

Actualización de la aplicación del ficómetro en las zonas I y II (Lomas y Transición, respectivamente) de la Ciudad de México y su comparación y/o correlación con la prueba de corte directo

Raziel Saúl PONCE^{a,1}, David Eduardo SALGADO^a, Rubén GUTIÉRREZ^a,

Ana L. PONCE^a y José Luis GONZÁLEZ^b

^aHP Ingeniería, suelos y cimentaciones S.A. de C.V.

^bIngenieros Geotecnistas Asociados S.A. de C.V.

Resumen. Este artículo parte del tema original propuesto por González [1], en el cual se presentan brevemente los principios básicos de las pruebas de ficómetro, y se describen las partes que componen el equipo y el procedimiento de ensaye tradicional. Además se muestran los resultados obtenidos en un sitio ubicado en el área industrial de Chalco de Díaz Covarrubias (Zona II de Transición), y su correlación con los resultados de la prueba de corte directo, donde se observa una correlación alta ($\rho = 0.881$ a 0.998) entre los esfuerzos cortantes de la prueba de ficómetro con los de la prueba de corte directo en laboratorio; asimismo se comparan con los resultados presentados por González [1], en el sitio ubicado en Felix Cuevas, Colonia del Valle. Finalmente se presentan algunos resultados del ensaye con ficómetro en los suelos de la zona I y en los estratos duros y densos de las zonas II y III de la Ciudad de México.

Palabras Clave. Ficómetro, prueba de corte directo in situ, prueba de corte directo en laboratorio, ley de resistencia Mohr – Coulomb, esfuerzo cortante.

1. Introducción

Tradicionalmente la exploración del subsuelo de la Ciudad de México consiste en el empleo de cono eléctrico (*CPT*), piezocono (*CPTU*) y la prueba de penetración estándar (*SPT*). En este sentido, la determinación de las propiedades mecánicas se lleva a cabo mediante correlaciones con la resistencia de Punta del cono eléctrico o del piezocono (q_c), es decir, del número de golpes de la prueba de penetración estándar (N_{SPT}) y de los resultados de las pruebas de laboratorio sobre muestras inalteradas, especímenes cuya estructura no ha sido modificada en forma significativa durante el muestreo.

No obstante, es bien sabido que, salvo en el caso de los suelos finos cohesivos de consistencia blanda a media, como son las arcillas blandas de la Ciudad de México, la

¹ Correspondencia del autor: M.Sc. Eng. Raziel Saúl Ponce Navarrete: CEO of HP Ingeniería, suelos y cimentaciones S.A. de C.V., Calle 815, El Centinela, Delegación Coyoacán, Ciudad de México; E-mail: sponcen@ingenieriahp.mx.

extracción y/u obtención de dicho tipo de muestras es difícil y en muchos casos imposible por lo que es necesario recurrir a pruebas de campo (conocidas como pruebas in situ) para la obtención de los parámetros mecánicos que permitan caracterizar al subsuelo.

Lo anterior es particularmente aplicable a los suelos de la zona I, como los materiales de la zona poniente de la Ciudad de México (Lahares, tobas, conglomerados aluviales, rellenos de materiales granulares, etc.) o en los estratos duros o densos de las zonas II y III [2] los cuales presentan dificultades considerables en el muestreo.

1.1. Antecedentes

A fin de superar los problemas relacionados con la obtención de las propiedades de los suelos de difícil muestreo, [2] desarrolló en Francia un dispositivo con el que es posible determinar directamente en sitio los parámetros de resistencia al esfuerzo cortante (c y \emptyset) a partir del modelo Mohr-Coulomb, sin la necesidad de obtener muestras inalteradas y ensayarlas en laboratorio, dando origen al ficómetro.

Este tipo de dispositivo ha sido estudiado por diferentes investigadores [3]; [4] y [5], principalmente la correlación que existe entre los resultados de las pruebas mecánicas de laboratorio con los parámetros mecánicos de resistencia obtenidos del ensayo ficométrico. Por ejemplo, en la Tabla 1 se presentan algunos parámetros de c y \emptyset obtenidos con el ficómetro, comparados con los de las pruebas triaxiales consolidadas no drenadas (CU) obtenidos por [3] y [4] para diferentes tipos de suelos; en dicha tabla se puede apreciar que para ángulos de fricción mayores a 25° el ficómetro y la prueba de laboratorio tiene una relación 1:1.

