

# LOS SUELOS LACUSTRES DE LA CIUDAD DE MÉXICO<sup>1</sup>

Jorge Abraham Díaz-Rodríguez<sup>2</sup>

Resumen: Este artículo tiene como objetivo caracterizar el depósito natural lacustre de los sedimentos blandos y altamente estructurados de la ciudad de México. Las propiedades mecánicas únicas de los suelos de la ciudad de México se ubican como valores extremos en la mayoría de las cartas de propiedades geotécnicas. Nuestro conocimiento y entendimiento actual sobre el comportamiento de los suelos es puesto a prueba por las inusuales respuestas de los sedimentos lacustres de la ciudad de México. El propósito de este estudio es reunir información sobre los suelos de la ciudad de México para facilitar la interpretación de la evolución del depósito que explique las propiedades de ingeniería de esta peculiar secuencia sedimentaria incluyendo su respuesta dinámica.

**Palabras claves:** Suelos lacustres, Ciudad de México, caracterización, mineralogía, propiedades índice, propiedades mecánicas.

## LACUSTRINE SOILS OF MEXICO CITY

Abstract: This paper documents the main characteristics of the natural, lacustrine deposit of soft and highly structured Mexico City sediments. The unique mechanical properties of Mexico City soils plot as extreme values on most geotechnical engineering charts. Current knowledge and understanding of the behavior of soils is challenged by the unexpected response of unusual soil deposits, such as Mexico City sediments. The purpose of this study is to gather information about Mexico City soils to facilitate the interpretation of the deposit evolution leading to the current microstructure and ensuing engineering properties of this peculiar sedimentary sequence, including its dynamic response.

**Keywords:** Lacustrine soils, Mexico City, characterization, mineralogy, index properties, mechanical properties.

### INTRODUCCIÓN

La ciudad de México es una de las metrópolis más antiguas en el hemisferio occidental. Ocupa una planicie antigua (que fue un lago) rodeada por montañas con más de 16 millones de personas en un área de aproximadamente 1500 kilómetros cuadrados. El subsuelo de la ciudad de México tiene propiedades únicas. El contenido de agua es mayor a 400 %, el índice de plasticidad excede 300% y el índice de compresión  $C_c$  puede llegar a un valor de 10, cuando en la mayoría de los suelos es menor a 1. Lo anterior, ubica a los sedimentos lacustres de la ciudad de México como altamente compresibles, lo que ha dado lugar a intrincados problemas de cimentación para la construcción de edificios elevados y de gran peso en la ciudad de México. El antecedente más completo sobre la caracterización del subsuelo de la ciudad de México se debe a Marsal y Mazari (1959), en tanto que la experiencia más exitosa sobre la ingeniería de cimentaciones en la ciudad de México se debe a Zeevaert (1957a, 1972).

La región en donde se ubica la ciudad de México tiene alta sismicidad, como quedó constatado el 19 de septiembre de 1985, al ocurrir un terremoto frente a la costa del pacífico, con una magnitud 8.1 Ms y una intensidad variable que alcanzó IX en algunas partes de la ciudad. El sismo causó que muchos edificios sufrieran asentamientos excesivos e inclinaciones importantes, incluso el derrumbe total de algunas estructuras. Durante el sismo se perdieron más de 20,000 vidas y los daños se estimaron en más de 5,000 millones de dólares. Existe una fuerte correlación entre la distribución espacial del daño asociado al evento de 1985 y la ubicación de los sedimentos lacustres; por tanto se tiene la certeza de que las características y propiedades del subsuelo de la ciudad de México desempeñaron un papel principal en tan desastroso evento.

Los sedimentos lacustres de origen volcánico de la ciudad de México presentan propiedades índices y mecánicas singulares, que no se ajustan a los patrones de comportamiento de la mayoría de los suelos. Su comportamiento mecánico, tanto estático como dinámico es complejo y a la fecha aún presenta desafíos de interpretación. En general, el ángulo de fricción interna de los suelos disminuye al aumentar el índice de plasticidad, sin embargo el

<sup>1</sup> Artículo recibido el 29 de agosto de 2005, y aceptado el 6 de febrero de 2006.

<sup>2</sup> Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, Apartado Postal 70-165, Ciudad Universitaria, 04510 México D. F., México. E-mail: [jadrdriguez@servidor.unam.mx](mailto:jadrdriguez@servidor.unam.mx)

subsuelo de la ciudad de México presenta un ángulo de fricción de 43° comparable en magnitud con el de las arenas (Lo, 1962; Mesri et al., 1975; Díaz-Rodríguez et al., 1992, 1998).

Los suelos de la ciudad de México son sedimentos heterogéneos, volcánicos, lacustres, con una proporción y variedad de microfósiles (ostrácodos y diatomeas) que adicionan compuestos solubles generados por la alteración de sus exoesqueletos y que forman parte de la microestructura del suelo (Díaz-Rodríguez et al., 1998). Esto influye de tal manera en su comportamiento que los suelos no pueden considerarse dentro de una clasificación simple.

## **UBICACIÓN**

### **Los depósitos lacustres**

Los lagos son cuerpos de agua que se forman en cuencas o depresiones donde el agua se almacena y cuya vida dura unos cuantos miles de años, limitada por las condiciones climáticas y geológicas de su entorno, desaparece a causa de la erosión y la paulatina acumulación del sedimento en el lecho lacustre. Los lagos constituyen el 1% de la actual superficie terrestre. Los procesos de depósito que ocurren en los lagos son influenciados por condiciones climáticas y por una variedad de factores físicos, químicos y biológicos.

Los depósitos lacustres provienen principalmente de los ríos, los sedimentos se depositan a lo largo de la rivera, particularmente en la desembocadura de los ríos, donde se forman abanicos aluviales o deltas, que se extienden al interior del lago. Las gravas y arenas se depositan en las riveras, en tanto que los limos y arcillas alcanzan el centro del lago.

### **Breve historia de la ciudad de México**

En 1324 los aztecas llegaron a la cuenca lacustre de México, se asentaron en una pequeña isla llamada Tenochtitlan “Piedra surgiendo del agua”, localizada en el lago de México- Texcoco. Fundaron una ciudad a la cual llamaron México-Tenochtitlan. Ésta se diseñó con una apariencia cuadrada, de aproximadamente 3.2 km de lado, formada de avenidas y canales ordenados alrededor de un centro ceremonial integrado por pirámides, así como de templos altos y palacios.

