

“Caracterización dinámica de suelos arcillosos en una cámara triaxial” Dynamic Characterization of clay soils in a triaxial cell

Mario FLORES¹, Efraín OVANDO² y Celestino VALLE³

¹Ingeniero investigador, sección de geotecnia, Instituto de Ingeniería UNAM

²Investigador, sección de geotecnia, Instituto de Ingeniería, UNAM

³Investigador, Instituto Mexicano del Petróleo

RESUMEN: En este trabajo se describen los resultados de una investigación experimental en el que se utilizó una cámara triaxial instrumentada con elementos de flexión y de compresión para medir las velocidades de onda de corte (V_s) y compresión (V_p), respectivamente, para caracterizar las arcillas del ex Lago de Texcoco en términos de sus propiedades dinámicas. Además, se ensayaron en la columna resonantes especímenes de suelo labrados del mismo sitio y profundidad a los ensayos en la cámara triaxial instrumentada (muestras gemelas) para determinar las V_s y comparar estos resultados con las V_s medidas con los elementos de flexión. Finalmente las V_s medidas en el laboratorio se compararon con las V_s medidas en campo. Los datos experimentales muestran que, independientemente del método de ensayo, las velocidades de las ondas de cortante difieren en no más de 7 a 15%.

ABSTRACT: This paper describes the results of an experimental laboratory research in which we used a triaxial cell fitted with bender elements and piezoelectric disks to measure shear and compression wave velocities (V_s and V_p), to characterize clays from the former Texcoco Lake in terms of their dynamic properties. Soil specimens were subjected to isotropic loading-unloading cycles and values of V_s and V_p were determined during the saturation stage and after each increment or decrement of isotropic stress. We also performed resonant column tests on adjacent clayey soil samples to determine V_s and then compared these results with those obtained from the bender elements. The comparison was broadened by including the results of field measurements performed with a seismic cone. Our results show that irrespective of the testing method, shear waves velocities differ in no more than 7 to 15%.

1 INTRODUCCIÓN

El área ocupada por el antiguo lago de Texcoco fue parte de un sistema de lagos dentro de la cuenca de México. El subsuelo ha sido estudiado en el pasado, pero todavía se requiere de más investigaciones exhaustivas acerca de las propiedades dinámicas de las arcillas altamente compresibles. El estudio se enfoca en analizar la variación en la velocidad de onda de cuerpo que pasa a través del espécimen de suelo, asociada a un esfuerzo aplicado utilizando un modelo de leyes de potencia. Dichas velocidades se miden al ensayar un espécimen de suelo en una cámara triaxial instrumentada con cristales piezoeléctricos (M. Flores et al, 2010 y 2012).

Conociendo la distancia y el tiempo, se determina la velocidad de la onda que se propaga en el suelo

—

(1)

La distancia es un valor conocido y depende de las dimensiones del espécimen de suelo; el tiempo es un valor que se puede medir directamente en función de la velocidad de la onda transmitida en el espécimen.

Con la velocidad de onda S medida, empleamos la teoría de propagación de ondas mediante la siguiente expresión

(2)

donde V_s es la velocidad de onda cortante y ρ es la densidad del suelo.

La primera aplicación de los cristales piezoeléctricos en suelo fue descrita por Shirley y Anderson (1975). Ellos explican, que un elemento de flexión (BE) es un excelente generador y receptor de ondas de esfuerzos cortantes a través del suelo. Brunson y

Jonhson (1980), han informado sobre mediciones de $G_{m\acute{a}x}$ (módulo de elasticidad al corte) del suelo usando elementos de flexión insertados directamente en el interior de muestras de suelo.

La medición del módulo de rigidez es útil para predecir la deformación del suelo, así como las deformaciones angulares asociadas con los problemas de interacción suelo-estructura; estos son generalmente menores de 0,1% (Jardine et al, 1986). Existen varias técnicas disponibles para la medición de este parámetro in-situ y en el laboratorio.

Shirley y Hampton (1978) y Dyvik y Madshus (1985), desarrollaron un sistema para medir velocidades de onda utilizando elementos de flexión. Los cristales piezoeléctricos son capaces de generar y detectar ondas de cuerpo (cortante y de compresión); son relativamente baratos y su conexión es muy sencilla (Santamarina et al, 2001), y además se pueden incorporar en una amplia gama de equipos de laboratorio para ensayos geotécnicos en muestras de suelo (Dyvik y Olsen 1989; Viggiani y Atkinson, 1995a; Jovicic y Coop, 1997). Recientemente se han instalado en columna resonantes (Stokoe, 2006). El uso de los elementos bender se ha extendido más allá del ámbito académico, y en la actualidad ya se usa en la industria. A pesar de esto, no existe una metodología definitiva para el uso de elementos de flexión, y el procedimiento de interpretación pueden variar considerablemente según el criterio del usuario.