Tabla 1. Correlación aproximada entre esfuerzo cortante obtenido con el ficómetro con el esfuerzo cortante en laboratorio [1].

Ficómetro			Estimación	
Ángulo de fricción (\emptyset)	Cohesión (c)	Tipo de suelo	Ángulo de fricción (\emptyset)	Cohesión (c)
°	kN/m ²		°	kN/m ²
≤ 15	-	Arcilla suave	17	0
	≥ 20	Arcilla rígida	17	ci/4
$15 < \emptyset \leq 25$	< 20	Suelos no cohesivos	25	0
	≥ 20	Limos, mezcla de arenas, limos y arcillas	25	ci/3
$25 < \emptyset \leq 30$	< 20	Suelos no cohesivos	\emptyset_i	0
	≥ 20	Limos, mezcla de arenas, limos y arcillas	\emptyset_i	ci/3
> 30	< 10	Suelo con gravas y pocos finos	\emptyset_i	0
	≥ 10		\emptyset_i	ci/2
> 25		Rocas alteradas	\emptyset_i	$> ci$

En el caso de México, [1] demostró que existe una fuerte correlación entre los parámetros de resistencia al esfuerzo cortante obtenidos con el ficómetro y la prueba de corte directo de laboratorio, con un coeficiente de correlación alta (0.96), por lo que el presente trabajo de investigación pretende complementar y corroborar estos resultados.

1.2. Objetivo

Presentar algunos resultados obtenidos recientemente con la prueba de ficómetro en los suelos de la zona I y en los estratos duros o densos de las zonas II y III, así como su comparación y/o correlación con los resultados de la prueba de corte directo. Adicionalmente, se incluye una breve descripción del equipo y el procedimiento de ejecución de la prueba.

2. Ensayo de ficómetro

La prueba con ficómetro es un ensayo de campo (in situ) en el cual se ensaya el suelo en corte directo (Figura 1). A partir de este ensayo es posible obtener los parámetros de resistencia al corte (c y ϕ) de acuerdo con el modelo de resistencia de Mohr-Coulomb, principalmente en suelos difíciles de muestrear y ensayar en laboratorio; por ejemplo, para determinar el ángulo ϕ de las capas duras de la Cuenca del Valle de México, o bien, para determinar la cohesión y fricción de suelos duros, arenas y rocas blandas.

2.1. Descripción del equipo

El equipo de ficómetro está integrado principalmente por tres componentes, interconectadas entre sí, tanto mecánica como hidráulicamente, estas son:

- La sonda.
- La unidad de control presión – volumen.
- El sistema de aplicación de carga a extracción.

2.2. Aplicaciones de la prueba con ficómetro

De acuerdo con el Manual de Obra Civiles de la Comisión Federal de Electricidad [6], los ensayos de ficómetro se aplican en suelos arenosos de cualquier compacidad, incluso con presencia de gravas de hasta 150 mm, en rocas blandas como las tobas, así como en suelos arcillosos o limosos de consistencia media a dura. En los suelos arcillosos muy blandos se dificulta la ejecución de la prueba por lo que su uso en estos suelos no es apropiado. Las pruebas de ficómetro no aportan datos respecto a la deformabilidad de los suelos, por lo que la interacción y complementación con otras técnicas es necesaria para contar con el espectro completo del comportamiento de los suelos estudiados, por ejemplo, con pruebas de presiómetro o dilatómetro.

2.3. Análisis e interpretación de los resultados obtenidos

El ensayo con ficómetro se analiza con el criterio Mohr – Coulomb, donde al graficar la presión normal corregida versus esfuerzo cortante para cada uno de los incrementos de presión radial se obtiene la ley de resistencia y/o envolvente de falla del material ensayado (Figura 5), a partir de la cual es posible determinar la resistencia al corte del terreno en términos del ángulo de fricción interna, ϕ_p , y la cohesión, c_p .

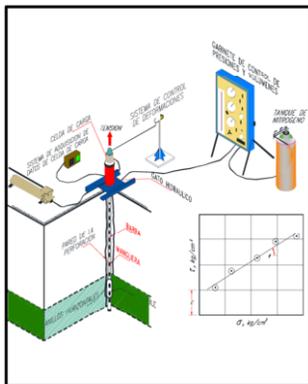


Figura 1. Ejecución de un ensayo e interpretación de la prueba [6].



