



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

MEDICIÓN DE LAS ONDAS SÍSMICAS EN PRUEBAS DE CONSOLIDACIÓN USANDO  
CRISTALES PIEZOELÉCTRICOS

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

PRESENTA:  
MIGUEL ANGEL DIAZ PARDAVE

TUTOR PRINCIPAL  
Dr. Efraín Ovando Shelley, Instituto de Ingeniería

MÉXICO, D. F., DICIEMBRE DE 2013



**JURADO ASIGNADO:**

Presidente: Dr. Aguilar Becerril Héctor Raúl.

Secretario: Dr. Osvaldo Flores Castrellón.

Vocal: Dr. Efraín Ovando Shelley.

1<sup>er</sup>. Suplente: M.C. Lermo Samaniego Javier F.

2<sup>do</sup>. Suplente: Dr. Celestino Valle Molina.

Lugar o lugares donde se realizó la tesis: Instituto de Ingeniería, de la UNAM

**TUTOR DE TESIS:**

**Dr. Efraín Ovando Shelley.**

-----  
**FIRMA**





Agradezco a la Universidad Nacional Autónoma de México y al Instituto de Ingeniería de la UNAM por la formación profesional que he recibido y el apoyo brindado para la elaboración del presente trabajo.

La paciencia y entusiasmo que el Dr. Efraín Ovando Shelley tuvo para que este trabajo se concluyera son meritorios, Dr. Efraín, muchas gracias por sus opiniones tan acertadas durante el desarrollo del mismo y sobre todo el amistoso trato con que siempre se ha dirigido a mí.

Este documento se enriqueció de manera importante con las opiniones que hicieron los miembros del jurado durante la revisión. A los Doctores Osvaldo Flores Castellón, Héctor Raúl Aguilar Becerril, Celestino Valle Molina, y M.C Javier F. Lermo Samaniego mis más sinceros agradecimientos.

Finalmente agradezco a Germán y Javier, por su valiosa colaboración en los trabajos realizados en el laboratorio de Mecánica de Suelos del Instituto de Ingeniería.



Agradezco

A mi esposa y mi futuro bebé  
a quienes las llevo en mi corazón y dedico este  
trabajo.

A mi familia, quienes siempre me  
apoyaron en las buenas  
y en las malas.



---

<b>RESUMEN</b> .....	I
<b>LISTA DE TABLAS</b> .....	II
<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	IV
<b>SÍMBOLOS Y NOTACIÓN</b> .....	XI
<b>CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN</b> .....	1
1.1. Introducción.....	1
1.2. Objetivo y alcances .....	4
1.3. Contenido y organización de la tesis .....	4
<b>CAPÍTULO 2: CONCEPTOS GENERALES</b> .....	6
2.1. Teoría de propagación de ondas sísmicas .....	6
2.1.1. Onda primaria o de compresión .....	6
2.1.2. Ondas secundarias o cortantes .....	7
2.1.3. Ondas en un medio semi-infinito .....	7
<b>CAPÍTULO 3: DISEÑO DEL CONSOLIDÓMETRO INSTRUMENTADO CON CRISTALES PIEZOELÉCTRICOS</b> .....	11
3.1. Introducción.....	11
3.2. Descripción y características del consolidómetro .....	13
3.3. Características de los cristales piezoeléctricos .....	19
3.4. Equipo complementario para la medición de las velocidades de onda.....	22
<b>CAPÍTULO 4: MATERIALES ESTUDIADOS Y PROCEDIMIENTO DE ENSAYE</b> .....	29
4.1. Introducción.....	29
4.2. Suelo marino .....	30
4.3. Arcilla de la Ciudad de México.....	31
4.4. Procedimiento de ensaye .....	33

---

<b>CAPÍTULO 5: PROCESAMIENTO DE LOS DATOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS .....</b>	<b>39</b>
5.1. Introducción.....	39
5.2. Programa de ensayos de consolidación instrumentado con cristales piezoeléctricos ....	39
5.3. Curvas de compresibilidad.....	40
5.4. Tiempo de viaje en ondas de compresión y de corte .....	44
5.4.1. Medición del tiempo de retraso por la instrumentación ( $t_c$ ) .....	52
5.5. Determinación de las velocidades de onda en la masa de suelo.....	54
5.6. Estimación de la frecuencia predominante del suelo mediante funciones de transferencia .....	60
5.7. Análisis de resultados .....	64
<b>CAPÍTULO 6: CONCLUSIONES.....</b>	<b>83</b>
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>87</b>
<b>Anexos.....</b>	<b>87</b>
Anexo A: Curvas de velocidades de ondas de corte compresión versus el esfuerzo efectivo para la serie A y B.....	88
Anexo B: Curvas de cociente espectral para la serie A y B .....	115
Anexo C: Curvas del valor de $R_d$ para cada serie A y B .....	149
Anexo D: Curvas de las velocidades de ondas de corte En función del esfuerzo efectivo para la serie A y B .....	149







## RESUMEN

Con el objetivo de evaluar la velocidad de ondas de corte ( $V_s$ ) y de compresión ( $V_p$ ) en un espécimen de suelo se usó un consolidómetro instrumentado con cristales piezoeléctricos de flexión y compresión. El trabajo experimental desarrollado en esta investigación describe varios aspectos involucrados en el diseño, la construcción, la técnica de instrumentación, y los ensayos en arcillas (suelo marino y del Valle de México) con cristales piezoeléctricos.

El ensayo consiste en someter al suelo a consolidación, para lo cual se aplicaron diferentes incrementos de esfuerzos efectivos hasta alcanzar el tramo virgen de la curva de compresibilidad. Además, para cada incremento de esfuerzo se midieron las velocidades de ondas P y S, con un rango de frecuencia de excitación ( $f_{in}$ ) de 1 a 7 kHz para el elemento de flexión y 20 a 100 kHz para elementos de compresión.

El análisis consiste en determinar los tiempos de llegada de las ondas en el elemento receptor, para de este modo, determinar las velocidades de propagación de las ondas. Sin embargo, varios investigadores encontraron que un efecto, conocido como efecto de campo cercano, inducía errores en la determinación de las velocidades con la técnica antes descrita. Por lo tanto, se propuso una nueva técnica, la cual consiste en hallar un parámetro  $R_d$ , propuesto por Sánchez Salinero (1986), y la frecuencia fundamental del sistema  $f_o$ , obtenida con la función de transferencia entre las señales de entrada y salida.

Los resultados mostraron que el uso de cristales piezoeléctricos y la técnica de análisis propuesta permite determinar confiablemente las velocidades de ondas de corte y de compresión.

## LISTA DE TABLAS.

Tabla 3.3.1. Características principales de los cristales piezoeléctricos del tipo PSI - 5H4E y PSI - 5A4E (Piezo System, Inc.).	20
Tabla 4.2.1. Resumen de los resultados de las propiedades índice de las muestras ensayadas para suelo marino, (Golfo de México, ubicación: aproximadamente a 60 km al noreste de Alvarado, Veracruz).	31
Tabla 4.3.1. Resumen de los resultados de las propiedades índice de las muestras ensayadas en el sitio 2, (Lago de Texcoco, ubicación: cerca de la esquina nororiente del Lago Nabor Carrillo, a 300 m de la carretera México-Texcoco).	33
Tabla 5.2.1. Resumen de los ensayos de consolidación en un consolidómetro instrumentado con cristales piezoeléctricos.	40
Tabla 5.3.1. Resumen de las cargas aplicadas para las muestras de la serie A y B.	41
Tabla 5.3.2. Resumen de los ensayos de consolidación y su esfuerzo de preconsolidación para las muestras de la serie A y B.	41
Tabla 5.4.1. Forma de la onda de entrada sugerido por diversos autores (Fonseca et al., 2008).	45
Tabla 5.4.2. Resumen de la forma de la onda de entrada para el presente estudio.	46
Tabla 5.4.3. Estimación del tiempo de la señal de los puntos característicos de la Figura 5.12.	51

---

Tabla 5.4.4. Resumen de datos de entrada para determinar el tiempo de retardo ( $t_c$ ).	53
Tabla 5.5.1. Resumen de las frecuencias de excitación para el elemento de flexión y compresión para las serie A y B.	56
Tabla 5.6.1. Resumen de las funciones usado en el procesamiento de la señal.	61
Tabla 5.6.2. Resultados de las frecuencias del sistema para cada serie de las pruebas.	62
Tabla 5.7.1. Resumen de la variación de velocidades de ondas de corte para la serie A y B en función del rango de frecuencia de excitación ( $f_{in}$ ).	65
Tabla 5.7.2. Cálculo de la velocidad de ondas de corte con la frecuencia predominante ( $f_o$ ) y con la frecuencia crítica ( $f_{crit}$ ) para un ensayo de la serie B1 (arcilla de la Ciudad de México).	81
Tabla 5.7.3. Resultados de las velocidades de ondas de corte para los ensayos de la serie A (suelo marino) y la serie B (arcilla de la Ciudad de México).	82

## LISTA DE FIGURAS.

Figura 2.1. Modelo de propagación de (a) ondas P y (b) ondas S	08
Figura 2.2. Esfuerzos en un cubo infinitesimal (Kramer, 1996)	10
Figura 3.1.1. Edómetro con elementos bender (Thomann y Hryciw, 1990)	12
Figura 3.1.2. Celda de consolidómetro: (a) vista en planta, (b) vista en elevación (Fam y Santamarina, 1995).	12
Figura 3.1.3. Celda de consolidómetro equipado con elementos bender (Shibuya, 1997)	12
Figura 3.1.4. Sección transversal de la celda de consolidómetro EIT	13
Figura 3.2.1 Edómetro (consolidómetro unidimensional)	14
Figura 3.2.2. Esquema general del cabezal (a) Vista en planta y (b) vista de perfil	15
Figura 3.2.3. Esquema general del pedestal (a) Vista en planta y (b) vista de perfil	15
Figura 3.2.4. Cazoleta, cabezal y pedestal implementados para los ensayo	15
Figura 3.2.5. . Esquema general del arreglo implementado para los ensayos	16
Figura 3.2.6. Dispositivo de los equipos y dispositivos para realizar los ensayos de consolidación	17
Figura 3.2.7. Comparación de la llegada de la onda de corte con especímenes de	

---

diferentes alturas para una arcilla blanda con un confinamiento isotrópico de 50 kPa (Brignoli et al., 1996).	18
Figura 3.2.8. Probeta experimental de 80 mm de altura y 69 mm de diámetro, para un suelo marino	19
Figura 3.3.1. Elemento Bender usado. (a) Vista en planta y (b) vista lateral	20
Figura 3.3.2. Disco de compresión usado. a) Vista planta y (b) vista lateral	21
Figura 3.3.3. Elementos Bender: (a) tipo serie, y (b) tipo paralelo (Lee y Santamarina, 2004).	22
Figura 3.3.4. Efectos de interferencia (Crosstalk): (a) tipo serie a serie sin conexión a tierra; (b) tipo serie a serie con recubrimiento y conexión a tierra; (c) paralelo a serie con recubrimiento y conexión a tierra; y (d) paralelo a paralelo con recubrimiento. El tiempo “ $T_{1st}$ ” corresponde a la primera llegada de la onda corte (ingreso de la señal pico a pico de longitud: $L=100$ mm). (Lee y Santamarina, 2004).	22
Figura 3.4.1. Propagación de la onda S y P emitido por un elemento bender y elemento de compresión	23
Figura 3.4.2. Generador de funciones	24
Figura 3.4.3. Osciloscopio modelo HP54540A	24
Figura 3.4.4. Visualizador de los resultados en la etapa de ensayo	25
Figura 3.5.1. Esquema general de la implementación: conexión bujes al cabezal y pedestal para la probeta modelo.	26
Figura 3.5.2. Elemento Bender y Disco adherido a los bujes de nylamid, orientado	

---

perpendicularmente a la base.	27
Figura 3.5.3. Aparato de conexión BNC implementado en el Laboratorio de Mecánica de Suelos del Instituto de Ingeniería.	28
Figura 3.5.4. Vista de la disposición del elemento bender conectado en el adaptador	28
Figura 4.2.1. Polígono de estudio, “Golfo de México”	30
Figura 4.2.2. Muestras recuperadas de sondeos AP-13 a AP-17	30
Figura 4.3.1. Ubicación de las muestras ensayadas en el Valle de México, (Flores <i>et al.</i> , 2009)	32
Figura 4.4.1. Muestras inalteradas para la investigación. a) Suelo marino y b) suelo Ciudad de México	35
Figura 4.4.2. Proceso de obtener el espécimen de suelo. a) Corte del espécimen de suelo y b) espécimen de suelo para el ensayo	35
Figura 4.4.3. Montaje de la muestra. a) Realizando el ranurado y b) colocando la mezcla de agua con bentonita	36
Figura 4.4.4. Montaje de la muestra. a) Colocando mezcla de agua con bentonita en los cristales piezoeléctricos, b) colocando el cabezal a la muestra de suelo y c) nivelando en ambas direcciones.	37
Figura 5.2.1. Esquema general de los ensayos de consolidación instrumentado con cristales piezoeléctricos en suelos arcillosos.	40
Figura 5.3.1. Curva de compresibilidad de la muestra AP15-M51	42
Figura 5.3.2. Curva de compresibilidad de la muestra AP15-M71	42

---

Figura 5.3.3. Curva de compresibilidad de la muestra AP17-M65	43
Figura 3.3.4. Curva de compresibilidad de la muestra M10-S1	43
Figura 3.3.5. Curva de compresibilidad de la muestra M14-S1	44
Figura 3.3.6. Curva de compresibilidad de la muestra M15-S3	44
Figura 5.4.1. Señal típica de un pulso de excitación para medir velocidad de onda de corte ( $V_s$ ), esfuerzo efectivo de 58.8 kPa, para una prueba de arcilla: (a) Onda senoidal de 3 kHz de frecuencia, y (b) onda cuadrada de 5 Hz de frecuencia.	46
Figura 5.4.2. Señal típica de un pulso de excitación para medir velocidad de onda compresionales ( $V_p$ ), esfuerzo efectivo de 58.8 kPa, para una prueba de arcilla.	46
Figura 5.4.3. Tiempo de llegada para una onda de corte con el método de primer tiempo y pico a pico.	49
Figura 5.4.4. Señal recibida para diferentes frecuencias e indicando el efecto de campo cercano	50
Figura 5.4.5. Señal de pulso senoidal (transmisión) y tiempo historia de la señal de recepción, y los puntos característicos correspondientes para la estimación del tiempo de viaje.	51
Figura 5.4.6. Obtención de tiempo de retardo de la señal $V_s$	53
Figura 5.4.7. Obtención de tiempo de retardo de la señal $V_p$	54
Figura 5.4.8. Verificación del tiempo de retardo a diferentes frecuencias (ondas $V_s$ ). a) elemento de compresión y b) elemento de flexión.	54

- Figura 5.5.1 Diagrama del equipo experimental para obtener las velocidades de onda de corte y compresión con el método de transmisión de ondas. 55
- Figura 5.5.2. Formas de las ondas a diferentes frecuencias de entrada ( $f_{in}$ ) y a un esfuerzo efectivo de 58.8 kPa para la serie B3. a) Ondas S y b) Ondas P. 57
- Figura 5.5.3. Formas de las ondas para diferentes esfuerzos (etapa de carga y descarga) para la prueba de la serie B3. a) arribo de las ondas S con una frecuencia de entrada de 4kHz y b) arribo de las ondas P con una frecuencia de entrada de 60 kHz 58
- Figura 5.6.1. Medida de la frecuencia del sistema ( $f_o$ ) para las ondas emitida a diferentes frecuencias de entrada ( $f_{in}$ ) y de recepción a un esfuerzo efectivo de 78.4 kPa para la serie B2. a) Curvas de transformada de Fourier (FFT) para emisor y receptor y b) curvas de función de transferencia (FT) indicando la frecuencia dominante del sistema. 63
- Figura 5.7.1. Comportamiento de las velocidades de ondas de corte a diferentes esfuerzos de consolidación (etapa de carga, descarga y recarga). a) Serie A1 (AP15-M51), b) serie A2 (AP15-M71) y c) serie A3 (AP17-M65). 67
- Figura 5.7.2. Comportamiento de las velocidades de ondas de corte a diferentes esfuerzos de consolidación (etapa de carga, descarga y recarga). a) Serie A1 (M10-S1), b) serie B2 (M14-S1) y c) serie B3 (M15-S1). 68
- Figura 5.7.3. Comportamiento de las velocidades de ondas de compresión a diferentes esfuerzos de consolidación (etapa de carga, descarga y recarga). a) Serie A1 (AP15-M51), b) serie A2 (AP15-M71), c) serie A3 (AP17-M65), d) Serie A1 (M10-S1), e) serie B2 (M14-S1) y f) serie B3 (M15-S1). 69
- Figura 5.7.4. Función de transferencia de un sistema elemento bender usando una arcilla de la ciudad de México (Serie B1) a) Esfuerzo efectivo de carga de 39.4 kPa



---

y b) esfuerzo efectivo de carga 78.5 kPa	73
Figura 5.7.5. Frecuencia principal de la señal recibida $f_{mean}$ en función de $V_s$ y $R_d$ para muestras con 26 mm de distancia de pico a pico del elemento de flexión (Lutz Karl, 2004).	75
Figura 5.7.6a. Variación del valor de $R_d$ para la frecuencia del sistema obtenido de FT para muestra de la Ciudad de México de 55.2 mm de distancia de pico a pico del elemento de flexión para las ondas senoidales.	76
Figura 5.7.6b. El valor de $R_d^*$ determinado para una frecuencia crítica ( $f_{crit}$ ) de 4kHz en una muestra de la Ciudad de México de 55.2 mm de distancia de pico a pico del elemento de flexión.	77
Figura 5.7.7a Variación del valor de $R_d$ para la frecuencia del sistema obtenido de FT para una muestra de la Ciudad de México de 55.2 mm de distancia de pico a pico del elemento de flexión para las ondas senoidales.	77
Figura 5.7.7b. El valor de $R_d^*$ determinado para una frecuencia crítica ( $f_{crit}$ ) de 6kHz en una muestra de la Ciudad de México de 55.2 mm de distancia de pico a pico del elemento de flexión.	78
Figura 5.7.8a. Variación del valor de $R_d$ para la frecuencia del sistema obtenido de FT para una muestra de suelo marino de 48 mm de distancia de pico a pico del elemento de flexión para las ondas senoidales.	78
Figura 5.7.8b. El valor de $R_d^*$ determinado para una frecuencia crítica ( $f_{crit}$ ) de 5 kHz en una muestra de suelo marino de 48 mm de distancia de pico a pico del elemento de flexión.	79
Figura C.1. El valor de $R_d^*$ determinado para una muestra de suelo marino de la serie A1.	155

---

Figura C.2. El valor de $R_d^*$ determinado para una muestra de suelo marino de la serie A2.	155
Figura C.3. El valor de $R_d^*$ determinado para una muestra de suelo marino de la serie A3.	156
Figura C.4. El valor de $R_d^*$ determinado para una muestra arcillosa del Valle de México de la serie B1.	156
Figura C.5. El valor de $R_d^*$ determinado para una muestra arcillosa del Valle de México de la serie B2.	157
Figura C.6. El valor de $R_d^*$ determinado para una muestra arcillosa del Valle de México de la serie B3.	157
Figura D.1. Curva de velocidades de ondas de corte versus esfuerzo efectivo para una muestra de suelo marino de la serie A1.	159
Figura D.2. Curva de velocidades de ondas de corte versus esfuerzo efectivo para una muestra de suelo marino de la serie A2.	159
Figura D.3. Curva de velocidades de ondas de corte versus esfuerzo efectivo para una muestra de suelo marino de la serie A3.	160
Figura D.4. Curva de velocidades de ondas de corte versus esfuerzo efectivo para una muestra arcillosa del Valle de México de la serie B1.	160
Figura D.4. Curva de velocidades de ondas de corte versus esfuerzo efectivo para una muestra arcillosa del Valle de México de la serie B2.	161
Figura D.4. Curva de velocidades de ondas de corte versus esfuerzo efectivo para una muestra arcillosa del Valle de México de la serie B3.	161

## SÍMBOLOS Y NOTACIÓN

$L_{sup}$	Distancia superior del elemento de flexión
$L_s$	Distancia pico a pico del elemento de flexión
$L_{inf}$	Distancia inferior del elemento de flexión
$L_d$	Distancia pico a pico del elemento de compresión
BE	Bender element
m	metros
Km	Kilometro
div	División
mV	Mili-volts
MHz	Megahertz
$t_o$	Tiempo de llegada
$t_p$	Tiempo pico a pico
$t_{cc}$	Tiempo de correlación cruzada
$\Delta t$	Tiempo de arribo
e	Relación de vacíos
$\gamma_m$	Peso volumétrico, g/cm <sup>3</sup> ó kN/m <sup>3</sup>
$G_{m\acute{a}x}$	Módulo de rigidez máximo, MPa
$G_s$	Densidad de sólidos
Hz	Hertz
cm	Centímetros
kHz	Kilohertz
kPa	Kilopascales
$\mu s$	Microsegundo
$\nu$	Relación de Poisson, adimensional
S	Ondas de corte
P	Ondas de compresión
$\sigma_c$	Esfuerzo efectivo, kPa
$S_r$	Grado de saturación, %
$\sigma_{pc}$	Esfuerzo de preconsolidación, kPa
P	Polarización
$V_s$	Velocidad de onda S, m/s
w	Contenido de humedad, %
$w_L$	Límite líquido, %
$w_P$	Límite plástico, %

V	Voltaje, volts
$V_p$	Velocidad de onda P, m/s
PI	Índice de Plasticidad
FFT	Transformada rápida de Fourier
IFFT	Inversa de la transformada rápida de Fourier
T	Tiempo, s
f	Frecuencia, Hz
$t_c$	Tiempo de retraso
$t_{cs}$	Tiempo de retraso del elemento de flexión
$t_{cp}$	Tiempo de retraso del elemento de compresión
$f_{in}$	Frecuencia de excitación, Hz o kHz
$t_s$	Tiempo de viaje de la onda de corte
$t_p$	Tiempo de viaje de la onda de compresión
$\lambda$	Longitud de onda
f	Frecuencia de salida del sistema
$\rho$	Densidad del suelo
FT	Función de transferencia
X(t)	Señal de entrada de la onda S
Y(t)	Señal de salida de la onda S
H(f)	Calculo de la función de transferencia
$\omega$	Frecuencia circular
$\Delta\omega$	Intervalo de frecuencia
$X_n(t)$	Señal de entrada normalizada de la onda S
$Y_n(t)$	Señal de salida normalizada de la onda S
X( $\omega$ )	Transformada rápida de Fourier de la señal de entrada de la onda S
Y( $\omega$ )	Transformada rápida de Fourier de la señal de salida de la onda S
$f_o$	Frecuencia dominante del sistema
$f_1, f_2, f_3, f_4$	Numerosos picos en función de transferencia (FT)
$R_d$	Parámetro de relación entre $L_s$ y $\lambda$
$f_{crit}$	Frecuencia critica
$\lambda_e$	Longitud de onda de corte
$R_d^*$	Parámetro que no depende de la frecuencia
$V_{s-f_o}$	Velocidad obtenida con la frecuencia $f_o$
$V_{s-crit}$	Velocidad obtenida con frecuencia critica $f_{crit}$
$E_r$ (%)	Error entre las velocidades

## CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

### 1.1. Introducción

Para medir los parámetros dinámicos de los suelos en el laboratorio normalmente se llevan a cabo ensayos como el triaxial cíclico o la columna resonante. Estos ensayos, sin embargo, están ligados a un alto costo de operación, por lo que se ha optado en buscar una solución más económica y confiable. Así, se ha encontrado que el uso de los cristales piezoeléctricos es una buena alternativa para medir estos parámetros dinámicos.

El uso de cristales piezoeléctricos en ensayos experimentales de laboratorio es actualmente una técnica innovadora no destructiva y muy popular para la medición del módulo de corte elástico máximo,  $G_{max}$ .

Esta aplicación pasó a ser típicamente popular con los elementos de flexión (elementos bender) capaces de generar una excitación dinámica al espécimen de suelo, con una onda de forma senoidal o cuadrada, con el fin de detectar ondas de cuerpo (corte y de compresión) de manera automática. En la actualidad no existe una metodología definitiva para el uso de elementos de flexión y elementos de compresión, y el procedimiento de interpretación pueden variar considerablemente según el criterio del usuario. Estos cristales piezoeléctricos han sido instalados en diferentes pruebas geotécnicas y con diferentes configuraciones; una configuración clásica es de colocar los cristales piezoeléctricos en la parte superior (emisor) e inferior del espécimen (receptor) para transmitir ondas de forma vertical en equipos, tales como el Triaxial, edométrico, de columna resonante, etc.

El uso de los cristales piezoeléctricos se justifica como una alternativa confiable, que permite el procesamiento de la información de forma eficiente y económica en comparación de otras técnicas de medición del módulo de corte,  $G$ . Varias configuraciones nuevas del uso de los cristales han sido propuestas por diferentes investigadores (Shirley and Hampton 1978; Horn 1981; Schulthesis 1981;

Dyvik and Madshus 1985; Thomann and Hryciw 1990; Agarwal and Ishibashi 1991; Gohl and Finn 1991; Viggiani and Atkinson 1995; Brignoli et al. 1996; Zeng and Ni 1998; Lee and Santamarina 2005; Leong et al. 2005; Landon et al. 2007; Hoyos et al. 2008; Chen et al. 2008; Fu et al. 2009; Kim and Kim 2010; Zhou et al. 2010; Viana da Fonseca et al, 2012).

Con el transcurso del tiempo, la aplicación de los cristales ha presentado dificultades en la interpretación de las llegadas de las ondas de corte, debido a que esta cambia de ubicación con el incremento de la frecuencia de excitación. Esto puede resultar en un error significativo en la interpretación del tiempo de arribo de las ondas recibidas y por ende en determinar las  $V_s$  con exactitud (Viggiani y Atkinson, 1995; Brignoli et al, 1996). Por el contrario, la interpretación de la llegada de las ondas de compresión no ha tenido dificultades. Esto es debido a que la llegada de las ondas se mantiene constante al variar la frecuencia de excitación y no se encuentra un error significativo en la interpretación del tiempo de arribo de las ondas recibidas y por ende resulta fácil determinar las  $V_p$ . Además, tiene una ventaja en evaluar el grado de saturación del espécimen por medio de velocidades de propagación de ondas de compresión.

Se han propuesto varias recomendaciones para la interpretación y comprensión del funcionamiento de los cristales piezoeléctricos y diversas sugerencias de análisis para la interpretación (Viggiani y Atkinson, 1995; Jovic'ic et al, 1996; Arulnathan et al, 1998; Blewett et al, 1999, 2000; Pennington et al, 2001; Arroyo et al, 2003a, 2003b; Clayton et al, 2004; Leong et al, 2005; Arroyo et al., 2006; Viana da Fonseca et al, 2009; Yamashita et al, 2009).

Una de las interpretaciones recomendadas es estudiar el efecto de campo cercano en las señales recibidas obtenidas con los elementos de flexión. Esto ha sido discutido ampliamente por Sánchez-Salineró et al (1986), Viggiani y Atkinson (1995b), Jovicic et al (1996), Brignoli et al (1996), Arroyo et al (2003), Lee y Santamarina (2005), Viana da Fonseca et al (2012).

En esta tesis se ha implementado tres dispositivos para realizar ensayos de consolidación los cuales se han instrumentado con cristales. Esto con el fin de medir las velocidades de onda en especímenes de suelo marino y arcilla de la Ciudad de

México. Para ello, se utilizaron elementos de compresión (discos) para medir las  $V_p$  y elementos de flexión para medir las  $V_s$  eligiendo de dimensiones considerables y para generar la energía suficiente para detectar las ondas y poder medir las velocidades. Estos cristales piezoeléctricos se utilizan en pares donde uno funciona como emisor y el otro de receptor, el emisor transforma en una señal eléctrica en un movimiento mecánico que perturba el medio en el que está incrustado en un extremo del espécimen de suelo, en el otro extremo del espécimen se alinea y se incrusta el otro que actúa como receptor. Con ello se identifica los tiempos de arribo de manera independiente

Las  $V_s$  y  $V_p$  que se propagan en el suelo se han determinado conociendo la distancia del recorrido que viaje la onda y tiempo que tarda en arribar la onda de propagación del emisor al receptor

La distancia es un valor conocido y depende de las dimensiones del espécimen de suelo; el tiempo es un valor que se puede medir entre la diferencia del tiempo de llegada de la onda recibida y transmitida, el cual puede ser mucho más complicada de determinar.

Varios autores han sugerido diferentes enfoques para la interpretación del tiempo de arribo basado en el dominio del tiempo y de la frecuencia (por ejemplo Viggiani y 1995b Atkinson; Brocanelli y Rinaldi, 1998; Blewett et al, 1999; Mohsin et al, 2004; Lee y Santamarina, 2005; Wang et al. 2007). En esta investigación se realizó una técnica alterna introduciendo el uso de funciones de transferencia como una herramienta para obtener la frecuencia fundamental del sistema ( $f_0$ ). Esto seguido por un estudio del efecto de campo cercano para determinar el parámetro  $R_d$  propuesto por Sánchez Salinero (1986), con el fin de disminuir la incertidumbre en la determinación de las  $V_s$  en el primer arribo de la onda de corte. El parámetro  $R_d$  es una relación entre la distancia pico a pico de viaje de la onda ( $L_s$ ) y la longitud de onda ( $\lambda$ ) para una interpretación adecuada de las señales con los elementos de flexión.

Finalmente, se reportaron los resultados de  $V_s$  y  $V_p$  para cada frecuencia de excitación ( $f_m$ ) demostrando la aplicación con éxito de la configuración experimental desarrollado para los ensayos. Además se propone una alternativa adecuada para

determinar las  $V_s$  medidas en especímenes de suelo utilizando cristales piezoeléctricos, cuando se observa que el valor de  $R_d$  no depende de la frecuencia y este se mantiene constante.

## 1.2. Objetivo y alcances

El objetivo y alcance de la presente investigación es medir las velocidades de ondas de compresión y de corte que viajan a través de un espécimen de suelo, el cual es ensayado en el laboratorio en un consolidómetro mecánico instrumentado con cristales piezoeléctricos. Para tal efecto se propone un método novedoso para realizar esas mediciones.

Para cumplir con el objetivo planteado, se consideraron los siguientes aspectos:

- Se diseñaron y pusieron en operación tres consolidómetros mecánicos para medir velocidades de onda de corte y compresión en muestras de suelo, utilizando cristales piezoeléctricos colocados en el pedestal y cabezal del espécimen.
- La investigación se enfoca al estudio de  $V_p$  y  $V_s$  medidas en especímenes de suelo marino y del Valle de México. En los ensayos y mediciones de las velocidades de onda de corte y compresión durante la etapa de consolidación, se aplican ciclos de carga-descarga-recarga para medir las  $V_s$  y  $V_p$  del suelo.

## 1.3. Contenido y organización de la tesis

En esta tesis se planificó una serie de actividades que comprendieron: la recopilación de información, el desarrollo de un programa de instrumentación con tres consolidómetros mecánicos, la realización de ensayos de laboratorio, el procesamiento de la información y el trabajo en gabinete para el análisis y elaboración del reporte de velocidades de ondas de compresión y de corte. De acuerdo al desarrollo de estas actividades se definió la organización de la investigación en seis capítulos que a continuación se describen brevemente:



En el Capítulo 2 se presenta la parte teórica de la propagación de las ondas sísmicas en el suelo; esta información está basada por los estudios realizados por diferentes investigadores.

En el Capítulo 3 se presentan los argumentos relacionados que acrediten la validez de la instrumentación del consolidómetro usando cristales piezoeléctricos como un sistema de medición de ondas S y P, considerando los estudios realizados por otros investigadores. Además, estos argumentos han servido para adoptar las dimensiones del espécimen y el diseño de la estación de ensayos implementada.

En el Capítulo 4 se presentan las muestras obtenidas de la exploración de campo que han permitido definir las características físicas y mecánicas de los suelos marinos y del Valle de México. Finalmente, se describe el desarrollo del procedimiento de montaje y de la configuración experimental del ensayo de consolidación considerando la instrumentación que se adoptó para esta investigación.

En el Capítulo 5 se presentan los resultados y análisis de las señales digitales obtenidas del ensayo de consolidación con cristales piezoeléctricos para determinar las  $V_s$  y  $V_p$ . Además se describe el método de análisis para determinar las  $V_s$  en el espécimen de suelo, utilizando la transformada rápida de Fourier (FFT), y las funciones de transferencia (FT), con la que se determina la frecuencia fundamental del sistema ( $f_0$ ). Además se determina el parámetro  $R_d^*$  que minimiza el efecto de campo cercano y permite obtener un valor de  $V_s$  confiable.

En el Capítulo 6 Finalmente, se presentan las conclusiones y recomendaciones derivadas del desarrollo de este estudio.





## **CAPÍTULO 2: CONCEPTOS GENERALES**

### **2.1. Teoría de propagación de ondas sísmicas**

Las ondas sísmicas consisten en minúsculos paquetes de energía elástica de deformación que viajan desde la fuente sísmica a través del subsuelo a velocidades que dependen del módulo de elasticidad y de las densidades del medio en el cual viajan.

Existen dos tipos de ondas sísmicas. Las ondas de cuerpo que se propagan por el interior de los sólidos y las ondas superficiales que se transmiten por la superficie o por los contactos entre cambios bruscos de la rigidez del medio; estos contactos pueden quedar en el interior del sólido.

Como se mencionó en la sección anterior, las ondas sísmicas se propagan a través del subsuelo, el cual es un medio continuo que es modelado desde el caso más simple (donde las ondas se propagan en un medio ilimitado o infinito), al caso más complejo (donde las ondas se propagan en un medio limitado y estratificado). Dentro de cada modelo, los conceptos son presentados, primero, para el caso de la propagación de la onda en una dimensión, y luego para el caso más general en tres dimensiones. Estos conceptos serán descritos a continuación.

#### **2.1.1. Onda primaria o de compresión**

Las ondas P, también conocidas como ondas primarias, de compresión o longitudinales producen sucesivas compresiones y dilataciones a través de los materiales por los que se propagan. Son análogas a las ondas de sonido, ya que las partículas del medio se mueven en el mismo sentido en que se propaga la onda. Igual que las ondas de sonido, las ondas P viajan a través de sólidos y fluidos (incluido el aire), como se muestra en la Figura 2.1a.

### 2.1.2. Ondas secundarias o cortantes

Las ondas S, también conocidas como ondas secundarias, de corte o transversales, causan deformaciones de corte cuando viajan a través de un material. El movimiento de la perturbación es perpendicular a la dirección de propagación de la onda S. La dirección del movimiento de una partícula se puede utilizar para dividir las ondas S en dos componentes: SV (movimiento en un plano vertical) y SH (movimiento en un plano horizontal).

La velocidad a la que viajan las ondas de corte varía en función de la rigidez de los materiales. Las ondas S viajan únicamente a través de sólidos debido a que los líquidos no soportan esfuerzos de corte, como se muestra en la Figura 2.1b.

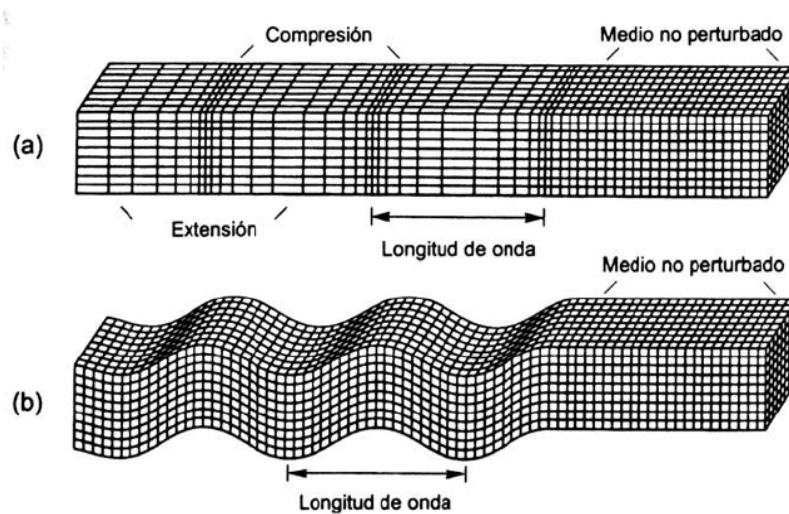


Figura 2.1.- Modelo de propagación de (a) ondas P y (b) ondas S.

### 2.1.3. Ondas en un medio semi-infinito

Es mucho más fácil entender la propagación de ondas de esfuerzos en un medio ilimitado o infinito partiendo del caso más simple en una dimensión, en el que se considera una varilla o barra infinitamente larga. Utilizando los requisitos básicos de equilibrio de fuerzas y compatibilidad de desplazamientos, y usando además las relaciones de deformación-desplazamiento y esfuerzo-deformación, la ecuación de la onda en una dimensión se puede escribir en una forma más familiar:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = V^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \quad (2.1)$$

Donde  $u$  es el desplazamiento en la dirección  $x$  y  $V$  representa la velocidad de propagación de la onda correspondiente al tipo de onda de esfuerzo de interés. La solución de tal ecuación puede escribirse de la forma:

$$u(x, t) = C e^{i(\omega t - kx)} + D e^{i(\omega t + kx)} \quad (2.2)$$

Donde  $\omega$  es la frecuencia circular y  $k$  es el número de onda. El primer y segundo término describen la propagación de las ondas armónicas en las direcciones "x" positivo y negativo, respectivamente.

Como una varilla infinita (representada por el modelo de propagación unidimensional de ondas) no es un modelo adecuado para describir la propagación de las ondas sísmicas a través de la Tierra, dado que la Tierra (Figura 2.2) y las fuentes de energía sísmica son tridimensionales, las ondas sísmicas se describen también en términos de la propagación de ondas tridimensionales. Al igual que el caso unidimensional, las ecuaciones de movimiento se formulan de las consideraciones de equilibrio, excepto que el equilibrio tiene que asegurarse en las tres direcciones perpendiculares, y utilizando además las relaciones de esfuerzo-deformación y deformación-desplazamiento; entonces las ecuaciones de movimiento para un material isotrópico, elástico y lineal. Estas ecuaciones son:

$$\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{xz}}{\partial z} \quad (2.3)$$

$$\rho \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = \frac{\partial \sigma_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{yz}}{\partial z} \quad (2.4)$$

$$\rho \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = \frac{\partial \sigma_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{zy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z} \quad (2.5)$$

Donde  $\rho$  es la densidad del material,  $p$  y  $w$  representan el desplazamiento en la dirección  $y$  y  $z$ , respectivamente. Además, las ecuaciones (2.3), (2.4) y (2.5)

representan las ecuaciones tridimensionales de movimiento de un sólido elástico en las direcciones “x”, “y” y “z” respectivamente. Estas ecuaciones de movimiento también se expresan en términos de desplazamiento. Al utilizar la ley de Hooke, que permite expresar las componentes de esfuerzo y deformación en términos de las dos constantes de Lamé,  $\lambda$  y  $\mu$ , las tres anteriores ecuaciones de movimiento pueden reescribirse en términos de deformación como:

$$\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = (\lambda + \mu) \frac{\partial \bar{\epsilon}}{\partial x} + \mu \nabla^2 u \quad (2.6)$$

$$\rho \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = (\lambda + \mu) \frac{\partial \bar{\epsilon}}{\partial y} + \mu \nabla^2 p \quad (2.7)$$

$$\rho \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = (\lambda + \mu) \frac{\partial \bar{\epsilon}}{\partial z} + \mu \nabla^2 w \quad (2.8)$$

Donde  $\bar{\epsilon}$  es la deformación volumétrica y  $\nabla^2$  es el operador Laplaciano.

Estas ecuaciones de movimiento para un sólido isotrópico, lineal y elástico sólo producen dos tipos de ondas que viajan a través de un sólido ilimitado y éstas son la onda P u onda primaria y la onda S u onda de corte, las cuales se describieron en la sección 2.1.1. Sus respectivas velocidades de propagación son:

$$V_P = \sqrt{\frac{G(2-2\nu)}{\rho(1-2\nu)}} \quad (2.9)$$

$$V_S = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (2.10)$$

Donde G es el módulo de corte y  $\nu$  es la relación de Poisson.

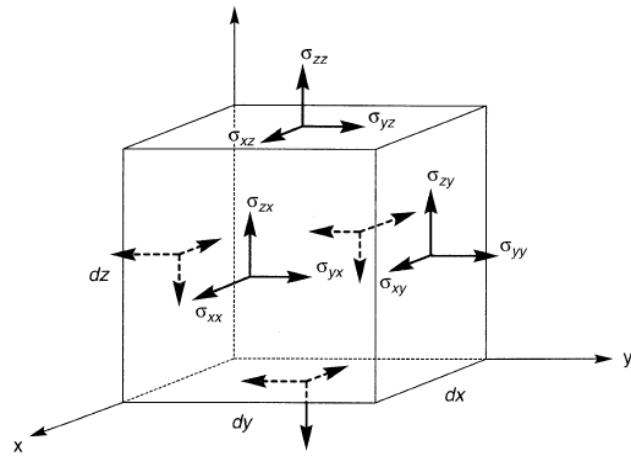


Figura 2.2.- Esfuerzos en un cubo infinitesimal (Kramer, 1996)



## CAPÍTULO 3: DISEÑO DEL CONSOLIDÓMETRO INSTRUMENTADO CON CRISTALES PIEZOELÉCTRICOS

### 3.1. Introducción

En la práctica, para evaluar las velocidades de propagación de ondas de corte y compresión en suelos durante las pruebas de consolidación se usaron cristales piezoeléctricos. Thomann y Hryciw (1990) presentaron un equipo de laboratorio similar a un edómetro, para investigar los efectos de carga y descarga sobre la velocidad de propagación de ondas de corte en condiciones de deformación lateral restringida, esta velocidad es determinada mediante elementos de flexión (elementos bender). El edómetro es de dimensiones considerables (cilindro de aluminio de 17.78 y 7.62 cm de diámetro y altura respectivamente, Figura 3.1.1). Lo Presti (1993) indica el uso de un consolidómetro instrumentado con elementos bender, para evaluar la influencia de la relación de vacíos ( $e$ ), y la historia de esfuerzos, en el módulo de rigidez estático y dinámico de arcillas reconstituidas. Fam y Santamarina (1995 y 1997) diseñan y construyen una celda de consolidación incorporando elementos Bender; su modelo indica un tamaño de base circular de 13.0 y 9.9 cm de diámetro y altura respectivamente (Figura 3.1.2). Shibuya (1997) presentó un consolidómetro equipado con elementos bender, este equipo fue desarrollado en la universidad de Hokkaido, el espécimen circular tiene una dimensión nominal de 6.0 y 2.0 cm de diámetro y altura respectivamente (Figura 3.1.3). Comina (2008) implementó un consolidómetro EIT, este modelo indica un tamaño de base de 13.0 cm de diámetro, con alturas de la muestra entre 2.0 a 6.0 cm; instrumentado con transductores cerámicos de ziconato de titanio en forma de barra (0.5 y 0.2 cm de largo y espesor respectivamente) y un disco (0.8 y 0.2 cm de diámetro y espesor respectivamente). Este modelo automatizado se ha convertido en un equipo de laboratorio moderno con dispositivos adecuados para medir las velocidades de ondas de corte y ondas compresión. Sin embargo, este equipo resulta ser muy costoso (Figura 3.1.4).

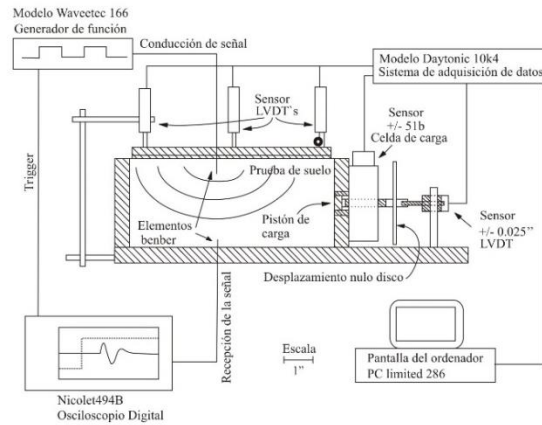


Figura 3.1.1.- Edómetro con elementos bender (Thomann y Hryciw, 1990)

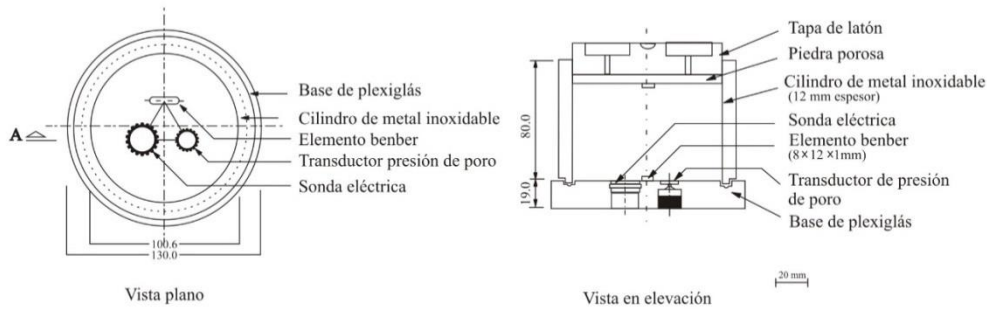


Figura. 3.1.2.- Celda de consolidómetro: (a) vista en planta, (b) vista en elevación (Fam y Santamarina, 1995).

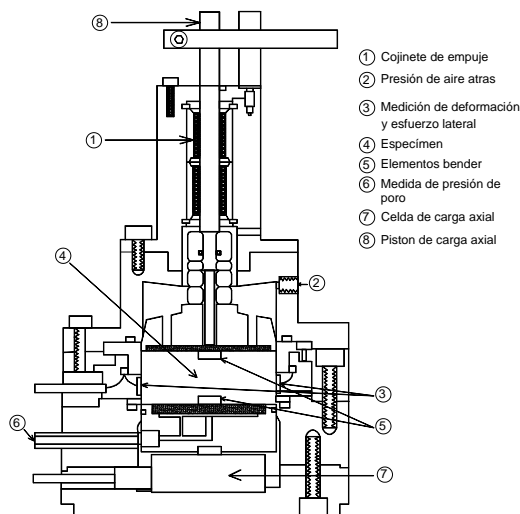
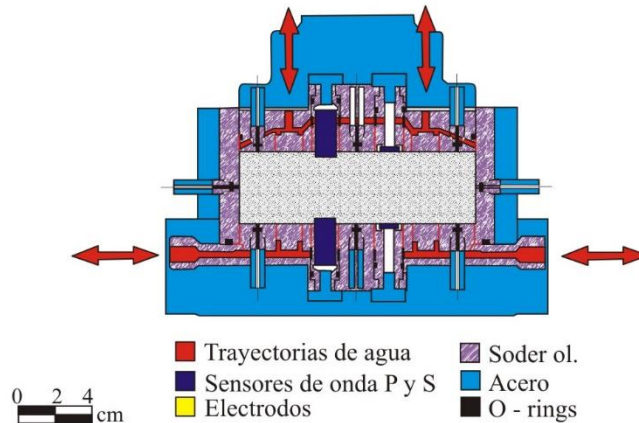


Figura. 3.1.3.- Celda de consolidómetro equipado con elementos bender (Shibuya, 1997)



**Figura. 3.1.4.-** Sección transversal de la celda de consolidómetro EIT

En el presente trabajo se implementó e instrumentó el equipo para evaluar las velocidades de ondas de corte y compresión en suelos arcillosos. A continuación se describirá los detalles de esta implementación.

### 3.2. Descripción y características del consolidómetro

#### Consolidómetro mecánico

La prueba de consolidación se emplea para determinar la relación aplicada a una muestra de suelo y su deformación, así como la relación entre dicha deformación y el tiempo que toma en desarrollarse.

El primer aparato de este tipo, fue construido por Terzaghi y fue llamado consolidómetro. La prueba consiste en aplicación de cargas a un espécimen del suelo confinado lateralmente, de tal manera que se deforme en una sola dirección. El aparato consta de un anillo rígido dentro del cual se coloca el espécimen del suelo, en ambas caras circulares se le coloca papel filtro y piedras porosas, que permiten la salida del agua de la muestra al ser comprimida. El conjunto se coloca dentro de un cilindro o cazuela, en el cual se puede poner agua si se desea mantener la muestra saturada.

En la presente investigación, dicha prueba se realiza mediante un consolidómetro mecánico de tipo flotante, manufacturado por el Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México (Figura 3.2.1), al cual se le modificó la

configuración típica de la prueba de consolidación, con el fin de preservar, en la medida posible, las condiciones de confinamiento de las muestras. A continuación se describen dichas modificaciones.



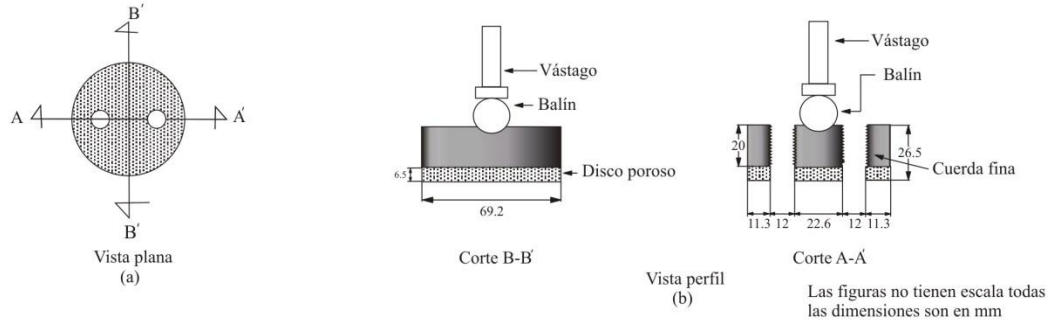
Figura 3.2.1.- Edómetro (consolidómetro unidimensional)

### **Cazoleta de ensayos y marco de carga.**

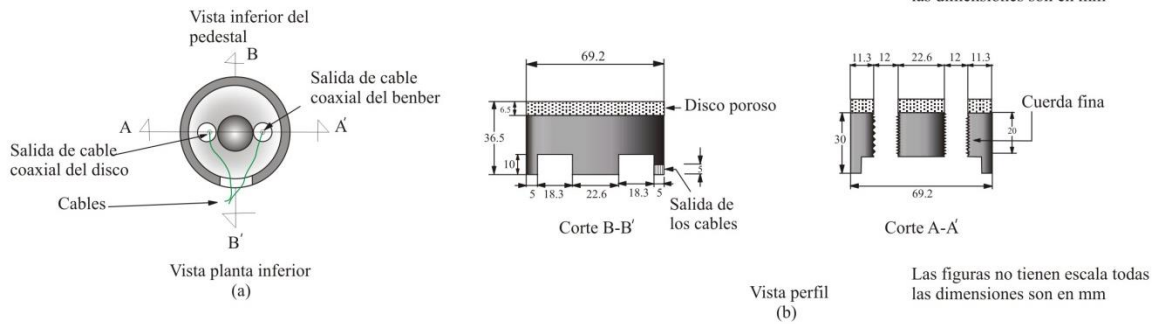
Para cumplir con los requerimientos referidos a la concepción de las dimensiones de las probetas a ensayar, se construyó una cazoleta de 102 y 128 mm de diámetro y altura respectivamente, para contener el espécimen de arcilla. Esta cazoleta se formó mediante el maquinado de un tubo acrílico para alcanzar las dimensiones deseadas. Finalmente, se construyó la base con una barra de aluminio de 102 y 15 mm diámetro y espesor respectivamente, la cual posteriormente se adhiere en uno de los extremos de la cazoleta.

También se diseñó y construyó un cabezal y pedestal de aluminio (Figuras 3.2.2 y 3.2.3), así como barras de acero inoxidable usadas entre las barras de carga. El procedimiento de diseño del pedestal y cabezal siguió el esquema de *Santamarina and Fam (1997)* para una celda de consolidación instrumentada con elementos Bender (Figuras 3.2.4 y 3.2.5). Debido a las dimensiones del espécimen de ensayo, se construyeron barras de 245 mm de longitud y de 12.7 mm de diámetro, como se muestra en la Figura 3.2.5. Adicionalmente, se diseñaron unas barras de acero

inoxidable de apoyo para el micrómetro de carátula, así como discos porosos y perfiles de acero para sujetar los cables coaxiales de la instrumentación (Figura 3.2.6).



**Figura 3.2.2.-** Esquema general del cabezal (a) Vista en planta y (b) vista de perfil



**Figura 3.2.3.-** Esquema general del pedestal (a) Vista en planta y (b) vista de perfil



**Figura 3.2.4.-** Cazoleta, cabezal y pedestal implementados para los ensayo

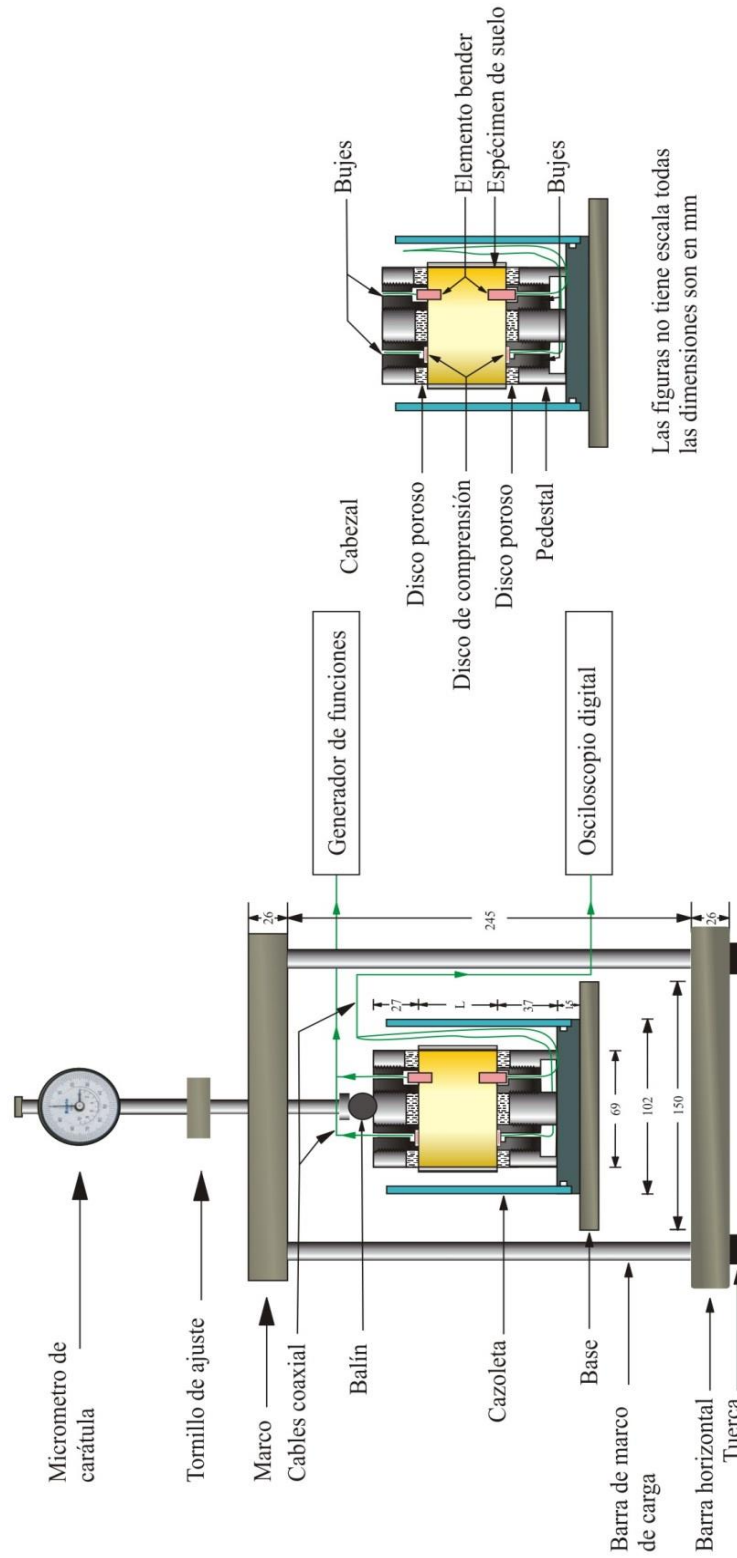


Figura 3.2.5.- Esquema general del arreglo implementado para los ensayos



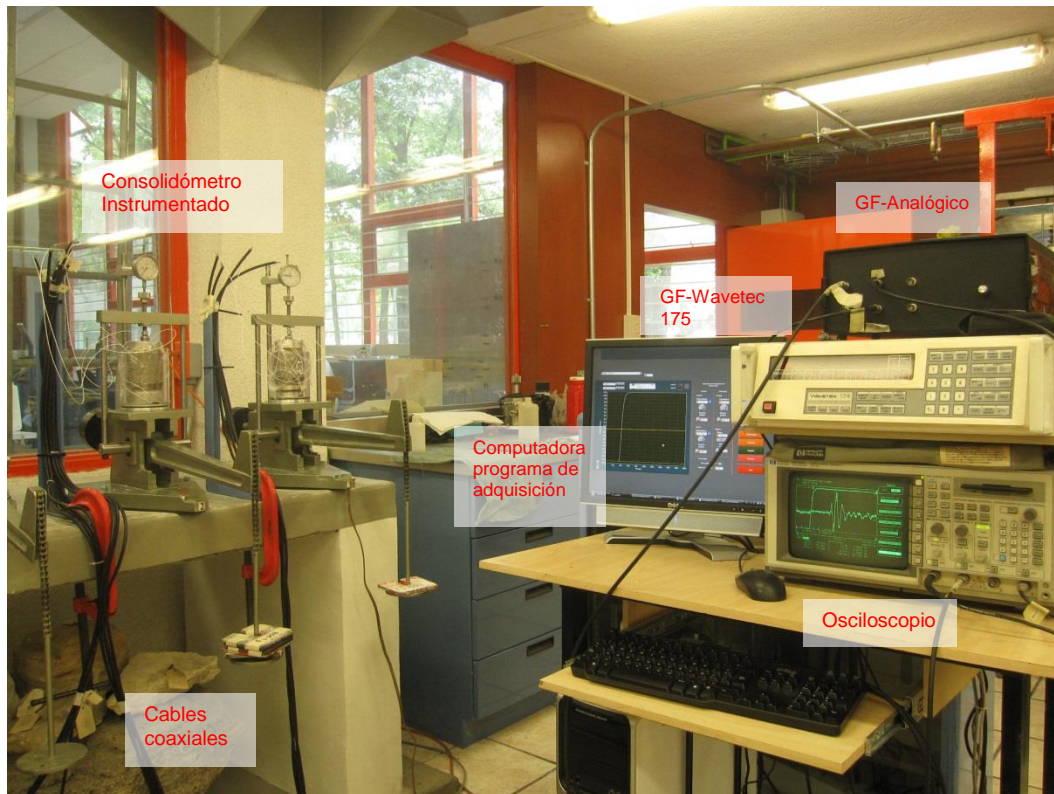


Figura 3.2.6.- Dispositivo de los equipos y dispositivos para realizar los ensayos de consolidación

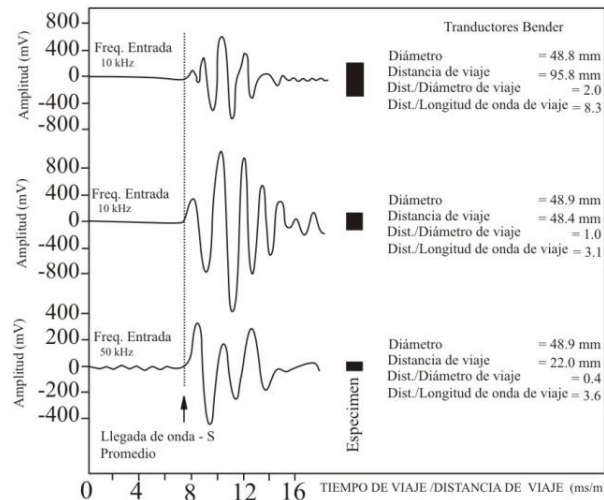
### Micrómetro de carátula y cronómetro

Los desplazamientos verticales que sufre la muestra bajo la aplicación de una carga se registran mediante un micrómetro de carátula tipo Shock proof con 20 mm de carrera y sensibilidad de  $100 \times 10^{-4} / \text{mm}$  (manufacturados por *Mitutoyo* del N°.2050-08). Por otro lado, el uso de un cronómetro permite relacionar las deformaciones registradas por los incrementos de esfuerzo con el tiempo que toman en desarrollarse.

### Probeta y equipo de ensayo

Diversos investigadores han estudiado la influencia de las dimensiones del espécimen durante la medición de las velocidades de propagación de ondas de corte y compresión en el laboratorio, a fin de que su propagación dentro de la masa de suelo no se vea influenciada por las fronteras del espécimen. Dichas investigaciones se han basado en la distancia de viaje de una onda para determinar las dimensiones adecuadas del espécimen.

Brignoli, *et al.* (1996) realizaron ensayos de laboratorio para la determinación de las velocidades de propagación de ondas de corte en especímenes de arcilla normalmente consolidada, con relaciones altura/diámetro de 2.0, 1.0 y 0.5. Cuando el pulso eléctrico se aplica al elemento bender incrustado en el suelo, la onda viaja a una distancia igual a la altura del espécimen; sin embargo, las ondas de compresión pueden llegar al mismo tiempo con amplitudes significativas para interferir con la llegada de la onda de corte y encontrar una incertidumbre en la determinación del tiempo y cálculo de la velocidad ondas de corte, las cuales son interrumpidas, afectadas y modificadas. En este sentido, Brignoli, *et al.* (1996) determinaron que en especímenes para pruebas triaxiales estándar sometidos a pulsos emitidos por cristales piezoeléctricos se pueden diferenciar de cinco a seis diferentes tipos de formas de ondas. Como resultado de la interferencia, el pico de la onda cortante se atenúa más rápido que la parte restante de la señal, que se incrementa con la relación altura/diámetro, y el tiempo de llegada de la onda permanece aproximadamente constante para un confinamiento determinado, después de la consolidación primaria (Figura 3.2.7).



**Figura 3.2.7.-** Comparación de la llegada de la onda de corte con especímenes de diferentes alturas para una arcilla blanda con un confinamiento isotrópico de 50 kPa (Brignoli et al., 1996).

En esta investigación, se adoptó una altura del espécimen 80 mm y un diámetro de 69 mm. A partir de estas dimensiones del espécimen se determinaron las dimensiones del consolidómetro mecánico que se implementó, las cuales fueron de 245 mm de alto y 102 mm de diámetro. Sin embargo, considerando que en futuro se



puede utilizar la estación experimental para otras investigaciones, se optó por instrumentar dos consolidómetros adicionales.

Con el fin de mantener las perturbaciones en el espécimen de suelo, se utilizó directamente el tubo Shelby de 69 mm de diámetro y recortado a longitud de 80 mm, como la probeta ensayada en el consolidómetro implementado, en la cual el tubo Shelby actúa como anillo confinante lateral. (Figura 3.2.8).



**Figura 3.2.8.** Probeta experimental de 80 mm de altura y 69 mm de diámetro, para un suelo marino

### 3.3. Características de los cristales piezoeléctricos

Para el experimento se usaron dos tipos de cristales piezoeléctricos, PSI-5H4E y PSI - 5A4E, manufacturados por Piezo System, Inc. Éstos consisten en materiales piezoeléctricos con placas de níquel en el exterior. La cerámica es polarizada en una dirección particular y cuando se aplica un voltaje a las placas de níquel, una de las capas se expande y la otra se contrae. Las propiedades índices de los cristales piezoeléctricos se muestran en la Tabla 3.3.1.

#### Cristales piezoeléctricos

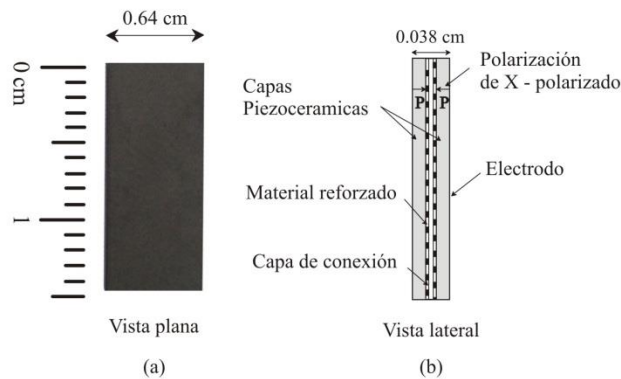
Un cristal piezoeléctrico esta hecho de un material de cerámicos de ziconato de titanio y tiene la forma típica de elemento flexión (elemento bender), o de disco de compresión. Se utiliza para medir la velocidad de propagación de ondas de corte ( $V_s$ ) y compresión ( $V_p$ ) por medio de la adherencia del cristal piezoeléctrico a la superficie de un espécimen de suelo. La onda que se propaga en el espécimen de suelo es generada

mediante una variación en el voltaje del cristal piezoeléctrico, ocasionando la flexión o compresión del elemento (dependiendo del tipo). Del mismo modo, esta onda se registra en el otro extremo del espécimen; también se registran las variaciones de voltaje del cristal piezoeléctrico. Cuando el cambio de voltaje es muy pequeño, se requiere un circuito en serie o paralelo para convertir el cambio de voltaje a una salida en pulso.

