez al cortante a partir de la medición de la velocidad de transmisión de onda de corte.

En este trabajo se utilizó una cámara triaxial instrumentada con cristales piezoeléctricos, los cuales permiten medir las velocidades de transmisión de ondas de cuerpo: de compresión (V_p) y de cortante (V_s). El análisis de los datos obtenidos mediante transductores piezoeléctricos, permite obtener el parámetro de la rigidez del suelo (utilizando V_s) y la saturación de la probeta (utilizando V_p).

Aquí se presenta la continuación de una línea de investigación propia del Instituto de Ingeniería UNAM, que comenzó en 2013 con la instrumentación de la cámara triaxial utilizando cristales piezoeléctricos, después continuada en 2014 (Flores Guzmán, 2013; Díaz, 2014). Dicha cámara y un consolidómetro de palanca se instrumentaron con estos cristales. La principal aportación de esos trabajos fue el desarrollo de un procedimiento para minimizar el efecto de campo cercano presentado en las señales recibidas por los cristales piezoeléctricos (Díaz P. M. , 2014). Después se continuó utilizando el equipo triaxial para realizar pruebas en suelos arcillosos del lago de Texcoco para observar su comportamiento dinámico bajo diferentes condiciones de consolidación (Vázquez, 2016).

Aunque igual que en los trabajos antes mencionados, en el presente se realizaron mediciones de velocidad de onda en las etapas de saturación y consolidación, pero la principal aportación de esta investigación es la medición de ondas de cortante a lo largo de la etapa de falla, con el objetivo de observar el comportamiento de las propiedades elásticas del suelo al aplicarle carga hasta llevarlo a la falla.

Las muestras de suelo estudiadas (arcillas lacustres) en el presente trabajo, fueron obtenidas mediante la técnica de muestreo inalterado con tubo de pared delgada tipo Shelby, obtenidas dentro del marco de los trabajos de exploración y muestreo de la mecánica de suelos para la construcción del Nuevo Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México, ubicado en el ex lago de Texcoco.

Como parte del análisis de resultados, se realizó la observación de la variación de V_p con respecto del grado de saturación en el que se encuentra la probeta en cada incremento de esfuerzo de la etapa de saturación. De la misma manera, se analizó el comportamiento de la velocidad de cortante (V_s) en cada uno de los incrementos de esfuerzo de la etapa de consolidación, y a diferentes deformaciones axiales de la etapa de falla. Por otro lado, también se realizó una comparación de los resultados de la velocidad de transmisión de onda con valores obtenidos en ensayos de columna resonante y ensayos de campo empleando el equipo de sonda suspendida.

1.1 Objetivo

Utilizar una cámara triaxial instrumentada con cristales piezoeléctricos para medir la velocidad de transmisión de onda, tanto primaria (V_p) como secundaria (V_s), en las etapas de saturación, consolidación y falla en pruebas triaxiales, y así observar la variación de estos parámetros en función del parámetro B de Skempton y la trayectoria de esfuerzos.

1.2 Alcance

Para cumplir el objetivo, se ejecutaron ensayos con las muestras mencionadas en una cámara triaxial (pruebas CU) instrumentada con cristales piezoeléctricos, utilizando distintos coeficientes de carga (k) y se analizaron las velocidades de transmisión de onda, y éstas a su vez fueron relacionadas con el esfuerzo efectivo y/o desviador aplicado en las distintas etapas de las pruebas.

CAPÍTULO 2: Conceptos generales

2.1 Introducción al problema de transmisión de ondas sísmicas

Las ondas sísmicas son pequeños paquetes de energía que viajan a través del subsuelo provocando tensiones y compresiones en el medio, dando lugar a pequeñas deformaciones en el mismo. La velocidad con que viajan por un medio depende directamente de las propiedades elásticas del suelo (módulo de elasticidad, módulo de rigidez al cortante y densidad).

Existen dos principales tipos de transmisión de ondas: ondas de cuerpo y ondas de superficie. Las primeras son aquellas que viajan por el interior del medio, mientras que las segundas viajan por los contactos entre distintos materiales, en los cuales se presentan cambios bruscos de rigideces. De la misma forma, existen dos tipos de ondas de cuerpo, las cuales son: onda principal (compresión) y onda secundaria (cortante).

A continuación se describe brevemente el comportamiento de los dos tipos de ondas de cuerpo.

2.1.1 Ondas P

Estas ondas viajan en forma de contracciones y dilataciones sucesivas a través del medio. Usualmente son conocidas como ondas primarias, debido a que son las de mayor velocidad, y por lo tanto son las primeras en arribar cuando son medidas las ondas de cuerpo. La excitación provocada por este tipo de onda es el mismo sentido en que viaja, como se muestra en la Figura 1.

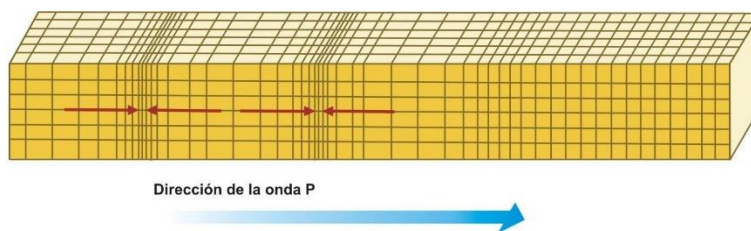


Figura 1 Movimiento de excitación debido a onda P

2.1.2 Ondas S

Este tipo de ondas provoca movimientos cortantes dentro del medio al ser transmitidas, lo que significa que la dirección del movimiento de excitación es transversal a la dirección de transmisión de la onda, como se muestra en la Figura 2. También son conocidas como ondas secundarias, ya que arriban un tiempo después que las ondas P.

Las ondas de cortante únicamente se transmiten en sólidos, dado que los fluidos no soportan esfuerzos de corte. Para los fines del presente trabajo, es importante mencionar que su velocidad de transmisión depende de la rigidez y la densidad del material, por la forma de su movimiento de excitación.

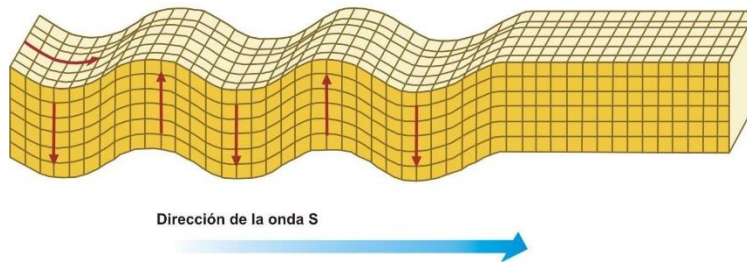


Figura 2 Movimiento de excitación debida a onda S

2.1.3 Parámetros de medición de una onda

En ingeniería, se conoce a una onda como la excitación o movimiento de las partículas internas de un material, el cual es causado por una fuente externa. En general, los siguientes puntos son los más utilizados para caracterizar una onda:

1. Ciclo. Es un movimiento completo de la partícula, la forma unitaria de la onda, está compuesta de una parte positiva y una parte negativa.
2. Periodo de oscilación (T). Es el tiempo transcurrido entre dos puntos equivalentes de una onda, o bien, el lapso que separa dos instantes en los que el sistema se encuentra exactamente en el mismo estado. Tiene unidades de tiempo.
3. Frecuencia de oscilación (f). Es la cantidad de repeticiones de la oscilación de la onda por unidad de tiempo. Tiene unidades de ciclos por unidad de tiempo.
4. Longitud de onda (λ). Es la distancia entre dos puntos consecutivos que se encuentran en el mismo estado de vibración, en un determinado intervalo de tiempo.
5. Amplitud (A). Es la variación máxima de desplazamiento, medida desde el punto de equilibrio o punto neutro hasta una cresta o punto más alejado.
6. Velocidad de propagación (V). Cuando la onda viaja en medios homogéneos e isótropos, puede ser definida como la longitud de la onda entre el periodo de la misma.

$$V = \frac{\lambda}{T} = f \lambda \quad 2.1$$

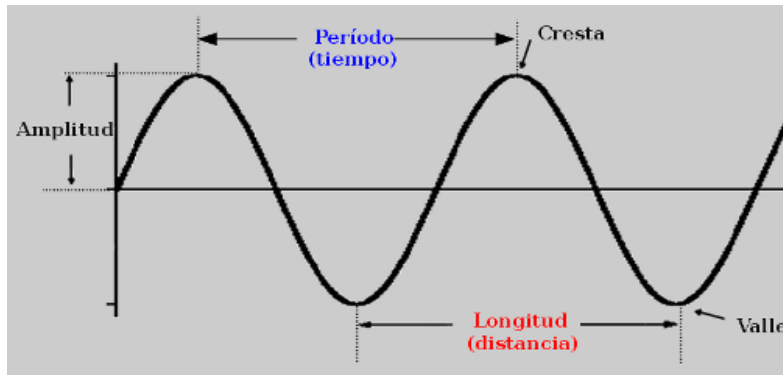


Figura 3 Partes de una onda periódica

2.1.4 Propagación de ondas en una barra elástica

Para describir el fenómeno de propagación de ondas producidas por una perturbación dentro de un medio elástico, es necesario definir el movimiento de las partículas del medio por el cual se propagan, así como los esfuerzos internos que se producen por efecto del movimiento de las partículas.

Ya que el movimiento de las partículas dentro del medio puede considerarse como el efecto de una fuerza que actúa sobre una masa, se recurre a utilizar la segunda ley de Newton, la cual enuncia:

$$F = m * a = \rho * \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \quad 2.2$$

donde:

- m masa
- a aceleración
- ρ densidad del material
- u desplazamiento
- t tiempo

Ahora bien, para definir la propagación de una onda de compresión en una barra de sección transversal circular como la que se muestra en la Figura 4, sobre la cual se le aplica un esfuerzo σ_x , el equilibrio dinámico de una porción de la barra, limitada por dos secciones transversales permite obtener la expresión:

$$-\sigma_x A + \left(\sigma_x + \frac{\delta \sigma_x}{\delta x} dx \right) A = \rho A dx \frac{\delta^2 u}{\delta t^2} \quad 2.3$$

donde:

- σ_x esfuerzo aplicado a la barra

- A área de la barra
- x distancia del punto de medición al origen
- ρ densidad del material
- u desplazamiento
- t tiempo

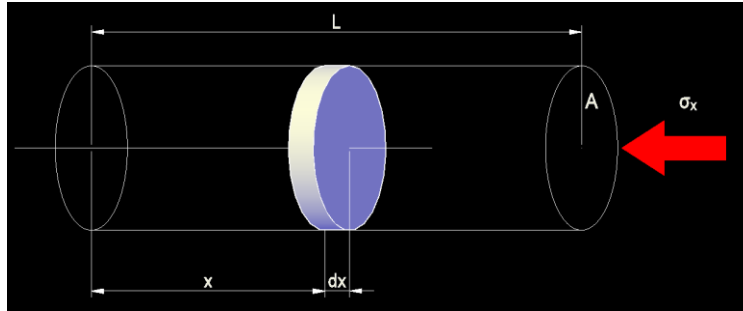


Figura 4 Barra de sección circular (ondas de compresión)

Simplificando la ecuación 2.3, se tiene:

$$\frac{\delta \sigma_x}{\delta x} = \rho \frac{\delta^2 u}{\delta t^2} \quad 2.4$$

Si se considera que

$$\sigma_x = E \frac{\delta u}{\delta t} \quad 2.5$$

$$V_p^2 = E/\rho \quad 2.6$$

donde:

- E módulo de elasticidad del material
- V_p velocidad de transmisión de onda primaria

Finalmente se obtiene la expresión que describe la onda como:

$$\frac{\delta^2 u}{\delta t^2} = V_p^2 \frac{\delta^2 u}{\delta x^2} \quad 2.7$$

Por otro lado, si se quiere definir la transmisión de las ondas de corte o torsionales, al aplicar un momento como se muestra en la Figura 5, el equilibrio de una porción limitada por dos secciones permite obtener la ecuación 2.8

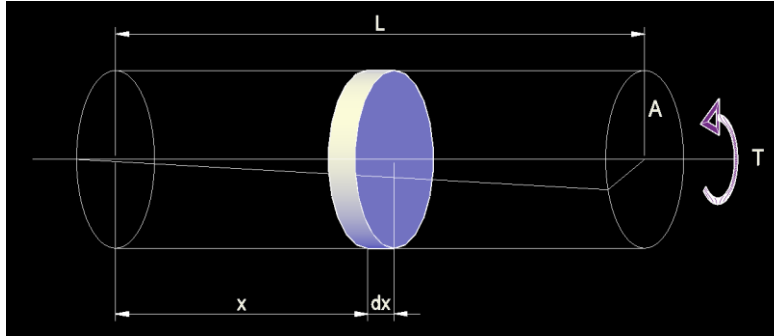


Figura 5 Barra de sección circular (ondas de cortante)

$$-T + \left(T + \frac{\delta T}{\delta x} dx \right) = \rho J dx \frac{\delta^2 \theta}{\delta t^2} \quad 2.8$$

donde:

- T momento torcionante aplicado
- x distancia del punto de medición al origen
- ρ densidad del material
- J momento polar de inercia de la sección de la barra
- θ deformación angular
- t tiempo

Si se considera que:

$$T = JG \frac{\delta \theta}{\delta x} \quad 2.9$$

$$V_s^2 = G/\rho \quad 2.10$$

donde:

- G módulo de elasticidad del material al cortante
- V_s velocidad de transmisión de onda secundaria

Finalmente se obtiene la expresión que describe la onda como:

$$\frac{\delta^2 \theta}{\delta t^2} = V_s^2 \frac{\delta^2 \theta}{\delta x^2} \quad 2.11$$

Las ecuaciones 6 y 10 son la base para la obtención de las propiedades elasto-dinámicas de un material utilizando métodos de obtención de velocidades de transmisión de onda.

2.2 Piezoelectricidad

La piezoelectricidad es un fenómeno que se presenta en ciertos cristales; un cristal con propiedades piezoeléctricas es aquel en el cual se produce electricidad o polaridad eléctrica por efecto de la presión, es decir, un cristal el cual se electrifica al ser comprimido, o bien, se deforma al ser afectado por un campo eléctrico. La anterior definición puede ser ampliada un poco más, por ejemplo, explicando que al realizar una extensión en vez de compresión a un cristal piezoeléctrico, se consigue un cambio de signo en la carga eléctrica emitida por éste (Cady, 1964).

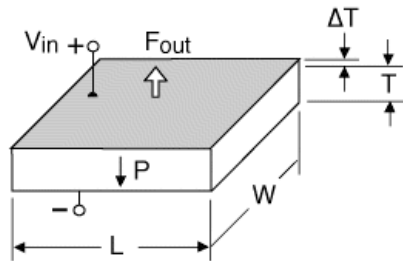


Figura 6 Comportamiento de un cristal piezoeléctrico con la aplicación de un voltaje (Piezo Systems, Inc., 2015)

2.3 Resistencia al esfuerzo cortante en suelos

La resistencia al esfuerzo cortante es la capacidad de un suelo de resistir la falla y el deslizamiento por unidad de área, en cualquier plano dentro de él. La ruptura o falla en el suelo se da cuando se rompen los contactos entre las partículas o grupos de partículas que forman el mismo. Este concepto es importante en la ingeniería geotécnica por ser un parámetro indispensable para el cálculo de estabilidad en cualquier estructura asentada sobre suelo. Ejemplos muy claros los tenemos en las cimentaciones de edificaciones, muros de contención y estabilidad de taludes con o sin protección.

El concepto de falla en el suelo es relativo, ya que existen varios criterios de falla, los cuales están en función de la deformación del suelo, de la resistencia pico que alcanza o del esfuerzo en el que alcanza la fluencia.

2.3.1 Teoría de falla de Mohr-Coulomb

Se sabe que la resistencia al esfuerzo cortante de los suelos depende de un número importante de factores. En suelos gruesos, los principales son la compacidad, la forma de los granos y la granulometría. En cohesivos, se consideran dos parámetros de resistencia, la cohesión y el ángulo de fricción interno del suelo. La expresión para determinar la resistencia al esfuerzo cortante en un suelo se muestra a continuación.

$$\tau = c + \sigma \tan \phi \quad 2.12$$

donde:

- τ esfuerzo cortante en el plano de falla
- σ esfuerzo normal total sobre el plano considerado
- ϕ ángulo de fricción
- c cohesión aparente

2.3.2 Trayectoria de esfuerzos de Cambridge (Teoría de falla del estado crítico)

Al ejecutar un ensaye triaxial se obtiene información sobre el comportamiento mecánico del suelo. La trayectoria de esfuerzos Cambridge es una herramienta de análisis que permite examinar se conoce como trayectoria p-q, donde p y q se definen a continuación:

$$p = \frac{(\sigma_1 + 2\sigma_3)}{3} \quad 2.13$$

$$q = \sigma_1 - \sigma_3 \quad 2.14$$

En función de los esfuerzos efectivos:

$$p' = \frac{(\sigma'_1 + 2\sigma'_3)}{3} \quad 2.15$$

$$q = q' = \sigma'_1 - \sigma'_3 \quad 2.16$$

donde:

σ_1 y σ_3 esfuerzos principales totales aplicados en la prueba
 σ'_1 y σ'_3 esfuerzos principales totales aplicados en la prueba

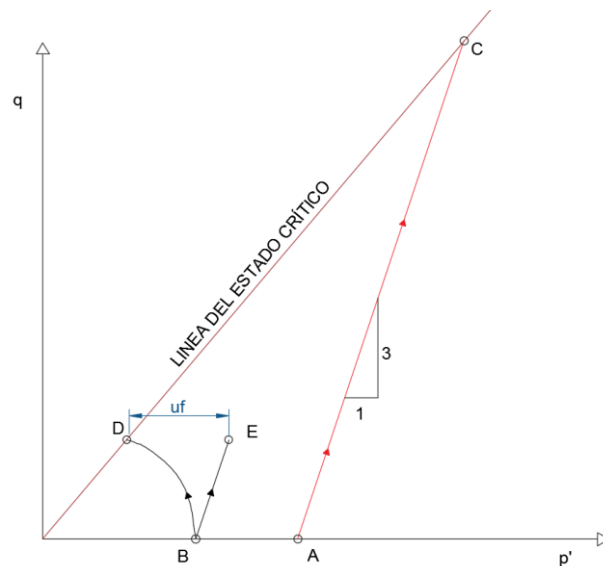


Figura 7 Gráfica esquemática de trayectoria de esfuerzo de Cambridge

La línea que une el origen con el punto C se conoce como línea del estado crítico, la cual tiene una pendiente M. La línea que une los puntos A y C es una trayectoria de esfuerzos efectivos con una pendiente 1:3, a partir del esfuerzo confinante A de un ensayo triaxial CD (*consolidated drained*). La línea que une los puntos B y D es una trayectoria de esfuerzos efectivos de una prueba triaxial CU (*consolidated undrained*), y la línea que une los puntos B y E es una trayectoria de esfuerzos totales de la misma prueba (puede observarse que la distancia horizontal desde la línea BD a la línea BE es el exceso de presión de poro provocada por la presión aplicada). Las relaciones entre M y Φ son:

$$M = \frac{6 \operatorname{sen}\phi}{3 - \operatorname{sen}\phi} \quad 2.17$$

$$\operatorname{sen}\phi = \frac{3M}{6 + M} \quad 2.18$$

donde:

- M pendiente de la línea de falla o de estado crítico
 ϕ ángulo de fricción del suelo en el estado crítico

2.4 Propiedades elásticas de los suelos

Cuando un suelo arcilloso es sometido a deformaciones cíclicas, como en el caso de sismos, vibración provocada por maquinaria o por oleaje, su comportamiento dinámico se puede considerar como no drenado, ya que la velocidad de aplicación de las cargas no permite que dentro de la masa de suelo se disipe la presión de poro extra inducida por la misma carga. Cuando la deformación inducida al suelo es pequeña ($\gamma \leq 10^{-4} \%$), la arcilla tiene un comportamiento que puede considerarse linealmente elástico, ya que no existe una gran disipación de energía por amortiguamiento y la degradación del material no es importante con respecto al número de ciclos. Ahora bien, si la deformación cíclica es de una magnitud importante ($\gamma > 10^{-4} \%$), la energía por disipación y la degradación del material modifican el comportamiento del suelo, lo cual se traduce en una deformación no lineal.

Las deformaciones provocadas por los transductores piezoeléctricos pueden ser consideradas como deformaciones pequeñas, lo que permite realizar el cálculo de parámetros elásticos del suelo sin ser una prueba destructiva. Los parámetros obtenidos a partir de la medición de velocidades de onda en el presente trabajo son el módulo de compresión confinado (M), el módulo de elasticidad de Young (E), y el módulo de rigidez al cortante (G).