Figura 2. La sonda.



Figura 3. Unidad de control presión – volumen.



Figura 4. Sistema de aplicación de carga a extracción

Se traza la curva cambio de volumen ($V_f - V_o$) contra presión radial corregida p_c (Figura 5), en donde se observan tres etapas: La etapa I del ensayo, que corresponde a la fase donde el contacto entre la sonda del ficómetro y las paredes del barreno aún no se establece; la etapa II corresponde a la rama de comportamiento elástico del material, en donde el cambio de volumen es aproximadamente constante y la presión radial aplicada p_c es muy similar al nivel de esfuerzos en la fase elástica del ensayo presiométrico; en esta zona se determina los parámetros c_p y ϕ_p . La etapa III representa la fase de comportamiento no lineal del material, donde la presión radial aplicada excede el comportamiento elástico del suelo (fase elástica del ensayo presiométrico), asociada a cambios de volumen importantes.

3. Descripción del sitio de estudio

El sitio de estudio se encuentra dentro de la zona industrial de Chalco de Díaz Covarrubias, cabecera municipal de Chalco, Edo de México. De acuerdo con la zonificación geotécnica establecida por las Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Cimentaciones (2017), el área de estudio corresponde a la zona II de Transición (Figura 6).

Los trabajos de exploración consistieron en un sondeo de penetración estándar (SPT-1) hasta los 40.20 m de profundidad, con el cual se programaron las pruebas de corte directo y esfuerzo – deformación in situ (ficómetro y presiómetro, respectivamente), así como el muestreo inalterado; un sondeo expreso para pruebas de ficómetro (SF-1) a profundidades variables, entre los 7.0 y 30.5 m; y un sondeo mixto (SM-1) para recuperación de muestras inalteradas y ensayos presiométricos con Elastómetro HQ. El muestreo inalterado se realizó a la misma profundidad donde se efectuaron las pruebas con ficómetro. En laboratorio se realizaron pruebas índice y de corte directo a las muestras de suelo alteradas e inalteradas, respectivamente.

La estratigrafía del sitio consiste en: de 0.0 a 22.80 m, arenas arcillosas de compacidad media a muy densa con intercalaciones de arcillas arenosas o con arena de consistencia muy firme a dura; de 22.80 a 32.30, arcilla de media a alta plasticidad, de consistencia blanda a firme; 32.30 a 40.0, intercalaciones de arenas limo arcillosas muy

densas y limo arcillosos con arena de consistencia muy dura. Los contenidos de agua varían de 17.5 hasta 144.0%.

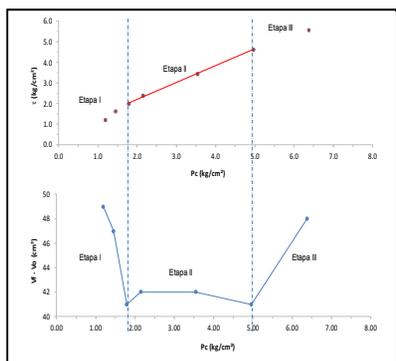


Figura 5. Determinación de ϕ_p y c_p [7].

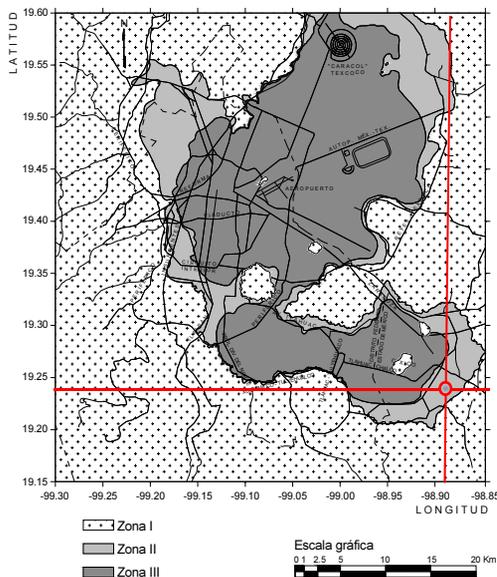


Figura 6. Ubicación del área de estudio de acuerdo con la zonificación geotécnica de la Ciudad de México [8].

