

Esfuerzo de pre-consolidación basado en la medición de Vs en suelos Lacustres

Pre consolidation stress evaluated with Vs in Lacustrine soils

Alfonso Fernández-Lavín¹; Claudia Chamorro-Zurita²

¹Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México-México, afernandezl@iingen.unam.mx

²Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México-México, cchamorroz@iingen.unam.mx

DOI: <http://dx.doi.org/10.31243/id.v15.2022.1586>

Resumen

Para realizar un análisis esfuerzo-deformación en un suelo saturado, es indispensable conocer el esfuerzo de pre-consolidación. Por esta razón, en los últimos 80 años se han propuesto una serie de criterios que permiten evaluar esta variable en ensayos de consolidación unidimensional. Además, muchos investigadores han equipado con cristales piezoeléctricos sus consolidómetros para poder relacionar las propiedades mecánicas de los suelos con el cambio de rigidez elástica producida por el cambio del estado de esfuerzo. Dentro de la información adquirida con la medición de ondas sísmicas es posible observar de una manera indirecta el cambio de la estructura del suelo durante una prueba de consolidación e incluso poder evaluar el esfuerzo de pre-consolidación. En esta investigación se analizan datos provenientes de ensayos de consolidación efectuados sobre muestras inalteradas de suelo lacustre blando en los que se han medido la velocidad de onda cortante para estimar el esfuerzo de pre-consolidación. Los resultados obtenidos se compararon con algunos criterios presentados en la bibliografía especializada observándose muy buena relación especialmente con los métodos visuales de Casagrande y de Pacheco-Silva. Además, la interpretación de los tiempos de arribo de la onda cortante se realiza utilizando un enfoque basado en la identificación del primer pico dentro un análisis tiempo-escala-coeficiente basado en el marco teórico de la transformada wavelet.

Palabras clave:

Elemento bender, velocidad de onda cortante, suelo lacustre, esfuerzo de pre-consolidación, transformada wavelet

Abstract

To perform a stress-strain analysis in saturated soil, it is essential to evaluate the pre-consolidation stress. For this reason, in the last 80 years, a series of criteria have been proposed that allow the evaluation of this variable in one-dimensional oedometer tests. In addition, many researchers have equipped their oedometers with piezoelectric transducers to relate the soil mechanical properties concerning an elastic stiffness modification produced by an effective stress variation. Within the information acquired with the measurement of seismic waves, it is possible to indirectly observe the change in the soil structure throughout an oedometer test and even to be able to evaluate the pre-consolidation stress. This research analyzes data from several oedometer tests carried out on undisturbed samples of soft lacustrine soil in which shear wave velocity has been measured to estimate the pre-consolidation stress. The results obtained were compared with some methods presented in the specialized bibliography, observing a very good relationship, especially with the visual methods of Casagrande and Pacheco-Silva. Furthermore, the interpretation of the shear wave arrival

time is evaluated using an approach based on the identification of the first peak within a time-scale-coefficient analysis based on the wavelet transform framework.

Keywords: *Bender element, shear wave velocity, lacustrine soil, pre-consolidation stress, wavelet transform.*

Introducción

El proceso de análisis y diseño geotécnico puede ser muy complejo y su idoneidad depende de la cuidadosa caracterización de los diferentes materiales que lo componen. Hoy en día, las estructuras de obra civil están diseñadas para asegurar que la resistencia del suelo sea mayor que la carga impuesta y se pone un gran énfasis en el control de la deformación para lograr un nivel aceptable de seguridad y servicio. Además, desde un punto de vista económico, este diseño también debe ser eficiente, por lo que se podría realizar un análisis geotécnico avanzado utilizando algunos modelos constitutivos que han sido ampliamente discutidos en la literatura especializada (Wood, 2004).