El método más utilizado para estimar el arribo de la onda de propagación es identificar la primera deflexión de la señal receptora mediante una inspección visual. Sin embargo, debido a los efectos de campo cercano (near field effects) y las reflexiones de onda debido a las fronteras de la muestra de suelo, este enfoque puede resultar en un error significativo al interpretar el tiempo de arribo. La importancia de los efectos de campo cercano en los ensayos realizados en especímenes de suelo con los elementos de flexión han sido discutidos ampliamente por Brignoli et al (1996), Viggiani y Atkinson (1995b), Jovicic et al (1996), Arroyo et al (2003) y Lee y Santamarina (2005). Sánchez-Salineró et al (1986) evidenciaron en su investigación los efectos de campo cercano en el

arribo de la primera onda de cortante y propusieron el siguiente límite para la interpretación de las señales con los elementos bender:

(3)

donde d es la distancia entre los elementos bender y λ es la longitud de las ondas que se propagan. La longitud de onda queda definida como en la ecuación 4.

(4)

donde

V es la velocidad de propagación de onda de compresión o de corte

f es la frecuencia de excitación

El límite inferior toma en cuenta los efectos de campo cercano, mientras que el límite superior minimiza la atenuación de la señal.

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) recomiendan la correlación cruzada para el primero y segundo tiempo de arribo de las ondas. La correlación cruzada también fue sugerida por Viggiani y Atkinson (1995b), Mohsin et al. (2004) y Wang et al. (2007).

2 TÉCNICA EXPERIMENTAL

A pesar de que existen técnicas bien establecidas para determinar la rigidez en el campo y laboratorio, en esta investigación se desarrolla una técnica alterna para la medición de la velocidad de onda de cuerpo. Se instrumentó una cámara triaxial estática con transductores piezoeléctricos para medir las velocidades de onda en especímenes de suelo. Se utilizaron discos piezoeléctricos para medir la velocidad de ondas de compresión, V_p , y elementos de flexión para medir la velocidad de ondas de corte, V_s . Entre las ventajas de contar con los cristales piezoeléctricos, se encuentran el poder evaluar la rigidez y grado de saturación del espécimen por

medio de velocidades de propagación de ondas de compresión, V_p , y de corte, V_s .

Los cristales piezoeléctricos utilizados se colocaron en una cámara triaxial estática. Estos transductores se utilizan en pares donde un cristal piezoeléctrico funciona como transmisor y el otro como receptor. El cristal emisor se incrusta en un extremo del espécimen de suelo, en el otro extremo del espécimen se alinea y se incrusta el cristal receptor. El cristal de transmisión al aplicarle un voltaje transforma la señal eléctrica en un movimiento mecánico que perturba el medio en el que está incrustado. Esta perturbación se propaga a través del medio en forma de ondas mecánicas y llega al otro extremo de la muestra al cristal receptor. Esta onda hace que al cristal receptor se flexione y como consecuencia se genera una señal de salida eléctrica. Mediante un análisis de las señales de entrada y de salida, es posible obtener las velocidades de onda de cuerpo.

En la actualidad, los cristales piezoeléctricos se utilizan y se adaptan en ensayos con especímenes de suelo con métodos no destructivos. Aunque los cristales fueron utilizados primero en dispositivos eléctricos, los investigadores encontraron la manera de adaptarlos en la ingeniería geotécnica. Durante más de un cuarto de siglo los cristales piezoeléctricos se han utilizado para medir la velocidad de las ondas que se propagan a través de las muestras de suelo.

Las velocidades medidas en especímenes de suelo utilizando los cristales piezoeléctricos se comparan con las velocidades obtenidas en especímenes de suelo ensayadas en una cámara de columna resonante. Además, las V_s obtenidas en el laboratorio, se comparan con las V_s medidas en campo.

3 MATERIALES EMPLEADOS

Las muestras recuperadas para esta investigación son de dos sitios ubicados en el lago de Texcoco, como se muestra en la Figura 1. Estas muestras de suelo se ensayaron con diferentes equipos triaxiales instrumentadas con cristales piezoeléctricos (M. Flores et al, 2010).