En la Tabla 2 se presentan los resultados obtenidos a partir de las pruebas de ficómetro y presiómetro, así como los de las pruebas de corte directo en laboratorio. Adicionalmente, como una referencia y/o comparativa, también se incluyen los resultados presentados por [1] (Tabla 3), ya que ambos sitios corresponden a la zona II de Transición. Como se puede apreciar, los resultados obtenidos en el sitio ubicado en la zona industrial de Chalco son bastante congruentes con los reportados por [1].

4. Resultados

4.1. Ley de resistencia

Con base en los resultados de las pruebas in situ con ficómetro y de corte directo en laboratorio, se obtuvo la ley de resistencia para cada prueba siguiendo la teoría y/o criterio de Mohr – Coulomb.

En las Figuras 7 a 10 se presenta las curvas de cedencia o ley de resistencia de cada una de las pruebas de ficómetro realizadas dentro del sitio de estudio (Zona industrial de Chalco Díaz de Covarrubias, Municipio de Chalco, Estado de México). A estos resultados se sobreponen las envolventes de falla de las pruebas de corte directo, tal como sugiere [1]. Como se puede apreciar, existe cierta similitud entre las pruebas de ficómetro y corte directo (esta última produce valores ligeramente menores a las del ficómetro).

Tabla 2. Resultados de las pruebas in situ con ficómetro y presiómetro y de corte directo en laboratorio, correspondientes al sitio ubicado en Chalco, Edo de México [7].

Proyecto	Sondeo	Profundidad (m)	Zonificación geotécnica	S.U.C.S.	Ficómetro		Presiómetro Elastometro			Laboratorio corte directo CD		
					<i>c</i>	θ	<i>Em</i>	<i>pL</i>	<i>py</i>	<i>c</i>	θ	
					kg/cm ²	°	MPa	MPa	MPa	kg/cm ²	°	
Chalco, Edo. de Mex.	SM-1	3.5	Zona II (Transición)	SC			16.92	2.80	1.23			
	SM-1	5.5		SC			55.35	4.50	1.96			
	SPT-1	6.3		CL								
	SF-1	7		CL	0.56	39.30					0.23	30.55
	SM-1	7.5					26.15	2.67	1.41			
	SPT-1	9.9										
	SM-1	11.5					35.18	3.29	2.06			
	SF-1	17									0.11	26.85
	SPT-1	20.7			SC							
	SF-2	24			CL	0.26	36.8				0.12	31.12
	SF-3	30.5			CH	0.5	29.7				0.76	19.56
	SPT-1	35.7			SM							

Tabla 3. Resultados de las pruebas in situ con ficómetro y presiómetro y de corte directo en laboratorio, correspondientes al sitio ubicado en Félix Cuevas [1].

Proyecto	Sondeo	Profundidad (m)	Zonificación geotécnica	S.U.C.S.	Ficómetro		Presiómetro Elastometro		
					<i>c</i>	θ	<i>Em</i>	<i>pL</i>	<i>py</i>
					kg/cm ²	°	MPa	MPa	MPa
Félix Cuevas - Insurgentes, CDMX	SM-1A	5.5	Zona II (Transición)	SC	0.75	24.5	6.5	0.71	0.49
		8.5		SC	0.25	37.4	46.1	2.46	2.28
		13.5		SC	0.22	38.4	35.7	2.49	2.03
		16.5		SC	0.10	39.8			
	SM-4A	5.5		CL	0.38	33.6	11.5	1.14	0.68
		8.5		CH	0.29	38.3	6.6	1.12	0.73
		11.5		CL	0.24	44.7	48	2.35	2.03
		15.5		SC	1.23	27.1	73.4	1.55	1.51
	A-1 BUFFAL	10.2		CL	0.32	37.3			
		2.25			0.09	19.5			
		6.25			0.20	30.9			
		10.5			0.10	38.0			
SM-VW	13.5		1.05	25.0					
	16.5		0.61	36.0					

4.2. Correlaciones

Al graficar el esfuerzo cortante de las pruebas de corte directo en laboratorio contra el de las pruebas de ficómetro se obtienen las gráficas de correlación (Figura 11 a 14), donde se comprueba que efectivamente existe una correlación media a alta ($\rho = 0.881$ a 0.998) entre las resistencias del ficómetro y corte directo, tal como sugiere [1]. Debido a que los datos empleados (tanto de ficómetro como de corte directo) aún son muy reducidos, las Figuras 11 a 14 son evidencia gráfica de que existe equivalencia entre los resultados de las pruebas de corte directo y del ficómetro.