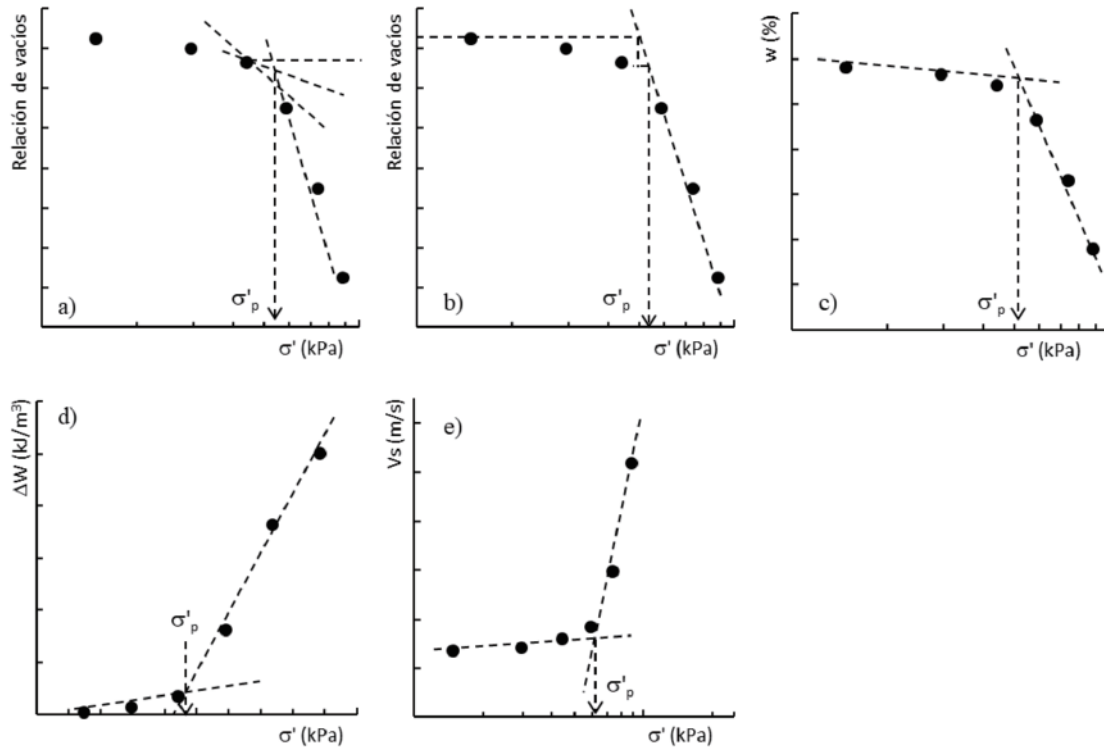
Un mismo tipo de suelo puede presentar diferente respuesta esfuerzo-deformación cuando es sometido a un cambio en su estado de esfuerzos. Esta diferencia se relaciona con muchas variables intrínsecas que afectan su estado inicial en el cual han sido cargadas, como son: la historia de esfuerzos previa, la relación de vacíos, el grado de saturación, el índice plástico, entre otros. Para el caso de suelos saturados, un parámetro fundamental para conocer su comportamiento ante un cambio en su estado de esfuerzos es el OCR que relaciona el esfuerzo de pre-consolidación (σ'_p) y el esfuerzo vertical efectivo actual que tiene en campo (σ'), $OCR = \sigma'_p / \sigma'$. Un valor de $OCR=1$ representa un estado de consolidación normal, es decir, el máximo esfuerzo efectivo experimentado previamente por un material no es mayor que el estado actual de esfuerzos. Un $OCR > 1$ describe un estado de sobre consolidación en el cual el máximo esfuerzo efectivo que el suelo ha experimentado es mayor que el nivel de esfuerzo actual.

En esta investigación se utilizan los resultados de la medición de onda cortante durante la realización de ensayos de consolidación unidimensional efectuados en probetas de suelo lacustre para establecer el esfuerzo de pre-consolidación. Los resultados obtenidos con este método son comparados con los determinados por medio de otros criterios presentados en la bibliografía especializada. Además, la interpretación del tiempo de arribo de la onda cortante se realizó utilizando un diagrama tiempo-escala-frecuencia obtenido al descomponer la señal de salida a través del marco teórico de la transformada wavelet.

Algunos criterios para estimar el esfuerzo de pre-consolidación

El primer método para interpretar el esfuerzo de pre-consolidación fue propuesto por Arthur Casagrande en 1936 y con el transcurso del tiempo nuevos enfoques han ido surgiendo, basados en la investigación del comportamiento esfuerzo-deformación de diferentes suelos alrededor del mundo. Algunos de estos criterios alternativos se basan en observaciones empíricas, en calcular la energía necesaria para cambiar el estado de esfuerzos de la probeta e incluso en la medición de ondas sísmicas durante la prueba. En la Fig. 1 se muestran algunos de estos criterios y a continuación serán explicados de manera general.

Figura 1. Diferentes criterios para estimar el esfuerzo de pre-consolidación (σ'_p): a) Casagrande, b) Pacheco Silva, c) Contenido de agua, d) Trabajo y e) Velocidad de onda cortante



Criterio de Casagrande (1936)

Este criterio visual es ampliamente usado y se basa en relacionar la relación de vacíos (e) con el esfuerzo vertical efectivo (σ') en escala semilogarítmica (Fig. 1a). Para la obtención del σ'_p se deben seguir los siguientes pasos: 1) se selecciona el radio mínimo de curvatura visualmente en la curva $e - \log \sigma'$; 2) se traza una línea horizontal y otra tangencial en el punto del radio mínimo; 3) se dibuja una bisectriz en el ángulo formado por las líneas dibujadas en el paso 2; 4) se traza una prolongación del sector con mayor pendiente de la curva $e - \log \sigma'$ (zona normalmente consolidada) que cruce con la línea efectuada en el paso 3; 5) la proyección al eje $\log \sigma'$ de la intersección de las líneas dibujadas en los pasos 3 y 4 corresponderá al esfuerzo pre-consolidación.