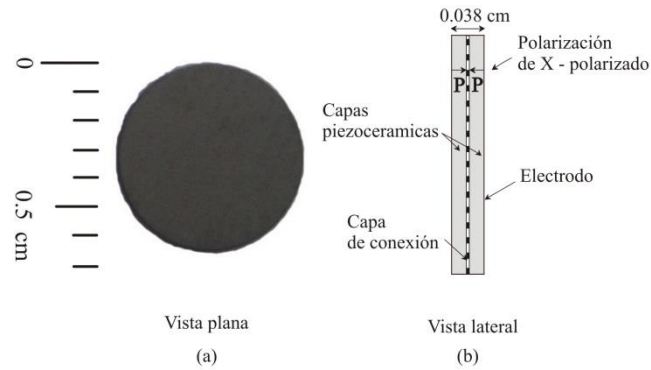
La dimensión de un cristal piezoeléctrico es una consideración importante y es el primer parámetro que se define en la instrumentación. En este experimento, el diámetro del espécimen de suelo dictaminó el tipo de cristal piezoeléctrico a usar; se usaron cristales piezoeléctrico del tipo PSI - 5H4E y PSI - 5A4E, manufacturados por Piezo System, Inc. Las principales características de estos dispositivos se muestran en la Tabla 3.3.1 y en las Figuras 3.3.1 y 3.3.2.

**Tabla 3.3.1.-** Características principales de los cristales piezoeléctricos del tipo PSI - 5H4E y PSI - 5A4E (Piezo System, Inc.).

Descripción	T215-H4CL-203X	T216-A4N0-173X
Nombre	Elemento Bender	Disco de compresión
Tipo	PSI-5H4E	PSI-5A4E
Manufactura	Piezo System, Inc.	Piezo System, Inc.
Largo (mm)	31.75	-
Ancho (mm)	6.4	-
Espesor (mm)	0.38	0.38
Diámetro (mm)	-	6.4
Número de capas	2	2
Capacitancia (nF)	17	1.1



**Figura. 3.3.1.-** Elemento Bender usado. (a) Vista en planta y (b) vista lateral



**Figura. 3.3.2.-** Disco de compresión usado. a) Vista planta y (b) vista lateral

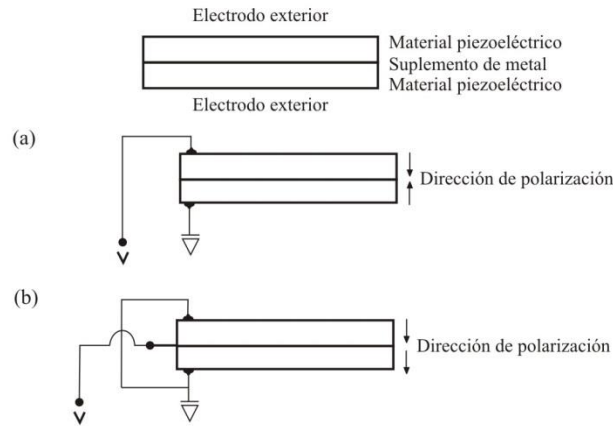
### Características de instrumentación de los cristales piezoeléctricos usados en el estudio

Lee y Santamarina (2004) indican que existen dos tipos de instrumentación en elementos Bender: paralelo y serie. El tipo serie tiene la polarización contraria, el cable de tierra está conectado a un extremo de los electrodos exteriores y el núcleo al otro extremo (Figura 3.3.3a). El tipo paralelo tiene la misma dirección de polarización, el cable del núcleo está conectado en la parte intermedia (cuña de aislante) y el cable de tierra, a los extremos (Figura 3.3.3b).

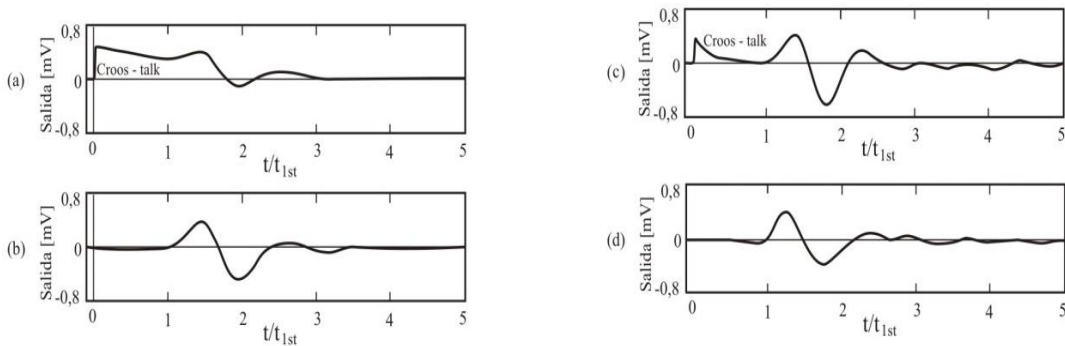
Las mediciones realizadas con ambos tipos de instrumentación pueden dar lugar a la aparición de acoplamiento electromagnético entre la fuente y el receptor de los elementos Bender. Esta interferencia, llamada *Cross-Talk* (nombre del investigador), indica ser muy importante en suelos conductores, tales como las arcillas saturadas y en suelos marinos. Por ello, Lee y Santamarina (2004) realizaron un estudio experimental para observar la interferencia cruzada (*Cross-Talk*) en elementos Bender conectados en serie y en paralelo. Se utilizaron elementos Bender con 12.7x8.0x0.6 (largo x ancho x espesor en milímetros), protegidos por una pintura conductiva y una capa delgada de resina a prueba de agua. En la Figura 3.3.4a se observa la interferencia cruzada en el tipo serie sin conexión a tierra. La interferencia *Crosstalk* se puede remover con eficacia mediante la conexión a tierra. En la Figura 3.3.4b se observa que la interferencia cruzada desaparece en el tipo serie y con conexión a tierra. En la Figura 3.3.4c se observa la interferencia cruzada en el tipo paralelo – serie, con conexión a tierra. Por

último, en la Figura 3.3.4d se observa que la interferencia cruzada desaparece con tipo paralelo-paralelo con protección.

En esta investigación los elementos bender y disco fueron instrumentados en serie tanto para la fuente, como para el receptor (Figura 3.3.3a).



**Figura 3.3.3.-** Elementos Bender: (a) tipo serie, y (b) tipo paralelo (Lee y Santamarina, 2004)



**Figura 3.3.4.-** Efectos de interferencia (Crosstalk): (a) tipo serie a serie sin conexión a tierra; (b) tipo serie a serie con recubrimiento y conexión a tierra; (c) paralelo a serie con recubrimiento y conexión a tierra; y (d) paralelo a paralelo con recubrimiento. El tiempo "T<sub>1st</sub>" corresponde a la primera llegada de la onda corte (ingreso de la señal pico a pico de longitud: L=100 mm). (Lee y Santamarina, 2004).

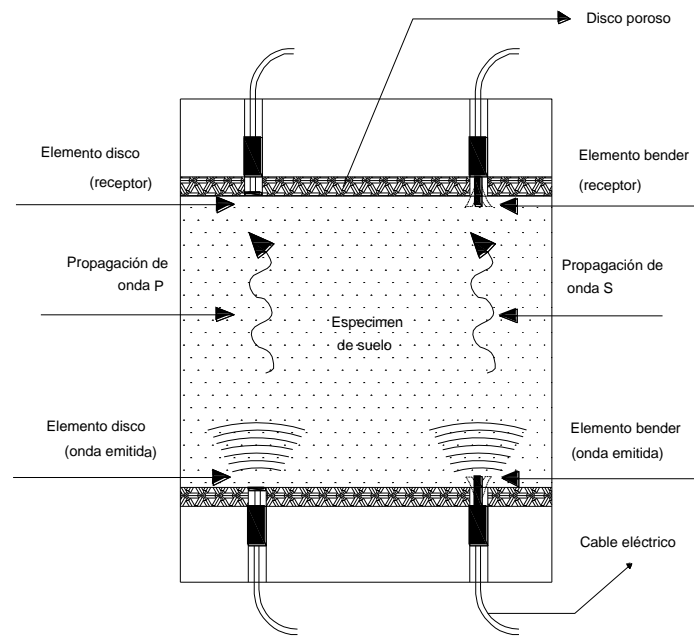
### 3.4. Equipo complementario para la medición de las velocidades de onda

#### Elemento emisor y receptor

Para la medición de velocidades de propagación de ondas de corte y ondas de compresión, se utiliza un par de elementos de flexión (elemento bender) y compresión. Uno de estos elementos actúa como un transmisor de ondas y el otro como un receptor

de ondas. El mecanismo de generación de la onda en la masa de suelo para el elemento bender es de flexión y para el elemento de compresión es de contracción. Se muestra en la Figura 3.4.1 un diagrama esquemático de los elementos de flexión y compresión para la prueba.

Cuando se utiliza un par de elementos bender y elementos discos es necesario elegir la dirección para cada par de elementos durante la prueba. Estos elementos montados en los extremos de la muestra como se muestra (Figura 3.4.1), permiten definir la transmisión de las ondas con una cierta polarización y trayectoria de viaje.



**Figura 3.4.1.-** Propagación de las ondas S y P emitido por un elemento bender y elemento de compresión.

### Generador de funciones

Parra. G (2008) diseñó un generador de funciones. El modelo es un prototipo GFAT.asm fabricado por el Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México (Figura 3.4.2); es un generador analógico complementado con un sistema digital diseñado para medir una amplitud máxima de 200 Volts, una frecuencia máxima de hasta 300 kHz, fase y número de ciclos de la señal proporcionada por el generador. Este equipo permite modificar los parámetros de la onda generada y programarlo para tareas específicas.

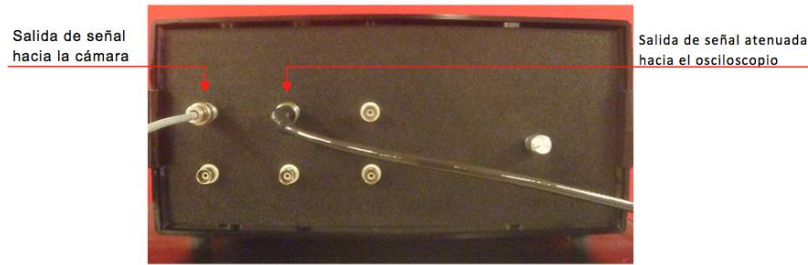


Figura 3.4.2.- Generador de funciones

### Generador de funciones Wavetec 175

El generador de funciones Wavetec 175, fabricado por General-Purpose Instrumentation Bus (GP-IB), es un generador digital complementario al generador analógico, para producir cualquier forma de onda expresada en función del tiempo. Este equipo permite generar una onda cuadrada con ciertas consideraciones de frecuencia y amplitud.

### Adquisidor de Datos HP54540A

El modelo HP54540A, fabricado por Hewlett – Packard USA, es un osciloscopio digital portátil de adquisición de datos diseñado para la medición electrónica, el cual en una gráfica de señales eléctricas representa en el eje de las abscisas las fracciones del tiempo (segundos, milisegundos, microsegundos, nanosegundos, etc.) y en el eje de las ordenadas la tensión de entrada (voltios, milivoltios, microvoltios, etcétera). Este equipo incorpora automáticamente la medición y la transfiere a la computadora. El modelo HP54540A mide hasta 4 canales simultáneamente; tiene un ancho de banda de 500 Mhz y una sensibilidad de 1mV/div a 5mv/div (Figura 3.4.3).

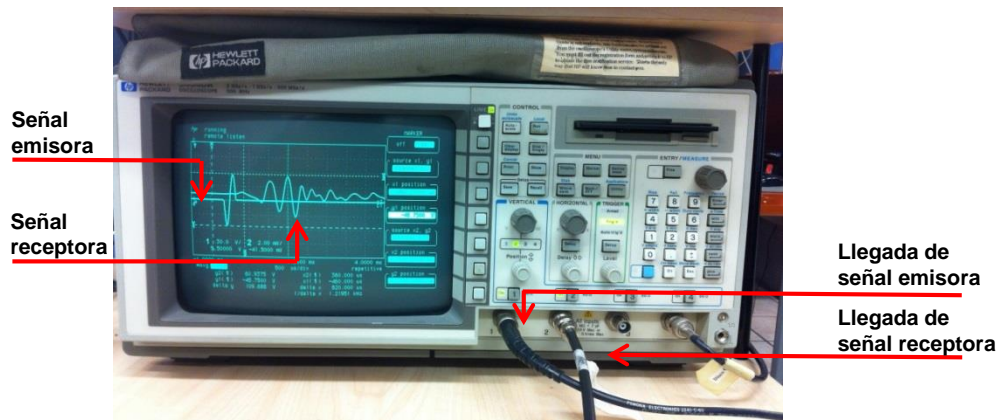


Figura 3.4.3.- Osciloscopio modelo HP54540A

## Programa de medición de ondas

El programa que controla el sistema de generación y medición de ondas (Figura 3.4.4), ya sea de las señales de fuente y recepción se encuentra en un lenguaje de programación de Labview 8.5. Este lenguaje de programación fue diseñado por el Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México.

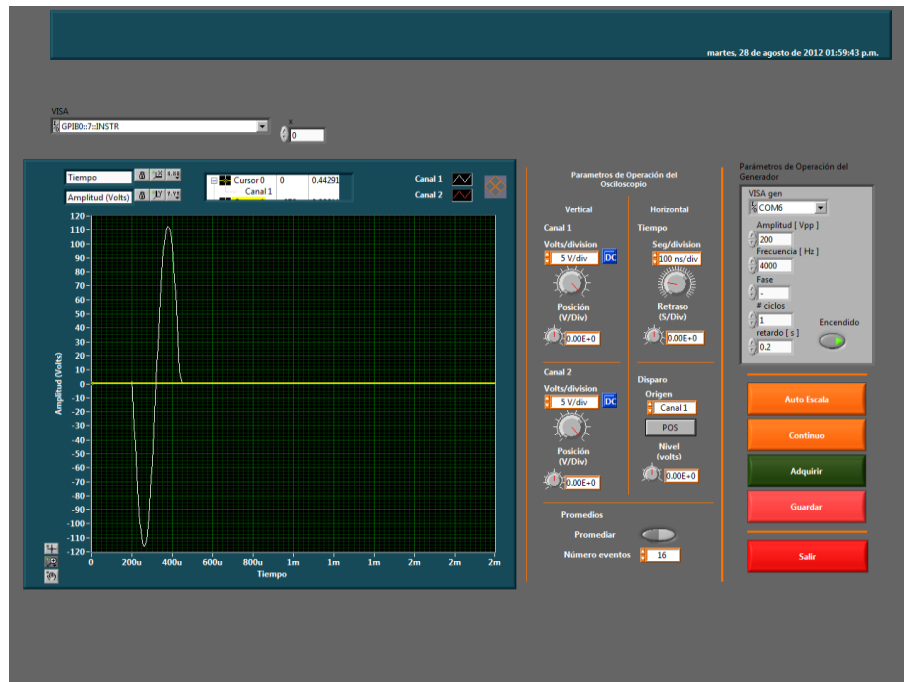


Figura 3.4.4.- Visualizador de los resultados en la etapa de ensayo

### 3.5 Consideraciones adicionales para la instrumentación

#### Adherencia de los cristales piezoeléctricos en el cabezal y pedestal del consolidómetro

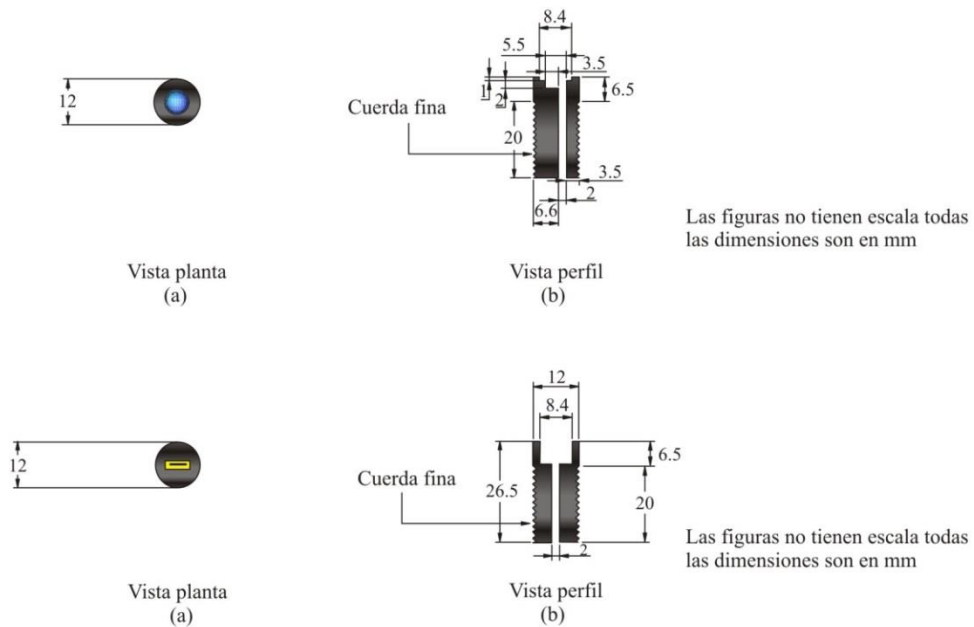
En general, el procedimiento de adherencia consiste en la preparación de la superficie del buje de nylamid, en la aplicación de un epóxico para la adherencia del elemento bender o disco, y en la aplicación de una capa de protección. Se siguió la recomendación del manual de operación de adhesivos para cristales piezoeléctricos, el cual consiste en modificar la superficie lisa del buje a una superficie rugosa, usando un papel lija, a fin de obtener una mayor ligazón con el adhesivo. La superficie se limpió



cuidadosamente con acetona para eliminar cualquier residuo contaminante como grasa, polvo, etcétera.

Los elementos bender o disco fueron adheridos en sus respectivos bujes, y colocados a una distancia del centro del cabezal y pedestal guardando simetría respecto al diámetro del cabezal (Figuras 3.2.2 y 3.2.3). Se usó un adhesivo de tipo TJAR (acción rápida) para propósitos generales (manufacturado por TOP Technology). Para la adherencia de los elementos bender y disco sobre materiales de nylamid de color negro como polímero (SL), no es necesario un agente de tratamiento de la superficie. Una vez terminada la preparación de la superficie, se aplicó la cantidad necesaria de adhesivo en la parte superior del buje y se ubicó el elemento bender o disco aplicando una presión uniforme con los dedos, teniendo cuidado de lograr un correcto centrado para evitar la transmisión de señales incorrectas debido a la direccionalidad del pulso y obtener primeras señales de llegada (Lee Santamarina, 2004).

Este trabajo se realizó de forma rápida debido a que el curado del adhesivo TJAR es casi inmediato (4 a 6 min.), de acuerdo a las especificaciones de la hoja de datos del adhesivo TJAR (Figura 3.5.1).

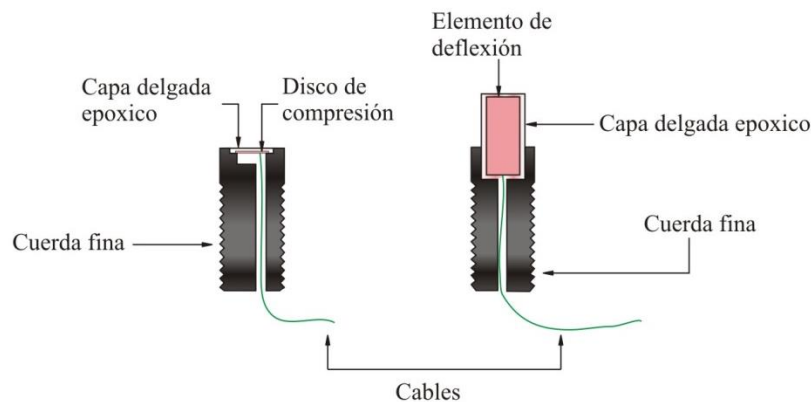


**Figura 3.5.1.** Esquema general de la implementación: conexión bujes al cabezal y pedestal para la probeta modelo.



### Protección de los cristales piezoeléctricos en condiciones de humedad

Los elementos bender y disco deben estar enterrados dentro de una masa de suelo y deben ser protegidos contra las condiciones de humedad. Para lograrlo se aplicó una resina ultravioleta FOTOPLAST S CIC (manufacturado por Dreve Otoplastik GMBH) como primera capa de protección contra las condiciones de humedad del suelo de arcilla. Esta resina resulta adecuada para los propósitos de protección de los cristales piezoeléctricos (Figura 3.5.2).



**Figura 3.5.2.** Elemento Bender y Disco adherido a los bujes de nylamid, orientado perpendicularmente a la base.

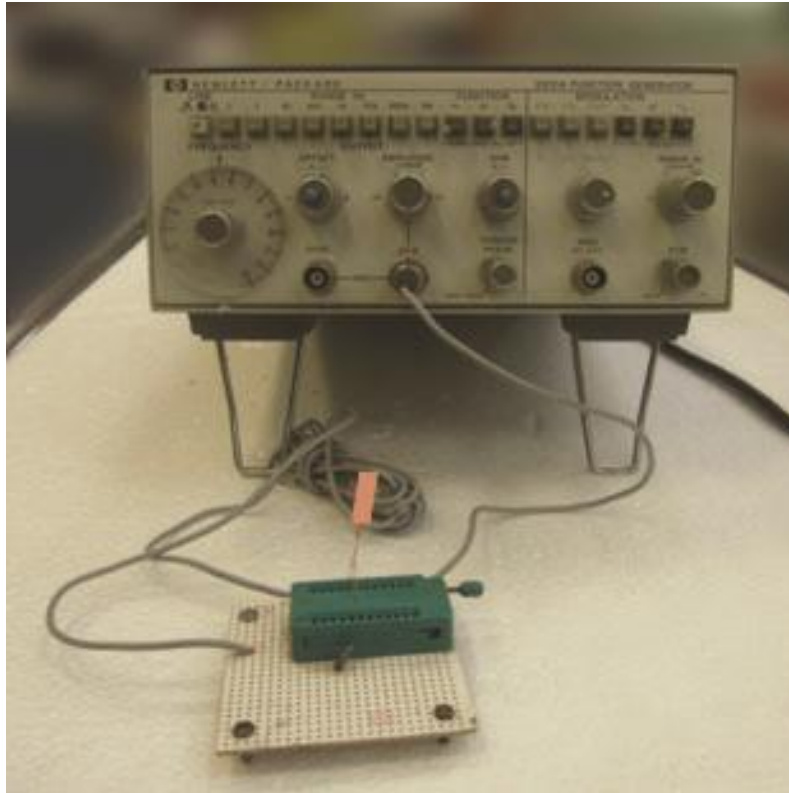
### Verificación del funcionamiento de los cristales piezoeléctricos en el laboratorio antes de ser colocados en el suelo

Para realizar los ensayos del pulso eléctrico de los cristales piezoeléctricos se implementó un aparato en el Laboratorio de Mecánica de Suelos del Instituto de Ingeniería (Figuras 3.5.3 y 3.5.4).

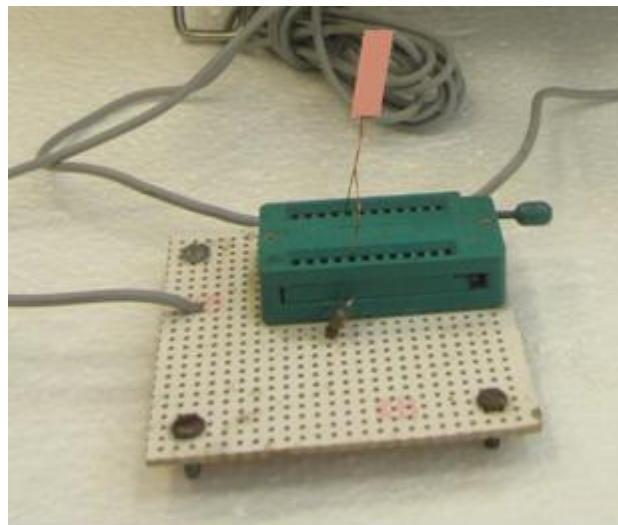
El aparato implementado, que se conecta al generador de funciones (HEWLET PACKARD - 3312 A), consta de un adaptador con un conector BNC, los cuales sujetan fuertemente la salida de conexión del cristal piezoeléctrico. Uno de los extremos está conectado a un polo positivo, mientras que el otro extremo está conectado al negativo.

Para prevenir el indebido contacto entre las salidas de conexión del cristal piezoeléctrico y el adaptador durante el experimento, el cristal piezoeléctrico se sujetó

fuerte a las salidas de conexión mediante unas placas de presión; con este arreglo se descartó cualquier contacto indebido (Figura 3.5.4).



**Figura 3.5.3.-** Aparato de conexión BNC implementado en el Laboratorio de Mecánica de Suelos del Instituto de Ingeniería.



**Figura 3.5.4.-** Vista de la disposición del elemento bender conectado en el adaptador

## CAPÍTULO 4: MATERIALES ESTUDIADOS Y PROCEDIMIENTO DE ENSAYE

### 4.1. Introducción

Con el fin de cumplir con los objetivos planteados para la presente investigación, se realizó un programa experimental de pruebas de consolidación en el laboratorio de mecánica de suelos del Instituto de Ingeniería de la UNAM. Dicho programa consistió en realizar ensayos de consolidación en un consolidómetro instrumentado con cristales piezoeléctricos descrito en el capítulo 3.

Los ensayos de consolidación se realizaron en muestras inalteradas extraídas en dos sitios: (1) suelo marino proveniente de la zona de Campeche, Golfo de México y (2) suelo de la Ciudad de México proveniente del Lago Texcoco. Las muestras del primer sitio fueron proporcionados por PEMEX y el Instituto de Ingeniería por un convenio entre ellos para realizar un proyecto de “Pruebas Geotécnicas de Laboratorio Estáticas y Dinámicas” el cual se aboca al estudio y caracterización de suelos marinos y las muestras del segundo sitio fueron proporcionados por el Instituto de Ingeniería.

A las muestras a ensayar se les determinaron sus propiedades índices que permiten clasificar al suelo y dan una idea aproximada de sus propiedades mecánicas, especialmente en suelos finos, donde el contenido de agua y los límites de plasticidad constituyen un buen índice de la consistencia del suelo. Además, se estimó su peso volumétrico y el grado de saturación inicial. Los ensayos fueron realizados de acuerdo a las normas de la *American Society for Testing and Material* (ASTM) y fueron los siguientes:

- Ensayo de límite líquido y límite plástico : ASTM D-4318
- Ensayo de contenido de agua : ASTM D4959-94
- Ensayo de densidad de fase sólida : ASTM D-854
- Peso volumétrico : ASTM D-4254

Finalmente se describe el procedimiento del ensayo para las muestras ensayadas. A continuación se describirá brevemente las características geotécnicas de cada lugar.

#### 4.2. Suelo marino

Las muestras recuperadas fueron de la exploración realizada en aguas profundas localizadas aproximadamente a 60 km al noreste de Alvarado, Veracruz en el Golfo de México, como se muestra en la Figura 4.2.1. Estas muestras recuperadas fueron de cinco sondeos (AP-13, AP-14, AP-15, AP-17) a profundidades de exploración de 100.6 m para AP-13, AP-14, AP-15 y AP-17 y 101.7 m para AP-16. En cada sondeo se obtuvieron 24 tubos tipo SALV (Figura 4.2.2).

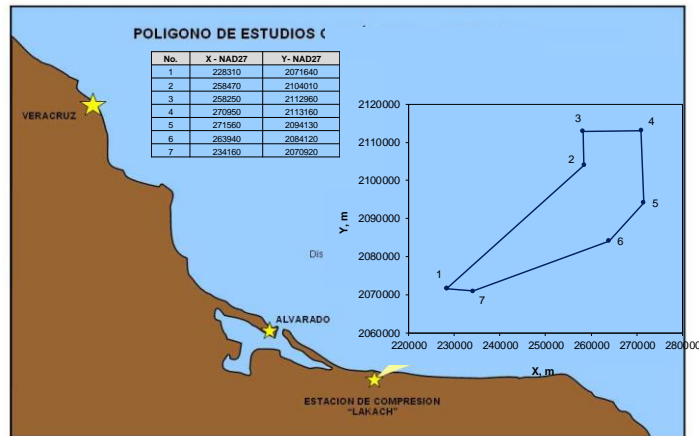


Figura 4.2.1.- Polígono de estudio, "Golfo de México"



Figura 4.2.2.- Muestras recuperadas de sondeos AP-13 a AP-17

### Características y propiedades

Cada una de las muestras seleccionadas se clasificó visualmente de acuerdo a la norma ASTM D2487. Las muestras fueron clasificadas como CH- Arcillas de alta plasticidad. Los tirantes de agua de los sondeos realizados para esta investigación son: para el AP-15 de 925.2 m y para el AP-17 de 1,088 m. Se tomaron tres muestras para realizar la investigación, dos de las muestras fueron del sondeo AP-15 y una del sondeo AP-17. Se determinaron sus propiedades índice, como su contenido de agua ( $w\%$ ), los límites de Atterberg (límites líquido,  $w_L$ , y plástico,  $w_P$ ) y se calculó el índice de plasticidad, IP definido como la diferencia entre el límite líquido y el plástico, la relación de vacíos, la densidad de sólidos y los pesos volumétricos. En la Tabla 4.2.1 se presentan los resultados de las propiedades índices de las tres muestras seleccionadas a diferentes profundidades.

**Tabla 4.2.1.-** Resumen de los resultados de las propiedades índice de las muestras ensayadas para suelo marino, (Golfo de México, ubicación: aproximadamente a 60 km al noreste de Alvarado, Veracruz).

Sondeo	Muestra	Profundidad Bajo el mar	$G_w$	$w$	$w_L$	$w_P$	PI	$\gamma$	$S_s$
	No.	m	%	%	%	%	%	$kN/m^3$	
AP-15	51	17.07-17.59	97	65.8	78.09	28.74	49.35	1.69	2.77
	71	25.51	76.2	64.2	80.04	31.18	48.86	1.59	2.76
AP-17	65	22.46	84.5	52.9	71.93	26.85	45.08	1.66	2.77

### 4.3. Arcilla de la Ciudad de México

Las muestras recuperadas para esta investigación se ubican en el Valle de México, como se muestra en la Figura 4.3.1. Estas muestras de suelo pertenecen al sitio 2 (viveros), cerca de la esquina nororiente del Lago Nabor Carrillo, a 300 m de la carretera México-Texcoco. De las muestras recuperadas se seleccionaron tres muestras de suelo a diferentes profundidades.

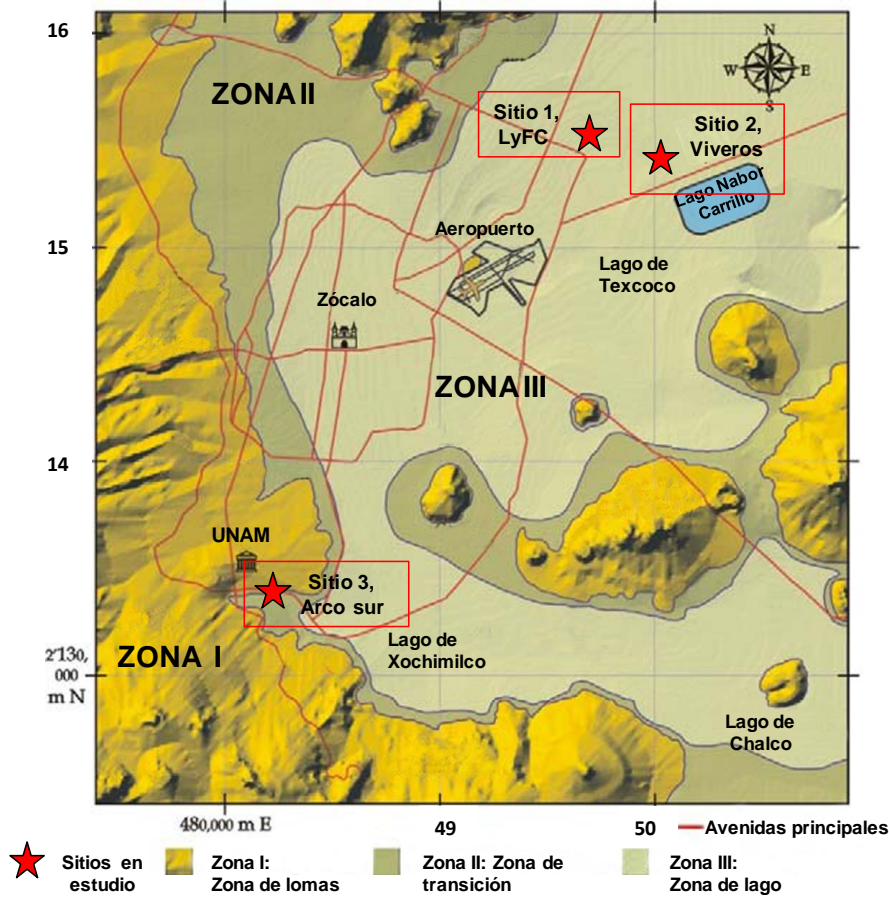


Figura 4.3.1.- Ubicación de las muestras ensayadas en el Valle de México, (Flores *et al.*, 2009)

### Características y propiedades

El sitio 2 presenta una costra de desecación de espesores variables que van desde 0.5 a 2.0 m. Subyace a esta costra la Formación Arcillosa Superior (FAS) que llega hasta 35 m de profundidad en promedio, y que está constituida por estratos arcillosos lacustres muy blandos y compresibles, cuya clasificación predominante de acuerdo con el SUCS es CH (arcilla de alta plasticidad). En la FAS se llegan a alcanzar contenidos de agua cercanos a 300%. Los estratos arcillosos están constituidos por arcilla compresible de consistencia muy blanda a blanda, que se encuentran intercalados con delgadas capas de vidrio volcánico y de arena fina (Flores *et al.*, 2013). Finalmente, de acuerdo a la Zonificación Geotécnica establecida en las Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Cimentaciones del Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal (NTC-RCDF), corresponde

a la Zona III (zona de lago). Para este estudio se tomaron tres muestras y se determinó sus propiedades índice, como su contenido de agua ( $w\%$ ), los límites de Atterberg (límites líquido,  $w_L$ , y plástico,  $w_P$ ) y se calculó el índice de plasticidad, IP definido como la diferencia entre el límite líquido y el plástico, la relación de vacíos, densidad de sólidos y los pesos volumétricos. En la Tabla 4.3.2 se presenta un resumen de los resultados de las propiedades índices de las tres muestras seleccionadas a diferentes profundidades.

**Tabla 4.3.2.-** Resumen de los resultados de las propiedades índice de las muestras ensayadas en el sitio 2, (Lago de Texcoco, ubicación: cerca de la esquina nororiente del Lago Nabor Carrillo, a 300 m de la carretera México-Texcoco).

Sondeo	Muestra	Profundidad	$G_w$	$w$	$w_L$	$w_P$	PI	$\gamma$	$S_s$
	No.	$m$	%	%	%	%	%	$kN/m^3$	
M – 10	S1	14.8 – 15.0	79.9	248.4	332.8	72.2	260.6	1.18	3.00
M – 14	S1	18.8 – 19.0	59.4	182.9	210.0	76.22	133.8	1.27	2.91
M – 15	S3	19.4 – 19.6	93.5	280.2	332.3	85.2	247.11	1.19	2.98

#### 4.4. Procedimiento de ensaye

En seguida se describe el proceso de preparar los especímenes de suelo y el montaje de ellos, así como, el proceso de los ensayos, el cual se divide de la siguiente manera:

##### Preparación de la muestra y generación del espécimen

Para obtener el espécimen de suelo para los ensayos se siguieron dos procedimientos diferentes por el tipo de muestreador, como se explica a continuación:

Las muestras de suelo marino inalteradas se encuentran en tubos niquelados del tipo Shelby de pared delgada con un diámetro exterior de 76.2 mm y un diámetro interior de 71.9 mm, el cual se utilizara como anillo confinante lateral (Figura 4.4.1a). En el capítulo tres se detallaron las consideraciones para definir las dimensiones que se requiere del espécimen. Se encontró que las dimensiones necesarias del espécimen debían ser de 80 mm y 71.9 mm de altura y diámetro respectivamente.

Para la formación de la probeta se seguirán los siguientes pasos:

- a) Primero, se realizan unas marcas al tubo muestreador de 30 cm en donde se va cortar con las medidas de altura descritas anteriormente. Después, este tubo se coloca en una base de acero, a continuación se fija el tubo ajustando con una faja alrededor del tubo para garantizar su estabilidad, se procede a cortar el tubo (Figura 4.4.2a).
- b) Posteriormente se retira el residuo del metal adherido producto del corte en la parte superior e inferior del espécimen y así mismo el material contaminado por las partículas de metal.
- c) Finalmente, se pesa el suelo húmedo con el anillo, se miden las dimensiones del espécimen y se toman testigos para determinar el contenido de agua (Figura 4.4.2.b).

Las muestras inalteradas del sitio 2 del Valle de México se encuentran también en un tubo muestreador TGC. El tubo TGC del tipo Shellby, se divide en 5 secciones de 20 centímetros (Figura 4.4.1b).

Para la formación de la probeta se seguirán los siguientes pasos:

- a) Se procede a labrar la muestra colocándola sobre una plataforma giratoria, teniendo cuidado de mantener la misma dirección que tenía "in situ". Se retira el material del perímetro del espécimen utilizando una cuchilla al ir girando la plataforma aplicando un mínimo de fuerza y de forma uniforme, con el objeto de reducir el área y así poder insertar el añillo (diseñado para el ensayo), previamente pesado el anillo, hasta que parte del material salga del anillo; parte que será removida al enrasar la capa superior.
- b) Finalmente, se pesa el suelo húmedo con el anillo, se toman las dimensiones del espécimen y se toman testigos para determinar el contenido de agua.



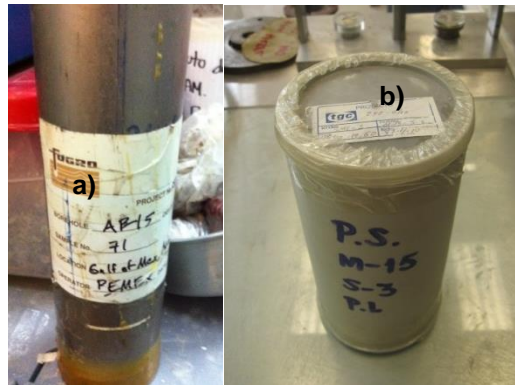


Figura 4.4.1.- Muestras inalteradas para la investigación. a) Suelo marino y b) suelo Ciudad de México

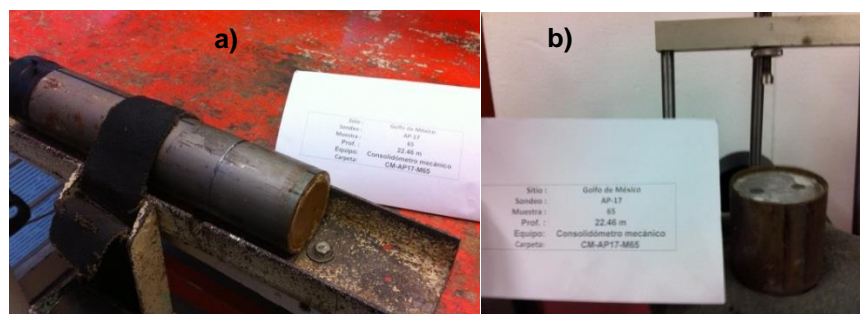


Figura 4.4.2.- Proceso de obtener el espécimen de suelo. a) Corte del espécimen de suelo y b) espécimen de suelo para el ensayo.

### Montaje de las muestras

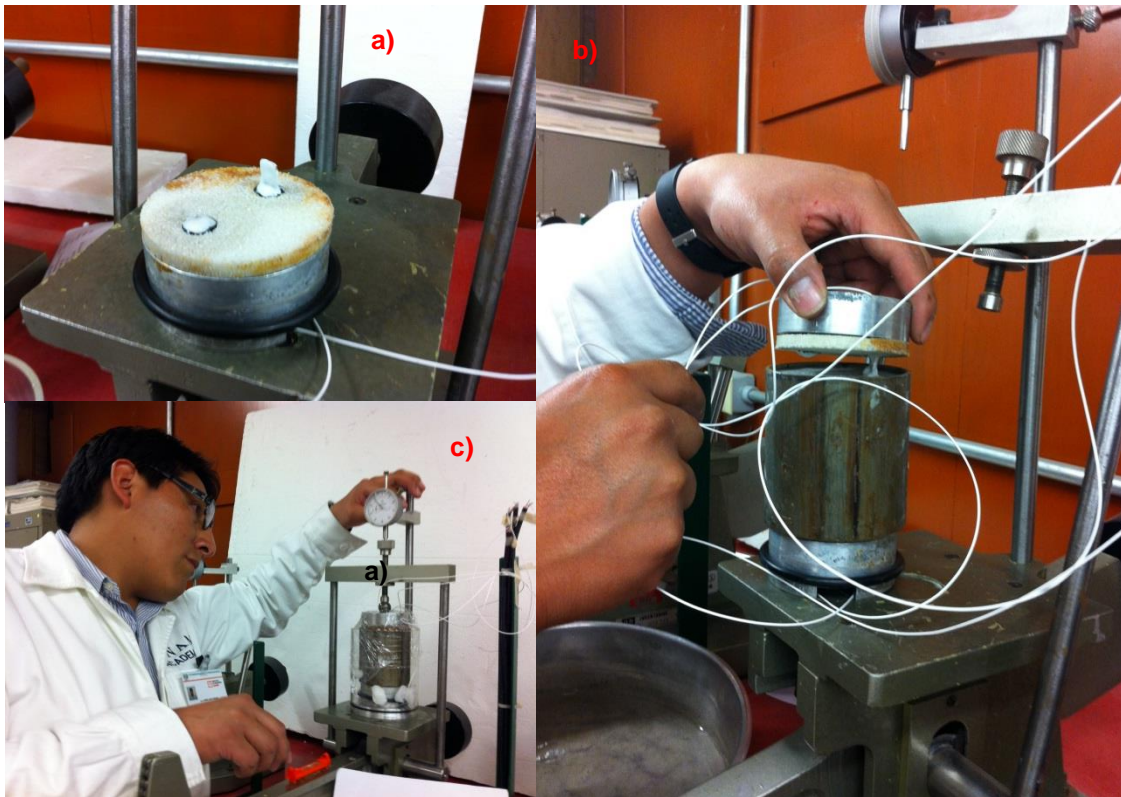
Después de formada la muestra para ambos suelos arcillosos se procede a realizar el montaje como se describe a continuación:

- a) Se coloca sobre la cara inferior de la muestra un papel filtro y en la parte superior e inferior de la probeta se realiza el ranurado de 1, 0.5 y 0.3 cm de largo, ancho y espesor respectivamente (Figura 4.4.3a). Para colocar el elemento de flexión ubicado en el pedestal y encima el disco poroso, ambos elementos deberán quedar centrados para evitar fricción de éstos con el anillo. Es importante recordar que los discos porosos y el papel filtro deben de estar previamente saturados, con el objeto de que no absorban parte de la humedad de la muestra. Se voltea la muestra y se repite el proceso descrito anteriormente sobre la cara superior. El propósito de las piedras porosas es la de permitir el flujo de agua del interior de la muestra hacia fuera y la del papel filtro es el de impedir incrustaciones de la muestra en las piedras.

- b) Posteriormente, se coloca en la parte ranurada una mezcla de agua con bentonita para garantizar el contacto entre los cristales piezoeléctricos y el suelo (Figuras 4.4.3b y 4.4.4a), con ello ya se puede colocar el pedestal. Se voltea la muestra y se repite el proceso descrito anteriormente sobre la cara superior (Figura 4.4.4b).
- c) El conjunto es colocado en la base de la cazuela del consolidómetro junto con la placa metálica, utilizada para distribuir la carga y evitar cualquier movimiento entre las partes.
- d) Se coloca dentro de la cazuela algodón húmedo y se cubre con una membrana de plástico adherible.
- e) Se instala el conjunto sobre el consolidómetro con un balín en la concavidad de la placa metálica para conectarla con el pistón que esta conectada con el marco de carga.
- f) La cazuela es centrada en la base del consolidómetro y se coloca el marco de carga nivelándolo en las dos direcciones con unos niveles de mano.
- g) Se coloca el micrómetro de modo que tenga contacto con el marco, tratando de evitar cargas excéntricas (Figura 4.4.4c). Por último, se revisa la conexión de los cristales piezoeléctricos con los cables coaxiales.



**Figura 4.4.3.-** Montaje de la muestra. a) Realizando el ranurado y b) colocando la mezcla de agua con bentonita.



**Figura 4.4.4.-** Montaje de la muestra. a) Colocando mezcla de agua con bentonita en los cristales piezoeléctricos, b) colocando el cabezal a la muestra de suelo y c) nivelando en ambas direcciones.

### Proceso del ensayo

Para realizar los ensayos en el consolidómetro instrumentado con cristales piezoeléctricos se definen las siguientes etapas:

- a) Se toma la lectura inicial del micrómetro de caratula y se coloca la primera carga en el portapesas (evitando impactos), al mismo tiempo que se pone en marcha el cronómetro, tomándose lecturas en los primeros 5, 10, 15 30 segundos y a 1, 2, 4, 8, 15 y 30 minutos y después cada dos horas. La duración de cada incremento será hasta que se presente la consolidación secundaria por lo menos, en caso de no presentarse, la duración será de 24 horas como mínimo.
- b) Posteriormente se coloca la siguiente carga repitiendo el paso anterior, así hasta completar el ciclo de carga. Una vez completado el ciclo de carga, se lleva a cabo la descarga, en el cual se anota la lectura del micrómetro, y al

mismo tiempo que se pone en marcha el cronómetro se van retirando de una en una las cargas que se colocaron, cada movimiento se realiza hasta que la deformación por recuperación sea casi nula.

- c) Antes de hacer un incremento del esfuerzo efectivo, una vez definida la curva de consolidación primaria, se adquieren los tiempos de llegada de las ondas para el elemento emisor y receptor al propagar una onda sísmica en la muestra de suelo excitando los cristales con un generador de funciones para aplicar una señal con amplitud de 100 Volts y a un rango de frecuencias de 1 a 7 kHz y de 10 a 100 kHz para las ondas de corte y compresión respectivamente. Una vez que se excita al cristal fuente con la señal amplificada, el cristal receptor ubicado en el otro extremo de la muestra de suelo, registra la señal de arribo, y se calcula  $\Delta t$ . De manera simultánea, las señales emisora y receptoras se visualizan en tiempo real en un osciloscopio. Posteriormente, se observa digitalizado en un programa en lenguaje Labview desarrollado en el Instituto de Ingeniería, como se explicó detalladamente en el capítulo 3. Se repite el mismo procedimiento para cada incremento de consolidación, hasta obtener la curva de compresibilidad en su tramo virgen.

## **CAPÍTULO 5: PROCESAMIENTO DE LOS DATOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS**

### **5.1. Introducción**

En este capítulo se presentan y analizan los resultados experimentales que se obtuvieron en el laboratorio al ensayar especímenes de suelo extraídos en suelo marino y del Valle de México. La descripción y ubicación de las muestras ensayadas se detallan en el capítulo 4. Las  $V_s$  y  $V_p$  medidas en especímenes de suelo se obtuvieron con los consolidómetros instrumentadas con los cristales piezoeléctricos.

### **5.2. Programa de ensayos de consolidación instrumentado con cristales piezoeléctricos**

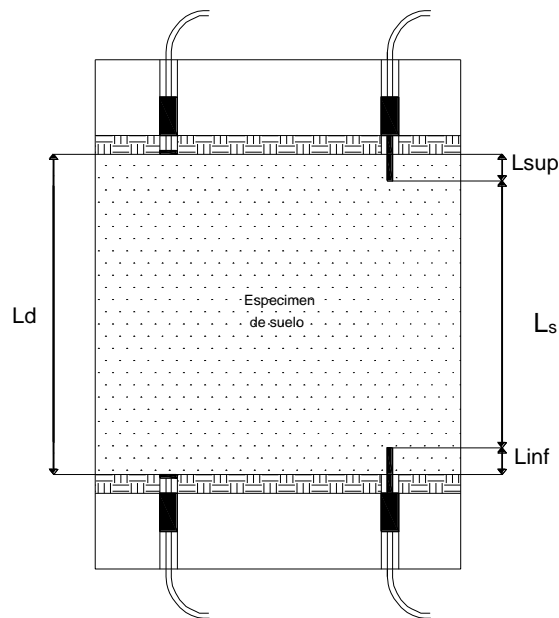
Se realizaron dos series de ensayos de consolidación en muestras inalteradas instrumentadas con dos elementos flexión y dos elementos de compresión. En la Tabla 5.2.1 se detallan los ensayos ejecutados. La serie (A) corresponde a muestras obtenidas en suelos marinos, mientras que la serie (B) corresponde a muestras obtenidas de las arcillas de la Ciudad de México. Los objetivos de estos ensayos fueron: i) evaluar el comportamiento de los suelos ensayados bajo condiciones de carga y deformación uniaxial; ii) determinar las velocidades de ondas  $V_s$  y  $V_p$  en las etapas de carga, descarga y recarga de la prueba; y iii) evaluar el efecto de la velocidad cortante en el dominio de bajas y altas frecuencias (0.2 kHz a 7 kHz).

La Figura 5.2.1 muestra un esquema general del arreglo de los ensayos de consolidación con cristales piezoeléctricos.

**Tabla 5.2.1.-** Resumen de los ensayos de consolidación en un consolidómetro instrumentado con cristales piezoeléctricos.

Serie	Sondeo	Muestra	Profundidad (m)	Parámetros geométricos del arreglo del elemento bender y disco de compresión				
				$L_{sup}$ (cm)	$L_s$ (cm)	$L_{inf}$ (cm)	$L_d$ (cm)	
A	A1	AP – 15	M – 51	17.07 – 17.59	1.07	4.34	1.17	6.58
	A2	AP – 15	M – 71	25.51	1.07	4.56	1.37	7.00
	A3	AP – 17	M – 65	22.49	1.60	4.38	1.16	7.14
B	B1	M – 10	S – 1	14.8 – 15.0	1.20	5.52	1.30	8.02
	B2	M – 14	S – 1	18.8 – 19.0	1.15	5.60	1.30	8.05
	B3	M – 15	S – 3	19.4 – 19.6	1.20	5.52	1.30	8.02

$L_{sup}$ ,  $L_s$ ,  $L_{inf}$ ,  $L_d$  : Ver en la Figura 5.2.1



**Figura 5.2.1.-** Esquema general de los ensayos de consolidación instrumentado con cristales piezoeléctricos en suelos arcillosos.

### 5.3. Curvas de compresibilidad

Las muestras de suelo para la serie A y B fueron sometidas a consolidación, para lo cual se aplicaron diferentes incrementos de esfuerzos efectivos (Tabla 5.3.1). Para cada incremento de esfuerzo efectivo se obtuvo su correspondiente curva de

consolidación. Una vez que el suelo alcanzó al menos el 90% de consolidación primaria, definido con el criterio de Taylor (Taylor, 1948), se aplicó el siguiente incremento de esfuerzos hasta alcanzar el tramo virgen de la curva de compresibilidad. Además, para cada incremento de esfuerzo se midieron las velocidades de onda P y S, con un rango de frecuencia de excitación establecido para el elemento de flexión y compresión. En las Figuras 5.3.1, a 5.3.6 se muestran las curvas de compresibilidad para cada muestra de ambas series. El esfuerzo de preconsolidación correspondiente a cada curva de compresibilidad se presenta en la Tabla 5.3.2.

**Tabla 5.3.1.-** Resumen de las cargas aplicadas para las muestras de la serie A y B

Serie	Profundidad (m)	Esfuerzos aplicados de carga (kPa)						
		1 <sup>ra</sup>	2 <sup>da</sup>	3 <sup>ra</sup>	4 <sup>ta</sup>	5 <sup>ta</sup>	6 <sup>ta</sup>	7 <sup>ma</sup>
A1	17.07 – 17.59	19.61	39.23	58.84	78.45	147.10	196.13	-
A2	25.51	19.61	39.23	58.84	78.45	147.10	196.13	-
A3	22.49	19.61	39.23	58.84	78.45	147.10	196.13	294.2
B1	14.8 – 15.0	19.61	39.23	58.84	78.45	117.7	-	-
B2	18.8 – 19.0	19.61	39.23	58.84	78.45	98.07	-	-
B3	19.4 – 19.6	19.61	39.23	58.84	78.45	98.07	-	-

**Tabla 5.3.2.-** Resumen de los ensayos de consolidación y su esfuerzo de preconsolidación para las muestras de la serie A y B.

Serie		Sondeo	Muestra	Profundidad (m)	Esfuerzo de preconsolidación (kPa)
A	A1	AP – 15	M – 51	17.07 – 17.59	84.87
	A2	AP – 15	M – 71	25.51	150.43
	A3	AP – 17	M – 65	22.49	70.78
B	B1	M – 10	S – 1	14.8 – 15.0	43.26
	B2	M – 14	S – 1	18.8 – 19.0	74.51
	B3	M – 15	S – 3	19.4 – 19.6	70.14

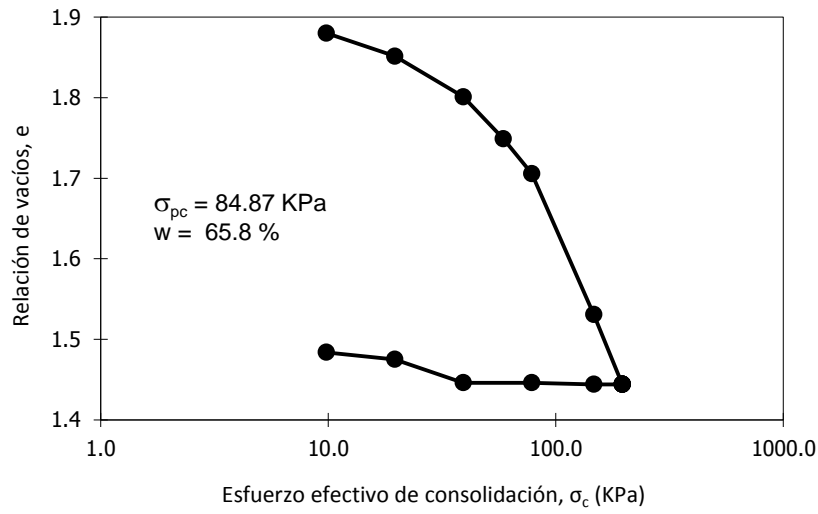


Figura 5.3.1.- Curva de compresibilidad de la muestra AP15-M51

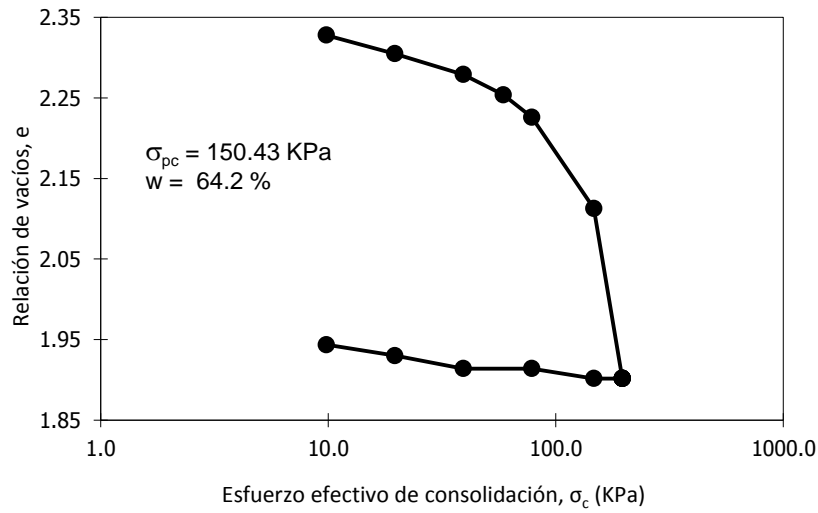


Figura 5.3.2.- Curva de compresibilidad de la muestra AP15-M71



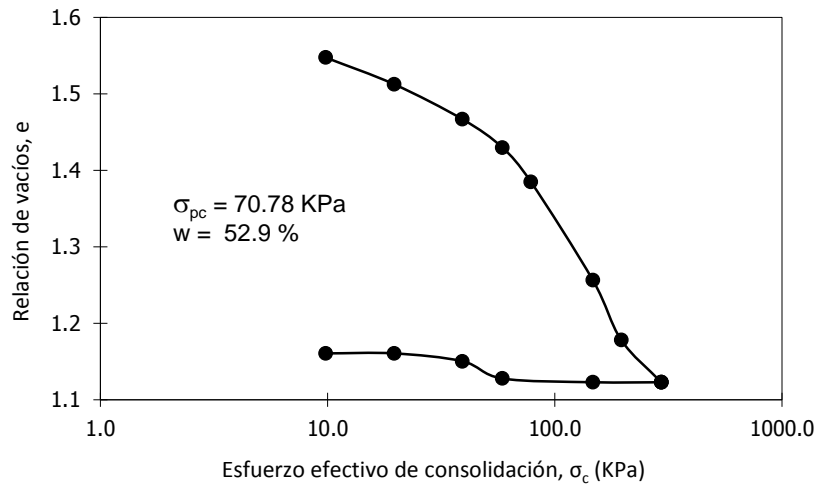


Figura 5.3.3.- Curva de compresibilidad de la muestra AP17-M65

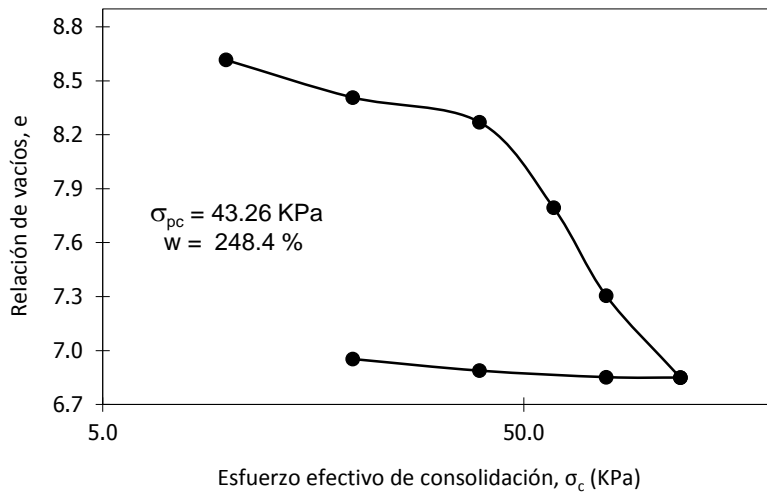


Figura 5.3.4.- Curva de compresibilidad de la muestra M10-S1

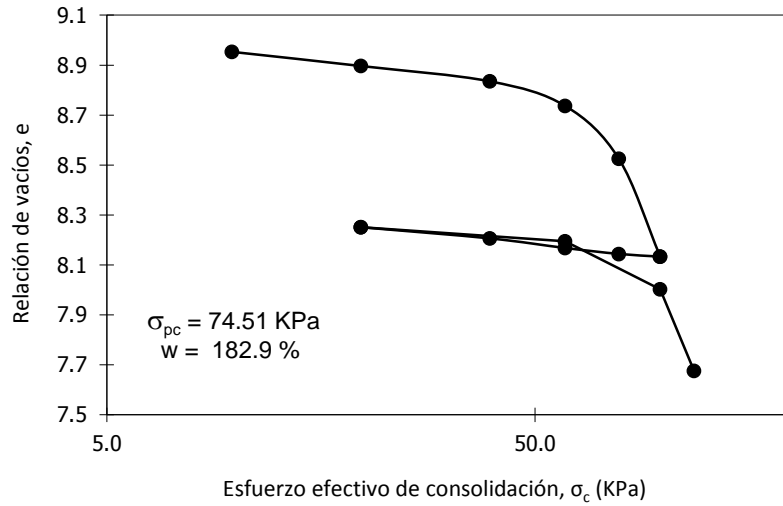


Figura 5.3.5.- Curva de compresibilidad de la muestra M14-S1

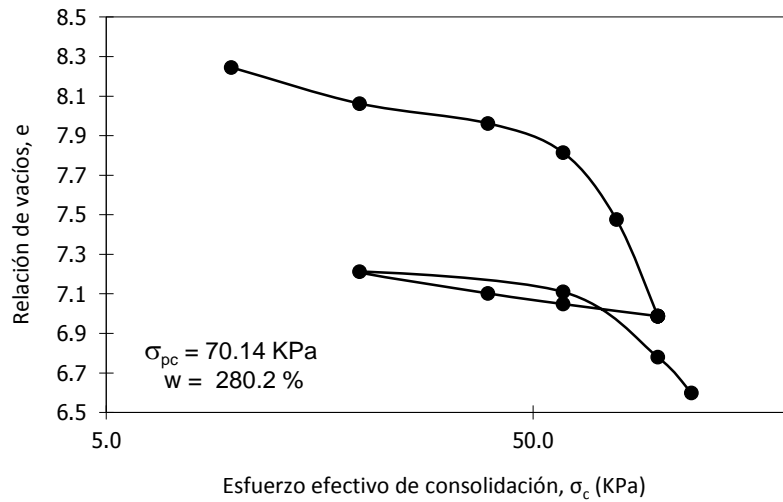


Figura 5.3.6.- Curva de compresibilidad de la muestra M15-S3

#### 5.4. Tiempo de viaje en ondas de compresión y de corte

La medición directa del tiempo de viaje en ondas de compresión y de corte se relaciona con la medición del intervalo de tiempo entre la onda emitida y recibida. Este tiempo de viaje ha sido determinado observando el tiempo entre el inicio del pulso emisor y la primera deflexión de la señal de la recepción del elemento flexión (Shirley, 1978; Abbiss 1981; Dyvik and Madshus 1985; Jamiolkowski et al. 1995; Jovičić et al. 1996; Pennington 1999; Fonseca et al. 2008). La determinación del tiempo de viaje puede hacerse mediante la interpretación visual, similar a las pruebas

geofísicas in situ. Esta técnica asume un frente de ondas planas y la ausencia de cualquier onda de reflexión y refracción (Arulnathan et al. 1998).

Diversos autores han señalado la dificultad de identificar el tiempo exacto de la llegada de la onda de corte en la señal de recepción (Dyvik y Madshus 1985; Brignoli et al. 1996; Viggiani y Atkinson 1995a, 1996b; Nakagawa et al. 1996). Para la identificación de este tiempo, se han propuesto diversas metodologías, una de ellas consiste en métodos simples basados en la inmediata observación del inicio de la onda y medida del tiempo entre el inicio de la onda emitida y recibida, otra metodología consiste en técnicas elaboradas que se desarrollan por medio del procesamiento de la señal para un posterior análisis espectral.

En la literatura se encuentran algunas alternativas para la selección de la configuración de la onda de entrada (Tabla 5.4.1). Esta señal se selecciona no sólo en términos de su forma, sino también por su frecuencia, efecto de claridad de la señal de salida y su fácil interpretación.