Los aztecas transformaron el lago en chinampas (manzanas de tierra muy fértil), construidas con un marco de troncos atados con cuerdas que delimitaban el perímetro (tablestacas), el interior se rellenó con tierra y fragmentos de roca, con el objeto de crear una isla artificial, donde se cultivaron vegetales y flores.

La isla capital del imperio azteca se comunicaba con la rivera del lago mediante cuatro calzadas hechas con pilotes de madera, roca y tierra: (1) Tepeyac, (2) Tenayuca, (3) Tlacopan y (4) Iztapalapa. Las calzadas contaban con un sistema de puentes de madera. Mediante dos acueductos se proporcionaba agua fresca y potable al centro ceremonial. La ciudad estaba protegida de inundaciones mediante un sistema de diques. El principal fue el gran dique de Nezahualcóyotl, construido en 1449, el cual tenía aproximadamente 16 km de longitud, 7 m de ancho y un trazo que unía Iztapalapa con Atzacolco. Este dique fue indudablemente la obra más importante de la ingeniería hidráulica azteca.

Después del sitio de 1521, los españoles conquistaron México-Tenochtitlan, arrasaron los edificios hasta sus cimientos y fundaron sobre sus ruinas la ciudad de México. Los españoles reconstruyeron la ciudad, con edificios estilo español en lugar de los templos y palacios aztecas. La ciudad fue creciendo, muchos de los canales prehispánicos se rellenaron con materiales gruesos y finos. En 1593, el primer Virrey Luis de Velasco ordenó la construcción de un área recreacional, mediante el relleno de un pequeña ciénega, lo que dio origen al Parque Alameda.

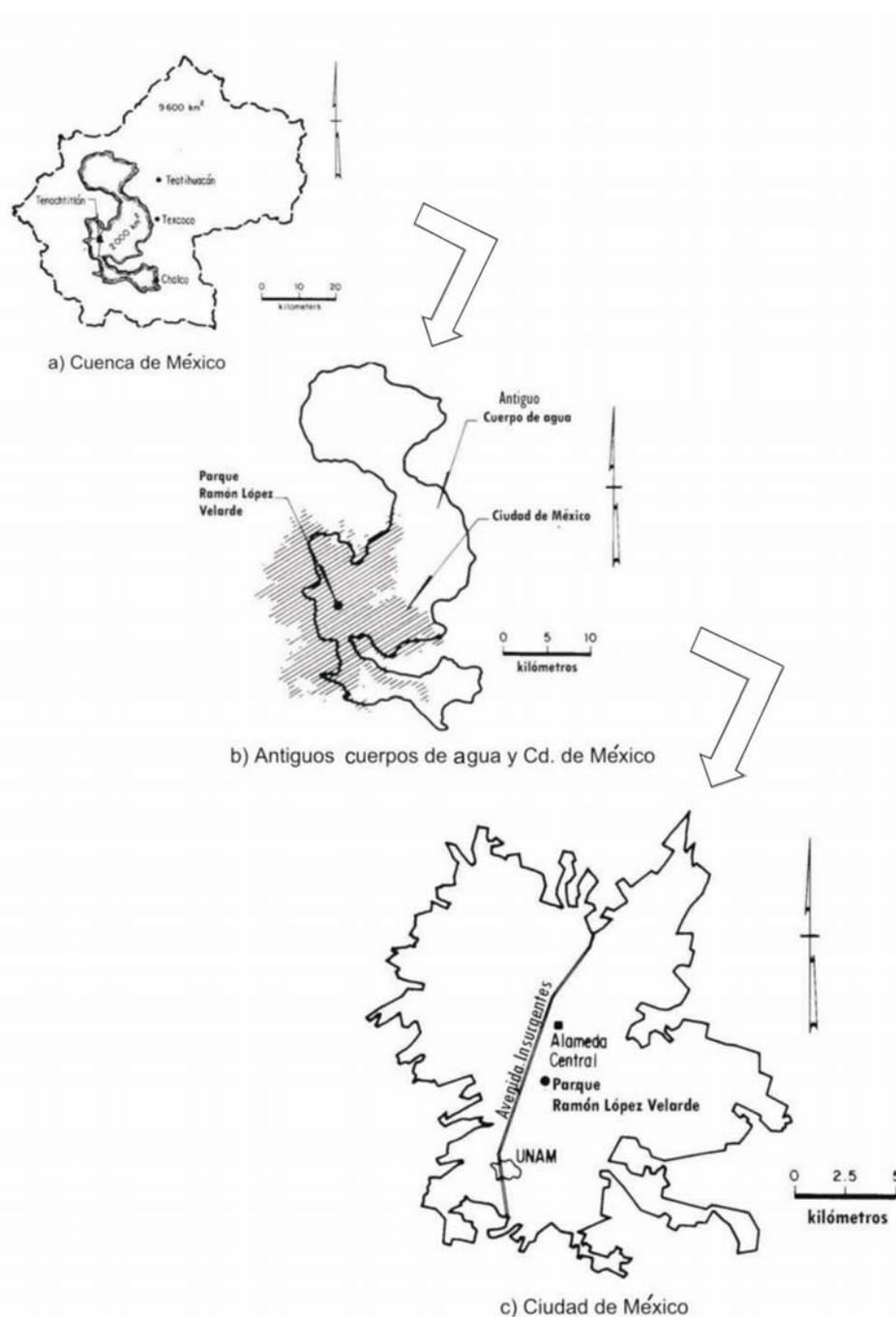
La ciudad de México tuvo un lento crecimiento hasta la década de los años 40 cuando se inició la construcción de edificios altos, entre los cuales destaca la Torre Latinoamericana basada en un sistema novedoso de cimentación compensada con pilotes de fricción ( Zeevaert 1957a, b).

## **FORMACIÓN**

### **Introducción**

La ciudad de México está situada en una planicie lacustre en la cuenca de México. Dicha cuenca ocupa un área de aproximadamente 9,600 km<sup>2</sup> (Figura 1) situada a 2,250 m sobre el nivel del mar, en el extremo sur de la Mesa Central. La cuenca de México tiene un contorno irregular, alargado de norte a sur, de aproximadamente 125 km de largo y 75 km de ancho. Está rodeada por altas montañas, limitada al norte por las sierras de Pachuca, Tepotzotlan, Guadalupe, Patlachique y Tepozán. Al sur está limitada por la sierra de Chichinautzin, al este por la sierra Nevada,

con sus picos Ixtacihuatl y Popocatepetl, con una altura media de 5,300 m. Al oeste la cuenca está limitada por la sierra de Monte Alto y de las Cruces (Figura. 2).



