

Determinación de las propiedades de compresibilidad de la arcilla de la Ciudad de México mediante pruebas de laboratorio (consolidación unidimensional) y campo (presiómetro y piezocono)

David Eduardo SALGADO^{a,1} y Rigoberto RIVERA CONSTANTINO^b

^a *HP Ingeniería, suelos y cimentaciones S.A. de C.V.*

^b *División de Ingeniería Civil y Geomática – Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de México.*

Resumen. En este trabajo se evalúa la utilidad y/o aplicación del ensaye presiométrico en la determinación de las propiedades de compresibilidad de los suelos de consistencia blanda a media de la Ciudad de México. Se presentan los principios básicos del ensaye, y se describen las características principales de los presiómetros tipo PBP (Prebored pressuremeter) utilizados (Ménard y Elastómetro HQ). Se muestran los parámetros presiométricos (E_m , p_L y p_p) obtenidos en la arcilla blanda de alta plasticidad (CH) de la Ciudad de México, en dos sitios ubicados en la Zona III de Lago. Finalmente se presenta una comparación experimental entre los módulos odométricos (E_{oed}) obtenidos a partir de los ensayes presiométricos y los módulos E_{oedm} obtenidos mediante pruebas de consolidación unidimensional y de piezocono realizadas a la misma profundidad donde se llevaron a cabo las pruebas con presiómetro.

Palabras Clave. Presiómetro de Ménard, Elastómetro HQ, ensaye presiométrico esfuerzo-deformación in situ, módulo presiométrico, presión límite, presión de fluencia, consolidación unidimensional, piezocono, módulo odométrico.

1. Introducción

Como parte de las pruebas in situ recomendadas para la exploración del subsuelo de la Ciudad de México, [1] sugieren la aplicación del presiómetro y ficómetro para el caso de los suelos y/o estratos duros de difícil muestreo, como es el caso de la Costra Superficial (C.S.), la Primera Capa Dura (C.D.) y en los Depósitos Profundos (D.P.), así como el subsuelo de la zona poniente de la Ciudad (compuesto por lahares, tobas, conglomerados aluviales, rellenos de materiales granulares, etc.). No obstante, de acuerdo con la literatura especializada [2]; [3] y [4] el ensayo presiométrico también es adecuado para la determinación de los parámetros esfuerzo-deformación in situ de los suelos de consistencia blanda a media; incluso, de acuerdo con [5] y [6] existen correlaciones entre

¹ M.Sc. Eng. David Eduardo Salgado Mendoza; PM of HP Ingeniería, suelos y cimentaciones S.A. de C.V., Calle 815, El Centinela, Delegación Coyoacán, Ciudad de México; E-mail: dsalgadom@ingenieriahp.mx

los resultados experimentales de laboratorio y la resistencia en punta del cono eléctrico con los parámetros presiométricos.

1.1. Antecedentes

En 1954, Fang en la Universidad de Indiana y Louis Ménard en la Universidad de Illinois, comienzan el desarrollo del primer presiómetro moderno. Posteriormente, En Francia, 1955, Louis Ménard desarrolla el presiómetro de perforación previa para poder medir las propiedades de deformaciones in situ del suelo, y en 1963, con base en su experiencia, publica las primeras ecuaciones y gráficas relacionas con la aplicación directa de los resultados presiométricos en el análisis de capacidad de carga y asentamientos, tanto para cimentaciones superficiales como profundas. De manera independiente, durante la década de los 50's, Fukuoka de Japón desarrolló un ensayador de carga lateral conocido como "K -Value Tester", un presiómetro de perforación previa, capaz de obtener los valores del módulo lateral del suelo, para asistir en el diseño de pilas y/o pilotes por carga horizontal. En 1966, la Corporación OYO desarrollan el ensayador de carga lateral y después el Elastómetro 100; ambos de perforación previa y también de los más utilizados actualmente.

En el continente americano, y en particular en México, este dispositivo se conoce desde hace más de tres décadas, y se utiliza cada vez más con mayor frecuencia, principalmente en materiales de difícil muestreo inalterado, por ejemplo en los suelos de la zona poniente de la Ciudad de México [7], del estado de Aguascalientes [8] o como en los reportados por [9] en Cadereyta, N.L.