Las siguientes expresiones fueron las utilizadas para el cálculo de los parámetros antes mencionados.

$$M = \rho V_p^2 \quad 2.19$$

$$E = \rho V_c^2 \quad 2.20$$

$$G = \rho V_s^2 \quad 2.21$$

donde:

- M módulo confinado en compresión
 V_p velocidad de propagación de onda de compresión confinada
E módulo de Young

- V_c velocidad de propagación de onda de compresión no confinada
- G módulo de rigidez al corte
- V_s velocidad de propagación de onda de corte
- ρ densidad del suelo

Utilizando los datos de velocidad de transmisión de onda (V_s y V_p), es posible determinar la relación de Poisson (ν), la cual es una medida entre las deformaciones transversales y longitudinales al someter un material a un esfuerzo. Mediante la expresión 2.22 es posible obtener el valor de esta relación.

$$\frac{V_p}{V_s} = \sqrt{\frac{2(1-\nu)}{1-2\nu}} \quad 2.22$$

donde:

- V_p velocidad de propagación de onda de compresión confinada
- V_s velocidad de propagación de onda de corte
- ν relación de Poisson

CAPÍTULO 3: Descripción de equipo de laboratorio

3.1 Equipo triaxial neumático

Este equipo es utilizado para realizar pruebas triaxiales en probetas cilíndricas de suelo (8.5 cm de altura y 3.5 cm de diámetro), teniendo la opción de realizar pruebas con una etapa de consolidación isótropa y otra anisótropa, si es necesario, esto variando la presión de confinamiento y el esfuerzo axial ejercido a la probeta mediante la utilización de motores neumáticos a paso semi-automatizados. Lo anterior se puede entender como la posibilidad de seguir trayectorias de esfuerzo definidas para consolidar y fallar un espécimen.

Para la instrumentación con cristales piezoeléctricos para hacer mediciones de velocidad de transmisión de onda, se tuvieron que realizar algunas adecuaciones al equipo. En la placa base se colocaron tornillos tipo glándula para poder pasar los cables de los cristales del interior al exterior de la cámara, de forma que no existan fugas. Por otra parte, se diseñaron y maquilaron el cabezal y el pedestal para poder ser instrumentados con los cristales piezoeléctricos (Flores Guzmán, 2013).



Figura 8 Cámara triaxial neumática con probeta

Esta cámara se encuentra instrumentada con transductores para medir deformaciones axiales en el tercio central de la probeta, fuerza axial, presión confinante, presión de poro o contrapresión,

cambio volumétrico y deformación axial externa en el espécimen de suelo, como se describe a continuación (Flores Guzmán, 2013):



Figura 9 Vista de transductores de cámara triaxial neumática

- Sensores de tipo LVDT sumergibles instalados en el interior de la cámara los cuales permiten registrar las deformaciones axiales en el tercio central de las probetas, con una precisión de lectura del sistema de 0.001%.
- Una celda de carga sumergible colocada en el pedestal, modelo LCUW-250, con un rango de 0–250 lbs.
- Un transductor de presión, modelo G830-000-1C, con un rango de 0 a 100 psi, el cual se utiliza para medir la presión confinante, controlada por un motor a pasos.
- Un transductor de presión Statham, con un rango de 0 a 250 psi, para medir la contrapresión al interior de la muestra.
- Un transductor de presión diferencial, modelo DP15-25, con un rango de 30 cm de columna de agua, opera con ayuda de una doble bureta graduada.
- Un LVDT externo, modelo E1000, de 2" de carrera total, para registrar el desplazamiento del pistón neumático. Está dispuesto de manera que el núcleo permanezca unido al vástago de extensión, acoplado en el émbolo del pistón.
- En el cabezal y pedestal se instrumentó con cristales piezoeléctricos para medir velocidades de onda en una muestra de suelo.

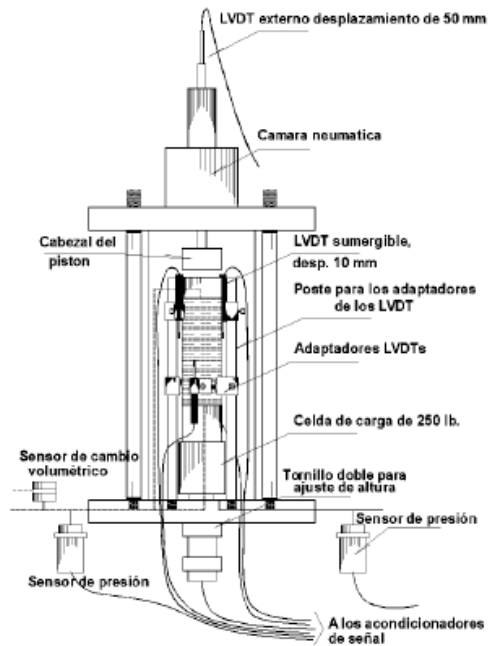


Figura 10 Esquema de cámara triaxial neumática (Valderrama A., 2013)

3.1.1 Calibración de transductores

Todos los transductores utilizados en la cámara triaxial neumática envían una señal a la tarjeta de adquisición de datos, la cual está conectada a un ordenador donde se almacenan todos los datos de las distintas etapas las pruebas triaxiales. Para la realización de las calibraciones de cada uno de los transductores, se utiliza una subrutina del programa de ejecución de las pruebas, especialmente diseñado para de calibrar los transductores y almacenar las constantes para ser utilizadas durante el ensaye. A continuación se mencionan de forma breve cada uno de los procedimientos para la calibración de los distintos transductores:

- Sensores de tipo LVDT sumergibles: Estos cuatro sensores son colocados, uno a la vez, en un marco junto con un tornillo milimétrico, lo cual permite realizar mediciones precisas de desplazamiento y al mismo tiempo el voltaje inducido por el movimiento del núcleo móvil.
- Celda de carga sumergible: Para su calibración se coloca un marco sobre ella y se colocan placas de un peso conocido, para de esta forma determinar el voltaje emitido por la celda cuando se le aplica una serie de cargas conocidas.
- Transductor de presión para medir presión confinante: Para este caso, se utiliza una columna de mercurio conectada en paralelo a la línea de presión y al transductor, lo que permite hacer incrementos en la presión de la línea mediante las perillas del tablero de la cámara, y al mismo tiempo medir el voltaje emitido por el transductor. Dado que se conocen la constante de conversión de altura de columna de mercurio a una presión en kg/cm^3 , es posible realizar mediciones de la presión y el voltaje del transductor para calcular las constantes de calibración.
- Transductor de presión para medir ésta al interior de la muestra: De forma análoga al sensor de presión confinante, se coloca conecta a la línea de la columna de mercurio la línea de presión y el transductor para realizar mediciones de presión y voltaje.
- Transductor de presión diferencial para medir la variación de volumen: El equipo cuenta con una bureta doble que permite la medición visual de la variación de volumen de agua, durante las etapas de saturación y consolidación. Esta bureta permite hacer mediciones de la variación del volumen y al mismo tiempo se observa la variación de voltaje, esto para calcular las constantes de calibración.
- LVDT externo: De manera análoga a los LVDT internos, se coloca en un marco junto con un tornillo milimétrico para hacer mediciones de desplazamiento.

3.2 Instrumentación de cabezal y pedestal con cristales piezoeléctricos

Para realizar las mediciones de velocidad de transmisión de onda, tanto P como S, fue necesario instalar un par de cristales piezoeléctricos en cada pieza (pedestal y cabezal), ya que uno recibirá y otro emitirá una señal que viajará en forma de ondas a través de la probeta de suelo. En el caso de la onda P, se utilizarán elementos de compresión en forma de discos, mientras que para la medición de la onda S se utilizarán elementos de flexión (denominados elementos Bender).

A continuación se describen las características generales de los dos tipos de cristales utilizados.

3.2.1 Elementos de flexión (Bender)

Estos dispositivos están compuestos por dos placas de cristal piezoeléctrico, unidas éstas en contrafase por medio de una lámina conductiva (Figura 11). Este tipo de transductor funciona empujándose tanto en el cabezal como en el pedestal del equipo triaxial, lo cual permite que el dispositivo se coloque dentro de la probeta cilíndrica de suelo, y mediante la utilización de un generador de funciones se aplica un voltaje a uno de los cristales (emisor), para provocar una pequeña deformación (Figura 12), lo que a su vez produce una onda de cortante que viaja a través del suelo, la cual será recibida por el otro cristal (receptor) y la deformación provocada por dicha onda causará un pequeño voltaje, el cual será medido y estudiado para determinar la velocidad de transmisión de onda de corte. Los cristales utilizados en esta investigación fueron adquiridos con la empresa *Piezo System, Inc.*, y el modelo utilizado fue T215-H4CL-203X. Las dimensiones de los elementos Bender son: 31.8 mm de altura, 6.4 mm de ancho y 0.38 mm de espesor.

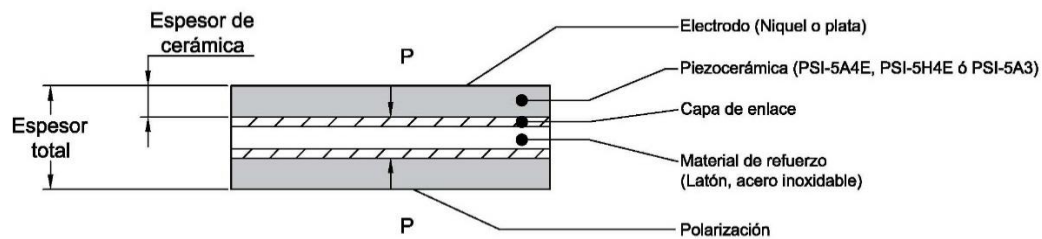


Figura 11 Esquema de los componentes de elementos Bender

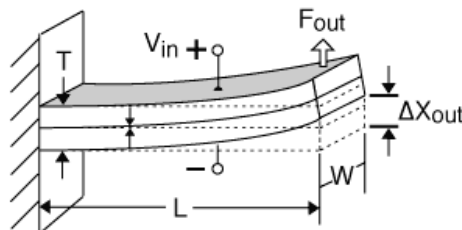


Figura 12 Flexión de un elemento Bender al aplicar un voltaje (Piezo Systems, Inc., 2015)

Tabla 1 Especificaciones de elementos de flexión (Piezo Systems, Inc., 2015)

Número de serie	Peso (g)	Rigidez (N/m)	Capacitancia (nF) Operación en Serie	Voltaje Nominal (Vp) Operación en Serie	Frecuencia Resonante (Hz)	Deflexión Libre (μm)	Fuerza de Bloqueo (N)
X-polos Operación en serie (2 cables)							
.015" (.38mm) Espesor							
T215-A4CL-103X	0.22	1.2×10^2	6	± 120	275	± 370	$\pm .04$
T215-A4CL-203X	0.45	2.0×10^2	11	± 120	275	± 370	$\pm .09$
T215-A4CL-303X	0.9	4.0×10^2	22	± 120	275	± 370	$\pm .17$
T215-A4CL-503X	4.5	1.3×10^2	110	± 120	68	± 1480	$\pm .23$
T215-H4CL-103X	0.22	1.2×10^2	9	± 80	270	± 370	$\pm .045$
T215-H4CL-203X	0.45	2.2×10^2	17	± 80	270	± 370	$\pm .08$
T215-H4CL-303X	0.9	4.6×10^2	35	± 80	270	± 370	$\pm .17$
T215-H4CL-503X	4.5	1.6×10^2	175	± 80	68	$\pm 1,480$	$\pm .23$

3.2.2 Elementos de compresión (discos)

Los elementos de flexión, de la misma forma que los elementos Bender, están compuestos por dos capas de cristal piezoeléctrico y una placa de refuerzo (Figura 11). En este caso, similar a los elementos de flexión, al aplicársele un voltaje a un disco, se producen pequeñas deformaciones (controladas por un generador de funciones), y éstas a su vez provocan una onda de compresión que viaja a través de la probeta de suelo, y de forma análoga, el otro dispositivo recibe la señal para poder calcularse la velocidad de trasmisión de onda de compresión. Para esta investigación se utilizaron cristales modelo T216-A4NO-173X, adquiridos con la empresa *Piezo System, Inc.*, los cuales tienen un diámetro de 6.4 mm y espesor de 0.38 mm.

Tabla 2 Especificaciones de discos de compresión (*Piezo Systems, Inc., 2015*)

Número de serie	Peso (g)	Rigidez (N/m)	Capacitancia (nF) Operación en Serie	Voltaje Nominal (Vp) Operación en Serie	Frecuencia Resonante (Hz)	Deflexión Libre (μm)	Fuerza de Bloqueo (N)
X-polos Operación en serie (2 cables)							
.015" (.38mm) Espesor							
T216-A4NO-073X	0.03	2×10^4	0.3	± 180	116,000	± 1.2	± 2.4
T216-A4NO-173X	0.1	500×10^3	1.1	± 180	29,300	± 4.7	± 2.4
T216-A4NO-273X	0.4	125×10^3	4.3	± 180	7,300	± 19.1	± 2.4
T216-A4NO-373X	2.5	20×10^3	27	± 180	1,170	± 119	± 2.4
T216-A4NO-573X	9.8	5×10^3	107	± 180	290	± 476	± 2.4

3.2.3 Procedimiento de instrumentación

Para realizar el proceso de instrumentación de cabezal y pedestal mediante la utilización de cristales piezoeléctricos, son necesarios los siguientes materiales y equipo:

- 1.- Juego de cristales piezoeléctricos (dos elementos de flexión y dos elementos de compresión)
- 2.- Alambre cobre galvanizado
- 3.- Cable coaxial de 1 mm de diámetro
- 4.- Pintura conductiva de plata
- 5.- Mica transparente auto adherible
- 6.- Resina con reacción a la luz ultravioleta y cámara de luz UV
- 7.- Resina epóxica transparente
- 8.- Acetona pura
- 9.- Soldadura de plata y líquido fundente
- 10.- Termo-contráctil de 1/8" y 1/16" de diámetro
- 11.- Pegamento flexible no conductivo
- 12.- Molde para cristales para encapsular los cristales piezoeléctricos
- 13.- Cautín eléctrico de estación, y
- 14.- Multímetro digital



Figura 13 Equipo y material para instrumentación de cristales piezoeléctricos



Figura 14 Equipo para instrumentación de cristales piezoeléctricos

Para el caso de los discos de compresión, se tiene el siguiente procedimiento para la instrumentación de cada cristal piezoeléctrico:

1.- Se limpia perfectamente con acetona el disco para evitar que se tenga impurezas que impidan que se adhiera la soldadura.

2.- Se cortan dos cables de cobre, uno de 3 cm y uno de 2 cm, se expone el núcleo, utilizando el cautín para retirar el galvanizado del cable y se estaña con soldadura de plata para soldarse al cristal. Es importante diferenciar ambos alambres, ya que el más largo será tomado como el polo positivo.

3.-Previo la colocación de la soldadura, se usa una gota de fundente en el lugar donde se soldará el alambre, el cual debe de ser aproximadamente a 1 mm del centro del disco. Con el cautín se aplica un punto de soldadura al disco sobre el alambre, tanto de un lado como de otro (positivo y negativo).

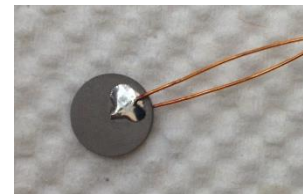


Figura 15 Punto de soldadura en disco de compresión

4.- Para volver a dejar completamente limpio de impurezas el disco, se limpia de nueva cuenta con acetona. Una vez que tiene ambos alambres soldados, se prosigue a colocarle una película protectora aislante (mica auto adherible), dejando descubierto el polo negativo. Sobre la película aislante se pone una capa de pintura conductiva con base de plata y se deja secar por unos minutos.

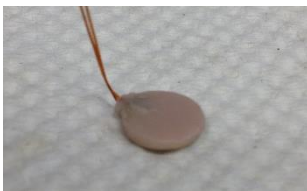


Figura 16 Disco encapsulado con resina UV

5.- Una vez seca la pintura, se prosigue a colocar el cristal dentro del molde y se vacía resina UV para encapsular el cristal y se expone a la luz UV dentro de la cámara. Esto debe realizarse de ambos lados del cristal, de forma que quede completamente cubierto por la resina. El acabado final se le da utilizando unas pinzas para cortar las rebabas y una lija fina para darle la forma y el tamaño necesarios para colocarse tanto en pedestal como en cabezal.

6.- Por último se deben sueldan los alambres a un cable coaxial. Para poder hacer lo anterior, previamente debe prepararse el cable coaxial, separando el recubrimiento del núcleo y dejando

expuesto una parte del núcleo, y estañando ambas partes del cable coaxial. El alambre negativo debe soldarse al recubrimiento y el alambre positivo al núcleo del cable. Para finalizar, debe de aislarse el núcleo con el termo-contráctil de 3/32" de diámetro (debe colocarse antes de soldar el núcleo), el cual debe fijarse con el pegamento flexible, y de la misma forma se aíslan ambos con el termo-contráctil de mayor diámetro.

Para el caso de los elementos Bender, se tiene el siguiente procedimiento para la instrumentación de cada cristal piezoeléctrico:

1.- Se parte por la mitad en forma transversal el elemento de flexión para dejarlo de una altura aproximada de 16 mm, y se limpia perfectamente con acetona para evitar que se tenga impurezas que impidan que se adhiera la soldadura.



Figura 18 Elemento de flexión con mica auto-adherible

2.- Se llevan a cabo los pasos 2 a 6 del procedimiento anterior.

Es importante realizar una prueba con un generador de funciones para asegurar el funcionamiento del juego completo de cuatro cristales (dos elementos Bender y dos discos de compresión).



Figura 17 Extracción de núcleo de alambre de cobre galvanizado

Nota: En cada uno de los pasos y antes de comenzar con el proceso de encapsulado de cualquier cristal, con la ayuda del multímetro digital, es necesario asegurarse que la capacitancia del dispositivo esté dentro de los rangos de la Tabla 3, así como revisar si el cristal no entró en corto. Lo anterior permite cerciorarse si el procedimiento de instrumentación ha sido el adecuado.

Tabla 3 Rangos de capacitancia de cristales piezoeléctricos

Cristal piezoeléctrico	Capacitancia (nF)
Elementos de flexión	7 - 15
Discos de compresión	1.1 - 1.3

Ya que se cuenta con el juego completo de cristales, el siguiente paso es colocarlos en el pedestal y el cabezal. Como último paso es necesario es colocar unas gotas de pegamento rígido den la base de cada uno de los cristales (con el objetivo de impedir su movimiento) para después colocar una capa de resina epóxica transparente que proteja el conjunto eléctrico interno del agua y humedad. Antes de colocar la resina, es importante realizar la calibración de los discos de compresión (3.2.4 Tiempo de retardo de arribo de la onda debido al equipo), ya que una vez colocados los elementos Bender, será imposible poner en contacto ambos discos.

Tabla 4 Productos y proveedores de materiales para instrumentación de cristales piezoeléctricos (Flores Guzmán, 2013)

Descripción	Proveedores	Modelos según catalogo	Observaciones	Página web
Elemento de compresión	Piezo Systems, Inc.	T216-A4NO-173X	2 layer piezo bending disk actuator	www.piezo.com
Elemento de flexión		T215-H4CL-203X	2 layer high performance piezo bending actuator	
Cable coaxial	Coner Wire	CW2040-3650F	Cable coaxial de 1 mm de diámetro	www.coonerwire.com
Pintura conductiva dieléctrica base plata	Newark	96H6677	CONDUCTIVE INK, BOTTLE, 125G; Coating Type: Conductive; Chemical Color: Silver.	www.newark.com
Conectores BNC	Newark	39F063		www.newark.com
Material para fabricar el pedestal y cabezal de 3.6 cm de Ø.	Metales Díaz S.A. de C. V.	14212	RED. NYLAMID 44.4 Mm SL (NEGRO)	www.metalesdiaz.com.mx
Kit de recubrimiento M-coat A	Micro medidas, S.A. de C.V.	---	VISHAY	www.vishaypg.com , www.micromedidas.com
Fotoplas S10	Dreve otoplastik GmbH	4972	Resina UV	www.dreve.com
Kit de soldadura y fundente	Harris products group	SBSKPOP Kit con Fundente	Stay-Brite® Kit	www.harrisproductsgroup.com , www.newark.com

3.2.4 Tiempo de retardo de arribo de la onda debido al equipo

Existe un tiempo de retardo que afecta directamente en la medición de la velocidad de transmisión de ambas ondas, debido a las características de los equipos electrónicos, de los cristales piezoeléctricos y a los cables utilizados para los cristales. La preparación previa de los cristales consiste en colocar un juego de éstos directamente uno contra el otro (ya sea de elementos Bender o de discos de compresión), de forma que la señal sea recibida directamente y poder conocer el tiempo que tarda en llegar la señal, y de esta forma poder corregir el tiempo de retardo que tarda la onda en llegar de un cristal a otro pasando a través del suelo.

3.3 Equipo para adquisición de datos de velocidad de transmisión de onda

El sistema utilizado para el desarrollo de las mediciones de velocidad de transmisión de onda fue diseñado y construido en el laboratorio de Geotecnia, con la colaboración de la Coordinación de Instrumentación del Instituto de Ingeniería de la UNAM. El sistema consiste en un generador de funciones para generar el movimiento de los cristales, un osciloscopio digital y un equipo con software que permite el almacenamiento digital de la señales. A continuación se describen brevemente cada uno de los equipos utilizados.