Criterio Pacheco Silva (1970)

Este criterio visual fue propuesto por Pacheco Silva (1970), es ampliamente utilizado en Brasil y se basa en relacionar la relación de vacíos (e) con el esfuerzo vertical efectivo (σ') en escala semilogarítmica (Fig. 1b) aunque la selección de σ'_p varía con el criterio de Casagrande. En este método se siguen los siguientes pasos: 1) se traza una recta horizontal que pase por el punto de mayor relación de vacíos; 2) se traza una prolongación del sector con mayor pendiente de la curva $e - \log \sigma'$ (zona normalmente consolidada) que cruce con la línea efectuada en el paso 1; 3) desde el punto de intercepción encontrado en el punto 2, se traza una línea vertical que intercepte a la curva $e - \log \sigma'$. 4) desde el punto establecido en el numeral 3 se traza una horizontal hasta la curva dibujada en el punto 2; 5) la proyección al eje $\log \sigma'$ de la intersección de

las líneas dibujadas en el paso 4 corresponderá al esfuerzo pre-consolidación.

Criterio del contenido de agua

El contenido de agua se encuentra definido como la relación entre el peso del agua y el peso de los sólidos que conforman el suelo. De una manera práctica se asume que, para un suelo saturado, el volumen y el peso del agua son iguales. Un suelo saturado se encuentra conformado únicamente por dos fases que son la sólida y la líquida, la primera puede sufrir cambios en su arreglo, pero su peso no varía y la segunda, conforme se incrementa el esfuerzo aplicado a la probeta, será expulsada hasta lograr culminar la consolidación primaria. Con este análisis se ha observado que es posible establecer una relación entre el σ'_p en un gráfico contenido de agua (w) con el esfuerzo vertical efectivo (σ') (Dolinar, 2004) y visualmente es posible establecer el σ'_p cuando se intersecan las proyecciones tanto de la rama pre-consolidada como de la normalmente consolidada (Fig. 1c).

Criterio energético

Para pruebas de consolidación, Becker et al (1987) propusieron un criterio para establecer el esfuerzo de pre-consolidación basado en un enfoque energético. El trabajo por unidad de volumen asociado con un incremento de carga en condiciones de restricción lateral (K_0) se expresa de la siguiente manera:

$$\Delta W = \left[\frac{\sigma'_i + \sigma'_{i+1}}{2} \right] (\varepsilon_{i+1} - \varepsilon_i) \quad (1)$$

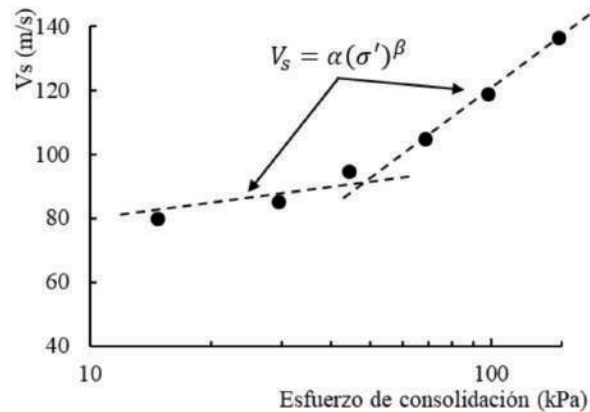
donde σ' y ε son el esfuerzo efectivo y la deformación unitaria, respectivamente. Los subíndices i e $i + 1$ se refieren a las secuencias de carga. Para establecer el σ'_p es necesario graficar el trabajo por unidad de volumen versus el esfuerzo vertical efectivo en escala aritmética como se muestra en la Fig. 1d. En esta figura se observan dos tendencias claramente identificadas, la primera en la que el incremento del trabajo desarrollado tiene una pendiente baja y el segundo cuando ésta pendiente es más pronunciada. La intersección de estas líneas de tendencia se interpreta como el σ'_p .

Criterio de la velocidad de onda cortante

En las últimas décadas ha ido ganando importancia el estudio de la propagación de ondas sísmicas en el laboratorio en equipos que se encuentran instrumentados con cristales piezoeléctricos debido a que es posible conocer el comportamiento dinámico de los suelos en el rango elástico de forma complementaria a los parámetros geotécnicos convencionalmente encontrados (Shibuya et al., 2005).