2. Ensayo presiométrico.

El ensayo presiométrico es prueba esfuerzo-deformación in situ que permite obtener las características geotécnicas del suelo referidas a su deformabilidad y resistencia; consistente en la expansión radial de una membrana dentro de una cavidad cilíndrica en el suelo. El procedimiento de instalación, ejecución e interpretación de la prueba depende principalmente del tipo de dispositivo utilizado.

2.1. Descripción del equipo

Los componentes principales de un presiómetro son (Figura 2 y 3): la sonda (A); unidad de control, consola de medición o controlador presión-volumen (B), dependiendo del tipo de dispositivo (Figuras 2 y 3); y conexión de la sonda a la superficie y/o tubería de conexión *C.P.V.* - sonda o unidad de control - sonda (C). Asimismo, la sonda se divide en tres módulos, conectados por un tubo central (1) de acero, estos son: sección de instalación (D), sección de prueba (E) y una sección (F) la cual puede estar vacía, alojar un sistema instrumentado o un módulo de perforación, dependiendo del dispositivo. La sonda se conecta a la superficie por medio de la tubería de perforación y un cable de control (tubería de conexión *CPV* - sonda o unidad de control - sonda).

2.1.1. La sonda.

Las diferentes técnicas de instalación dan origen a los tres grupos principales de presiómetros y/o sondas: de perforación previa (PBP, por sus siglas en inglés), de empuje y/o hincado (PIP y PSMPMT) y autoperforante (SBP). No obstante, los presiómetros PBP son los más comunes en la práctica. Por ejemplo, las sondas utilizadas en los trabajos referidos en este documento son los presiómetros de perforación previa Ménard y el Oyo Elastómetro HQ, los cuales se describen brevemente a continuación:

- a) El presiómetro Ménard: Es de perforación previa, la sonda cuenta con tres celdas de expansión (sonda tricelular, Figura 4a). La celda central o sección de prueba se conecta a un dispositivo de medición de volumen. Las otras dos celdas se conocen como celdas de guarda, y están diseñadas para asegurar, en medida de lo posible, que la celda de medición o sección de prueba de expanda solo radialmente (Figuras 4a y 5).
- b) El Oyómetro o Elastómetro HQ: también es de perforación previa, la sonda es de una celda (monocelular, Figura 4b) y cuenta con transductores de desplazamiento, que incluyen transformadores diferenciales lineales, medidores de efecto Hall y medidores de deformación (Figuras 4b y 5).

El presiómetro tipo Ménard (MPM) es de tipo volumétrico y las lecturas de los cambios de volumen (deformaciones del suelo) corresponden a la cédula central de la sonda; mientras que el Elastómetro HQ, realiza las lecturas de las deformaciones por desplazamiento radial (transductores de desplazamiento).

2.1.2. Consola de medición o Controlador de Presión – Volumen (C.P.V).

El CPV (Figura 6) está diseñado exclusivamente para el presiómetro de Ménard. Permite regular la presión en la sonda con el fin de realizar la carga estática del suelo y seguir la evolución de los escalones de presión. Se compone principalmente de un volúmetro de 800 cm³ con visor graduado, un regulador de presión, una válvula diferencial, manómetros 0x25, 0x60 bar y 0x100 bar que permiten conocer la presión de alimentación de la celda central (sección de prueba) y de las células de guarda de la sonda. Tanto el control de la presión aplicada como la medición de la deformación radial o cambio de volumen se realizan mediante el Controlador de Presión – Volumen (C.P.V).

2.1.2.1. Sistema GeoSPAD y unidad de control GeoBOX.

GeoSPAD 2 (Figura 7) permite la adquisición de datos presiométricos a través de la unidad central de control geotécnica *GeoBox* (Figura 9). Este sistema permite controlar la realización de ensayos presiométricos y registra automáticamente las condiciones y los resultados de estos ensayos. *GeoSPAD 2* es un sistema único totalmente integrado al presiómetro de Ménard, mandando directamente los datos al *GeoBox*.