Figura 19 Equipo para medir tiempo de arribo de ondas

3.3.1 Generador de funciones y amplificador



Figura 20 Generadores de funciones

Para provocar la excitación necesaria a los cristales piezoeléctricos se utiliza un equipo que genera funciones sinusoidales y cuadradas (modelos Wavetek 175). Este equipo emite señales eléctricas hacia el cristal transmisor, lo que provoca en el cristal un movimiento, y éste a su vez genera la onda que viaja a través del suelo hasta llegar al cristal receptor. El equipo cuenta con un amplificador del voltaje, lo cual permite que se aplique una señal con una amplitud de hasta 250 Volts punta a punta. El generador puede aplicar con frecuencias de hasta 800 kHz.

3.3.2 Osciloscopio digital y software

Las señales emitidas por el generador de funciones y admitidas por el cristal receptor, son visualizadas en tiempo real mediante la utilización de un osciloscopio digital (modelo: HP 54540), el cual cuenta con dos canales de entrada, uno conectado directamente desde el generador de funciones y otro desde el cristal receptor.



Figura 21 Osciloscopio digital

Al comparar ambas señales en un mismo espacio, es posible realizar el cálculo de la diferencial de tiempo (Δt). Los datos de ambas señales son enviados a un ordenador mediante una tarjeta de adquisición de datos para poder ser procesados. El software utilizado para la adquisición de datos es la plataforma LabVIEW (*Laboratory Virtual Instrumentation Engineering Workbench*). Con la utilización del lenguaje propio de la plataforma se desarrolló un programa para poder digitalizar los datos y guardarse en el ordenador para su posterior procesamiento.

El análisis del tiempo de arribo se realiza con el programa Igor Pro, el cual está diseñado para el análisis de ondas y fue desarrollado por *WaveMetrics Inc*. El ambiente de este programa permite tener en una misma pantalla ambas ondas y determinar la diferencia de tiempo entre la señal emitida y la señal recibida.

CAPÍTULO 4: Descripción de muestras y procedimiento de ensayos

4.1 Descripción de las muestras utilizadas

Las muestras utilizadas para el presente trabajo fueron extraídas como parte de la campaña de exploración previa al estudio de mecánica de suelos y proyecto geotécnico para la construcción del Nuevo Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México (NAICM). En la Figura 22 se muestra una vista satelital del predio de estudio, donde también se pueden observar algunas de las lagunas de control cercanas al predio.

El sitio en estudio también se ubicó en el mapa de zonificación geotécnica de las Normas Técnicas Complementarias para diseño y construcción de cimentaciones del Reglamento de Construcción del D.F. (Figura 23), donde se puede observar que el sitio se encuentra en la Zona III (zona de lago). Las principales características de esta zona son los siguientes:

“Lacustre, integrada por potentes depósitos de arcilla altamente compresibles, separados por capas arenosas con contenido diverso de limo o arcilla. Estas capas arenosas son generalmente medianamente compactas a muy compactas y de espesor variable de centímetros a varios metros. Los depósitos lacustres suelen estar cubiertos superficialmente por suelos aluviales, materiales desecados y rellenos artificiales; el espesor de este conjunto puede ser superior a 50 m.” (Normas Técnicas Complementarias para diseño y construcción Cimentaciones, Reglamento de Construcción del Distrito Federal, 2004)



Figura 22 Vista satelital del sitio de estudio, NAICM

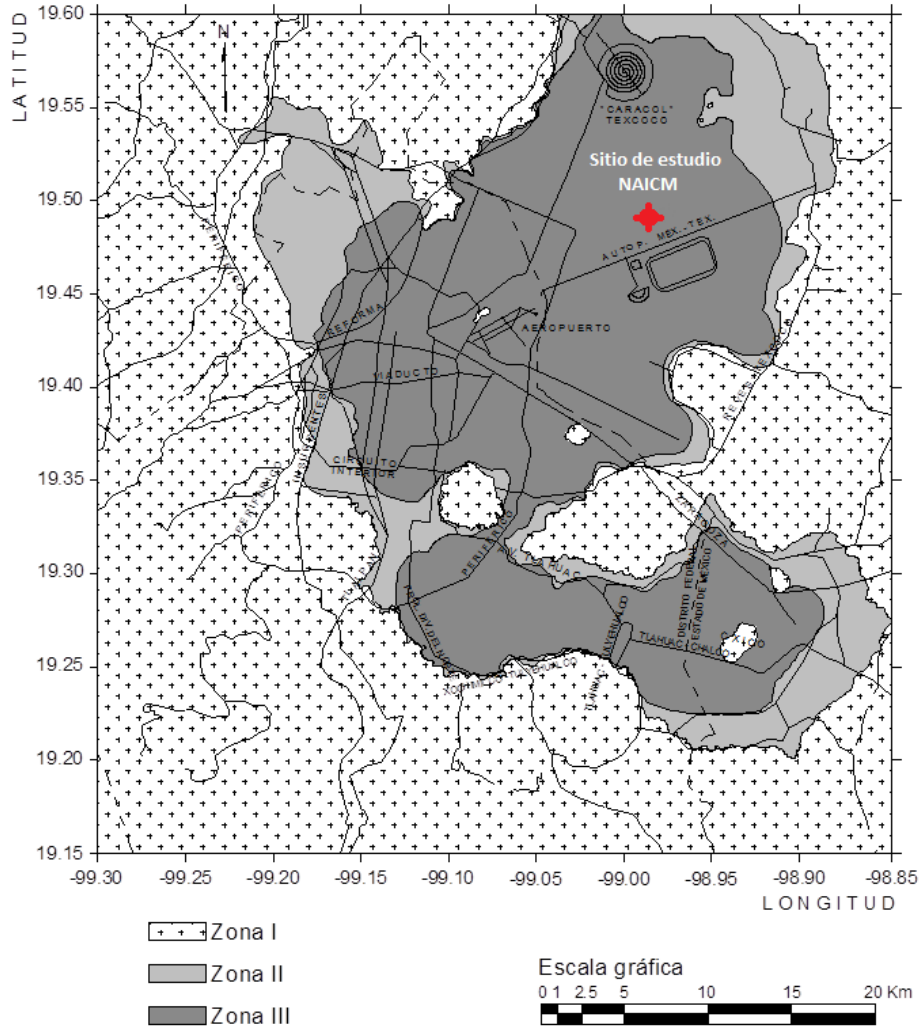


Figura 23 Ubicación de sitio de estudio en mapa de zonificación geotécnica (Normas Técnicas Complementarias para diseño y construcción Cimentaciones, Reglamento de Construcción del Distrito Federal, 2004)

En la Tabla 5 se muestra la información de identificación de las muestras ensayadas, así como las propiedades índice de cada una de ellas.

Tabla 5 Resumen de identificación y propiedades de muestras ensayadas

Sondeo	Muestra No.	Profundidad (m)	K	w %	w _L %	w _P %	PI %	LI	G _S	e	G _w	γ kN/m ³
SS-01	7	29.30-30.00	0.4	152.45	213.25	63.84	149.41	0.321	2.88	3.84	99.24	13.44
SS-03	6	25.40-26.00	0.5	195.9	254.48	56.29	198.19	0.704	3.34	6.65	98.54	12.65
SM-23	10-Bis	24.00-24.60	0.6	178.73	264.97	86.91	178.06	0.516	3.17	5.69	99.54	12.94
SM-07	65	30.90-31.40	1.0	148.95	294.41	92.66	201.75	0.635	2.67	5.94	99.31	12.98

4.2 Procedimiento de ensaye

4.2.1 Antecedentes

Como ya se mencionó anteriormente, como parte de una línea de investigación propia del Instituto de Ingeniería de la UNAM, se realizaron pruebas de consolidación unidimensional y triaxiales midiendo la velocidad de transmisión de onda. El primero en instrumentar una cámara triaxial con transductores piezoeléctricos fue Flores Guzmán (2013), quien realizó pruebas con suelos del Valle de México de alta plasticidad; comparó los resultados con otras pruebas de laboratorio, así como con pruebas de campo. Con lo anterior, el método de obtención de parámetros elásticos utilizando cristales piezoeléctricos quedó validado, ya que los resultados fueron congruentes con los obtenidos con otros métodos.

Después de su utilización por primera vez, esta técnica fue utilizada para instrumentar un consolidómetro mecánico (Díaz P. M. , 2014), con el objetivo de medir las velocidades de transmisión de onda de corte y compresión en muestras de suelo, específicamente en suelos marinos y del Valle de México. Durante las pruebas de consolidación unidimensional, las cuales consistieron en etapas de carga y descarga, se midieron las velocidades V_s y V_p , con el objetivo de conocer la variación de los parámetros dinámicos durante la prueba. Con esta investigación se desarrolló una metodología para disminuir la incertidumbre de medición del tiempo de arribo, misma que es utilizada en la presente investigación.

La investigación más reciente (Vázquez A., 2016), consistió en la realización de pruebas triaxiales (CU) en probetas de suelo del lago de Texcoco, bajo diferentes trayectorias de esfuerzo durante la etapa de consolidación. Durante estas pruebas se tomaron lecturas de onda al final de cada incremento de esfuerzos, en las etapas de saturación y consolidación.

En 1979, Stephan K. Roesler, utilizó un equipo de laboratorio para formar probetas cúbicas de arena construidas en capas, de forma que pudiera aplicar distintas cargas en los tres sentidos (X, Y Z), y además, utilizó un motor de corriente directa, colocándolo dentro de la probeta de forma que pudiera crear ondas de cortante S, y por supuesto, un juego de 3 transductores que permitieran la medición de la velocidad de transmisión de onda S en cada sentido en que se aplican las cargas. Roesler encontró que la velocidad de transmisión de ondas S a través de la muestra depende del estado de anisotropía en el que se encuentre, es decir, de las direcciones y magnitudes de las cargas aplicadas (Roesler, 1979).

Más recientemente, en 2004, Jaques Desrues, realizó pruebas de laboratorio con arena de granos finos de Grenoble, Francia en un equipo de compresión con deformación plana. Sus pruebas consistieron en la formación de una probeta prismática de arena recubierta con una membrana (sobre la cual se dibuja una malla), y la aplicación de un esfuerzo horizontal σ_3 , y una carga vertical σ_1 , lo que permite una consolidación anisótropa de la arena. Una vez terminada la etapa de consolidación, las probetas fueron llevadas a la falla con una velocidad de deformación controlada de 1.2 mm/min, pero en distintos puntos del ensaye se tomaron fotografías con el objetivo de realizar mediciones reconociendo el movimiento de los puntos de la malla dibujada sobre la

membrana(fotogrametría), todo lo anterior para conocer las líneas de falla que se presentan en la probeta y de esta manera describir el tipo de falla sufrido dentro del suelo (Desrues, 2004).

Utilizando una cámara triaxial, Supot Techavorasinsku, llevó a cabo una serie de ensayos sobre suelos arenosos obtenidos de la región este de Tailandia. El cabezal y el pedestal de la cámara fueron instrumentados con elementos Bender para medir la velocidad de transmisión de onda de corte. Las conclusiones obtenidas de este estudio fueron que en la etapa de consolidación isotrópica, la velocidad de corte tiene una relación de dependencia con la magnitud de la presión efectiva principal, mientras que en la etapa de falla es necesaria una función para describir el comportamiento de los parámetros medidos, y una vez alcanzado el pico de fuerza desviadora, la velocidad decrece de forma casi lineal (Teachavorasinskun S. P., 2016).

En una nota técnica, Supot Techavorasinsku, realizó un reporte sobre sus trabajos sobre las arcillas de la ciudad de Bangkok. Al igual que en el presente trabajo, fueron utilizados elementos Bender colocados en cabezal y pedestal de una cámara triaxial para medir la velocidad de transmisión de onda de corte.

En el presente trabajo, como ya se explicó, se utilizó un equipo triaxial neumático semi-automático, lo cual permite realizar una etapa de consolidación anisótropa antes de la etapa de falla, y de la misma forma que Techavorasinsku se utilizaron cabezal y pedestal instrumentados con elementos Bender para medir la velocidad de transmisión de onda de corte, añadiendo elementos de compresión que permitieron la medición de la velocidad de ondas P. En los siguientes apartados se mencionan con precisión las etapas llevadas a cabo en cada una de los ensayos.

4.2.2 Preparación de la muestra y labrado de probeta

Las muestras fueron extraídas de tubo de pared delgada tipo Shellby. Para su extracción es necesario cortar un tramo de aproximadamente 11 cm del tubo con la ayuda de una segueta y arco. Mientras se va cortando el tubo de acero, es necesario pasar un alambre a través de la abertura para ir cortando el suelo y evitar desconchamientos al separar las partes del tubo.

Una vez que se tiene el tramo de tubo, se introduce una pequeña broca transversalmente pegada a la pared del tubo, con el objeto de romper parte de la fricción entre el suelo y la pared del tubo. Para extraer la muestra se coloca sobre una base conectada al pistón de un gato hidráulico, de forma que no se pueda mover el tubo de acero y poder extraer la muestra utilizando el gato.

A continuación se mencionan los pasos necesarios para el labrado de la muestra:

- a) Se corta una muestra de aproximadamente 10 cm de altura y se coloca horizontalmente en el cabeceador, para cortar la cara superior e inferior y así garantizar que sean paralelas.
- b) De preferencia, se corta en 3 secciones longitudinalmente para obtener las mismas 3 probetas para que puedan ser ensayadas. Se coloca una sección en el pedestal del labrador para ser cortada con sumo cuidado la muestra hasta obtener una forma cilíndrica, esto utilizando un alambre delgado y una regla de aluminio.

c) Ya conseguida la forma cilíndrica, se carea la muestra de suelo para tener una altura aproximada de 8.5 cm. El diámetro queda definido por el torno, el cual es el mismo que el del pedestal sobre el que se coloca el suelo dentro de la cámara triaxial (aproximadamente 3.5 cm).

d) Se toman las medidas de la probeta, ya que puede existir una variación en el diámetro, y la altura, así como el peso de la misma.

Mientras se realiza el proceso de labrado, se obtienen pequeñas muestras representativas para el contenido de agua de la probeta. Se toma una muestra de los cortes más alejados de la probeta y una de los cortes más cercanos a ésta.

4.2.3 Montaje de probeta

El montaje de las probetas en la cámara triaxial neumática es un punto crucial en los resultados arrojados por cada una de las pruebas, ya que como se explicó con anterioridad, este equipo cuenta con transductores para medir desplazamiento, cambio volumétrico, presión de poro y confinante, y tiempo de arribo de ondas; lo anterior hace que el montaje sea un procedimiento muy delicado y tenga muchos detalles que afecten el desarrollo de la prueba.

A continuación se presentan el procedimiento general a seguir en el montaje:



Figura 24 Rejilla de papel filtro para cubrir la probeta

a) Se preparan las piedras porosas (filtros del drenaje de pedestal y cabezal), el papel filtro para tapar las mismas y evitar que se saturen de suelo y se tapen los drenajes, de la misma forma se prepara una rejilla para cubrir perimetralmente la probeta (Figura 24). Ambos, tanto las piedras como el papel deben de saturarse con agua destilada antes de ser colocados. Las líneas de drenaje deben ser saturadas y se debe verificar que no estén tapadas.

b) Se perforan cavidades en la parte superior e inferior de la probeta, con el objetivo de que puedan ser ensamblados los cristales piezoeléctricos de pedestal y cabezal, de forma que se encentren en contacto con el suelo. Para asegurar el contacto, también se coloca sobre cada uno de los cristales una pequeña cantidad de mezcla de caolín con agua (Figura 25).

c) Se coloca la muestra sobre el pedestal, se prepara la membrana y se coloca el cabezal sobre la muestra. Una vez alineada y bien colocada la muestra se coloca la membrana y se fija con arosellos.

d) Ya colocada la muestra y la membrana, se realizan 4 perforaciones en el tercio medio de la probeta para colocar las zapatas utilizadas para colocar y fija los LVDT's sumergibles, y se colocan las zapatas con un pegamento para impedir fugas. Después de ser colocados los LVDT's, es necesario ponerlos en una lectura inicial, la cual permitirá hacer



Figura 25 Mezcla de caolín para hacer contacto cristales-suelo

mediciones (evitando pasar de valores negativos a positivos) sin que se sature cada transductor o no tenga la carrera necesaria.

- e) Por último se coloca la camisa de la cámara y la tapa, de forma que la posición del pistón no permita la trasmisión de carga directamente sobre la probeta, pero que haga perfectamente contacto. Una vez colocado todo en su lugar, se llena la cámara con agua destilada y desairada.

4.2.4 Etapa de saturación por contrapresión y medición de B de Skempton

El procedimiento de saturación por contrapresión consiste en aplicar presiones de confinamiento y contrapresión, de manera que el esfuerzo efectivo sea igual a 0.1 kg/cm^2 en varios incrementos, es decir que la diferencia de la presión confinante menos la contrapresión sea igual a este valor.

El primer incremento de cargas en esta etapa es de 0.5 kg/cm^2 de contrapresión y 0.6 kg/cm^2 de presión confinante. Para permitir que la probeta se sature por la entrada de agua, es necesario abrir las válvulas de drenaje. Aproximadamente cada 24 horas se realiza un incremento de presiones de 0.5 kg/cm^2 , de forma que permanezca la diferencia de 0.1 kg/cm^2 de esfuerzo efectivo. Al término de cada incremento se realiza el cálculo del parámetro B de Skempton y con los transductores piezoeléctricos, se miden V_s y V_p .

La medición de B de Skempton se realiza tomando como referencia las presiones iniciales aplicadas a la probeta, y se aumenta la presión de confinamiento en 1 kg/cm^2 , cerrando el drenaje para evitar la consolidación del suelo, pero midiendo la presión de poro interna. Después de que se han estabilizado las presiones, se vuelve a medir ambas y se sustituyen en la expresión 4.1

$$B = \frac{\Delta u_{cp}}{\Delta \sigma_c} \quad 4.1$$

donde:

Δu_{cp} diferencial de presión de poro

$\Delta \sigma_c$ diferencial de presión de confinamiento

Cuando este parámetro es igual o mayor que 0.96, se considera que la probeta está saturada, lo que permite continuar la prueba, con la etapa de consolidación.

4.2.5 Etapa de consolidación

Como se mencionó anteriormente, el equipo con el que se trabajó permite ensayar una muestra con consolidación anisótropa, mediante la variación de la presión de confinamiento y la aplicación de carga axial a la probeta.

Antes de comenzar la consolidación anisótropa se realizan dos incrementos de consolidación isotrópica cada 24 horas, con el objetivo de alejarse de la línea de falla o línea de estado crítico y evitar que la muestra falle en la etapa de consolidación. Los motores de paso controlados por el software utilizado para llevar a cabo la prueba, permiten automatizar la aplicación de una

trayectoria de esfuerzos con un parámetro k (relación entre presión de confinamiento y presión axial aplicada), como se observa en la Figura 26.

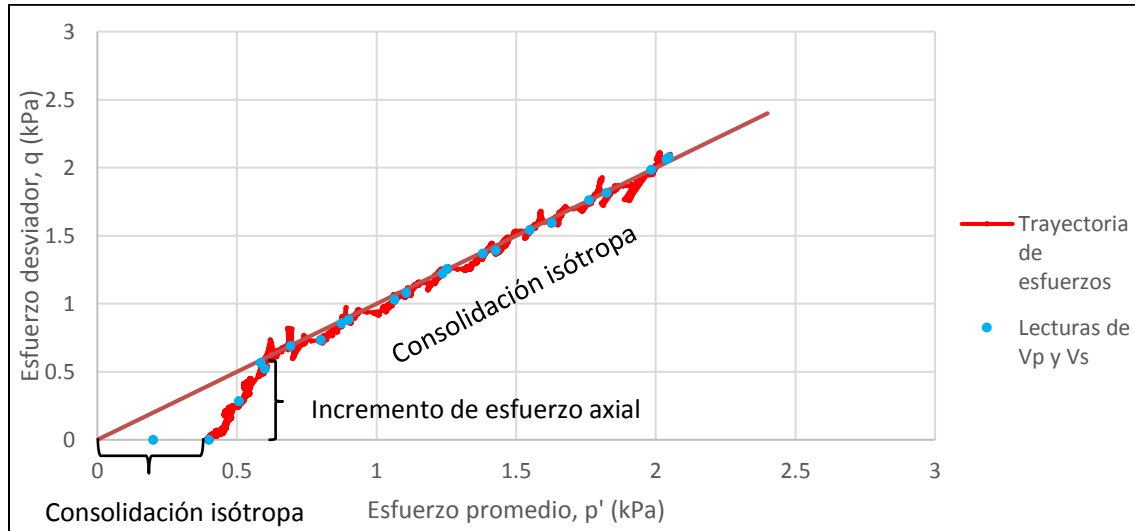


Figura 26 Diagrama p' - q de una consolidación anisótropa

Se midieron las velocidades de transmisión de onda después de 24 horas de haber aplicado los primeros dos incrementos de consolidación isotrópica, y 2 veces por día (cada 12 horas aproximadamente) en el proceso de consolidación anisótropa. El tiempo de duración de la etapa de consolidación va de los 5 hasta los 10 días.