La piezoelectricidad es una propiedad natural de algunos cristales (e.g. cuarzo, turmalina), pero también pueden ser fabricados industrialmente. Este tipo de materiales generan una señal eléctrica cuando son sometidos a deformaciones mecánicas y en contraste sufren deformaciones mecánicas cuando se les aplica un voltaje. Típicamente un elemento bender (BE) consiste en dos placas piezoeléctricas delgadas pegadas a una placa central metálica (Brignoli et al., 1996) y pueden ser conectados eléctricamente tanto en serie como en paralelo.

Figura 2. Relación entre el esfuerzo efectivo y la velocidad de onda cortante



En materiales particulados y a diferencia de un medio continuo, el estado de esfuerzos efectivos modifica la rigidez del esqueleto del suelo estudiado y este comportamiento se puede expresar como una ecuación potencial (Santamarina & Fam, 1997). El módulo de rigidez al cortante en el rango elástico se encuentra relacionado con la V_s por la relación $G_{m\acute{a}x} = \rho V_s^2$ (ρ es la densidad natural del suelo), por esta razón en el rango de deformaciones elásticas es posible estudiar la estructura del suelo pues en pruebas de laboratorio se ha observado un comportamiento bilineal en la relación V_s -log σ' debido a un incremento en el esfuerzo efectivo (Santamarina et al., 2001), como se observa en la Fig. 2. Donde α es la velocidad de onda cortante de referencia (1 kPa de confinamiento) y β es un coeficiente experimental.

En el primer tramo de la relación V_s -log σ' se observa un ligero cambio de la rigidez del suelo representado por un leve incremento de la V_s conforme se incrementa el esfuerzo efectivo debido a que los contactos entre partículas dentro del suelo permanecen intactos y a este intervalo normalmente se lo conoce como rama pre consolidada. Si se sigue incrementado el esfuerzo efectivo se observará un cambio de la pendiente en la relación V_s -log σ' , este punto de quiebre coincide con el esfuerzo de fluencia (σ_p') o de pre-consolidación. A partir del esfuerzo de fluencia la microestructura del suelo sufre un cambio significativo debido a que los contactos entre partículas dentro del suelo comienzan a romperse observándose una mayor deformabilidad del suelo que se refleja en un rápido incremento de V_s conforme se incrementa el esfuerzo efectivo. Este tramo corresponde a la rama normalmente consolidada.

Metodología

Probetas

En esta investigación se usaron probetas inalteradas recuperadas de sondeos selectivos llevados a cabo en el sector donde se implantaba el Ex Lago de Texcoco (oriente de la Ciudad de México). A los estratos que conforman los primeros 30 metros de profundidad en promedio se los denomina la formación arcillosa superior (FAS), principalmente conformada por suelos finos de tipo arcilloso y limoso (MH y CH). Predominan los minerales tipo montmorillonita cálcica, aunque en menor cantidad también se pueden encontrar montmorillonita sódica, caolín plástico, illita, sepiolita y atapulgita (Almanza-Hernández et al., 2013). En la Tabla 1 se muestran la descripción y propiedades físicas de las probetas ensayadas cuyas dimensiones

iniciales fueron de 90 mm de alto y 95 mm de diámetro.

Consolidómetro, cristales piezoeléctricos y equipo periférico

Se empleó un consolidómetro de palanca adaptado para ensayar probetas de grandes dimensiones. Una vez montada la probeta en el consolidómetro se realizó el ensayo de consolidación mediante incrementos programados de carga hasta que la deformación axial fue la máxima permitida por el equipo. Además, este equipo fue instrumentado con BE en ambos extremos de la probeta con el fin de propagar ondas en sentido vertical una vez que la consolidación primaria concluyó y antes de un nuevo incremento de carga. Los BE tuvieron dimensiones de 12 x 6 x 1 mm y antes de ser empotrados 1/3 de su longitud en la probeta de suelo, fueron soldados a cables coaxiales, debidamente aterrizados y recubiertos con una capa delgada de pintura fotosensible con el fin de evitar daños eléctricos por el contacto con el agua.

Tabla 1. Descripción y propiedades físicas de la probetas ensayadas

Ensayo	Prof. m	w %	wL %	wP %	IP %	Gs	e
P-3	24.1	224.13	279.74	67.8	211.95	2.93	6.88
P-5	18.7	200.60	239.89	72.50	167.39	3.13	6.38
P-6	14.1	207.40	279.62	78.97	200.64	2.54	5.22
P-9	15.5	218.99	340.93	86.50	254.43	2.98	6.26
P-10	15.0	131.36	130.56	62.90	67.66	2.60	3.59

- w_L = límite líquido, w_P = límite plástico, I_P = índice de plasticidad, G_s = peso específico de sólidos

La señal de entrada fue de tipo pulso sinusoidal generada con frecuencias de 1 a 7 kHz (amplitud variable de 100 a 200 V). El equipo periférico fue constituido por un generador de funciones y un osciloscopio modelo HP54540A, conectado a una computadora de escritorio para la adquisición y análisis de las señales. Información complementaria acerca de la descripción del equipo y la configuración de las pruebas se explica en Chamorro (2016).