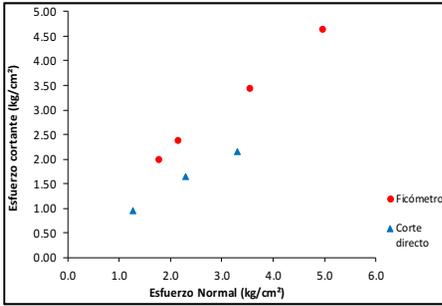


Figura 7. Ley de resistencia Mohr – Coulomb para pruebas realizadas a los 7.0 m de profundidad en el sitio Chalco, Edo de México [4].

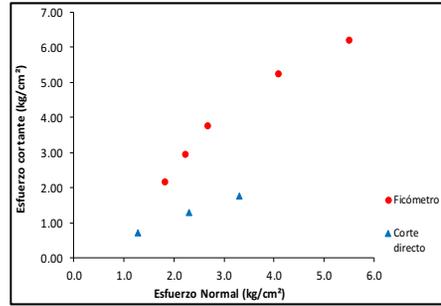


Figura 8. Ley de resistencia Mohr – Coulomb para pruebas realizadas a los 17.0 m de profundidad en el sitio Chalco, Edo de México [4].

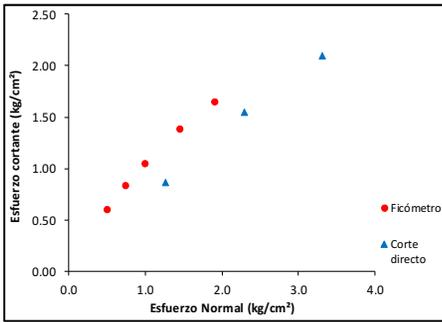


Figura 9. Ley de resistencia Mohr – Coulomb para pruebas realizadas a los 24.0 m de profundidad en el sitio Chalco, Edo de México [4].

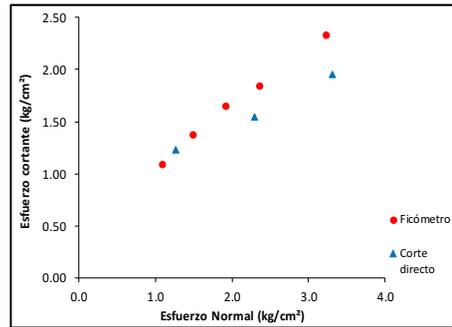


Figura 10. Ley de resistencia Mohr – Coulomb para pruebas realizadas a los 30.5 m de profundidad en el sitio Chalco, Edo de México [4].

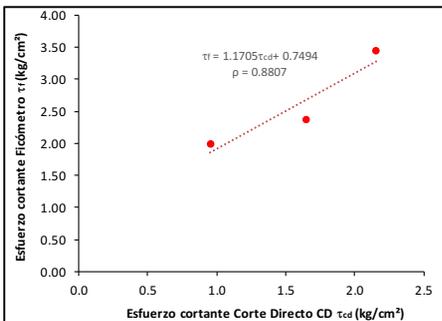


Figura 11. Correlación entre los esfuerzos cortantes obtenidos en las pruebas con ficómetro y de corte directo realizadas a los 7.0 m de profundidad [4].

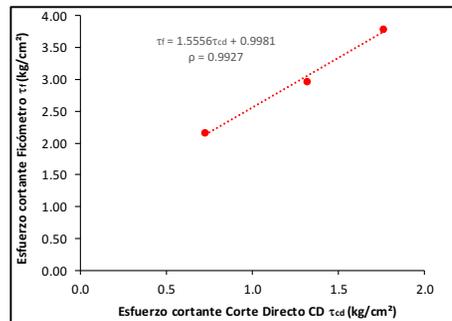


Figura 12. Correlación entre los esfuerzos cortantes obtenidos en las pruebas con ficómetro y de corte directo realizadas a los 17.0 m de profundidad [4].