4.2.6 Etapa de falla

Esta etapa se aplica una carga axial a la muestra, manteniendo constante la presión de confinamiento e impidiendo el drenaje de la muestra, para obtener los parámetros no drenados de resistencia del suelo ensayado. La aplicación de carga fue a velocidad de deformación constante de 0.04167 mm/min.

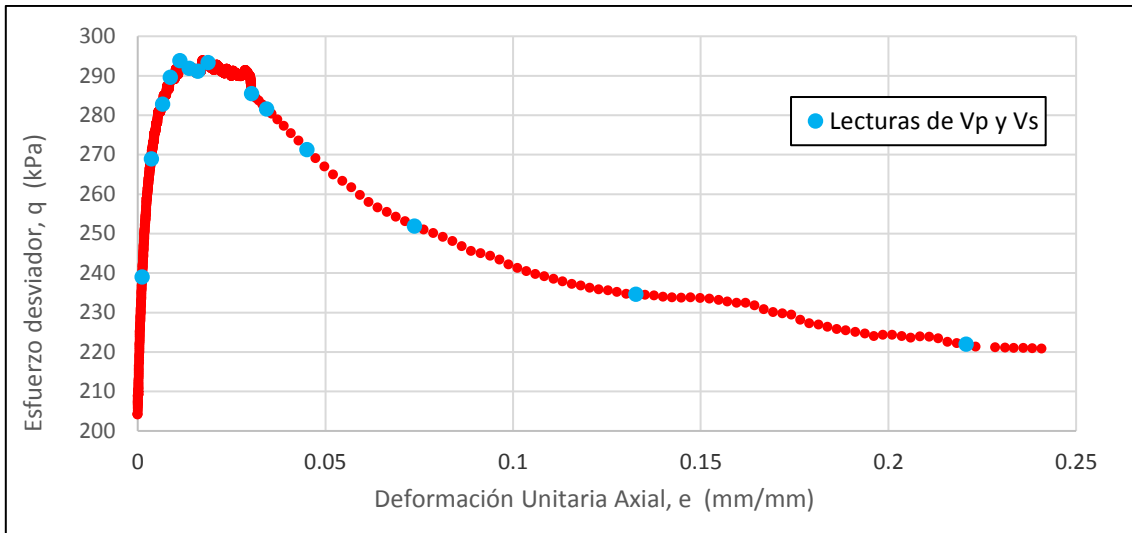


Figura 27 Diagrama de esfuerzo-deformación en etapa de falla

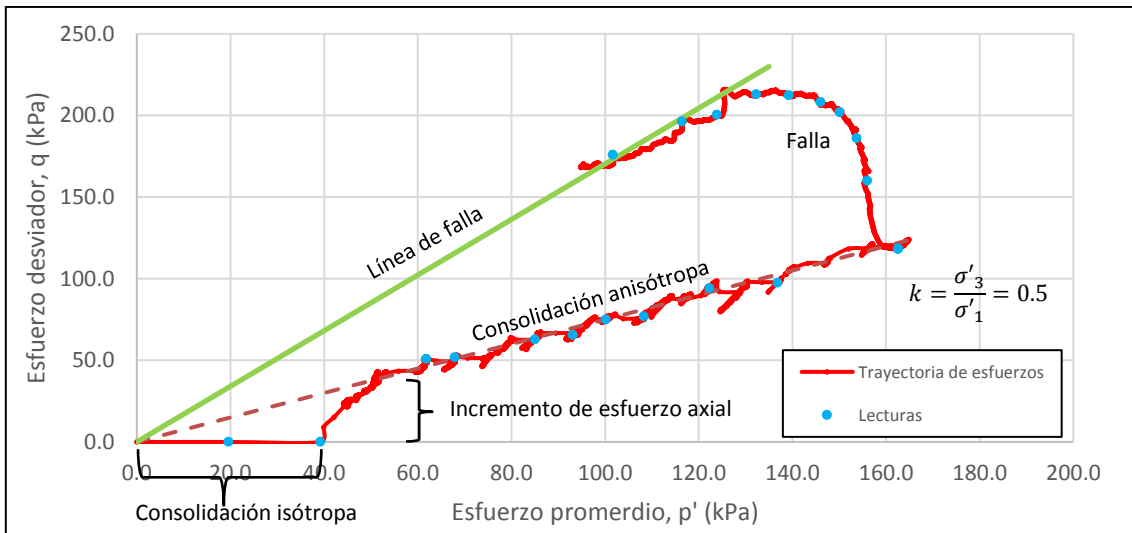


Figura 28 Diagrama p' - q con la trayectoria de esfuerzo de la prueba completa

Como se muestra en las figuras anteriores (Figura 27y Figura 28), se realizaron mediciones de velocidades de onda en distintos incrementos de esfuerzo de la etapa de falla, lo que permitió apreciar el de las propiedades elasto-dinámicas del suelo durante esta etapa.

4.2.7 Obtención de k_0 a partir de pruebas triaxiales

Utilizando los datos de consolidación de las pruebas realizadas, es posible obtener el coeficiente de tierra en reposo (k_0) (Bishop, 1958). Este método alternativo está basado en la suposición de que para encontrar el valor de K_0 es necesario que durante la consolidación la deformación volumétrica sea igual a la deformación axial, es decir:

$$\frac{\Delta V}{V_0} = \frac{\Delta H}{H_0} \quad (5.1)$$

$$\varepsilon_v = \varepsilon_a \quad (5.2)$$

donde:

ΔV diferencial de volumen sufrido durante la prueba

V_0 volumen inicial

ΔH diferencial de altura sufrido durante la prueba

H_0 altura inicial

ε_v deformación volumétrica

ε_a deformación axial

Para lograr estas condiciones en una prueba es necesario contar con transductores que permitan una medición exacta de las deformaciones, sin embargo, también es posible utilizando las pruebas de consolidación anisótropa, es decir, definiendo un cociente de esfuerzos y manteniéndolo constante durante cada prueba. Se realizan pruebas con muestras del mismo horizonte con distintos valores del coeficiente de esfuerzos

Una vez que se tiene los datos de las pruebas, se calcula un cociente de deformaciones ($\varepsilon_v/\varepsilon_a$) y se busca que se mantenga constante dentro de un gráfico contra los esfuerzos efectivos (p'); al encontrar ese punto, puede realizarse otra gráfica en la que ubiquen estos puntos contra el coeficiente de esfuerzos al que fue sometido la probeta. Al crear una tendencia con los puntos anteriores, es posible localizar el k_0 donde el cociente de deformaciones es igual a 1 ($\varepsilon_v/\varepsilon_a=1$) (Ovando, López, & Trigo, 2007).

CAPÍTULO 5: Resultados de los ensayos

5.1 Resultados de pruebas triaxiales

5.1.1 Gráficas de compresibilidad

En la etapa de consolidación de la prueba, es posible obtener una gráfica de compresibilidad teniendo información sobre la deformación volumétrica y los esfuerzos efectivos aplicados sobre la probeta que provocan el fenómeno de consolidación. A continuación se pueden observar las curvas de compresibilidad de cada una de las pruebas realizadas (Figura 29-Figura 32) antes de comenzar la etapa de falla. De estas gráficas se puede obtener mediante el criterio de Casagrande (*Casagrande, 1936*), en la Tabla 6 se concentran los esfuerzos de preconsolidación de cada una de las probetas ensayadas.

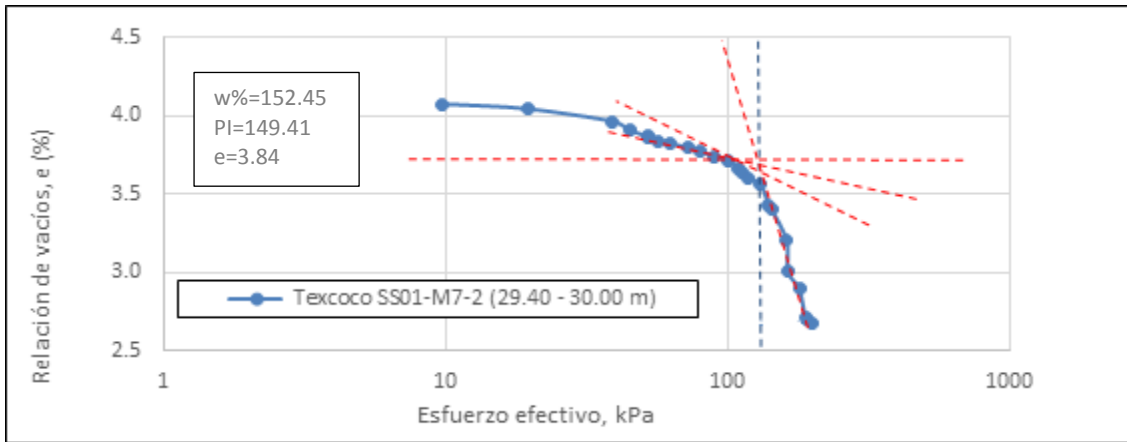


Figura 29 Curva de compresibilidad (M-7 SS-01) $k=0.4$

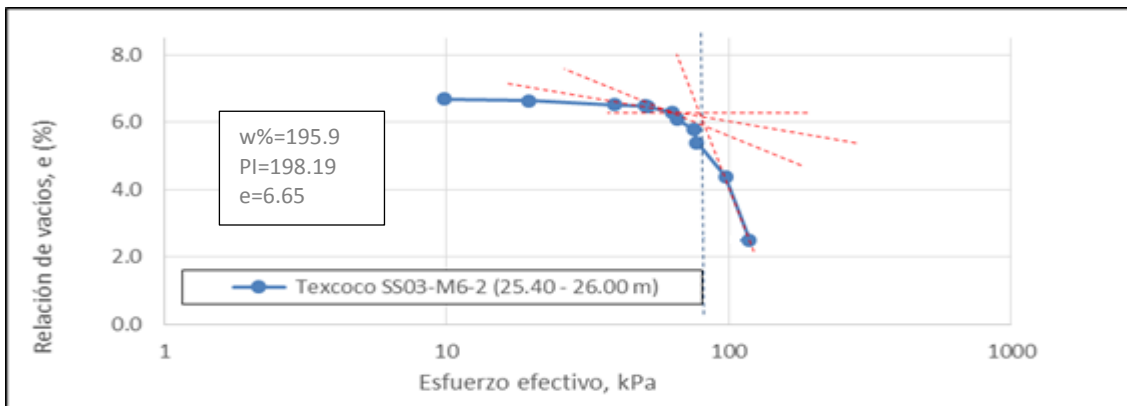


Figura 30 Curva de compresibilidad (M-6 SS-03) $k=0.5$

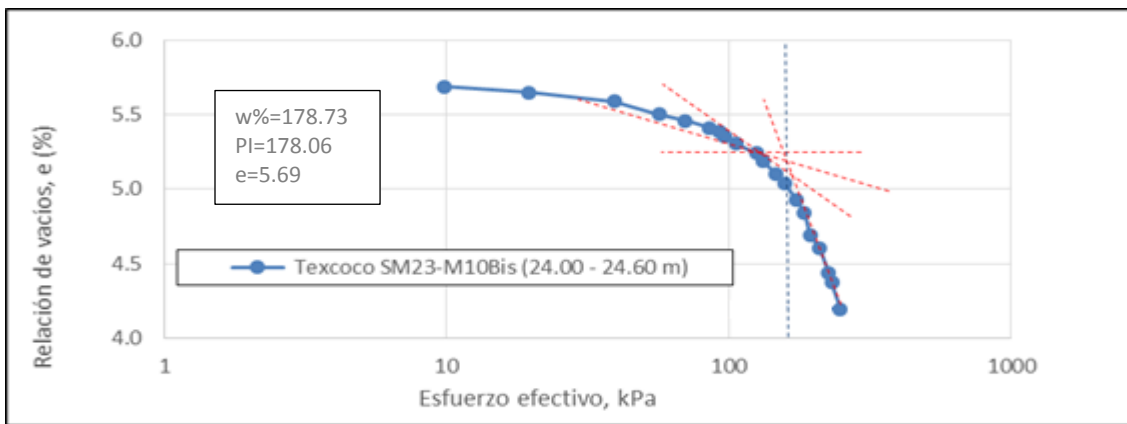


Figura 31 Curva de compresibilidad (M-10Bis SM-23) $k=0.6$

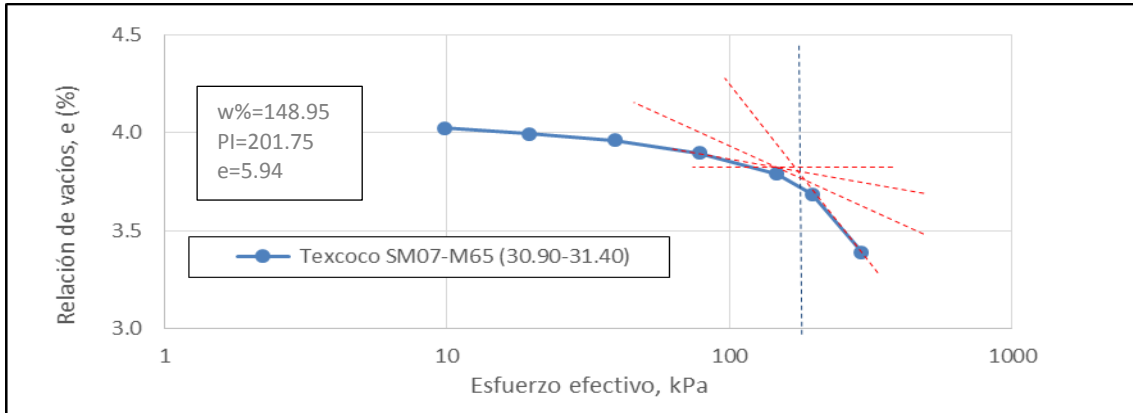


Figura 32 Curva de compresibilidad (M-65 SM-07) k=1

Tabla 6 Esfuerzos de preconsolidación de las muestras

Muestra	Esfuerzo de preconsolidación, Pc (kPa)	k
M-7 SS-01	120	0.4
M-6 SS-03	80	0.5
M-10Bis SM-23	160	0.6
M-65 SM-07	175	1.0

5.1.2 Trayectorias de esfuerzos

En este apartado se muestran las trayectorias de esfuerzo, durante la etapa de consolidación isotrópica, continuando con la consolidación anisótropa y terminando con la etapa de falla. En las figuras siguientes se pueden observar las trayectorias de esfuerzo seguidas en cada ensaye (Figura 33-Figura 37).

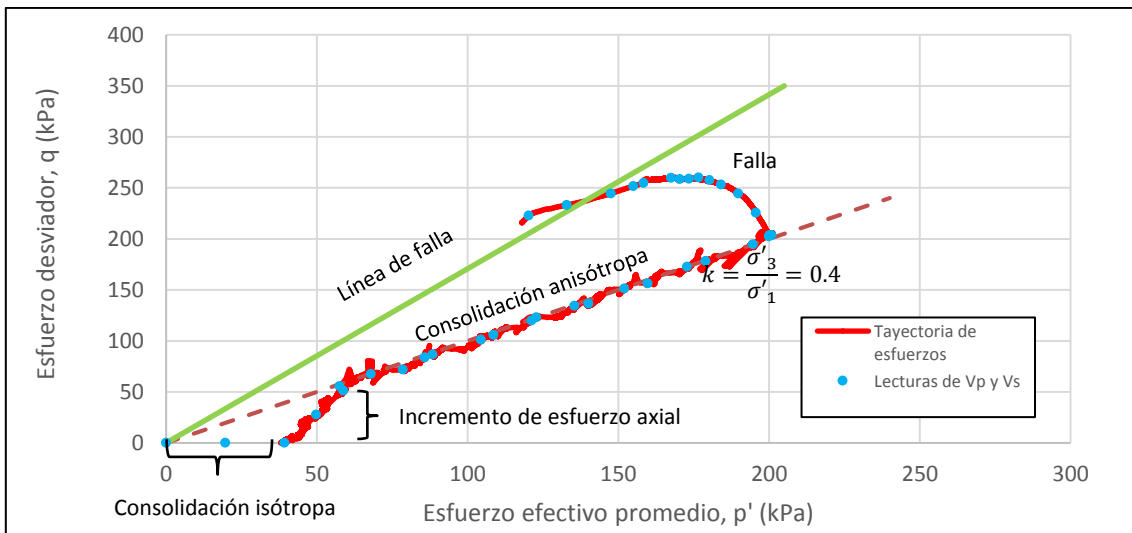


Figura 33 Diagrama p'-q, trayectoria de esfuerzo (M-7 SS-1)

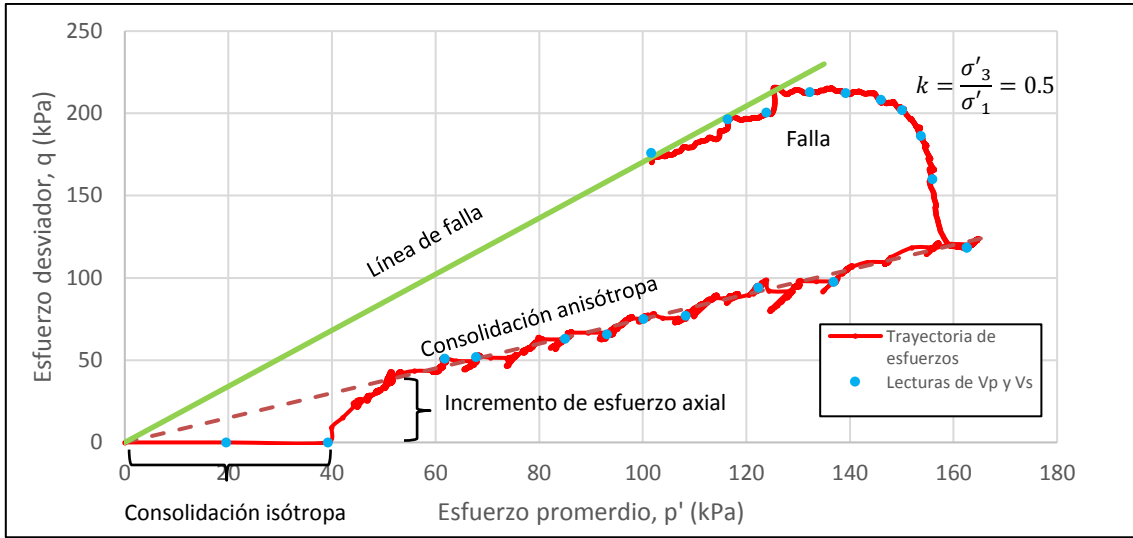


Figura 34 Diagrama p' - q , trayectoria de esfuerzo (M-6 SS-03)

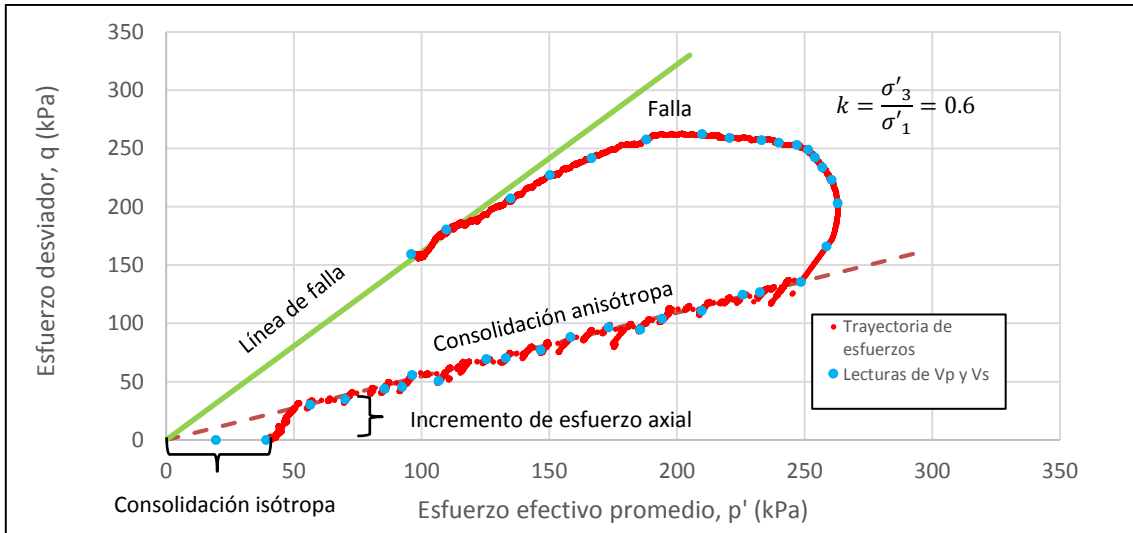


Figura 35 Diagrama p' - q , trayectoria de esfuerzo (SM-23 M-10Bis)