**Tabla 5.4.1-** Forma de la onda de entrada sugerido por diversos autores (Fonseca et al., 2008)

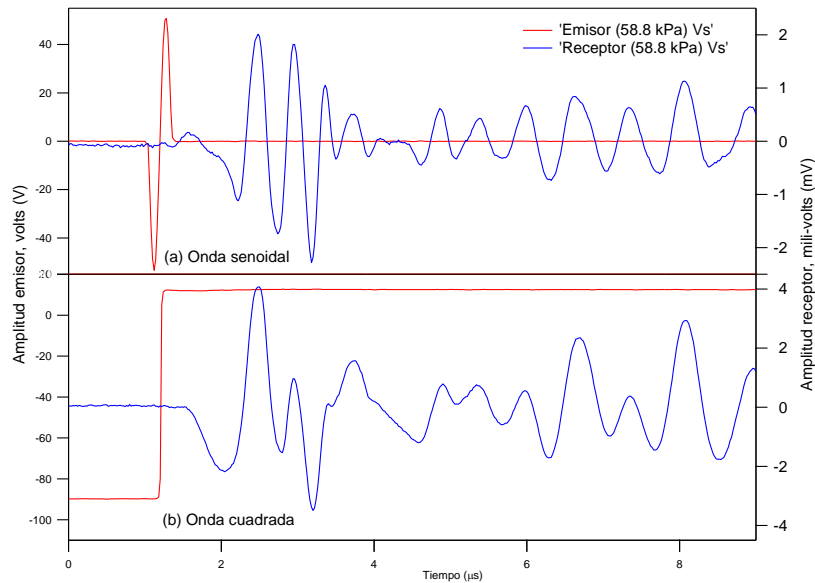
Forma de la onda de entrada	Referencia
 Señal cuadrada	Dyvik y Madshus (1985); Fam y Santamarina (1995)
 Señal impulso	Lee y Santamarina (2005)
 Señal senoidal	Viggiani y Atkinson (1995); Brignoli et al. (1996)
 Señal pulso (90° de fase)	Pennington et al. (2001)
 Onda seno distorsionado (Típicamente 30° de fase)	Jovicic et al. (1996)
 Oscilación forzada (Ciclos de ondas seno en frecuencia de resonancia)	Jovicic et al. (1996)
 Onda seno continua de frecuencia constante	Greening y Nash (2004)
 barrido de ondas seno Frecuencia (100 Hz a 20 kHz)	Greening y Nash (2004); Ferrira et al. (2006)
Señal aleatoria	Roesler (1979); Santos et al. (2007)

En este estudio se ha utilizado como una forma de onda de entrada la forma senoidal y cuadrada, para facilitar la identificación de los puntos de la señal emisora y receptora de la forma de la onda (Figuras 5.4.1 y 5.4.2). Estas ondas senoidales y

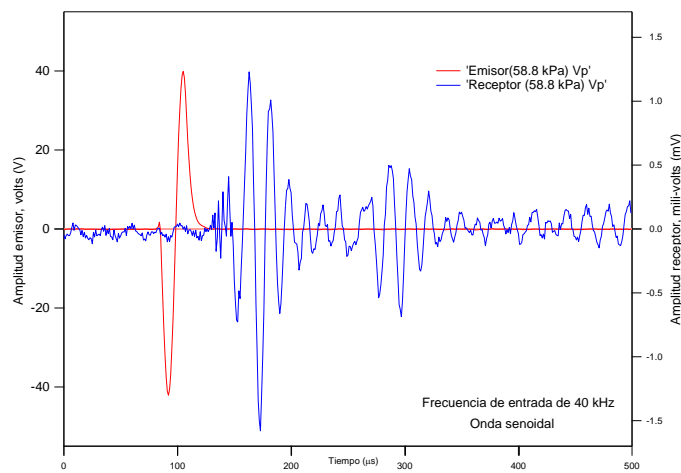
cuadradas fueron adquiridas en diferentes frecuencias de excitación (Tabla 5.4.2), con ellas se puede realizar diversos análisis.

**Tabla 5.4.2.-** Resumen de la forma de la onda de entrada para el presente estudio

Forma de la onda de entrada	Tipo de elemento	Frecuencia de excitación del elemento
	Señal cuadrada	Flexión Compresión
	Señal senoidal	Flexión Compresión



**Figura 5.4.1.-** Señal típica de un pulso de excitación para medir velocidad de onda de corte ( $V_s$ ), esfuerzo efectivo de 58.8 kPa, para una muestra en arcilla: (a) Onda senoidal de 3 kHz de frecuencia, y (b) onda cuadrada de 5 Hz de frecuencia.



**Figura 5.4.2.-** Señal típica de un pulso de excitación para medir velocidad de onda compresionales ( $V_p$ ), esfuerzo efectivo de 58.8 kPa, para una prueba de arcilla.

En términos de interpretación, para calcular el correcto tiempo de llegada de la onda recibida y la onda emitida, algunos investigadores han propuesto métodos que se clasifican en dos grupos principales: el método del tiempo dominante y el método de frecuencia dominante.

El método del tiempo dominante, consiste en la identificación visual del primer instante de llegada de la onda que se genera en el emisor y receptor. Estas señales representan en el eje x de las abscisas el tiempo (s) y en el eje y de la ordena los voltios (Volts). Este método en algunos casos, es un análisis simple y directo, en el cual se puede determinar fácilmente el primer arribo de la onda; en otros casos, es más incierta la determinación del tiempo (Viggiani y Atkinson., 1995; Santamarina y Fam, 1995; Brignoli et. Al., 1996; Arulnathan et al., 1998; Jovicic and Coop, 1998; Zeng y Ni, 1998; Clayton et al., 2004; Lee y Santamarina 2005; Porbaha et al. 2005; Ismail. et al 2005; Zhou. et al 2008; et alChen Ming; 2012).

El método de la frecuencia dominante, consiste en el análisis de la señal de entrada y salida almacenada, la cual será transformada en dominio de la frecuencia (Viggiani y Atkinson., 1995; Brocanelli y Rinaldi, 1998; Arroyo, 2001; Greening y Nash, 2004; Sahaphol y Miura, 2004; Zhou. et al 2008; Barkate et al, 2008).

La principal razón para la interpretación del tiempo usando elementos de flexión (elementos bender), fue la falta de entendimiento de la interacción del sistema conformado por el elemento de flexión y la muestra de suelo durante la medición de las ondas (Vojkan Jovicic, 2009). Por ello, el tiempo de viaje (t) se puede determinar mediante tres métodos como se describe a continuación:

### **Primer tiempo de llegada ( $t_0$ )**

También llamado elección visual (Chen Mig, 2012), consiste en observar la primera deflexión de la señal de recepción como el primer tiempo de llegada, a este tiempo se le denomina ( $t_0$ ), comúnmente adoptado y usado por Viggiani and Atkinson 1995; Jovicic et al. 1996; Lings and Greening 2001; Kawaguchi et al. 2001 y otros autores, como se muestra en la Figura 5.4.3. Mediante este método es difícil determinar el tiempo de viaje, debido a la señal de recepción que no muestra un punto de desviación clara y sutil. Este procedimiento tiene beneficios limitados, ya que este

punto de llegada se oculta por ruido, por la parte reflejada de las ondas de compresión y el efecto de campo cercano (*near field effect*, Sánchez Salinero, 1987).

**Primer tiempo pico a pico ( $t_p$ )**

El método pico a pico, se refiere al tiempo de llegada entre el primer pico de la señal emitida y recibida, como se muestra en la Figura 5.4.3 (Viggiani y Atkinson 1995; Brignoli et al. 1996; Jovicic et al 1996; Arulnathan et al. 1998; y Ni 1999; Lee y Santamarina 2005; Leong et al. 2005).

**El método de correlación cruzada (*cross-correlation*  $t_{cc}$ )**

El método de correlación cruzada de la señal emitida y recibida (Viaggini and Atkinson, 1995; Leong and Yeo, 2005), es un método muy usado para la determinación del tiempo de llegada de la onda recibida. Este método corresponde a una función de  $CC_{yx}(t)$  que es la medida de correlación entre la recepción de la señal,  $X(t)$ , y la señal emitida,  $Y(t)$ , versus el cambio de tiempo ( $\tau$ ):

$$\text{Donde } CC_{yx} = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_T X(t)Y(t + \tau)dt \dots\dots\dots (5.4.1)$$

Donde T es el tiempo total de la duración del registro.

$$CC_{yx}(\tau) = IFFT[G_{yx}(f)] \dots\dots\dots (5.4.2)$$

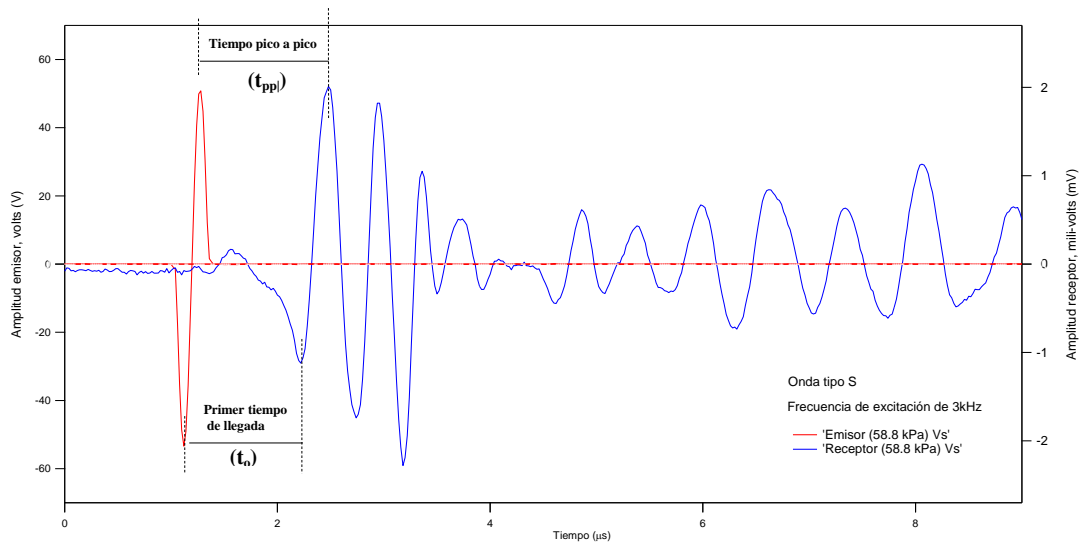
$G_{yx}(f)$  es un espectro de energía a una función de frecuencia (f) y es calculada por la siguiente expresión.

$$G_{yx}(f) = L_x(f)L_y^*(f) \dots\dots\dots (5.4.3)$$

Donde  $L_x(f) = FFT[X(t)]$ ;  $L_y(f) = FFT[Y(t)]$  y  $L_y^*(f)$  corresponde al complemento o conjugado de  $L_y(f)$ . El FFT e IFFT se refieren a la transformada rápida de Fourier e inversa de la transformada rápida de Fourier, respectivamente. El análisis de correlación cruzada se basa en la suposición de que el tiempo de viaje ( $t_{cc}$ ) es igual al cambio de tiempo ( $\tau$ ) correspondiente para el máximo de la ecuación 5.4.2.

El análisis numérico fue realizado con las señales de salida adquiridas por el osciloscopio, basado en técnicas descritas por Mancuso, Simonelli & Vinale (1989), y

originalmente usado para la interpretación de la prueba cross-hole. Esto requiere de un registro en el tiempo dominante para ser descompuesto en un grupo de ondas armónicas en función de frecuencia y amplitud. Una composición algorítmica para este propósito es la transformada rápida de Fourier (Viaggini and Atkinson, 1995).



**Figura 5.4.3.-** Tiempo de llegada para una onda de corte con el método de primer tiempo y pico a pico.

### Efecto de campo cercano (near field effect)

Algunos investigadores han reportado un factor de error en las señales recibidas, una desviación de la onda y una falta de uniformidad. Este efecto corresponde a la presencia del campo cercano (*near field effect*), lo cual hace que la determinación del tiempo llegada sea ambigua (Sánchez Salinero et al., 1986; Viggiani and Atkinson, 1995; Jovicic et al., 1996; Arulnathan et al. 1998; Arroyo et al, 2001).

Sánchez-Salinero et al. (1986) y Brignoli et al. (1996) demostraron experimentalmente en pruebas triaxiales usando cristales piezoeléctricos (elementos bender), la existencia del efecto de campo cercano oculto en la primera llegada de la onda. Esto afecta y dificulta la forma correcta de la llegada de las ondas de corte en pruebas con elementos de flexión (Mancuso y Vinale, 1988). Jovicic et.al. (1998) y J. Kumar (2010) indican que el efecto de campo cercano en las señales de recepción se elimina aplicando diferentes valores de frecuencia para cada incremento de esfuerzo efectivo (Figura 5.4.4).

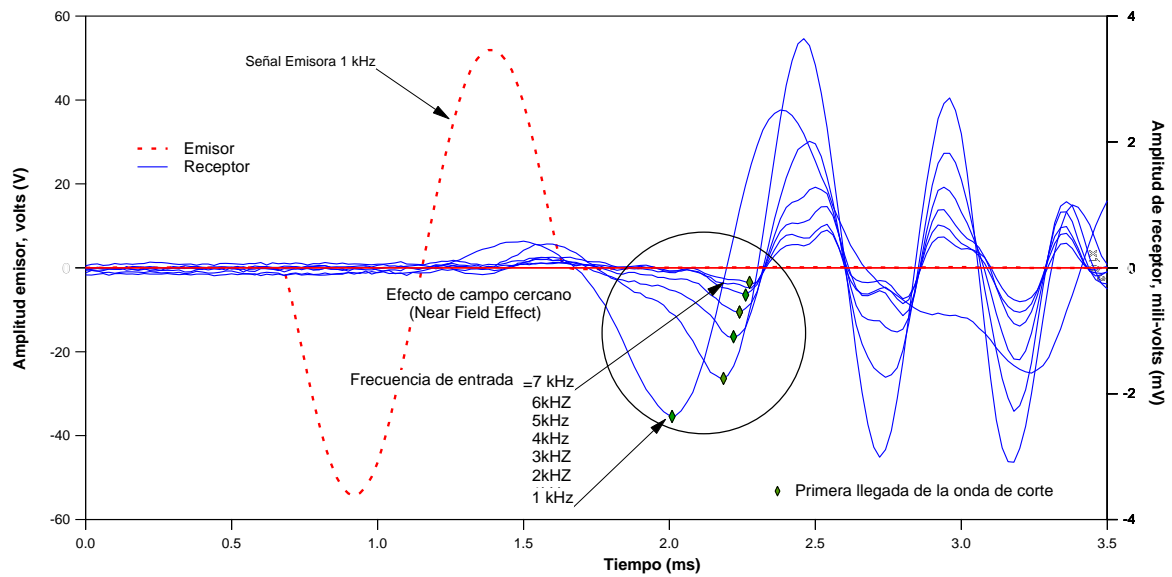


Figura 5.4.4.- Señal recibida para diferentes frecuencias e indicando el efecto de campo cercano

### Relación entre la distancia y el tiempo de viaje de la onda

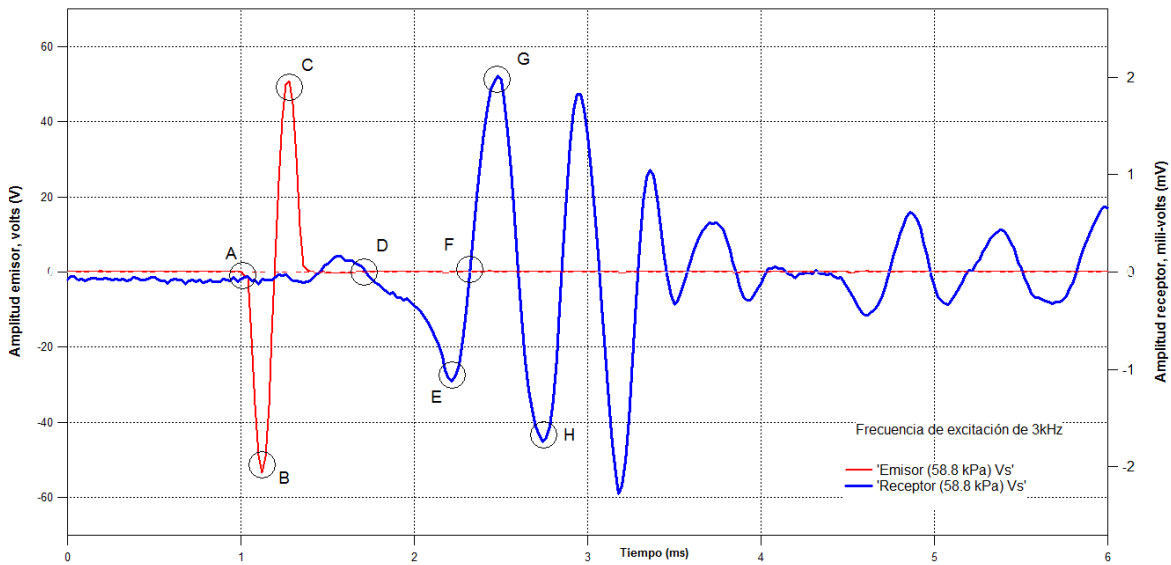
Dyvik y Madshus 1985 y Lee y Santamarina 2005 han comprobado que la distancia de viaje desde la onda emitida hasta la onda recibida se mide entre los picos de los elementos bender instalados en el equipo y aplicados en los especímenes. Debido a que esta distancia es relativamente pequeña, es necesaria la determinación exacta del tiempo de viaje.

Para la determinación del tiempo de viaje desde el inicio de la onda emisora hasta la onda receptora, es necesario identificar un punto en la onda emisora y receptora; por ello, diferentes autores definen puntos característicos en pruebas con cristales piezoeléctricos: donde inicia la onda de llegada, y donde se inicia la deflexión de la onda. Sin embargo, los estudios teóricos de Sánchez Salinero, Roesset & Stokoe (1986) muestran que la identificación de la señal puede no corresponder a la llegada de la onda, debido al efecto de campo cercano (near field effect).

En la Figura 5.4.5, se marcan algunos rasgos característicos en las curvas de las señales transmitidas y recibidas. A partir de estos se puede obtener una serie de estimaciones de tiempo de viaje. Los puntos característicos A, B y C marcan el



comienzo del primer mínimo local y del primer máximo local de la señal transmitida. En la señal recibida los puntos característicos marcados son D - primera desviación, E - primer mínimo local, F - primero por cero, G – primer máximo local y H - segundo mínimo local. Si las características en la señal transmitida se relacionan con las características de la señal recibida, la diferencia de tiempo entre tales características resultará en el tiempo de viaje de onda deseada. La Tabla 5.4.3 presenta el tiempo de viaje estimado usando las diferencias de tiempo entre los puntos mencionados que podrían estar relacionados.



**Figura 5.4.5.-** Señal de pulso senoidal (trasmisión) y tiempo historia de la señal de recepción, y los puntos característicos correspondientes para la estimación del tiempo de viaje.

**Tabla 5.4.3.-** Estimación del tiempo de la señal de los puntos característicos de la Figura 5.12

Puntos característicos	Tiempo de viaje
A – D	0.72 ms
A – E	1.22 ms
A – F	1.32 ms
B – E	1.10 ms
B – G	1.36 ms
C – G	1.20 ms
C – H	1.46 ms

En cuestiones de interpretación del tiempo de viaje de la onda cortante, la discrepancia encontrada entre los resultados presentados en la Tabla 5.4.3 es variable, por la fuente de perturbación de la onda que se propaga, debido al efecto de campo cercano en el inicio de la onda. Por ello, en este estudio se considera el tiempo de viaje entre los puntos característicos A – E para determinar las velocidades de ondas de corte, y después se realizará un análisis espectral.

#### 5.4.1. Medición del tiempo de retraso por la instrumentación ( $t_c$ )

Para el cálculo del tiempo de retraso se procedió a colocar el transmisor y el receptor en contacto directo, es decir, sin ninguna muestra de suelo que se encuentra entre los cristales piezoeléctricos. El transmisor es excitado a diferentes frecuencias y con una señal senoidal o cuadrada, en estas condiciones el receptor debe registrar una forma de onda similar. Sin embargo, la forma de onda generada que se ha probado es generalmente diferente debido a una serie de factores entre la señal transmitida y recibida: magnitud, tiempo de retardo, polaridad y forma (Camacho et al. 2012).

**La magnitud** de la señal de salida depende de la eficiencia de los cristales piezoeléctricos (mecánica eléctrica), de conexión (serie o paralelo), de contacto del elemento bender con el suelo y la ganancia del amplificador. Se recomienda para los procesos interpretativos que la única condición obligatoria es tener suficiente resolución para diferenciar los puntos característicos de la forma de onda.

**El tiempo de retraso** se debe a los equipos electrónicos, cables y conexiones a tierra; este retraso es una constante del sistema que debe de ser medido durante la prueba.

**La polaridad** se presenta por la tensión eléctrica en la salida del cristal piezoeléctrico. El efecto de polaridad consiste en una señal positiva aplicada a la de transmisor, la cual produce una señal negativa en el receptor del cristal piezoeléctrico. Por ello, es necesario identificar este cambio en la polaridad para evitar una identificación errónea de la hora de llegada.

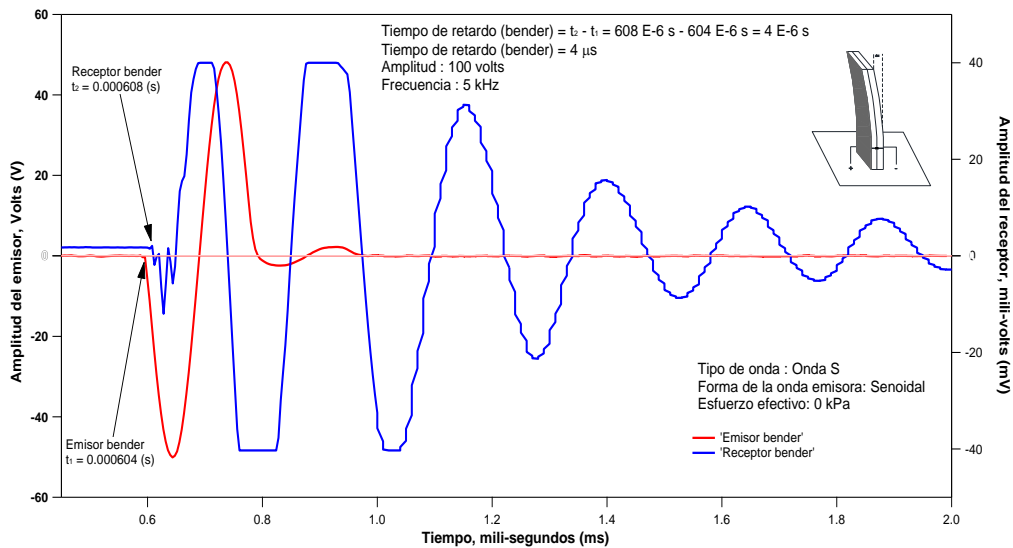
**La forma** depende de la señal de salida no solo del receptor, sino también al transmisor de los cristales piezoeléctricos. El movimiento actual de los elementos

de transmisión es diferente a la señal de entrada. Las características específicas de la señal pueden introducir cambios adicionales en la forma.

Considerando la implementación para el cálculo y la serie de factores, se aplicó un barrido de señales a diferentes frecuencias con una amplitud de 100 volts para los elementos de flexión y compresión (Tabla 5.4.4). Con estas señales obtenidas se calculó el tiempo de retardo ( $t_c$ ), el cual consiste en restar el tiempo de la señal emisora al tiempo de la señal receptora, tal como se muestra en las Figuras 5.4.6 y 5.4.8.

**Tabla 5.4.4.-** Resumen de datos de entrada para determinar el tiempo de retardo ( $t_c$ )

DATOS DE CORRECCIÓN DEL TIEMPO ( $t_c$ )			
ELEMENTOS BENDER		ELEMENTOS DISCO	
Escala	200 $\mu\text{s}/\text{div}$	Escala	50 $\mu\text{s}/\text{div}$
Rango	- 700 ms a 1.28 ms	Rango	- 100 $\mu\text{s}$ a 400 $\mu\text{s}$
Frecuencia (kHz)	$\Delta t$ (s)	Frecuencia (kHz)	$\Delta t$ (s)
1 - 2	$4.0 \times 10^{-06}$	10 - 50	$5.0 \times 10^{-06}$
3 - 4	$4.0 \times 10^{-06}$	60	$6.0 \times 10^{-06}$
5 - 7	$4.0 \times 10^{-06}$	70 - 100	$5.0 \times 10^{-06}$
$t_{cs}$	4.0 $\mu\text{s}$	$t_{cp}$	5.0 $\mu\text{s}$



**Figura 5.4.6.-** Obtención de tiempo de retardo de la señal Vs

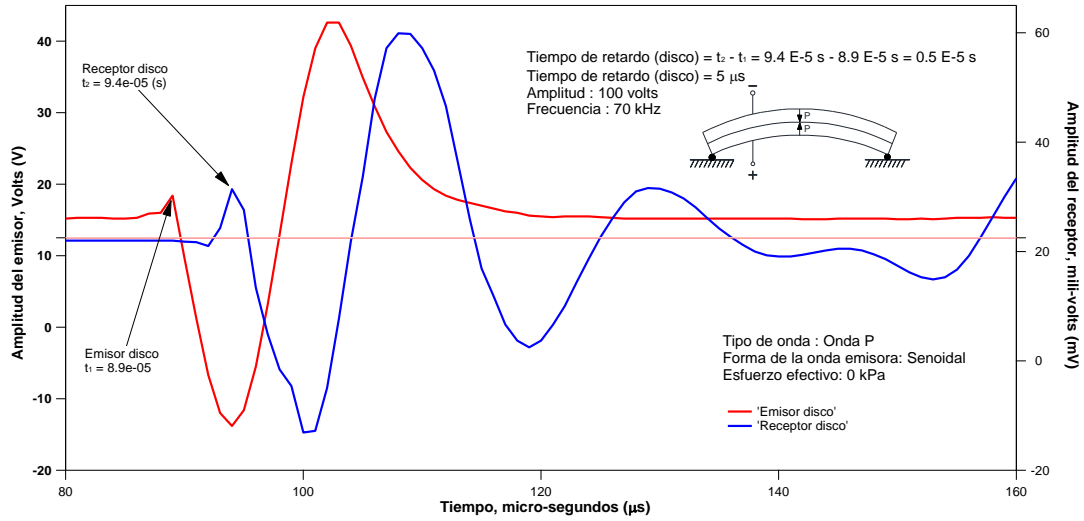


Figura 5.4.7.- Obtención de tiempo de retardo de la señal  $V_p$

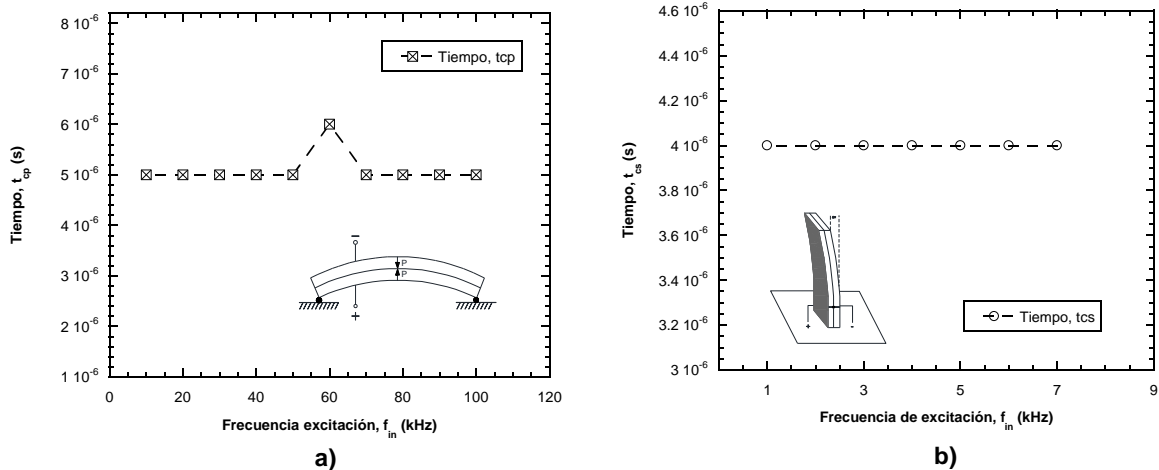


Figura 5.4.8.- Verificación del tiempo de retardo a diferentes frecuencias (ondas Vs). a) elemento de compresión y b) elemento de flexión.

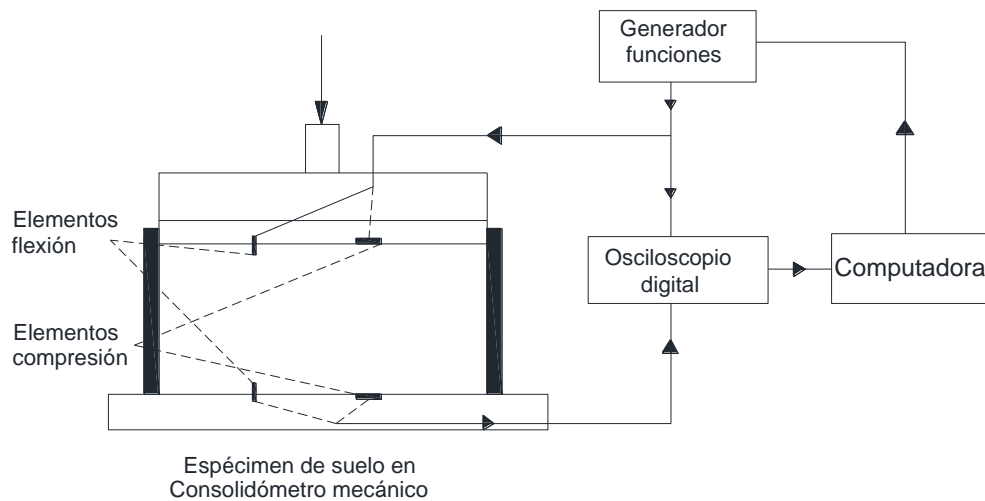
Estos tiempos de retardo ( $t_c$ ) se restarán a los tiempos de arribo de cada señal, con el objetivo de retirar la serie de factores generado por el propio sistema (elemento receptor-suelo-elemento emisor), y así obtener el tiempo real que tarda el impulso en recorrer el espécimen de suelo; por consiguiente, calcular las velocidades de onda P y S, con una mayor exactitud.

### 5.5. Determinación de las velocidades de onda en la masa de suelo

Para determinar las velocidades de ondas de corte y de compresión en un espécimen de suelo con elementos de flexión y compresión, tal como se ilustra en la Figura 5.5.1, es necesario generar ondas de compresión y de corte. El método consiste en usar un

generador de funciones que emite un pulso en el emisor creando ondas de compresión y de corte que viajan a través del espécimen de suelo y son registradas por el receptor. Ambas señales se graban en un osciloscopio y posteriormente se digitalizan. Estos datos digitalizados se procesan en hojas de cálculo para su posterior análisis que se describe más adelante.

En total se usaron dos tipos de señales de entrada: las de pulso senoidal, y las de pulso cuadrado. Las características específicas de las señales usadas para la serie A y B durante la prueba, para cada frecuencia y amplitud, se muestran en la Tabla 5.5.1.



**Figura 5.5.1.-** Diagrama del equipo experimental para obtener las velocidades de onda de corte y compresión con el método de transmisión de ondas.

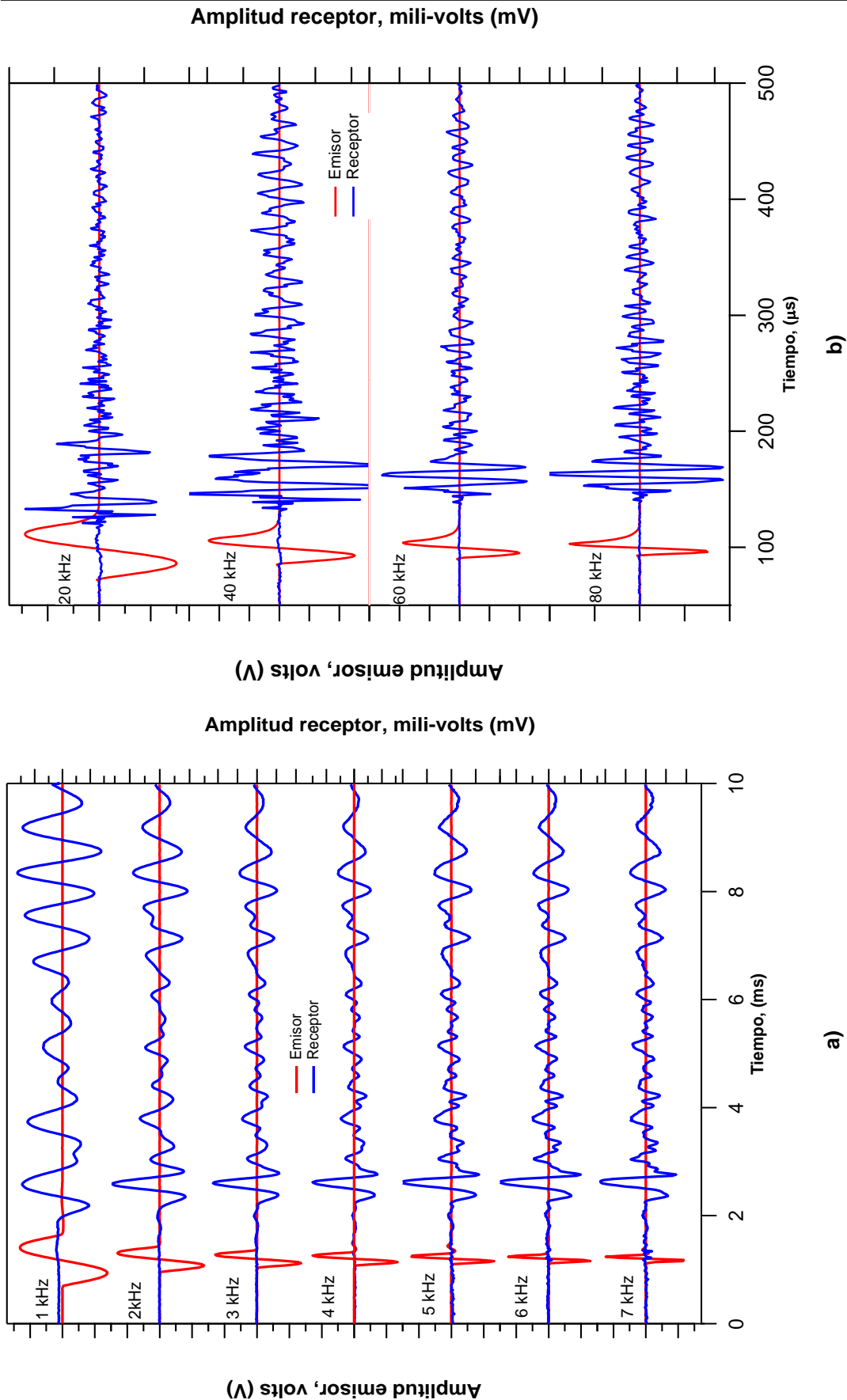
En cada serie de las pruebas realizadas se aplicó una señal de entrada (emisor). Esta señal se emite con una excitación en la parte superior del espécimen (cabezal), de forma senoidal, de amplitud de 100 volts y a varias frecuencias (Tabla 5.5.1), como respuesta a la excitación se generó una señal de salida (receptor). Finalmente, ambas señales fueron detectadas por el osciloscopio, y a diferentes esfuerzos efectivos como muestra en las Figuras 5.5.2, tanto para las velocidades de corte,  $V_s$ , como para las de compresión,  $V_p$ .

**Tabla 5.5.1.-** Resumen de las frecuencias de excitación para el elemento de flexión y compresión para las serie A y B.

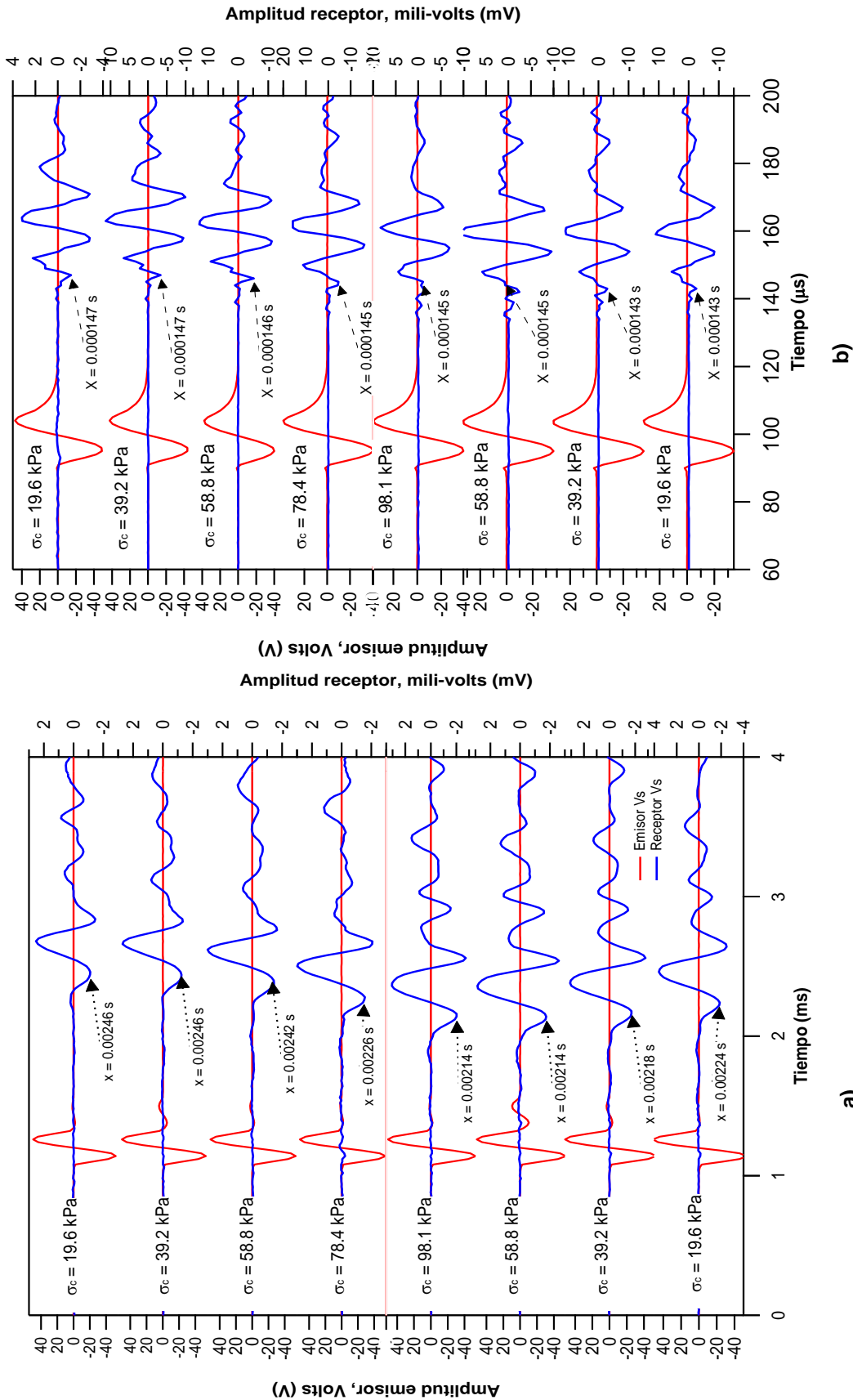
Serie	Frecuencia de excitación, $f_{in}$												Amplitud
	Elementos de flexión (kHz)							Elementos de compresión (kHz)					Volts
	1 <sup>ra</sup>	2 <sup>da</sup>	3 <sup>ra</sup>	4 <sup>ta</sup>	5 <sup>ta</sup>	6 <sup>ta</sup>	7 <sup>ma</sup>	1 <sup>ra</sup>	2 <sup>da</sup>	3 <sup>ra</sup>	4 <sup>ta</sup>	5 <sup>ta</sup>	
A1	1	2	3	5	-	-	-	10	20	40	70	100	100
A2	1	2	3	5	-	-	-	10	20	40	70	100	
A3	1	2	3	4	5	6	7	10	20	40	70	100	
B1	1	2	3	4	5	6	7	40	60	80	100	-	100
B2	1	2	3	4	5	6	7	10	20	40	70	100	
B3	1	2	3	4	5	6	7	20	40	60	80	-	

En las Figuras 5.5.2.a y 5.5.2.b se muestran las formas de las ondas S y P (línea de puntos) que viajan a través del espécimen de suelo. Estas señales fueron tomadas durante la etapa de carga y descarga para las pruebas de la serie A y B para determinar el tiempo de viaje de la onda que va desde el emisor hasta el receptor. Este tiempo se determinó considerando la primera deflexión de la señal, tanto en las señales emisoras como en las receptoras. El triángulo negro marca los puntos de llegada de las ondas S y P (Figuras 5.5.3.a y 5.5.3), los cuales fueron estimados por una inspección visual en el trazo y considerando el efecto de campo cercano.

Así mismo, para determinar la velocidad de propagación se calcularon las distancias de viaje entre las ondas emitidas y recibidas para las pruebas de las series A y B. A la distancia de viaje entre la onda emitida y la onda recibida tanto para la onda de corte y compresión se le denomina  $L_s$  y  $L_d$  respectivamente; estas distancias son diferentes a la longitud del espécimen. Al tiempo que viaja la onda de corte y compresión en esta distancia se le denomina  $t_s$  y  $t_p$ .



**Figura 5.5.2.-** Formas de las ondas a diferentes frecuencias de entrada ( $f_{in}$ ) y a un esfuerzo efectivo de 58.8 kPa para la serie B3. a) Ondas S y b) Ondas P.



**Figura 5.5.3.-** Formas de las ondas para diferentes esfuerzos (etapa de carga y descarga) para la prueba de la serie B3. a) arribo de las ondas S con una frecuencia de entrada de 4kHz y b) arribo de las ondas P con una frecuencia de entrada de 60 kHz.



El cálculo de las velocidades de onda de corte,  $V_s$ , compresión,  $V_p$ , de manera experimental se describe de la siguiente manera (Brignoli *et al.*, 1996; ASTM D 2845-95, ASTM 1997a):

$$V_p = L_d / (t_p - t_{cs}) \dots\dots\dots(5.5.1)$$

$$V_s = L_s / (t_s - t_{cp}) \dots\dots\dots(5.5.2)$$

Donde  $L_s$  y  $L_d$  son las distancias efectivas de viaje de la onda de corte y compresión respectivamente, y  $t_s$  y  $t_p$ , los tiempos de arribo de las ondas S y P, a los que se restara la corrección del tiempo ( $t_{cp}$  y  $t_{cs}$ ). Es importante mencionar que los elementos de flexión se introducen dentro de la muestra de suelo una longitud igual al 50% de la altura del elemento de flexión, siendo ésta de 7 hasta 10 mm, aproximadamente y los elementos de compresión están en contacto directo con las caras de la muestra de suelo (Figura 5.5.1).

Alternativamente, de manera analítica es posible determinar la velocidad de propagación de un grupo de ondas para una frecuencia dada mediante la siguiente expresión (Botare y Massarch, 1984; Mancuso et al. 1989; Viggiani, 1995; Arulnathan et al, 1998):

$$V_s = \lambda f \dots\dots\dots(5.5.3)$$

Donde  $\lambda$  es la longitud de onda y  $f$  la frecuencia de salida del sistema.

Otro de los datos que se puede obtener con la velocidad de corte es el módulo de corte máximo,  $G_{m\acute{a}x}$ , de la siguiente manera (Brignoli *et al.*, 1996):

$$G_0 = \rho \cdot V_s^2 \dots\dots\dots(5.5.4)$$

Donde  $V_s$  es la velocidad de la onda de corte.

Con las velocidades de compresión y de cortante también se obtiene la variación de la relación de Poisson, haciendo uso de la siguiente expresión (Kumar y Madhusudhan, 2010):

$$v = \frac{(0.5V_p^2 - V_s^2)}{(V_p^2 - V_s^2)} \dots \dots \dots (5.5.5)$$

Utilizando las ecuaciones 5.5.1 y 5.5.2 se determinaron las velocidades de ondas de corte y compresión respectivamente a diferentes esfuerzos efectivos y diferentes frecuencias de entrada. Los resultados para cada serie se muestran en el Anexo A.

**5.6. Estimación de la frecuencia predominante del suelo mediante funciones de transferencia**

Las señales digitalizadas tanto para el emisor y receptor que son registradas en el dominio del tiempo, para los elementos de flexión, requieren de una técnica de procesamiento en el dominio de la frecuencia, con la cual se obtiene una función de transferencia (FT).

La función de transferencia (FT) de un sistema se puede determinar debido a que es posible predecir su respuesta para cualquier excitación de entrada. Existe una relación directa entre la excitación de entrada (señal emitida) y la respuesta del sistema dicha excitación (señal recibida). El sistema mecánico (elemento emisor, suelo y elemento receptor) se puede considerar como un sistema lineal tal que su respuesta a una excitación puede ser descrita en términos de la función de transferencia (FT) que es única e independiente de la excitación (Bendat y Piersol, 2000).

El cálculo de la Función de transferencia  $H(f)$  relaciona una señal de entrada y otra de salida definidas como  $X(t)$  y  $Y(t)$ . El objetivo del estudio es obtener  $H(f)$  que es el cociente espectral entre la transformada rápida de Fourier (FFT) de la señal  $Y(t)$  y  $X(t)$  (Fratta y Santamarina, 1996; Cascante y Santamarina, 1997; Alvarado et al. 2012).

Joseph Fourier (1768-1830), estudiando la transmisión del calor, demostró matemáticamente que una señal periódica se puede descomponer en una suma de senos y cosenos. Con esta definición las señales de emisión y de recepción en el dominio del tiempo pueden ser representadas por una suma de senos y cosenos. Usando esta representación, las señales en el dominio del tiempo se transforman al dominio de la frecuencia sin perder información. La transformada de Fourier para la señal de entrada se define como

$$X(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} X(t)e^{-j\omega t} dt \dots\dots\dots(5.6.1)$$

Donde  $\omega$  es la frecuencia circular. La ecuación transformada para señales digitales de longitud finita es:

$$X(m\Delta\omega) = \frac{T}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x(n\Delta t)e^{-jnm/N} \dots\dots\dots(5.6.2)$$

Donde N es el número de puntos en la serie de tiempo,  $\Delta t$  es el intervalo de muestreo,  $\Delta\omega$  es el intervalo de frecuencia, y m y n son números enteros (Fratta y Santamarina, 1996). El procesamiento de señales en el dominio de la frecuencia se resume en la Tabla 5.6.1.

**Tabla 5.6.1.-** Resumen de las funciones usado en el procesamiento de la señal

Tiempo dominante	
Señal de entrada (emisor)	X(t)
Señal de salida (receptor)	Y(t)
Señal de entrada normalizada	Xn(t)
Señal de salida normalizada	Yn(t)
Frecuencia dominante (FFT)	
Señal de entrada (emisor)	X(ω) = FFT (Xn(t))
Señal de salida (receptor)	Y(ω)= FFT (Yn(t))
Función de transferencia (FT)	
$H(\omega) = \frac{Y(\omega)}{X(\omega)}$	

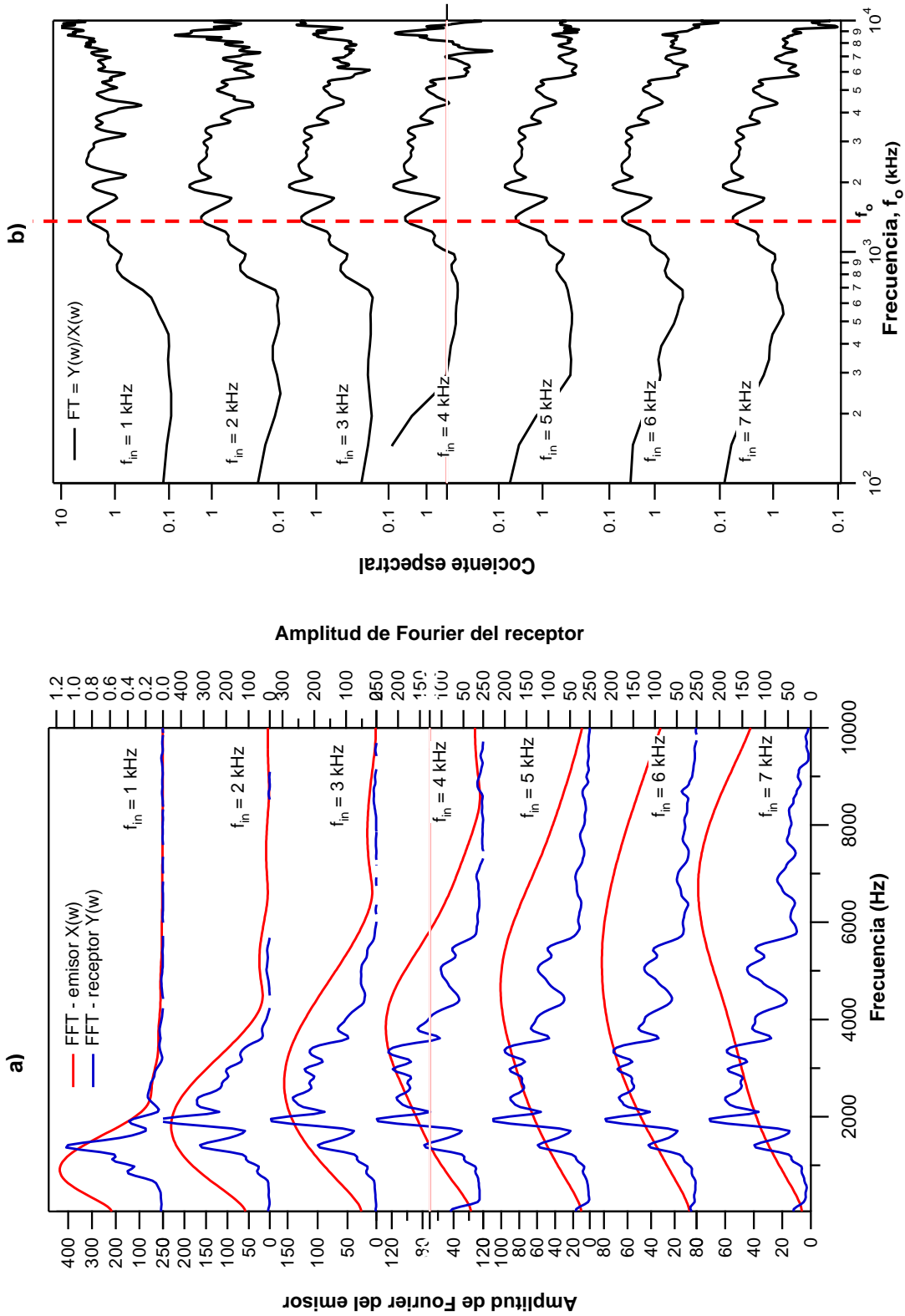
Esta relación H(ω) implica que los sistemas con elementos de flexión (elementos bender) tienen una frecuencia de vibración fundamental que corresponde a la amplitud máxima de H(ω), y al modo de vibración fundamental (Alvarado et al, 2012). En este estudio, como se muestra en la Figura 5.6.1, la mayoría de los sistemas con elementos

de flexión exhiben múltiples máximos y por lo tanto varios modos de vibración para diferentes frecuencias de excitación ( $f_{in}$ ).

Utilizando el resumen de la Tabla 5.6.1 se determinó la frecuencia fundamental del sistema ( $f_0$ ) para cada esfuerzo efectivo y a diferentes frecuencias de entrada, los resultados se muestran en la Tabla 5.6.2. Las gráficas del cociente espectral para cada serie se muestran en el Anexo B.

**Tabla 5.6.2.-** Resultados de las frecuencias del sistema para cada serie de las pruebas

Etapa	Esfuerzo efectivo, $\sigma_c$ (kPa)	Frecuencia del sistema, $f_0$ (kHz)					
		A1	A2	A3	B1	B2	B3
CARGA	19.61	1.196	1.465	1.025	1.074	0.732	1.172
	39.23	1.416	1.538	1.270	1.123	1.172	1.172
	58.84	1.660	1.660	1.563	1.416	1.367	1.220
	78.45	1.709	1.758	1.758	1.758	1.416	1.367
	98.07	-	-	-	2.441	1.514	1.025
	147.1	2.222	2.026	2.295	-	-	-
	196.13	2.441	2.393	2.637	-	-	-
	294.2	-	-	3.906	-	-	-
DESCARGA	147.1	2.515	2.417	3.027	-	-	-
	78.45	2.368	2.246	-	2.002	1.465	-
	58.84	-	-	2.734	-	1.465	1.221
	39.23	2.075	2.271	2.490	1.953	1.465	1.025
	19.61	2.222	2.075	2.246	1.904	1.416	1.367
RECARGA	58.84	-	-	-	-	1.465	0.977
	98.07	-	-	-	-	1.563	1.221
	117.68	-	-	-	-	1.660	1.318



**Figura 5.6.1.-** Medida de la frecuencia del sistema ( $f_o$ ) para las ondas emitida a diferentes frecuencias de entrada ( $f_{in}$ ) y de recepción a un esfuerzo efectivo de 78.4 kPa para la serie B2. a) Curvas de transformada de Fourier (FFT) para emisor y receptor y b) curvas de función de transferencia (FT) indicando la frecuencia dominante del sistema ( $f_o$ ).

## 5.7. Análisis de resultados

### Influencia del esfuerzo efectivo en la masa de suelo en las velocidades de ondas de corte ( $V_s$ )

Con las señales medidas mediante los elementos de flexión (elementos bender) se analizan los tiempos de arribo para las ondas emitidas y recibidas, para diferentes frecuencias de excitación ( $f_{in}$ ). Este proceso se realiza para diferentes incrementos del esfuerzo efectivo durante la prueba de consolidación.

En la Figura 5.5.3a se muestran las señales de las ondas de corte que se transmiten a través del espécimen de suelo, al cual se le han aplicado diversos esfuerzos efectivos durante la etapa de carga, descarga y recarga. Como se observa en dicha figura, es evidente que el tiempo de arribo de las ondas de corte disminuye en la etapa de carga, debido a que esta etapa está asociada a un incremento de los esfuerzos efectivos. El tiempo de arribo de estas ondas aumenta en la etapa de descarga y en la etapa de recarga disminuye nuevamente.

Es importante indicar que el tiempo de arribo en la etapa de descarga para un esfuerzo de 19.6 kPa es menor que el tiempo de arribo para el mismo esfuerzo al iniciar el ensaye en la etapa de carga. La diferencia entre estos tiempos de arribo se debe al efecto de preconsolidación del espécimen de suelo después de someterlo a un esfuerzo máximo de 98 kPa y 196 kPa.

En las Figuras 5.7.1 y 5.7.2 se observa el comportamiento de la velocidad de la onda de corte,  $V_s$ , a diferentes esfuerzos efectivos de consolidación para las pruebas de las series A y B. Cada velocidad de onda se asocia a un esfuerzo efectivo de consolidación aplicado (etapa de carga y descarga) en el espécimen de suelo para diferentes frecuencias de excitación ( $f_{in}$ ). Se puede observar que las  $V_s$  medidas son sensibles al incremento del esfuerzo, por ello las velocidades de ondas de corte aumentan linealmente con el esfuerzo efectivo.

La Figuras 5.7.1a a 5.7.1c muestran las velocidades de ondas de corte para un suelo marino (serie A). Se observa que  $V_s$  varía en mayor proporción en el rango de frecuencia de excitación ( $f_{in}$ ) de 1 kHz a 3 kHz que en el rango de 4 kHz a 7 kHz

(Tabla 5.7.1). Las Figuras 5.7.2a a 5.7.2c muestran las velocidades de ondas de corte para la arcilla de la Ciudad de México (serie B). Se observa que  $V_s$  varía en mayor porcentaje en el rango de frecuencias ( $f_{in}$ ) de 1kHz a 3kHz que en el rango de 4 kHz a 7 kHz, como se muestra en la Tabla 5.7.1. En esta sección sólo se presenta el análisis de las curvas de velocidades de ondas de corte medidas al variar el esfuerzo efectivo.

**Tabla 5.7.1.-** Resumen de la variación de velocidades de ondas de corte para la serie A y B en función del rango de frecuencia de excitación ( $f_{in}$ ).

Serie		Rango de frecuencia de excitación, $f_{in}$ , kHz	Variación de la velocidad de onda de corte, $V_s$ (%)
A	A1	1 y 2	0 – 16
		3 y 5	0
	A2	1 y 2	6 – 20
		3 y 5	0 – 9
	A3	1 a 3	5 – 29
		4 a 7	2 – 14
B	B1	1 a 3	9 – 14
		4 a 7	0 – 5
	B2	1 a 3	3 – 5
		4 a 7	0 – 3
	B3	1 a 3	9 – 12
		4 a 7	1 – 5

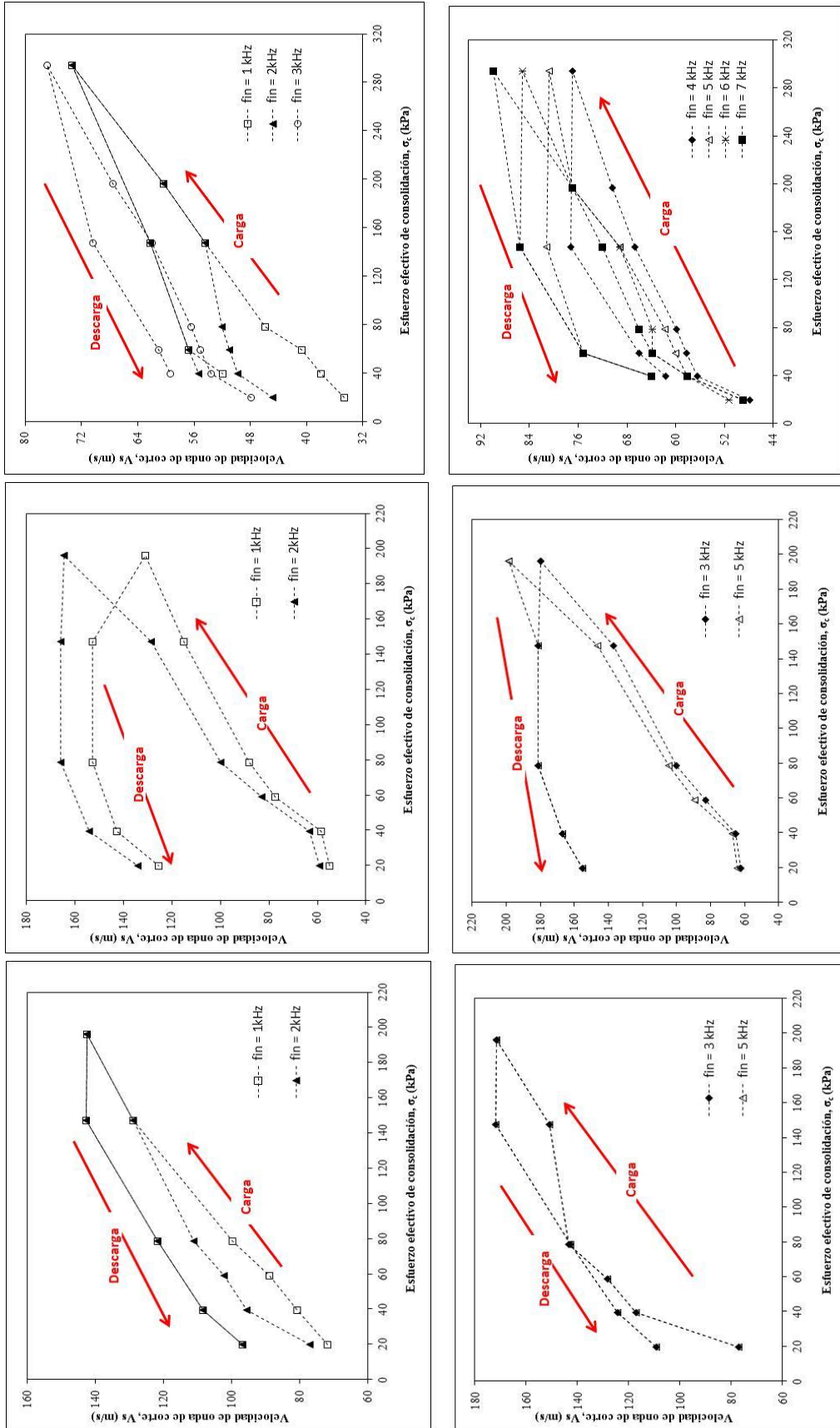
### Influencia del esfuerzo efectivo en la masa de suelo en las velocidades de compresión ( $V_p$ )

En la Figura 5.5.3b se muestran las señales de las ondas de compresión. Se observa claramente el mismo tiempo de arribo, independientemente del esfuerzo efectivo aplicado durante la etapa de carga y descarga. La razón de la insensibilidad en el tiempo de arribo se debe a que los especímenes de suelo se encontraban saturados, por lo que, las  $V_p$  viajaban principalmente a través del agua (fase líquida del suelo). El grado de saturación ( $S_r$ ) afecta a las velocidades de las ondas elásticas, especialmente a la velocidad de la onda P.

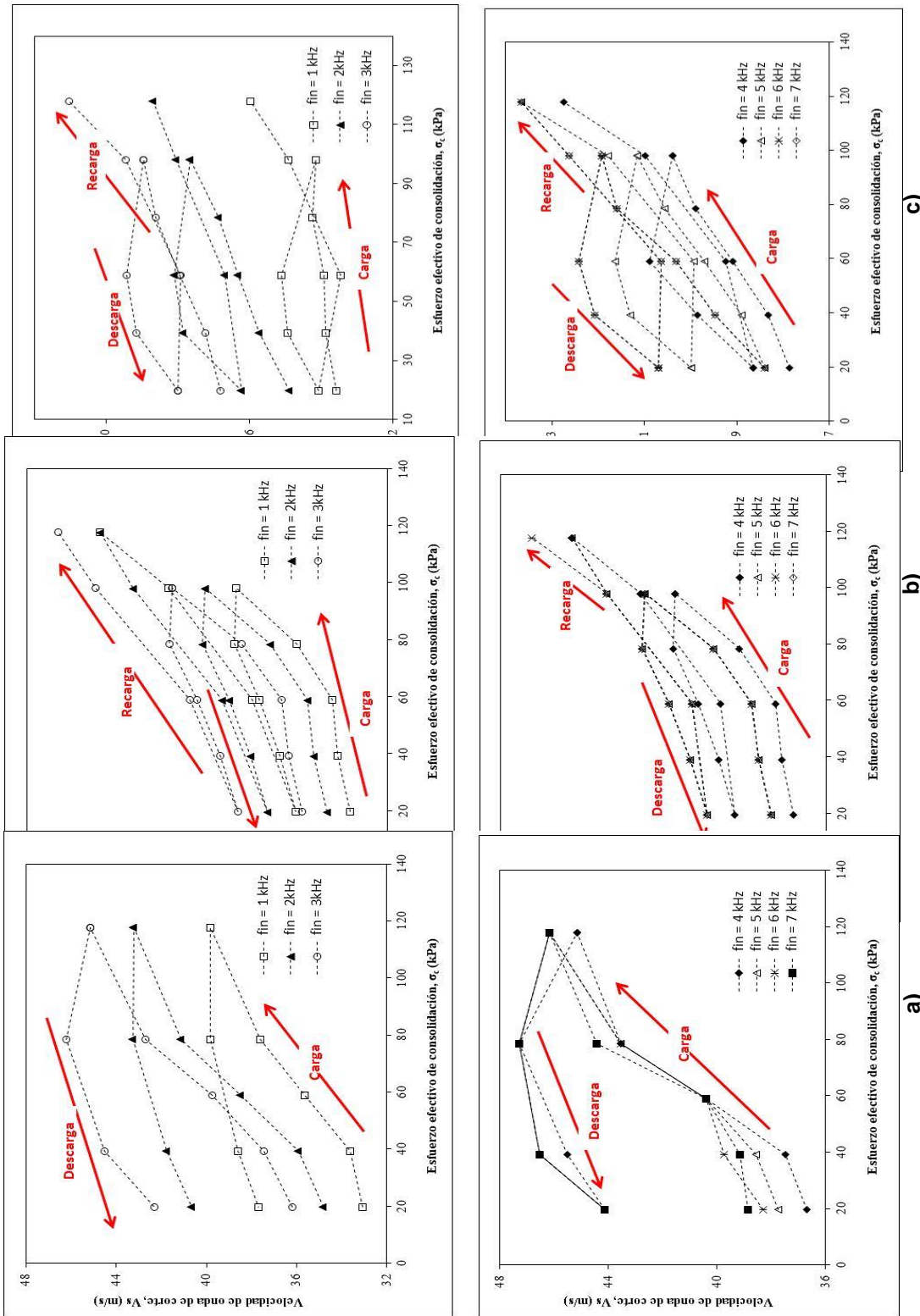
En las Figuras 5.7.3a a 5.7.3f se puede observar el comportamiento de las  $V_p$ , que son insensibles al incremento del esfuerzo debido a que los especímenes se

encuentran saturados. En estas figuras se aprecia que  $V_p$  es casi constante con una velocidad promedio. Las Figuras 5.7.3a a 5.7.3c muestran que el promedio de las velocidades de ondas de compresión es de a 1573, 1529 y 1514 m/s, que corresponden a la serie A. Las Figuras 5.7.3d a 5.7.3f muestran que el promedio de las de las velocidades de ondas de compresión es de 1424, 1387 y 1500 m/s, que corresponden a la serie B.