**Figura 1: Cuenca de México, antiguos cuerpos de agua y ciudad de México.**

La cuenca de México permaneció abierta (exorreica) hasta hace 700,000 años, cuando una gran actividad volcánica formó una enorme cortina natural: la sierra de Chichinautzin, que cerró la cuenca (Mooser, 1963) y obstruyó el drenaje que iba al río Balsas. Por esta razón se almacenó agua y dio origen a varios lagos. Los ríos que descendían de la sierras circundantes depositaron en potentes conos de deyección, materiales muy diversos al confluir a dichos lagos. La parte central de la cuenca se fue llenando con acarreo limo-arenoso, limo-arcilloso y emisiones de cenizas y pómez provenientes de los volcanes del sur. Al pie de las sierras y por el brusco cambio de pendiente de los ríos, se localizan grandes depósitos aluviales de composición muy variable y estratificación cruzada o lenticular, evidencia de una dinámica erosiva debido a periodos de lluvia intensa.



- Desarrollo de un conjunto de fallas NE-SW, a través del piso de la cuenca, bajo los depósitos lacustres (De Cserna et al., 1988; Marín-Córdova y Aguayo-Camargo, 1989).

## Mineralogía

Los suelos lacustres se forman mediante procesos de erosión y transporte, seguido de depositación y consolidación bajo su propio peso. El comportamiento de los suelos lacustres depende principalmente de dos factores: de su composición y de su estructura.

El término composición se refiere a la naturaleza de las partículas mismas (tamaño, forma y mineralogía). La mineralogía controla el tamaño, forma y características de las partículas de suelo. Estas características y la interacción con la fase líquida determinan la plasticidad, compresibilidad, resistencia y permeabilidad. Por lo tanto, la mineralogía es fundamental en la interpretación y comprensión de las propiedades de los suelos. Sin embargo, los resultados de los estudios mineralógicos a menudo varían entre los investigadores, debido a variaciones en los métodos de análisis, preparación de las muestras, entre otros factores. Un factor muy importante a considerar es que no se pueden hacer generalizaciones a partir de una muestra o una profundidad en particular, ya que puede dar lugar a contradicciones.

Los componentes mineralógicos del subsuelo de la ciudad de México se han determinado en varios trabajos de investigación (Zeevaert, 1949; Marsal y Mazari, 1959; Lo, 1962; Mesri, Rokhsar y Bohor, 1975; Gómez-Looh, 1987; Peralta y Fabi, 1989; Díaz-Rodríguez, et al. 1998), de los cuales se puede concluir que el subsuelo de la ciudad de México es un material singular donde el orden de abundancia de los minerales varía erráticamente, y resulta aventurado tratar de generalizar la proporción y variedad de los componentes con alguna precisión.

Los sedimentos lacustres de la cuenca de México se pueden clasificar de acuerdo con su origen en tres grupos (Díaz-Rodríguez et al., 1998):

- Componente alóctona, consiste de minerales detríticos, tales como la plagioclasa, hornblenda, hiperstena, cristobalita, vidrio volcánico, minerales de arcilla, ceniza volcánica y materia orgánica. Todos estos componentes son resultado de la erosión de la cuenca.
- Componente autóctona, incluye precipitado de calcita bioquímica (valvas de ostrácodos y conchas de gastrópodos), sílice biogénica (frústulas de diatomeas), olitos, y materia orgánica.
- Componente diagenética, incluye componentes que se formaron de la alteración de vidrio volcánico o de la inestabilidad de otros componentes primarios después de su depositación (sílice, ópalo y minerales ferromagnesianos). Se identifican ópalo-CT, cristobalita, goetita, calcita y pirita.

Díaz-Rodríguez et al. (1998) realizaron un estudio reciente en una columna continua de suelo hasta 40 m de profundidad, del parque Ramón López Velarde (19.40°N, 99.15°W), en la zona lacustre de la ciudad de México. Las técnicas utilizadas fueron: difracción de rayos X (DRX), microscopio electrónico de barrido (MEB) con microanalizador elemental por dispersión de energías, y espectroscopía de infrarrojo (IR), las cuales fueron complementadas con las determinaciones físicas y químicas de: contenido de agua, textura; pH; porcentaje de materia orgánica (MO); determinación de hidróxidos y óxidos libres; y capacidad de intercambio catiónico total (CIC).

El estudio por DRX se realizó tanto en muestras totales como en las fracciones arena, limo y arcilla. Las muestras totales están constituidas principalmente por feldespatos (Fd), cristobalita (Cr), calcita (Ca), halloysita-7Å (Ha-7Å) y ferrohornblenda (Hn). En la fracción arena predominan Fd, Cr y Ha-7Å; en la fracción limo, Cr, Fd y Ha-7Å; y en la fracción de tamaño arcilla, Ha-7Å, Cr y Fd.

En las muestras estudiadas se identificaron cuatro polimorfos de SiO<sub>2</sub>: uno no cristalino, ópalo, que constituye los restos de las frústulas de diatomeas desarrolladas en el antiguo Lago de México; otro de origen diagenético, cuyo proceso de evolución lo coloca en la etapa ópalo-CT; un tercero de origen detrítico, criptocristalino, cuyo patrón de difracción corresponde a alfa-cristobalita; y un cuarto polimorfo que es cuarzo (Q).

Con base en la alta retención de agua, contenido de MO y CIC, que mostraron algunas capas del subsuelo, así como la reacción positiva a la prueba de Fieldes y Perrot (1966), se infirió la presencia de materiales no-cristalinos. Muestras con escasos contenidos de arcilla y bajas concentraciones de MO dieron elevados valores de CIC, más de 100 miliequivalentes/100g, propiedad que indica la presencia de dichos materiales no-cristalinos. La Figura. 3 muestra parte de los perfiles de datos mineralógicos obtenidos de la zona lacustre de la ciudad de México.

Por tanto, los suelos de la ciudad de México son mezclas complejas de minerales cristalinos y no cristalinos que desafían una nomenclatura sencilla; son arcillas heterogéneas, volcánicas, lacustres, con una proporción y variedad de microorganismos que adicionan compuestos solubles, generados por la alteración de sus exoesqueletos y que forman parte de la estructura del suelo, así como materia orgánica residual.