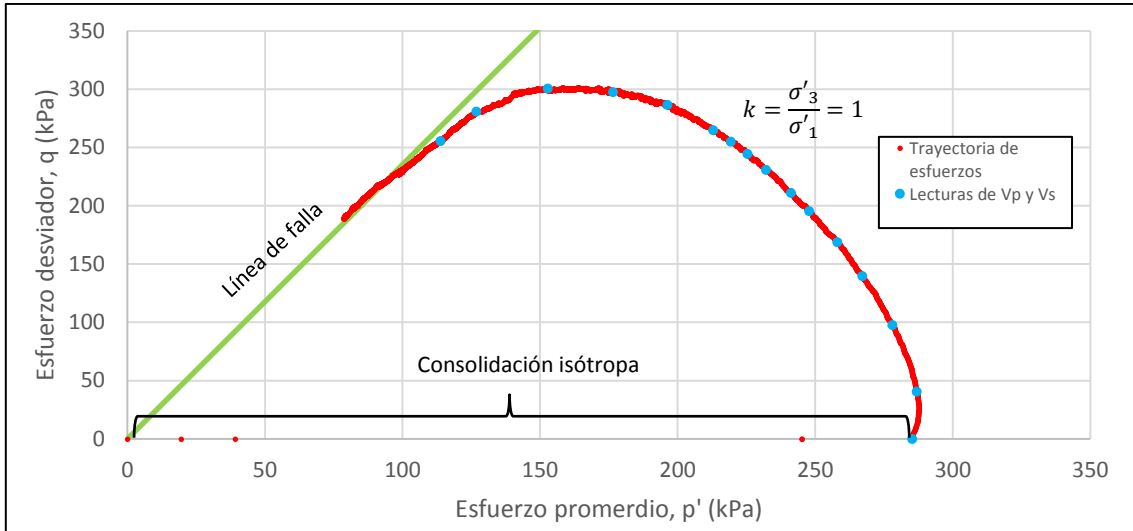


Figura 36 Diagrama p' - q , trayectoria de esfuerzo (SM-07 M-65)

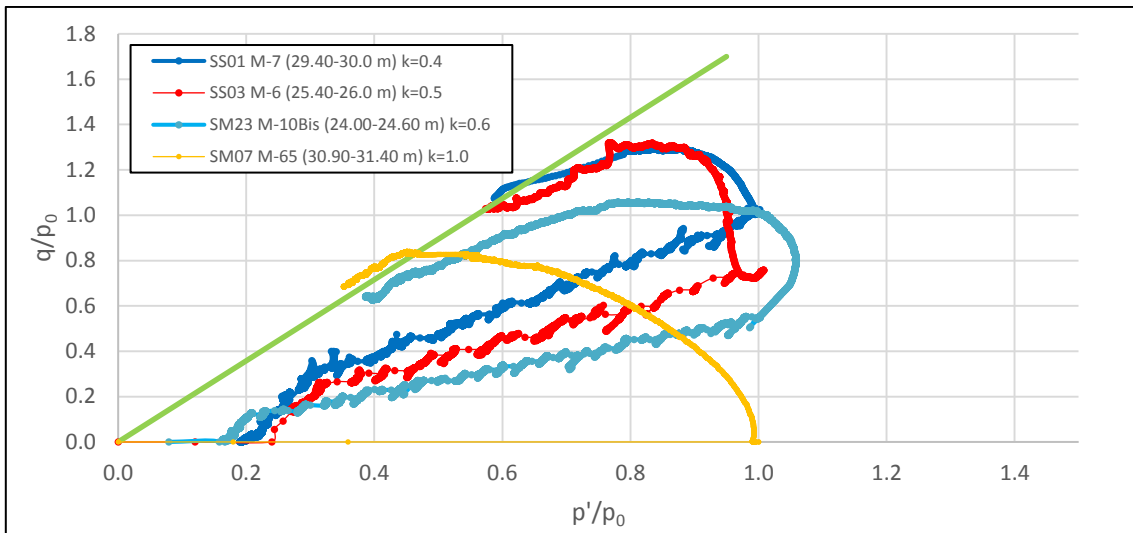


Figura 37 Trayectorias de esfuerzos normalizadas con respecto al esfuerzo efectivo medio

5.2 Velocidades de transmisión de onda

5.2.1 Tiempo de arribo de las ondas

Existen distintos métodos para determinar los puntos de arribo de las señales en las gráficas del elemento emisor y receptor, los cuales a su vez serán utilizados para el cálculo del tiempo de arribo de las ondas. Por ejemplo: la selección visual, el primer pico a pico mayor, correlación cruzada, espectro cruzado, entre otras (Viggiani, 1995).

Para el caso de los análisis realizados en este trabajo, se utilizó el primer criterio, el método de la selección visual, el cual consiste en identificar visualmente la primera deflexión, ya sea positiva o negativa para cada una de las señales, con la comparación de los tiempos de arribo en ambas señales, se puede obtener una diferencial de tiempo para así conocer la velocidad de propagación de onda. Este procedimiento es el más franco y rápido de utilizar, pero tiene algunas desventajas,

ya que al presentarse fenómenos como ruido de fondo o el efecto de campo cercano, pueden presentarse dificultades para identificar la primera deflexión de la señal.

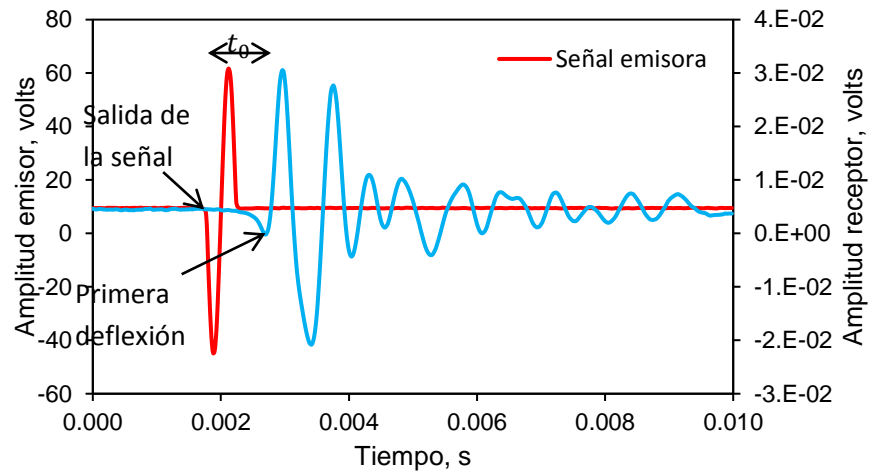


Figura 38 Señales sinusoidal (emisora y receptora) típica para medir velocidad de onda de corte (Vázquez A., 2016)

El fenómeno de ruido de fondo se presenta por la presencia de otras pequeñas señales emitidas por los equipos empleados en la ejecución del ensaye y/o por algunos otros equipos que se encuentren operando cerca, y el fenómeno de campo cercano puede describirse como la presencia de la señal de salida en la señal receptora.

5.2.1.1 Efecto de campo cercano

Dado que para la obtención del tiempo de arribo de la señal se utiliza el criterio visual para localizar el punto de la primera deflexión, es necesario hacer un análisis del efecto de campo cercano. Con anterioridad, el tema ha sido tratado más ampliamente por Brignoli et al. (1996), Viggiani y Atkinson (1995), Jovicic et al. (1996), Arroyo et al. (2003) y Lee y Santamarina (2005). El procedimiento para minimizar el error debido a este efecto utilizado en este trabajo fue propuesto por Díaz Pardave (2014).

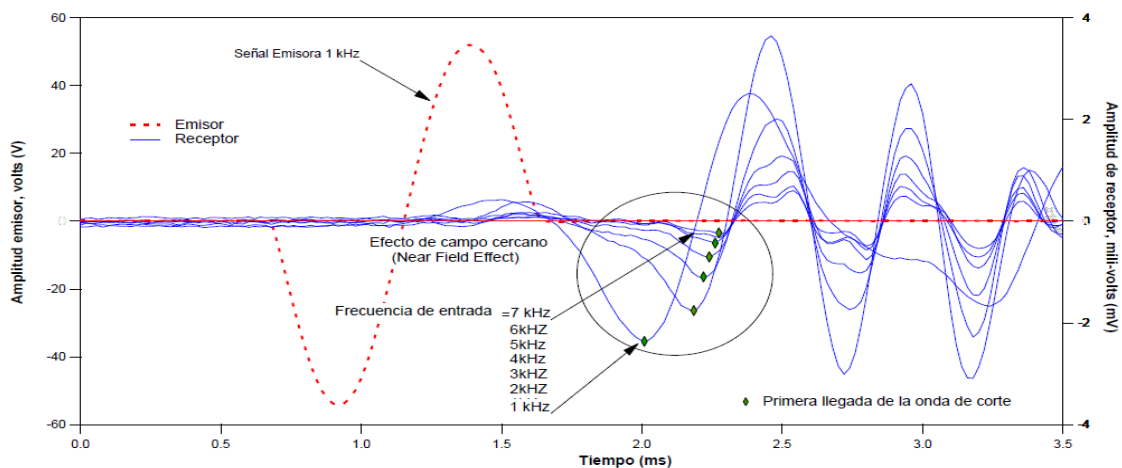


Figura 39 Efecto de campo cercano representado (Díaz P. M., 2014)

El primer paso de este procedimiento es la utilización de la frecuencia dominante o fundamenta del sistema (f_0) para obtener el parámetro R_d (Sanchez-Salineró, 1986):

$$R_d = \frac{L_{EFFECT}}{\lambda} \quad 5.1$$

donde:

L_{EFFECT} distancia efectiva que viaja la onda

λ longitud de onda propagada

Si definimos de forma analítica la velocidad de transmisión de onda de corte, podemos escribir (Viggiani, 1995):

$$V_s = \lambda f \quad 5.2$$

Ahora bien, si se despeja λ y se sustituye en la ecuación 5.1 se obtiene:

$$R_d = \frac{L_{EFFECT} * f}{V_s} \quad 5.3$$

donde:

f frecuencia de la señal de entrada

V_s velocidad de onda de corte

Se puede definir V_s como $L_{EFFECT}/\Delta t$, donde Δt es el tiempo de arribo de la señal. Díaz Pardave (2014) propuso utilizar la frecuencia dominante del sistema (f_0) para el cálculo del parámetro R_d , teniendo finalmente:

$$R_d = \Delta t * f_0 \quad 5.4$$

En la Figura 40 se observa cómo el valor de R_d tiene una variación en razón de la frecuencia, sin embargo el valor de R_d se mantiene constante cuando la frecuencia sobrepasa los 4 kHz, a este valor constante se le denomina R_d^* y a la frecuencia desde la cual R_d se mantiene constante se denomina frecuencia crítica (f_{crit}) (Díaz P. M. , 2014).

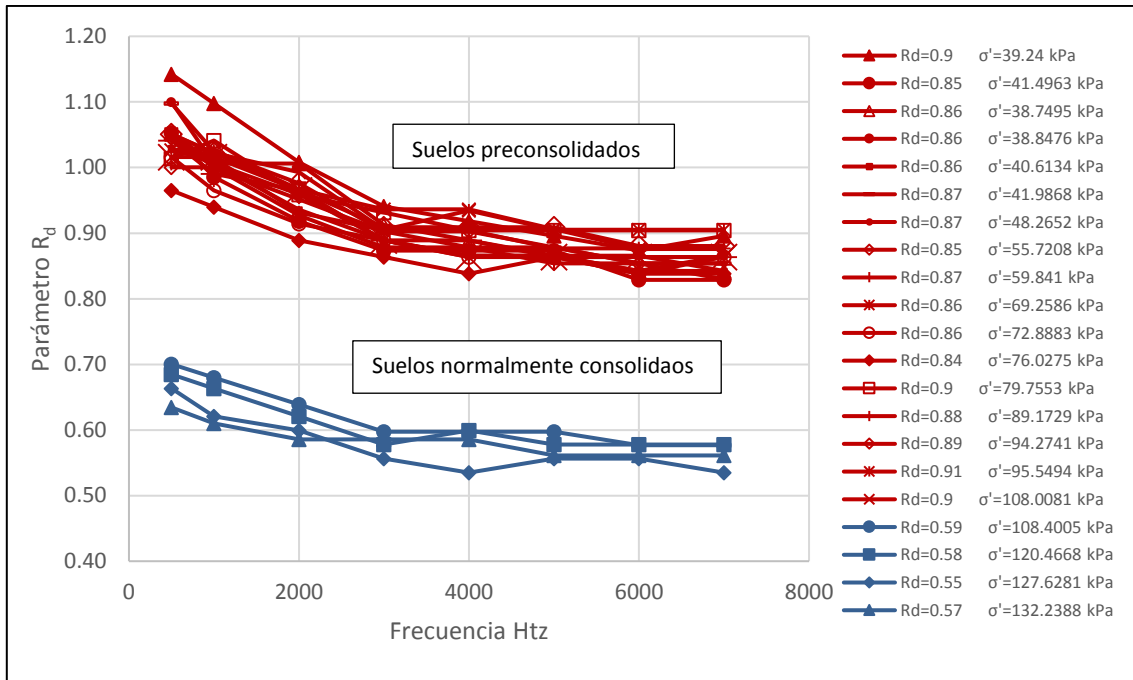


Figura 40 Gráfica de R_d contra frecuencia (SS-01-M-7)

En la Figura 40 se puede observar que cuando se ha alcanzado un esfuerzo de efectivo de consolidación mayor al esfuerzo de preconsolidación de la muestra, el cual es de 108.85 kPa para el caso de la muestra M-7 SS-01, el parámetro R_d disminuye considerablemente.

5.2.2 Frecuencia fundamental del sistema

Para el cálculo de la frecuencia dominante o frecuencia fundamental del suelo ensayado se realiza mediante la obtención de funciones de transferencia de las señales obtenidas en la medición de pasando del dominio del tiempo al dominio de la frecuencia. El sistema emisor-suelo-receptor se puede considerar como un sistema lineal tal que su respuesta a una excitación pueda ser descrita en términos de una función de transferencia, que es única e independiente transformada rápida de Fourier de las señales de entrada y de salida.

La transformada de Fourier consiste en representar las señales (de emisión y recepción) como una suma de senos y cosenos, de forma que puedan ser transformadas al dominio de la frecuencia sin perder información.

Para la señal de entrada, la expresión para obtener su transformada de Fourier es la siguiente:

$$X(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} X(t)e^{-j\omega t} dt \quad 5.5$$

donde:

- $X(\omega)$ transformada de Fourier
- $X(t)$ función de transferencia de señal de entrada
- ω frecuencia circular
- t tiempo

Ahora bien, la ecuación transformada para señales digitales de longitud finita es (Santamarina, 1998):

$$X(m\Delta\omega) = \frac{T}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x(n\Delta t) e^{-jnm/N} \quad 5.6$$

donde:

- N número de los puntos en la serie de tiempo
- Δt intervalo de muestreo de tiempo
- $\Delta\omega$ intervalo de frecuencia
- m,n número enteros

Para obtener la función de transferencia es necesario realizar el cociente de la transformada de Fourier normalizada de la señal de salida entre la transformada de Fourier normalizada de la señal de entrada, definiéndose como:

$$FT = \frac{\text{Transformada de Fourier de la señal de salida normalizada (receptor)}}{\text{Transformada de Fourier de la señal de entrada normalizada (emisor)}}$$

Dado que se tiene un proceso de banda angosta con elementos de flexión, puede considerarse que tiene una frecuencia de vibración dominante o modo de vibración fundamental que corresponde a la amplitud máxima de la función de transferencia o cociente espectral (Alvarado, 2012).

En el presente trabajo se utilizó el programa Degtra A4, desarrollado por el Instituto de Ingeniería de la UNAM, para la obtención de las transformadas rápidas de Fourier para las señales de entrada y salida en cada una de las mediciones realizadas en las distintas pruebas efectuadas.

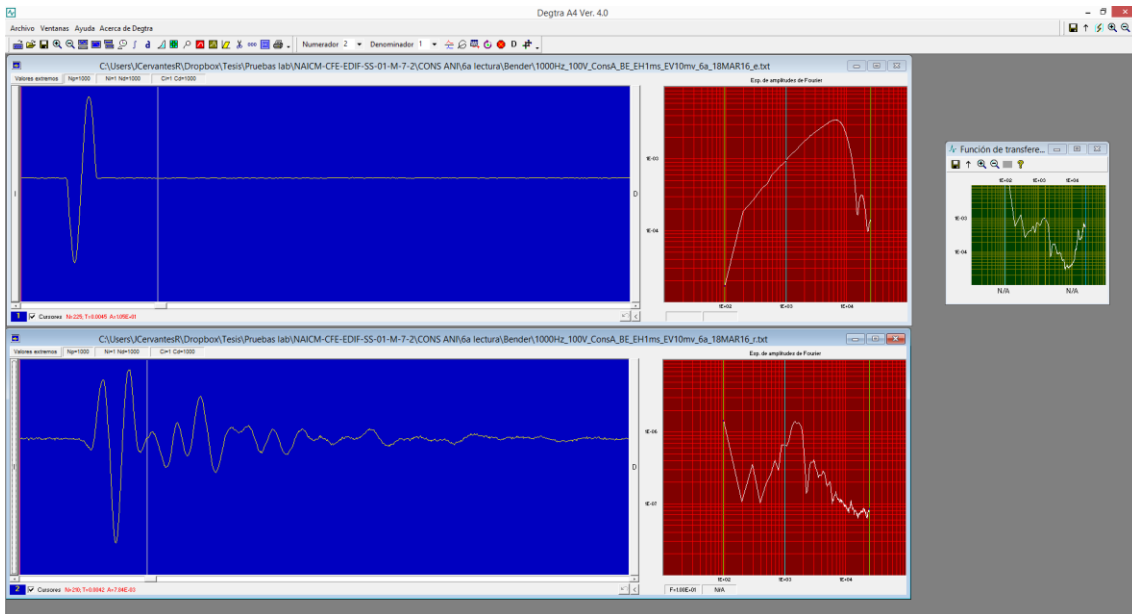


Figura 41 Impresión de pantalla del programa Degtra A4 utilizado para obtener la función de transferencia

El producto final obtenido con el programa Degtra A4 es una gráfica de cociente espectral contra frecuencia. En las siguientes figuras (Figura 42-Figura 44) se muestran traslapadas las gráficas del barrido de frecuencias realizado en las mediciones de cada una de las lecturas en la etapa de saturación (M-7Bis TBH-03).

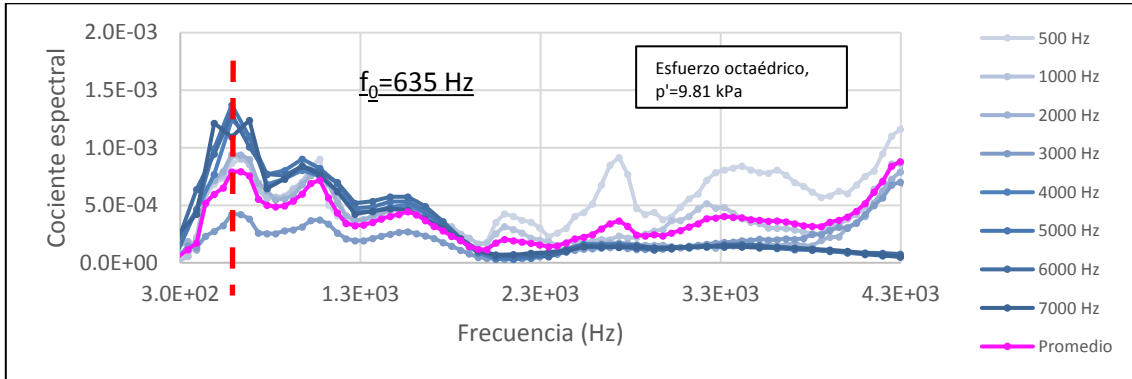


Figura 42 Gráfica de cocientes espectrales contra frecuencia, etapa de saturación, incremento 1 (SM-07 M-65)

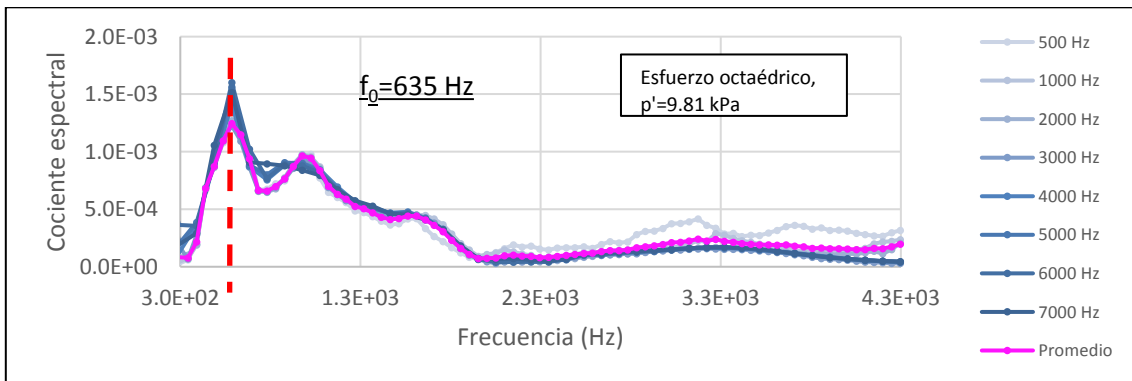


Figura 43 Gráfica de cocientes espectrales contra frecuencia, etapa de saturación, incremento 2 (SM-07 M-65)

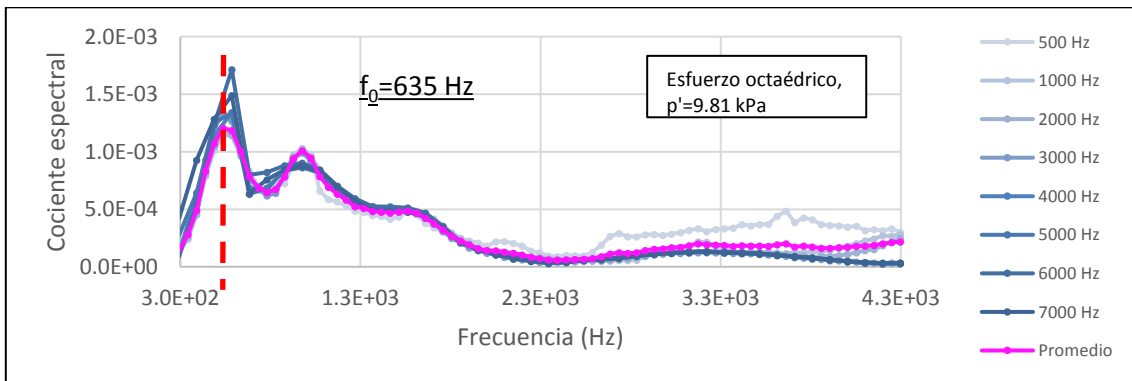


Figura 44 Gráfica de cocientes espectrales contra frecuencia, etapa de saturación, incremento 3 (SM-07 M-65)

Se puede observar que al mantener constante el esfuerzo efectivo, la frecuencia dominante de la probeta permanece sin cambios.