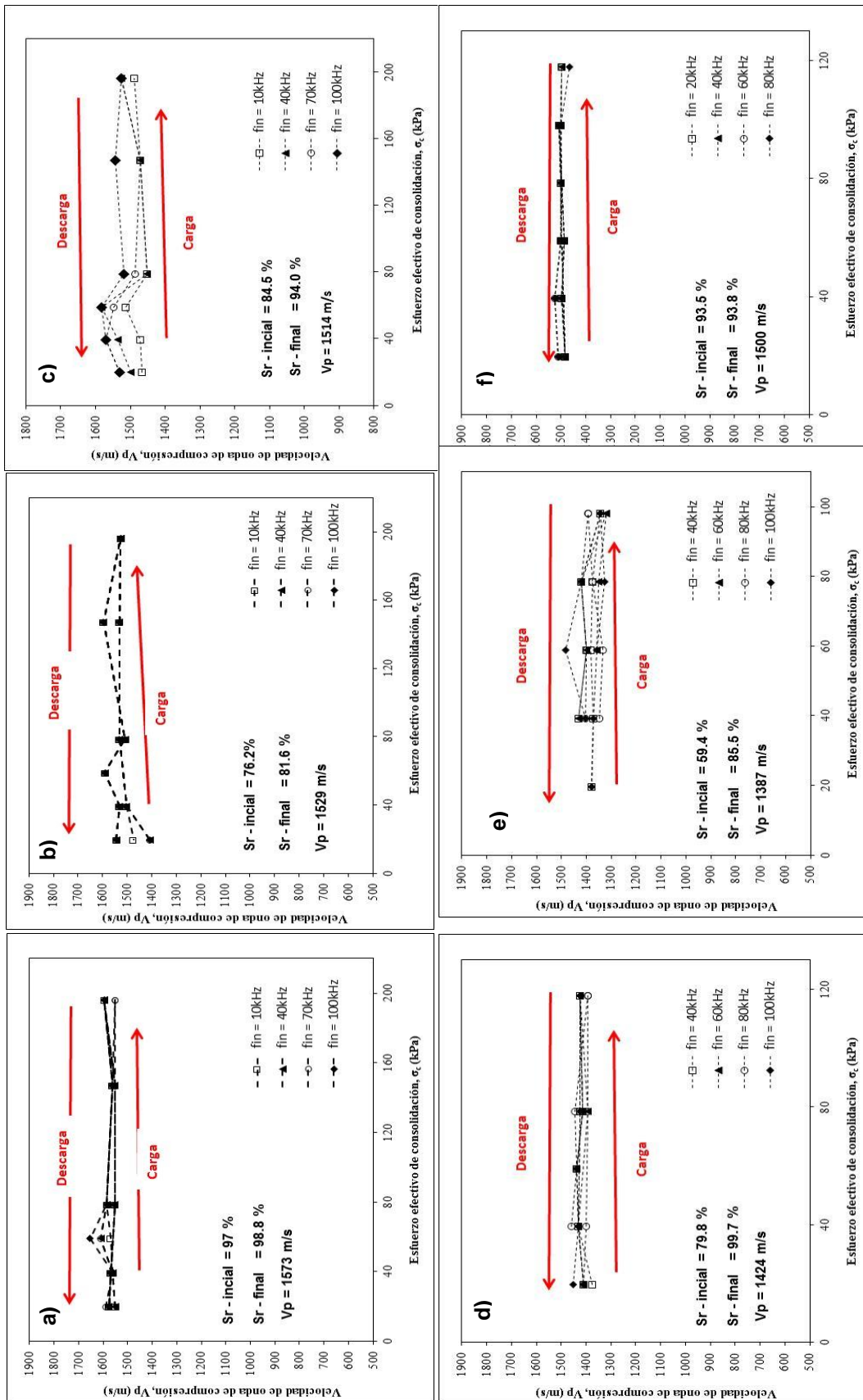




**Figura 5.7.1.-** Comportamiento de las velocidades de ondas de corte a diferentes esfuerzos de consolidación (etapa de carga, descarga y recarga). a) Serie A1 (AP15-M51), b) serie A2 (AP15-M71) y c) serie A3 (AP17-M65).



**Figura 5.7.2.-** Comportamiento de las velocidades de ondas de corte a diferentes esfuerzos de consolidación (etapa de carga, descarga y recarga). a) Serie B1 (M10-S1), b) serie B2 (M14-S1) y c) serie B3 (M15-S3).



**Figura 5.7.3.-** Comportamiento de las velocidades de ondas de compresión a diferentes esfuerzos de consolidación (etapa de carga, descarga y recarga). a) Serie A1 (AP15-M51), b) serie A2 (AP15- M71), c) serie B1 (M10-S1), d) Serie B3 (M15-S3), e) serie B2 (M14-S1) v f) serie B3 (M15-S3).

## **Análisis de los factores que afectan la interpretación de las velocidades de ondas de corte**

Al aplicar excitaciones con diferentes frecuencias de excitación a un espécimen de suelo, se ha encontrado que las velocidades de propagación de las ondas en el espécimen son variables, y los modos en los que vibra el suelo también lo son. La presencia de diferentes velocidades de propagación no permite determinar el tiempo de llegada real de la onda en el elemento receptor. Este comportamiento es atribuido al efecto de campo cercano. Por lo general se conoce como una caída inicial en la señal recibida (Vojkan Jovicic, 2009), como se mostró en la Figura 5.4.4.

Diferentes criterios de análisis han sido propuestos por diversos investigadores, para poder minimizar la incertidumbre en la medida de las velocidades de ondas de corte (efecto de campo cercano). El análisis más común está relacionado con las señales digitalizadas en el tiempo dominante (tipo senoidal), lo que podría proporcionar información acerca de la frecuencia predominante ( $f_0$ ), la cual corresponde al primer modo de vibración (Cascante y Santamarina, 1997) y esto podría ayudar a minimizar el efecto de campo cercano. El análisis de las funciones de transferencia, que es la relación espectral entre el espectro de Fourier de la señal de salida y de entrada, es utilizado también comúnmente para identificar la frecuencia predominante ( $f_0$ ).

En el presente estudio, el principal trabajo es comprender los dos factores relacionados con la determinación de la velocidad de ondas de corte: el efecto de campo cercano y la función de transferencia. Para ello, se realizó un análisis numérico diseñado para (1) evaluar la frecuencia del sistema ( $f_0$ ) con funciones de transferencia y; (2) evaluar el efecto de campo cercano considerando la relación entre la longitud efectiva de pico a pico ( $L_s$ ) y la longitud de onda ( $\lambda$ ).

### **Frecuencia del sistema ( $f_0$ )**

Con los resultados reportados en el anexo B para todas las pruebas de la serie A y B, donde se aplica el método descrito anteriormente, se determinaron las funciones de transferencia (FT). El análisis consiste en determinar la frecuencia dominante del sistema ( $f_0$ ) observando la frecuencia correspondiente al máximo valor de la función

de transferencia. Es importante mencionar que se han determinado funciones de transferencia para diferentes frecuencias de excitación para cada esfuerzo de consolidación. La función de transferencia constituye una herramienta poderosa para el análisis de vibraciones en muchos sistemas mecánicos (Bendat y Piersol, 1993; Inman, 2001; Alvarado et al., 2012). Como se mostrara más adelante, tienen una importante aplicación para sistemas con elementos de flexión (elemento bender).

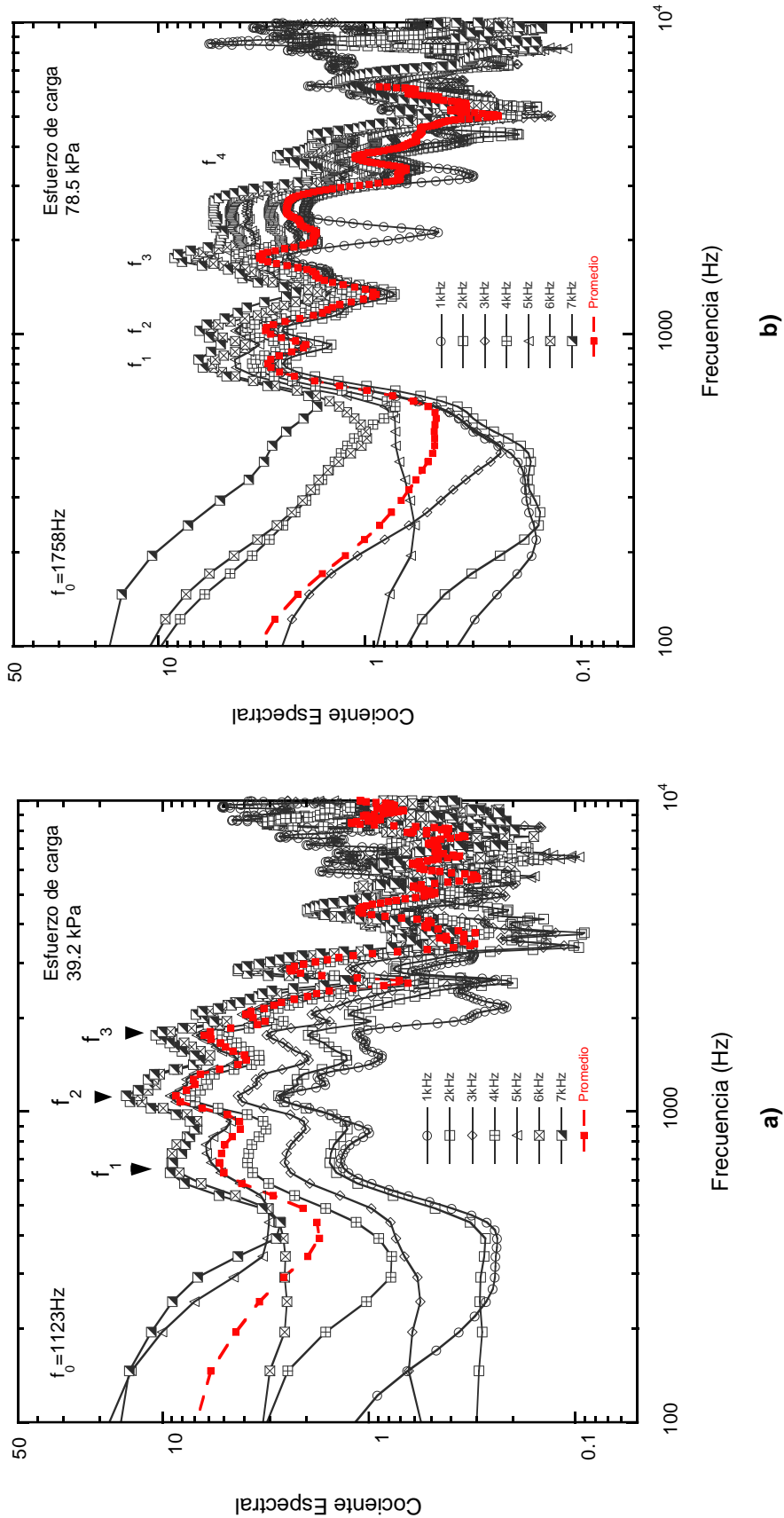
En la Figura 5.7.4a se muestran las FT calculadas a diferentes frecuencias de excitación usando una señal senoidal (que van de 1 a 7 kHz) para una arcilla de la Ciudad de México. Además, se observa que cada FT contiene una amplia gama de frecuencias y el factor de ganancia en relación al cociente espectral se incrementa al aumentar la frecuencia de excitación ( $f_{in}$ ). Dado que la señal recibida es fuertemente atenuada, como se observó en la Transformada Rápida de Fourier (FFT) de la Figura 5.6.1a, se han presentado los datos a una mayor escala para una mayor claridad. En la Figura 5.7.4a se observa también que las funciones de transferencia tienen una forma similar para todo el rango de frecuencias de excitación.

Se observa la existencia de múltiples modos (picos en la curva) en la componente del cociente espectral de la función de transferencia. En la Figura 5.7.4a no se observan muchos picos pero cuando se incrementa el esfuerzo efectivo se pueden observar numerosos picos, como se muestra en la Figura 5.7.4b ( $f_1$ ,  $f_2$ ,  $f_3$  y  $f_4$ ). Para el sistema conformado por el elemento flexión emisor, suelo y flexión receptor, la función de transferencia se puede medir, pero en la mayoría de los casos no es factible distinguir un único modo de vibración (Figura 5.7.4b) sino que se observa un pico máximo comprendido dentro de un cierto rango de frecuencias. En el caso de las Figuras 5.7.4a y 5.7.4b este rango de frecuencias se encuentra entre 1 y 2 kHz.

Con todas las otras funciones de transferencia que se presentan en el anexo B se ha obtenido una buena correspondencia entre la FT y la FFT ya que ninguno de los principales modos de vibración se ha perdido, aunque aparecen algunas diferencias que se imponen por el acoplamiento del elemento de flexión y el suelo y los dispositivos electrónicos periféricos utilizados en las mediciones (cables, filtros, amplificadores, convertidor A / D, etc.), como lo indican Fratta y Santamarina, (1996).

De los resultados se puede observar que la función de transferencia es única, y prácticamente igual en forma a la función de transferencia en otro rango de frecuencia (punto-a-punto), y por lo tanto el uso de pulsos senoidales como la señal de transmisión para el cálculo de la función de transferencia está justificado.

Finalmente, con la función de transferencia del sistema, y conociendo su forma analítica,  $V_s$  se puede derivar utilizando la ecuación 5.5.3 para las pruebas de las series A y B.



**Figura 5.7.4.-** Función de transferencia de un sistema elemento bender usando una arcilla de la ciudad de México (Serie B1) a) Esfuerzo efectivo de carga de 39.4 kPa y b) esfuerzo efectivo de carga 78.5 kPa.



### Relación entre la longitud efectiva de pico a pico ( $L_{tt}$ ) y longitud de onda ( $\lambda$ )

Para determinar las velocidades de ondas de corte experimentalmente es necesario medir la distancia del emisor al receptor y el tiempo de viaje de la onda transmitida. Se han mostrado diferentes métodos para estimar el tiempo de viaje, (Figura 5.4.5) los cuales pueden diferir hasta en un 50% de su valor medido. Algunos investigadores han estudiado estas dificultades en la interpretación del tiempo de viaje para poder minimizar el error, utilizando mediciones simultáneas con transductores de ondas P (Brignoli et al. 1996). Otros, como Viggiani y Atkinson (1995) introdujeron el análisis de los resultados basados en la frecuencia dominante mientras que Jovicic et al. (1996) sugirieron que los procedimientos en el dominio del tiempo puede ser eficientes si es que la señal de entrada es de buena calidad y está bien definida.

Una característica común de los trabajos mencionados fue la identificación del efecto de campo cercano como la principal causa de la incertidumbre en la determinación de las velocidades de ondas de corte en las pruebas con cristales piezoeléctricos. Sánchez Salinero et al. (1986) fue el primero en tratar este fenómeno realizando un análisis de sensibilidad sistemática de la propagación de un solo pulso senoidal en un medio elástico isótropo, y lo siguió el trabajo de Arulnathan et al. (1998) y Blewett et al. (1999) que introdujo nuevas consideraciones, pero los efectos de campo cercano todavía se consideran como el centro del problema (Kawaguchi et al., 2001).

Con el fin de separar el efecto de campo cercano (near field effect) en las señales recibidas Sánchez Salinero et al (1986) investigaron analíticamente las características de la onda de cuerpo e introdujeron el parámetro  $R_d$  el cual se define como:

$$R_d = \frac{L_s}{\lambda} \dots \dots \dots (5.7.1)$$

En donde todos los parámetros de esta expresión ya se definieron.

La influencia de la amplitud de la componente del campo cercano en la identificación de la primera llegada de las ondas de corte es menos significativa conforme  $R_d$  disminuye.

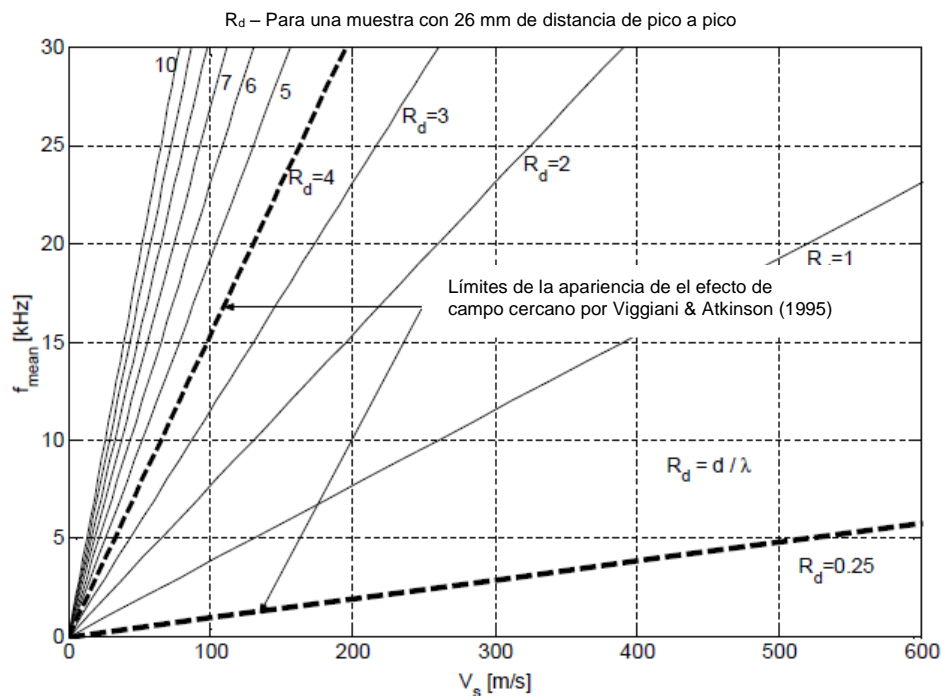


En la Figura 5.7.5 se muestran los valores de  $R_d$  obtenidos de la medición de ondas de corte. Sánchez Salinero et al. (1986) sugirieron que cuando  $R_d \geq 2$  y  $R_d < 4$  el efecto de campo cercano (near-field effect) puede ser ignorado. Viggiani y Atkinson (1995) especifican que el efecto de campo cercano puede esconder la llegada de las onda de corte cuando  $R_d$  está entre 0.25 y 4. Brignoli et al. (1996) obtienen que cuando  $R_d > 4$  o sólo 5 no existe campo cercano. Arroyo (2001) calcula un límite inferior para  $R_d = 0.625$ , en el cual el error del cálculo de  $V_s$  es menor que 5%.

Utilizando la ecuación 5.5.3 y remplazando en la ecuación 5.7.1 se deriva la siguiente expresión:

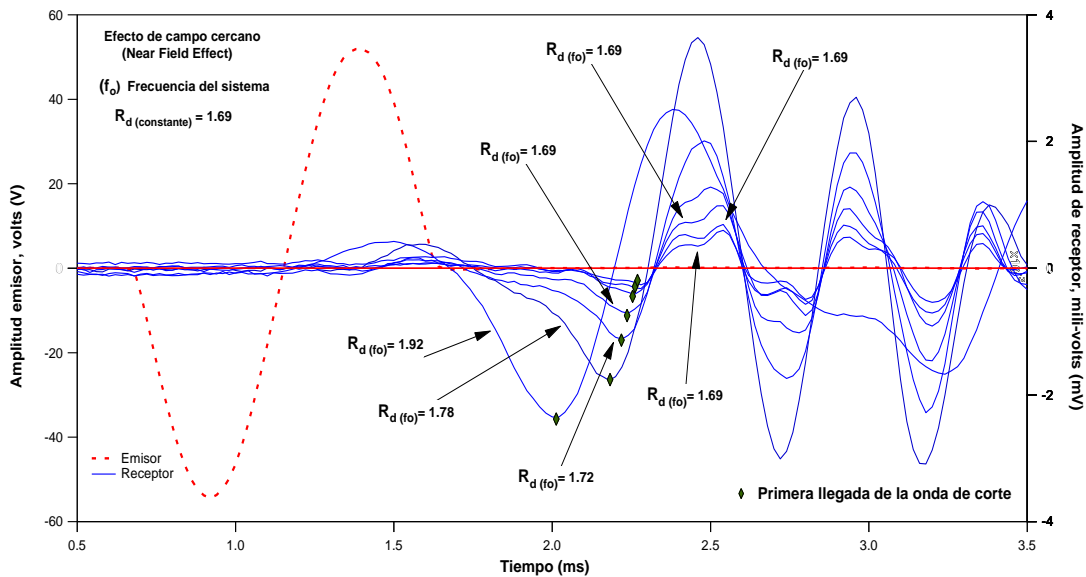
$$R_d = \frac{(L_s)f}{V_s} \dots \dots \dots (5.7.2)$$

Donde  $L_s$  es la distancia de recorrido de la onda,  $\lambda$  es la longitud de onda,  $f$  es la frecuencia de la señal de entrada de la onda S y  $V_s$  es la velocidad de ondas de corte.

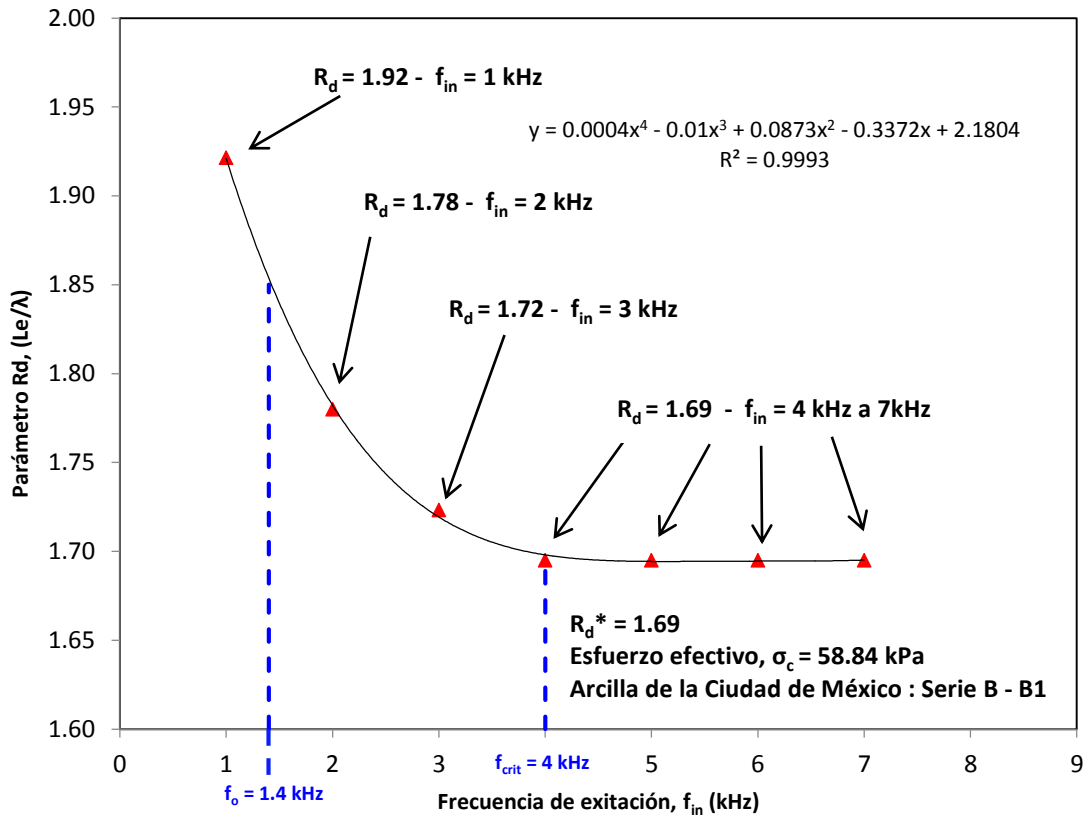


**Figura 5.7.5.-** Frecuencia principal de la señal recibida  $f_{mean}$  en función de  $V_s$  y  $R_d$  para muestras con 26 mm de distancia de pico a pico del elemento de flexión (Lutz Karl, 2004).

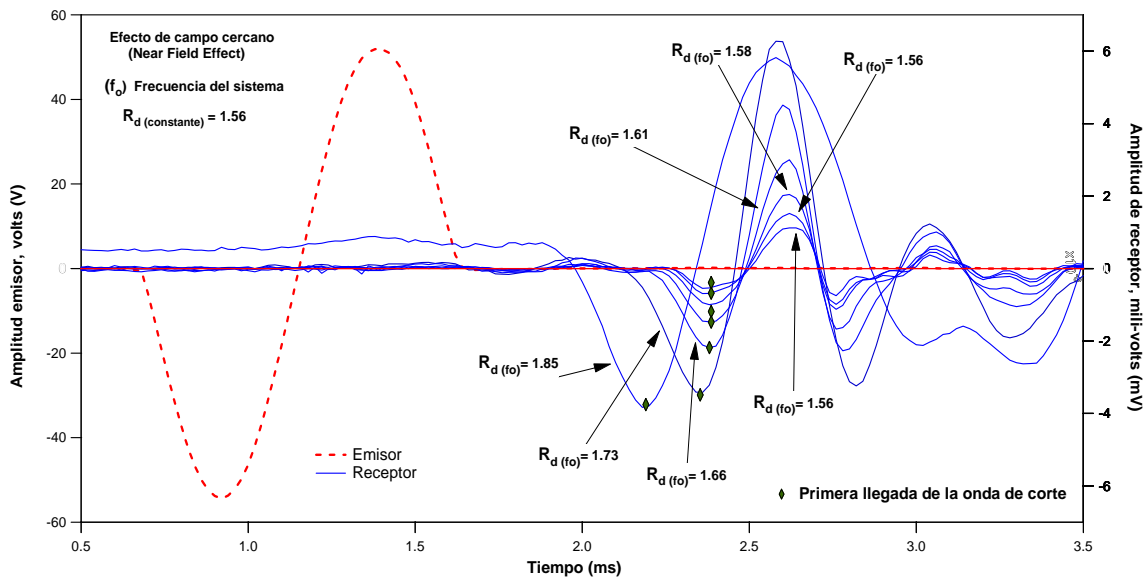
Para determinar el parámetro  $R_d$  (propuesto por Sánchez Salinero, 1996) en las pruebas de las series A y B se utilizó la ecuación 5.7.2 (los resultados se presentan en el anexo C). Con el fin de aplicar esta ecuación, se determinó el parámetro  $R_d$  utilizando la frecuencia fundamental del sistema ( $f_o$ ) y la velocidad de ondas de corte obtenido experimentalmente para cada frecuencia de excitación ( $f_{in}$ ), como se muestra en la Figura 5.7.6a. En la Figura 5.7.6b se observa que el valor de  $R_d$  varía conforme cambia la frecuencia de excitación ( $f_{in}$ ). En el caso ilustrado en dicha figura la frecuencia de excitación varió de 1 a 7 kHz para un esfuerzo efectivo aplicado de 58.8 kPa. Sin embargo, se observa que cuando la frecuencia excede 4 kHz, el valor de  $R_d$  ya no depende de la frecuencia y este se mantiene constante. A este valor constante de  $R_d$  lo denominaremos  $R_d^*$ , y a la frecuencia desde la cual  $R_d$  se mantiene constante la llamaremos  $f_{crit}$ . Adicionalmente se presentan dos ejemplos en los cuales se ha determinado el  $R_d^*$ , como se muestra en las Figuras 5.7.7a, 5.7.7b, 5.7.8a y 5.7.8b.



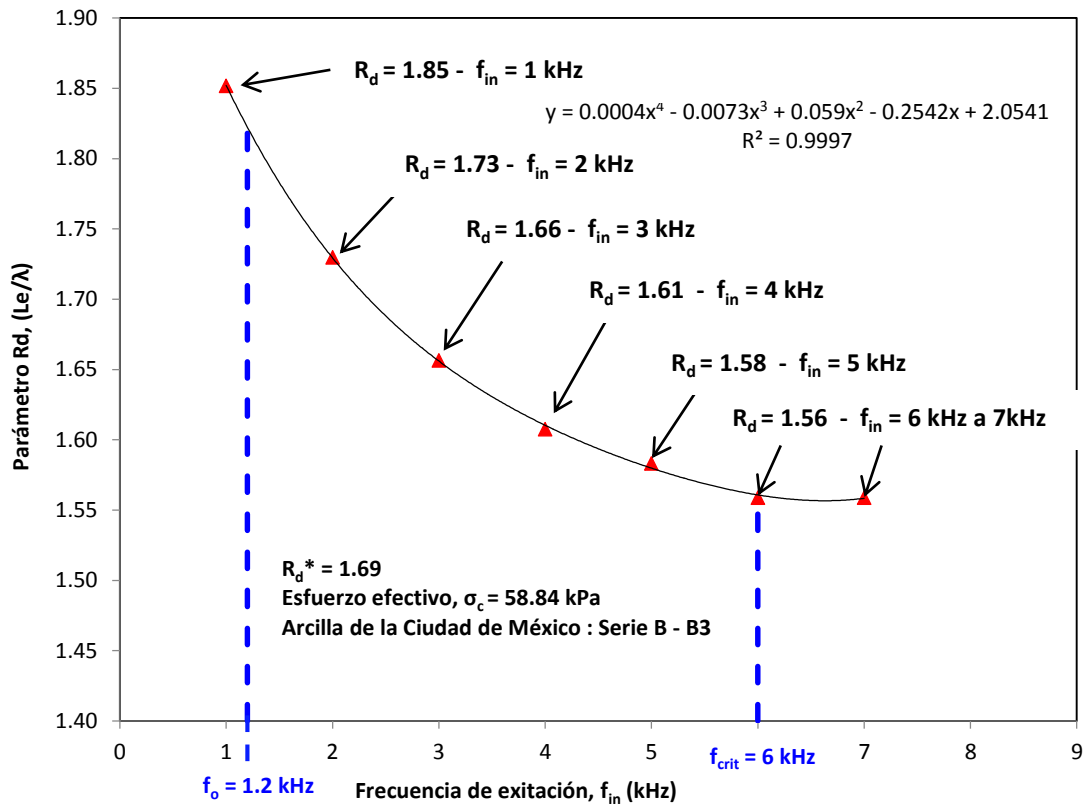
**Figura 5.7.6a.-** Variación del valor de  $R_d$  para la frecuencia del sistema obtenido de FT para muestra de la Ciudad de México de 55.2 mm de distancia de pico a pico del elemento de flexión para las ondas senoidales.



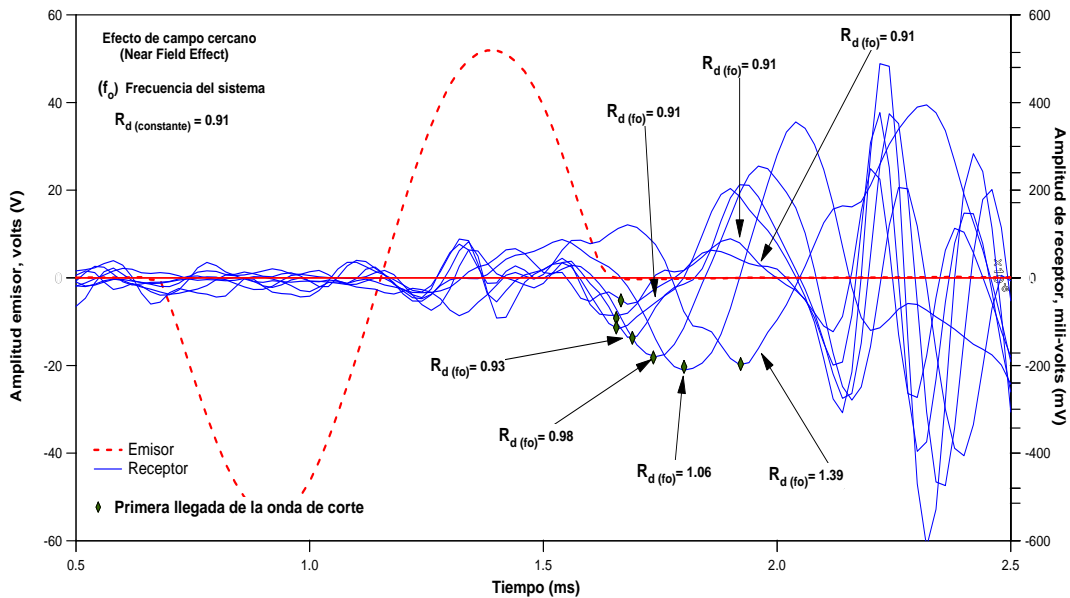
**Figura 5.7.6b.-** El valor de  $R_d^*$  determinado para una frecuencia crítica ( $f_{crit}$ ) de 4kHz en una muestra de la Ciudad de México de 55.2 mm de distancia de pico a pico del elemento de flexión.



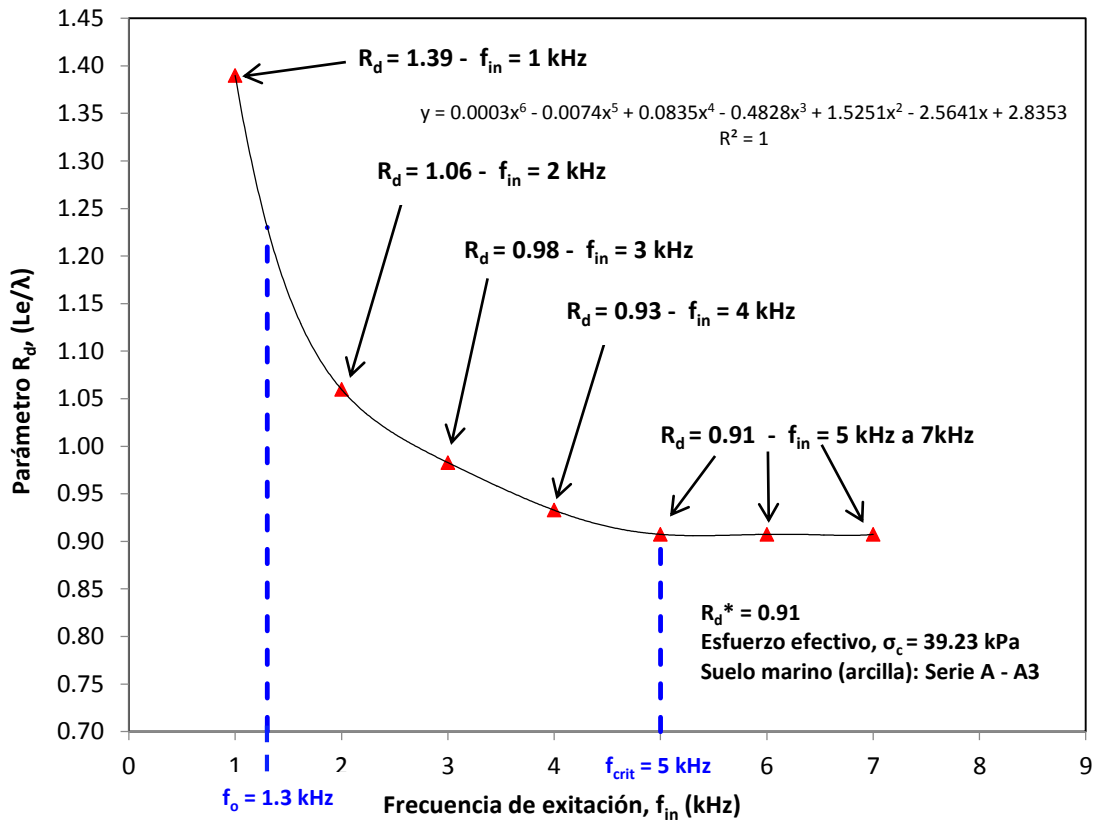
**Figura 5.7.7a-** Variación del valor de  $R_d$  para la frecuencia del sistema obtenido de FT para una muestra de la Ciudad de México de 55.2 mm de distancia de pico a pico del elemento de flexión para las ondas senoidales



**Figura 5.7.7b.-** El valor de  $R_d^*$  determinado para una frecuencia crítica ( $f_{crit}$ ) de 6kHz en una muestra de la Ciudad de México de 55.2 mm de distancia de pico a pico del elemento de flexión.



**Figura 5.7.8a-** Variación del valor de  $R_d$  para la frecuencia del sistema obtenido de FT para una muestra de suelo marino de 48 mm de distancia de pico a pico del elemento de flexión para las ondas senoidales



**Figura 5.7.8b.-** El valor de  $R_d^*$  determinado para una frecuencia crítica ( $f_{crit}$ ) de 5 kHz en una muestra de suelo marino de 48 mm de distancia de pico a pico del elemento de flexión.

### Determinación de las velocidades de corte

A partir de las observaciones anteriores se propone que el valor de  $V_s$  se obtenga determinando el valor constante de  $R_d^*$ , es decir el valor que se alcanza cuando  $R_d$  se vuelve independiente de la frecuencia. En la expresión 5.7.2 se utiliza el valor de  $f_0$  determinado a partir de las funciones de transferencia (ver Figuras 5.7.4a, 5.7.4b). Finalmente,  $V_s$  se obtiene despejándola de la ecuación 5.7.2 sustituyendo en ella los valores antedichos de  $V_s$  y  $f_0$ .

A partir de estas observaciones se propone que el valor de  $V_s$  se obtenga determinando el valor constante de  $R_d^*$ , es decir el valor que se alcanza cuando  $R_d$  se vuelve independiente de la frecuencia. En la expresión 5.7.2 se utiliza el valor de  $f_0$  determinado a partir de las funciones de transferencia (ver Figuras 5.7.4a, 5.7.4b).

Finalmente,  $V_s$  se obtiene despejándola de la ecuación 5.7.2 sustituyendo en ella los valores antedichos de  $V_s$  y  $f_o$ .

Con los pasos descritos anteriormente se determinan las velocidades de ondas de corte para las pruebas de las serie A y B (Tabla 5.7.3). En la Tabla 5.7.2 se muestran los resultados para una prueba de la serie B1 (arcilla de la Ciudad de México). En esta Tabla se observa el valor del parámetro  $R_d^*$  determinado para cada esfuerzo efectivo aplicado en la etapa de carga y descarga, así como la longitud de onda ( $\lambda_e$ ) determinado con los parámetros ya descritos, con ellos se determinaron las velocidades de ondas de corte para la frecuencia crítica ( $f_{crit}$ ). Asimismo, se observa que el error de la velocidad de onda de corte determinada con  $f_o$  y con  $f_{crit}$  es de 0%. Este análisis nos conduce a un mayor nivel de confianza en determinar la velocidad de ondas de corte como se muestra en la Tabla 5.7.3. Finalmente, en el anexo D se presentan las gráficas del comportamiento de las velocidades de ondas de corte en función del esfuerzo efectivo aplicado para la serie A y B.

**Tabla 5.7.2.-** Cálculo de la velocidad de ondas de corte con la frecuencia predominante ( $f_0$ ) y con la frecuencia crítica ( $f_{crit}$ ) para un ensayo de la serie B1 (arcilla de la Ciudad de México).

Etapa	Esfuerzo efectivo $\sigma_c$ kPa	Longitud específica de pico a pico (BE) $L_s$ mm	Parámetro $R_d = L_e/\lambda$ $R_d^*$	Longitud de onda $\lambda_e = L_e/R_d^*$ mm	Frecuencia del sistema (FT) $f_0$ kHz	Frecuencia crítica $f_{crit}$ kHz	Velocidad de onda de corte		Error $E_r = \frac{V_{s-f_0} - V_{s-f_{crit}}}{V_{s-f_0}}$ %
							con $f_0$ $V_s = \lambda_e f_0$ m/s	con $f_{crit}$ $V_s = L_e/\Delta t$ m/s	
Carga	19.6	53.49	1.48	36.17	1.074	7	38.8	38.8	0
	39.2	52.35	1.48	35.40	1.123	6	39.7	39.7	0
	58.8	48.38	1.69	28.54	1.416	4	40.4	40.4	0
	78.5	44.30	1.79	24.78	1.758	4	43.6	43.6	0
	117.7	40.50	2.10	19.30	2.393	5	46.2	46.2	0
Descarga	78.5	40.52	1.72	23.62	2.002	4	47.3	47.3	0
	39.2	40.82	1.71	23.83	1.953	5	46.5	46.5	0
	19.6	41.36	1.78	23.18	1.904	4	44.1	44.1	0

BE = Elemento de flexión (elemento bender)  
 $R_d^*$  = Parámetro que no depende de la frecuencia  
 $f_{crit}$  = frecuencia crítica de excitación  
 $V_{s-f_0}$  = Velocidad obtenida con la frecuencia  $f_0$   
 $V_{s-crit}$  = Velocidad obtenida con frecuencia crítica  $f_{crit}$   
 $E_r$  (%) = Error entre las velocidades

**Tabla 5.7.3.-** Resultados de las velocidades de ondas de corte para los ensayos de la serie A (suelo marino) y la serie B (arcilla de la Ciudad de México).

Etapa	Esfuerzo efectivo	Serie A			Serie B		
		A1	A2	A3	B1	B2	B3
-	$\sigma_c$	Velocidad de onda de corte $V_s$					
-	kPa	m/s					
Carga	19.6	77.1	64.1	48.9	38.8	54.2	38.4
	39.2	117.3	67.0	58.1	39.7	56.3	39.5
	58.8	128.4	89.5	63.8	40.4	56.7	40.3
	78.5	143.5	104.6	65.9	43.6	58.6	41.6
	98.1	-	-	-	-	61.4	41.9
	117.7	-	-	-	46.2	-	-
	147.1	150.9	146.2	69.2	-	-	-
	196.1	171.7	198.4	76.9	-	-	-
294.2	-	-	85.1	-	-	-	
Descarga	147.1	171.9	181.1	85.5	-	-	-
	78.5	142.6	181.1	-	47.3	62.1	-
	58.8	-	-	75.2	-	60.8	42.4
	39.2	124.3	167.1	64.0	46.5	59.7	42.1
	19.6	109.1	154.7	54.5	44.1	58.5	40.7
Recarga	58.8	-	-	-	-	59.6	40.6
	98.1	-	-	-	-	63.8	42.6
	117.7	-	-	-	-	65.5	43.7



## CAPÍTULO 6: CONCLUSIONES

Una de las aportaciones de la presente investigación fue la implementación de un consolidómetro mecánico con cristales piezoeléctricos para realizar ensayos en laboratorio para medir las  $V_p$  y  $V_s$  en un espécimen de suelo. Con respecto al desarrollo de los trabajos experimentales, a continuación se plantean algunas reflexiones que se pueden formular a partir de ellos:

- La ubicación de los cristales piezoeléctricos a un extremo y no al centro de las bases del consolidómetro mecánico, no significó un problema para obtener las señales emitidas y recibidas adecuadas para el análisis, ya que se siguió el esquema similar desarrollado por Fam y Santamarina (1995).

Es importante indicar que el uso de los cristales piezoeléctricos para especímenes de suelo de diámetro y altura de 69 mm y 80 mm, respectivamente, dictaminaron la elección del tipo de elementos de flexión y compresión como lo indica la Tabla 3.3.1 del Capítulo 3. El utilizar cristales piezoeléctricos como un instrumento de emisión y recepción de ondas a través del espécimen de suelo contribuye a una alternativa adecuada para medir las velocidades de ondas de compresión y de corte en la cual las ondas generados con cristales piezoeléctricos inducen a la muestra distorsiones muy pequeñas, haciendo de esta técnica una prueba no destructiva.

- En esta investigación se realizó la instrumentación en serie recomendada por Lee y Santamarina (2004) para evitar el problema de interferencia, llamada *Cross-Talk* (nombre del investigador), obteniendo señales adecuadas para indicar el tiempo de llegada de las ondas de manera visual.
- Como parte de la instrumentación es importante realizar una protección en condiciones de humedad del suelo y los cristales piezoeléctricos debido al contacto entre ellos y a las condiciones de esfuerzo que estarán sometidos.

- Para facilitar la identificación de los puntos de arribo y análisis de la onda emisora y receptora se utilizó la onda senoidal, y se identificaron señales bien definidas en un rango frecuencia de excitación de 1 a 7kHz y para los elementos de compresión de 20 a 80 kHz.
- Se observó que las Vs medidas con los elementos de flexión en los especímenes de suelo (serie A y B) están relacionadas linealmente con el esfuerzo efectivo aplicado durante la etapa de carga, descarga y recarga. Sin embargo, el estudio detallado de este efecto cae fuera de los alcances de esta tesis.
- Es importante elaborar un procedimiento detallado del proceso de instrumentación y montaje de los cristales piezoeléctricos, con el objetivo de fabricar cristales piezoeléctricos instrumentados que garanticen un buen funcionamiento y por ende una buena señal de recepción.

En cuanto los resultados del trabajo experimental, a continuación se enumeran las siguientes conclusiones:

- Durante la prueba de consolidación, las  $V_p$  medidas con los elementos de compresión en los especímenes de suelos (serie A y B) resultaron ser insensibles al incremento de esfuerzo. Esto se debe que los especímenes de suelo se encontraban saturados, por lo que, las  $V_p$  viajaban principalmente a través del agua (fase líquida del suelo). Por ello, se puede definir que hay una correcta relación entre las  $V_p$  y el grado de saturación ( $S_r$ ) de los especímenes de suelo ensayados, como se puede observar en la siguiente Tabla:

Pruebas	Serie	$V_p$ (m/s)	Grado de saturación ( $S_r$ ) (%)
Suelo marino	A1	1573	97.0
	A2	1529	76.2
	A3	1514	84.5
Arcilla de la Ciudad de México	B1	1424	79.8
	B2	1387	59.4
	B3	1500	93.5

- En la transmisión de las ondas que viajan a través del espécimen se observó que los elementos de flexión tienen una mayor sensibilidad que los elementos de compresión. Esto se puede observar al determinar las velocidades de ondas de corte y compresión (Anexo A). Por ello, se utilizó la función de transferencia (FT) como una herramienta poderosa para el análisis del sistema conformado por el elemento emisor, el suelo y elemento receptor (elementos de flexión). Este análisis ha tenido una buena correspondencia entre FFT y FT ya que ningún modo se ha perdido y se puede obtener la frecuencia predominante del sistema ( $f_o$ ) como ha sido analizado por diferentes investigadores.

- Es importante realizar el análisis del efecto de campo cercano (near field effect) propuesto por Sánchez Salinero (1986) debido a la incertidumbre en la determinación de las velocidades de ondas de corte. Este efecto se ha observado en la Tabla 5.7.1 del capítulo 5 donde se indica que las  $V_s$  varían de 0 a 30 % para frecuencias de excitación ( $f_{in}$ ) menores a 3 kHz y de 0 a 9% para  $f_{in}$  mayores a 3 kHz. Encontrándose una variación muy alta para estimar las velocidades de ondas de corte.
- En esta investigación se analizó el efecto de campo cercano con la determinación del parámetro  $R_d$ , propuesto por Sánchez Salinero (1986). Se ha encontrado que este parámetro  $R_d$  varía conforme cambia la frecuencia de excitación ( $f_{in}$ ), observándose que el valor de  $R_d$  disminuye conforme aumenta la  $f_{in}$  y después de cierta frecuencia ya no depende de la  $f_{in}$  sino que se mantiene constante. A partir de estas observaciones se ha propuesto que el valor de  $V_s$  se obtenga determinando el valor constante de  $R_d^*$ , y la frecuencia del sistema ( $f_o$ ). Esta propuesta se ha comparado con las  $V_s$  determinadas con la frecuencia crítica ( $f_{crit}$ ) y se ha obtenido un mayor nivel de confianza para reportar correctamente la determinación de las  $V_s$ .

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Alvarado, G & Coop M. R. (2012). "On the performance of bender elements in triaxial test". *Géotechnique* 62, No. 1, 1-17.
2. Arulnathan, R., Boulanger. R. W., and Riemer, M. F., "Analysis of Bender Element Tests," *Geotechnical Testing Journal*, GTJODJ. Vol. 21. No. 2, June 1998, pp. 120-131.
3. Arroyo, M., Muir Wood, D, & Greening P.P. (2003), "*Source near-field effects and pulse test in soil samples*", *Géotechnique* 53, No 3, pp 337-345
4. Arroyo, M., D. Muir Wood, P. D. Greening, L. Medina, and J. Rio. 2006. Effects of sample size on bender-based axial G<sub>0</sub> measurements. *Geotechnique* 56, no. 1: 39–52.
5. ASTM Standard D 2845-95, 1997a: Testing Materials, Laboratory Determination of Pulse Velocities and Ultrasonic Elastic Constants of Rock, Annual Book of ASTM Standards, ASTM International, West Conshohocken, PA.
6. AKI K., (1957) "Space and time spectra of stationary stochastic waves with special reference to microtremors", *Bull. Erthq. Res. Inst.*, pp 415-456.
7. Bartake PP, Patel A, Singh DN (2008) Instrumentation for bender element testing of soils. *Int J Geotech Eng* 2(4):395–405
8. Brignoli, E., Gotti, M, and Stokoe, K., H. II, (1996), "*Measurement of Shear Waves in Laboratory Specimens by Means of Piezoelectric Transducers*" *Geotechnical Testing Journal*, GTJODJ, Vol. 19, No4, December, pp 384-397.
9. Camacho et at (2012). "A procedure to calibrate and perform the bender element test". Universidad Militar Nueva Granda.

10. Clayton, C. R. I., Theron, M. & Best, I. (2004). The measurement of vertical shear-wave velocity using side-mounted bender elements in the triaxial apparatus. *Geotechnique* 54, No. 7, 495–498, doi: 10.1680/geot.2004.54.7.495.
11. Comina, C., S. Foti, G. Musso, and E. Romero. 2008. EIT oedometer: an advanced cell to monitor spatial and time variability in soil. *ASTM Geotechnical Testing Journal* 31, no. 5: 404–412.
12. Dyvik, R. and Madshus, C., 1985, *Lab Measurements of  $G_{max}$  Using Bender Elements*, Norwegian Geotechnical Institute Publication, No. 161, Oslo.
13. da Fonseca, V., C. Ferreira, and M. Fahey. 2009. A Framework Interpreting Bender Element Tests, Combining Time-Domain and Frequency-Domain Methods. *ASTM Geotechnical Testing Journal* 32, no. 2: 91–107.
14. Deniz, O., 2008, “Bender Elements and Bender Disks for Measurement of Shear and Compressional Wave Velocities in Large Sand Specimens,” M.S. thesis, Northeastern University, Boston, MA.
15. Fam, M. and Santamarina, J.C. (1997). “*A Study of Consolidation Using Mechanical and Electromagnetic Waves*”. *Geotechnique*, vol. 47, no. 2, pp. 203-216
16. Fam, M.A., and Santamarina, J.C., (1995). “*Study of geoprocesses with complementary mechanical and electromagnetic wave measurements in an oedometer*”. *Geotechnical Testing Journal*, 18(3): 307– 314. doi:10.1520/GTJ10999J.
17. Flores, E. et al (2009), “Texcoco Lake seismic response. Results from strong motion records”. *Earthquake Engineering Magazine* No. 81 37-51.
18. Flores G., M (2013). “Microspección de ondas dinámicas en muestras de suelo en una cámara triaxial”. Tesis de doctorado, F.I., Universidad Nacional Autónoma de México.
19. Gajo, A., Fedel, A., and Mongiovi, L., 1997, “Experimental Analysis of the Effects of Fluid-Solid Coupling on the Velocity of Elastic Waves in Saturated Porous Media,” *Geotechnique*, Vol. 47, No. 5, pp. 993–1008.

20. Gohl, W. B., and Finn, W. D. L., 1991, "Use of Piezoelectric Bender Elements in Soil Dynamics Testing," Recent Advances in Instrumentation, Data Acquisition, and Testing in Soil Dynamics, ASCE Special Publication No. 29, ASCE, New York, pp. 118–133.
21. Greening, P. D. & Nash, D. F. T. (2004). Frequency domain determination of  $G_0$  using bender elements. *Geotech. Test. J.* 27, No. 3, 288–294.
22. Jovicic, V., Coop M. R., and Simic, M., 1996, "Objective Criteria for Determining  $G_{max}$  from Bender Element Tests," *Géotechnique*, Vol. 46, No. 2, pp. 357–362.
23. Jyant Kumar\*, B.N. Madhusudhan. (2010). A note on the measurement of travel times using bender and extender elements. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 30 (2010) 630-634.
24. KRAMER S. L., (1996) "Geotechnical Earthquake Engineering", Prentice Hall, New York.
25. Lawrence, F. V., 1963, Propagation of Ultrasonic Waves Through Sand, Research Report R63-08, Boston: Massachusetts Institute of Technology.
26. Lawrence, F. V., 1965, Ultrasonic Shear Wave Velocity in Sand and Clay, Research Report R65-05, Boston: Massachusetts Institute of Technology.
27. Lee, J. S. and Santamarina, J. C., 2004-2005, "Bender Elements: Performance and Signal Interpretation," *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, Vol. 131, No. 9, pp. 1063–1070.
28. Leong, E. C., Yeo, S. H., and Rahardjo, H., 2005, "Measuring Shear Wave Velocity Using Bender Elements," *Geotech. Test. J.*, Vol. 28, No. 5, pp. 488–498.
29. LO PRESTI D.C.F. et. al (1993), "Maximun shear modulus measurement using bender element in oedometer tests", *rivista italiana di geotecnica*.
30. Lutz Karl. (2004-2005), "Dynamic Soil Properties out of SCPT and Bender Element Tests with Emphasis on Material Damping". Ghent University Faculty of Engineering Department of Civil Engineering (TW15) Laboratory of Soil Mechanics.

31. Rio, J. (2006). Advances in laboratory geophysics using bender elements. PhD thesis, University College London.
32. Santamarina, J. C. and Fam, M. A., 1997, "Discussion on Interpretation of Bender Element Tests," *Geotechnique*, Vol. 47, No. 4, pp. 873–875.
33. Santamarina, J.C, and Fam, MA, (1997), "Interpretation of Bender Elements", Discussion, *Geotechnique*, Vol. 47, No.4, pp. 873-877.
34. Santamarina, J.C, Klein,K.,and Fam, MA, (2001), "Soils and waves", John Wiley & Sons LTD, pp. 488.
35. Sanchez A., J.A. (2013). "Determinación de la relación de Poisson dinámica en suelos granulares utilizando cristales piezoeléctricos y mediciones locales". Tesis de Maestría, F.I., Universidad Nacional Autónoma de México.
36. Sanchez-Salineró, I., Roesset, J.M., and Stokoe, K.H., II. (1986). "*Analytical studies of body wave propagation and attenuation*". Civil Engineering Department, The University of Texas at Austin, Austin, Tex. Geotechnical Engineering Report No.GR86-15.
37. Shirley, D. J., 1978, "An improved shear wave transducer," *Journal of Acoustic Society of America*, Vol. 63, No. 5, pp. 1643–1645.
38. Shirley, D.J. 1978. An improved shear wave transducer. *The Journal of the Acoustical Society of America* 63:1643.
39. Shirley, D. J. and Hampton, L. D., 1978, "Shear Wave Measurements in Laboratory Sediments," *Journal of Acoustic Society of America*, Vol. 63, No. 2, pp. 607–613.
40. Shibuya, S., Hwang, S.C. and Mitachi, T. 1997a. Elastic shear modulus of soft clays from shear wave velocity measurement, *Géotechnique* 47(3): 593-601.
41. Schultheiss, P. J. (1981). Simultaneous measurements of P and S wave velocities during conventional laboratory soil testing procedures. *Marine Geotech.* 4, No. 4, 343–367.



42. Thomann, J. G. and Hryciw, R. D., 1990, "Laboratory Measurement of Small Strain Shear Modulus under  $k_0$  Conditions," *Geotech. Test. J.*, Vol. 13, No. 2, pp. 97–105.
43. Viggiani, G., Atkinson, JH, (1995), "*Interpretación of bender elements tests*", *Géotechnique* 45, No 1, pp 149-154.
44. Wang YH, Lo KF, Yan WM, Dong XB (2007) Measurement biases in the bender element test. *J Geotech Geoenv Eng* 133(5):564–574
45. Yamashita, S., T. Kawaguchi, Y. Nakata, T. Mikami, T. Fujiwara, and S. Shibuya. 2009. International Parallel Test on the Measurement of  $G_{max}$  Using Bender Elements Organized by TC-29. *Soils and foundations* 49, no. 4: 631-650.