El sitio 1 (LyFC) se ubica a 300 m del cruce de la Avenida Río de los Remedios y la Avenida Central Carlos Hank González. De este sitio se ensayaron tres muestras de suelo, recuperadas a diferentes profundidades de un sondeo mixto que se realizó para un proyecto de la Compañía de Luz y Fuerza del Centro en el año 2006.

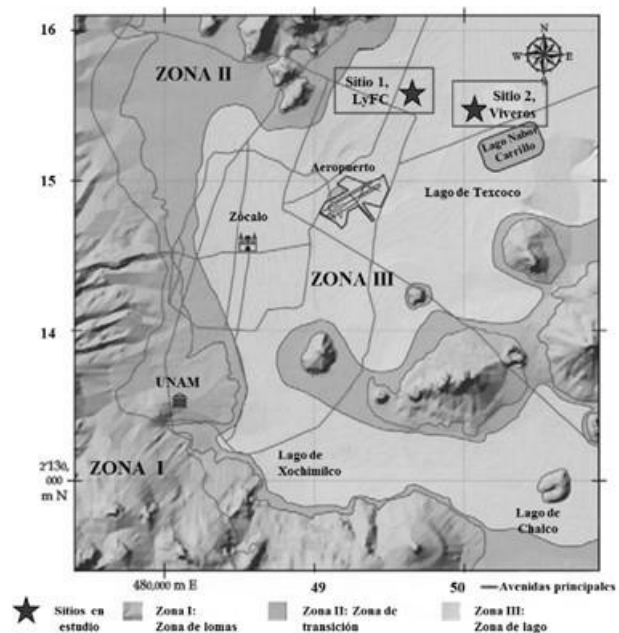


Figura 1 Ubicación de las muestras ensayadas en el Valle de México, (Flores *et al.*, 2009)

El sitio 2 (viveros) se ubica cerca de la esquina nororiente del Lago Nabor Carrillo, a 300 m de la carretera México- Texcoco. En este sitio se seleccionaron seis muestras de suelo a diferentes profundidades. Cabe mencionar que para cada muestra seleccionada, se labraron dos especímenes. Uno se ensayó en la cámara triaxial estática instrumentada y el otro en la columna resonante.

3.1 Pruebas índice

Las muestras recuperadas en la exploración en campo se llevaron al laboratorio para su almacenamiento y ensaye. Se determinaron la plasticidad, la densidad de sólidos, el contenido de agua, la relación de vacíos, y el peso volumétrico a cada muestra recuperada para esta investigación. Las propiedades índices 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. Los resultados de estos ensayos se resumen en las Tablas 1 y 2.

Tabla 1 Propiedades índice de las muestras ensayadas en el sitio 1, (Lago de Texcoco, ubicación: Río de los Remedios y Periférico Oriente, Proyecto LyFC)

Prof. <i>m</i>	PI %	G_s	w_i %	e_o	γ g/cm^3	S_r %	w_L	Cámara triaxial utilizada
11.7	112.67	2.61	279	7.21	1.21	100	170.5	ELE
19.5	183.33	2.41	255	5.99	1.22	100	235	ELE
25.5	101.4	2.94	221	6.63	1.24	98	142	ELE

Tabla 2 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).

Prof. <i>m</i>	PI %	G_s	w_i %	e_o	γ g/cm^3	S_r %	w_L %	Cámara triaxial utilizada
5.9	263.16	2.9	340	9.94	1.17	99.03	342.46	Neumática
			331	9.68	1.17	99.29		Columna resonante
10.3	207.95	2.82	305	8.67	1.18	99.23	280.59	ELE
			307	8.57	1.2	100		Columna resonante
12.5	139.9	2.62	215	5.56	1.26	100	190.47	Neumática
			198	5.23	1.26	99.44		Columna resonante
15.1	239.25	3	273	8.37	1.195	97.97	310.44	ELE
			278	8.42	1.21	99.24		Columna resonante
18.3	150.8	2.85	248	7.07	1.23	99.98	222.22	Neumática
			247	7.13	1.22	98.76		Columna resonante
19.7	197	2.63	246	6.46	1.22	100	276.57	ELE
			258	6.68	1.23	100		Columna resonante

4 RESULTADOS EXPERIMENTALES

4.1 Laboratorio

En esta sección se analizan las V_p y V_s medidas con los cristales piezoeléctricos en especímenes de suelo consolidados isotrópamente a diferentes esfuerzos efectivos octahédricos en condiciones saturadas utilizando un modelo de leyes de potencia.