En las siguientes gráficas (Figura 45-Figura 50), se muestran las gráficas de coeficiente espectral contra frecuencia en las lecturas tomadas en la etapa de consolidación (M-7Bis TBH-03).

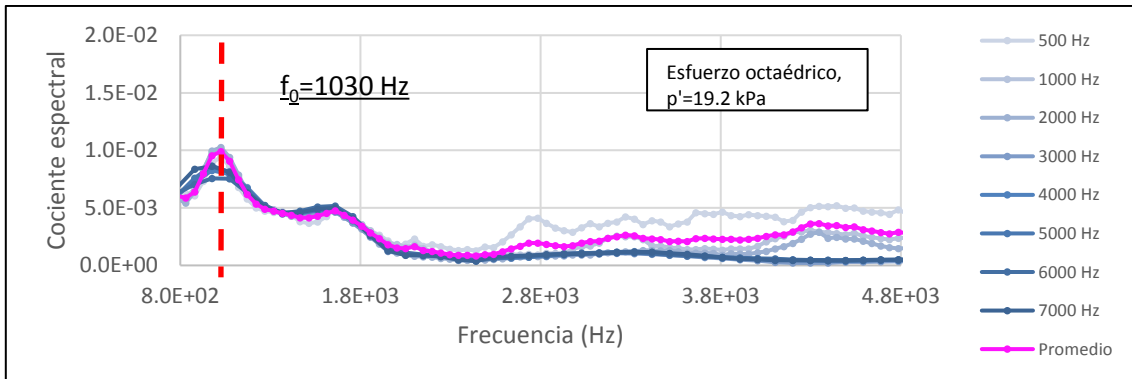


Figura 45 Gráfica de cocientes espectrales contra frecuencia, etapa de consolidación, incremento 1 (SM-07 M-65)

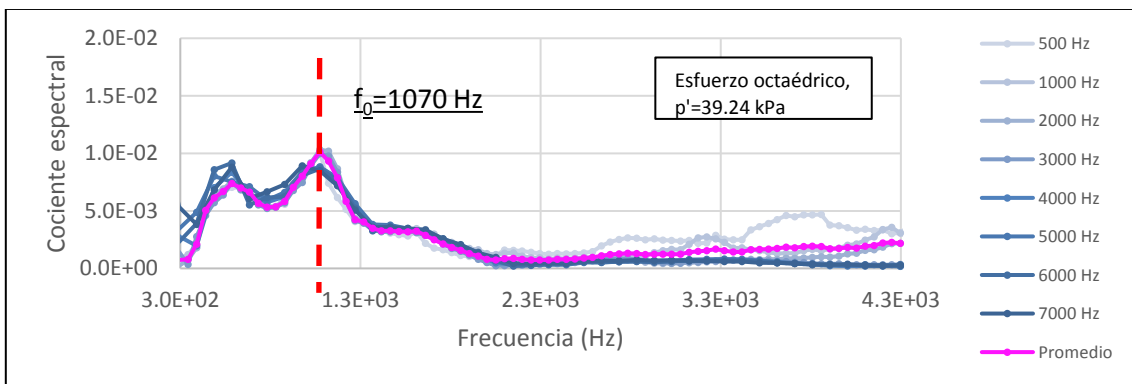


Figura 46 Gráfica de cocientes espectrales contra frecuencia, etapa de consolidación, incremento 2 (SM-07 M-65)

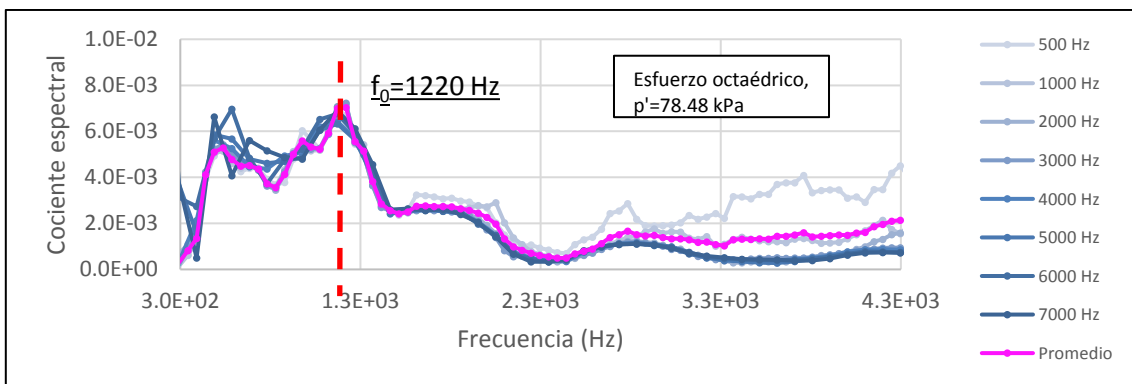


Figura 47 Gráfica de cocientes espectrales contra frecuencia, etapa de consolidación, incremento 3 (SM-07 M-65)

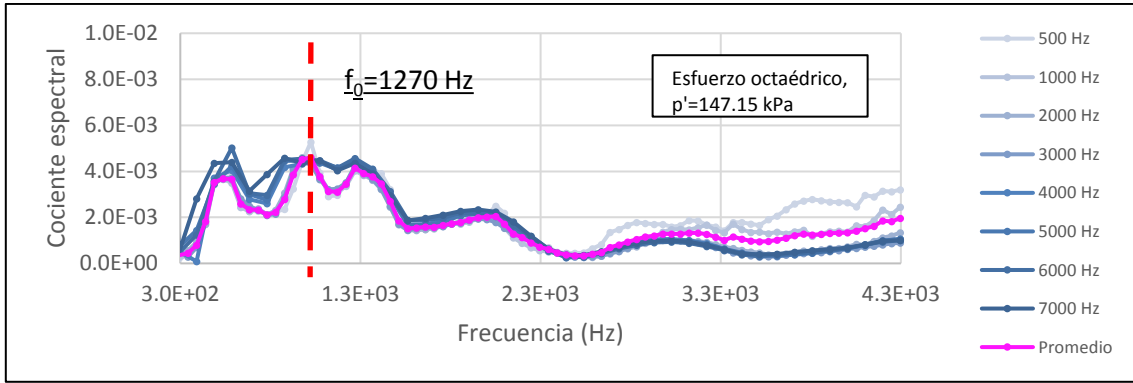


Figura 48 Gráfica de cocientes espectrales contra frecuencia, etapa de consolidación, incremento 4 (SM-07 M-65)

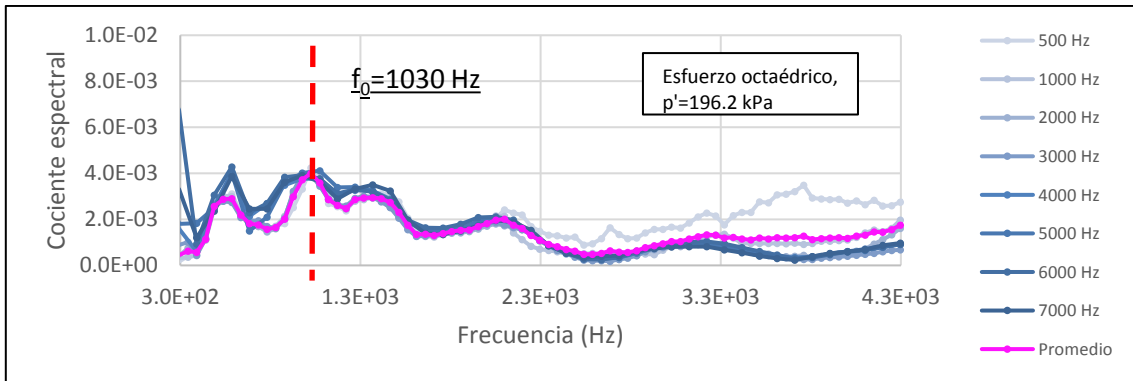


Figura 49 Gráfica de cocientes espectrales contra frecuencia, etapa de consolidación, incremento 5 (SM-07 M-65)

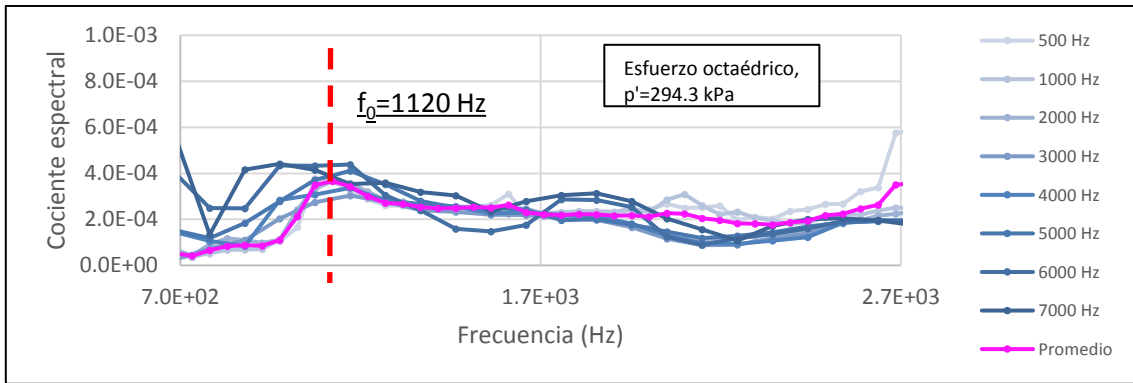


Figura 50 Gráfica de cocientes espectrales contra frecuencia, etapa de consolidación, incremento 6 (SM-07 M-65)

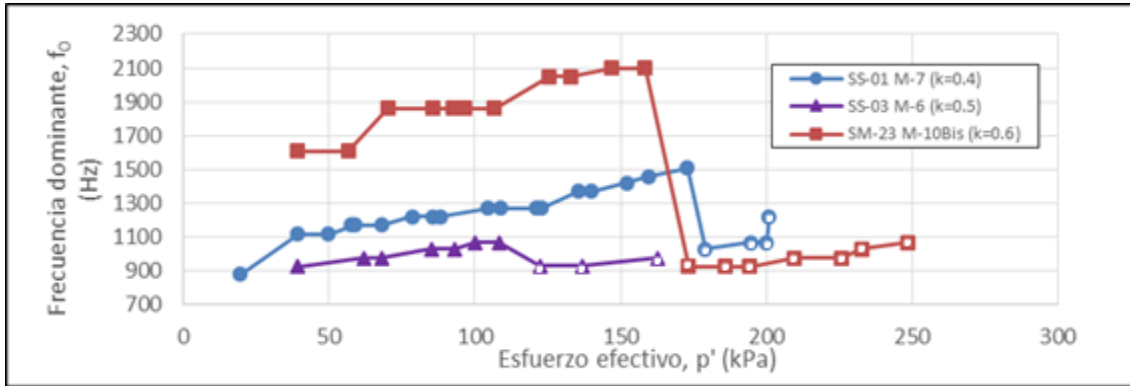


Figura 51 Gráfica de comportamiento de frecuencia dominante f_0 contra esfuerzo efectivo en etapa de consolidación anisótropa

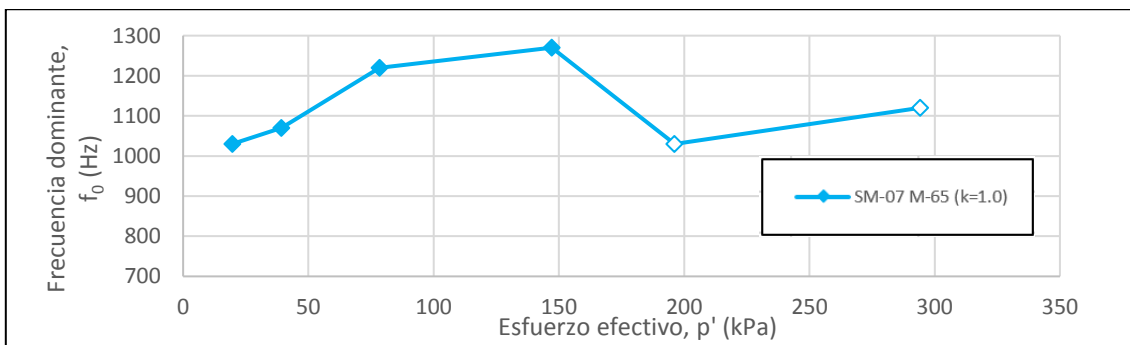


Figura 52 Gráfica de comportamiento de frecuencia dominante f_0 contra esfuerzo efectivo en etapa de consolidación

En las y Figura 52 se muestra la tendencia de la frecuencia dominante al variar el esfuerzo efectivo aplicado a la muestra en la etapa de consolidación; se aprecia una tendencia casi lineal directamente proporcional, pero al aplicar una mayor esfuerzo que el preconsolidación ocurre un escalón.

5.2.3 Comportamiento de velocidades de transmisión de onda

5.2.3.1 Etapa de saturación

La velocidad de compresión, como ya se mencionó con anterioridad, puede utilizarse como un indicador de estado de saturación de una probeta. En la Figura 53 se muestra una gráfica que relaciona la velocidad de onda de compresión con la B de Skempton; se puede apreciar que a medida que se acerca a 1 el valor de la B, el valor de la velocidad de compresión se acerca a 1530 m/s, que es la velocidad de propagación de ondas de compresión en el agua.

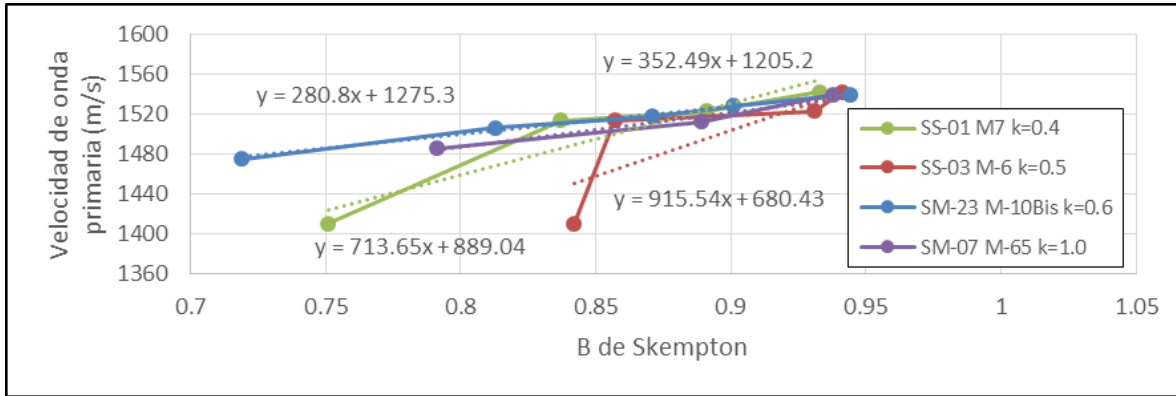


Figura 53 Comportamiento de velocidad de compresión en etapa de saturación

Por otro lado, el comportamiento de la velocidad de cortante no es afectado por el grado de saturación de la probeta, como se puede apreciar en la Figura 54. La velocidad de onda de corte se mantiene prácticamente constante en el proceso de saturación de la probeta.

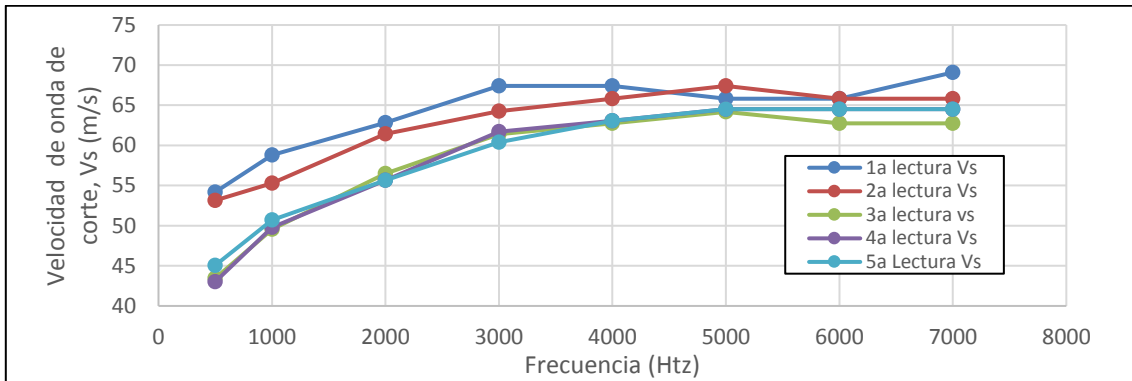


Figura 54 Comportamiento de la velocidad de corte en la etapa de saturación (M-7 SS-01)

5.2.3.2 Etapa de consolidación

El fenómeno de consolidación, provoca expulsión de agua de la masa del suelo, lo que su vez produce un aumento en la rigidez del suelo. La velocidad de corte V_s , al ser un indicador de la rigidez del suelo, aumenta conforme se aumenta el esfuerzo efectivo aplicado a la probeta durante la etapa de consolidación. En la Figura 56 se observa que existe una tendencia clara a aumentar la velocidad de corte V_s con respecto del esfuerzo efectivo aplicado.

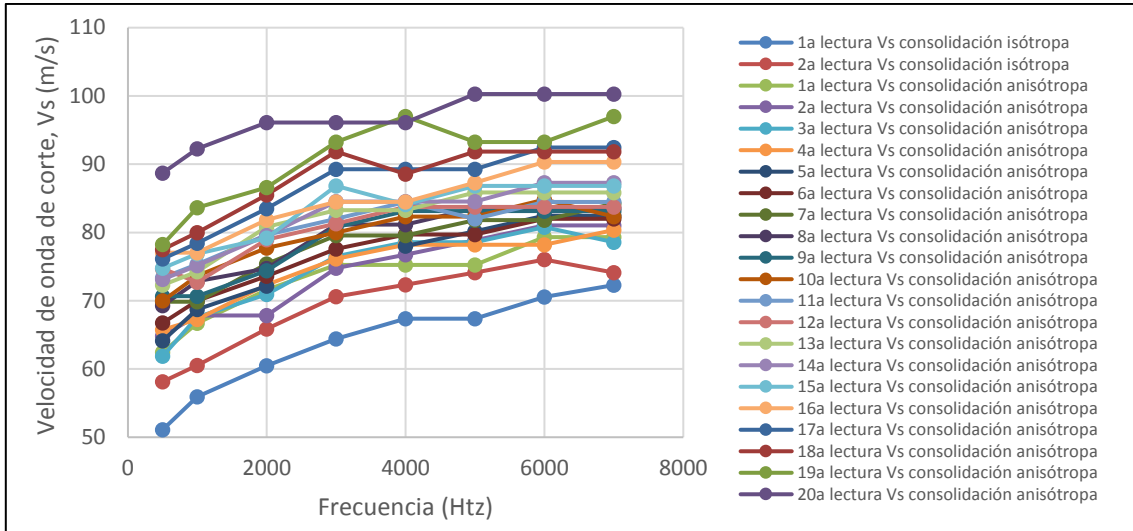


Figura 55 Velocidades de cortante en distintos incrementos de etapa de consolidación (M-7 SS-01)

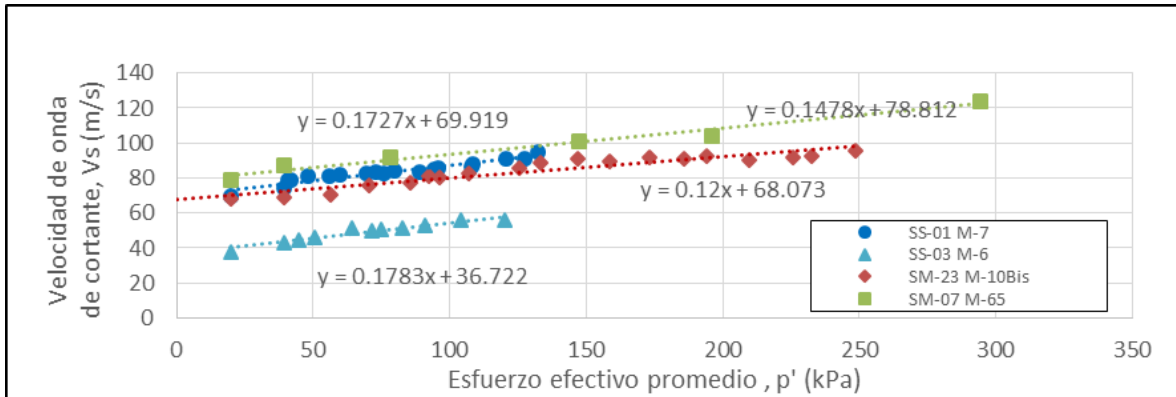


Figura 56 Comportamiento de la velocidad de corte con respecto del esfuerzo efectivo promedio en etapa de consolidación anisótropa

5.2.3.3 Etapa de falla

Como ya se mencionó anteriormente, se realizaron mediciones de la velocidad de corte en diversos puntos de la etapa de falla de cada ensaye, las cuales fueron ejecutadas con una tasa de deformación de 0.0417 mm/min. Para obtener puntos dentro de la parte elástica de la gráfica, las primeras lecturas fueron tomadas cada 5 minutos los primeros 40 minutos de la prueba. En la Figura 57 se muestra el comportamiento de la velocidad de cortante comparado con el diagrama de esfuerzo deformación en la etapa de falla.