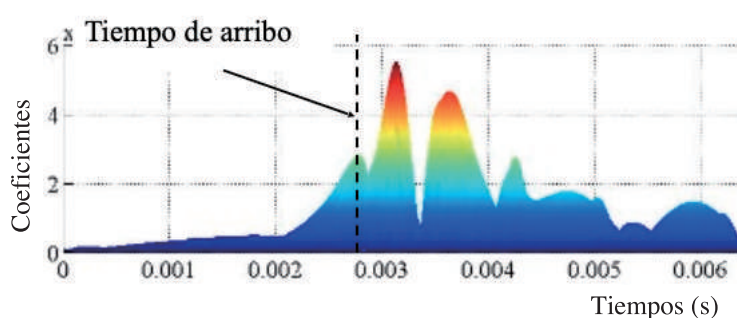
Procesamiento de las señales

Para la estimación de la velocidad de onda cortante (V_s) en el laboratorio mediante pruebas con BE, es necesario conocer únicamente dos valores ($V_s=L/t$); L es la longitud del tramo viajado por la onda cortante y t corresponde al tiempo de viaje de la onda. Aunque la determinación de V_s es muy simple, todavía no existe un criterio unificado para establecer el tiempo de arribo de la onda cortante pues en una misma señal se pueden tener una serie de puntos característicos relacionados con este evento. Por esta razón, existen varias investigaciones en la que se presentan métodos visuales denominados como en el dominio del tiempo, métodos numéricos denominados como en el dominio de la frecuencia e incluso métodos en el dominio tiempo-frecuencia (Viggiani & Atkinson, 1995; Jovičić et al., 1996; Pennington et al., 2001; Greening & Nash, 2004; Airey & Mohsin, 2013; Viana da Fonseca et al., 2009; Yamashita et al., 2009; Fernández-Lavín & Ovando-Shelley, 2020).

En este trabajo se calculó el tiempo de viaje de la onda cortante utilizando el método denominado primer

arribo dentro de un análisis multiresolución usando la transformada wavelet de Fernández-Lavín y Ovando-Shelley (2019a). Este enfoque se basa en utilizar una wavelet madre tipo sombrero mexicano para descomponer la señal de llegada e interpretar el arribo de la onda en un diagrama tiempo-escala-coeficientes como un pico relativo. En los últimos años hemos utilizado este método de análisis en el laboratorio con buenos resultados (Fernández-Lavín, 2020; Martínez Álvarez et al., 2021). Incluso este método permite analizar señales de salida influenciadas por ruido. En la Fig. 3, como ejemplo, se puede ver la evaluación del tiempo de llegada de la onda cortante usando un enfoque multi resolución.

Figura 3. Identificación del tiempo de arribo de la onda cortante en un diagrama tiempo-escala-coeficientes