Los datos experimentales se presentan gráficamente a escala logarítmica ($\log V_s - \log$). Las ecuaciones 5 y 6 son las expresiones del modelo de leyes de potencia que se utilizan para las V_p y V_s medidas al variar el esfuerzo efectivo, σ_o' (Hardin y Drnevich, 1972, Hardin, 1978):

(5)

(6)
donde:

A_p y A_s son las velocidades de compresión y de cortante a 1 atm (100 kPa),

n_p y n_s son exponentes adimensionales, y

P_a es la presión atmosférica ($P_a = 100$ kPa).

Dichas ecuaciones son expresiones empíricas que tienen una base teórica, y el marco de referencia es para materiales ideales. Para la relación entre V_s y el

esfuerzo efectivo, Cascante y Santamarina (1996) mostraron que n_s en la ecuación 6 es de 0,25. De acuerdo a la investigación de estos autores, el exponente $n_s = 0.25$ se obtiene cuando se ensaya un medio ideal de esferas viscoplasticas perfectas con un arreglo uniforme. Otros autores han mostrado que las mediciones del exponente n_s con diferentes materiales varían entre 0.17 y 0.48 y que además pueden variar con la plasticidad del suelo (Fam y Santamarina, 1997).

Debe tenerse en cuenta que los materiales ensayados en esta investigación difieren considerablemente de los estudiados previamente por otros investigadores, el contenido de humedad oscila entre 200 y 340%, la relación de vacíos varía entre 5.2 y 10,0, y los índices de plasticidad son entre 100 y 240%.

Tabla 3 Parámetros $A_{p,s}$ y $n_{p,s}$ que se obtiene de los datos experimentales al emplear el modelo de leyes de potencia en suelos normalmente consolidados.

Sitio	suelo normalmente consolidado								Promedio	
	PI %	Prof. m	A_p m/s	n_p adimensional	A_p m/s	n_p adimensional	A_s m/s	n_s adimensional	A_s m/s	n_s adimensional
Tx-LyFC	113	11.7	1510.0	0.001	1515	0.001	48.7	0.302	56	0.32
Tx-LyFC	101	25.5	1533.0	0.001			62.3	0.332		
Tx-viveros	208	10.3	1494.0	0.001	1504	0.002	43.5	0.327	57	0.30
Tx-viveros	197	19.7	1488.0	0.001			59.6	0.302		
Tx-LyFC	183	19.5	1532.0	0.003			67.9	0.281		
Tx-viveros	239	15.1	1522.0	0.002	1522	0.002	49.2	0.371	49	0.37
Prom.					1514	0.002	Prom.		54	0.33

La Figura 2 muestra las V_p medidas con los elementos de compresión en seis especímenes de suelo al aumentar el esfuerzo octahédrico. A los datos experimentales se traza un ajuste lineal con el modelo de leyes de potencias (Ecuación 5). Como se observa, las V_p son casi insensible al incrementarse el esfuerzo octahédrico, esto se debe a que los especímenes se encontraban saturados. De acuerdo a los resultados experimentales, A_p es igual a 1514 m/s y esta corresponde a la velocidad de las ondas de compresión que viajan a través del agua, y que la línea de potencia es casi lineal con un exponente n_s igual a 0.002.

En la Figura 3 se presentan las V_p al variar el esfuerzo

Además, el modelo de leyes de potencia no se ha utilizado para estudiar las velocidades de ondas en las arcillas de la ciudad de México (compresibles y con altos índices de plasticidad).

Durante la etapa de consolidación de los especímenes se midieron las V_p y V_s . Para el análisis de los datos experimentales con el modelo de leyes de potencia se utilizaron las V_p y V_s medidas a lo largo de la línea virgen de consolidación de cada ensaye, se definió una línea de tendencia con dicho modelo para cada espécimen realizado y se calcularon los parámetros de $A_{p,s}$ y $n_{p,s}$. En la Tabla 3 se presentan el resumen de dichos parámetros calculados para suelos normalmente consolidados.

octahédrico, a los datos experimentales se le trazaron dos líneas de potencia, una línea corresponde a un modelo teórico cuando el exponente n_s es igual a 0.25 y la otra línea representa a los datos experimentales cuyo n_s promedio es igual a 0.33, dicho valor es representativo para los seis ensayos realizados.

La Figura 4 muestra los datos experimentales a los cuales se les trazaron tres líneas de potencia que corresponden a diferentes índices de plasticidad. Como se observa, los exponentes n_s son 0.33, 0.30 y 0.37 y corresponden a los especímenes de suelo cuyo índice de plasticidad son cercanos a 100, 200 y 240 % respectivamente.