**Anexo A: Curvas de velocidades de ondas de corte compresión versus el esfuerzo  
efectivo para la serie A y B**

---





**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**  
 POSGRADO DE INGENIERÍA CIVIL

INSTITUTO DE INGENIERÍA  
 LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS

Instituto de Ingeniería UNAM, Circuito Escolar s/n, Ciudad Universitaria, Delegación Coyoacán, México D.F., C.P. 04510, Teléfono +52(55)5623-3600

INFORME : CM-AP15-M51  
 SOLICITANTE : PEMEX  
 PROYECTO : LAKACH  
 UBICACION : 60 km al oeste de Alvarado Veracruz en el Golfo de México  
 FECHA : Julio, 2012

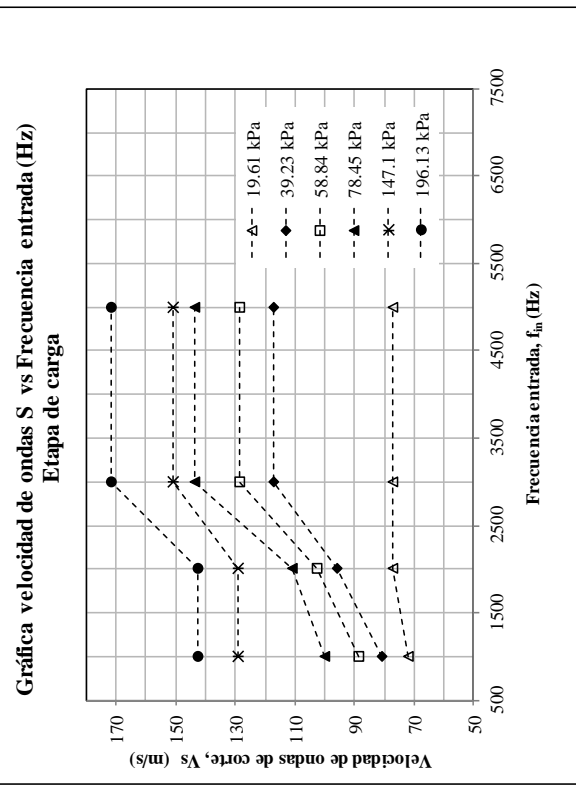
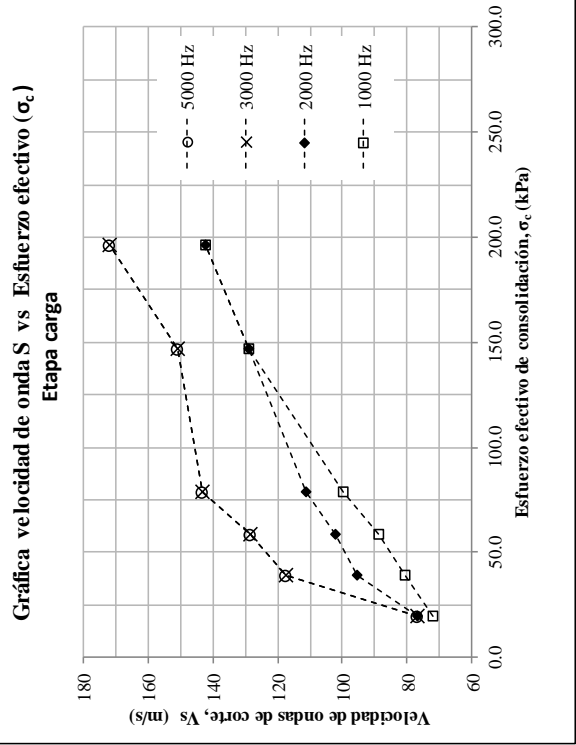
Sondaje : AP-15  
 Muestra : M - 51  
 Profundidad (m) : 17.07 - 17.59 m  
 Clasific. (S.U.C.S.) : CH  
 Estado : Inalterado

**CURVAS DE VELOCIDADES ONDAS (Vs) - ETAPA DE CARGA**

DATOS DEL ESPECIMEN	
Altura (cm)	6.58
Diámetro (cm)	6.93
Gravedad de Sólidos ( $G_s$ )	2.77

RESULTADOS	
Presión de Preconsolidación (PC)	84.87 kPa

Contenido de agua inicial (%)	65.8
Contenido de agua final (%)	52.6
Saturación inicial (%)	97.0
Saturación final (%)	98.8



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**  
 POSGRADO DE INGENIERÍA CIVIL

INSTITUTO DE INGENIERÍA  
**LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS**

Instituto de Ingeniería UNAM, Circuito Escolar s/n, Ciudad Universitaria, Delegación Coyoacán, México D.F., C.P. 04510, Teléfono +52(55)5623-3600

INFORME : CM-API5-M51  
 SOLICITANTE : PEMEX  
 PROYECTO : LA KACH  
 UBICACION : 60 km al oeste de Alvarado Veracruz en el Golfo de México  
 FECHA : Julio, 2012

Sondaje : AP-15  
 Muestra : M - 51  
 Profundidad (m) : 17.07 - 17.59 m  
 Clasific. (S.U.C.S.) : CH  
 Estado : Inalterado

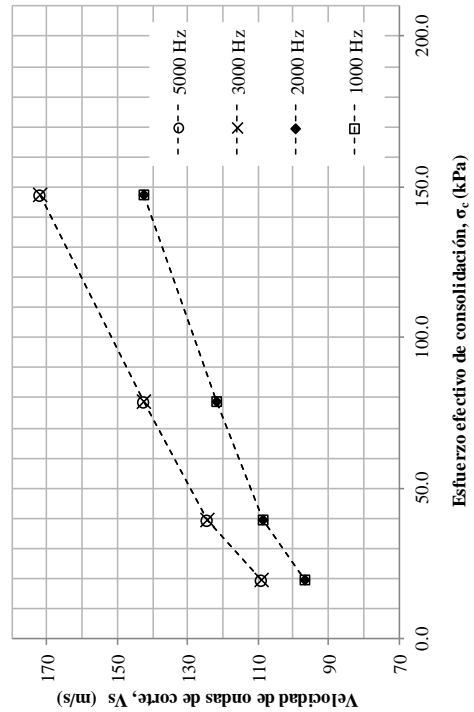
**CURVAS DE VELOCIDADES ONDAS (Vs) - ETAPA DE DESCARGA**

DATOS DEL ESPECIMEN	
Altura (cm)	6.58
Diámetro (cm)	6.93
Gravedad de Sólidos ( $G_s$ )	2.77

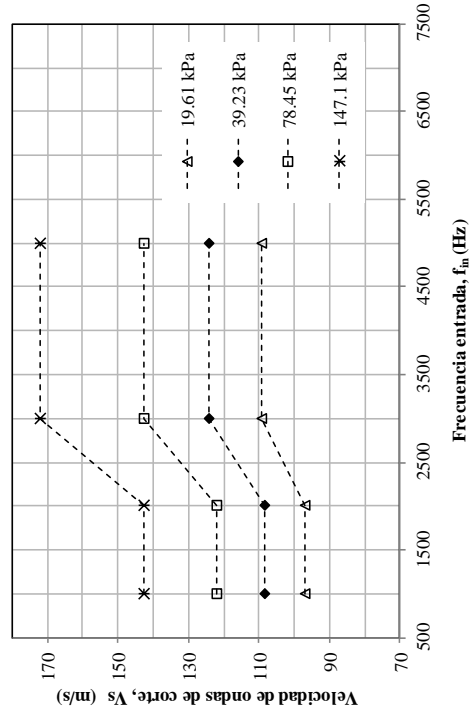
RESULTADOS	
Presión de Preconsolidación (PC)	84.87 kPa

Contenido de agua inicial (%)	65.8
Contenido de agua final (%)	52.6
Saturación inicial (%)	97.0
Saturación final (%)	98.8

**Gráfica velocidad de onda S vs Esfuerzo efectivo ( $\sigma_c$ )  
 Etapa descarga**



**Gráfica velocidad de ondas S vs Frecuencia entrada (Hz)  
 Etapa de descarga**





**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**  
 POSGRADO DE INGENIERÍA CIVIL

INSTITUTO DE INGENIERÍA  
**LABORATORIO MECÁNICA DE SUELOS**

Instituto de Ingeniería UNAM, Circuito Escolar s/n, Ciudad Universitaria, Delegación Coyoacán, México D.F., C.P. 04 510, Telé fono +52 (55) 5623-3600

INFORME : CM-API5-M51  
 SOLICITANTE : PEMEX  
 PROYECTO : LA KACH  
 UBICACION : 60 km al oeste de Alvarado Veracruz en el Golfo de México  
 FECHA : Julio, 2012

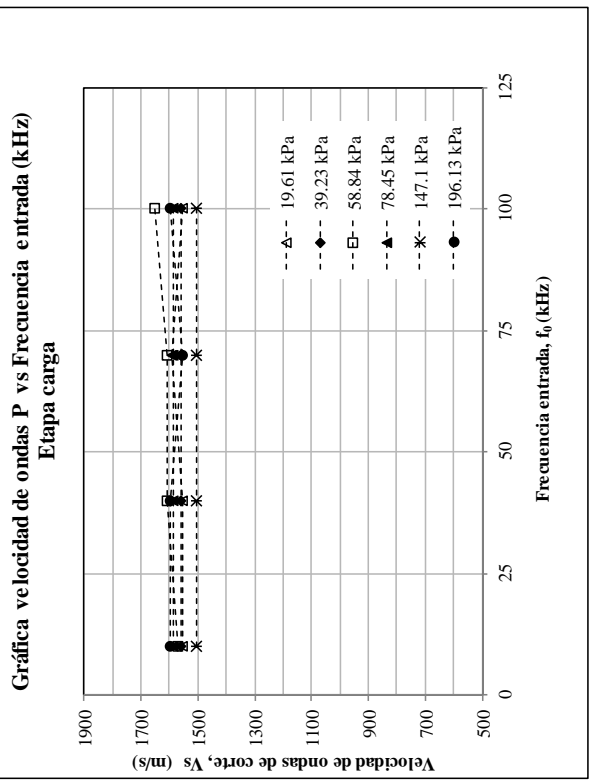
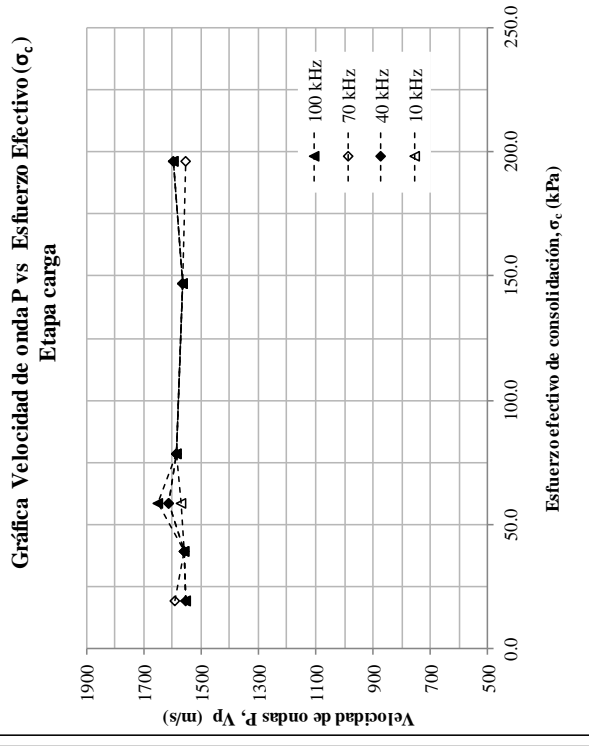
Sondaje : AP-15  
 Muestra : M - 51  
 Profundidad (m) : 17.07 - 17.59 m  
 Clasific. (S.U.C.S.) : CH  
 Estado : Inalterado

**CURVAS DE VELOCIDADES ONDAS (Vp) - ETAPA CARGA**

DATOS DEL ESPECIMEN	
Altura (cm)	6.58
Diámetro (cm)	6.93
Gravedad de Sólidos ( $G_s$ )	2.77

RESULTADOS	
Presión de Preconsolidación (PC)	84.87 kPa

Contenido de agua inicial (%)	65.8
Contenido de agua final (%)	52.6
Saturación inicial (%)	97.0
Saturación final (%)	98.8



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**  
 POSGRADO DE INGENIERÍA CIVIL

**INSTITUTO DE INGENIERÍA**  
**LABORATORIO MECÁNICA DE SUELOS**

Instituto de Ingeniería UNAM, Circuito Escolar s/n, Ciudad Universitaria, Delegación Coyoacán, México D.F., C. P. 04510, Telé fono +52(55) 5 623-3600

INFORME : CM-AP15-M51  
 SOLICITANTE : PEMEX  
 PROYECTO : LAKACH  
 UBICACION : 60 km al oeste de Alvarado Veracruz en el Golfo de México  
 FECHA : Julio, 2012

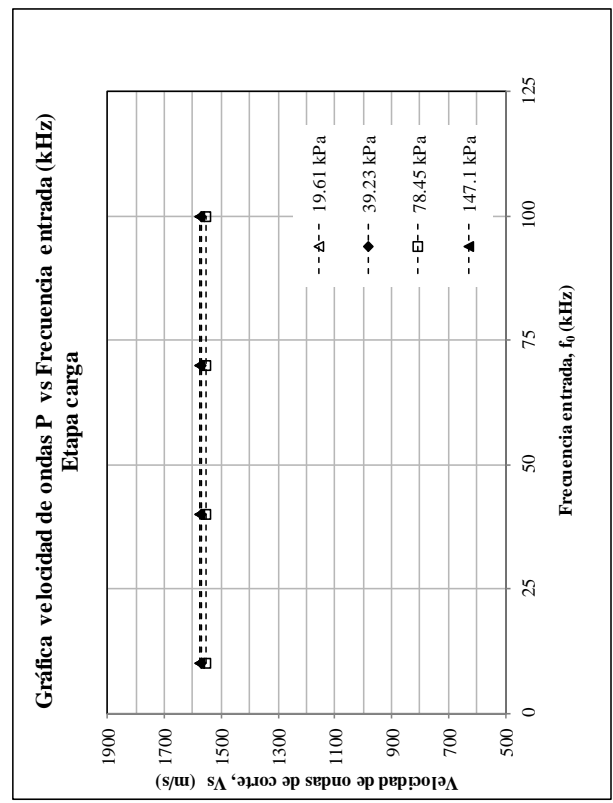
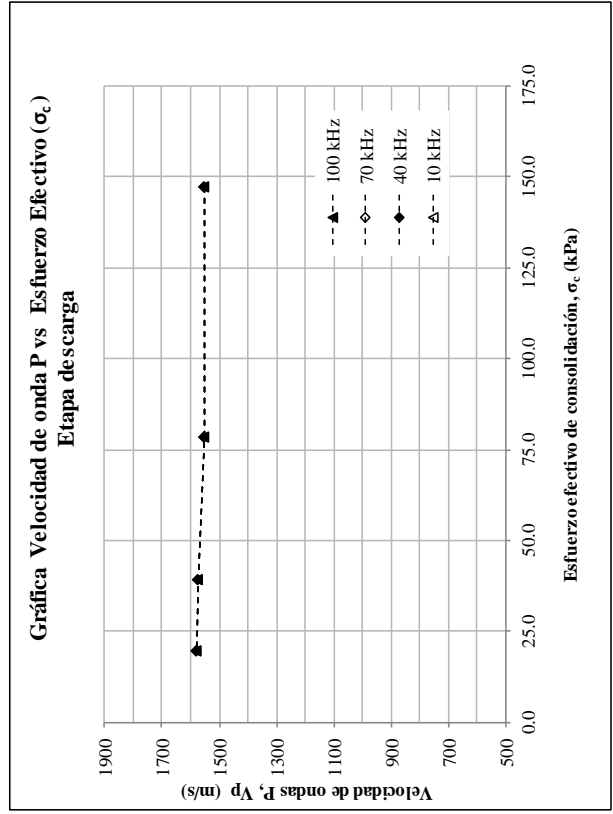
Sondaje : AP-15  
 Muestra : M - 51  
 Profundidad (m) : 17.07 - 17.59 m  
 Clasific. (S.U.C.S.) : CH  
 Estado : Inalterado

**CURVAS DE VELOCIDADES ONDAS (Vp) - ETAPA DESCARGA**

DATOS DEL ESPECIMEN	
Altura (cm)	6.58
Diámetro (cm)	6.93
Gravedad de Sólidos ( $G_s$ )	2.77

RESULTADOS	
Presión de Preconsolidación (PC)	84.87 kPa

Contenido de agua inicial (%)	65.8
Contenido de agua final (%)	52.6
Saturación inicial (%)	97.0
Saturación final (%)	98.8







**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**  
 POSGRADO DE INGENIERÍA CIVIL

INSTITUTO DE INGENIERÍA  
**LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS**

Instituto de Ingeniería UNAM, Circuito Escolar s/n, Ciudad Universitaria, Delegación Coyoacán, México D.F., C.P. 04510, Teléfono +52(55)5623-3600

INFORME : CM-AP15-M71  
 SOLICITANTE : PEMEX  
 PROYECTO : LAKACH  
 UBICACION : 60 km al Noroeste de Alvarado Veracruz en el Golfo de México  
 FECHA : Agosto, 2012

Sondaje : AP-15  
 Muestra : M - 71  
 Profundidad (m) : 25.71 m  
 Clasific. (S.U.C.S.) : CH  
 Estado : Inalterado

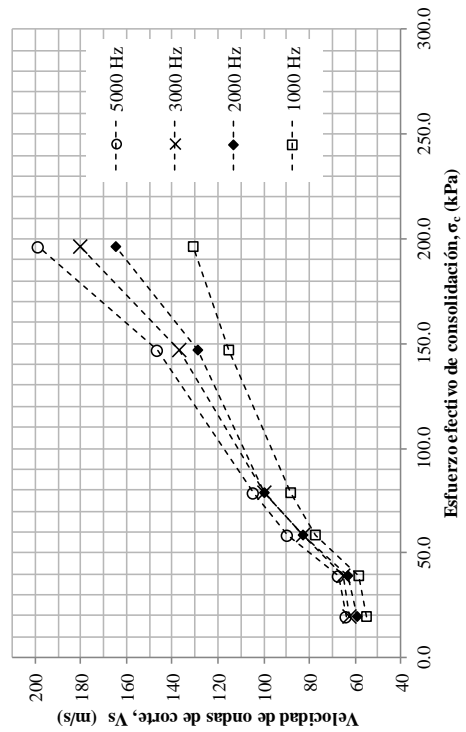
**CURVAS DE VELOCIDADES ONDAS (Vs) - ETAPA DE CARGA**

DATOS DEL ESPECIMEN	
Altura (cm)	7.00
Diámetro (cm)	6.93
Gravedad de Sólidos ( $G_s$ )	2.76

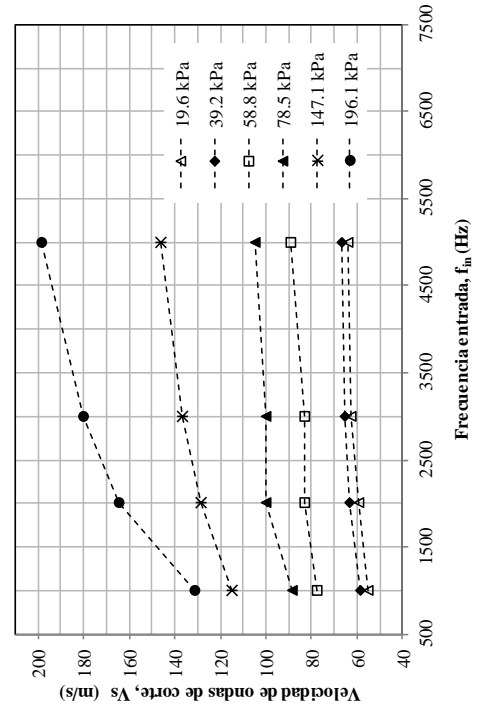
RESULTADOS	
Presión de Preconsolidación (PC)	150.43 KPa

Contenido de agua inicial (%)	64.2
Contenido de agua final (%)	57.3
Saturación inicial (%)	76.2
Saturación final (%)	81.6

**Gráfica velocidad de onda S vs Esfuerzo efectivo ( $\sigma_c$ )**  
 Etapa carga



**Gráfica velocidad de ondas S vs Frecuencia entrada (Hz)**  
 Etapa de carga



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**  
 POSGRADO DE INGENIERÍA CIVIL

INSTITUTO DE INGENIERÍA  
**LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS**

Instituto de Ingeniería UNAM, Circuito Escolar s/n, Ciudad Universitaria, Delegación Coyoacán, México D.F., C.P. 04510, Teléfono +52(55)5623-3600

INFORME : CM-API5-M71  
 SOLICITANTE : PEMEX  
 PROYECTO : LAKACH  
 UBICACION : 60 km al Noreste de Alvarado Veracruz en el Golfo de México  
 FECHA : Agosto, 2012

Sondaje : AP-15  
 Muestra : M - 71  
 Profundidad (m) : 25.71 m  
 Clasific. (S.U.C.S.) : CH  
 Estado : Inalterado

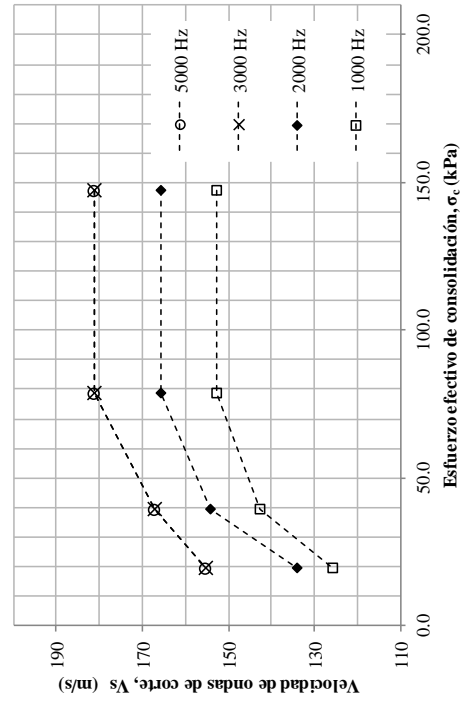
**CURVAS DE VELOCIDADES ONDAS (Vs) - ETAPA DE DESCARGA**

DATOS DEL ESPECIMEN	
Altura (cm)	7.00
Diámetro (cm)	6.93
Gravedad de Sólidos ( $G_s$ )	2.76

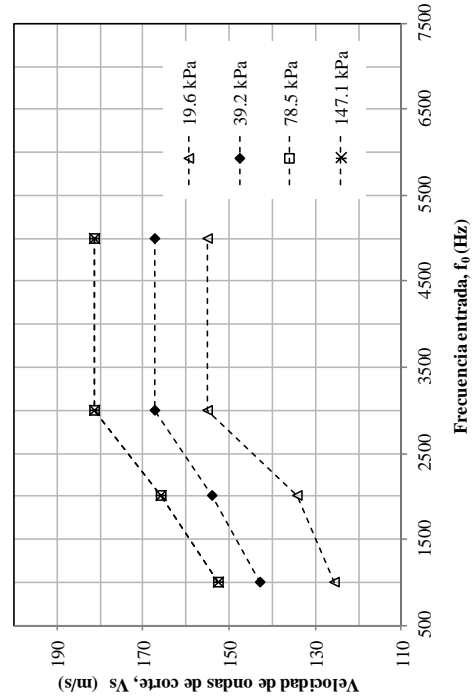
RESULTADOS	
Presión de Preconsolidación (PC)	150.43 kPa

Contenido de agua inicial (%)	64.2
Contenido de agua final (%)	57.3
Saturación inicial (%)	76.2
Saturación final (%)	81.6

**Gráfica velocidad de onda S vs Esfuerzo efectivo ( $\sigma_c$ )  
 Etapa descarga**



**Gráfica velocidad de ondas S vs Frecuencia entrada (Hz)  
 Etapa de descarga**



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**  
 POSGRADO DE INGENIERÍA CIVIL

INSTITUTO DE INGENIERÍA  
**LABORATORIO MECÁNICA DE SUELOS**

Instituto de Ingeniería UNAM, Circuito Escolar s/n, Ciudad Universitaria, Delegación Coyoacán, México D.F., C.P. 04510, Telé fono +52 (55) 5623-3600

INFORME : CM-API5-M71  
 SOLICITANTE : PEMEX  
 PROYECTO : LA KACH  
 UBICACION : 60 km al Noreste de Alvarado Veracruz en el Golfo de México  
 FECHA : Agosto, 2012

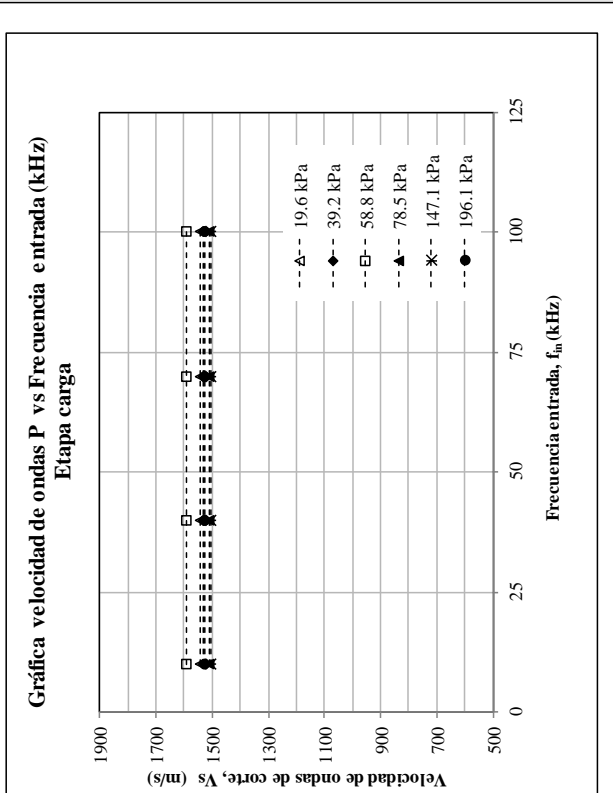
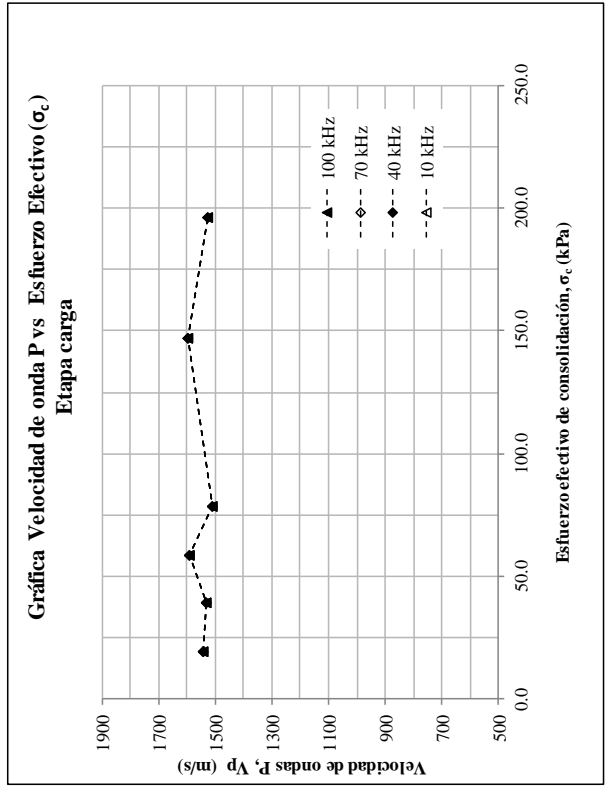
Sondaje : AP-15  
 Muestra : M - 71  
 Profundidad (m) : 25.71 m  
 Clasific. (S.U.C.S.) : CH  
 Estado : Inalterado

**CURVAS DE VELOCIDADES ONDAS (Vp) - ETAPA CARGA**

DATOS DEL ESPECIMEN	
Altura (cm)	7.00
Diámetro (cm)	6.93
Gravedad de Sólidos ( $G_s$ )	2.76

RESULTADOS
Presión de Preconsolidación (PC)
150.43 kPa

Contenido de agua inicial (%)	64.2
Contenido de agua final (%)	57.3
Saturación inicial (%)	76.2
Saturación final (%)	81.6



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**  
 POSGRADO DE INGENIERÍA CIVIL

INSTITUTO DE INGENIERÍA  
 LABORATORIO MECÁNICA DE SUELOS

Instituto de Ingeniería UNAM, Circuito Escolar s/n, Ciudad Universitaria, Delegación Coyoacán, México D.F., C.P. 04510, Telé fono +52(55)5623-3600

INFORME : CM-API5-M71  
 SOLICITANTE : PEMEX  
 PROYECTO : LA KACH  
 UBICACION : 60 km al Noreste de Alvarado Veracruz en el Golfo de México  
 FECHA : Agosto, 2012

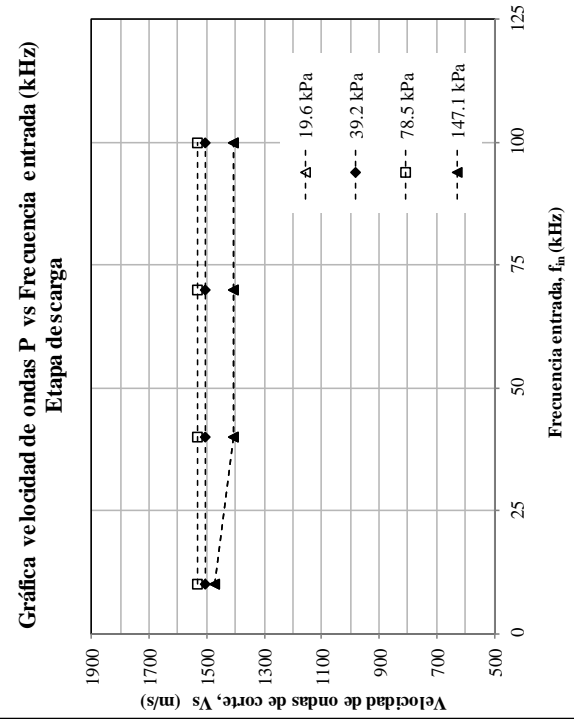
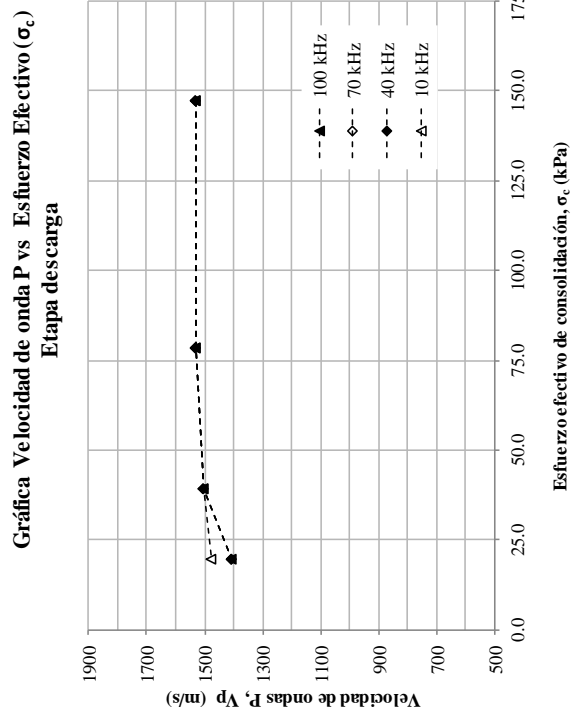
Sondaje : AP-15  
 Muestra : M - 71  
 Profundidad (m) : 25.71 m  
 Clasific. (S.U.C.S.) : CH  
 Estado : Inalterado

**CURVAS DE VELOCIDADES ONDAS (Vp) - ETAPA DESCARGA**

DATOS DEL ESPECIMEN	
Altura (cm)	7.00
Diámetro (cm)	6.93
Gravedad de Sólidos (G <sub>s</sub> )	2.76

RESULTADOS	
Presión de Preconsolidación (PC)	150.43 kPa

Contenido de agua inicial (%)	64.2
Contenido de agua final (%)	57.3
Saturación inicial (%)	76.2
Saturación final (%)	81.6









**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**  
 POSGRADO DE INGENIERÍA CIVIL

INSTITUTO DE INGENIERÍA  
**LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS**

Instituto de Ingeniería UNAM, Circuito Escolar s/n, Ciudad Universitaria, Delegación Coyoacán, México D.F., C.P. 04510, Teléfono +52(55)5623-3600

INFORME : CM-AP17-M65  
 SOLICITANTE : PEMEX  
 PROYECTO : LAKACH  
 UBICACION : 60 km al Noreste de Alvarado Veracruz en el Golfo de México  
 FECHA : 22 de Noviembre

Sondaje : AP-17  
 Muestra : M - 65  
 Profundidad (m) : 22.49 m  
 Clasific. (S.U.C.S.) : CH  
 Estado : Inalterado

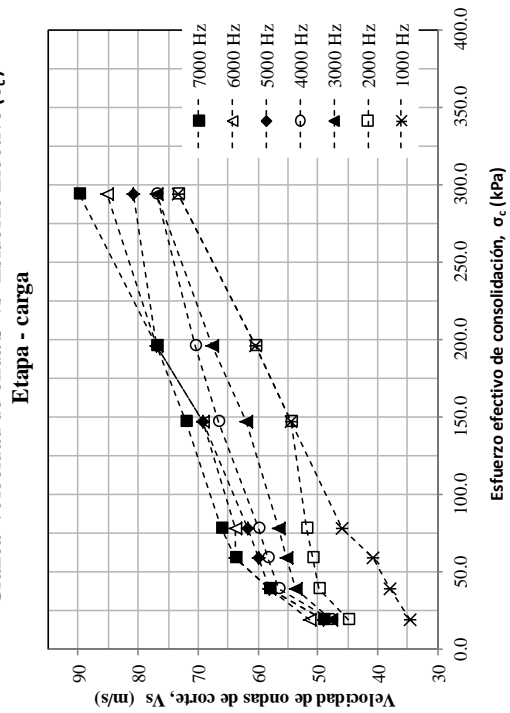
**CURVAS DE VELOCIDADES ONDAS (Vs) - ETAPA - CARGA**

DATOS DEL ESPECIMEN	
Altura (cm)	7.14
Diámetro (cm)	6.90
Gravedad de Sólidos ( $G_s$ )	2.77

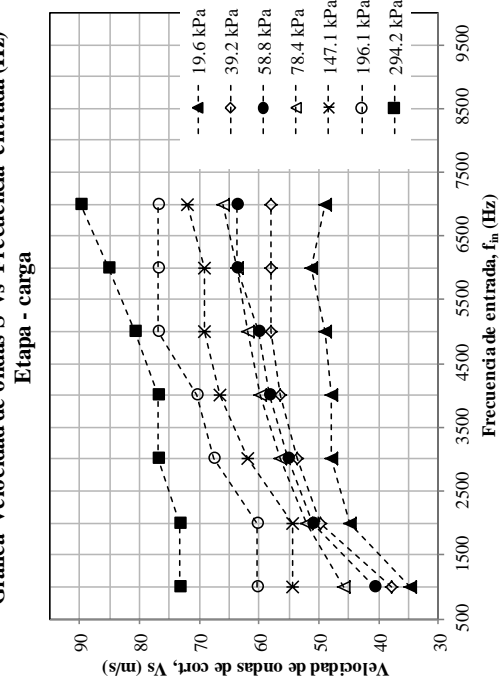
RESULTADOS
Presión de Preconsolidación (PC)
70.78 kPa

Contenido de agua inicial (%)	52.9
Contenido de agua final (%)	44.7
Saturación inicial (%)	84.5
Saturación final (%)	94.0

**Gráfica Velocidad de onda S vs Esfuerzo Efectivo ( $\sigma_c$ )**



**Gráfica Velocidad de ondas S vs Frecuencia entrada (Hz)**



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**  
 POSGRADO DE INGENIERÍA CIVIL

INSTITUTO DE INGENIERÍA  
**LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS**

Instituto de Ingeniería UNAM, Circuito Escolar s/n, Ciudad Universitaria, Delegación Coyoacán, México D.F., C.P. 04510, Teléfono +52[55]5623-3600

INFORME : CM-API7-M65  
 SOLICITANTE : PEMEX  
 PROYECTO : LA KACH  
 UBICACION : 60 km al Noreste de Alvarado Veracruz en el Golfo de México  
 FECHA : 22 de Noviembre

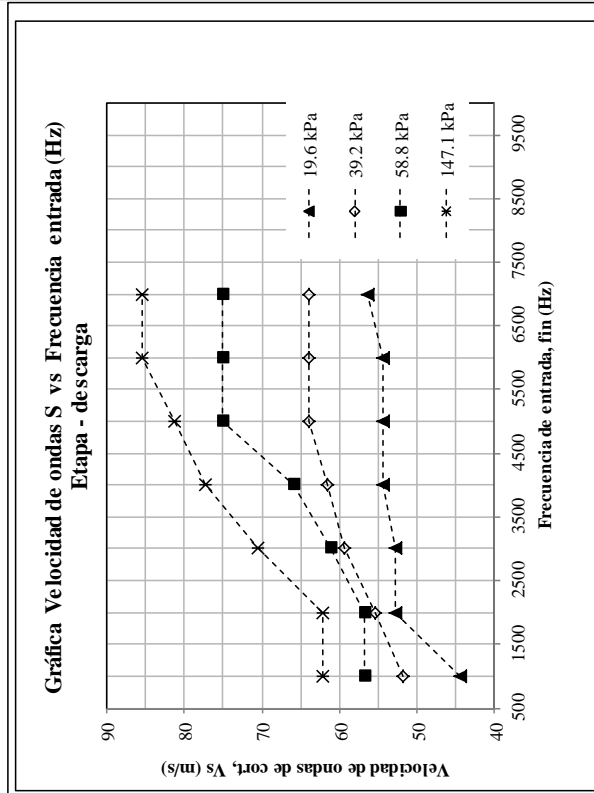
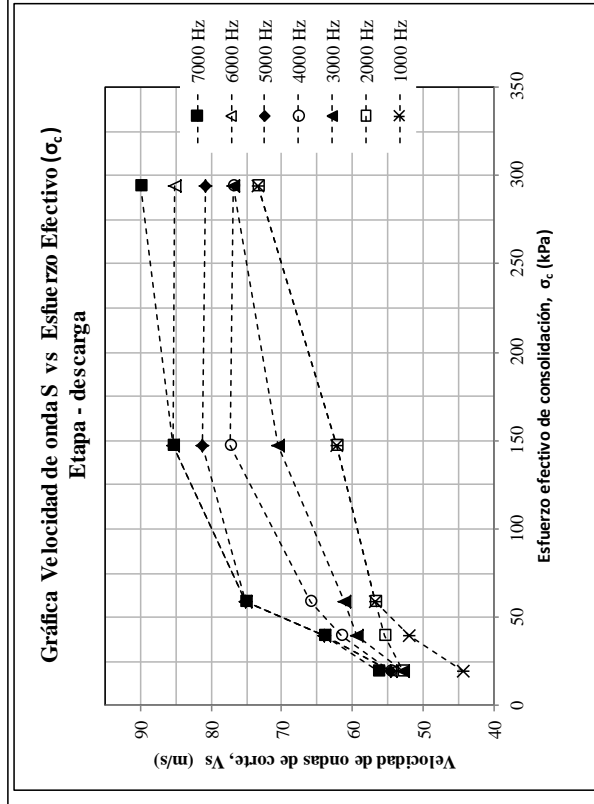
Sondaje : AP-17  
 Muestra : M - 65  
 Profundidad (m) : 22.49 m  
 Clasific. (S.U.C.S.) : CH  
 Estado : Inalterado

**CURVAS DE VELOCIDADES ONDAS (Vs) - ETAPA - DESCARGA**

DATOS DEL ESPECIMEN	
Altura (cm)	7.14
Diámetro (cm)	6.90
Gravedad de Sólidos ( $G_s$ )	2.77

RESULTADOS
Presión de Preconsolidación (PC)
70.78 kPa

Contenido de agua inicial (%)	52.9
Contenido de agua final (%)	44.7
Saturación inicial (%)	84.5
Saturación final (%)	94.0



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE MÉXICO**  
 POSGRADO DE INGENIERÍA CIVIL

INSTITUTO DE INGENIERÍA  
**LABORATORIO MECÁNICA DE SUELOS**

Instituto de Ingeniería UNAM, Circuito Escolar s/n, Ciudad Universitaria, Delegación Coyoacán, México D.F., C.P. 04510, Teléfono +52 (55) 5623-3600

INFORME : CM-API7-M65  
 SOLICITANTE : PEMEX  
 PROYECTO : LA KACH  
 UBICACION : 60 km al Noreste de Alvarado Veracruz en el Golfo de México  
 FECHA : 22 de Noviembre

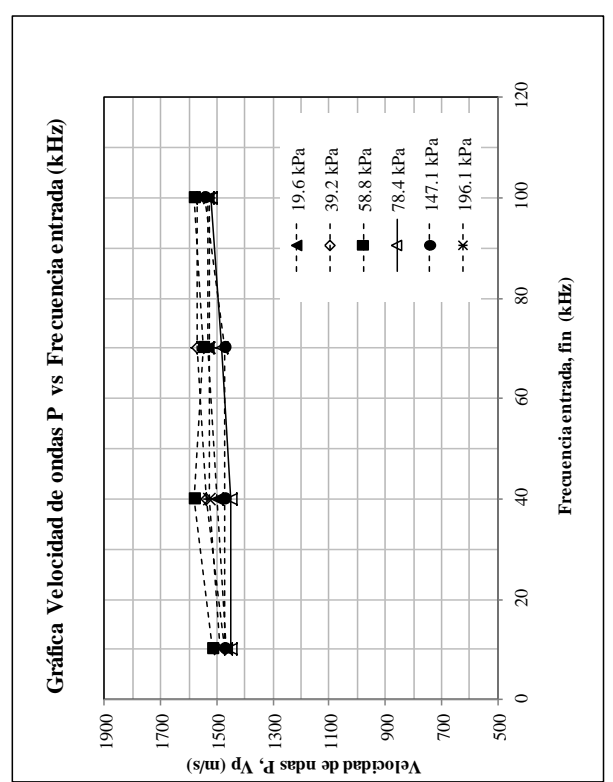
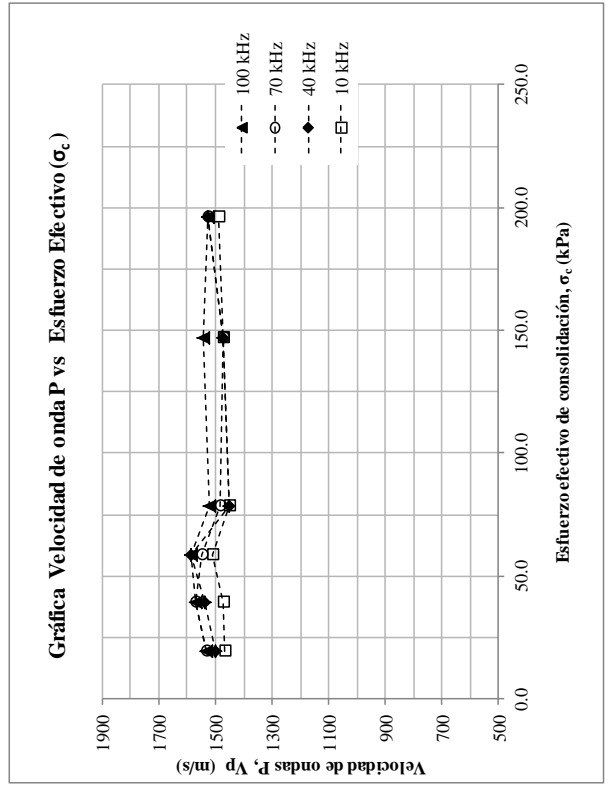
Sondaje : AP-17  
 Muestra : M - 65  
 Profundidad (m) : 22.49 m  
 Clasific. (S.U.C.S.) : CH  
 Estado : Inalterado

**CURVAS DE VELOCIDADES ONDAS (Vp) - ETAPA CARGA**

DATOS DEL ESPECIMEN	
Altura (cm)	7.14
Diámetro (cm)	6.90
Gravedad de Sólidos ( $G_s$ )	2.77

RESULTADOS	
Presión de Preconsolidación (PC)	70.78 kPa

Contenido de agua inicial (%)	52.9
Contenido de agua final (%)	44.7
Saturación inicial (%)	84.5
Saturación final (%)	94.0











**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**  
 POSGRADO DE INGENIERÍA CIVIL

INSTITUTO DE INGENIERÍA  
**LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS**

Instituto de Ingeniería UNAM, Circuito Escolar s/n, Ciudad Universitaria, Delegación Coyoacán, México D.F., C.P. 04510, Teléfono +52(55)5 623-3600

INFORME : CM-M10-S1  
 SOLICITANTE : -  
 PROYECTO : 290-6/10  
 UBICACION : DF México  
 FECHA : 15-05-13

Sondaje : M-10  
 Muestra : SI  
 Profundidad (m) : 14.8 - 15.0  
 Clasific. (S.U.C.S.) : CH  
 Estado : Inalterado

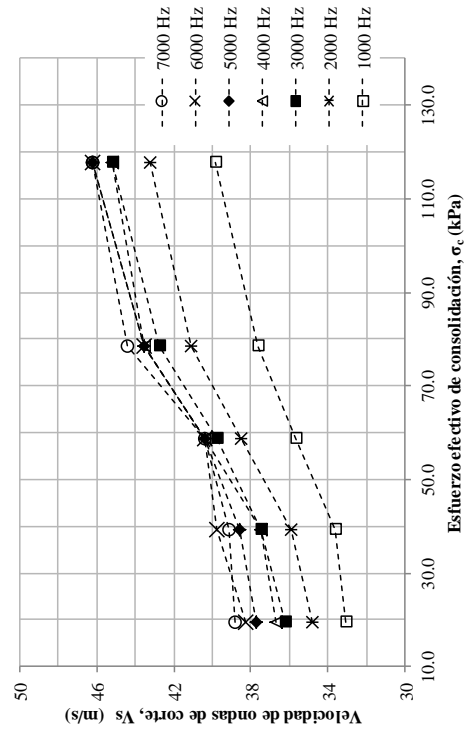
**CURVAS DE VELOCIDADES ONDAS (Vs) - ETAPA DE CARGA**

DATOS DEL ESPECIMEN	
Altura (cm)	8.02
Diámetro (cm)	6.90
Gravedad de Sólidos ( $G_s$ )	3.00

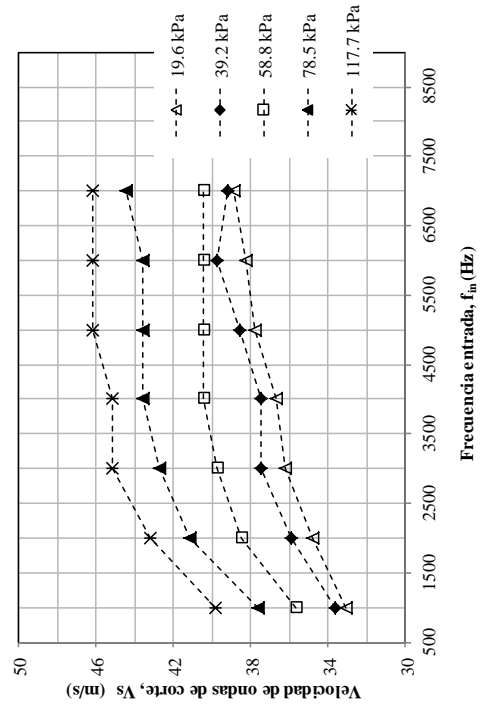
RESULTADOS	
Presión de Preconsolidación (PC)	43.26 kPa

Contenido de agua inicial (%)	248.4
Contenido de agua final (%)	254.6
Saturación inicial (%)	79.9
Saturación final (%)	99.8

**Gráfica velocidad de onda S vs Esfuerzo efectivo ( $\sigma_c$ )  
 Etapa carga**



**Gráfica velocidad de ondas S vs Frecuencia entrada (Hz)  
 Etapa de carga**



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**  
 POSGRADO DE INGENIERÍA CIVIL

INSTITUTO DE INGENIERÍA  
**LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS**

Instituto de Ingeniería UNAM, Circuito Escolar s/n, Ciudad Universitaria, Delegación Coyoacán, México D.F., C.P. 04510, Teléfono +52(55)5623-3600

INFORME : CM-M10-SI  
 SOLICITANTE : -  
 PROYECTO : 290-6/10  
 UBICACION : DF México  
 FECHA : 15-05-13

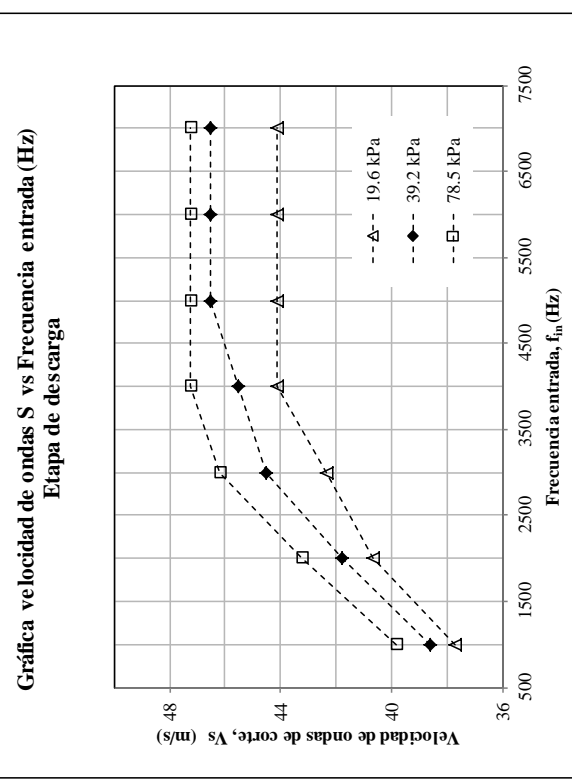
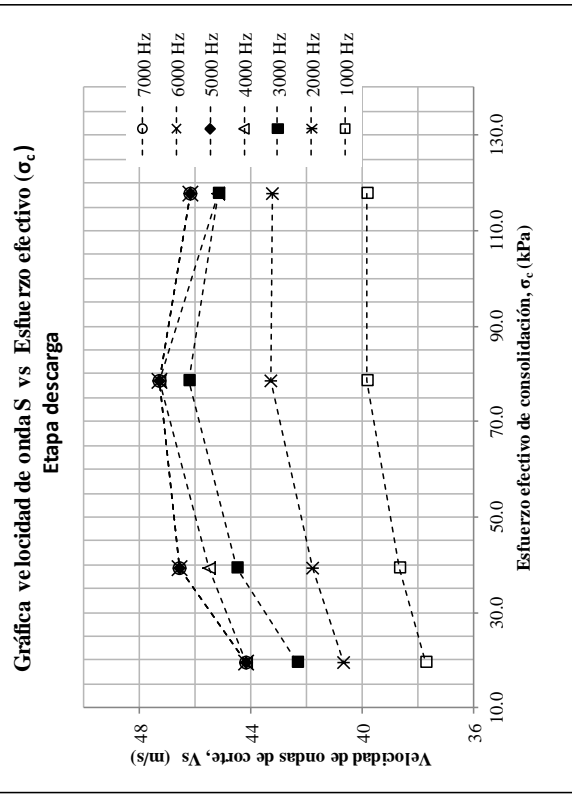
Sondaje : M-10  
 Muestra : S1  
 Profundidad (m) : 14.8 - 15.0  
 Clasific. (S.U.C.S.) : CH  
 Estado : Inalterado

**CURVAS DE VELOCIDADES ONDAS (Vs) - ETAPA DE DESCARGA**

DATOS DEL ESPECIMEN	
Altura (cm)	8.02
Diámetro (cm)	6.90
Gravedad de Sólidos ( $G_s$ )	3.00

RESULTADOS	
Presión de Preconsolidación (PC)	43.26 kPa

Contenido de agua inicial (%)	248.4
Contenido de agua final (%)	254.6
Saturación inicial (%)	79.9
Saturación final (%)	99.8



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**  
 POSGRADO DE INGENIERÍA CIVIL

INSTITUTO DE INGENIERÍA  
**LABORATORIO MECÁNICA DE SUELOS**

Instituto de Ingeniería UNAM, Circuito Escolar s/n, Ciudad Universitaria, Delegación Coyoacán, México D.F., C.P. 04510, Telé fono +52(55)5623-3600

INFORME : CM-M10-S1  
 SOLICITANTE : -  
 PROYECTO : 290-G/10  
 UBICACION : DF México  
 FECHA : 15-05-13

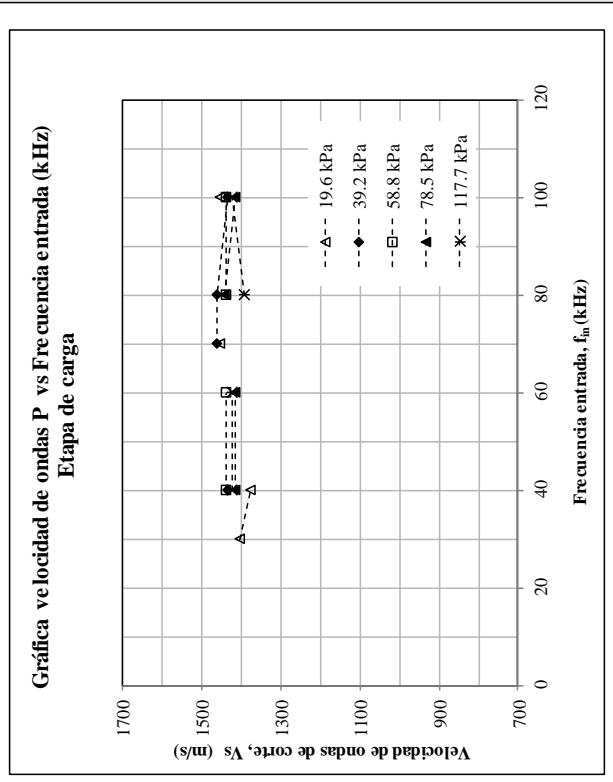
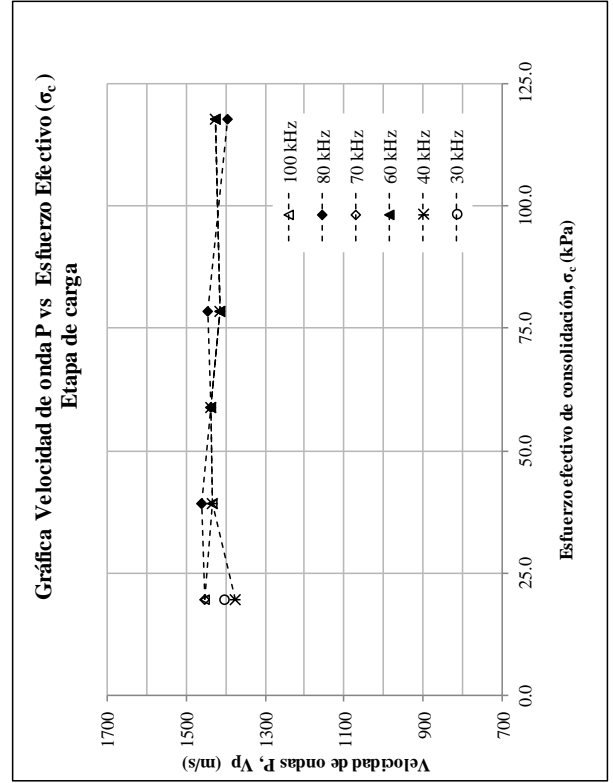
Sondaje : M-10  
 Muestra : S1  
 Profundidad (m) : 14.8 - 15.0  
 Clasific. (S.U.C.S.) : CH  
 Estado : Inalterado

**CURVAS DE VELOCIDADES ONDAS P (Vp) - ETAPA CARGA**

DATOS DEL ESPECIMEN	
Altura (cm)	8.02
Diámetro (cm)	6.90
Gravedad de Sólidos (G <sub>s</sub> )	3.00

RESULTADOS	
Presión de Preconsolidación (PC)	43.26 kPa

Contenido de agua inicial (%)	248.4
Contenido de agua final (%)	254.6
Saturación inicial (%)	79.9
Saturación final (%)	99.8



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**  
 POSGRADO DE INGENIERÍA CIVIL

INSTITUTO DE INGENIERÍA  
**LABORATORIO MECÁNICA DE SUELOS**

Instituto de Ingeniería UNAM, Circuito Escolar s/n, Ciudad Universitaria, Delegación Coyoacán, México D.F., C.P. 04510, Teléfono +52(55)5623-3600

INFORME : CM-M10-SI  
 SOLICITANTE : -  
 PROYECTO : 290-6/10  
 UBICACION : DF México  
 FECHA : 15-05-13

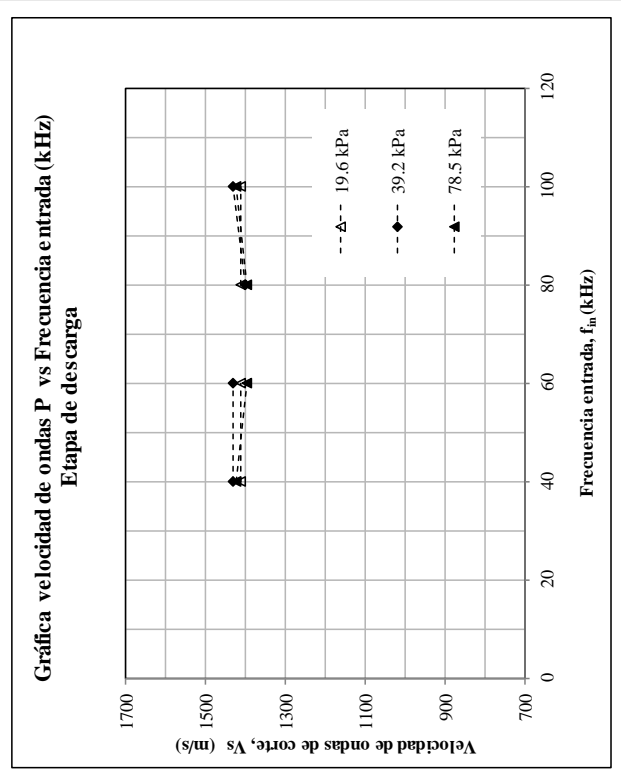
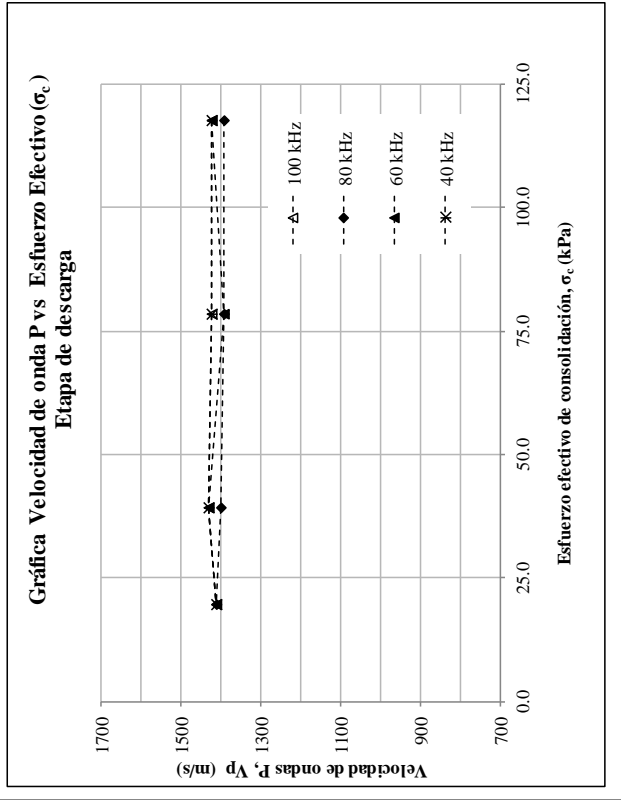
Sondaje : M-10  
 Muestra : S1  
 Profundidad (m) : 14.8 - 15.0  
 Clasific. (S.U.C.S.) : CH  
 Estado : Inalterado

**CURVAS DE VELOCIDADES ONDAS P (Vp) - ETAPA DESCARGA**

DATOS DEL ESPECIMEN	
Altura (cm)	8.02
Díámetro (cm)	6.90
Gravedad de Sólidos ( $G_s$ )	3.00

RESULTADOS
Presión de Preconsolidación (PC)
43.26 kPa

Contenido de agua inicial (%)	248.4
Contenido de agua final (%)	254.6
Saturación inicial (%)	79.9
Saturación final (%)	99.8







**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**  
 POSGRADO DE INGENIERÍA CIVIL

INSTITUTO DE INGENIERÍA  
**LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS**

Instituto de Ingeniería UNAM, Circuito Escolar s/n, Ciudad Universitaria, Delegación Coyoacán, México D.F., C.P. 04510, Teléfono +52(55)5623-3600

INFORME : CM-M14-SI  
 SOLICITANTE : -  
 PROYECTO : 290-6/10  
 UBICACION : DF México  
 FECHA : 22-06-13

Sondaje : M-14  
 Muestra : SI  
 Profundidad (m) : 18.8 - 19.0  
 Clasific. (S.U.C.S.) : CH  
 Estado : Inalterado

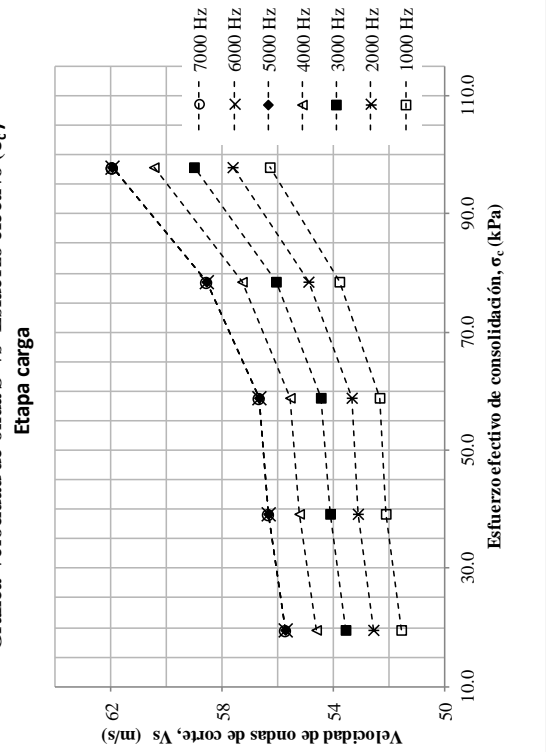
**CURVAS DE VELOCIDADES ONDAS (Vs) - ETAPA DE CARGA**

DATOS DEL ESPECIMEN	
Altura (cm)	8.05
Diámetro (cm)	6.90
Gravedad de Sólidos ( $G_s$ )	2.91

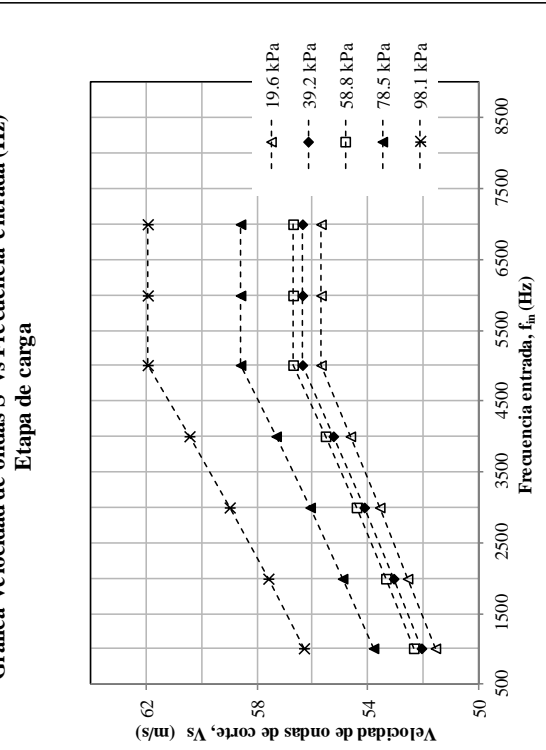
RESULTADOS	
Presión de Preconsolidación (PC)	74.51 kPa

Contenido de agua inicial (%)	182.9
Contenido de agua final (%)	240.8
Saturación inicial (%)	59.4
Saturación final (%)	85.5

**Gráfica velocidad de onda S vs Esfuerzo efectivo ( $\sigma_c$ )**  
 Etapa carga



**Gráfica velocidad de ondas S vs Frecuencia entrada ( $f_m$ )**  
 Etapa de carga



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**  
 POSGRADO DE INGENIERÍA CIVIL

INSTITUTO DE INGENIERÍA  
**LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS**

Instituto de Ingeniería UNAM, Circuito Escolar s/n, Ciudad Universitaria, Delegación Coyoacán, México D.F., C.P. 04510, Telé fono +52(55)5623-3600

INFORME : CM-M14-SI  
 SOLICITANTE : -  
 PROYECTO : 290-6/10  
 UBICACION : DF México  
 FECHA : 22-06-13

Sondaje : M-14  
 Muestra : S1  
 Profundidad (m) : 18.8 - 19.0  
 Clasific. (S.U.C.S.) : CH  
 Estado : Inalterado

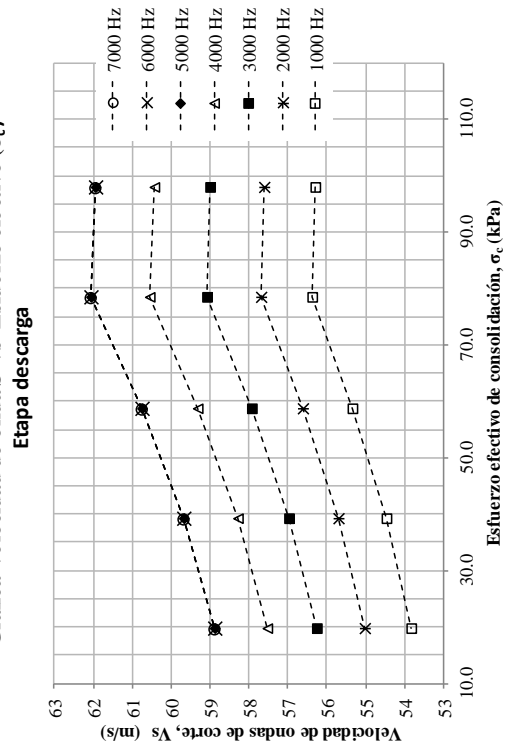
**CURVAS DE VELOCIDADES ONDAS (Vs) - ETAPA DESCARGA**

DATOS DEL ESPECIMEN	
Altura (cm)	8.05
Diámetro (cm)	6.90
Gravedad de Sólidos ( $G_s$ )	2.91

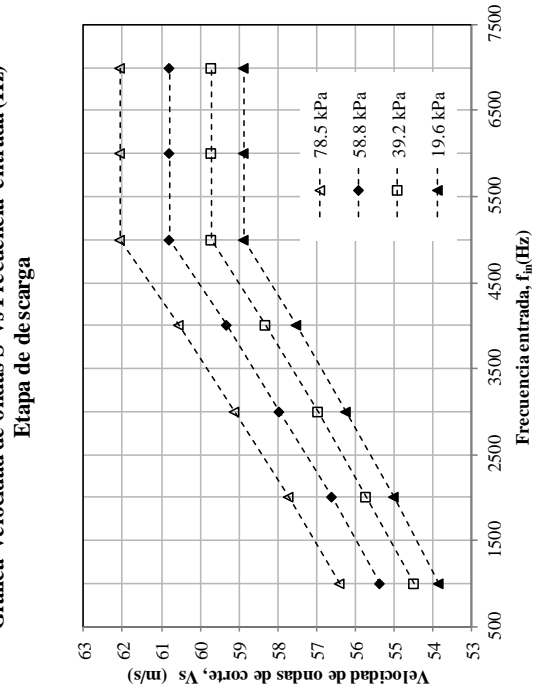
RESULTADOS	
Presión de Preconsolidación (PC)	74.51 kPa

Contenido de agua inicial (%)	182.9
Contenido de agua final (%)	240.8
Saturación inicial (%)	59.4
Saturación final (%)	85.5

Gráfica velocidad de onda S vs Esfuerzo efectivo de consolidación,  $\sigma_c$  (kPa)



Gráfica velocidad de ondas S vs Frecuencia entrada (Hz) Etapa de descarga





**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**  
 POSGRADO DE INGENIERÍA CIVIL

INSTITUTO DE INGENIERÍA  
**LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS**

Instituto de Ingeniería UNAM, Circuito Escolar s/n, Ciudad Universitaria, Delegación Coyoacán, México D.F., C.P. 04510, Teléfono +52(55)5623-3600

INFORME : CM-M14-SI  
 SOLICITANTE : -  
 PROYECTO : 290-6/10  
 UBICACION : DF México  
 FECHA : 22-06-13

Sondaje : M-14  
 Muestra : S1  
 Profundidad (m) : 18.8 - 19.0  
 Clasific. (S.U.C.S.) : CH  
 Estado : Inalterado

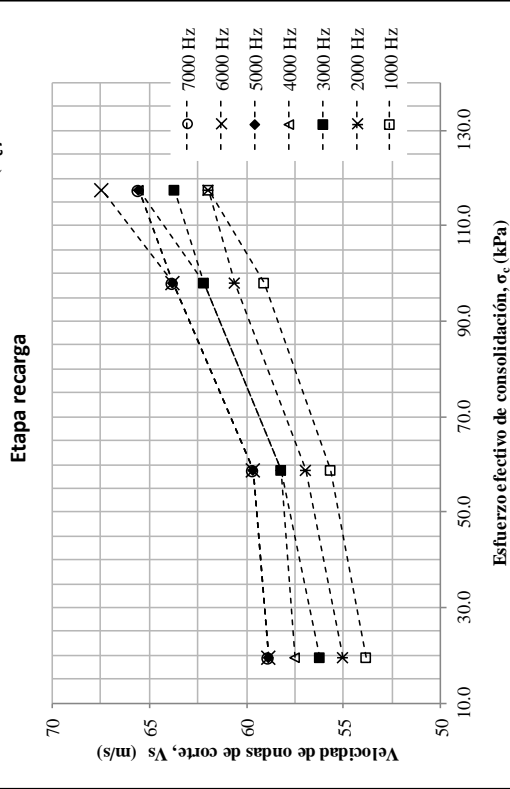
**CURVAS DE VELOCIDADES ONDAS (Vs) - ETAPA DE RECARGA**

DATOS DEL ESPECIMEN	
Altura (cm)	8.05
Diámetro (cm)	6.90
Gravedad de Sólidos ( $G_s$ )	2.91

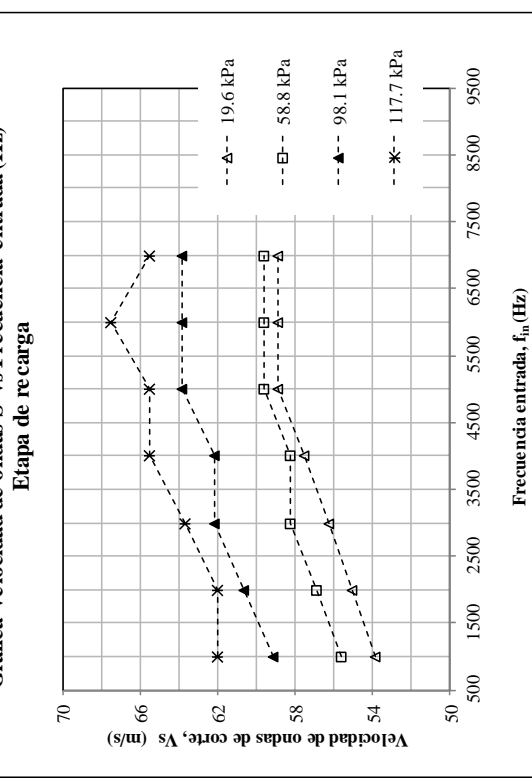
RESULTADOS
Presión de Preconsolidación (PC)
74.51 kPa

Contenido de agua inicial (%)	182.9
Contenido de agua final (%)	240.8
Saturación inicial (%)	59.4
Saturación final (%)	85.5

Gráfica velocidad de onda S vs Esfuerzo efectivo ( $\sigma_c$ )



Gráfica velocidad de ondas S vs Frecuencia entrada (Hz)



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**  
 POSGRADO DE INGENIERÍA CIVIL

INSTITUTO DE INGENIERÍA  
**LABORATORIO MECÁNICA DE SUELOS**

Instituto de Ingeniería UNAM, Circuito Escolar s/n, Ciudad Universitaria, Delegación Coyoacán, México D.F., C.P. 04510, Teléfono +52 (55) 5623-3600

INFORME : CM-M14-S1  
 SOLICITANTE : -  
 PROYECTO : 290-6/10  
 UBICACION : DF México  
 FECHA : 22-06-13

Sondaje : M-14  
 Muestra : S1  
 Profundidad (m) : 18.8 - 19.0  
 Clasific. (S.U.C.S.) : CH  
 Estado : Inalterado

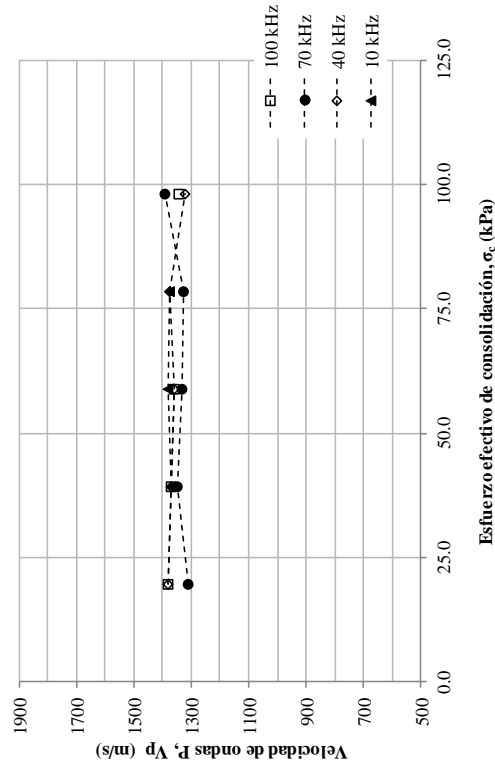
**CURVAS DE VELOCIDADES ONDAS (Vp) - ETAPA CARGA**