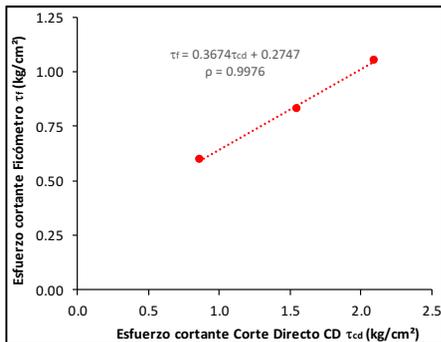


Figura 13. Correlación entre los esfuerzos cortantes obtenidos en las pruebas con ficómetro y de corte directo realizadas a los 24.0 m de profundidad [4].

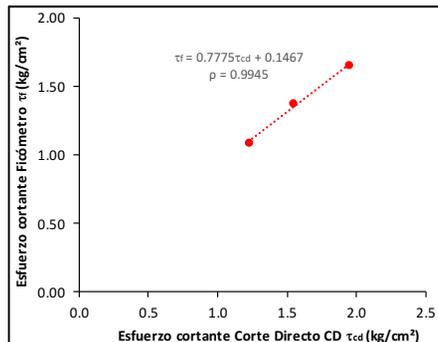


Figura 14. Correlación entre los esfuerzos cortantes obtenidos en las pruebas con ficómetro y de corte directo realizadas a los 30.5 m de profundidad [4].

5. Resultados de la prueba con ficómetro en las Zonas I, II y III de la Ciudad de México

En la Tabla 4 se presentan algunos de los resultados obtenidos recientemente [7] en los suelos duros o densos de las zonas I y II (Lomas y transición, respectivamente) y en la capa dura de la zona III (Llago). Asimismo, esta tabla tiene el propósito de servir y/o proporcionar una guía al ingeniero de diseño o campo que se disponga a realizar pruebas de ficómetro en los suelos y/o estratos duros y densos de la Ciudad de México, además es un punto de comparación con los resultados obtenidos en el sitio de estudio (Zona industrial de Chalco) y con los presentados por [1].

6. Conclusiones

Considerando los resultados obtenidos en el sitio de estudio ubicado en la zona II de transición, dentro de la zona industrial de Chalco, tenemos las siguientes conclusiones:

- Efectivamente, como demostró [1], existe una similitud entre las resistencias al esfuerzo cortante obtenidas con el ficómetro y las pruebas de corte directo, con un coeficiente de correlación medio a alto ($0.88 \leq \rho \leq 0.99$). La correlación presentada da continuidad a los resultados presentados por [1] y permite afinar la calibración de los resultados de las pruebas de laboratorio de corte directo con respecto a una prueba de ficómetro. Sin embargo, el número de puntos experimentales aún es bastante reducido, por lo que es necesario retroalimentar estos resultados.
- Los resultados del ensayo ficométrico obtenidos en el sitio de estudio por [7], así como los presentados por [1], son bastante congruentes con los valores presentados en la Tabla 4.
- Actualmente se está generando un análisis sobre la correlación entre los esfuerzos cortantes de la prueba de ficómetro (τ_{phi}) con el esfuerzo cortante (τ_{pre}) determinado a partir del ensayo presiométrico; aunque de acuerdo con

[1], presentan un coeficiente de correlación muy bajo ($\rho = 0.16$) con respecto a los esfuerzos resistentes de la prueba de ficómetro.

Tabla 4. Resultados de la prueba con ficómetro en los suelos duros o densos de las zonas I y II (Lomas y transición, respectivamente) y en la capa dura de la zona III (Llago) de la Ciudad de México [5].