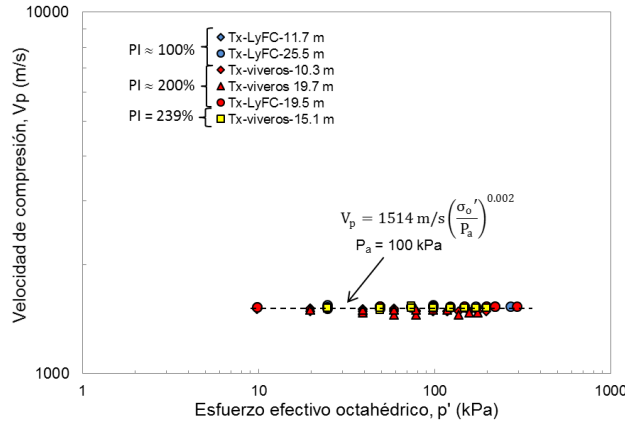


Figura 2. Velocidad de onda de compresión al variar el esfuerzo octahédrico de muestras normalmente consolidadas.

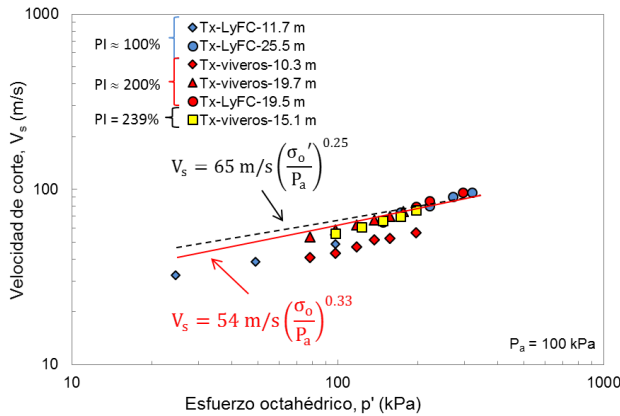


Figura 3. Velocidad de onda cortante al variar el esfuerzo octahédrico de muestras normalmente consolidadas.

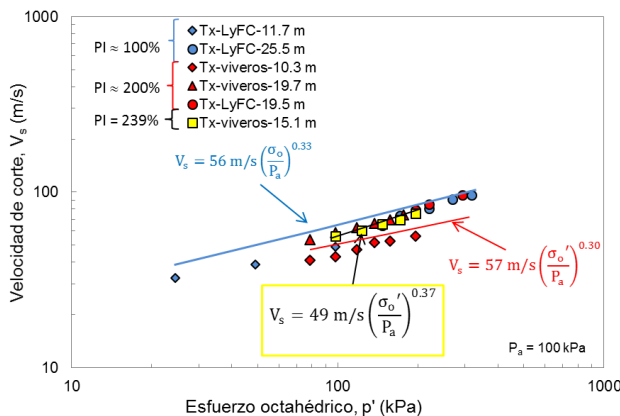


Figura 4 Línea de potencia para muestras de suelo normalmente consolidados con diferentes índices de plasticidad.

4.2 Resultados de laboratorio y campo

En esta sección se comparan las V_s medidas en campo con las que se obtuvieron en el laboratorio con la columna resonante y los elementos de flexión. A cada espécimen ensayado se le aplicó un esfuerzo octahédrico efectivo igual al de campo, tomando en cuenta su profundidad y peso volumétrico. En el campo, las V_s se determinaron usando las técnicas de la sonda suspendida y cono sísmico para los sitios 1 y 2, respectivamente. La distancia entre la perforación donde se recuperaron las muestras de suelo y los ensayos realizados en campo fue de 5 m aproximadamente.

En la Figura 5 se presentan las V_s medidas en campo y en el laboratorio en muestras de suelo recuperados de los sitios 1 y 2. En la Figura 5a se muestran las V_s medidas en campo con la técnica de la sonda suspendida realizado en el sitio 1 (Texcoco, LyFC). En este sitio se recuperaron tres especímenes de suelo a diferentes profundidades y se ensayaron en la cámara triaxial instrumentada. Como se observa, las V_s medidas con los elementos de flexión en los especímenes de suelo son muy parecidas a las V_s medidas en campo con la sonda suspendida.