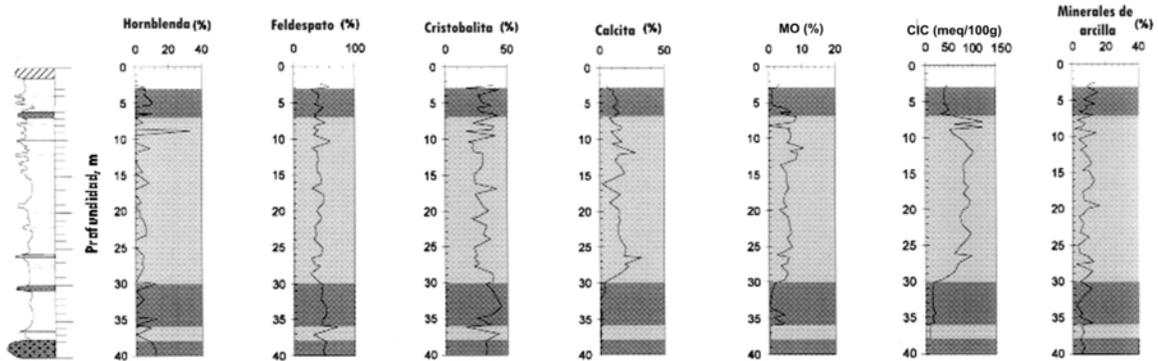


Figura 3: Perfiles de datos mineralógicos de la zona lacustre de la ciudad de México.

## ESTRATIGRAFÍA

### Antecedentes de la estratigrafía en la Cuenca de México

La Tabla 1 muestra los principales depósitos lacustres de la cuenca de México. Es una síntesis de datos de Bryan (1948), Zeevaert (1953) y Foreman (1955).

Tabla 1: Estratigrafía general de la ciudad de México

Formación	Profundidad (m)	Espesor (m)	w (%)	Litología
Azteca	N/D	N/D	N/D	N/D
Teotihuacan	N/D	N/D	N/D	Relleno
Zacatenco	N/D	N/D	N/D	N/D
Totalzingo	5 - 6	1	50 - 100	Ceniza alterada y arena
Barrilaco	6 - 7	1	100	Arcilla y arena con pómez y caliche.
Becerra	7 - 8.3	1.3	60 - 100	Arena, arcilla y arena pumítica
Tacubaya	8.3 - 33	24.7	200-500	Limo arcilloso, ceniza alterada e inalterada, microfósiles
Tarango	33 - 80	47	30 - 300	Depósitos aluviales y lacustres de grava, arena y limo arcillosos

Mediante radiocarbón se fechó entre  $11,033 \pm 500$  y 16,000 años, la edad de la Formación Becerra (Libby, 1955, p 129). En el estudio y definición de la estratigrafía de la ciudad de México destacan los trabajos de tres investigadores (Zeevaert, 1953 y Marsal y Mazari, 1959).

### Zonificación estratigráfica de la ciudad de México

Basados en una gran cantidad de sondeos realizados a diferentes profundidades, Marsal y Mazari (1959) definieron tres zonas en la ciudad de México (Figura 4): la zona del Lago, la zona de Transición y la zona de Lomas. La zona del lago (zona lacustre) se describirá en detalle en este artículo, la zona de Transición es material predominantemente arenoso, y la zona de Lomas (zona firme) corresponde a tobas volcánicas y rocas intemperizadas.

### Estudios recientes

La Figura 5 presenta la estratigrafía resultado de un estudio reciente (Díaz-Rodríguez et al., 1998). El perfil que se presenta puede considerarse típico de la zona lacustre de la ciudad de México. Se identifican seis zonas, las cuales se describen en orden ascendente de 40 m de profundidad a la superficie del terreno.

- Zona 1: Arenas con grava (40-38 m).



- Zona 3: limo arcillosos con arena (36 - 30 m).

Los minerales predominantes en esta zona son cristobalita y feldespato. La hornblenda es escasa, y la calcita empieza a aparecer hacia la parte superior de la zona.

En la parte inferior de la zona, se infiere la existencia de dos paleosuelos, debido a la presencia de raíces, lo cual se refleja en los valores de MO. Granulométricamente, esta zona se clasifica como limo arcilloso con poca arena (excepcionalmente el contenido de arena alcanza un 50%). El valor del  $q_c$  varía de 15 a 22 kg/cm<sup>2</sup> y una  $V_s$  de 75 m/s.; el pH varía entre 4 y 6.2. Esta zona se interpreta como una transición entre condiciones de depósito subaéreas y condiciones incipientes de depósito lacustre.