DATOS DEL ESPECIMEN	
Altura (cm)	8.05
Diámetro (cm)	6.90
Gravedad de Sólidos ( $G_s$ )	2.91

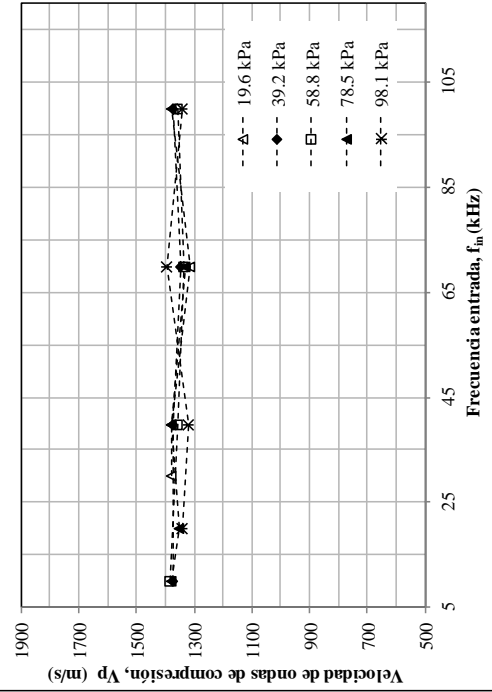
RESULTADOS	
Presión de Preconsolidación (PC)	74.51 kPa

Contenido de agua inicial (%)	182.9
Contenido de agua final (%)	240.8
Saturación inicial (%)	59.4
Saturación final (%)	85.5

**Gráfica Velocidad de onda P vs Esfuerzo Efectivo ( $\sigma_c$ )**  
 Etapa - carga



**Gráfica velocidad de ondas P vs Frecuencia entrada (kHz)**  
 Etapa de carga



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**  
 POSGRADO DE INGENIERÍA CIVIL

INSTITUTO DE INGENIERÍA  
**LABORATORIO MECÁNICA DE SUELOS**

Instituto de Ingeniería UNAM, Circuito Escolar s/n, Ciudad Universitaria, Delegación Coyoacán, México D.F., C.P. 04510, Teléfono +52 (55) 5623-3600

INFORME : CM-M14-S1  
 SOLICITANTE : -  
 PROYECTO : 290-6/10  
 UBICACION : DF México  
 FECHA : 22-06-13

Sondaje : M-14  
 Muestra : S1  
 Profundidad (m) : 18.8 - 19.0  
 Clasific. (S.U.C.S.) : CH  
 Estado : Inalterado

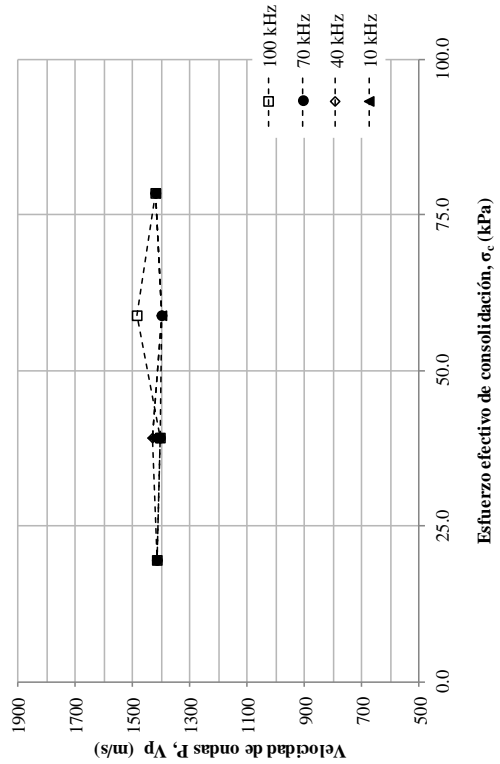
**CURVAS DE VELOCIDADES ONDAS (Vp) - ETAPA DESCARGA**

DATOS DEL ESPECIMEN	
Altura (cm)	8.05
Diámetro (cm)	6.90
Gravedad de Sólidos (G <sub>s</sub> )	2.91

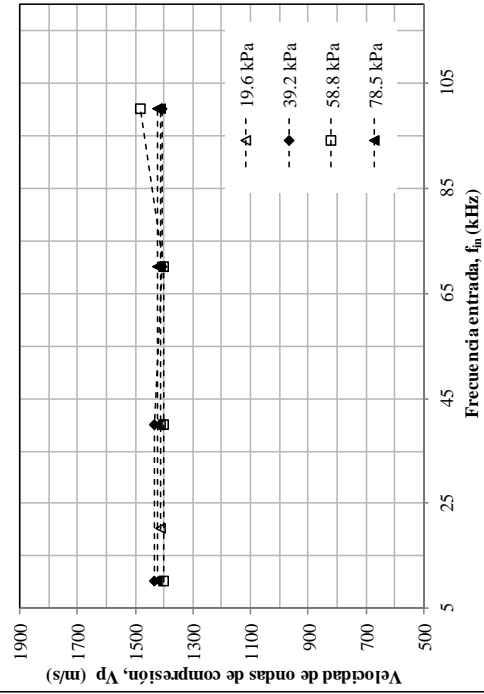
RESULTADOS	
Presión de Preconsolidación (PC)	74.51 kPa

Contenido de agua inicial (%)	182.9
Contenido de agua final (%)	240.8
Saturación inicial (%)	59.4
Saturación final (%)	85.5

**Gráfica Velocidad de onda P vs Esfuerzo Efectivo ( $\sigma_c$ )**  
 Etapa - descarga



**Gráfica velocidad de ondas P vs Frecuencia entrada (kHz)**  
 Etapa - descarga









**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**  
 POSGRADO DE INGENIERÍA CIVIL

INSTITUTO DE INGENIERÍA  
 LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS

Instituto de Ingeniería UNAM, Circuito Escolar s/n, Ciudad Universitaria, Delegación Coyoacán, México D.F., C.P. 04510, Telé foro +52(55)5623-3600

INFORME : CM-M15-S3  
 SOLICITANTE : -  
 PROYECTO : 290 - 6 /10  
 UBICACION : DF. México  
 FECHA : 10-7-13

Sondaje : M15  
 Muestra : S1  
 Profundidad (m) : 19.4 - 19.6  
 Clasific. (S.U.C.S.) : CH  
 Estado : Inalterado

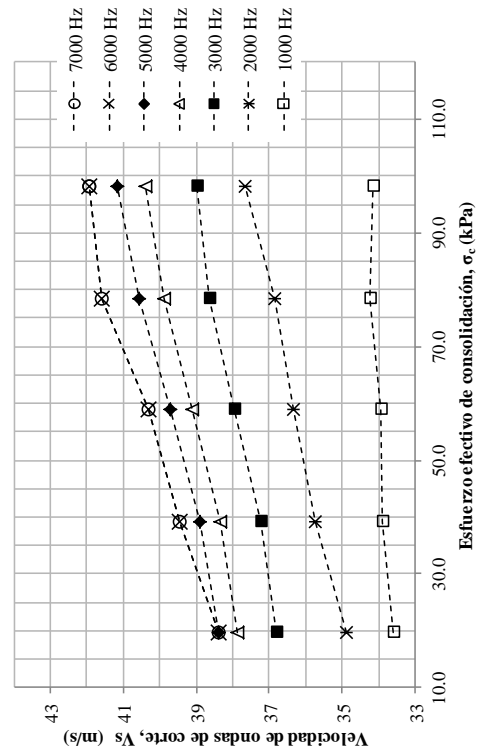
**CURVAS DE VELOCIDADES ONDAS (Vs) - ETAPA DE CARGA**

DATOS DEL ESPECIMEN	
Altura (cm)	8.02
Diámetro (cm)	6.90
Gravedad de Sólidos ( $G_s$ )	2.98

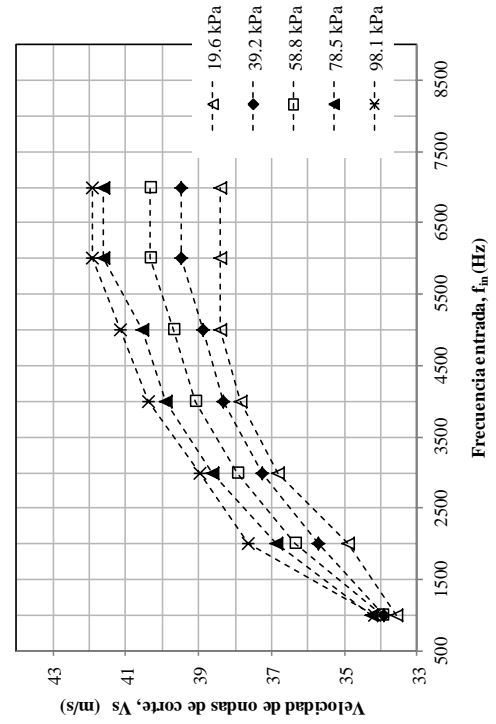
RESULTADOS	
Presión de Preconsolidación (PC)	70.14 kPa

Contenido de agua inicial (%)	280.2
Contenido de agua final (%)	244.8
Saturación inicial (%)	93.5
Saturación final (%)	93.8

**Gráfica velocidad de onda S vs Esfuerzo efectivo ( $\sigma_c$ )**  
 Etapa carga



**Gráfica velocidad de ondas S vs Frecuencia entrada (Hz)**  
 Etapa de carga



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**  
 POSGRADO DE INGENIERÍA CIVIL

INSTITUTO DE INGENIERÍA  
**LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS**

Instituto de Ingeniería UNAM, Circuito Escolar s/n, Ciudad Universitaria, Delegación Coyoacán, México D.F., C.P. 04510, Telé fono +52[55]5623-3600

INFORME : CM-M15-S3  
 SOLICITANTE : -  
 PROYECTO : 290 - 6 /10  
 UBICACION : DF, México  
 FECHA : 10-7-13

Sondaje : M15  
 Muestra : S1  
 Profundidad (m) : 19.4 - 19.6  
 Clasific. (S.U.C.S.) : CH  
 Estado : Inalterado

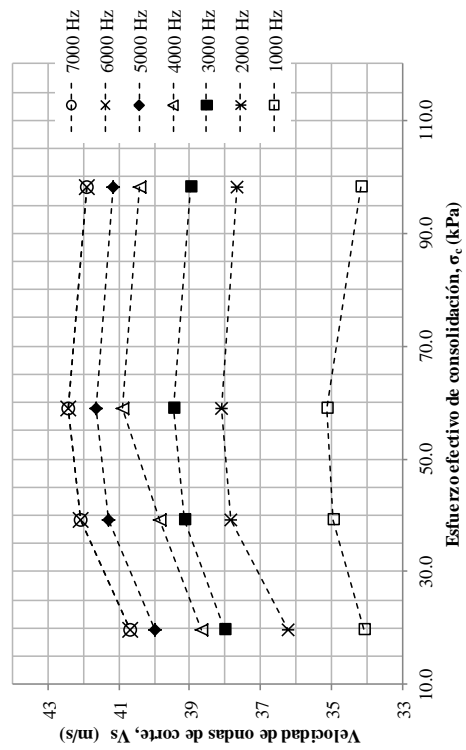
**CURVAS DE VELOCIDADES ONDAS (Vs) - ETAPA DE DESCARGA**

DATOS DEL ESPECIMEN	
Altura (cm)	8.02
Diámetro (cm)	6.90
Gravedad de Sólidos ( $G_s$ )	2.98

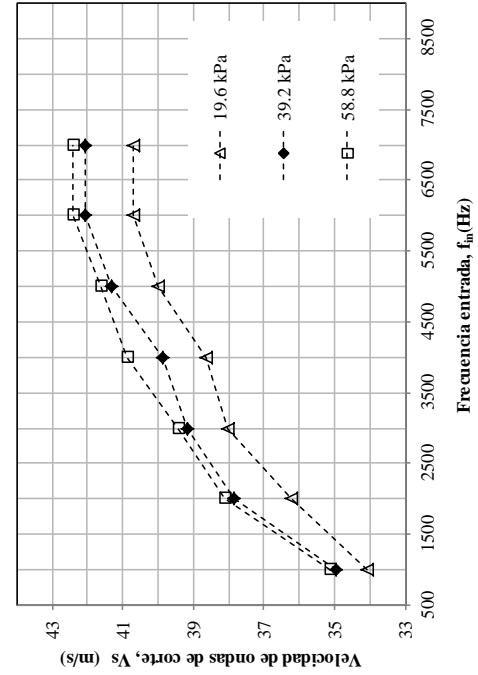
RESULTADOS	
Presión de Preconsolidación (PC)	70.14 kPa

Contenido de agua inicial (%)	280.2
Contenido de agua final (%)	244.8
Saturación inicial (%)	93.5
Saturación final (%)	93.8

**Gráfica velocidad de onda S vs Esfuerzo efectivo de consolidación,  $\sigma_c$  (kPa)**  
 Etapa descarga



**Gráfica velocidad de ondas S vs Frecuencia entrada (Hz)**  
 Etapa de descarga





**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**  
 POSGRADO DE INGENIERÍA CIVIL

INSTITUTO DE INGENIERÍA  
**LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS**

Instituto de Ingeniería UNAM, Circuito Escolar s/n, Ciudad Universitaria, Delegación Coyoacán, México D.F., C.P. 04510, Telé fono +52(55)5623-3600

INFORME : CM-M15-S3  
 SOLICITANTE : -  
 PROYECTO : 290 - 6/10  
 UBICACION : DF, México  
 FECHA : 10-7-13

Sondaje : M15  
 Muestra : SI  
 Profundidad (m) : 19.4 - 19.6  
 Clasific. (S.U.C.S.) : CH  
 Estado : Inalterado

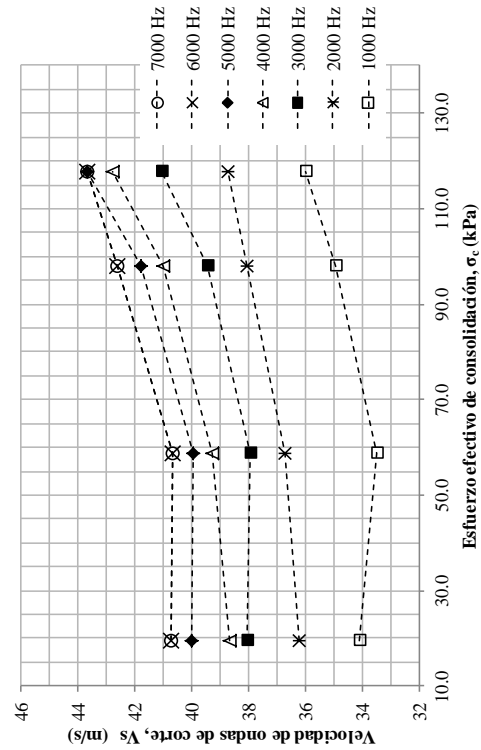
**CURVAS DE VELOCIDADES ONDAS (Vs) - ETAPA DE RECARGA**

DATOS DEL ESPECIMEN	
Altura (cm)	8.02
Diámetro (cm)	6.90
Gravedad de Sólidos ( $G_s$ )	2.98

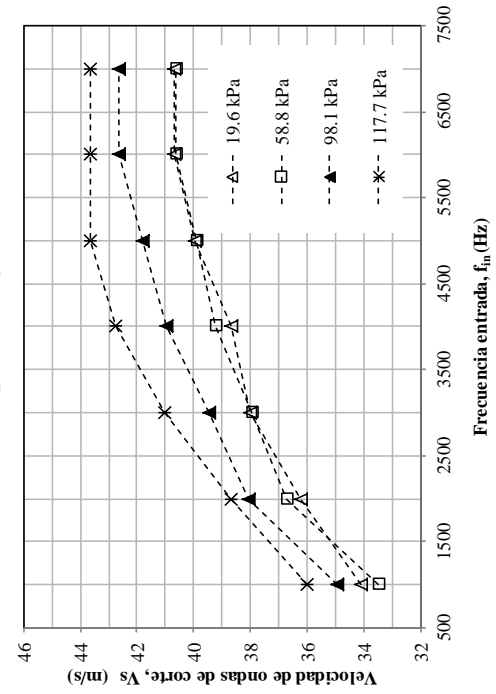
RESULTADOS	
Presión de Preconsolidación (PC)	70.14 kPa

Contenido de agua inicial (%)	280.2
Contenido de agua final (%)	244.8
Saturación inicial (%)	93.5
Saturación final (%)	93.8

**Gráfica velocidad de onda S vs Esfuerzo efectivo ( $\sigma_c$ )**  
 Etapa recarga



**Gráfica velocidad de ondas S vs Frecuencia entrada (Hz)**  
 Etapa de recarga



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**  
 POSGRADO DE INGENIERÍA CIVIL

INSTITUTO DE INGENIERÍA  
**LABORATORIO MECÁNICA DE SUELOS**

Instituto de Ingeniería UNAM, Circuito Escolar s/n, Ciudad Universitaria, Delegación Coyoacán, México D.F., C.P. 04510, Teléfono +52 (55) 5 623-3600

INFORME : CM-M15-S3  
 SOLICITANTE : -  
 PROYECTO : 290 - 6/10  
 UBICACION : DF, México  
 FECHA : 10-7-13

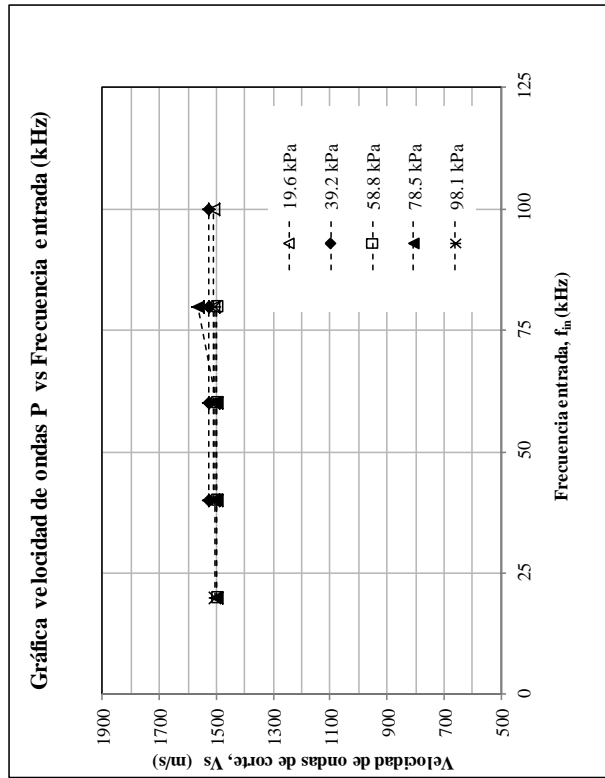
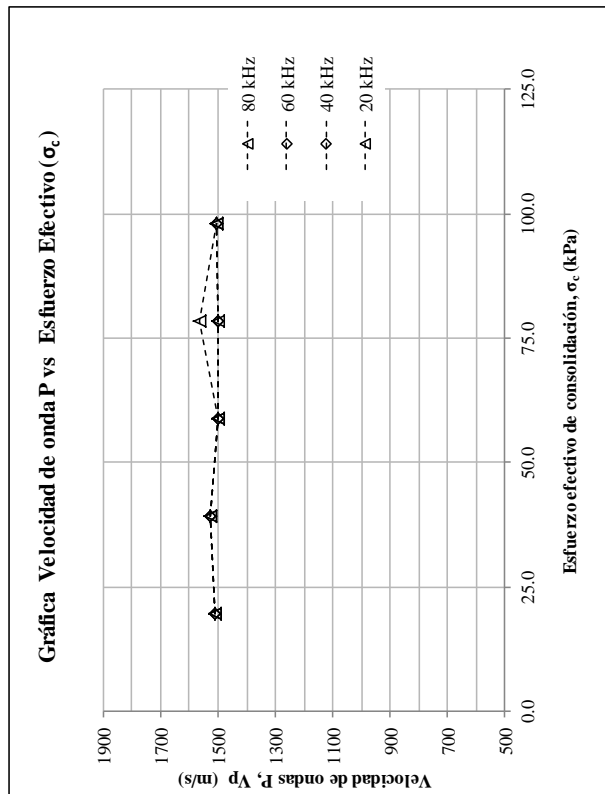
Sondaje : M15  
 Muestra : S1  
 Profundidad (m) : 19.4 - 19.6  
 Clasific. (S.U.C.S.) : CH  
 Estado : Inalterado

**CURVAS DE VELOCIDADES ONDAS (Vp) - ETAPA CARGA**

DATOS DEL ESPECIMEN	
Altura (cm)	8.02
Diámetro (cm)	6.90
Gravedad de Sólidos ( $G_s$ )	2.98

RESULTADOS	
Presión de Preconsolidación (PC)	70.14 kPa

Contenido de agua inicial (%)	280.2
Contenido de agua final (%)	244.8
Saturación inicial (%)	93.5
Saturación final (%)	93.8



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**  
 POSGRADO DE INGENIERÍA CIVIL

INSTITUTO DE INGENIERÍA  
**LABORATORIO MECÁNICA DE SUELOS**

Instituto de Ingeniería UNAM, Circuito Escolar s/n, Ciudad Universitaria, Delegación Coyoacán, México D.F., C.P. 04510, Telé fono +52(55)5623-3600

INFORME : CM-M15-S3  
 SOLICITANTE : -  
 PROYECTO : 290 - 6/10  
 UBICACION : DF. México  
 FECHA : 10-7-13

Sondaje : M15  
 Muestra : S1  
 Profundidad (m) : 19.4 - 19.6  
 Clasific. (S.U.C.S.) : CH  
 Estado : Inalterado

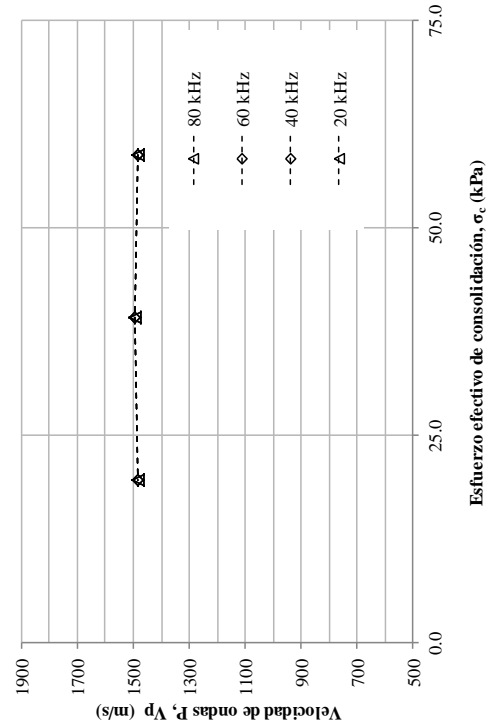
**CURVAS DE VELOCIDADES ONDAS (Vp) - ETAPA DESCARGA**

DATOS DEL ESPECIMEN	
Altura (cm)	8.02
Diámetro (cm)	6.90
Gravedad de Sólidos ( $G_s$ )	2.98

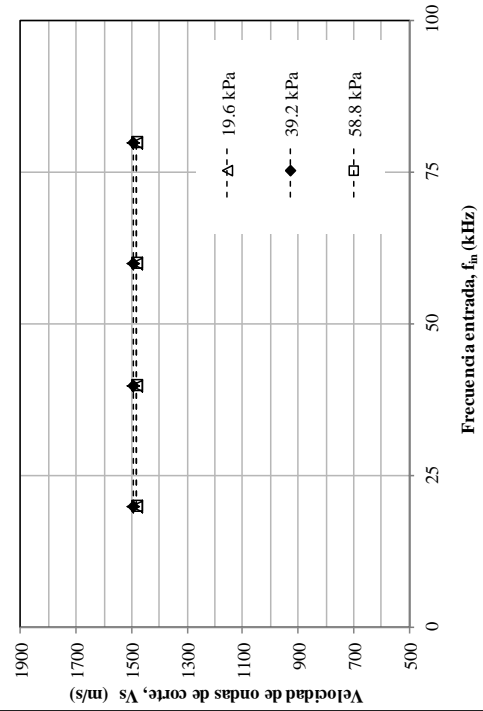
RESULTADOS	
Presión de Preconsolidación (PC)	70.14 kPa

Contenido de agua inicial (%)	280.2
Contenido de agua final (%)	244.8
Saturación inicial (%)	93.5
Saturación final (%)	93.8

**Gráfica Velocidad de onda P vs Esfuerzo Efectivo ( $\sigma_c$ )**



**Gráfica velocidad de ondas P vs Frecuencia entrada ( $f_m$ )**



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**  
 POSGRADO DE INGENIERÍA CIVIL

INSTITUTO DE INGENIERÍA  
**LABORATORIO MECÁNICA DE SUELOS**

Instituto de Ingeniería UNAM, Circuito Escolar s/n, Ciudad Universitaria, Delegación Coyoacán, México D.F., C.P. 04510, Teléfono +52 (55) 5623-3600

INFORME : CM-M15-S3  
 SOLICITANTE : -  
 PROYECTO : 290 - 6/10  
 UBICACION : DF, México  
 FECHA : 10-7-13

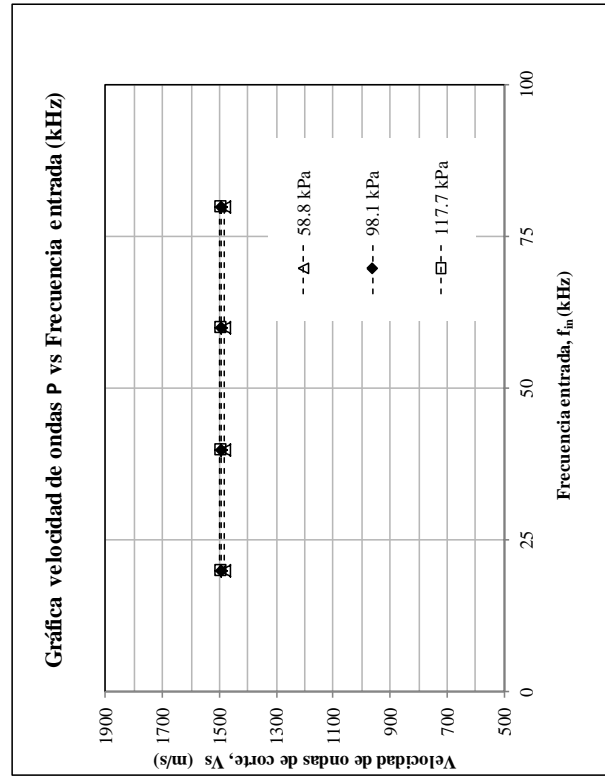
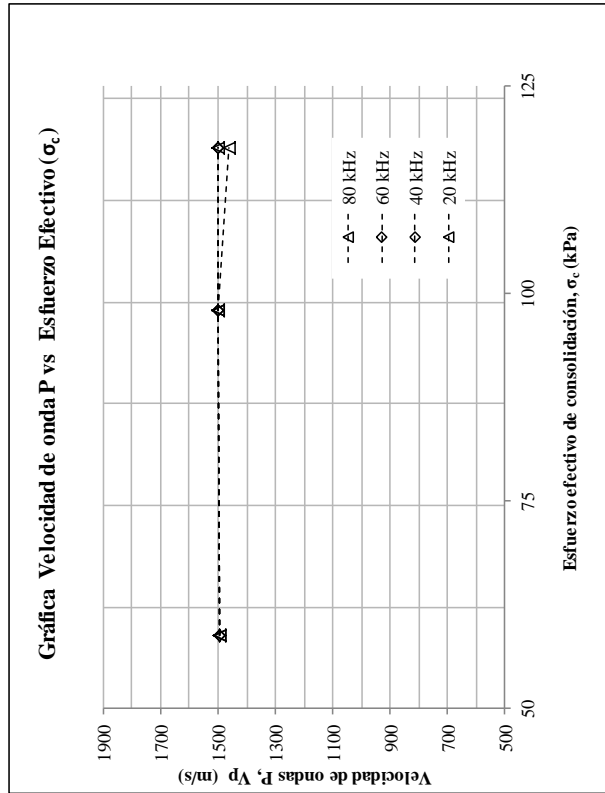
Sondaje : M15  
 Muestra : S1  
 Profundidad (m) : 19.4 - 19.6  
 Clasific. (S.U.C.S.) : CH  
 Estado : Inalterado

**CURVAS DE VELOCIDADES ONDAS (Vp) - ETAPA RECARGA**

DATOS DEL ESPECIMEN	
Altura (cm)	8.02
Diámetro (cm)	6.90
Gravedad de Sólidos ( $G_s$ )	2.98

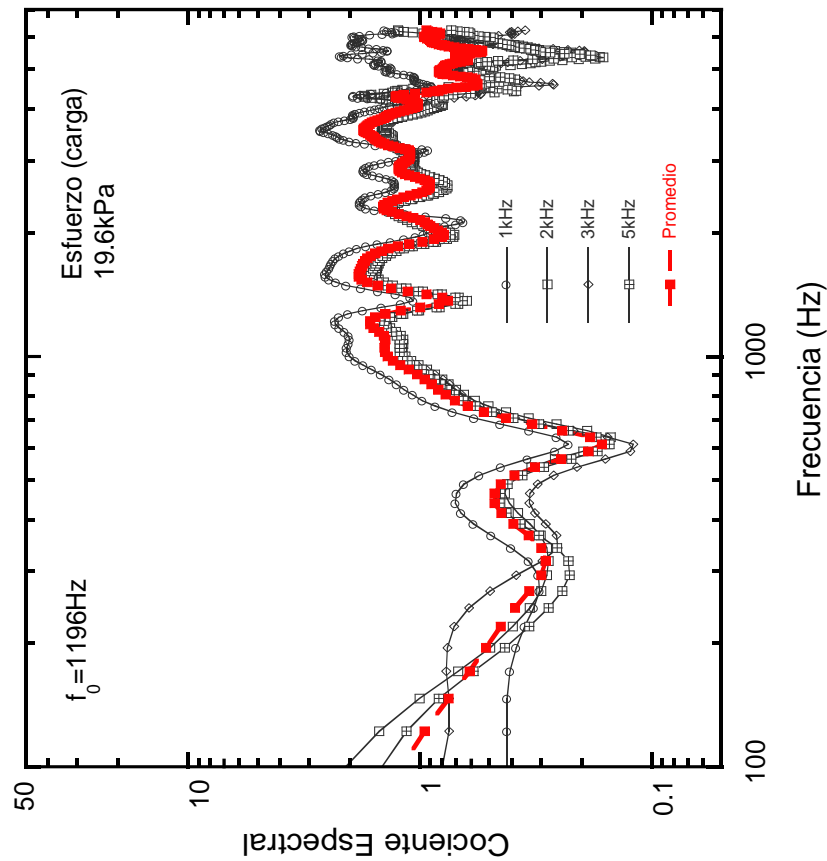
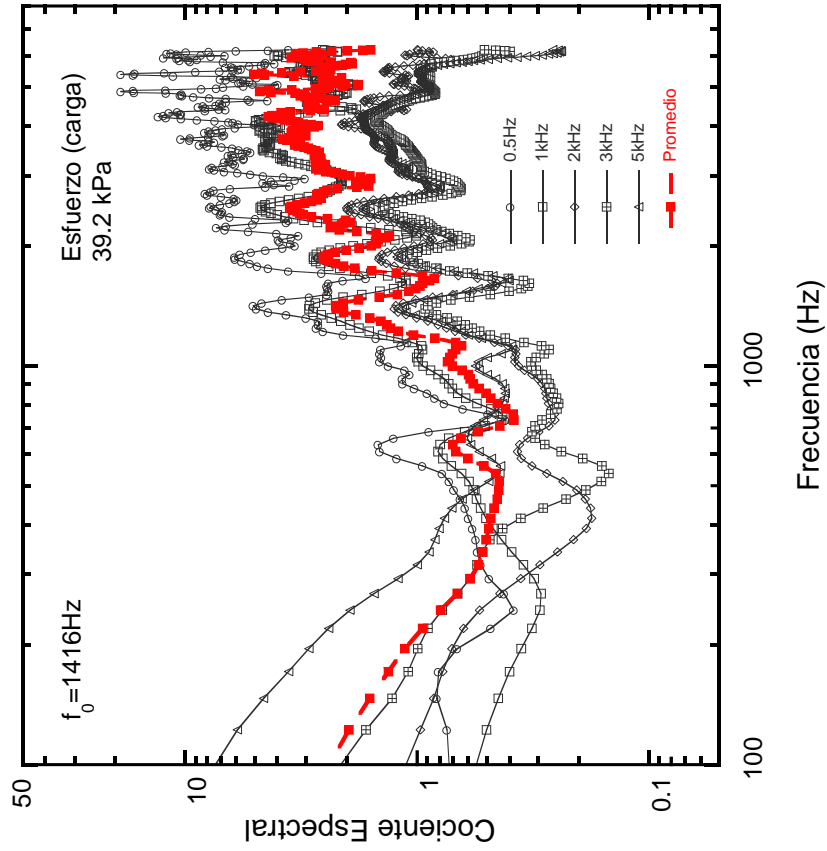
RESULTADOS	
Presión de Preconsolidación (PC)	70.14 kPa

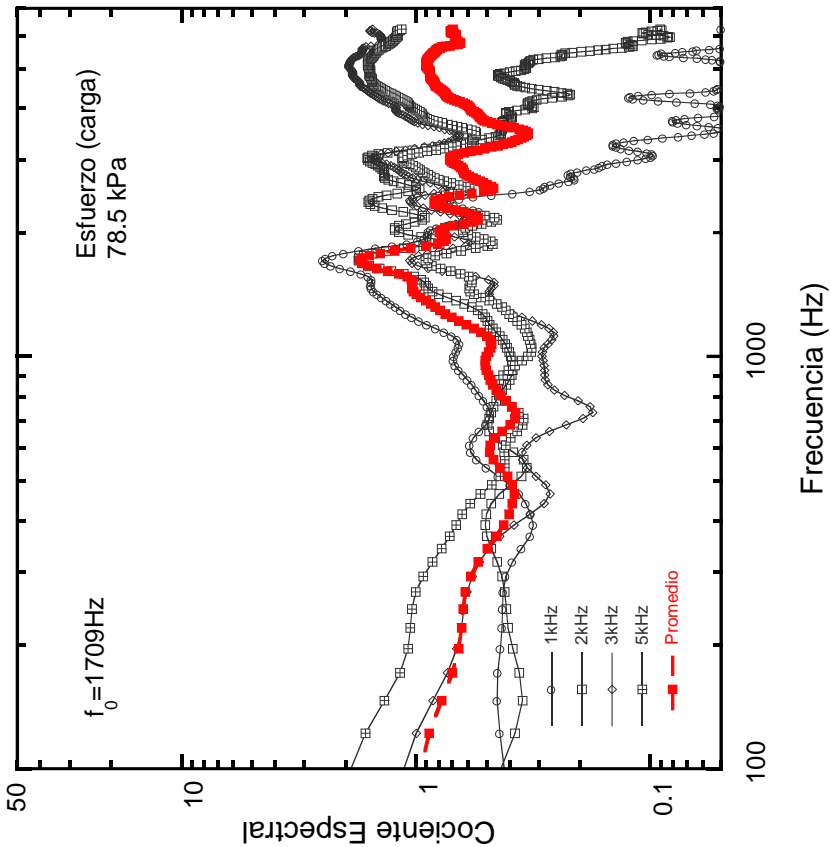
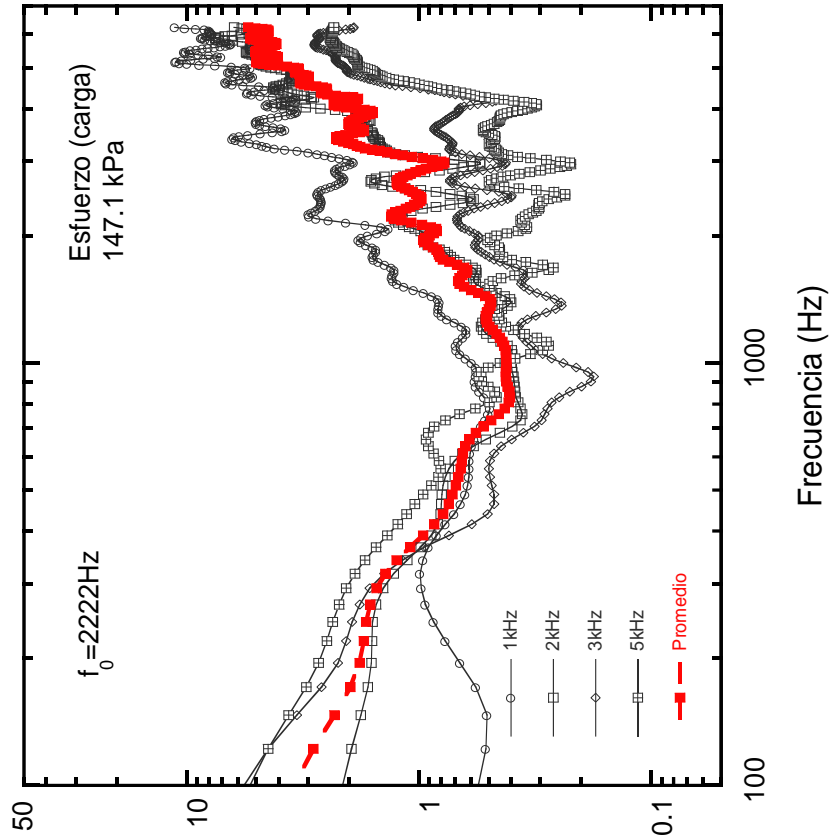
Contenido de agua inicial (%)	280.2
Contenido de agua final (%)	244.8
Saturación inicial (%)	93.5
Saturación final (%)	93.8



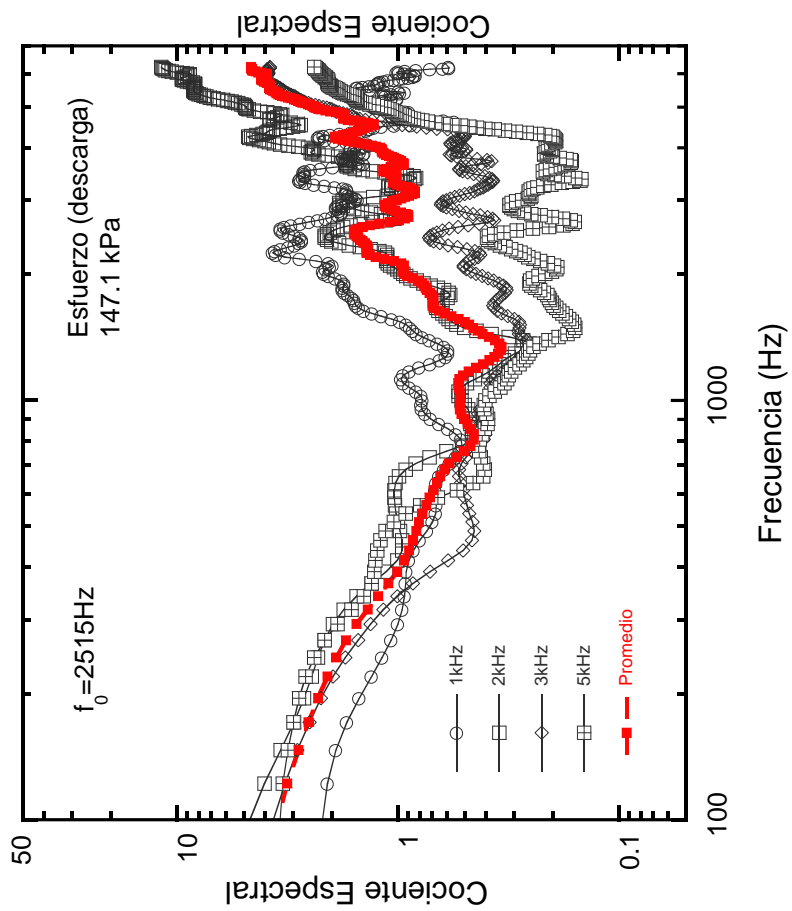
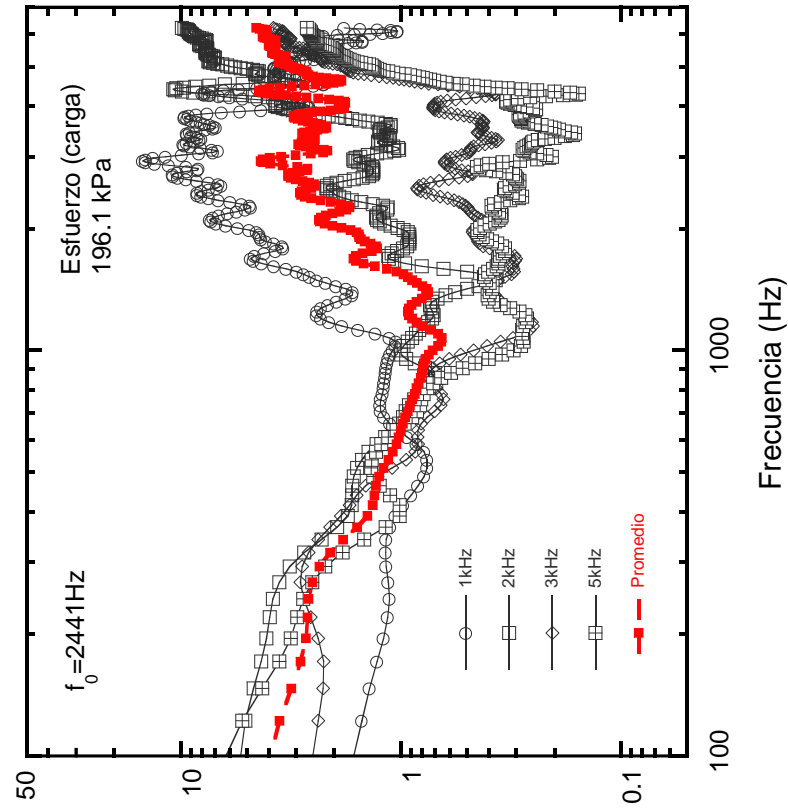


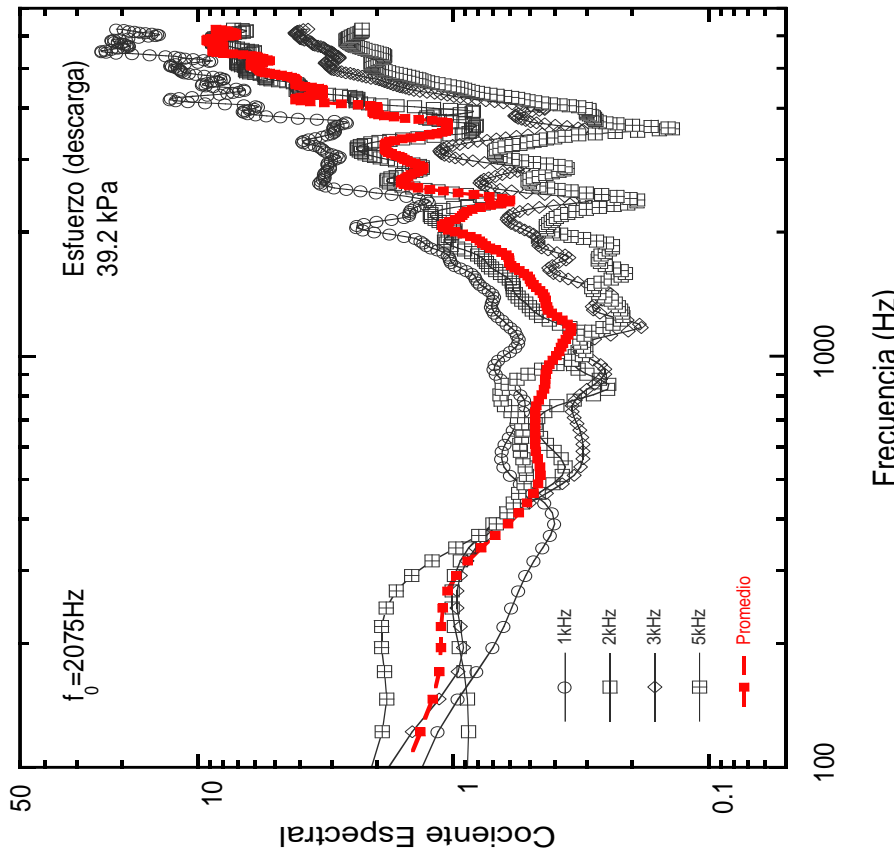
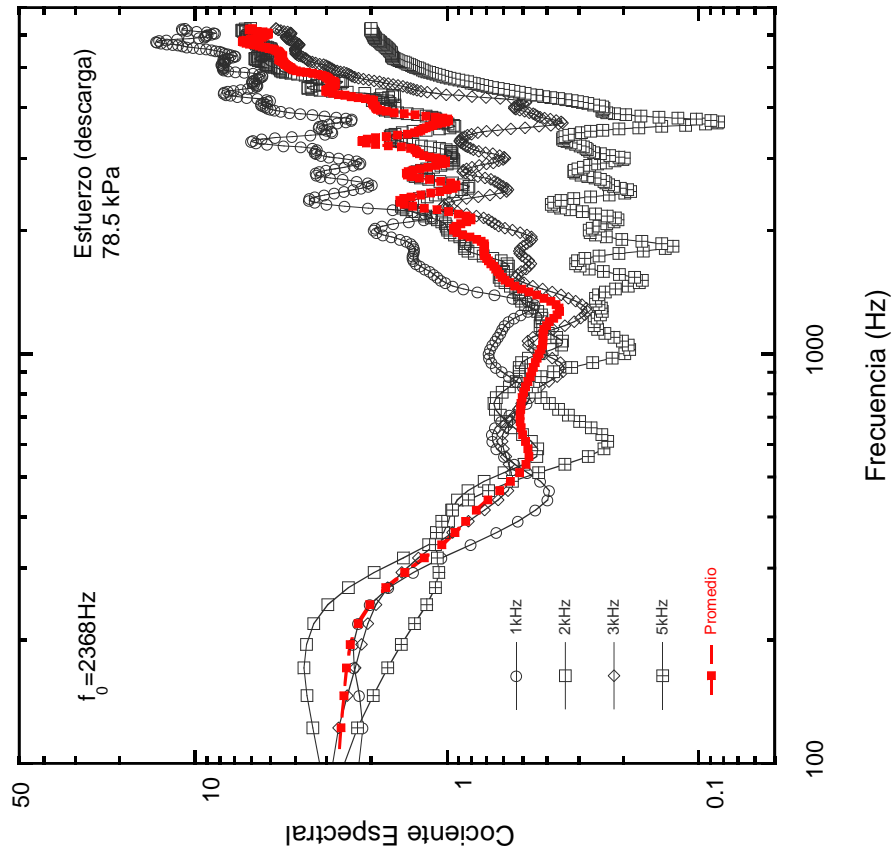


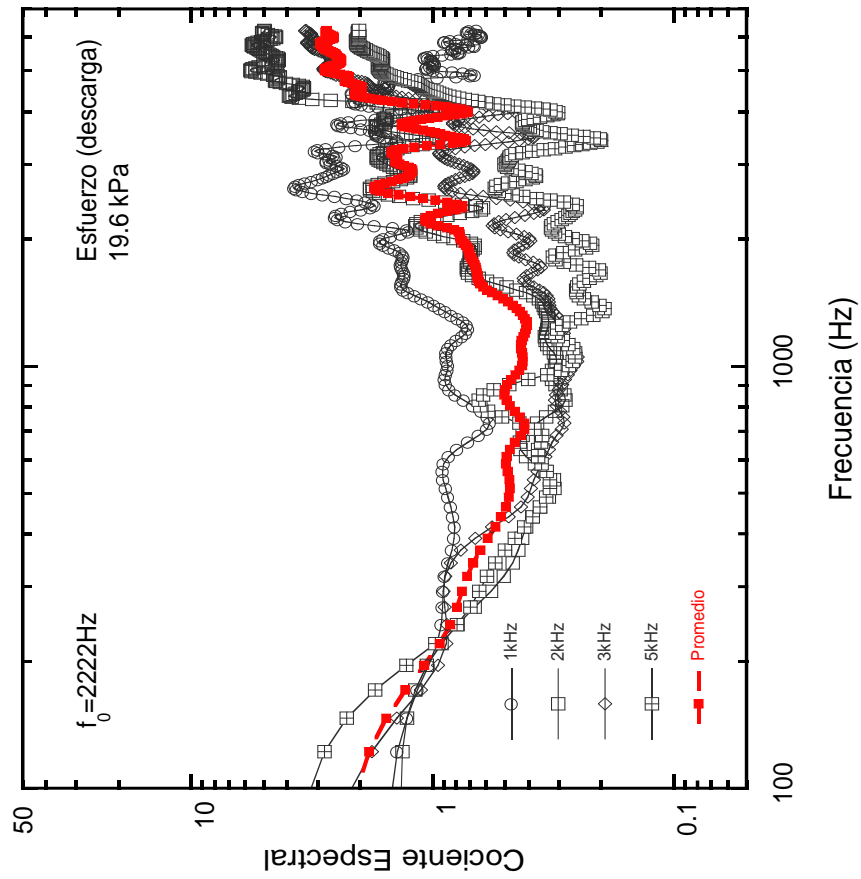








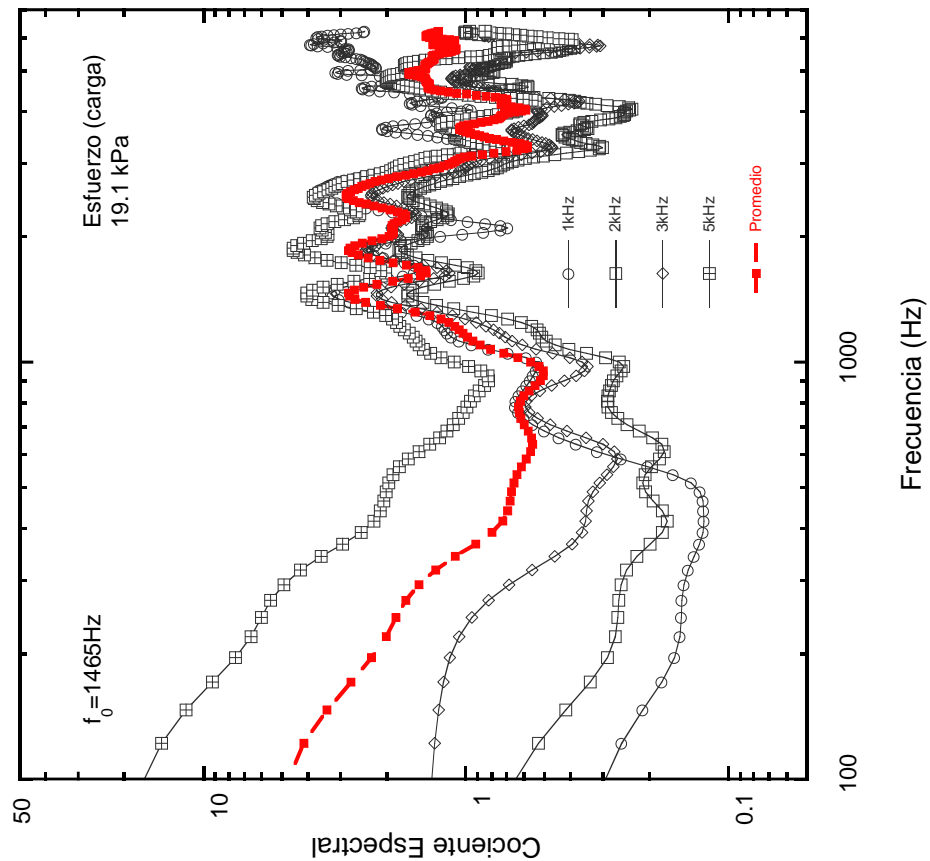
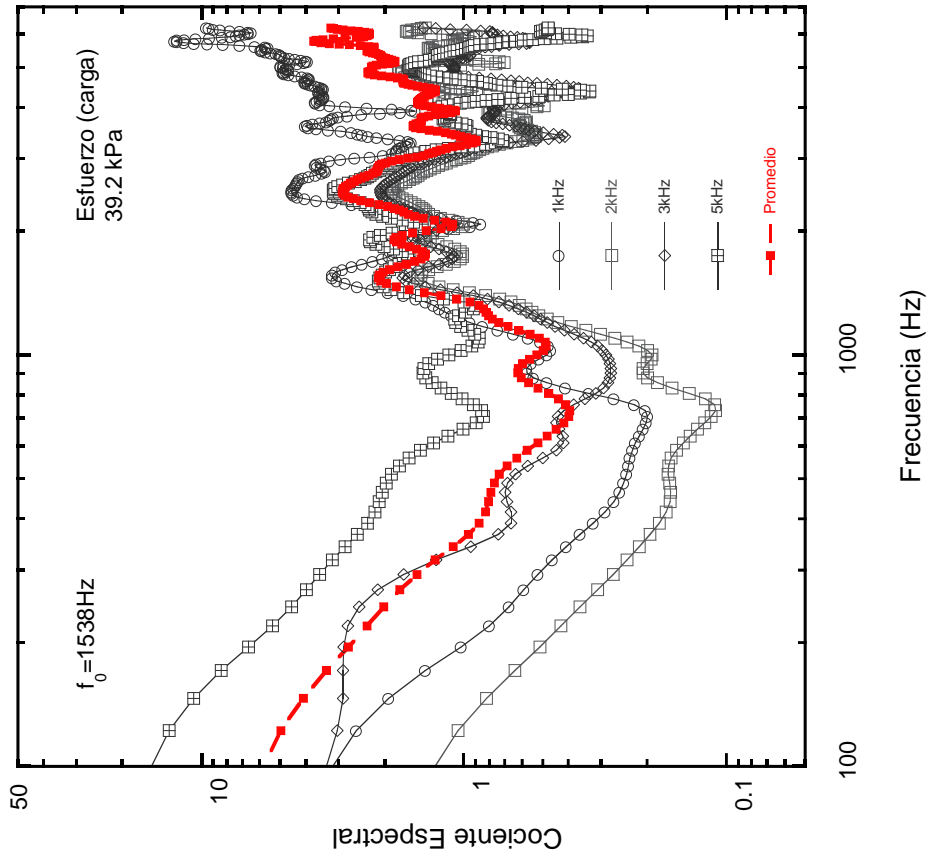


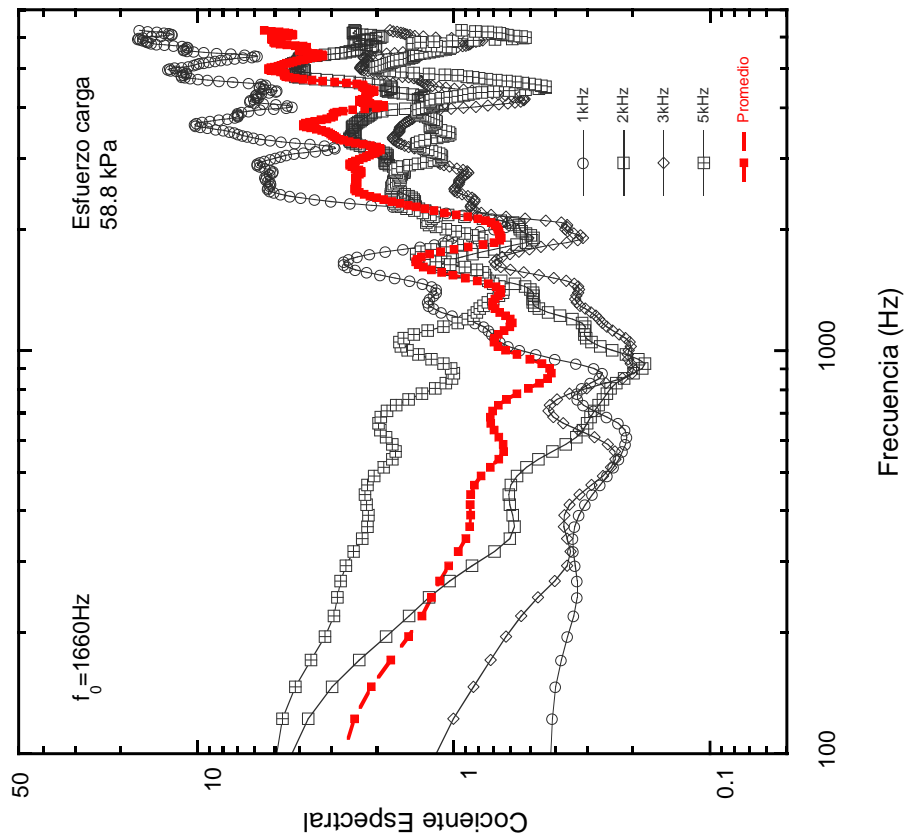
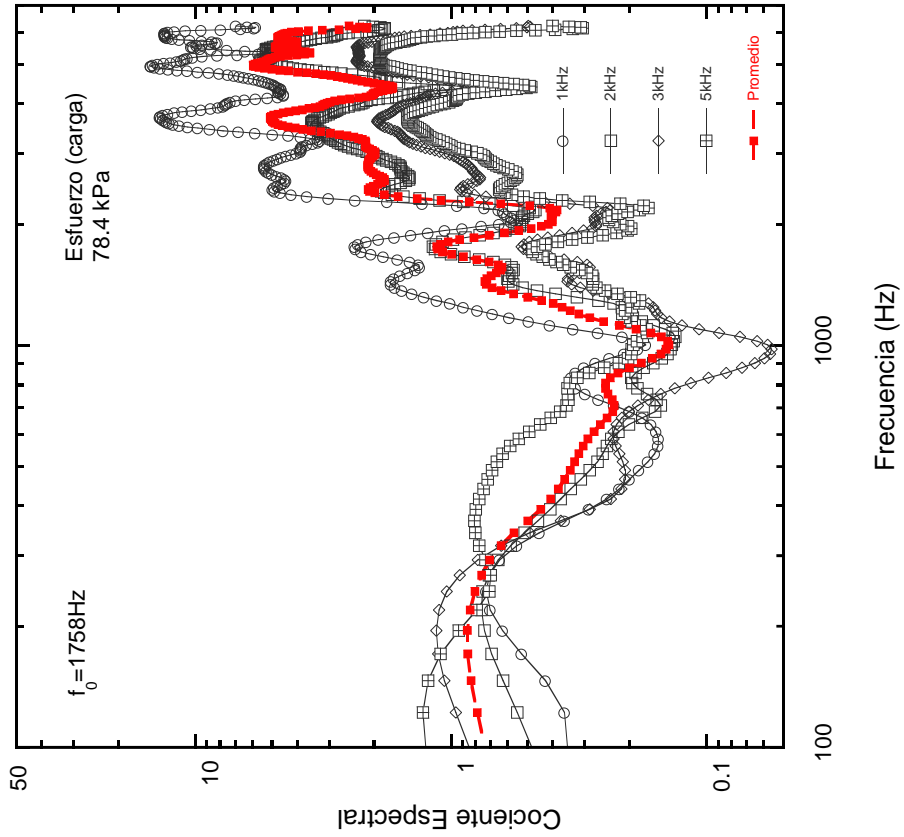




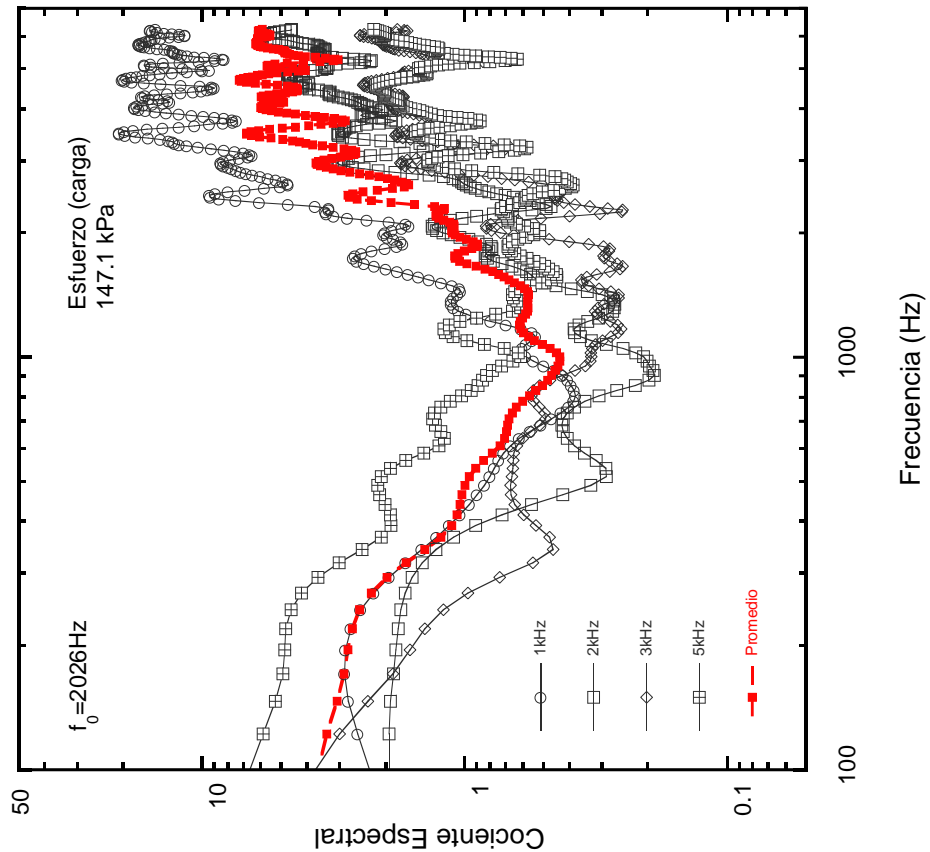
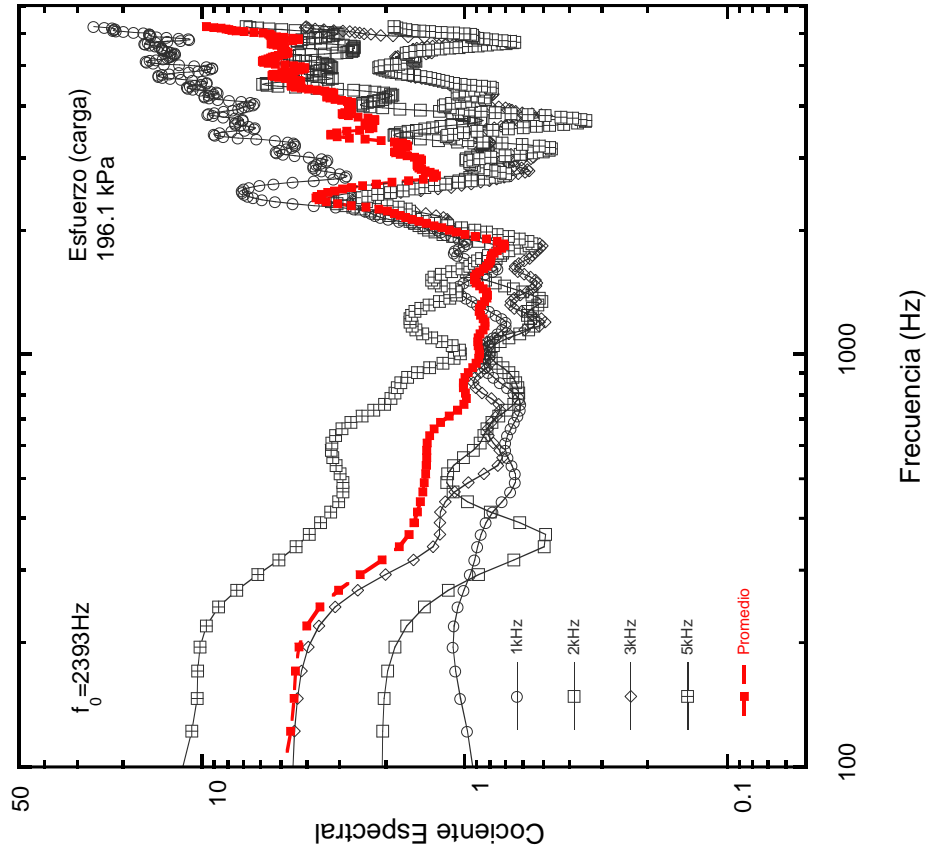