Proyecto/ Ubicación	Sondeo	Profundidad (m)	Zonificación geotécnica	Clasificación in situ	Ficómetro		Referencias
					c kg/cm ²	Ø °	
Tizayuca, Hgo.	SM-B-4	5.5	Características similares a la Zona I (Lomas)	Limo poco arenoso color café, consistencia muy dura	0.84	31.8	HP Ingeniería, suelos y cimentaciones; Ingenieros Geotecnistas Asociados (2018)
	SM-B-5	18.5		Limo con arena, color café rojizo (Toba)	0.33	28.9	
	SM-B-11	2.0		Limo con arena color café rojizo (Toba), consistencia dura a muy dura	0.29	36.3	
		12.0		Limo arenoso color café rojizo (Toba)	0.11	41.5	
	SM-B-26	5.5		Limo arenoso café claro, empacando gravas	0.11	36	
	SM-B-57	3.0		Limo poco arenoso color café (Toba), consistencia muy dura	0.59	36.3	
		7.0	Limo poco arenoso color café (Toba), consistencia muy dura	0.76	30.4		
Iztapalapa, CDMX	SM-1	37.5	Zona III (Lago)	Arena arcillosa, muy densa, intercalada con arcilla con arena de consistencia dura a muy dura (Capa dura)	1.16	37	HP Ingeniería, suelos y cimentaciones (2018)
Insurgentes sur, CDMX	SM-01	16.0	Zona II (Transición)	Arena arcillosa	0.12	37	HP Ingeniería, suelos y cimentaciones; Ingenieros Geotecnistas Asociados (2018)
Santa Fe, CDMX	SF-1	7.0	Zona I (Lomas)	Arena poco arcillosa, color café, con gravas.	0.16	39.0	HP Ingeniería, suelos y cimentaciones (2018)
		15.0		Arena media a fina	0.17	18.0	
Observatorio, CDMX	SC-14	8.5	Zona I (Lomas)	Relleno compuesto por arcilla y material de escombros	-	30.0	HP Ingeniería, suelos y cimentaciones (2018)
		10.5		Relleno compuesto por arcilla y material de escombros	0.22	38.7	
		14.0		Relleno compuesto por arcilla y material de escombros	0.37	36.2	
		17.5		Relleno compuesto por arcilla y material de escombros	0.17	41.9	
		24.5		Arena limosa color marrón	0.49	40.7	
		28.0		Arena poco limosa color marrón	0.17	38.8	
		31.5		Arena poco limosa color marrón	-	30	
		35.0		Arena poco limosa color marrón	-	32	
		38.5		Arena poco limosa color marrón	-	24	
		3.5		Relleno compuesto por arcilla y material de escombros	0.24	25.9	
SC-20	7.0	Relleno compuesto por arcilla y material de escombros	-	22.5			
	10.5	Relleno compuesto por arcilla y material de escombros	0.25	28.6			
Cuautitlán Izcálli, Edo de Mex.	SM-2	2.0	Zona I (Lomas)	Limo arenoso de media a alta plasticidad, de consistencia dura, color café grisáceo	0.62	30.6	HP Ingeniería, suelos y cimentaciones;
		4.5		Arcilla arenosa de baja plasticidad, de consistencia muy dura, color café y café grisáceo (Toba)	0.30	34.6	DECCSA Ingeniería y construcción S.A. de C.V. (2019)
		8.0			0.65	34.5	
		12.0			0.66	32.9	

Referencias

- [1] González, J., Ibarra, E., Rangel, J., & Ovando. Empleo del ficómetro en los suelos duros y aluviales del Valle de México. XXVI Reunión Nacional de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica, 8 (2012).
- [2] Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Cimentaciones, 2017.
- [3] Philipponnat, G. Interpretation of in situ test. Revue Française de Geotechnique, No. 35 (1986).
- [4] 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.

- [5] HP Ingeniería, suelos y cimentaciones S.A. de C.V. Resumen de ensayos de corte directo in situ con ficómetro en los suelos duros de la Zona I (Lomas) y en los estratos densos o duros de las Zonas II y III de la Ciudad de México. Resumen de pruebas in situ, Exploración, Ciudad de México, 2018.
- [6] Philipponnat, G. Interpretation of in situ test. *Revue Francaise de Geotechnique*, No. 65 (1993).
- [7] Zerhouini, M., Dhoub, A., & Perello, D. In situ shear resistance measurement in special materials using a Phicometer Parametres de calcul geotechnique Megnan (ed) Presses de Tenpc/Icpc. Paris (2002).
- [8] Katzenbach, R., Gutberlet, C., & Wachter, S. Coupled Pressuremeter-Phicometer Analysis for Soil Exploration. Conference in Field Measurements in Geomechanics (FMGM2007). Boston, MA (2007).
- [9] López Velázquez, O., Sosa Contreras, F., & Santoyo Villa, E. Aplicación del Ficómetro en el análisis de la estabilidad de taludes. XXV Reunión Nacional de Mecánica de Suelos (2010)
- [10] 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.