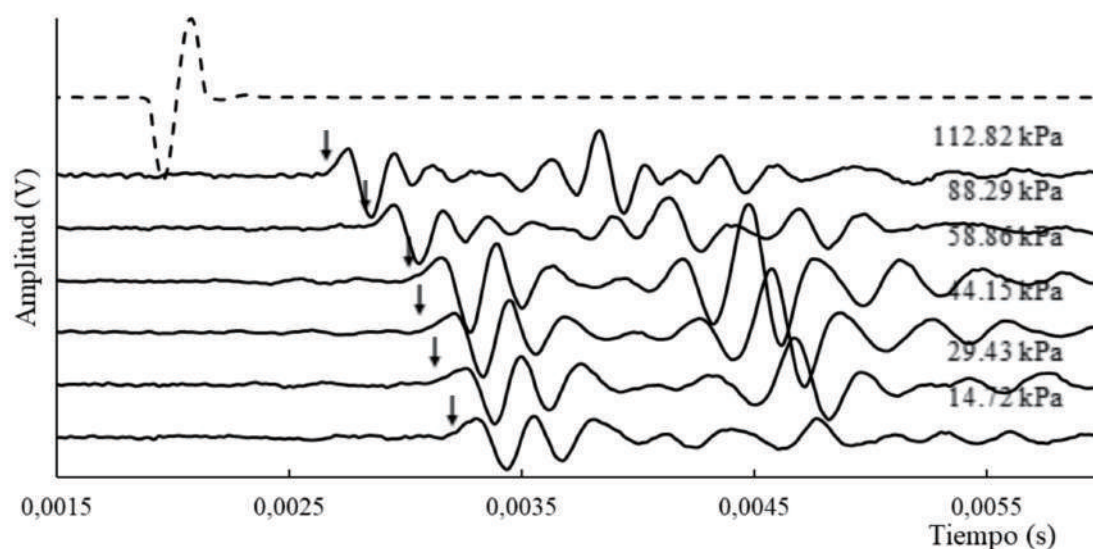


La wavelet conocida como pulso de Ricker o sombrero mexicano no tiene función de escalas y es derivada desde una función que es proporcional a la segunda derivada de una función Gaussiana. Se utiliza esta wavelet prototipo debido a que su forma se asemeja a la sección de las ondas de salida donde se encuentra el arribo de la onda cortante. El fundamento de la transformada wavelet se basa en que una onda madre escalada es trasladada a lo largo del eje del tiempo. En cada una de estas posiciones un coeficiente wavelet es calculado e indica la similitud que existe entre la onda trasladada para un tiempo y una escala específica respecto a la porción de la señal analizada. Este mismo análisis es repetido para cada uno de los diferentes niveles analizados, es decir que se calculan diferentes coeficientes para diferentes escalas en todas las secciones de la señal. Como resultado es posible observar la información de la señal de salida representada en tres ejes coordenados (tiempo, escala y coeficientes) que se denomina escalograma; la primera llegada de la onda cortante consiste en ubicar el primer pico de los coeficientes respecto a la escala de tiempo.

Presentación de resultados y discusión

Como se mencionó en párrafos anteriores, la medición de ondas sísmicas utilizando cristales piezoeléctricos permite conocer de una manera indirecta los cambios internos en los contactos entre partículas dentro un medio cuando se modifica el estado de esfuerzos al que se encuentra sometido. Las perturbaciones que permiten conocer este comportamiento son generadas en el rango elástico, es decir, no alteran la estructura del suelo ni ocasionan deformaciones permanentes, aun cuando son propagadas de forma continua mediante trenes de ondas (Styler & Howie, 2014). Las ondas generadas con los BE son de tipo cortantes y se propagan a través del contacto entre partículas, por esta razón, son muy útiles para conocer de una manera indirecta los cambios sufridos por la estructura del suelo cuando es sometida a un proceso de consolidación.

Figura 4. Señales sísmicas típicas adquiridas con elementos bender durante una prueba de consolidación, con línea segmentada señal de entrada ($f=4$ kHz) y con líneas sólidas señales de salida. La flecha indica la primera llegada

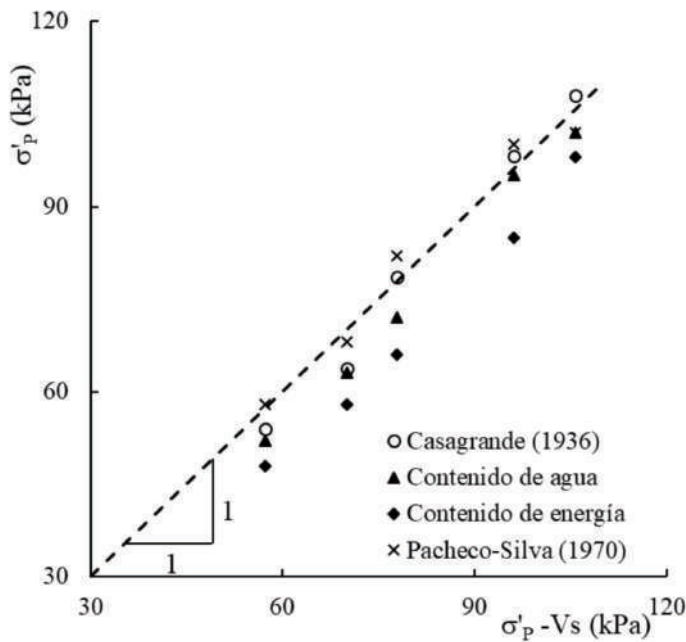


En la Fig. 4 se muestran señales de salida generadas durante una prueba de consolidación y se observa claramente dos comportamientos diferentes en la propagación de la onda cortante. Conforme se incrementa el estado de esfuerzos en la zona pre-consolidada, que es la zona que antecede al esfuerzo de pre-consolidación y en este caso son esfuerzos efectivos menores a 58.86 kPa se presentan pequeños incrementos de la velocidad de onda cortante. Esta zona presenta un comportamiento elástico y la estructura del suelo resiste sin movimiento o reacomodo de sus partículas. Por otro lado, una vez que el estado de esfuerzo sobrepasa el valor de pre-consolidación, en la Fig. 4 se observa que conforma se incrementa la carga transmitida al suelo, los valores de velocidad de onda cortante se incrementan considerablemente. Este cambio drástico se debe a que el suelo experimenta un rompimiento de la estructura existente y por ende una reestructuración y acomodo de sus partículas; a esta zona se la conoce como normalmente consolidada. De este razonamiento es posible deducir que conociendo la evolución de la velocidad de onda cortante con respecto al esfuerzo efectivo es posible conocer el valor del esfuerzo de pre-consolidación.