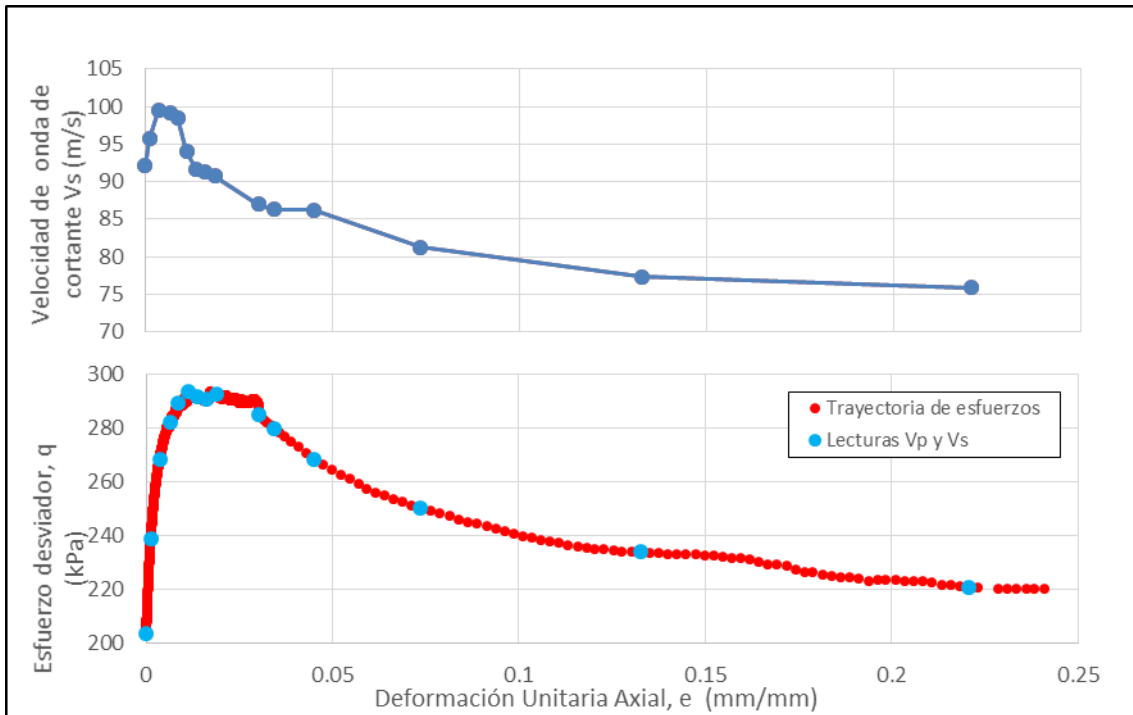


Figura 57 Gráficas de esfuerzo-deformación y comportamiento de V_s en etapa de falla (M-7 SS-1)

Con los datos de desplazamiento medidos durante la etapa de falla, tanto del LVDT del pistón como de los dos pares de LVDT internos, y de velocidad de cortante, es posible observar líneas de tendencia como las que se muestran en las siguientes imágenes (Figura 58-Figura 59)

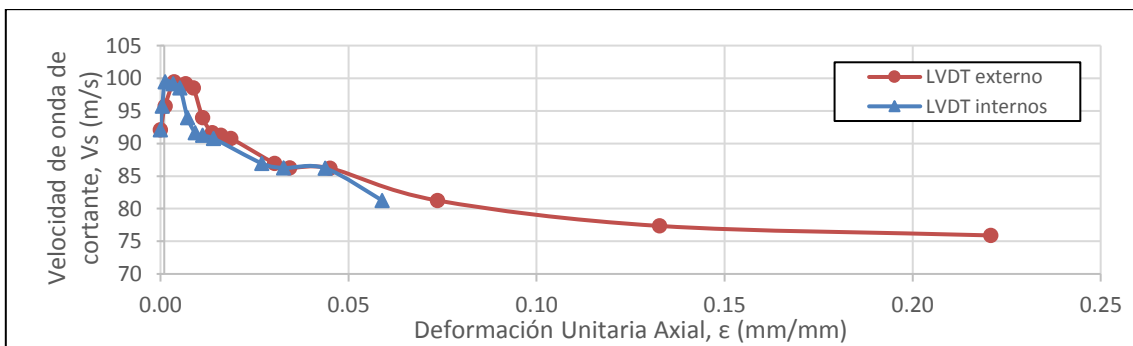


Figura 58 Gráfica de comportamiento de V_s en etapa de falla (M-7 SS-1)

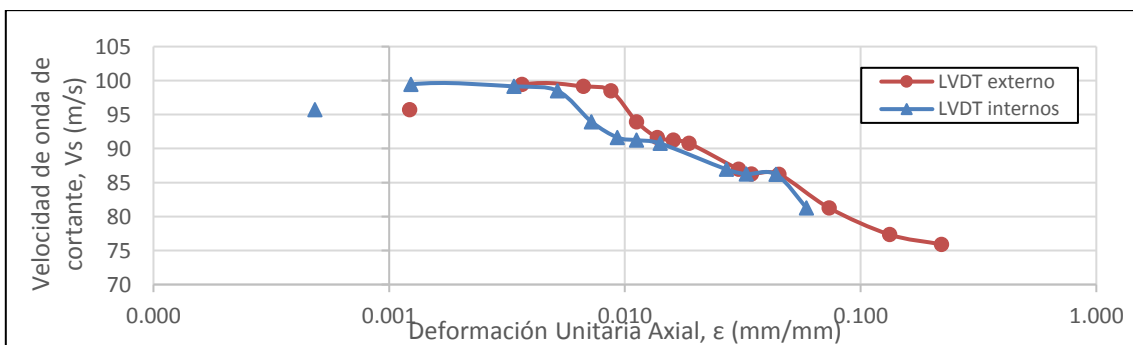


Figura 59 Gráfica de comportamiento de Vs en etapa de falla (semi-logarítmica) (M-7 SS-1)

Al sobreponer las gráficas de los LVDT internos y el externo, se puede observar que, por un lado, aunque las mediciones con los dispositivos internos son más exactas, dado que están en contacto directo con la probeta, las mediciones con el elemento externo tiene la misma tendencia, lo que sirve para verificar que ambos juegos de transductores están trabajando de forma correcta; y por otro lado se observa un comportamiento cercano al lineal en las gráficas semi-logarítmicas (Figura 58 y Figura 59).

En la Figura 60 se observa el comportamiento de la velocidad de cortante con respecto de la aplicación de esfuerzo axial, durante la etapa de falla. En la gráfica puede apreciarse que hay una relación lineal entre la velocidad de cortante y el esfuerzo desviador aplicado antes de llegar al pico, pero una vez en el pico, se aprecia un cambio y de nuevo hay una relación lineal entre ambos valores. Por otro lado, en la Figura 61, se puede apreciar de nuevo una relación lineal entre el esfuerzo efectivo promedio aplicado a la probeta y la velocidad de cortante.

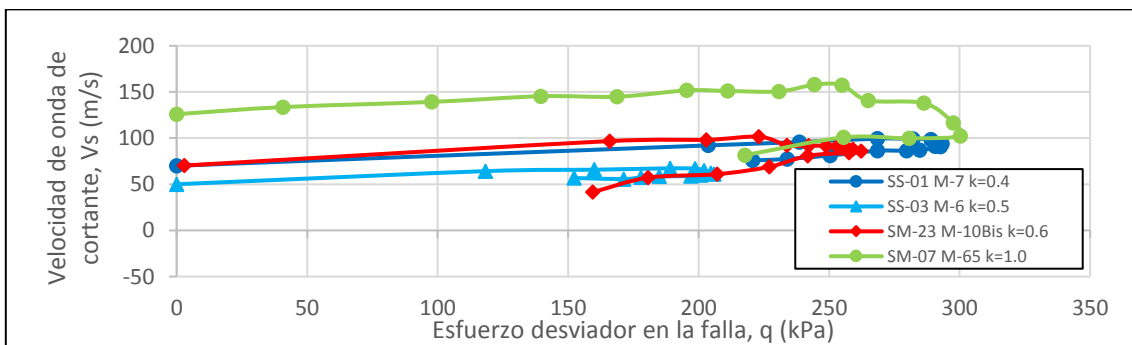


Figura 60 Variación de la velocidad de cortante con respecto del esfuerzo desviador en etapa de falla

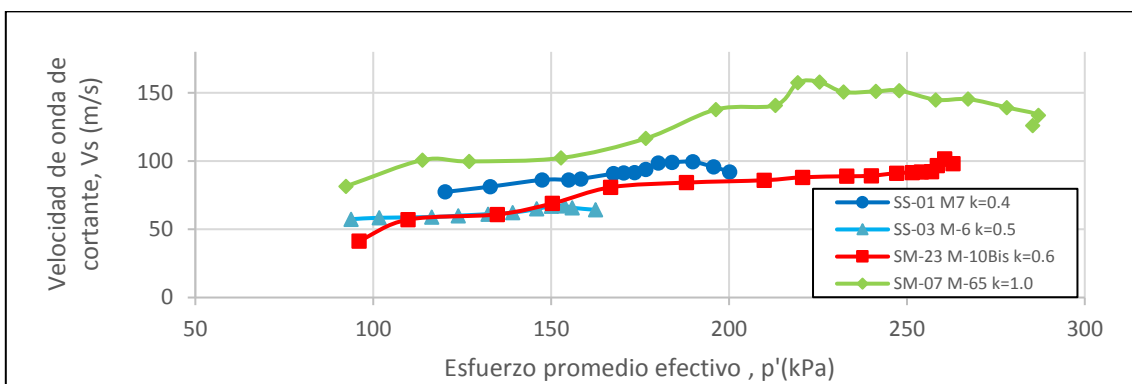


Figura 61 Variación de la velocidad de cortante con respecto del esfuerzo efectivo promedio (p') en la etapa de falla

5.3 Obtención de k_0 a partir de pruebas triaxiales

Al ejecutar pruebas triaxiales con etapa de consolidación anisótropa, con distintos coeficientes de esfuerzos (k), es posible obtener el coeficiente de empuje de tierra en reposo (Ovando, López, & Trigo, 2007). En la Figura 62 se muestra el comportamiento de las deformaciones (axial y volumétrica) durante la etapa de falla.

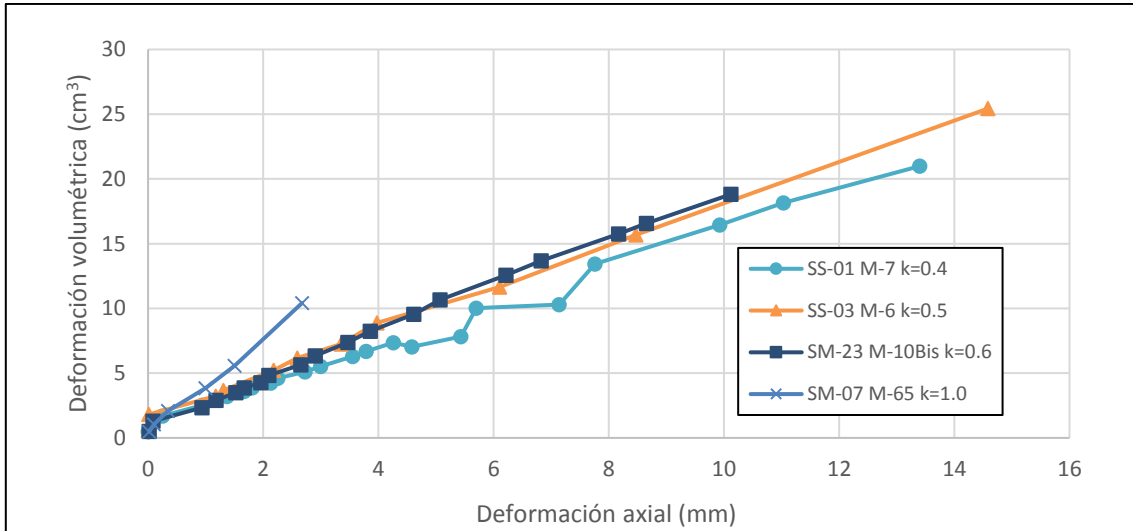


Figura 62 Deformación axial contra deformación volumétrica durante la etapa de consolidación

En la Figura 63 se muestra una gráfica con puntos de coeficiente de deformaciones, es decir, la deformación volumétrica entre la deformación axial, en diferentes puntos de la etapa de consolidación. En esta gráfica se puede observar que el coeficiente se vuelve constante después de alcanzar cierto esfuerzo de consolidación: para el caso de la muestra ensayada con $k=0.4$ en 1.44, para $k=0.5$ en 2.17, para $k=0.6$ en 2.46 y para $k=1.0$ en 3.84.

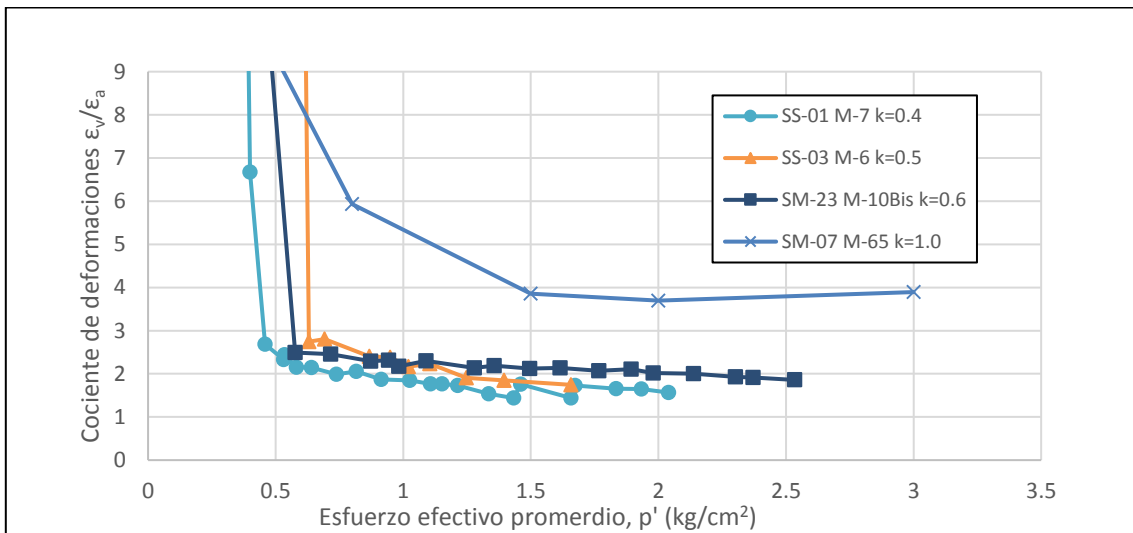


Figura 63 Cociente de deformaciones contra esfuerzo efectivo durante la etapa de consolidación

Conociendo los datos anteriores, se construye la Figura 64, colocando los puntos en los que se hace constante el coeficiente de deformaciones contra el coeficiente con el que fue ensayada la muestra.

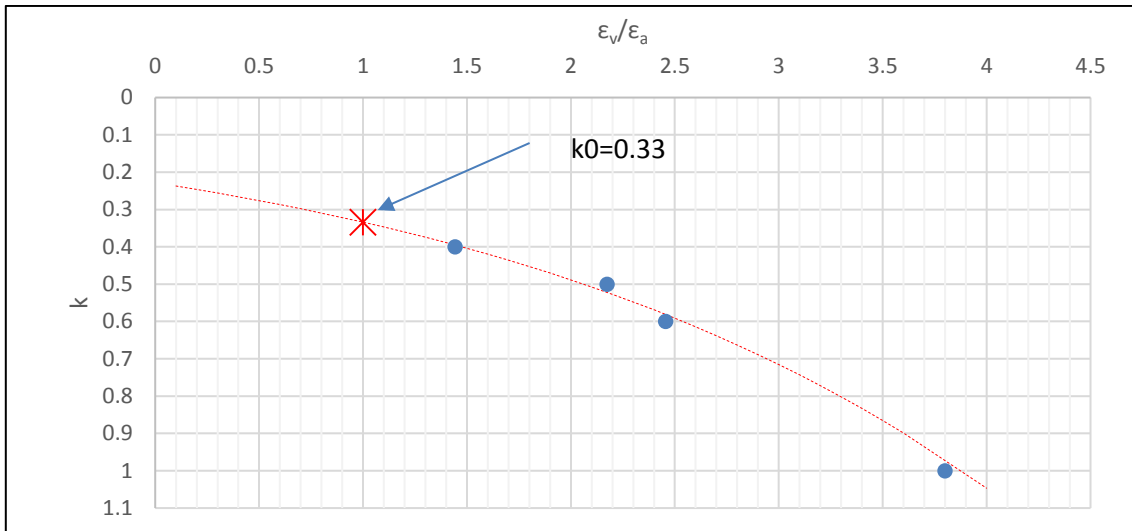


Figura 64 Cociente de esfuerzos (k) contra cociente de deformaciones

Observando la tendencia de los datos, es posible obtener el coeficiente de empuje de tierras en reposo extrapolado, es decir, donde la deformación volumétrica es igual a la deformación axial ($\epsilon_v/\epsilon_a=1$). El valor de k en este punto será el de k_0 , el cual para este caso es de 0.33.

Utilizando las trayectorias de esfuerzos de la etapa de falla de cada prueba, se obtiene un ángulo de fricción interna (Φ') de 40.73° en promedio. Mediante la ley de Jaky (Pressure in soils, 1948), se podemos obtener:

$$K_0 = 1 - \text{sen } \Phi' = 0.348 \quad (5.7)$$

Puede observarse que ambos valores son muy cercanos, lo cual valida el método utilizado con los datos de consolidación con distintos coeficientes.

CAPÍTULO 6: Comparación de resultados con otros métodos de obtención de velocidades de transmisión de onda

Dentro del mismo marco de exploración geotécnica previa a la construcción del Nuevo Aeropuerto de la Ciudad de México, se ejecutaron otros ensayos, tanto en laboratorio como en campo, para la obtención de velocidades de transmisión de onda. En este apartado se hace una comparación con dos métodos distintos de obtención de la velocidad de cortante en suelo, uno en laboratorio (columna resonante), y uno de ellos en campo (sonda suspendida). A continuación se muestra una reseña de los dos métodos con que se comparó el utilizado en esta investigación.

6.1 Columna resonante

La columna resonante es un equipo de laboratorio utilizado para calcular la respuesta de una probeta cilíndrica de suelo a la aplicación de una excitación torsional en la parte superior, siendo empotrada en la parte inferior. La frecuencia de la excitación es controlada mediante un generador de funciones, el cual a su vez envía una señal a un sistema de bobina e imanes para provocar el

movimiento torsional cíclico. En la Figura 65 se presenta un esquema del equipo utilizado en el Laboratorio de Geotecnia del Instituto de Ingeniería de la UNAM.