La Figura 5b muestra las V_s medidas con un ensaye de cono sísmico realizado en el sitio 2 (Texcoco, viveros). En este sitio se recuperaron seis muestras de suelo extraídos a diferentes profundidades. Se labraron dos especímenes de suelo en cada muestra seleccionada. Un espécimen de suelo se ensayó en la columna resonante y el otro espécimen se ensayó en la cámara triaxial estática instrumentada. Como se observa, las V_s medidas con la columna resonante en los especímenes de suelo son mayores a las V_s medidas con los elementos de flexión en un espécimen gemelo a la ensayada en la columna resonante. Además, se observa que las V_s medidas con la técnica del cono sísmico solo son mayores a las V_s medidas con los elementos de flexión en los especímenes.

Las V_s medidas con la columna resonante varían en un rango de 10 a 15 % a las V_s medidas con los elementos de flexión para los datos experimentales del sitio 2 (Texcoco-Viveros). Además, las V_s medidas en campo con respecto a las medidas con los elementos de flexión son mayores en un 10%, y

las V_s medidas en la columna resonante son mayores en un 15% a las medidas en campo.

4.3 Discusión de las V_s medidos en campo y en el laboratorio.

En esta sección se comparan las velocidades de ondas de corte medidos en el laboratorio (columna resonante y la cámara triaxial con cristales piezoeléctricos) con valores V_s medidos en el campo que se realizaron aproximadamente 5 metros de distancia de la perforación donde se recuperaron las muestras de suelo utilizadas en esta investigación. Los detalles de las técnicas utilizadas en las pruebas de campo ya han sido publicados por otros autores (Robertson P. K., et al 1986; Chen, 2008).

Los datos de la Figura 5 muestran las velocidades de las ondas de corte medidos con cuatro técnicas experimentales diferentes, además, si se toma en cuenta las propiedades de índice de las muestras de suelo, la frecuencia de excitación en los cristales piezoeléctricos y el nivel de deformación angular aplicado al espécimen asociada con cada medición de laboratorio, se observa, las V_s medidas en muestras de suelo con la cámara triaxial instrumentada con los cristales piezoeléctricos y con la columna resonante presentan diferencias evidentes, a pesar de que se utilizó especímenes recuperados desde el mismo sitio y de aproximadamente la misma profundidad.

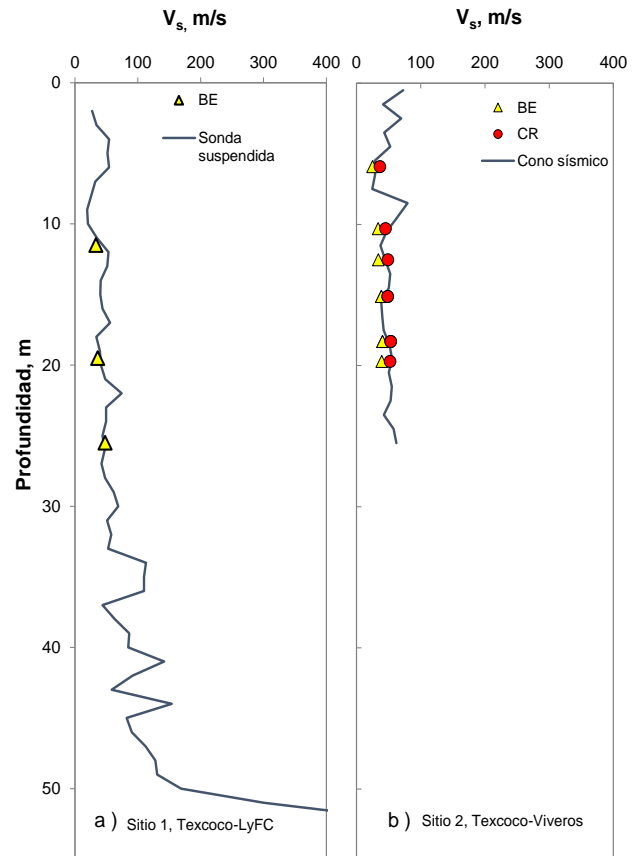


Figura 5 V_s medidos en campo y laboratorio.

Típicamente, estas diferencias pueden atribuirse a varios factores tales como:

a) Diferencias del nivel de deformación aplicado

Se compararon las V_s medidas en el laboratorio con las determinadas en campo. Usualmente se espera que las V_s medidas en campo fueran mayores que las medidas en el laboratorio debido a los bajos niveles de deformación aplicados al suelo en ensayos de campo

b) Diferencias en la frecuencia de excitación

Las V_p medidas con tres técnicas diferentes muestran una variación entre ellas de hasta en un 15%. Probablemente se deba a que los especímenes de suelo se excitaron a diferentes frecuencias, es decir, en la cámara triaxial instrumentada con los cristales piezoeléctricos, los especímenes fueron excitados a 2kHz. En la columna resonante, las frecuencias de excitación fueron en un rango de entre 8 a 15 Hz. En el caso

del cono sísmico, la frecuencia dominante con que viajan las señales es de 100 a 200 Hz (Santamarina, 2001). En el caso de las V_p medidas con el cono sísmico se esperan valores menores debido a que el suelo es más blando, es decir, menos rígido.