Con el fin de comparar los resultados obtenidos con el enfoque basado en la medición de ondas sísmicas para estimar el esfuerzo de pre-consolidación, los datos obtenidos de las diferentes probetas ensayadas fueron procesados utilizando los métodos explicados en la introducción. Como se puede observar en el eje de las abscisas de la Fig. 5 se graficaron los resultados obtenidos con el criterio basado en la medición de onda cortante y en el eje de las ordenadas se ubicaron los diferentes valores del esfuerzo de pre-consolidación evaluados con los métodos antes mencionados para las diferentes probetas presentadas en la Tabla 1. La diferencia de valores con el criterio de Casagrande varía entre 0.68 y 8.91 %, en donde el valor más alto se encontró en la probeta P-5, aunque, si se descartara esta prueba la diferencia con respecto a los otros resultados no variara más del 5.0 %. Es importante mencionar que el criterio de Casagrande fue el primero que se empleó para interpretar una prueba de consolidación. Esta técnica es puramente visual y se requiere seguir una serie de pasos para establecer el esfuerzo de pre-consolidación, es decir, es

necesario tener un gráfico muy claro y expresado en una adecuada escala para poder realizar los pasos indicados por el autor.

Figura 5. Comparación del esfuerzo de pre-consolidación obtenido con el criterio de la velocidad de onda cortante y otros métodos propuestos en la literatura



En la misma Fig. 5 se observa la comparación con el criterio propuesto por Pacheco-Silva y para este caso la diferencia de los esfuerzos de pre-consolidación entre estas técnicas varía entre 1.22 y 5.20 %, en donde la dispersión más alta se observa para esfuerzos efectivos mayores a 70 kPa. Este criterio también es visual, aunque su procedimiento es relativamente más sencillo que el propuesto por Casagrande. La diferencia entre los esfuerzos de pre-consolidación obtenidos con la velocidad de onda cortante y el criterio del cambio del contenido de agua varía entre 1.14 y 10.00 %. De manera general, se puede observar que el método del contenido de agua entrega valores menores que los obtenidos con la medición de ondas sísmicas, aunque en ambas técnicas se usa un criterio similar al interceptar las líneas del lado pre-consolidado y normalmente consolidado. Por último, se empleó el criterio basado en el contenido energético producido por la deformación de la probeta provocada por el cambio del estado de esfuerzos y se observa una diferencia que oscila entre 7.28 y 17.14 % en los valores del esfuerzo de pre-consolidación. Todos los valores obtenidos con el método energético son menores que aquellos evaluados con el criterio de la velocidad de onda cortante.

Conclusiones

Para realizar un análisis esfuerzo-deformación en un estrato de suelo saturado, es indispensable conocer el esfuerzo de pre-consolidación debido a que este parámetro es un indicativo de la deformabilidad que tendrá el suelo al momento de cambiar su estado de esfuerzos. En la práctica, si este cambio de esfuerzo efectivo se da en la parte pre-consolidada, el suelo presentará una deformabilidad menor que si se sobrepasa el σ'_p y se entra a la zona normalmente consolidada.

En los últimos 80 años se han propuesto varios métodos para interpretar el σ'_p modificando las variables que se relacionan con el esfuerzo efectivo o incluso si la interpretación se la realiza en escala aritmética o semilogarítmica, cada uno de ellos con ventajas y desventajas.

Actualmente se ha popularizado la medición de la velocidad de onda cortante durante pruebas de consolidación, permitiendo a más de conocer las propiedades dinámicas de la probeta también evaluar el σ'_p .

Del análisis de resultados se observa que los valores de σ'_p obtenidos con la medición de ondas sísmicas se asemeja a los obtenidos con los criterios visuales de Casagrande y Pacheco-Silva. Por otro lado, se observa que los σ'_p estimados con los criterios del contenido de agua y cuantificando la energía son menores al los establecidos con el criterio de velocidad de onda cortante hasta en un 17.14 %.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Secretaría de Educación Superior, Ciencia, Tecnología e Innovación (SENESCYT) y al Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México por el apoyo brindado para realizar la presente investigación.