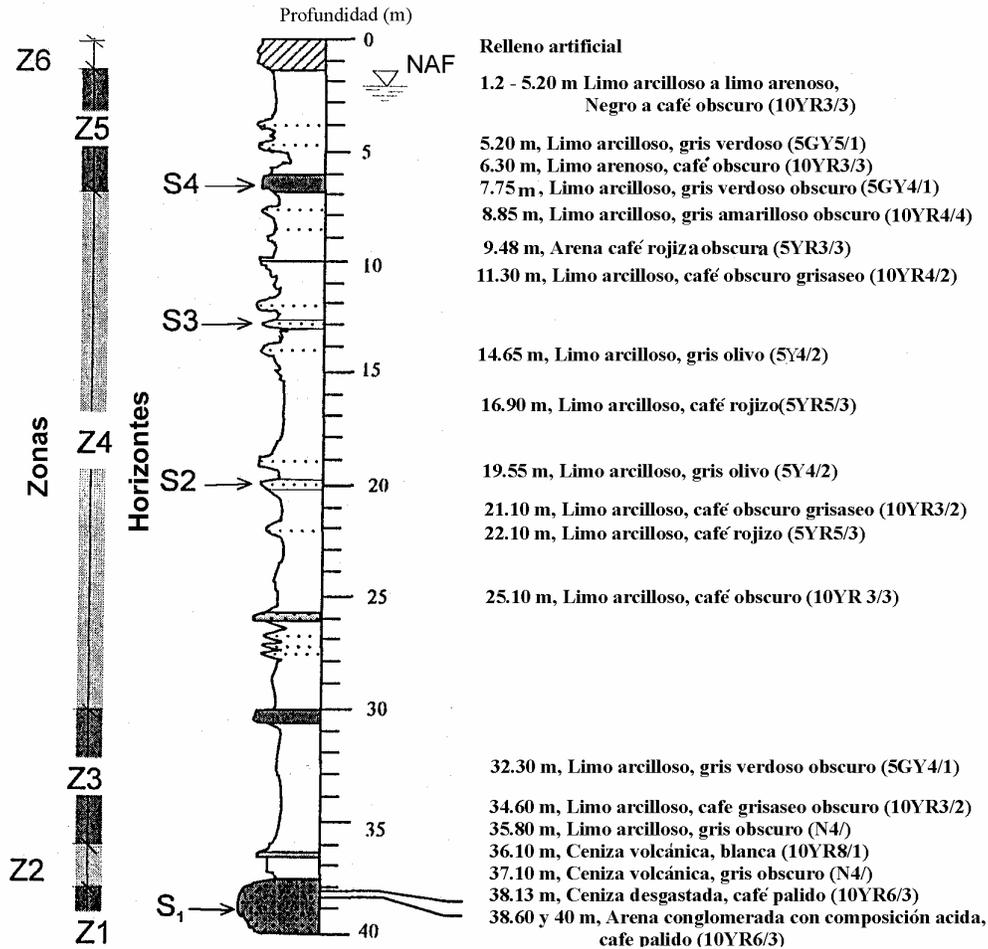


Figura 5: Columna estratigráfica del Parque Ramón López Velarde en la ciudad de México.

- Zona 4: limo arcillosos o arcilla limosas (30-7 m).

Esta es la zona más importante desde el punto de vista de la geotecnia, principalmente debido a su alta compresibilidad ( $m_v = 0.1$  kg/cm<sup>2</sup>). La calcita alcanza su máximo valor (32%) a la profundidad de 27 m. Granulométricamente esta zona se clasifica como limo arcilloso o arcilla limosa, con poca arena. Se tienen varias lentes de arena interestratificadas, los horizontes S2 y S3 son los más importantes. El contenido de agua se incrementa con el decrecimiento de la profundidad, con un valor de aproximadamente 220% a 30 m y alcanzado un máximo de 420% a 7 m. Los promedios de límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad son 338, 80 y 308%, respectivamente. El  $q_c$  presenta un comportamiento aproximadamente lineal con la profundidad, y la  $V_s$  es casi constante con la profundidad, con un promedio de 81 m/s.

Además de la esmectita, se identificó un mineral multicapa (MC), el cual fue caracterizado como clorita-esmectita. La presencia de minerales MC, identificados por DRX, implica un ambiente rico en montmorillonita en el cual la neoformación y asociación con capas de clorita puede ser un producto de la alteración de los minerales ferromagnesianos (Johnson 1964). La zona 4 representa un lapso en el cual las condiciones lacustres se establecieron claramente, esto apoyado por la evidente proliferación de diatomeas y ostrácodos en los sedimentos.

- Zona 5: limo arcilloso con arena (7-3 m).

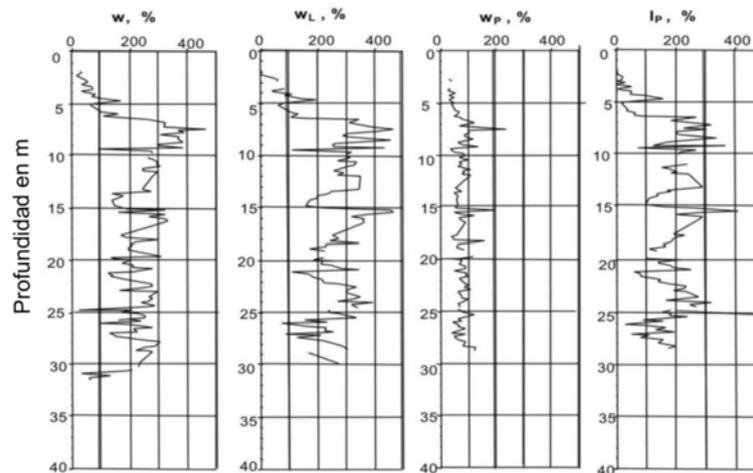
En la base de esta zona se encuentra un horizonte de arena S4, el cual presenta el mayor contenido de arena (85%) de todo el perfil. Los minerales identificados son horblenda, feldespato y cristobalita en concentraciones similares a la parte superior de la zona 4. La calcita y MO muestra un decrecimiento, en tanto que los minerales de arcilla incrementan su concentración de 1 a 14%. El CIC decrece logrando un valor estable entre 40 y 50 mequiv/100 g. La granulometría de esta zona corresponde a una arena, con variaciones a limo arenoso y limo arcilloso. El valor del  $q_c$  es de aproximadamente  $24 \text{ kg/cm}^2$ , el contenido de agua exhibe una tendencia a decrecer.

- Zona 6: relleno artificial (3-0 m).

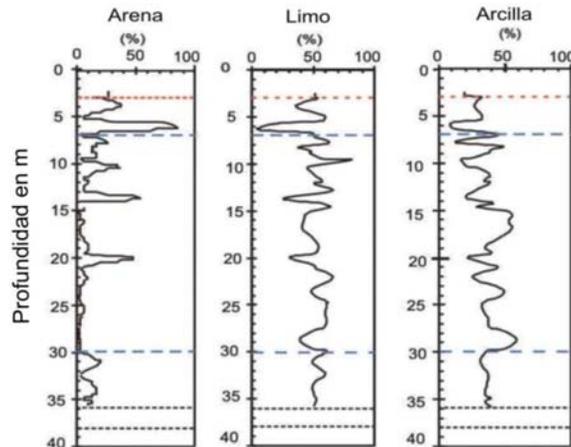
Esta zona 6 es un relleno artificial, producto de la actividad humana.

## PROPIEDADES ÍNDICE

El contenido de agua y los límites de Atterberg se muestran en la Figura 6a. En la zona 4 (30-7 m) se aprecia una bien definida variación del contenido de agua con la profundidad, también se puede apreciar una variación similar del límite líquido. El límite plástico se mantiene aproximadamente constante.



(a) contenido de agua y límites de consistencia.