En otras palabras, si nos enfocamos al efecto de la frecuencia, se observan tres órdenes magnitud de frecuencia con las cuales se excitan al suelo. Es decir, los elementos de flexión se excitan en kHz, el cono sísmico tiene una frecuencia dominante de las señales de cientos de Hz y la columna resonante excita al espécimen a decenas de Hz, que de acuerdo a los resultados experimentales, se presentan diferencias en las V_p medidas. Por otro lado, si analizáramos el efecto de la frecuencia bajo circunstancias similares, se espera que con los elementos de flexión se obtendrían valores de V_p más altos. Sin embargo, debido a la naturaleza de los ensayos y a la naturaleza del fenómeno de propagación de las ondas a través del espécimen de suelo no es posible tener la misma frecuencia con las tres técnicas. Es decir, si se tratara de operar frecuencias similares con las tres técnicas, no enfrentamos con problemas tales como el efecto de campo cercano en las señales obtenidas con los elementos de flexión cuando se disminuye la frecuencia de excitación; en la columna resonante la resonancia del espécimen ocurre en un rango diferente de frecuencias y con la técnica de campo la frecuencia esta fuera de nuestro control, simplemente las señales viajan a la frecuencia de excitación inducido al suelo.

c) Los modos en que se excitan al suelo, mientras que con los elementos de flexión la propagación es debido a un movimiento que se aplica de forma perpendicular a la muestra del suelo, en la columna resonante la excitación se hace mediante una torsión inducida al suelo utilizando un campo magnético y una señal senoidal periódica (Bobina y el imán) y con la técnica del cono sísmico el modo de generar las ondas es mecánico, es decir, mediante un impacto. Todo esto nos indica que el tipo de propagación es diferente en los tres casos, mientras que con el cono sísmico y los elementos de flexión la propagación se presenta como un frente de ondas que viajan en forma lineal que provocan oscilaciones perpendiculares a la muestra del suelo, en la columna resonante la propagación de ondas al

espécimen es en forma torsional la cual representa otra forma de excitación.

d) Los efectos de muestreo y manipulación de las muestras del suelo desde que se recupera en el campo hasta la extracción y el labrado del espécimen en el laboratorio. Esto quiere decir que con el muestreo se produce cambios en los esfuerzos inducidos al suelo, la cual tienen un efecto en el comportamiento mecánico del suelo que altera su rigidez y resistencia.

Finalmente, no importa la causa o causas de las diferencias de las V_s determinados con las técnicas de campo y laboratorio, el punto es que la máxima diferencia entre las velocidades medidas es del orden del 7 al 15%.

5 CONCLUSIONES

5.1 Durante la etapa de consolidación, las V_p medidas con los elementos de compresión en los especímenes de suelo resultaron ser insensibles al incremento del esfuerzo ya que los especímenes estaban saturados. Por el contrario, las V_s medidas con los elementos de flexión en los especímenes se observó que están relacionadas linealmente con el esfuerzo octahédrico.

5.2 V_s medidos en el laboratorio y en campo.

Las diferencias principales entre los resultados de las V_s medidas en el laboratorio y en campo se cree son debido a:

- i) Que se utilizaron diferentes técnicas experimentales.
- ii) En campo no está presente la alteración del espécimen de suelo por muestreo.
- iii) La frecuencia de excitación aplicada a los cristales influye en la obtención de las velocidades, el cual se estudiará posteriormente en otras investigaciones.
- iv) En las cámaras triaxiales no se reproducen con exactitud las condiciones reales de campo.

5.3 Aplicaciones inmediatas

Finalmente, las aplicaciones inmediatas de los equipos de laboratorio instrumentados con cristales piezoeléctricos para medir las velocidades de onda compresión y de corte son las siguientes:

- Calcular los módulos elásticos a bajos niveles de deformaciones.
- Estimar la relación de Poisson en el rango lineal.
- Evaluar que influencia tiene el esfuerzo octahédrico efectivo de consolidación en los valores de V_p y V_s .