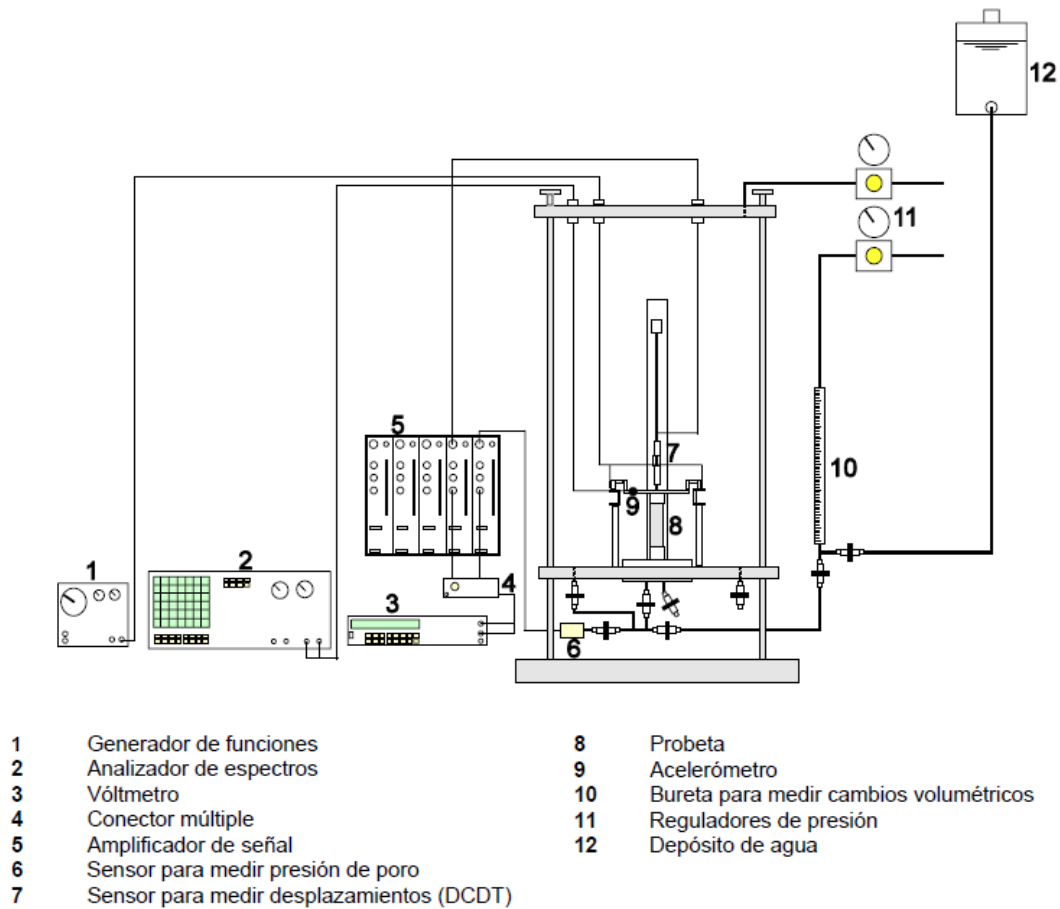


Figura 65 Esquema de columna resonante (Flores, 1996)

Al igual que en los ensayos realizados en la cámara triaxial, para obtener los parámetros mecánicos del suelo, no es necesario fallar la muestra, por lo que se consideran ensayos no destructivos. Para la ejecución de la prueba en la columna resonante, el rango de movimiento angular aplicado a la muestra es de 10^{-5} y 10^{-2} % (Flores, 1996).

6.2 Sonda suspendida

En ensayo de sonda suspendida, es una prueba realizada en campo, utilizada para conocer la velocidad de transmisión de onda en suelo y rocas blandas, hasta una profundidad de 150 m. Consiste en la emisión de ondas sonoras de baja frecuencia mediante una excitación indirecta. El sistema consiste en una fuente de martillo, dos geófonos, un *winch* o malacate, y el sistema de control y adquisición de datos (Figura 66). El sistema permite realizar mediciones en segmentos de 0.5 m.

El procedimiento de ensayo consiste en realizar una perforación previamente para poder bajar el sistema y ubicarla en la profundidad donde se desea hacer las mediciones. La prueba puede

realizarse en perforaciones ademadas o estabilizadas con lodo bentonítico. Ya ubicada la sonda, se acciona el martillo para obtener las señales de las ondas, tanto de compresión como de corte (Juárez, 2014).

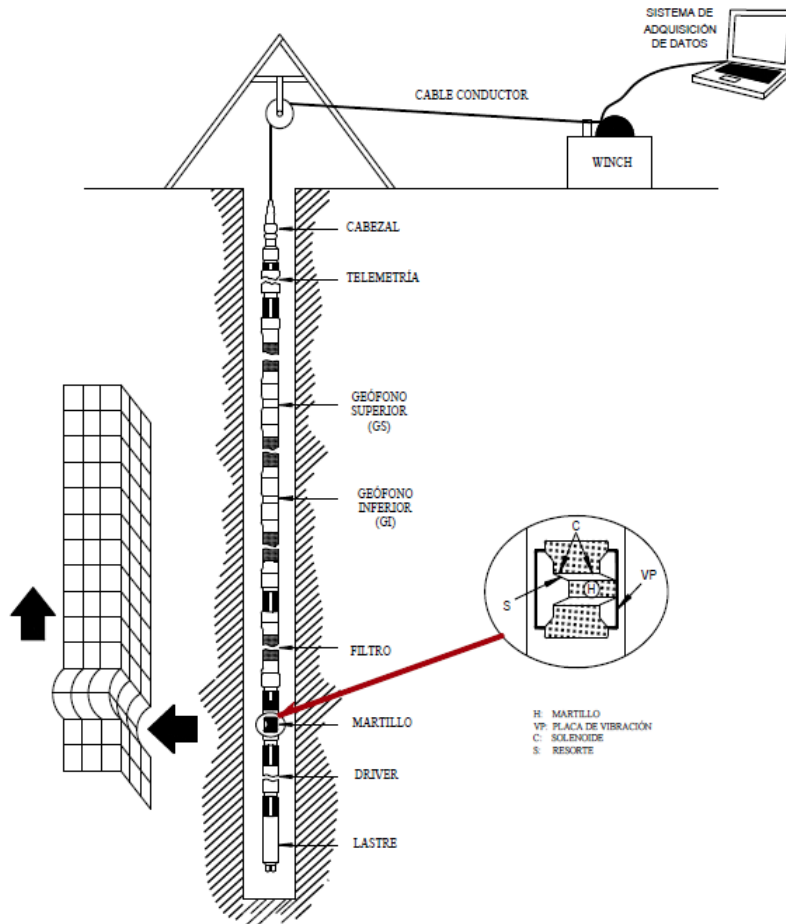


Figura 66 Esquema de funcionamiento de sonda suspendida (Juárez, 2014)

6.3 Gráficas de comparación

En este apartado se presenta la comparativa entre los valores de velocidades de transmisión de onda obtenidos mediante los dos métodos mencionados en los apartados anteriores y utilizando elementos Bender. En las siguientes figuras (Figura 67- Figura 69) se muestran en un mismo gráfico puntos de velocidad de cortante contra esfuerzo efectivo obtenidos con distintas técnicas.

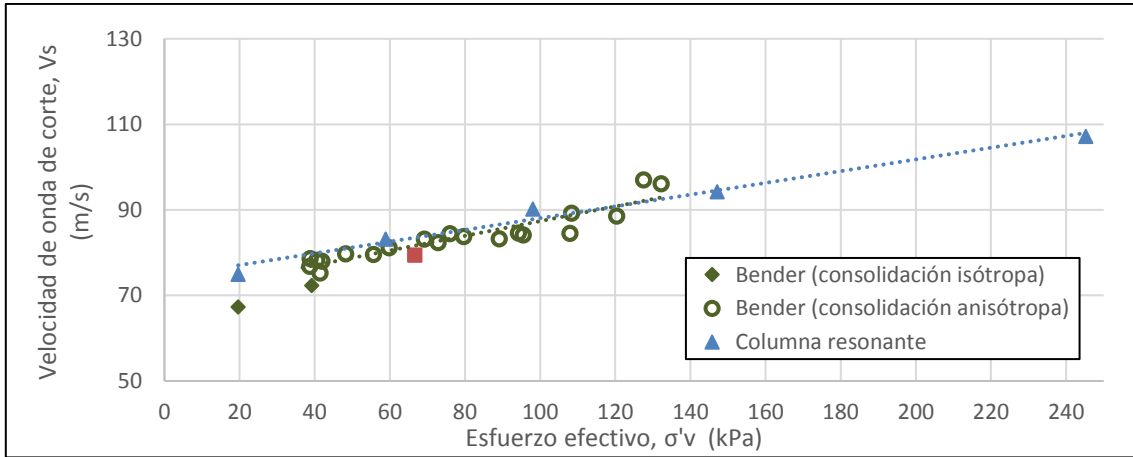


Figura 67 Gráfica comparativa esfuerzo efectivo contra velocidad de corte (M-7 SS-01 k=0.4)

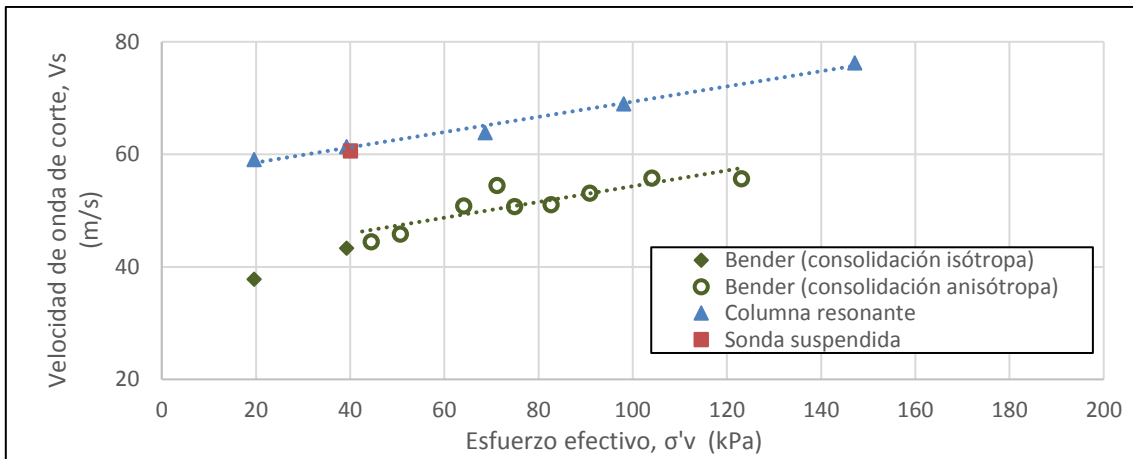


Figura 68 Gráfica comparativa esfuerzo efectivo contra velocidad de corte (M-6 SS-03 k=0.5)

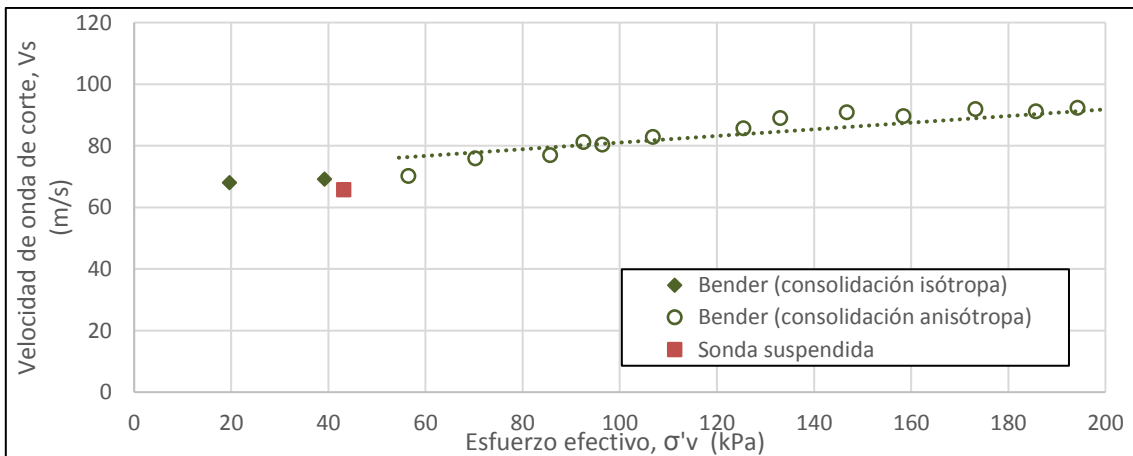


Figura 69 Gráfica comparativa esfuerzo efectivo contra velocidad de corte (M-10Bis SM-23 k=0.6)

CAPÍTULO 7: Conclusiones

La presente investigación es la continuación de una línea de investigación que comenzó en 2012 (Flores Guzmán) con la instrumentación de la cámara triaxial utilizando cristales piezoeléctricos, después continuada en 2014 (Díaz P. M.), se instrumentó con cristales un consolidómetro de palanca, con la principal aportación del procedimiento para obtener una frecuencia crítica que permitiera minimizar el efecto de campo cercano presentado en las señales recibidas por los cristales piezoeléctricos. Después en 2015 (Vázquez A.), se continuó utilizando el equipo triaxial para realizar pruebas en suelos arcillosos del lago de Texcoco para observar su comportamiento dinámico.

Aunque igual que en los trabajos antes mencionados, en el presente se realizaron medición de velocidad de onda en las etapas de saturación y consolidación, la principal aportación de esta investigación es la medición de ondas de cortante a lo largo de la etapa de corte, con el objetivo de observar el comportamiento de las propiedades elásticas del suelo al aplicarle carga hasta llevarlo a la falla.

A continuación se enuncian las conclusiones generales o el trabajo:

1. Uno de los puntos críticos de la utilización de cristales piezoeléctricos colocados en el pedestal y cabezal de la cámara triaxial, es el meticuloso método de instrumentación y encapsulado, ya que se debe de garantizar el buen funcionamiento de los elementos en condiciones de humedad y altas presiones.
2. Al analizar las señales obtenidas en las mediciones durante las etapas de saturación y consolidación, puede observarse el efecto de campo cercano, el cual afecta de forma importante en la determinación de los valores de velocidad de onda de corte V_s . Para minimizar este efecto se utilizó el método propuesto por Díaz P. (2014), utilizando el parámetro R_d y la frecuencia dominante para encontrar la frecuencia crítica en cada caso. La frecuencia dominante para este caso en particular en cada una de las pruebas se consideró de 4000 Hz.
3. En el proceso de obtención de la frecuencia dominante del sistema f_0 , se observa que al mantener constante el esfuerzo efectivo aplicado (etapa de saturación) f_0 permanece constante, y al aumentar este esfuerzo, de igual manera, la f_0 aumenta.
4. El valor R_d disminuye de forma considerable una vez que se sobrepasa el esfuerzo de preconsolidación de la muestra. Lo anterior puede explicarse por la pérdida de estructura de las partículas del suelo, al pasar a la rama virgen.
5. En la etapa de saturación, se observa que la velocidad de onda de compresión V_p aumenta en cada lectura al aumentar el grado de saturación de la probeta, llegando a valores muy cercanos a 1530 m/s, siendo éste último el valor de la velocidad de ondas de compresión cuando viajan a través del agua. Por otro lado, las ondas de corte permanecen prácticamente sin cambio al cambiar el grado de saturación.
6. En la etapa de consolidación, la velocidad de onda de cortante V_s , aumenta en cada incremento de esfuerzo. Por otro lado, la velocidad de onda de compresión V_p no es afectada por el aumento de esfuerzo efectivo, ya que no varía a lo largo de esta etapa.

7. Puede observarse que en los suelos con menor relación de vacíos e , contenido de agua $w\%$ e índice de plasticidad PI , se obtienen velocidades de cortante V_s más altas, lo cual se puede explicar dado que valores menores de estos parámetros significan mayor rigidez en el suelo, y al tener un medio más rígido, las ondas de cortante viajan más rápido.
8. En la etapa de falla, el comportamiento de la velocidad de cortante medido puede definirse en dos fases. Al principio de la etapa de falla, donde el suelo tiene un comportamiento cercano al elástico, la velocidad de cortante tiende a aumentar, pero al llegar al pico de esfuerzo desviador, la velocidad comienza a descender de forma asintótica con respecto de la deformación. De igual forma se aprecia una relación casi lineal con los esfuerzos efectivos.
9. El método utilizado para obtener el coeficiente de empuje de tierras en reposo con datos de consolidaciones anisótropas (Ovando, López, & Trigo, 2007), es validado al comparar el resultado con el obtenido utilizando la ley de Jaky, ya que el error es de 5.4%.

REFERENCIAS

- Alvarado, G. a. (2012). On the performance of bender elements in triaxial test. *Géotechnique*, 1-17.
- Arroyo, M. M. (2003). Source near-field effects and pulse test in soil samples. *Géotechnique*, 53(3), 337-345.
- Barnes, G. (1995). *Soil mechanics. Principles and practice*. New York, NY: Palgrave Macmillan.
- Bendat J.S., P. A. (1985). *Random data, analysis and measurement procedures*. New York, NY: John Wiley & Sons.
- Bishop, A. W. (1958). Test requeriments for maesuring the coefficient of earth pressure at rest. *Conf. on earth pressure problems*, (pp. 2-14). Bruselas.
- Brignoli, E. G. (1996, December). Measurement of shear waves in laboratory specimens by means of piezoelectric transducers. *Geotechnical Testing Journal*, 19(4), 384-397.
- Cady, W. G. (1964). *Piezoelectricity. An introduction to the Theory and Applications of Electromechanical Phenomena in Crystals* (Vol. One). New York: Dover Publications, Inc.
- Casagrande, A. (1936). The determination of the consolidation load and its practical significant. *First International Conference of Soil Mechanics*, (pp. 60-64). Cambridge, MA.
- Chan, C.-M. (2010). Bender Element Test in Soil Specimens: Identifying the Shear Wave Arrival Time. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 15 (Paquete M), pp. 1263-1276.
- Desrues, J. a. (2004). Strain localization in sand: an overview of the experimental results obtained in Grenoble using stereophotogrammetry. *International journal for numerical and analytical methods in geomechanics*, 279-321.

- Díaz P., M. (2014). *Medición de las ondas sísmicas en pruebas de consolidación usando cristales piezoeléctricos*. México: Programa de maestría y doctorado en ingeniería, Facultad de ingeniería, UNAM.
- Díaz P., M. A. (2012). *Instrumentación de cristales piezoeléctricos (Elementos de compresión y flexión)*. México: Instituto de Ingeniería, UNAM.
- Díaz-Rodríguez, J. (2014). *Mecánica de suelos. Naturaleza y propiedades*. Ciudad de México: Trillas.
- Díaz-Rodríguez, J. A. (2005). *Dinámica de suelos*. Ciudad de México: Limusa.
- Flores Guzmán, M. (2013). *Microspección de ondas dinámicas en muestras de suelo en una cámara triaxial*. México: Programa de maestría y doctorado en Ingeniería, FI UNAM.
- Flores, O. (1996). *Propiedades dinámicas de jales*. México, D.F.: División de estudios de posgrado, Facultad de Ingeniería, UNAM.
- Jaky, J. (1948). Pressure in soils. *2dn ICSMFE*, (pp. 103-107). London.
- Juárez, O. (2014). *Procedimiento para obtener velocidades de onda (V_p y V_s) en campo con Sonda Suspendida*. México, D.F.: Programa único de especializaciones de ingeniería, Facultad de Ingeniería, UNAM.
- Lee, J. a. (2004-2005). Bender elements: Performance and signal interpretation. *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, 131(9), 1063-1070.
- Marsal, R. y. (1957). *The subsoil of Mexico City*. Mexico City: Facultad de ingeniería, UNAM.
- Mitaritonna, G., Amorosi, A., & F., C. (2010). Multidirectional bender element measurements in the triaxial cell: equipment set-up and signa interpretation. *The Italian Geotechnical Journal*, 52-70.
- Normas Técnicas Complementarias para diseño y construcción Cimentaciones, Reglamento de Construcción del Distrito Federal*. (2004). México D.F.
- Ovando, E., López, O., & Trigo, M. (2007). The value of K_0 in Mexico city clay from laboratory and field tests. *Proceedings of the - 14th panamerican conference of soil mechanics and geotechnical engineering*. Canadian Geotechnical Society.
- Piezo Systems, Inc. (2015, 11 12). Retrieved from <http://www.piezo.com/>
- Roesler, S. K. (1979). Anisotropic shear modulus due to stress anisotropy. *Journal of the Geotechnical engineering division*, 871-880.
- Sanchez-Salinerio, I. R. (1986). *Analytical studies of body wave propagation and attenuation*. Civil Engineering Department. Austin, TEX.: The University of Texas at Austin.

- Santamarina, J. a. (1998). *Introduction to discrete signals and inverse problems in civil engineering*. Reston, VA: ASCE Press.
- Teachavorasinskun, S. a. (2004). Technical note: Paths of elastic shear modulus of clays. *Géotechnique*, 331-333.
- Teachavorasinskun, S. P. (2016). Shear wave velocity of sands subject to large strain triaxial loading.
- Valderrama A., Y. (2013). *Investigación experimental del comportamiento de las arcillas bajo pequeñas deformaciones*. Ciudad de México: UNAM.
- Vázquez A., R. (2016). *Obtención experimental de parámetros elásticos del suelo mediante la utilización de cristales piezoeléctricos*. México: Instituto Politécnico Nacional, ESIA.
- Viggiani, G. &. (1995). Interpretation of bender elements tests. *Géotechnique*, 149-154.
- Wood, D. M. (1990). *Soil behaviour and critical state soil mechanics*. Cambridge, U.K.: Cambridge University Press.