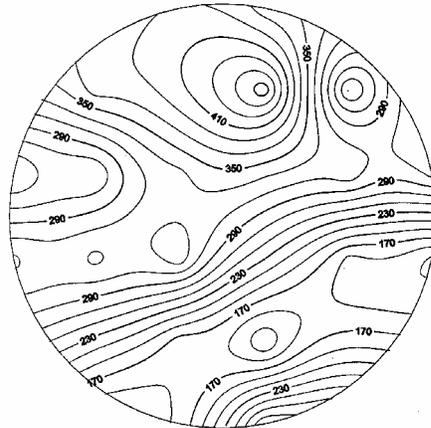


(b) Composición granulométrica.

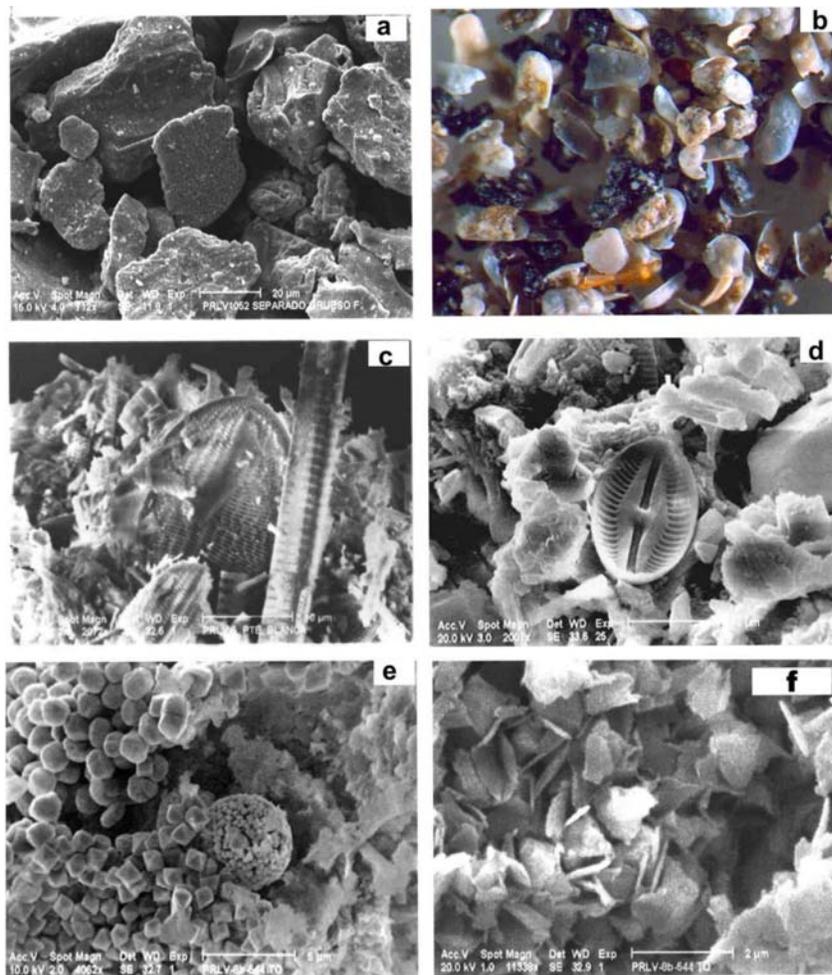
**Figura 6: Perfiles de propiedades índice del Parque Ramón López Velarde**

El perfil de la composición granulométrica se muestra en la Figura 6b. El porcentaje de tamaño arena varía entre 2 y 10%, excepto en algunas capas intercaladas en el perfil, donde alcanza valores hasta del 85%. El porcentaje de tamaño del limo varía entre 40 y 70%, en tanto que el porcentaje de tamaño arcilla varía entre 20 y 55%. En general, puede concluirse que la composición granulométrica se caracteriza por ser un suelo limo arcilloso o arcillo limoso con lentes de arena que varían en espesor desde pocos milímetros hasta aproximadamente 20 cm de espesor.

El contenido de agua presenta variaciones locales importantes en planos horizontales. La Figura 7 muestra los resultados obtenidos en una pastilla de suelo de 12.5 cm de diámetro y 1 cm de espesor que se dividió en 32 partes.



**Figura 7: Variabilidad horizontal del contenido de agua (%) en una pastilla de 12.5 cm de diámetro del subsuelo de la ciudad de México.**



**Figura 8: Fotomicrografía que ilustra la forma de las partículas del subsuelo de la ciudad de México: (a) Partículas de limo, (b) Valvas de ostrácodos, (c) y (d) Frústulas de diatomeas, (e) Framboides de pirita, (f) Dominios de partículas con estructura floculada.**

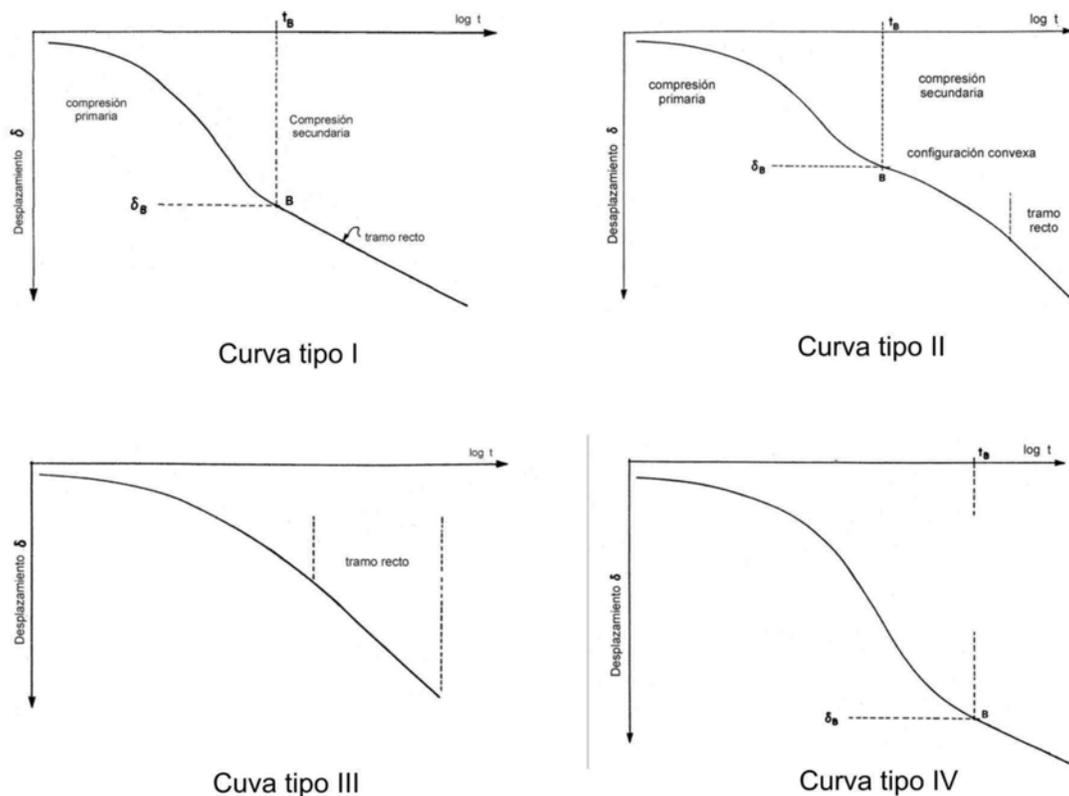
Con relación a la forma de las partículas, en la Figura 8 se muestran partículas desde el tamaño arena hasta el tamaño arcilla. Se puede apreciar un gran número de partículas angulosas, muchas de ellas son partículas de vidrio y fragmentos de diatomeas. También se pueden observar valvas de ostrácodos, desarticuladas y a veces rotas. Algunos