GeoBOX (Figura 9) muestra la curva bruta, permitiendo una visualización instantánea del ensayo. La presión de la celda central (sección de expansión) y la presión diferencial, el volumen, el *AV60/60*, el número de escalón y el tiempo aparecen también durante la ejecución del ensayo.

Figura 8b) y una unidad de procesamiento (computadora) para visualizar los ensayos presiométricos.

2.1.3.1. Lector de presión/ deformación radial para presiómetro Elastómetro HQ4180.

Este instrumento (Figura 8b y 10) está diseñado exclusivamente para acondicionar las señales eléctricas de la sonda presiométrica Elastómetro HQ modelo 4180, marca OYO. Mediante lectores digitales, visualiza los valores instantáneos de presión aplicada y expansión de radio. Asimismo suministra una salida con puerto USB para visualizar y registrar los datos obtenidos en los ensayos desde un ordenador PC.



Figura 8 Unidad de control presión - volumen [12].



Figura 6 Sistema GeoSPAD, para adquisición de datos presiométricos [11].



Figura 9 Seguimiento del ensayo en tiempo real con GeoBox [11].



Figura 7 Unidad de Control para ensayos presiométricos con sonda Elastómetro HQ [12].



Figura 10 Unidad de control presión volumen [12].

2.2. Fundamento teórico del ensayo.

El ensayo presiométrico se analiza a partir de la teoría de expansión de cavidades en un medio isótropo y homogéneo, donde se realizan las hipótesis siguientes:

- La cavidad es infinitamente larga y sólo existen desplazamientos radiales.
- El suelo circundante a la perforación está sometido a deformación plana, no existe deformación en la dirección paralela al eje de la cavidad.
- Los esfuerzos radiales, transversales y verticales son esfuerzos principales.

2.3. Análisis e interpretación de la prueba.

Los resultados corregidos de la presión y deformación por cambios de volumen (Presiómetro Ménard) o desplazamiento radial (Oyo Elastómetro HQ), se grafican en ejes coordenados, tal como se muestra en la Figura 11. La curva presiométrica corregida de prueba es la que se emplea en la determinación de los parámetros de resistencia y deformación in situ. De cada ensayo se obtienen los Módulos presiométrico (E_m) y de corte (G), la presión de fluencia (p_f) y presión Límite (p_L).

La curva típica de la prueba PBP tiene forma de “S” (Figura 11). La primera fase, OA en la Figura 11, es la expansión de la membrana dentro de la perforación. La segunda fase, AB, corresponde a la deformación de una zona reblandecida durante la perforación. La tercera fase de la curva, BC, representa el comportamiento elástico del material ensayado (fase elástica). La fase CD marca el inicio de la fluencia del suelo adyacente a la membrana.

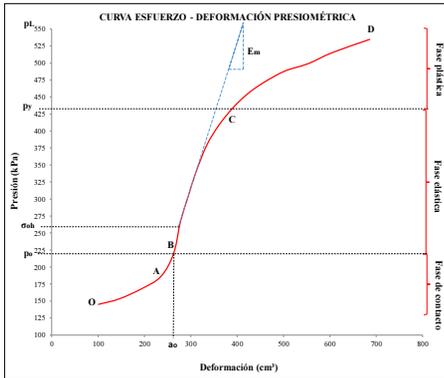


Figura 11. Curva presiométrica Ménard, prueba en la arcilla blanda de la Ciudad de México, a 16.5 m de profundidad [12].

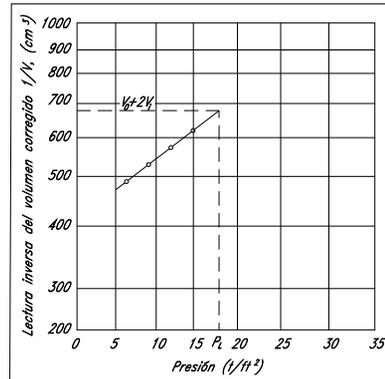


Figura 12. Determinación de la presión limite a partir de la gráfica inversa del volumen $1/V$ contra presión P .