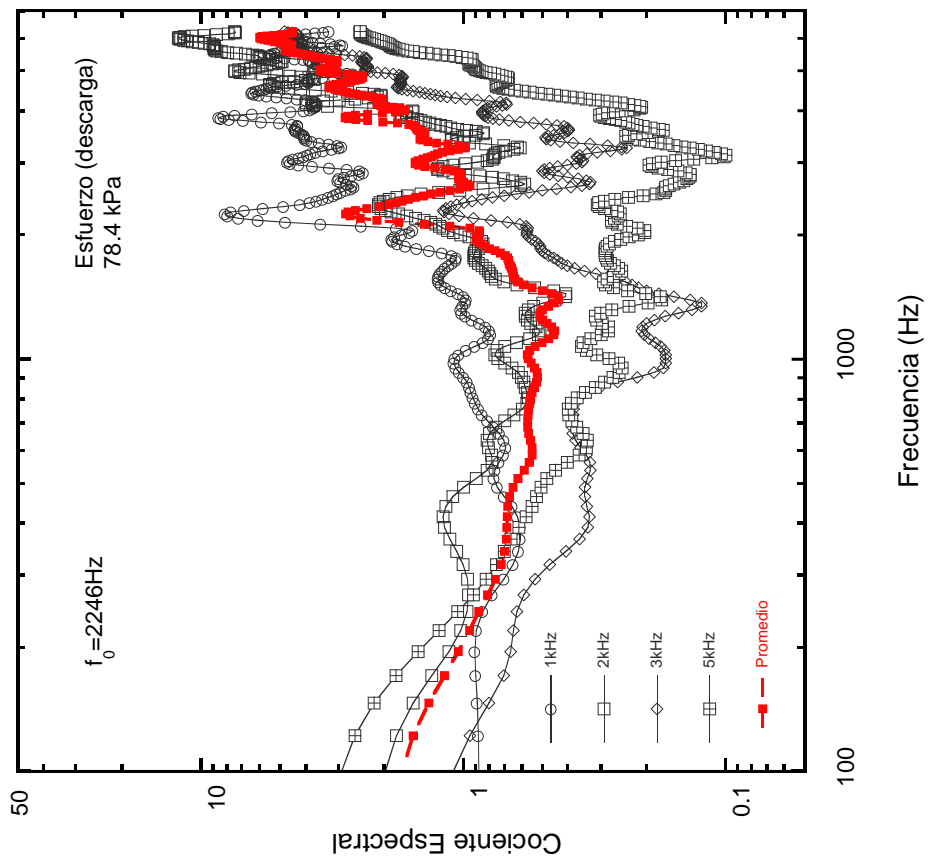
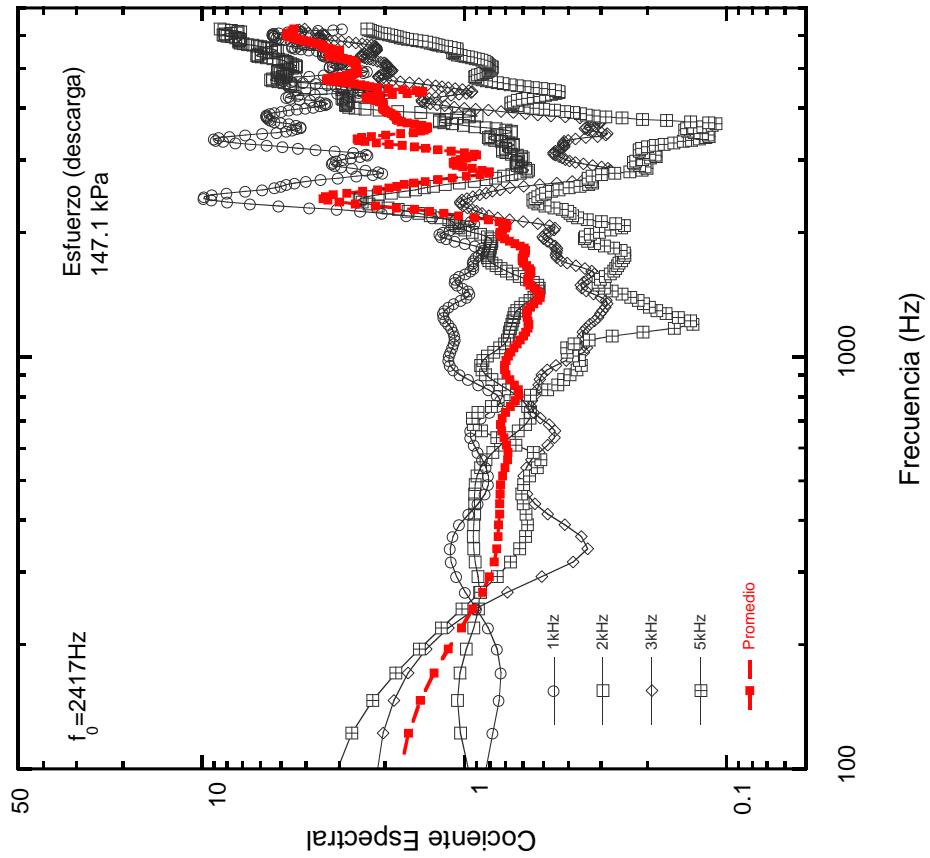


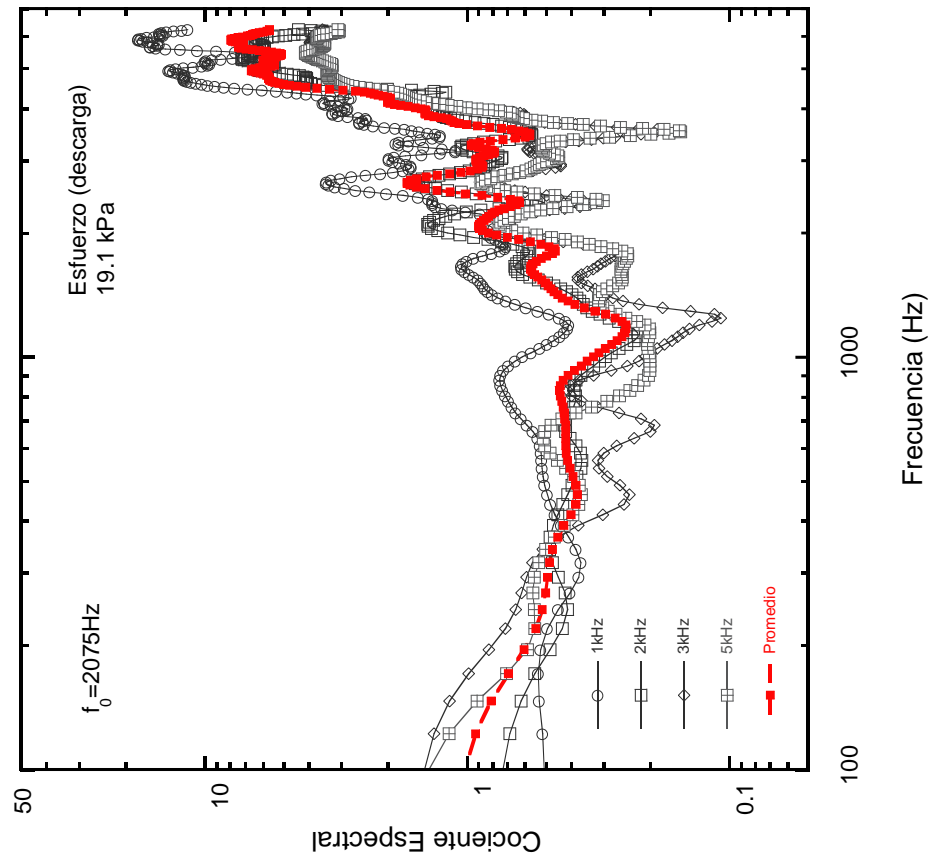
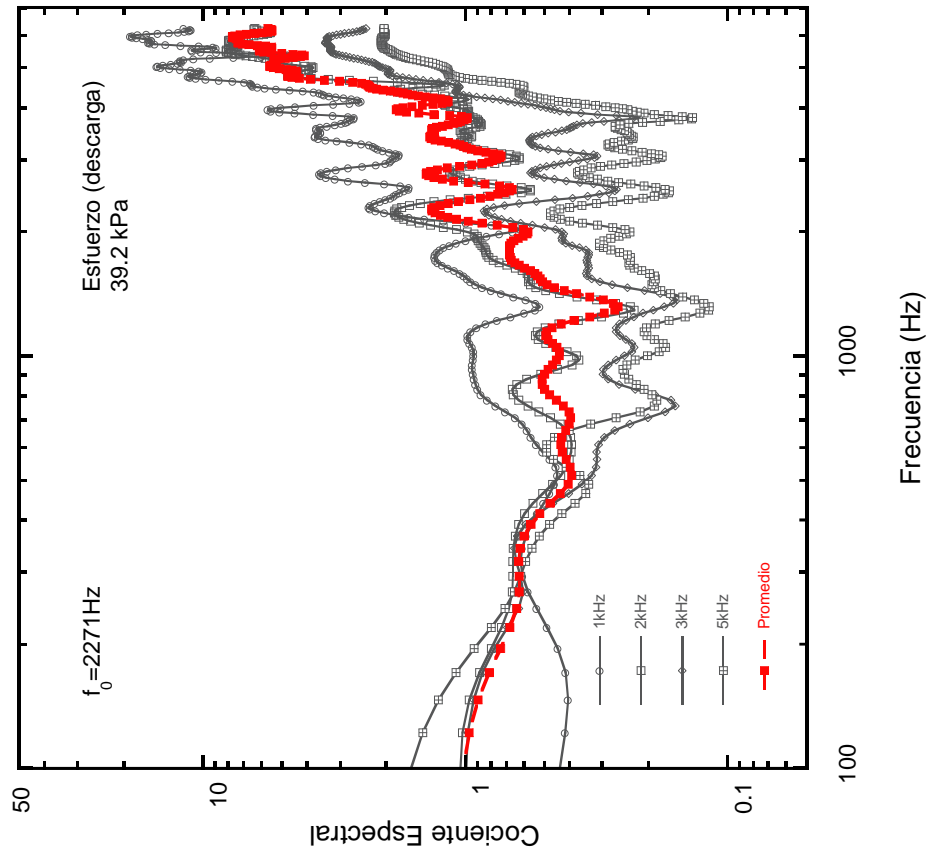








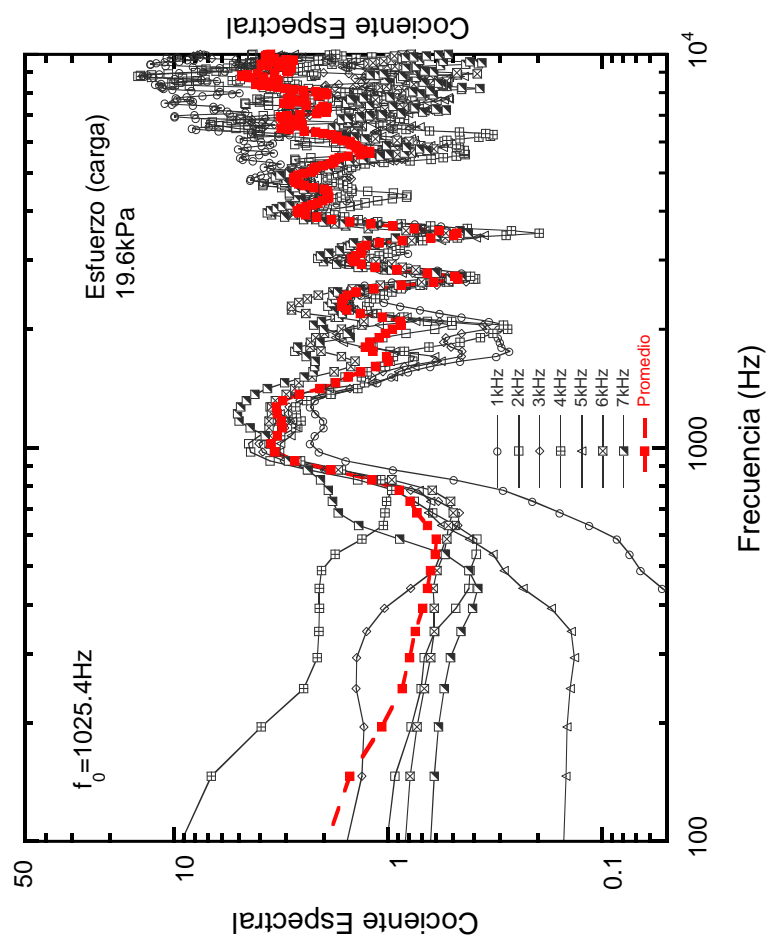
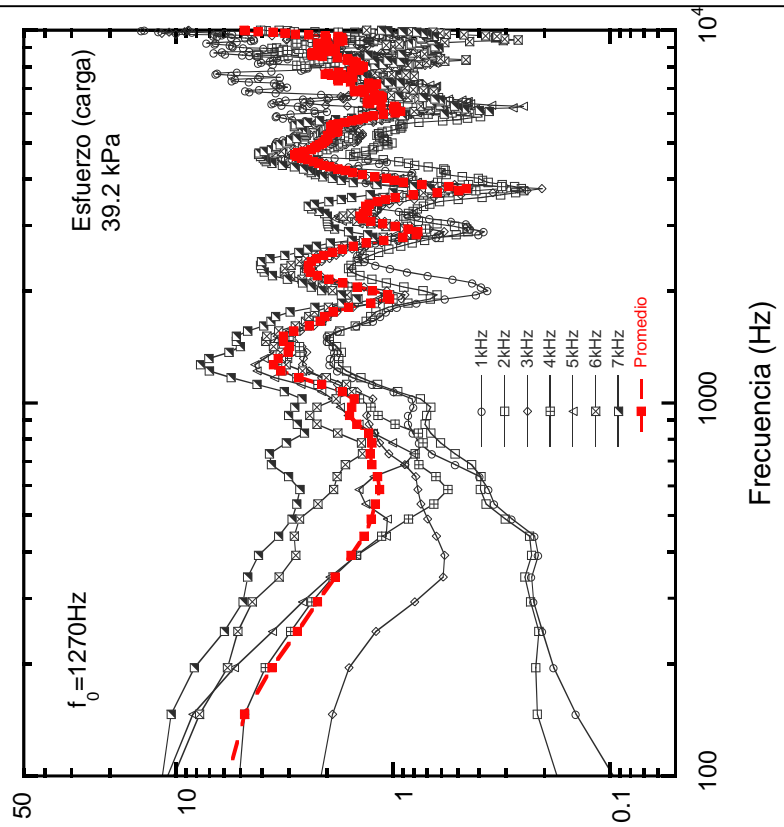


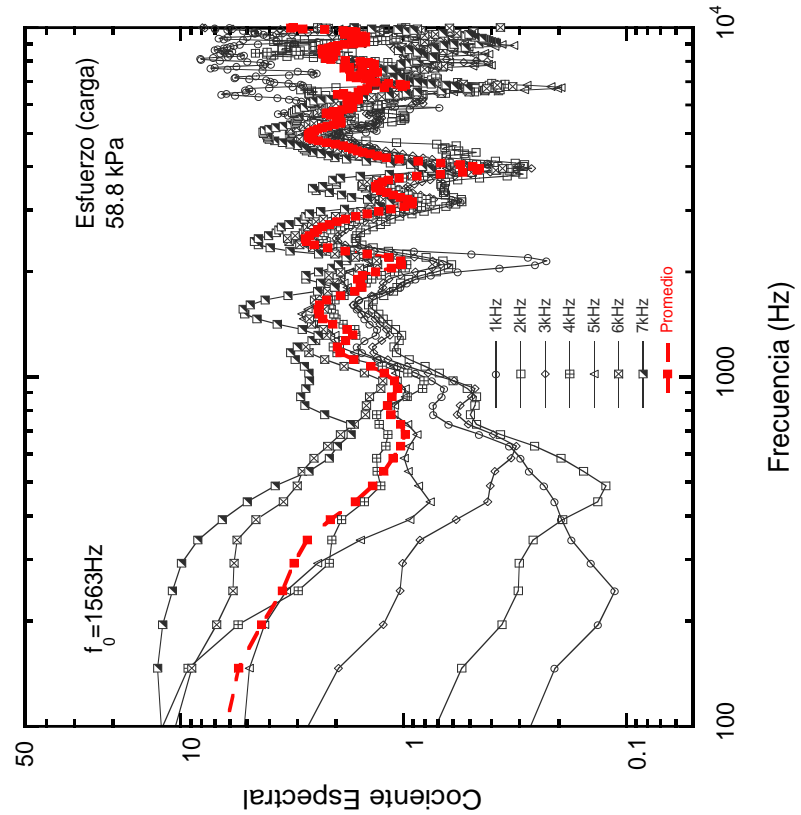
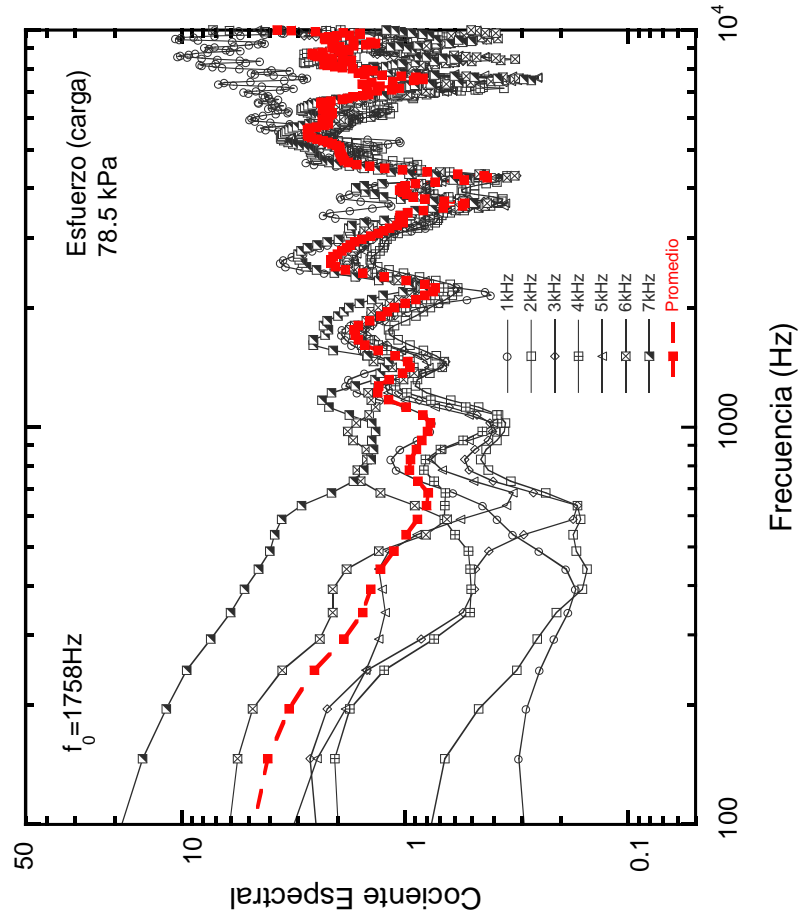




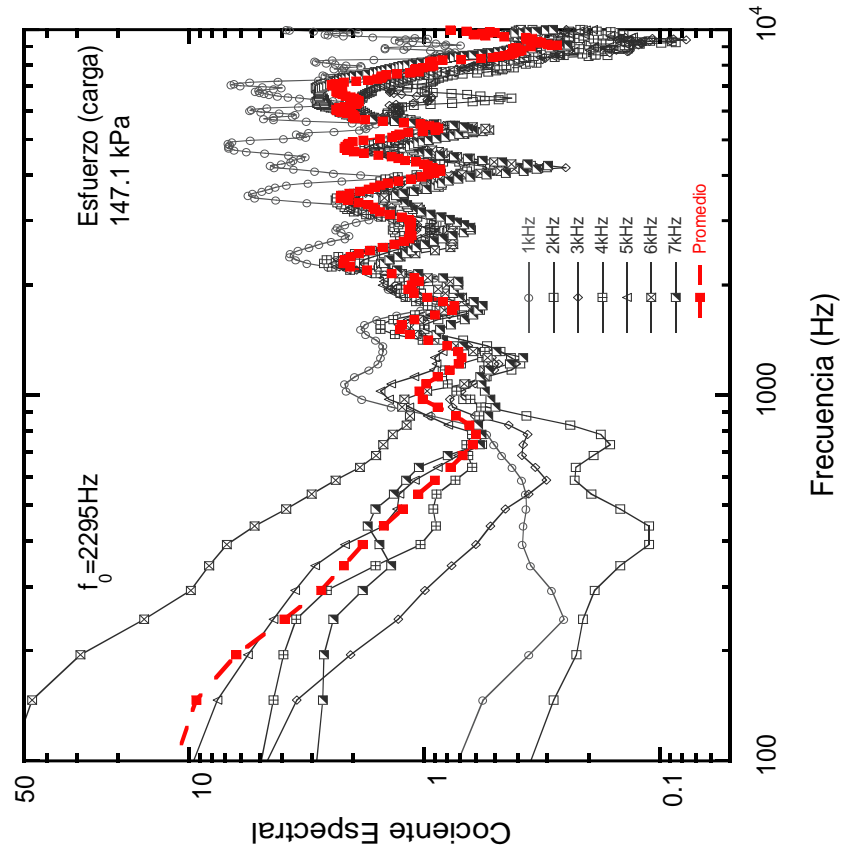
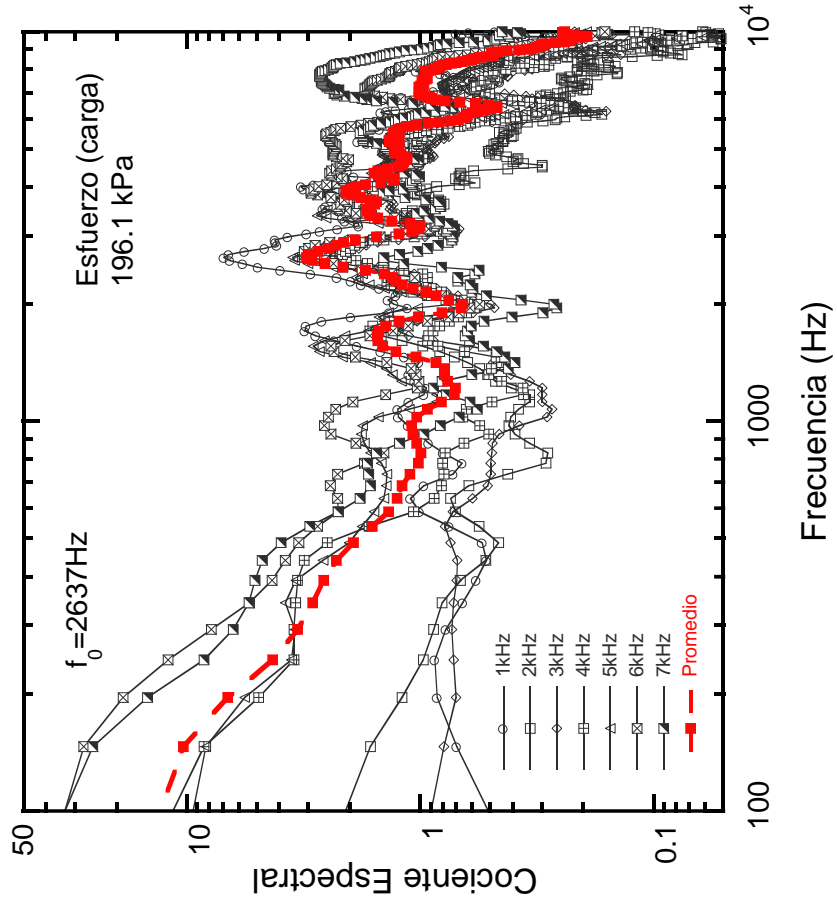


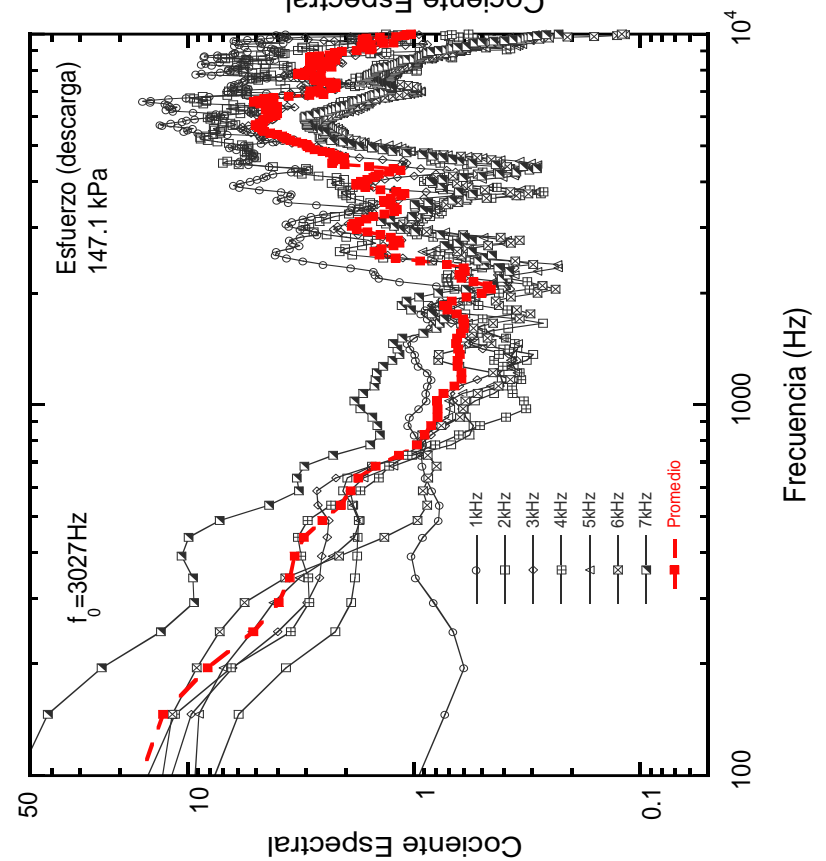
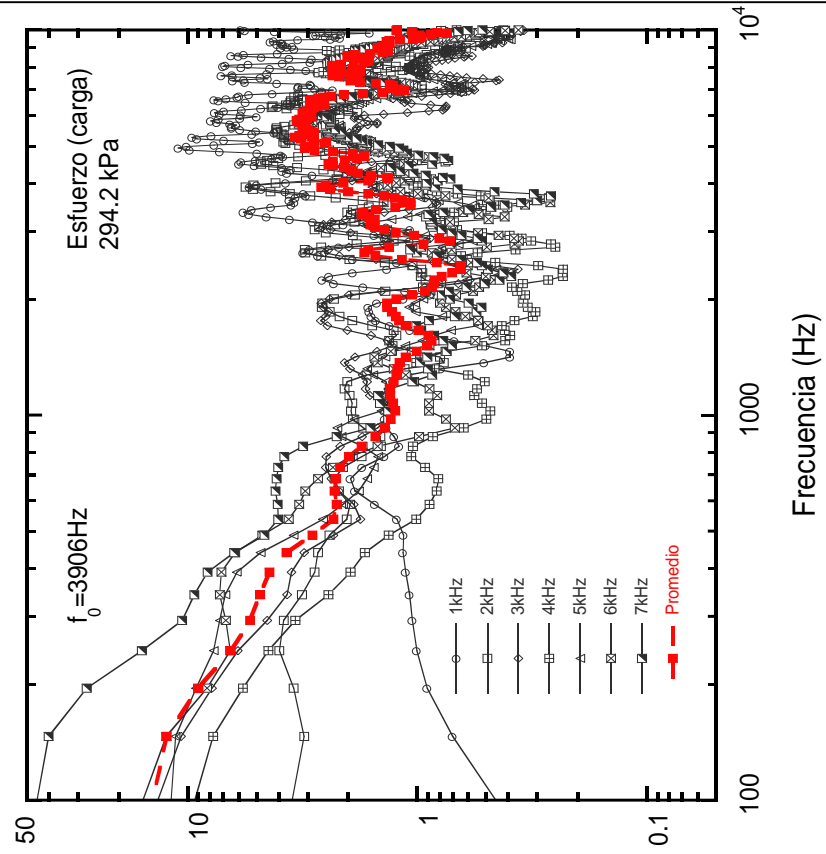


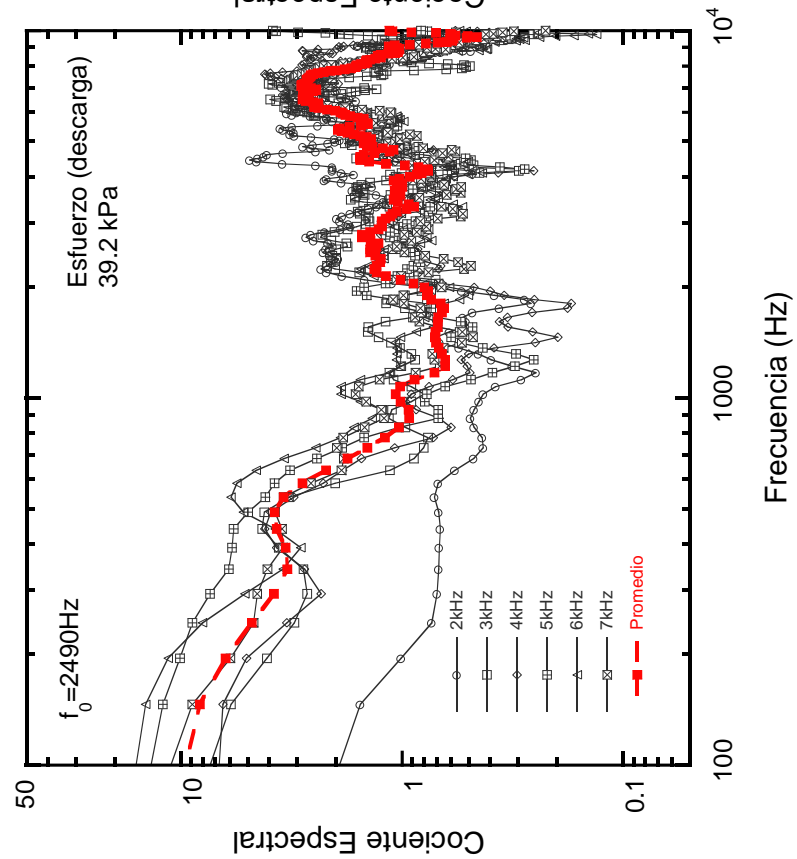
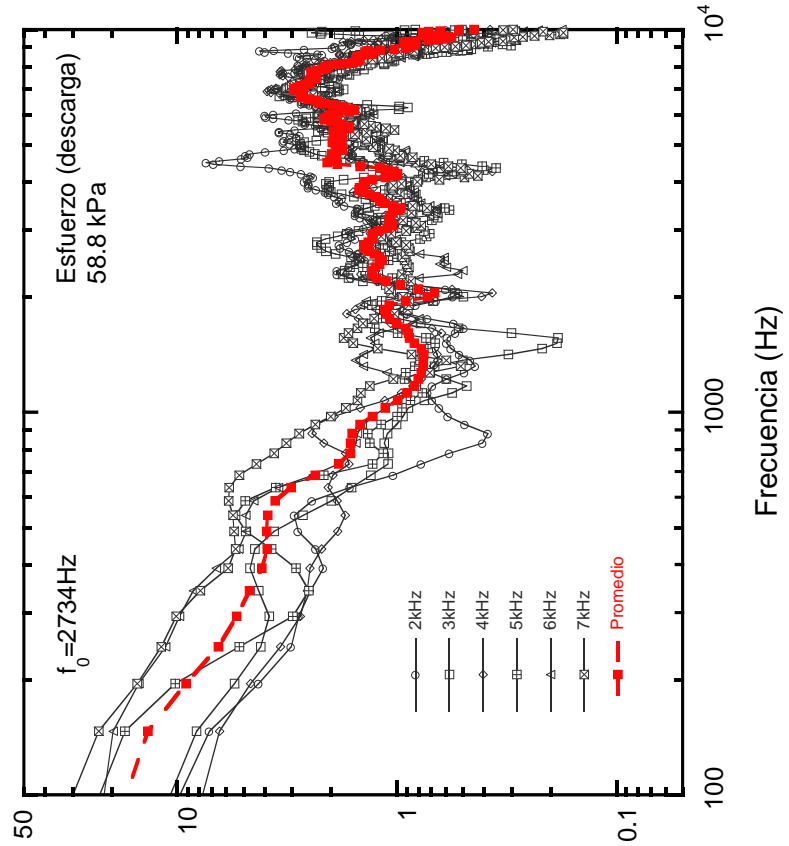


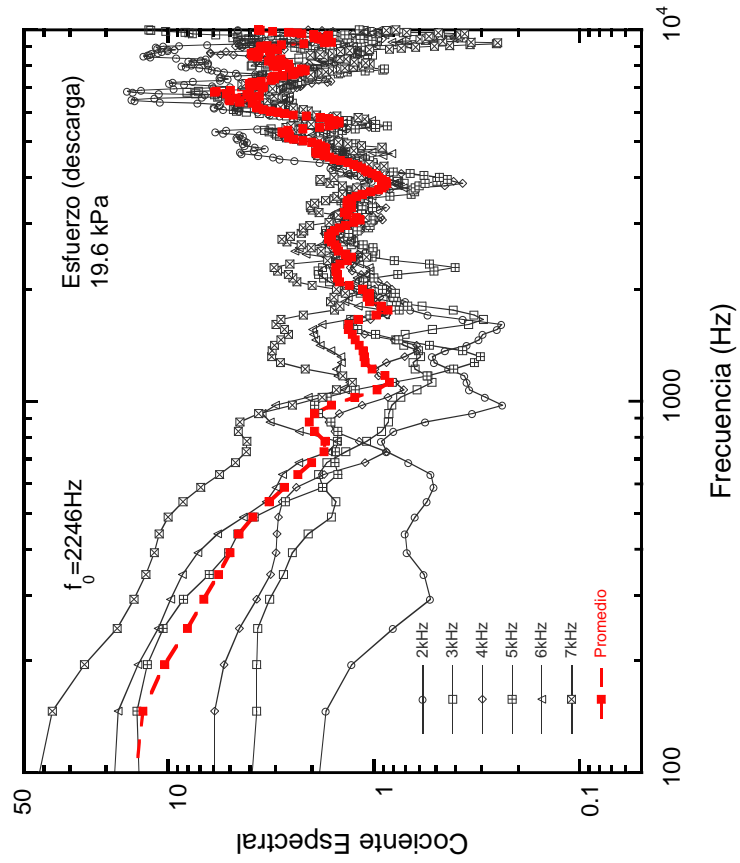






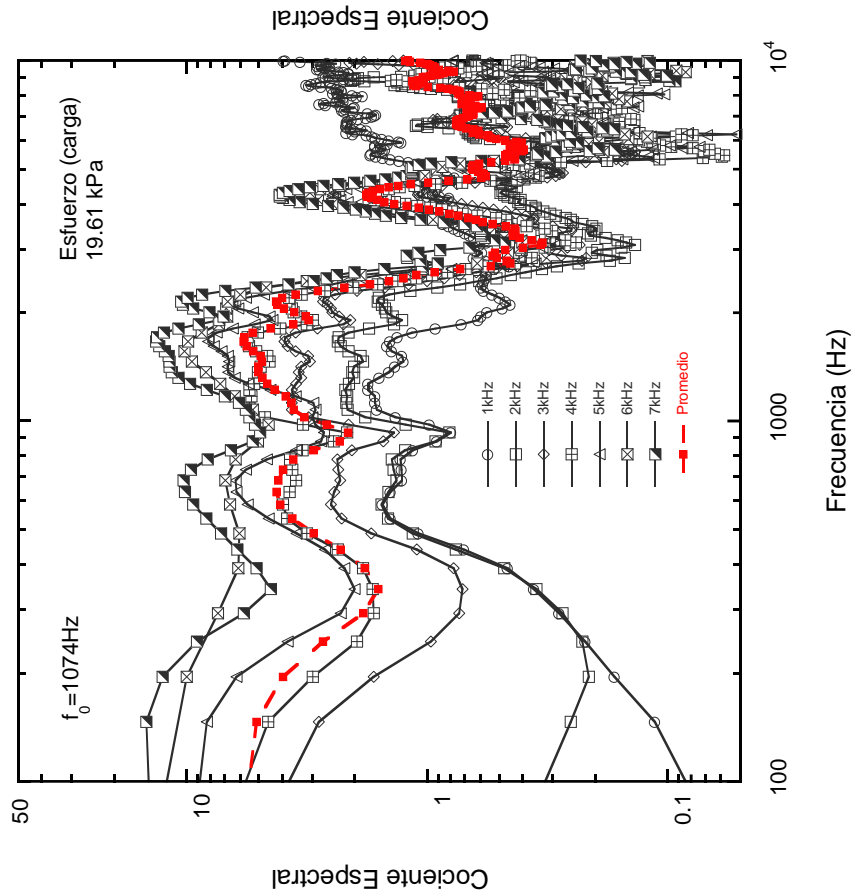
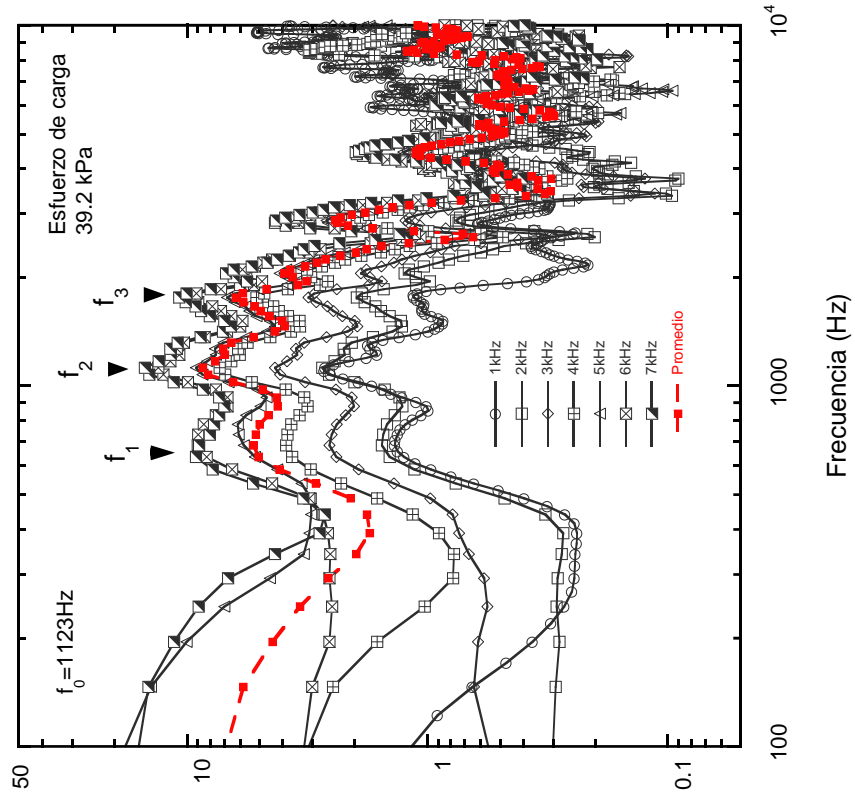


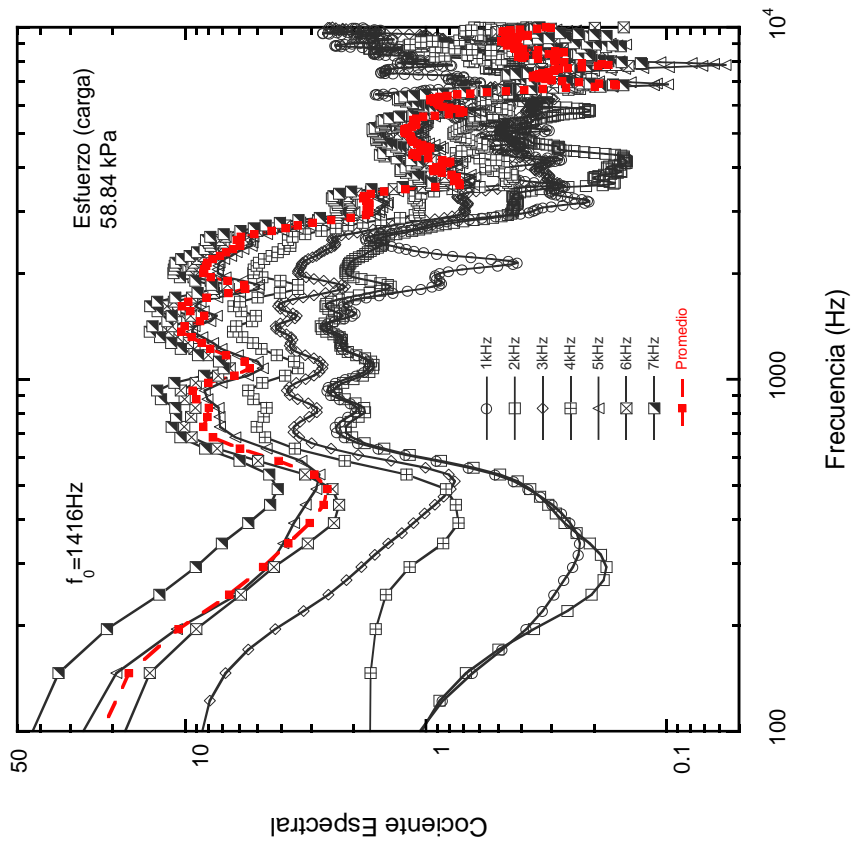
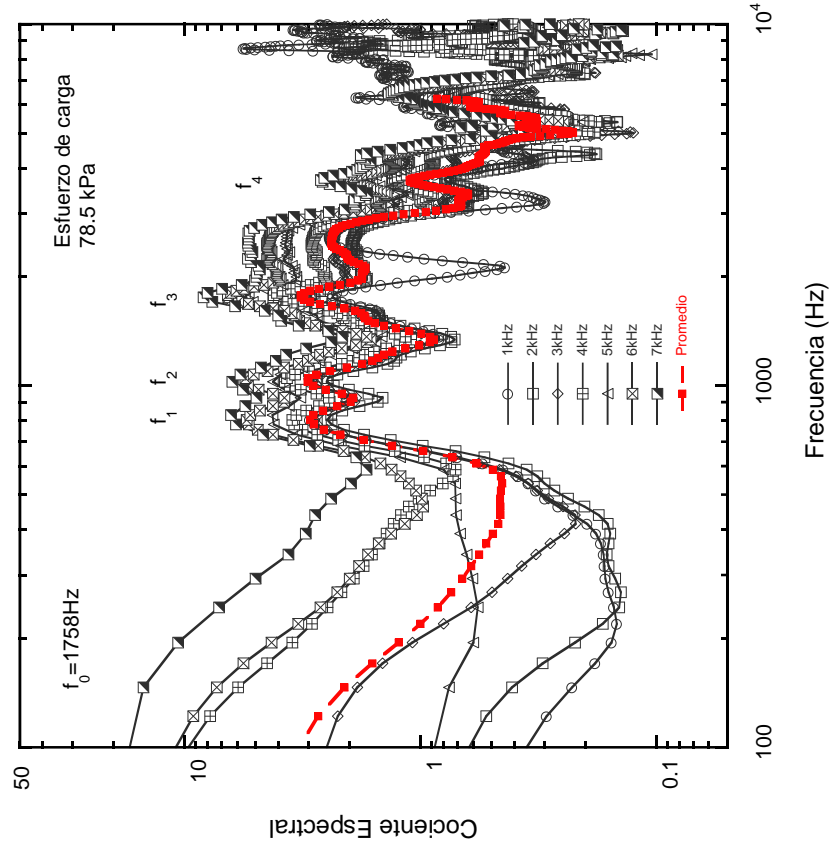




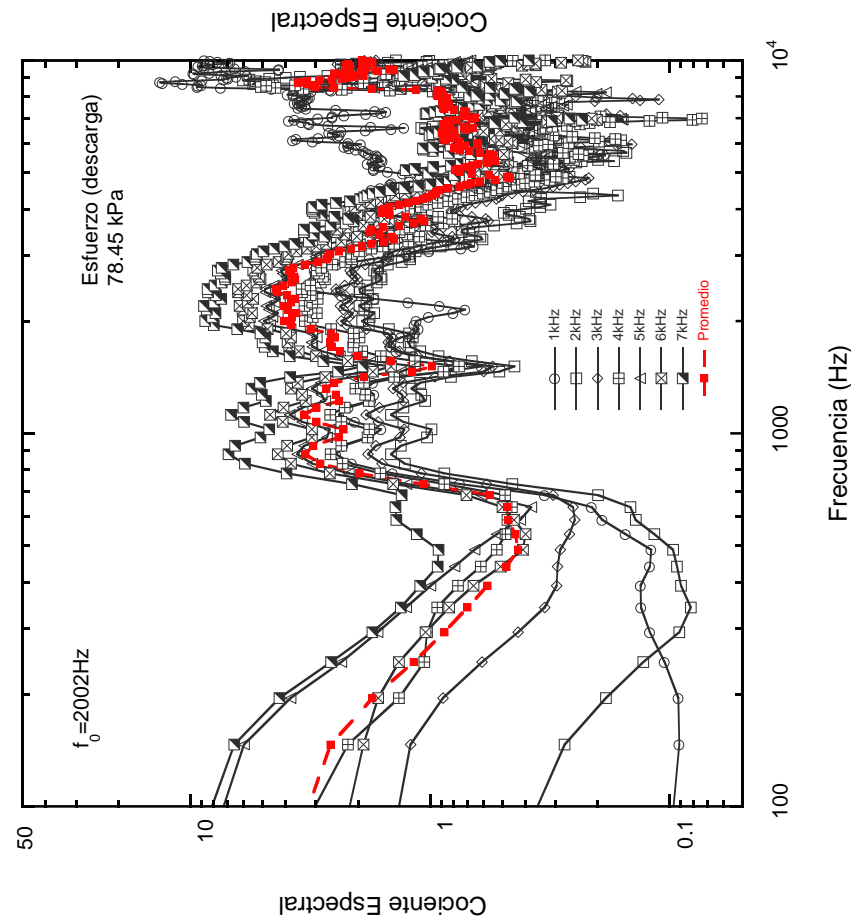
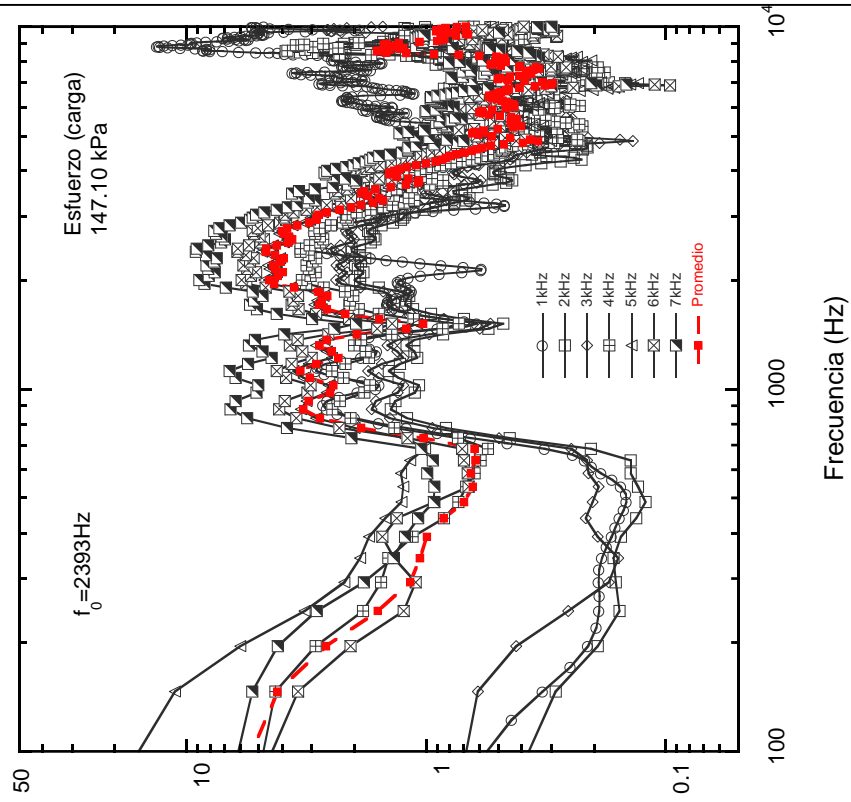


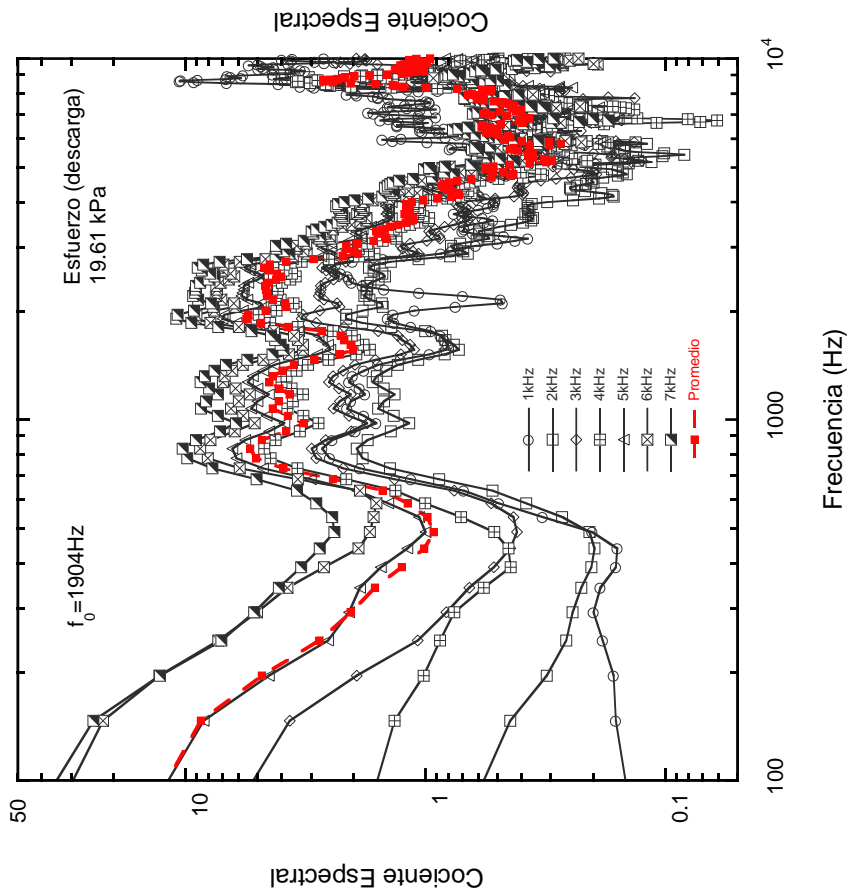
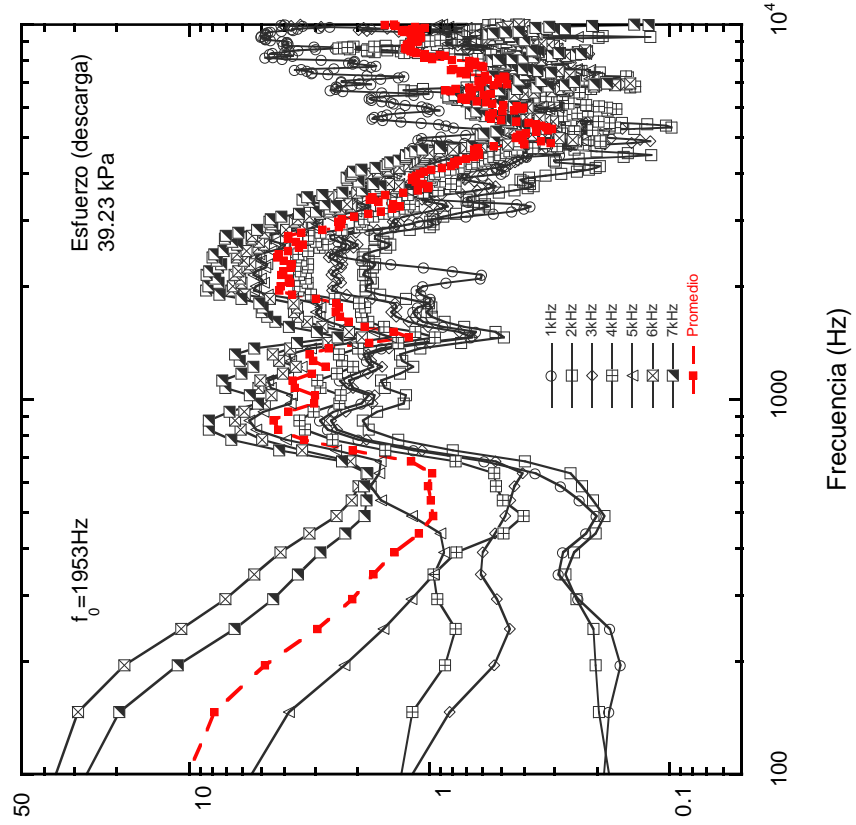






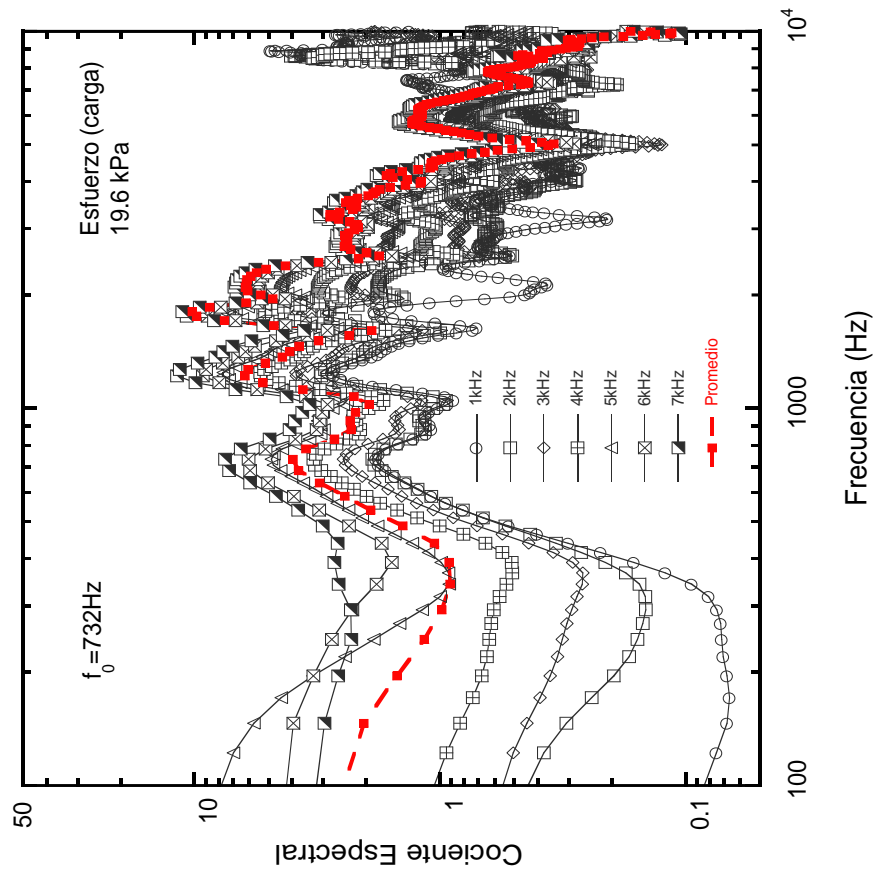
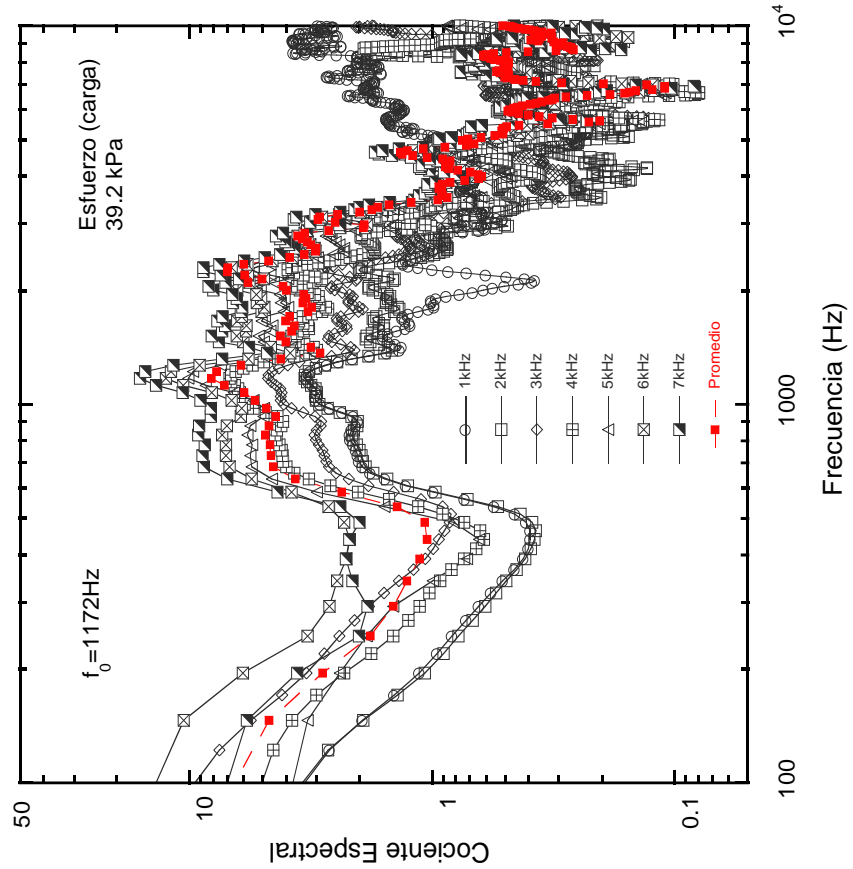


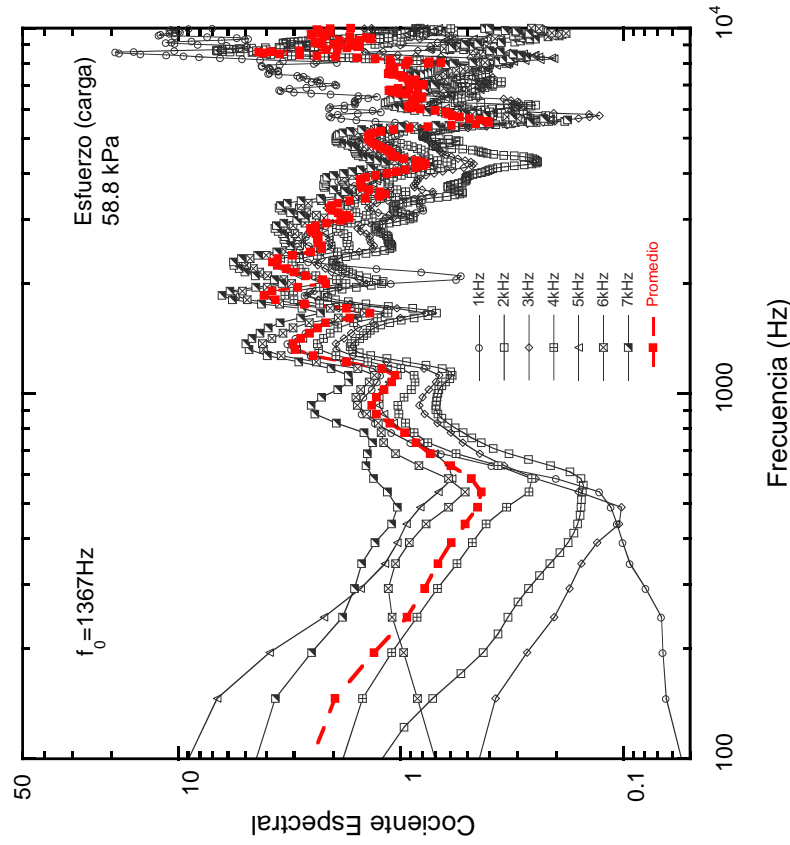
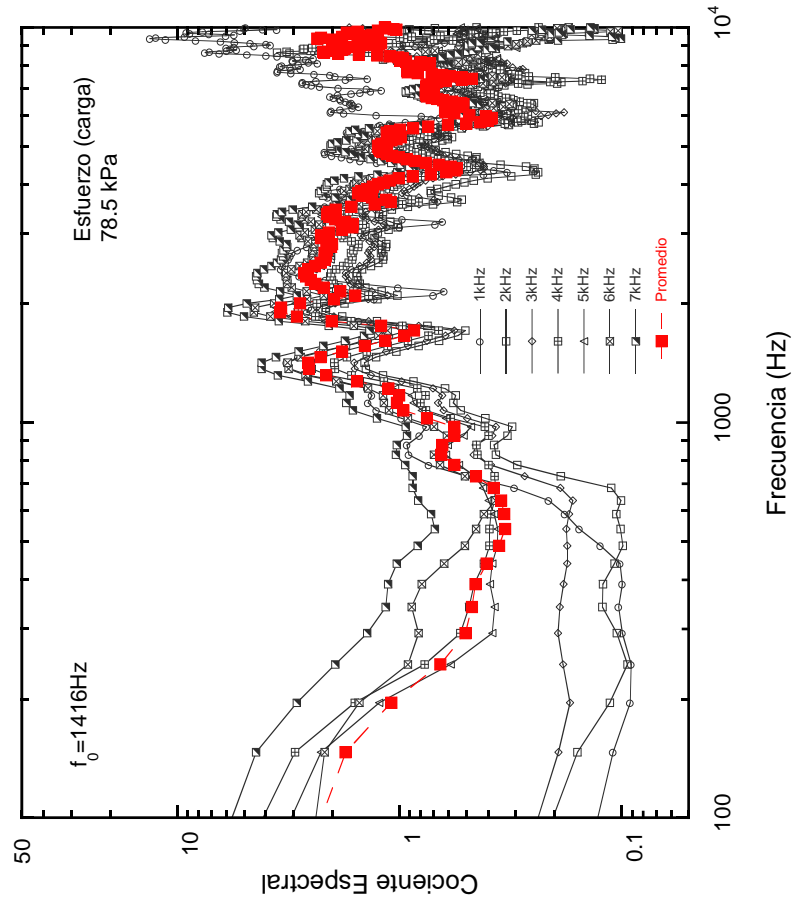


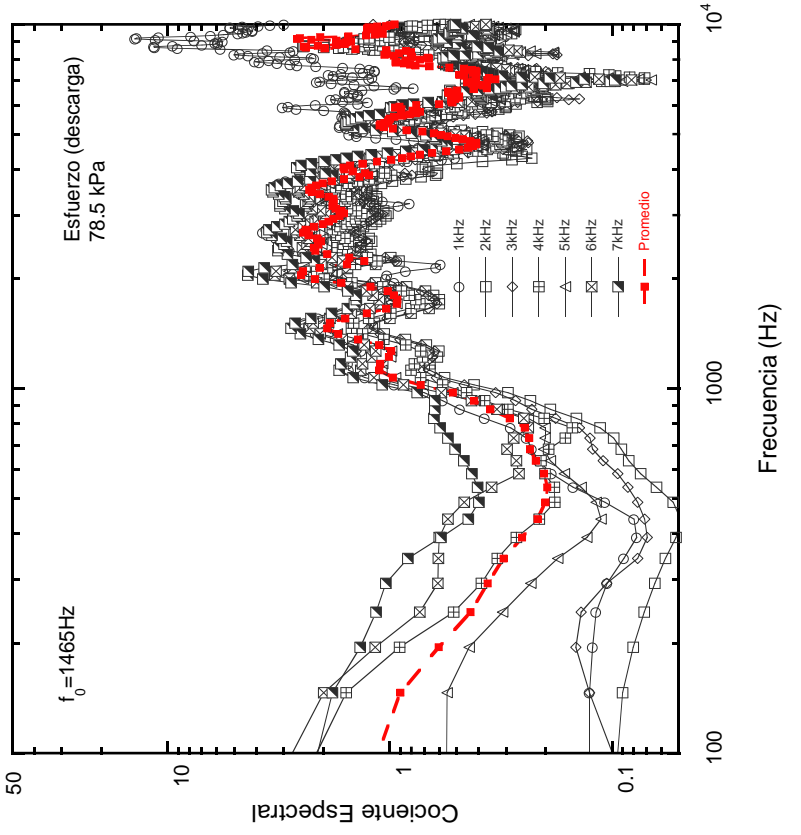
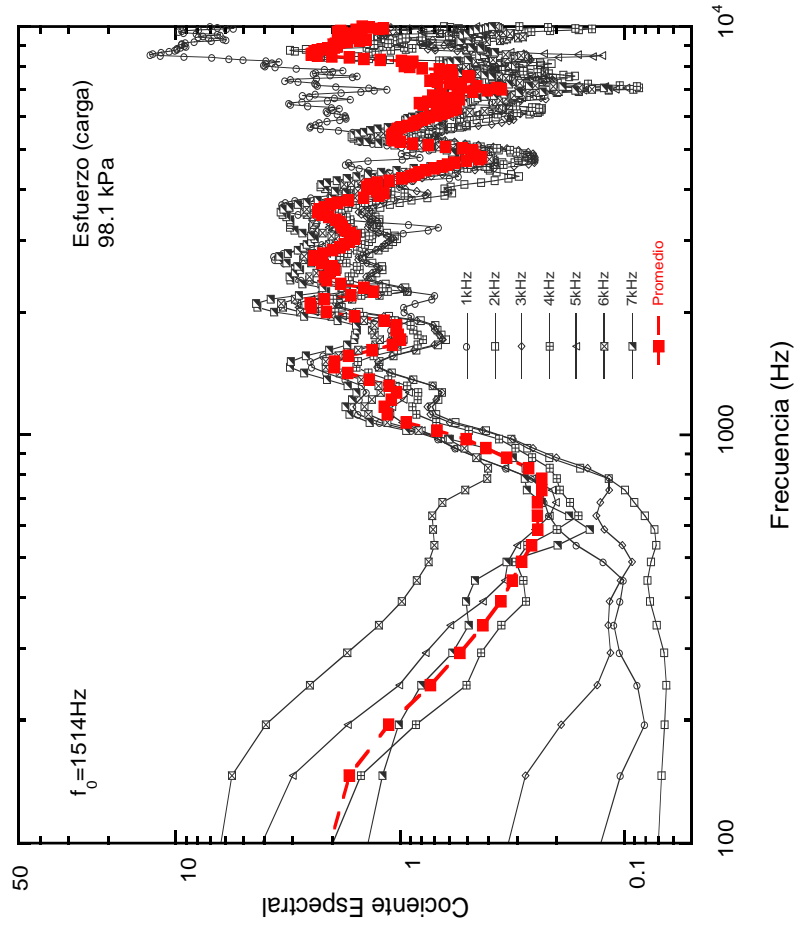