fragmentos de diatomeas muestran efectos de disolución atribuido a la alcalinidad del agua de poro. Se pueden observar cristales de pirita en forma de framboides, y la estructura floculada de las partículas de arcilla.

Se tienen pocas determinaciones de superficie específica ( $S_s$ ) de los sedimentos lacustres de la ciudad de México, Díaz-Rodríguez y Santamarina (2001) midieron un valor de  $S_s = 39.8 \text{ m}^2/\text{g}$  en condiciones secas mediante adsorción de  $\text{N}_2$  y un valor de  $S_s = 187 \text{ m}^2/\text{g}$  en condiciones húmedas mediante azul de metileno. Al respecto se pueden hacer las siguientes observaciones: (1) La diferencia entre la mediciones en condiciones secas y húmedas, confirma la presencia de minerales expansivos; (2) debido a que la superficie específica se determina en la fracción fina, la cual es de aproximadamente el 30% del total del suelo, se estima que la superficie específica de la fracción fina es aproximadamente de  $540 \text{ m}^2/\text{g}$ , este valor está en el rango de los minerales expansivos; y (3) los altos límites líquidos de los suelos de la ciudad de México reflejan su alta superficie específica de la fracción fina.

## COMPORTAMIENTO MECÁNICO

El comportamiento estático de los sedimentos lacustres de la ciudad de México puede establecerse como sigue: cuando se somete a esfuerzos inferiores al esfuerzo de fluencia,  $\sigma'_y$ , el esqueleto del suelo tiene un comportamiento de tipo elástico (Díaz-Rodríguez et al., 1992), cuando se supera dicho esfuerzo, las fuerzas entre partículas se rompen y el suelo muestra una excesiva deformación y cambios de volumen con predominante consolidación secundaria.



**Figura 9: Configuraciones típicas de consolidación de la ciudad de México (adoptado de Zeevaert, 1986)**

### Compresibilidad

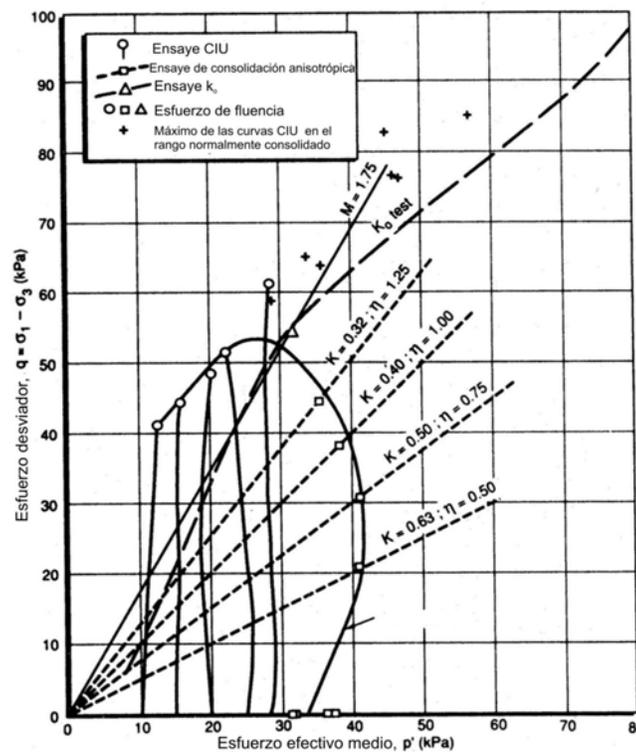
Después de exhaustivos estudios de los suelos de la ciudad de México, Zeevaert (1986) desarrolló una teoría sobre consolidación secundaria o viscosidad intergranular para suelos altamente compresibles. Propuso cuatro configuraciones típicas para las curvas de consolidación de la ciudad de México (Figura 9). La curva tipo I corresponde a esfuerzos inferiores al de fluencia ( $\sigma'_y$ ); la tipo II corresponde a esfuerzos en la vecindad de  $\sigma'_y$  pero inferiores a éste, la compresión secundaria empieza a hacerse evidente y presenta una configuración convexa después de terminada la consolidación secundaria; la tipo III corresponde al esfuerzo de fluencia, la curva no presenta ningún quiebre; en tanto que la tipo IV corresponde a esfuerzos mayores que ( $\sigma'_y$ ), en la que se forma una nueva estructura provocada por el alto nivel de esfuerzos.

La diferencia en la compresibilidad entre los estados inalterados y remoldeados varía considerablemente en los suelos de la ciudad de México, la magnitud de la diferencia es una evidencia del efecto estructural. Mesri et al. (1975) efectuaron una comparación entre los estados inalterado, sedimentado y remoldeado, al respecto. Las curvas de compresibilidad entre los estados sedimentados y remoldeados prácticamente son iguales y se juntan cerca del esfuerzo de fluencia, lo que parece indicar que la intensa dispersión mecánica en agua destilada tiene poco efecto sobre las partículas de los suelos de la ciudad de México.