Para ensayos realizados con el presiómetro de Ménard (el cual es de tipo volumétrico), la norma ASTM-D 4719-07 [13] indica que el módulo presiométrico está dado por la ecuación:

$$E_m = 2(1 + \mu)(V_0 + V_m) \frac{\Delta P}{\Delta V} \quad (1)$$

donde E_m es el módulo presiométrico, MPa; μ es la Relación de Poisson = 0.33; V_0 volumen de la sonda desinflada, correspondiente a la porción de medición, cm^3 ; V_m es el volumen corregido correspondiente a la mitad del intervalo ΔV , cm^3 ; ΔP es el incremento de la presión corregida correspondiente al tramo recto de la curva presión-volumen, MPa; ΔV es incremento del volumen corregido en la parte central de la porción de línea recta de la curva presión-volumen, correspondiente al incremento de presión ΔP , cm^3 .

Para el caso de ensayos realizados con presiómetro tipo Elastómetro HQ, la misma norma establece que el módulo E_m se obtiene como:

$$E_m = (1 + \mu)(R_p + \Delta R_m) \frac{\Delta P}{d\Delta R} \quad (2)$$

R_p es el radio de la sonda en condición desinflada, mm; ΔR_m Incremento del radio de la sonda hasta el punto correspondiente a la presión donde E_m es medido, mm; $d\Delta R$ es incremento del radio de la sonda correspondiente al incremento de presión ΔP en la porción de línea recta de la curva esfuerzo – deformación, mm.

La presión límite, p_L , se puede obtener graficando la inversa del volumen corregido $1/V$ contra la presión corregida P ; esto consiste en alinear los puntos leídos en la zona plástica dentro de la gráfica $1/V - P$ (Figura 12). Proyectando esta línea hasta el volumen $V_0 + 2Vi$ se puede deducir la presión límite, p_L . De acuerdo con [4] la presión límite también puede ser obtenida a partir de la presión de fluencia, pues p_y para el final de la fase elástica es igual a la mitad o dos terceras partes de la presión límite

La presión de fluencia, p_y , se encuentra al final de la línea recta de la curva presiométrica (Punto C en la Figura 11). Dicha presión puede ser determinada por simple inspección de la curva. p_y se calcula para verificar la calidad de la prueba o simplemente para estimar la presión límite cuando este valor no pueda ser obtenido directamente, pues, $p_L = 3/2 p_y$.

Diferentes autores [4]; [5] y [14] sostienen que las relaciones E_m/p_L o E_m/p_L^* sirven como una indicador y/o guía para la identificación del tipo de suelo (Tabla 1). Por su parte, Ménard observó que el cociente E_m/p_L^* guarda una estrecha relación con el grado de consolidación del suelo y se mantiene aproximadamente constante dentro de una misma formación geológica.

Tabla 1. Clasificación del tipo de suelo a partir de la relación E_m/p_L , diferentes autores: [2]; [4]; [5] y [14].

Autor	Relación de E_m / p_L propuesta	Tipo de suelo
M. Gambin (1988)	$12 \leq E_m/p_L \leq 30$	Suelos sobreconsolidados.
	$5 \leq E_m/p_L \leq 8$	suelos aluviales (arenas y gravas, arenas limosas bajo N.A.F)
	decremento del 20 al 30% de E_m/p_L	Remoldeo accidental durante la operación de perforación.
J. L. Briaud (1992)	$E_m/p_L^* > 12$	Arcillas.
	$7 < E_m/p_L^* < 12$	Arenas.
L. Menard (1962 y 1975); M. Devincenzi (2004)	$E_m/p_L^* < 5$	Arcilla alterada o fracturada.
	$5 < E_m/p_L^* \leq 8$	Arcilla subconsolidada o ligeramente alterada.
	$8 < E_m/p_L^* \leq 12$	Arcilla normalmente consolidada.
	$12 < E_m/p_L^* \leq 15$	Arcilla sobreconsolidada.
	$E_m/p_L^* > 15$	Arcilla fuertemente sobreconsolidada.
	$E_m/p_L^* < 5$	Arenas alteradas.
	$6 < E_m/p_L^* \leq 8$	Arenas y gravas sueltas (Bajo N.A.F).
$E_m/p_L^* > 10$	Arenas o gravas secas y densas.	

Tabla 2 Valores indicativos de E_m y p_L para distintos tipos de suelos [14].