Bibliografía

- Airey, D. & Mohsin, A. (2013). Evaluation of Shear Wave Velocity From Bender Elements Using Cross-Correlation. *Geotechnical Testing Journal, ASTM*, 36 (4), 506-514.
- Almanza-Hernández, F., Rangel-Nuñez, J., & Garfias-García, E. (2013). Study on the composition and microstructure of lacustrine soft soil deposits in Mexico City. In *Proceedings of the ISSMGE Technical Committee TC-214 Workshop Extreme Soils Mechanics*, México City, 23 May 2013. SMIG, n.d.
- Becker, DE., Crooks, JHA., Been, K., & Jefferies, MG. (1987). Work as a criterion for determining in situ and yield stress in clays. *Canadian Geotechnical Journal*, 24, 549-564.
- Brignoli, E. G., Gotti, M., & Stokoe, K. HI. (1996). Measurement of Shear Waves in Laboratory Specimens by Means of Piezoelectric Transducers. *Geotechnical Testing Journal, ASTM*, 19 (4), 384-397.
- Casagrande, A. (1936). In A. Casagrande (Ed). *Proceedings of the 1st International Soil Mechanics and Foundation Engineering Conference*, Cambridge, Mass.
- Chamorro, C. (2016). Medición de los valores de velocidad de onda cortante (V_s) en suelos provenientes del Ex Lago de Texcoco. M Sc Thesis, Universidad Nacional Autónoma de México, México [In spanish], 74.
- Dolinar, B. (2004). Undrained shear strength of saturated cohesive soils depending on consolidation pressure and mineralogical properties. *Acta Geotechnica Slovenica*, 2, 5-11.
- Fernández-Lavín, A. (2020). Interpretación de señales: uso de transformada wavelet para obtener parámetros dinámicos en suelos. Tesis de Doctorado en Ingeniería Civil, Universidad Nacional Autónoma de México, México
- Fernández-Lavín, A. & Ovando-Shelley, E. (2019a). Interpretación de Señales Usando Transformadas Wavelet Continuas. *Memorias XVI Congreso Panamericano de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica*, International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering,

- Ed. López-Acosta N. y otros, Cancún, Quintana Roo, México, 1 (138-145)
- Fernández-Lavín, A. & Ovando-Shelley, E. (2020). Haar wavelet transform for arrival time identification in bender element tests [on line]. *Geotechnical Testing Journal*, 43 (4), n.d. doi:10.1520/GTJ20180400.
- Greening, P. D. & Nash, D. FT. (2004). Frequency Domain Determination of G_0 Using Bender Elements. *Geotechnical Testing Journal*, ASTM, 27 (3), 288-294.
- Jovičić, V., Coop, M. R., & Simic, M. (1996). Objective Criteria for Determining G_{max} from Bender Element Tests. *Géotechnique*, 46 (2), 357-362.
- Martínez Álvarez, MR., Fernández-Lavín, A., & Ovando-Shelley, E. (2021). V_s y V_p medidas en suelos lacustres del ex Lago de Texcoco utilizando cristales piezoeléctricos durante pruebas en la cámara triaxial. En *Memorias de la XXX Reunión Nacional de Ingeniería Geotécnica, SMIG*, México, enviado para publicación
- Pacheco Silva, F. (1970). A new graphical construction for determination of the pre-consolidation stress of a soil sample. *Proceedings 4th Brazilian Conference Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Rio de Janeiro, 225-232.
- Pennington, D. S., Nash, D. FT., & Lings, M. L. (2001). Horizontally Mounted Bender Elements for Measuring Anisotropic Shear Moduli in Triaxial Clay Specimens. *Geotechnical Testing Journal*, 24 (2), 133-144.
- Santamarina, J. C. & Fam, M. A. (1997). Discussion: Interpretation of Bender Element Tests. *Géotechnique*, 47 (4), 873-875.
- Santamarina, JC., Klein, KA., & Fam, MA. (2001). *Soils and Waves - Particulate Materials Behavior, Characterization and Process Monitoring*. John Wiley & Sons.
- Shibuya, S., Koseki, J., & Kawaguchi, T. (2005). Recent Developments In Deformation And Strength Testing Of Geomaterials. In D. Be. al (Ed), *Deformation Characteristics of Geomaterials, Recent Investigations and Prospects*. Taylor & Francis Group.
- Styler, M. & Howie, J. (2014). Continuous Monitoring of Bender Element Shear Wave Velocities During Triaxial Testing. *Geotechnical Testing Journal*, 37 (2), 219-229.
- Viana da Fonseca, A., Ferreira, C., & Fahey, M. (2009). A Framework Interpreting Bender Element Tests, Combining Time-Domain and Frequency-Domain Methods. *Geotechnical Testing Journal*, ASTM, 32 (2), 91-107.
- Viggiani, G. & Atkinson, J. H. (1995). Interpretation of Bender Element Tests. *Géotechnique*, 45 (1), 149-154.
- Wood, DM. (2004). *Geotechnical modelling*, 1st edition. CRC Press.
- Yamashita, S., Kawaguchi, T. NY., Mikami, T., Fujiwara, T., & Shibuya, S. (2009). Interpretation of International Parallel Test on the Measurement of G_{max} Using Bender Elements. *Soils and Foundations*, 49 (4), 631-650.