Otra aplicación de interés ingenieril al medir V_p y V_s en los especímenes de suelo en el laboratorio durante la etapa de saturación es estimar la presencia de gas. Esta cuantificación se puede estudiar teóricamente a partir de la relación entre los parámetros de B de Skempton y el grado de saturación (S_r , %), siguiendo el criterio definido por Valle Molina (2006) y Valle Molina y Stokoe (2012).

La instrumentación de la cámara triaxial y el sistema de medición que se utilizó en este trabajo es de gran utilidad para la caracterización de suelos en el Valle de México, y para que el sistema continúe a la vanguardia de futuras investigaciones en muestras de suelo no solo del Valle de México, se recomienda instrumentar con cristales piezoeléctricos otros equipos de laboratorio como la columna resonante y el consolidómetro.

REFERENCIAS

- 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
- Cascante, G. and Santamarina, J. C., (1996). "Interparticle contact behaviour and wave propagation". *ASCE Journal of Geotechnical Engineering* 122, No. 10, pp 831-839.
- De Alba, P., and Baldwin, K. (1991). "Use of bender elements in soil dynamic experiments". In *Proceedings of Recent Advances in Instrumentation, Data Acquisition and Testing in Soil Dynamics*, Orlando, Fla., 21 October 1991. Geotechnical Special Publication No. 29, American Society of Civil Engineers. pp. 86–101.
- Dyvik, R., and Olsen, TS, (1987), "Gmax Measurements in Oedometer and DSS using Bender Elements". *Proceedings of the 12th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Rio de Janeiro, pp 39-42.
- 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.
- Fam, M. and Santamarina, J.C. (1997). "A Study of Consolidation Using Mechanical and Electromagnetic Waves". *Geotechnique*, vol. 47, no. 2, pp. 203-216
- Flores C., O., (2008), "Módulo de rigidez y relación de Poisson dinámicos obtenidos de mediciones en la franja del tercio medio en probetas de suelo granular". Tesis Doctoral, Universidad Nacional Autónoma de México.
- Flores M., Ovando, E. y Valle, C. (2010) "Propagación de ondas dinámicas en muestras de suelos en una cámara triaxial". XXV RNMSIG, Noviembre, 2010 – Acapulco, Gro.
- Flores M., Ovando, E. y Valle, C. (2012) "Velocidades de onda obtenidas en muestras de suelo de Texcoco ensayadas en el laboratorio utilizando cristales piezoeléctricos" XXVI RNMSIG, Noviembre, 2012 – Cancún, Quintana Roo.
- Flores, E. et al (2009), "Texcoco Lake seismic response. Results from strong motion records". *Earthquake Engineering Magazine* No. 81 37-51.
- Ming-Hung Chen, Kuo-Liang Wen, Chin-Hsiung Loh, y Robert L. Nigbor (2008). Experience of Suspension P-S Logging Method and Empirical Formula of Shear Wave Velocities in Taiwan. *Journal of the Chinese Institute of Civil and Hydraulic Engineering*.
- Ovando-Shelley E., (2011). "Some geotechnical properties to characterize Mexico City Clay".

Proceedings of the -14th Panamerican conference of soil mechanics and geotechnical engineering. Paper 889, Canadian Geotechnical society

Robertson P. K., et al (1986). "Seismic CPT to measure in situ shear wave velocity". Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 112, No. 8; pp 791-803.

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.

Santamarina, J.C, and Fam, MA, (1997), "Interpretation of Bender Elements", Discussion, Geotechnique, Vol. 47, No.4, pp. 873-877.

Santamarina, J.C, Klein,K.,and Fam, MA, (2001), "Soils and waves", John Wiley & Sons LTD, pp. 488.

Tanaka, M.,(2012), Personal communication.

Valle, C, and Stokoe, K.H, (2003), "Laboratory measurements of the Dynamic Properties of Intact and Remolded Offshore Clays from Campeche Bay" , Proceedings Offshore Mechanics and Artic Engineering Conference, OMAE '2003,American Society of Mechanical Engineers, Paper No.37248, Workshop of Offshore Geotechnics, Cancun, Mexico, June

Valle-Molina, C, and Stokoe, K.H. (2012), "Seismic Measurements in Sand Specimens Varying Degrees of Saturation Using Piezoelectric Transducers". Canadian Geotechnical Journal, 49-6, pp 671-685.

Viggiani, G., Atkinson, JH, (1995), "Interpretation of bender elements tests", Géotechnique 45, No 1, pp 149-154