Tipo de suelo	E_m MPa	p_L MPa
Rellenos recientes	0.5 to 5.0	0.05 to 0.30
Rellenos antiguos	4.0 to 15.0	0.40 to 1.00
Turbas	0.2 to 1.5	0.02 to 0.15
Arcilla blanda	0.5 to 3.0	0.05 to 0.30
Arcilla media	3.0 to 8.0	0.30 to 0.80
Arcilla dura	8.0 to 40	0.60 to 2.00
Arena limosa suelta	0.5 to 2.0	0.10 to 5.00
Limo	2.0 to 10.0	0.20 to 1.50
Arenas	7.5 to 40.0	1.00 to 5.00
Arenas y gravas	8.0 to 40.0	1.20 to 5.00
Margas	5.0 to 60.0	0.60 to 4.00
Calizas y rocas duras	80.0 to 20,000.0	3.00 to > 10

El módulo secante (G_s) para un valor determinado de deformación de la cavidad es aproximadamente la mitad de la pendiente de la curva presiométrica en ese valor de \mathcal{E}_c .

$$G_s = \frac{1}{2} \left(\frac{dp}{d\varepsilon_c} \right) \varepsilon_c \tag{3}$$

Gambin & Rosseau [4] consideran que el módulo presiométrico es un módulo de corte G “disfrazado” de un módulo de Young, esto de acuerdo con la expresión:

$$E = 2G(1 + \nu) \tag{4}$$

donde ν es la relación de Poisson, al que se le ha atribuido convencionalmente el valor de 0.33. Por lo tanto también es posible determinar de manera sencilla el módulo de elasticidad del material ensayado.

Gambin & Rosseau [4] y Clarke [6], proponen que el módulo presiométrico, E_m , se relaciona más con el medido en un ensaye odométrico (E_{odm}) y/o de consolidación, en el mismo rango de presión; el cual se expresa como:

$$E_{odm} = \frac{E_m}{\alpha} \tag{5}$$

donde el valore del factor de Ménard, α (factor reológico), depende del tipo de suelo y son indicados en la Tabla (3).

Tabla 3. Factor de Ménard α , en función del tipo de suelo y la relación E_m/p_L^* [5].

Tipo de suelo	Turba		Arcilla		Limo		Arena		Arena y gravas	
	E_m/p_L^*	α	E_m/p_L^*	α	E_m/p_L^*	α	E_m/p_L^*	α	E_m/p_L^*	α
Sobre consolidado	-	1	> 16	1	>14	2/3	>12	1/2	>10	1/3
Normalmente consolidado	Todos los valores	1	9-16	2/3	8-14	1/2	7-12	1/3	6-10	1/4
Intemperizado y/o remoldeado	-	1	7-9	1/2	-	1/2	-	1/3	-	1/4

3. Descripción de los sitios de estudio.

Los sitios de estudio se ubican en las colonias populares del Gas y Pro-hogar, Delegación Azcapotzalco, en la Ciudad de México. De acuerdo con la zonificación geotécnica establecida por las Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Cimentaciones [1], los sitios corresponden a la zona III de Lago (Figura 13).

Los trabajos de exploración consistieron en sondeos para medir la resistencia en punta ($CPTU$); sondeos para prueba con presiómetro (SP), y sondeos selectivos (SS) para recuperación de muestras inalteradas competentes para pruebas de compresión simple (q_u), triaxial UU y de consolidación.

En la Tabla 4 se presentan los resultados de los ensayos presiométricos realizados en arcilla blanda a media de la Ciudad de México, junto a los resultados obtenidos de las pruebas de resistencia en punta del piezocono (q_c , OCR y E_{odm}) y de consolidación en laboratorio (OCR y E_{odm}), realizadas prácticamente a la misma profundidad donde se llevaron a cabo los ensayos con presiómetro.