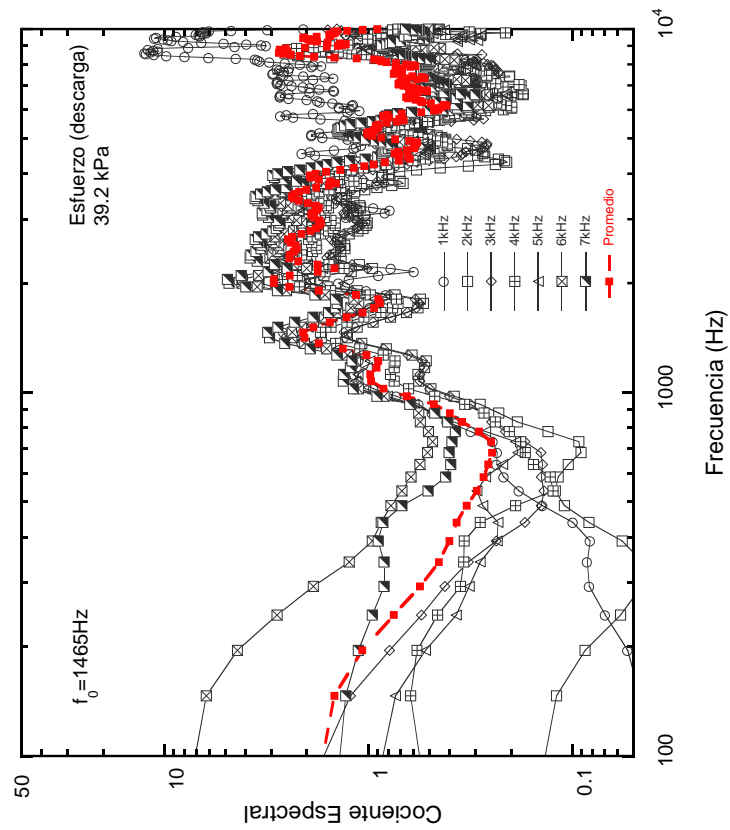
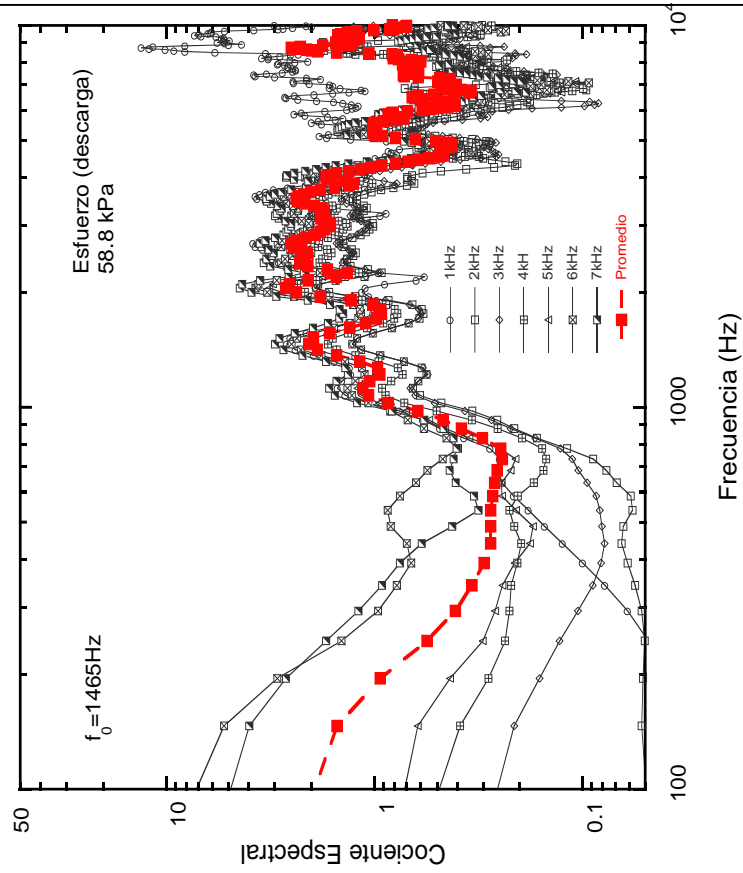




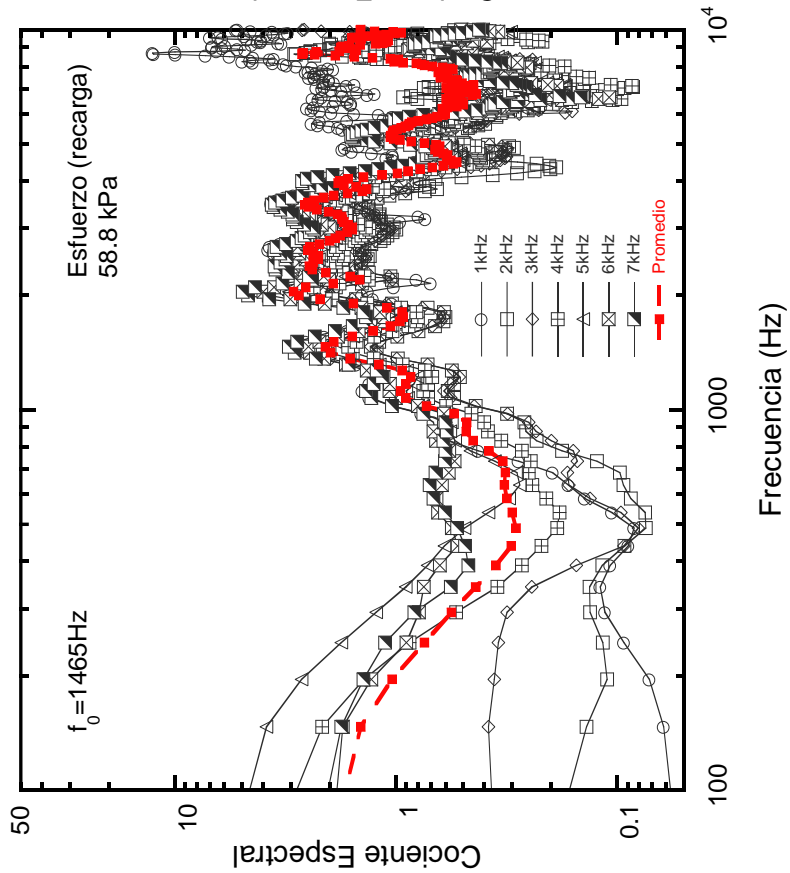
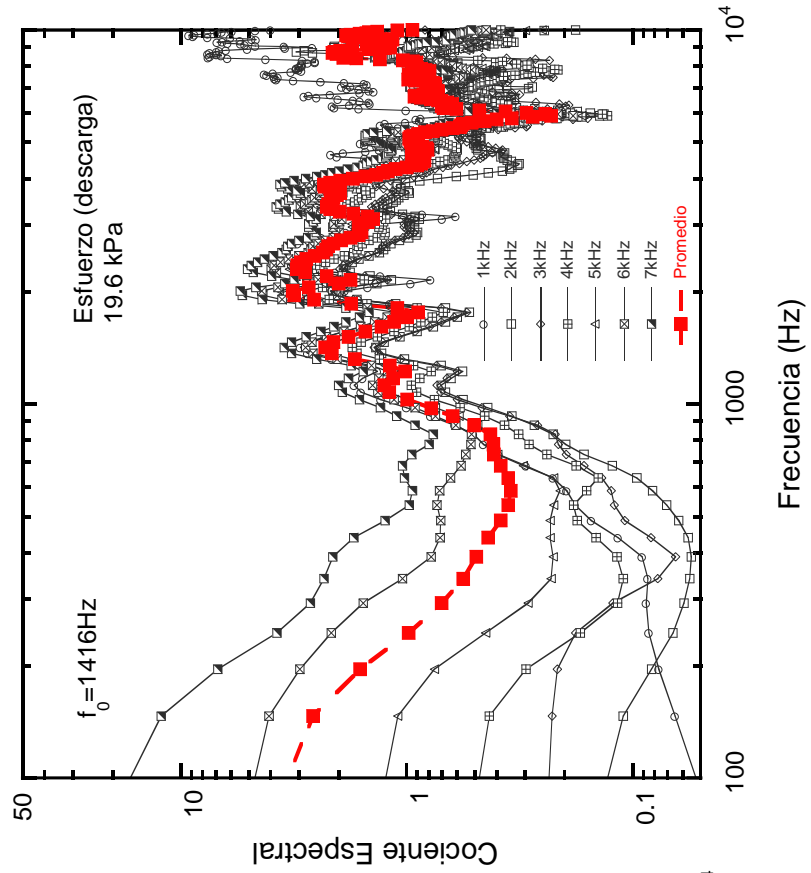


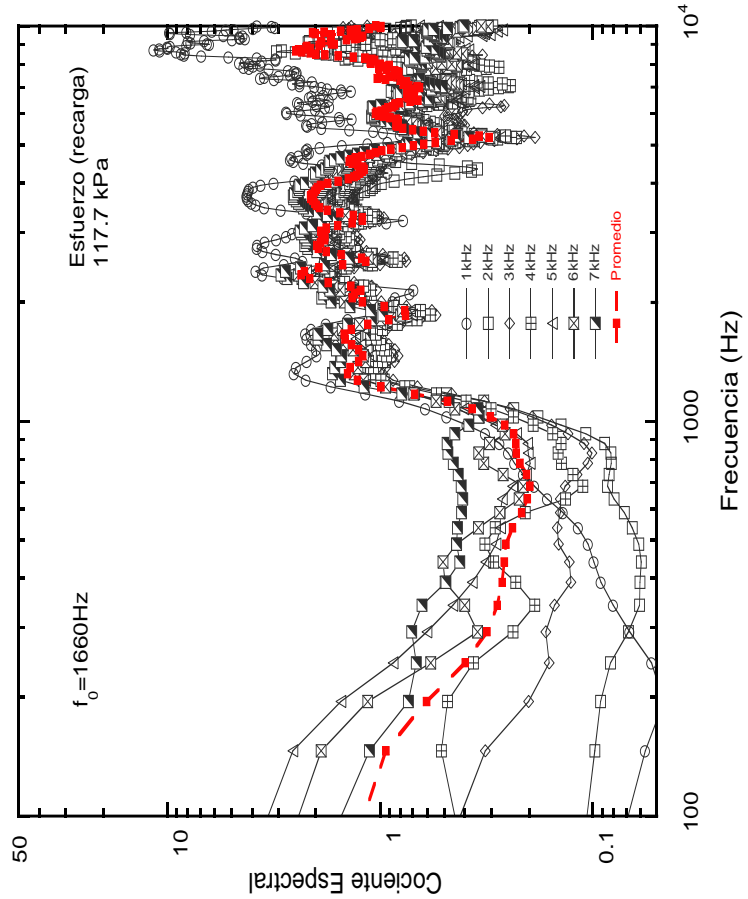
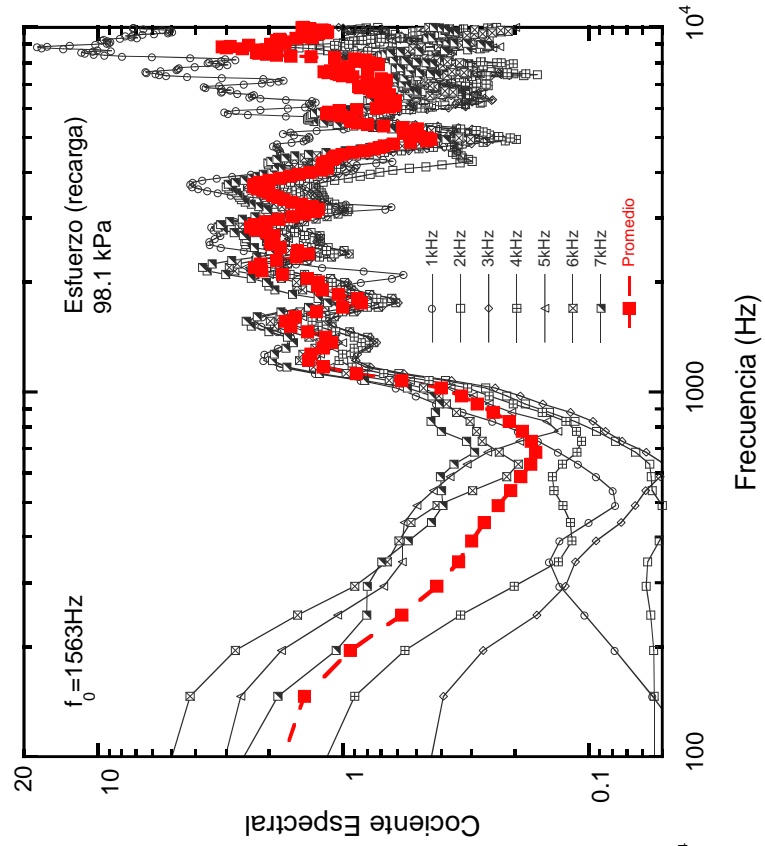






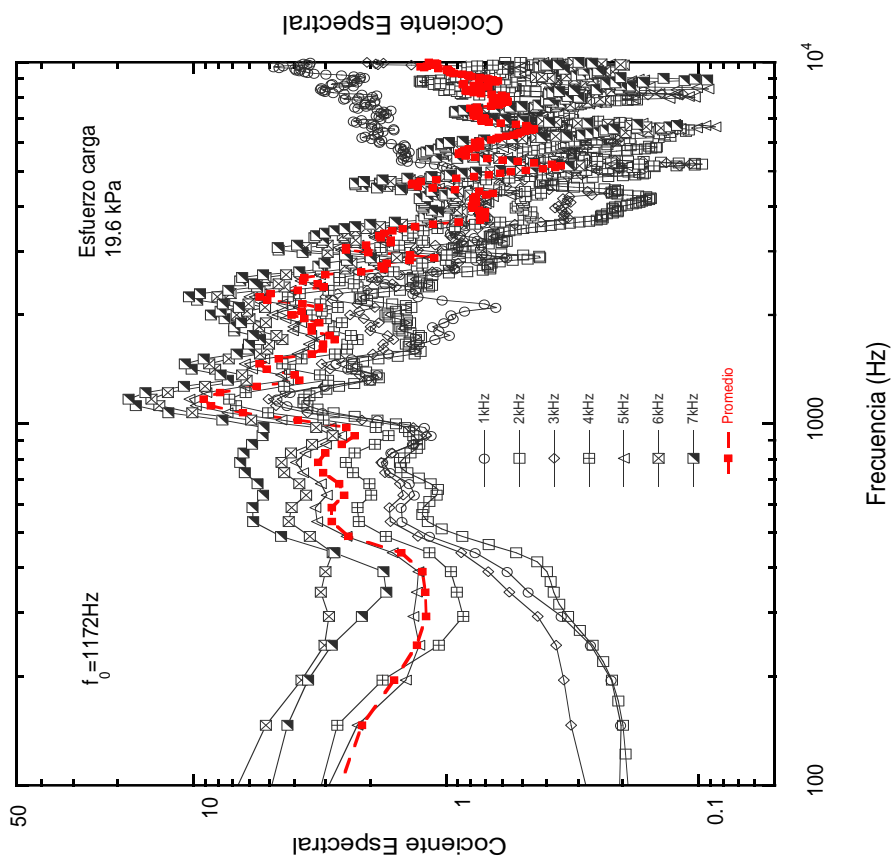
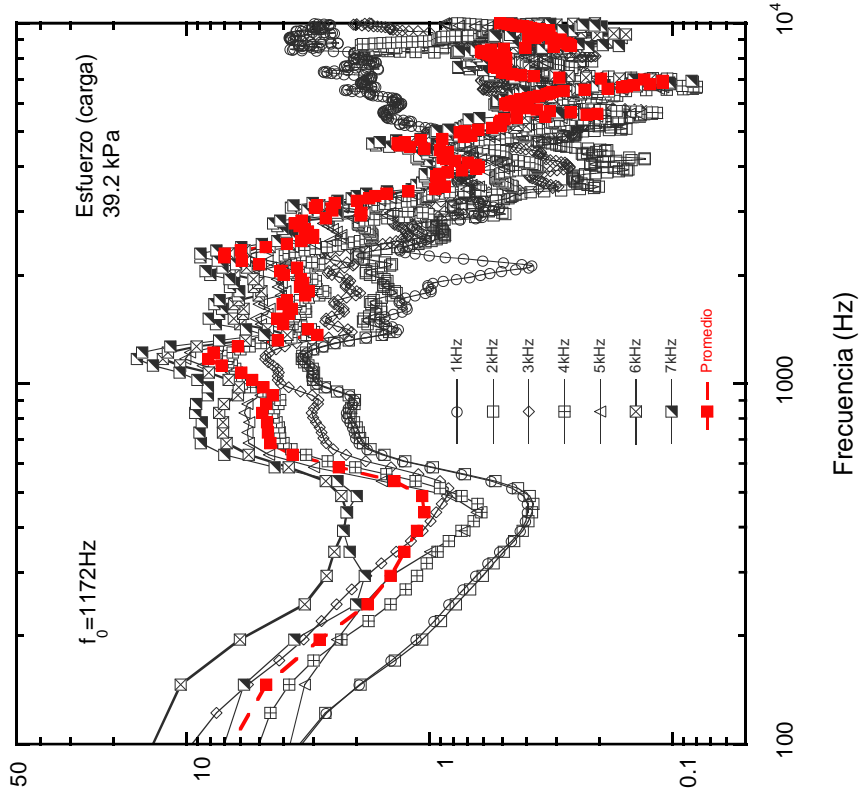


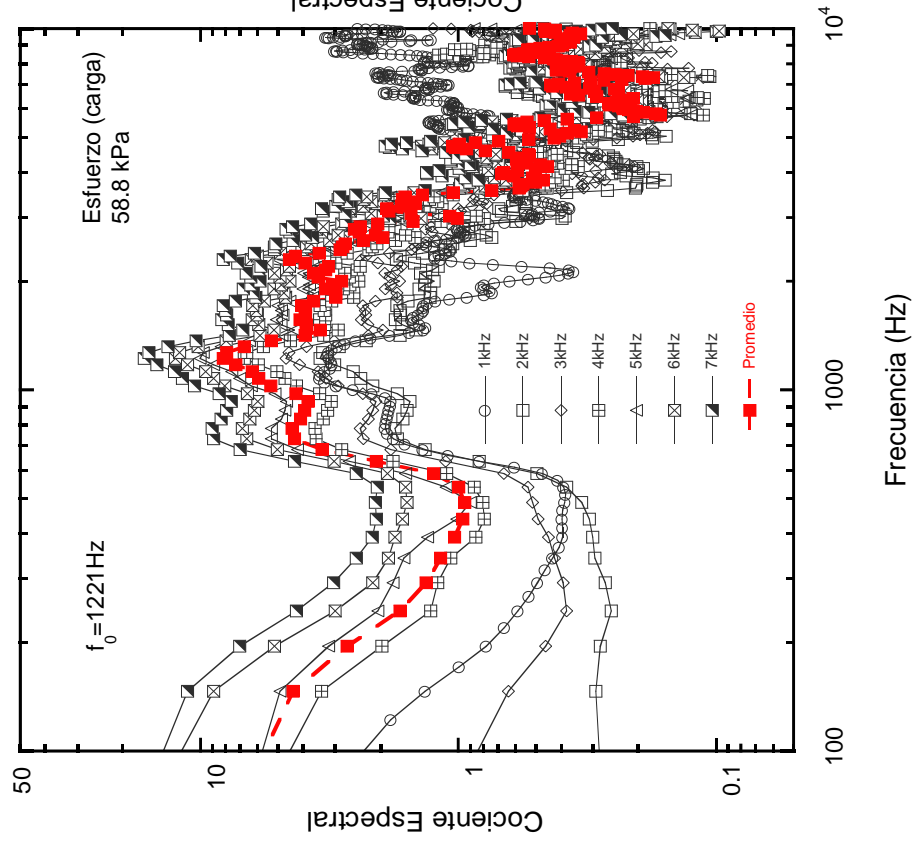
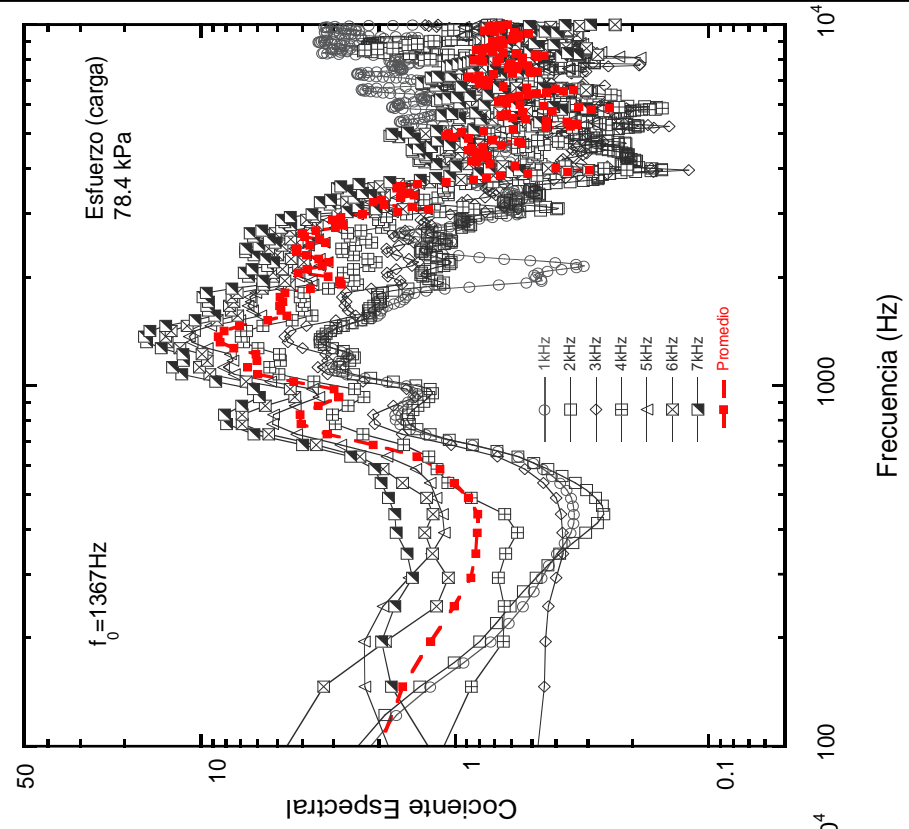


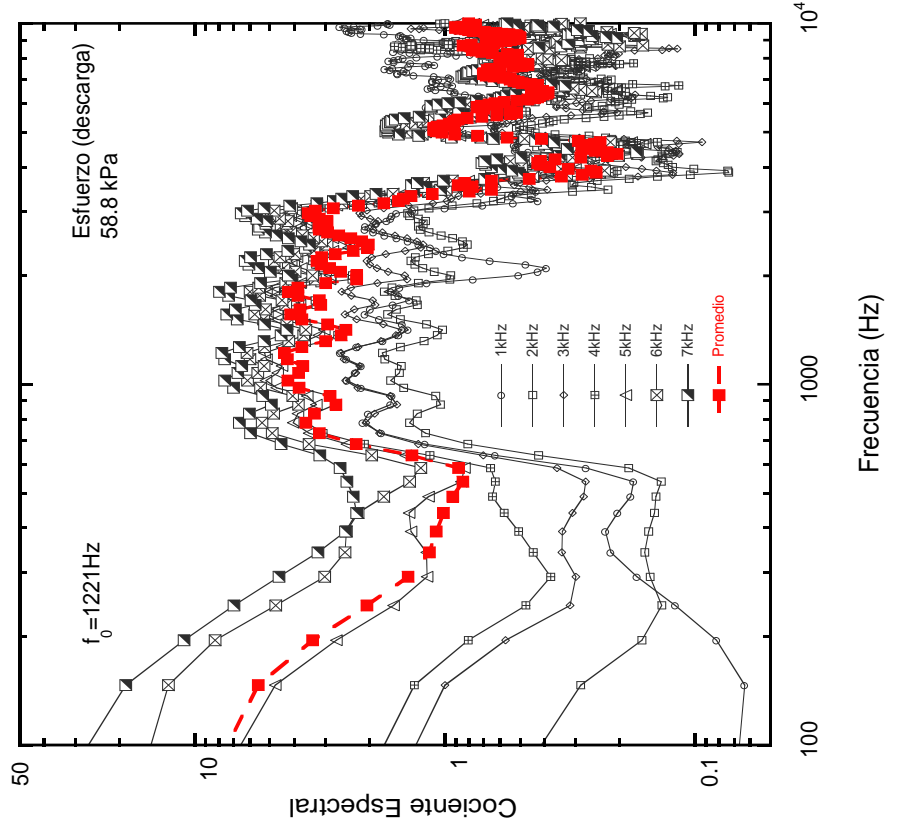
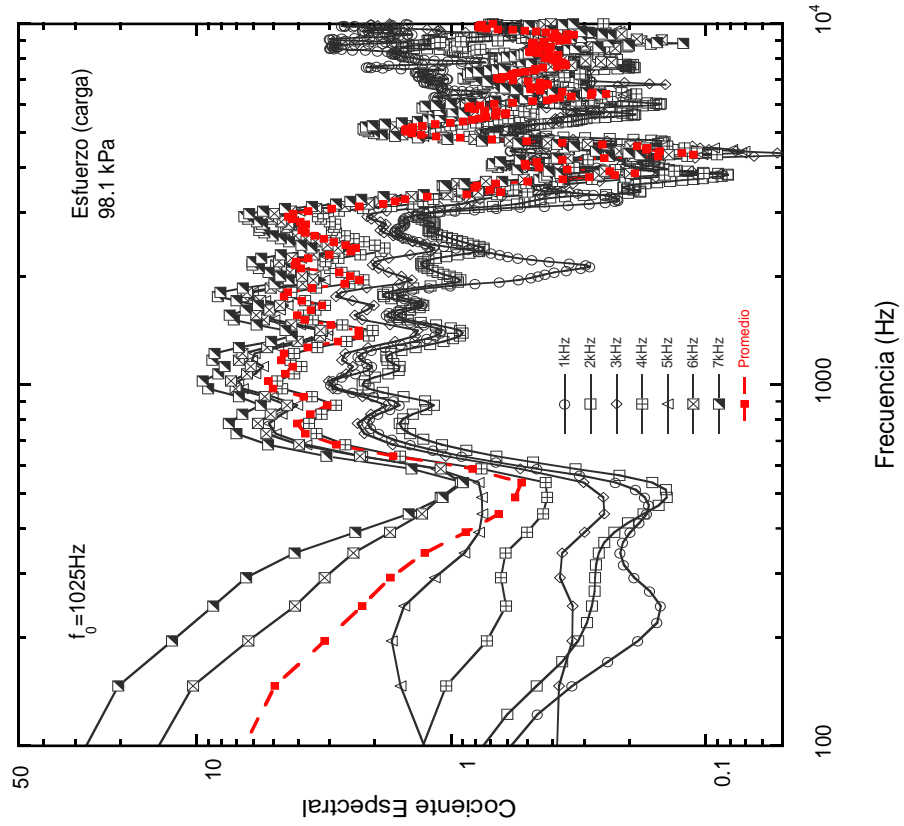


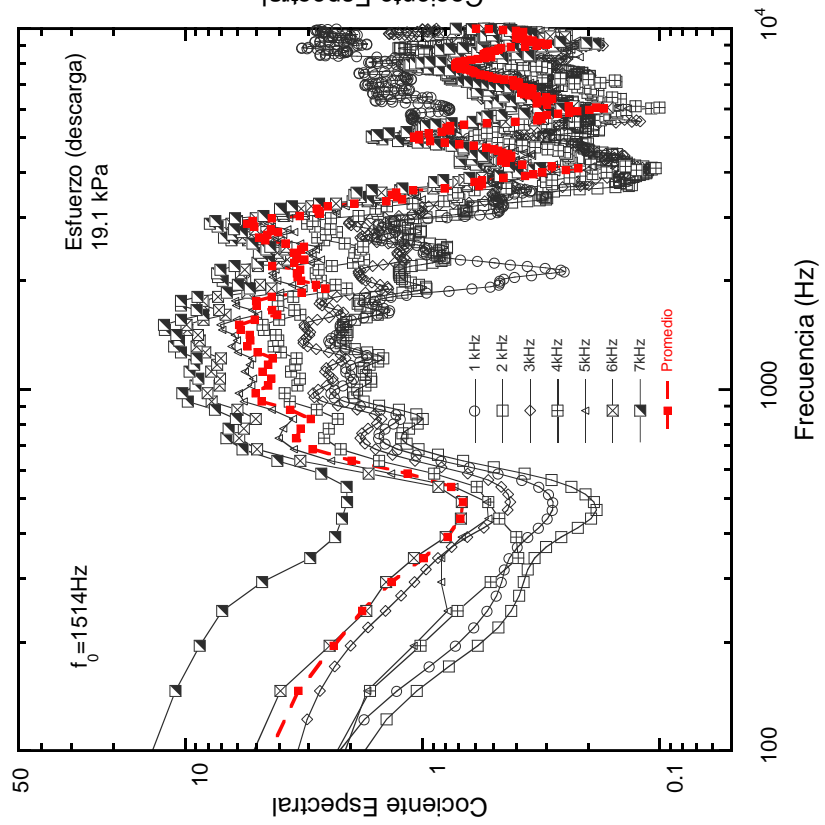
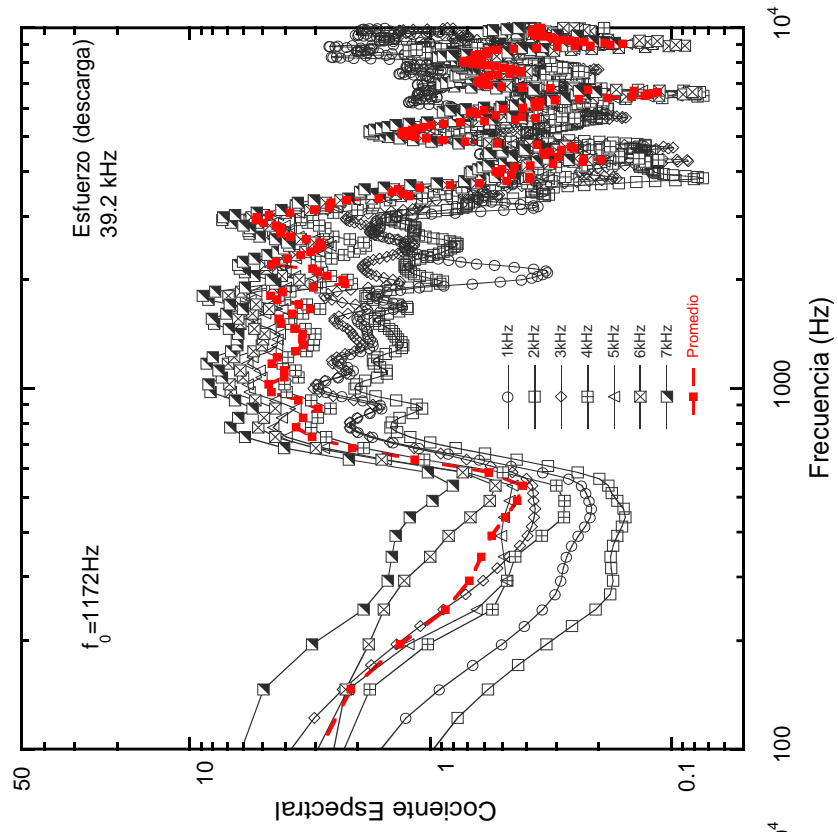




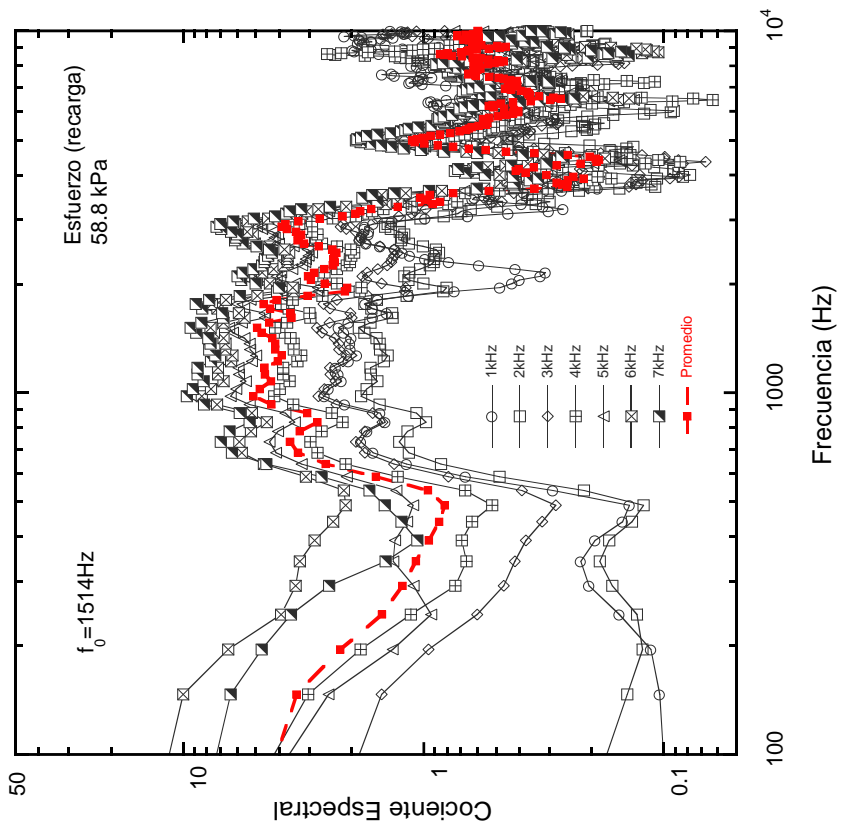
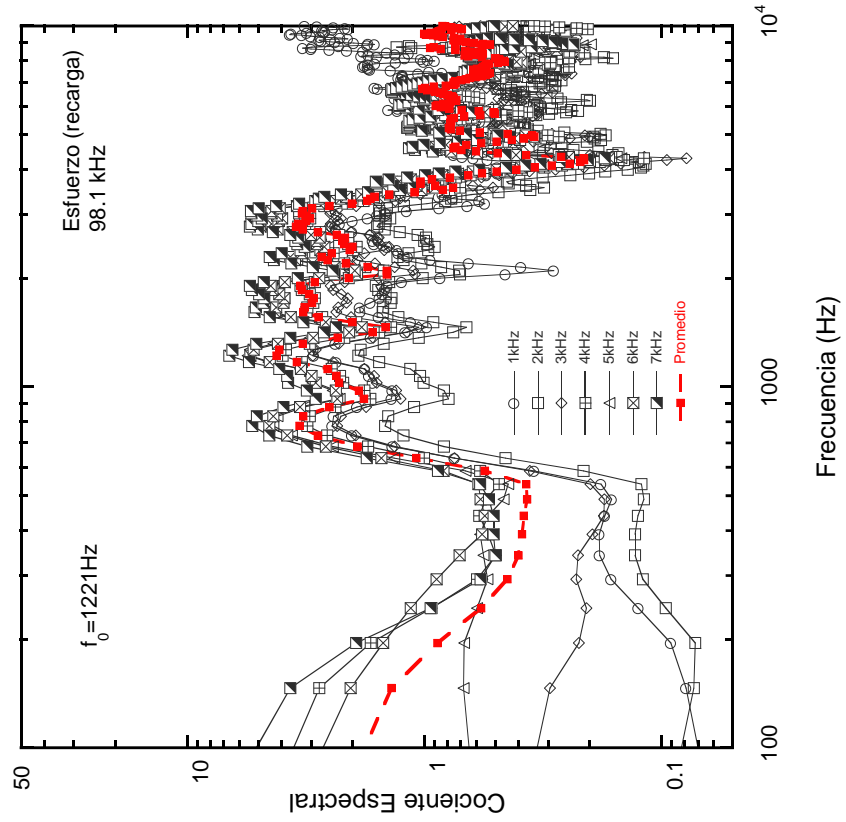


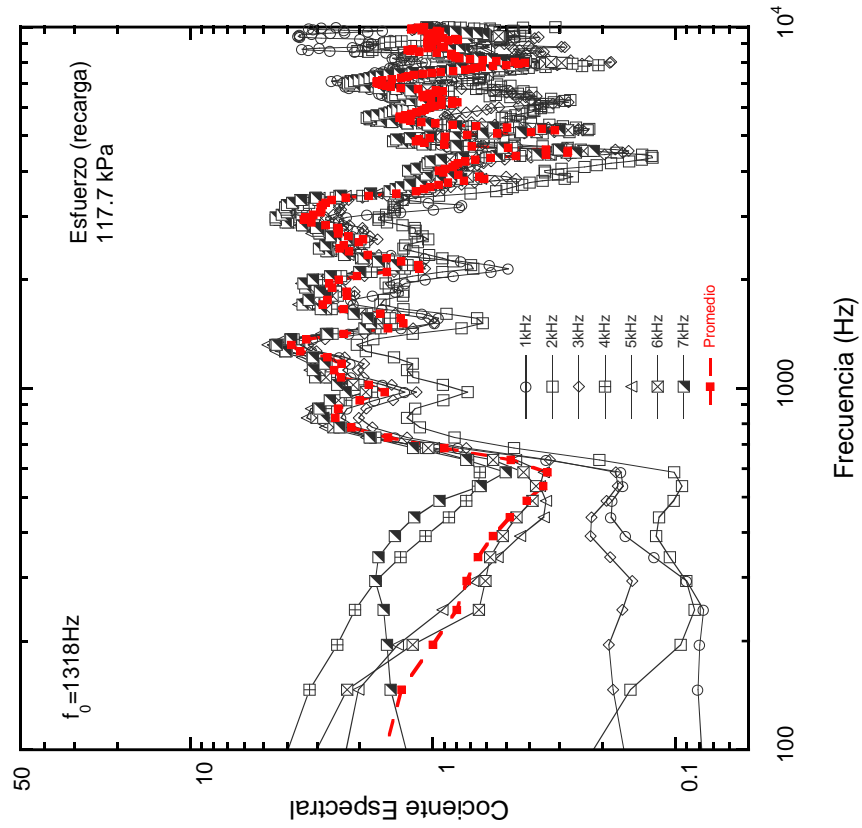
















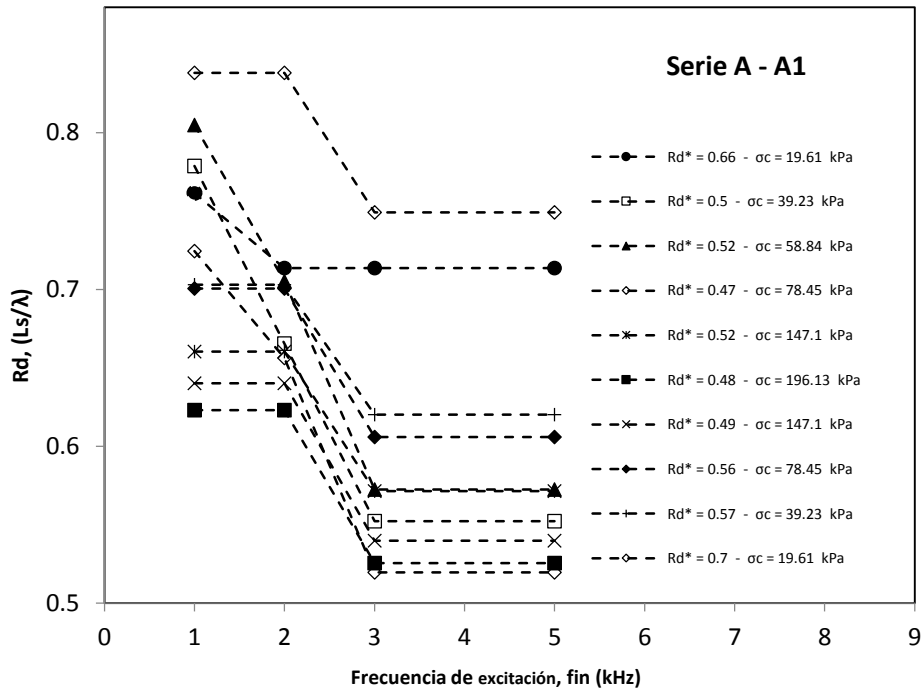


Figura C.1.- El valor de  $R_d^*$  determinado para una muestra de suelo marino de la serie A1.

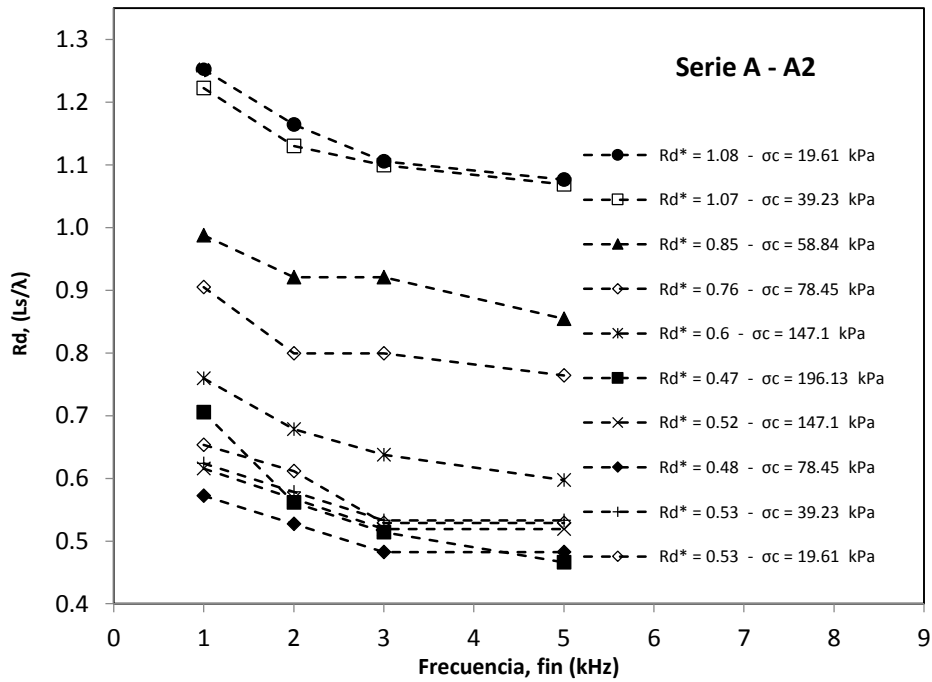


Figura C.2.- El valor de  $R_d^*$  determinado para una muestra de suelo marino de la serie A2.

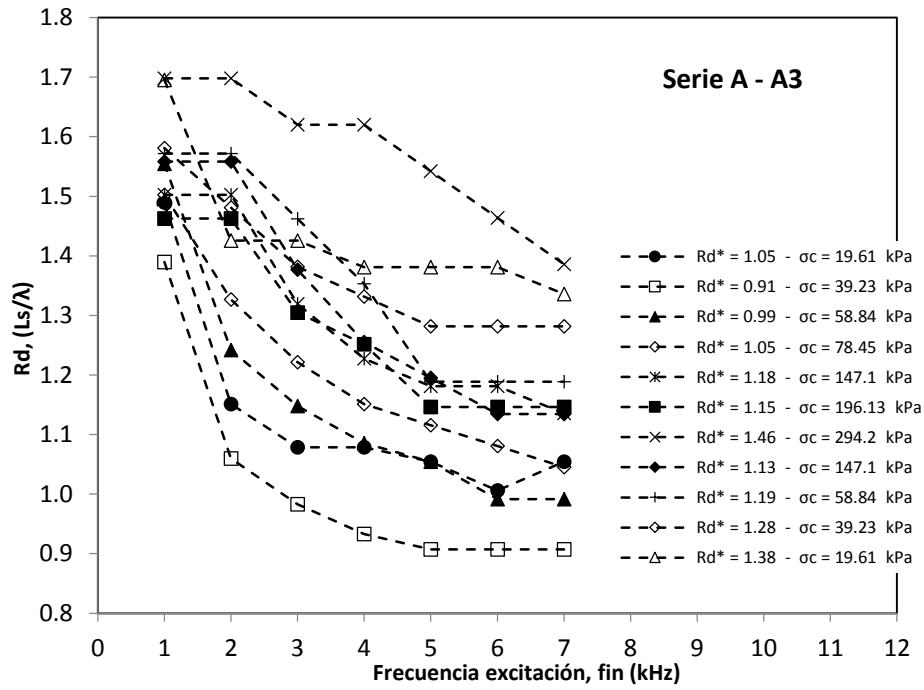


Figura C.3.- El valor de  $R_d^*$  determinado para una muestra de suelo marino de la serie A3.

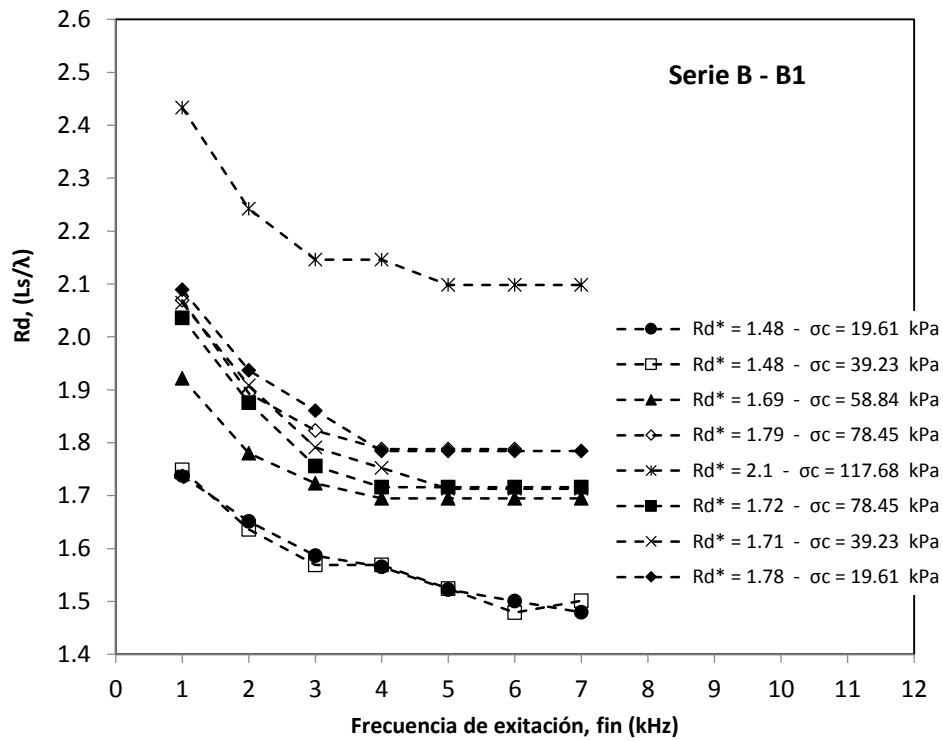


Figura C.4.- El valor de  $R_d^*$  determinado para una muestra arcillosa del Valle de México de la serie B1.

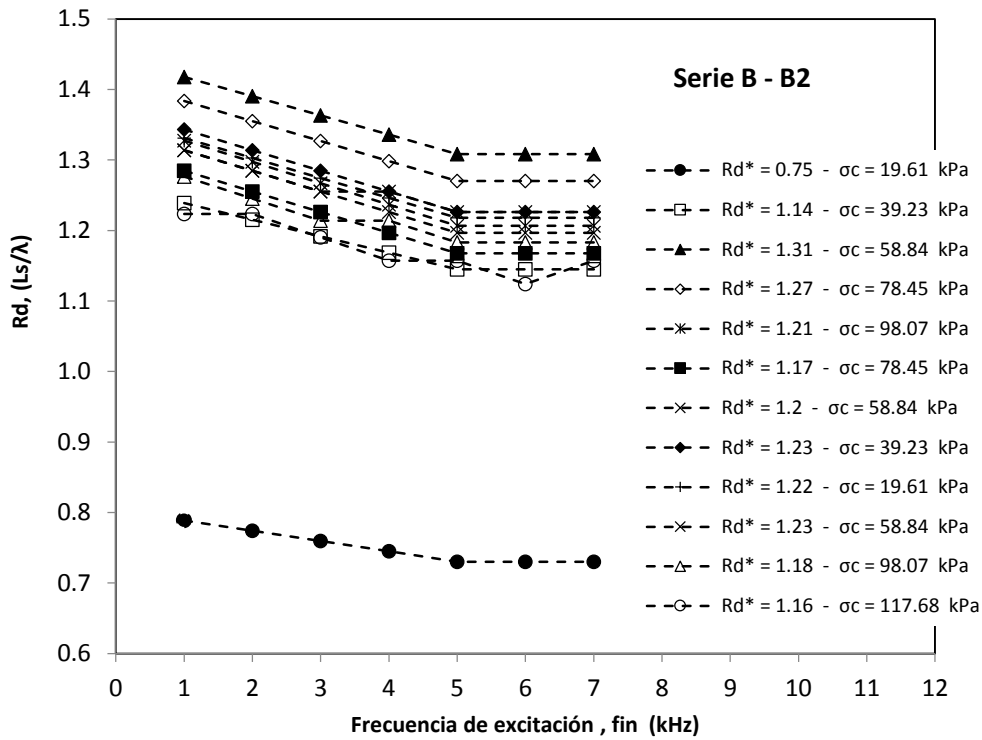


Figura C.5.- El valor de  $R_d^*$  determinado para una muestra arcillosa del Valle de México de la serie B2.

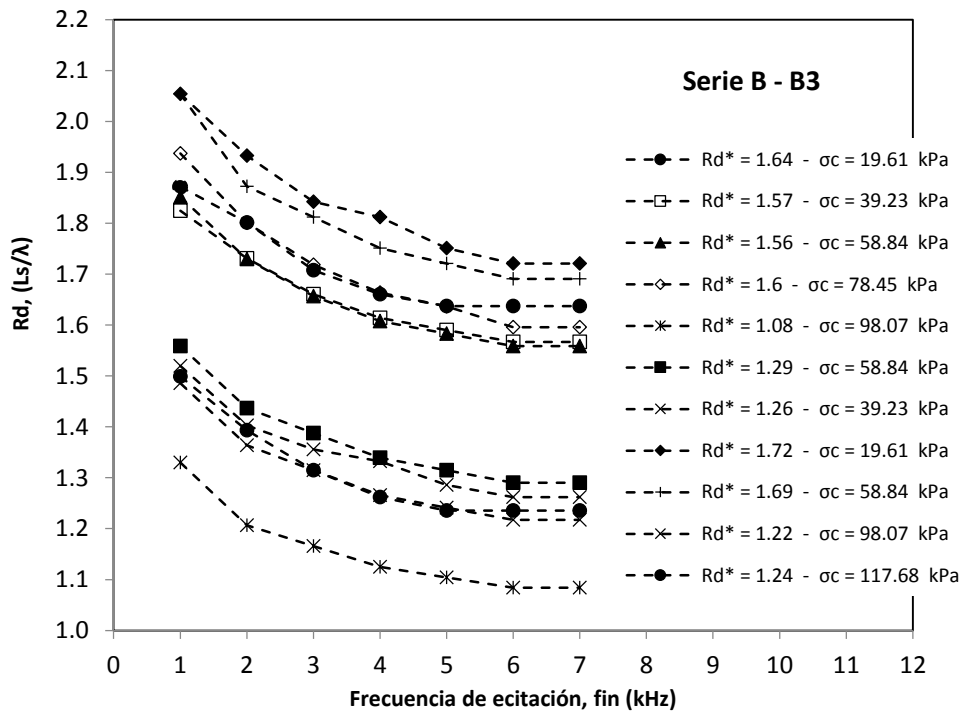


Figura C.6.- El valor de  $R_d^*$  determinado para una muestra arcillosa del Valle de México de la serie B3





**Anexo D: Curvas de las velocidades de ondas de corte En función del esfuerzo  
efectivo para la serie A y B**

---



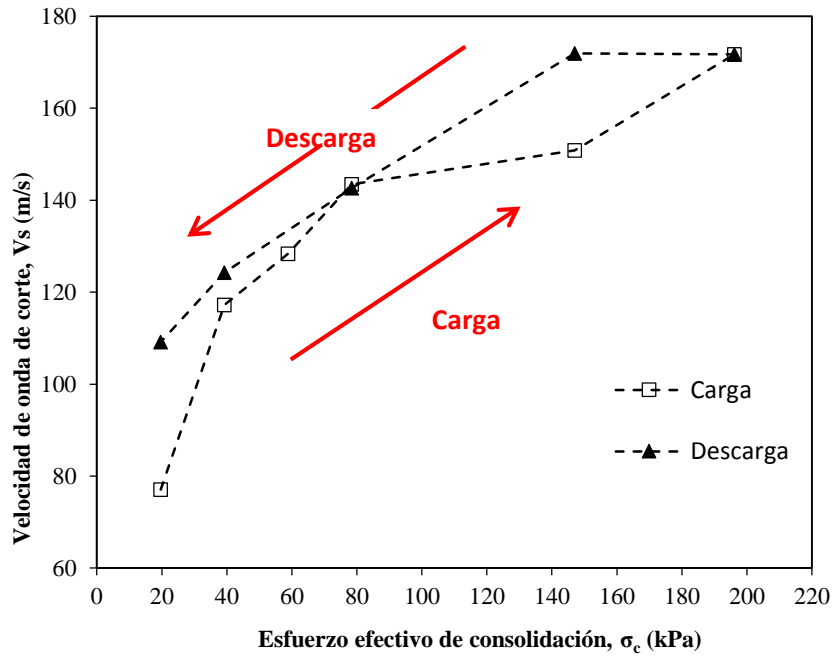


Figura D.1.- Curvas de velocidades de ondas de corte versus esfuerzo efectivo para una muestra de suelo marino de la serie A1.

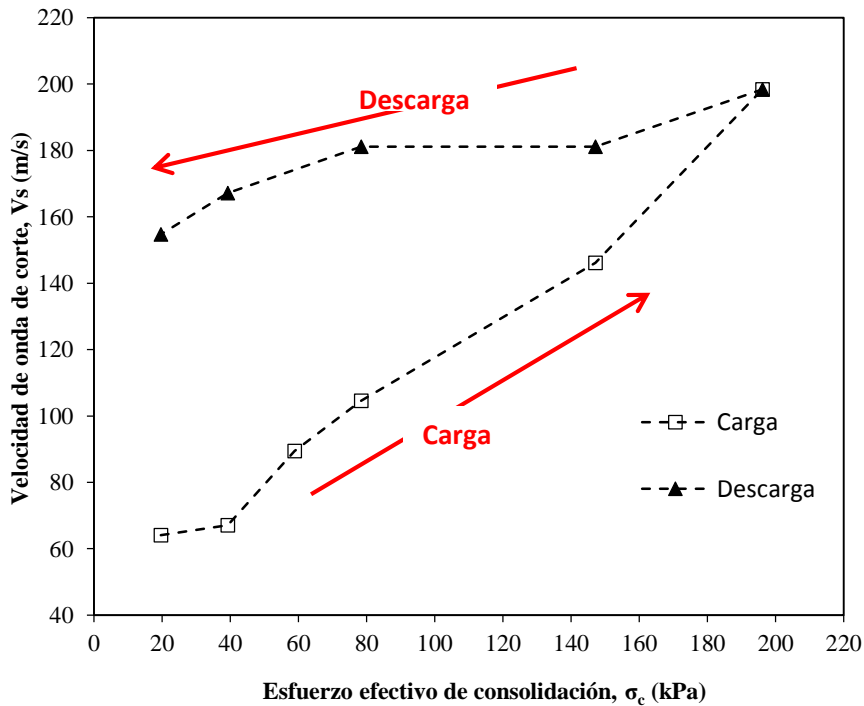


Figura D.2.- Curvas de velocidades de ondas de corte versus esfuerzo efectivo para una muestra de suelo marino de la serie A2.

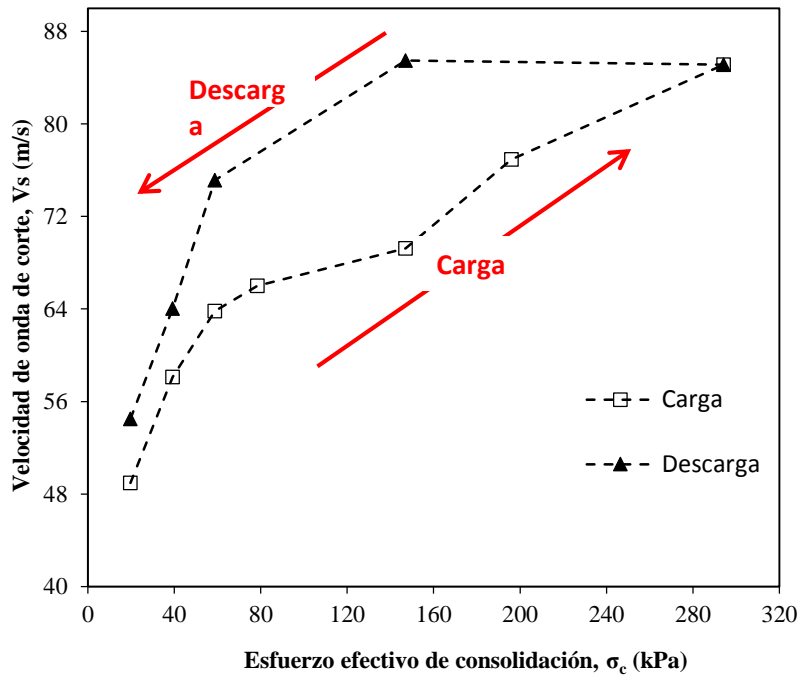


Figura D.3.- Curvas de velocidades de ondas de corte versus esfuerzo efectivo para una muestra de suelo marino de la serie A3.

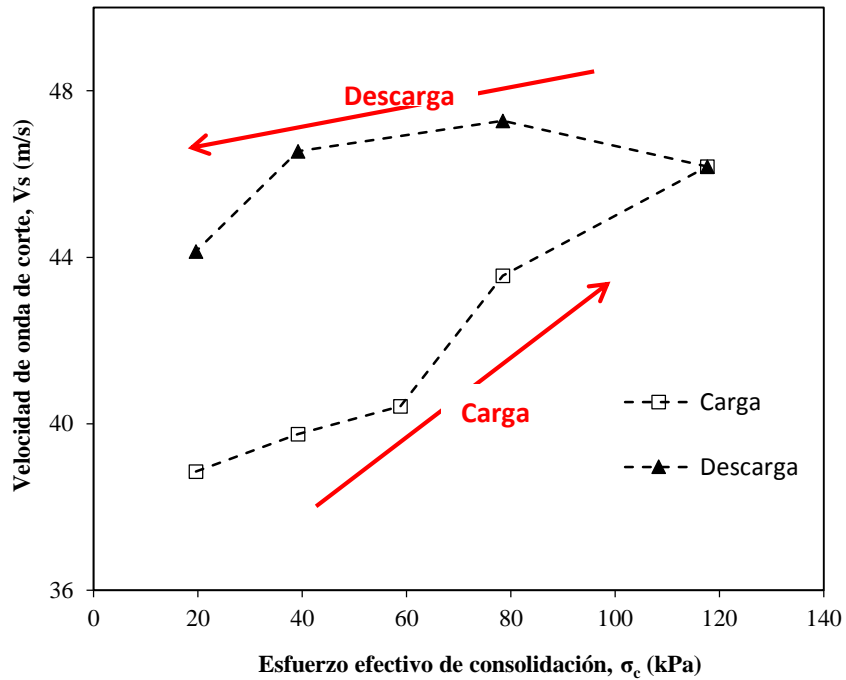
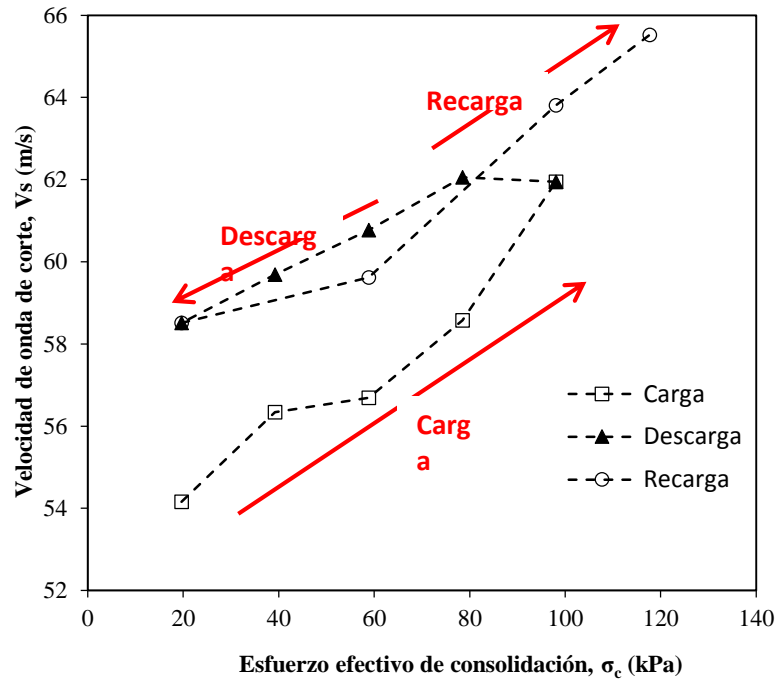
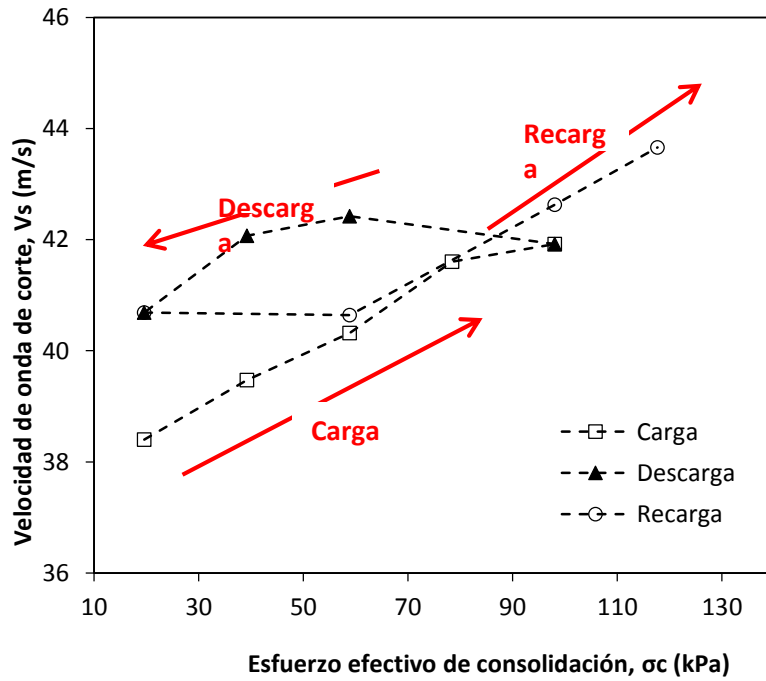


Figura D.4.- Curvas de velocidades de ondas de corte versus esfuerzo efectivo para una muestra arcillosa del Valle de México de la serie B1.



**Figura D.5.-** Curvas de velocidades de ondas de corte versus esfuerzo efectivo para una muestra arcillosa del Valle de México de la serie B2.



**Figura D.6.-** Curvas de velocidades de ondas de corte versus esfuerzo efectivo para una muestra arcillosa del Valle de México de la serie B3.