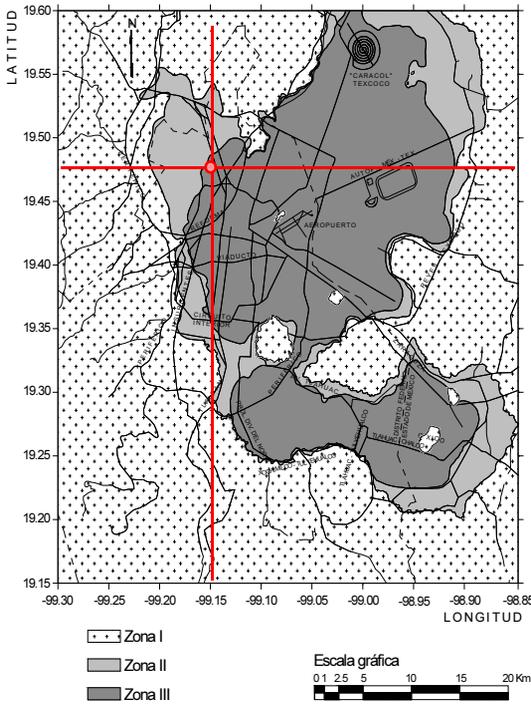


Figura 15. Ubicación de los dos sitios de estudio en la zonificación geotécnica de la Ciudad de México [1].

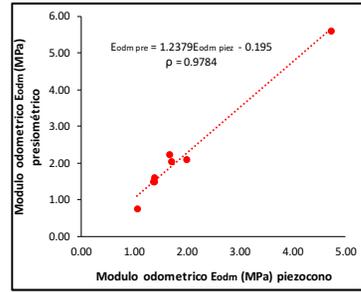


Figura 13. Correlación entre los módulos odométricos obtenidos de los ensayos presiométricos con los de resistencia en punta del piezocono, realizados en la arcilla blanda de la Ciudad de México.

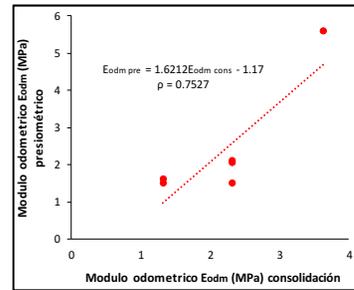


Figura 14. Correlación entre los módulos odométricos obtenidos de los ensayos presiométricos con los de la prueba de consolidación en laboratorio, realizados en la arcilla blanda de la Ciudad de México.

Tabla 4. Resultados de los ensayos presiométricos realizados en la serie arcillosa superior (S.A.S) de la Ciudad de México; comparación del módulo odométrico (E_{odm}) del ensaye presiométrico con los obtenidos a partir de la prueba de resistencia en punta del piezocono (CPTU) y de consolidación unidimensional en laboratorio [12].

Sitio de estudio	Sondeo	Prof. m	S.U.C.S	Tipo de sonda	Ensayo presiométrico				Piezocono			Consolidación		
					E_m MPa	p_L MPa	p_y MPa	E_{odm} MPa	Sondeo	q_c MPa	E_{odm} MPa	Sondeo	Prof. m	σ_b kPa
Colonia Prohogar, Del. Azcapotzalco	SP-1	6.4	CH	Oyometer	2.11	0.55	0.35	2.11	0.50	2.00	SS-1	6.06 - 6.23	0.06	0.26
		6.5		Ménard	0.5	-	-	0.75	0.53	1.06		-	-	-
	SP-2	8.0	MH-CH	Ménard	1.5	0.29	0.2	1.50	0.69	1.38				
	SP-3	6.0	CH	Oyometer	2.05	0.52	0.38	2.05	0.50	1.72				
Colonia Del Gas, Del. Azcapotzalco	SP-4	4.0	CH	Oyometer	2.25	0.49	0.31	2.25	0.42	1.68	CPTU-2	7.9 - 8.05	0.11	1.32
		8.0	MH-CH	Oyometer	1.62	0.44	0.29	1.62	0.69	1.38		8.22 - 8.40	0.17	2.36
Colonia Del Gas, Del. Azcapotzalco	SMI-02	6.0	CH	Ménard	1.0	0.2	0.13	1.50	0.34	1.36	SMI #2	5.0 - 6.0	0.18	2.31
		16.5	CH	Ménard	5.6	0.65	0.43	5.60	0.25	4.72		15.5 - 16.0	0.20	3.63

Como se puede apreciar (Tabla 4) existe similitud entre los valores del módulo odométrico (E_{odm}) obtenidos a partir del módulo presiométrico con los módulos E_{odm} determinados a partir de las pruebas de piezocono y de consolidación unidimensional. La prueba de consolidación realizada a la muestra obtenida entre los 6.0 y 6.23 m da un módulo E_{odm} muy bajo, posiblemente producto del remoldeo durante su labrado.

Si bien no se puede establecer una correlación representativa - debido al número limitado de pruebas de campo y laboratorio realizadas en los sitios de estudio - a partir de un ajuste lineal (Figuras 14 y 15) se obtuvo un factor de correlación relativamente alto para el caso de los módulos E_{odm} determinados a partir del presiómetro y con el piezocono ($\rho = 0.97$) y moderado para el caso de las pruebas de consolidación y el presiómetro ($\rho = 0.75$).

4. Conclusiones

- Los parámetros presiométricos E_m y p_L obtenidos en la arcilla blanda de la Ciudad de México son congruentes con los valores de otras arcillas (con características similares a las de este estudio) reportados en la literatura especializada [5] y [14]. Asimismo, los módulos elásticos, E , determinados a partir del ensayo presiométrico corresponden con los valores típicos y/o conocidos de la arcilla blanda de la Ciudad de México.
- Los módulos odométricos obtenidos a partir del ensayo presiométrico (Tabla 4) presentan una buena similitud con los obtenidos mediante la prueba de resistencia en punto del piezocono y de consolidación en laboratorio.

Referencias

- [1] Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Cimentaciones (2017).
- [2] Ménard, L., The Ménard Pressuremeter: Interpretation and application of the pressuremeter test results to foundation design (26 ed.). Sols Soils, 1975.
- [3] Baguelin, F., Jezequel, J., & Shields, D., The pressuremeter and Foundation Engineering. Clausthal - Zellerfeld, Germany: Trans Tech, 1978.
- [4] Gambin, M., & Rosseau, J. The Ménard Pressuremeter: Interpretation and Application of Pressuremeter Test Results to Foundation Design. Revised 1988 (with Addendum), Sols soils, 1975.
- [5] Briaud, J. L., The Pressuremeter (Vol. 1). Texas, Texas A&M University, College Station, U.S.A.: A.A BALKEMA/ ROTTERDAM/ BROOKFIELD, 1992.
- [6] Clarke, B., Pressuremeter in Geotechnical Design (First edition ed., Vol. 1). (C. & Hall, Ed.) Glasgow, U.K.: Blackie Academic & professional, 1995.
- [7] García R., L., & Auvinet G., Uso del presiómetro para la caracterización del subuelo de la zona poniente del Valle de México. Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, Distrito Federal, 1990.
- [8] Salgado M., D. E., Ponce, R. S., & Ponce, A. L. Informe final geológico/geotécnico - Proyecto Aguascalientes. HP Ingeniería, suelos y cimentaciones S.A. de C.V., Geotecnia, Aguascalientes (2017).
- [9] Ayes Z., J. C., & Salgado M., D. E. Estudio Geotécnico para el proyecto "Planta Catalítica", Cadereyta, N.L. Consultoría Integral en Ingeniería Geotécnica, Ciudad de México (2013).
- [10] B.2.3 Pruebas de campo para determinar propiedades de los suelos y enrocamientos. En Manual de Obras Civiles de la Comisión Federal de Electricidad. Ciudad de México (2010)
- [11] APAGEO, Modo operativo - Presiómetro de Ménard, Francia, 2012.
- [12] Salgado M., D. E. Caracterización de las arcillas de la Ciudad de México con el uso del presiómetro. Universidad Autónoma de México, Posgrado de Ingeniería, Ciudad de México, 2019
- [13] ASTM Standard D4719-07. Standard Test Methods for Pressuremeter Testing in Soils. Annual Book of ASTM Standards, 04.08 (2008).
- [14] Devincenzi, M., & Norberto, F. (2004). Ensayos Geotécnicos In situ: Su Ejecución e Interpretación. INGEOTEST, Caracterización Geotécnica y Geoambiental, Gerona, España.