### Curva de fluencia

La fluencia es un concepto muy importante del comportamiento esfuerzo-deformación de los suelos ligeramente preconsolidados. El esfuerzo de fluencia,  $\sigma'_y$ , divide la curva de compresibilidad en dos dominios: para esfuerzos inferiores al  $\sigma'_y$ , el comportamiento del suelo es elástico debido a que el suelo está en el dominio estructurado, al aumentar los esfuerzos y superar el  $\sigma'_y$ , las fuerzas entre partículas se rompen y el suelo muestra una excesiva deformación y cambios de volumen con predominante consolidación secundaria, el suelo está en el dominio desestructurado o normalmente consolidado (NC).

Con base en el concepto de fluencia, originalmente desarrollado por Roscoe et al. (1958), se realizó un conjunto de ensayos triaxiales para definir la curva de fluencia del subsuelo de la ciudad de México (Díaz-Rodríguez et al. 1992). Se realizaron ocho ensayos de consolidación anisotrópica, cada incremento de esfuerzos duró 24 h, y siguió una trayectoria de esfuerzos definida por la relación de esfuerzos  $K = \sigma'_3/\sigma'_1$  de 1 a 0.3 ( $\eta = q/p'$  de 0 a 1.25), cuando se alcanzó la fluencia y el suelo se ubicó en el rango normalmente consolidado, la consolidación por incrementos se detuvo y los especímenes se sometieron a la falla en compresión no drenada, a una velocidad de deformación constante de 0.5%/h. Adicionalmente seis especímenes se consolidaron isotrópicamente a esfuerzos efectivos que variaron entre 10 y 41.5 kPa. Se realizó un ensayo  $K_0$  a una velocidad de deformación de 0.13%/h.



**Figura 10: Trayectorias de esfuerzos y curvas de fluencia del suelo de la ciudad de México.**

La Figura 10 muestra las trayectorias de esfuerzos y la curva de fluencia obtenida por Díaz-Rodríguez et al. (1992). Vale la pena mencionar que la pendiente  $\lambda' = \Delta e / \Delta \log p'$  en el dominio NC se incrementa cuando K decrece (e.g.  $\lambda' = 7.0$  para  $K_0 = 1.0$  y  $\lambda' = 9.4$  para  $K_0 = 0.4$ ). Esto parece ser una característica de suelos naturales blandos (Tavenas y Leroueil, 1977; Graham et al., 1983). Las curvas típicas esfuerzo desviador vs deformación axial y presión de poro vs deformación axial, de ensayos CIU en el dominio estructurado muestran que el esfuerzo desviador máximo se alcanza para aproximadamente 2% de deformación, las trayectorias de esfuerzos seguidas por estos ensayos se muestran en la Figura. 10, se puede apreciar que las trayectorias seguidas tienen  $p'$  casi constante, lo cual podría ser una confirmación del comportamiento elástico de los suelos ensayados. En el dominio

desestructurado, el esfuerzo desviador máximo se alcanzó para 4 a 5% de deformación, aproximadamente, el doble de la deformación en el dominio estructurado.

La Figura 11 muestra la variación de los esfuerzos  $\sigma'_1$  y  $\sigma'_3$  durante un ensayo  $K_0$ . Hasta el punto de fluencia Y ( $p' = 33$  kPa) el suelo se encuentra en el dominio estructurado, con una relación de incrementos de esfuerzo  $\Delta\sigma'_3/\Delta\sigma'_1 = 0.11$ , a partir del punto Y empieza el proceso de desestructuración hasta alcanzar el dominio desestructurado o NC, con un valor estacionario  $\Delta\sigma'_3/\Delta\sigma'_1 = 0.31$ . El valor se confirmó con los resultados de la relación del incremento de la deformación axial ( $\Delta\varepsilon_a$ ) entre el incremento de la deformación volumétrica ( $\Delta\varepsilon_v$ ) vs la relación de esfuerzos de consolidación,  $\sigma'_3/\sigma'_1$ , observada en el dominio NC. La condición de diámetro constante ( $\Delta\varepsilon_a/\Delta\varepsilon_v = 1.0$ ) se alcanza para la relación de esfuerzos  $\sigma'_3/\sigma'_1 = 0.30$ , por tanto,  $K_{0,NC} = 0.30$ .

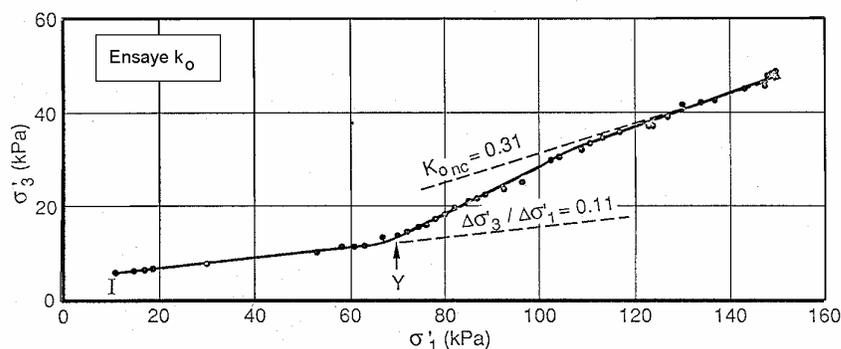


Figura 11: Trayectoria de esfuerzos durante un ensayo  $k_0$ .

En la Figura. 10, se pueden observar todas las trayectorias de esfuerzo de los ensayos descritos anteriormente, también se indican con cruces la condición de falla de los especímenes. Los resultados sugieren un valor de  $M$  de 1.75 o un ángulo de fricción  $\phi'_{NC} = 43^\circ$ . Este valor resulta sorprendentemente alto para un suelo arcilloso, sin embargo valores similares se han obtenido para el subsuelo de la ciudad de México: Marsal y Salazar-Resines (1960) y Lo (1962) midieron  $43^\circ$  y  $47^\circ$  respectivamente.

## Propiedades dinámicas

### Compresibilidad

Díaz-Rodríguez y Leyte-Guerrero (1989) investigaron el efecto de la aplicación de carga cíclica a muestras inalteradas de los suelos típicos de la ciudad de México, confinadas mediante un anillo metálico flotante. Los resultados sugieren una tendencia de reducción del esfuerzo de fluencia  $\sigma'_Y$ . Este efecto se puede deber a la reorientación de las partículas del suelo, equivalente a un remoldeo parcial provocado por la aplicación de esfuerzo cíclico. En la Figura 12a, se presenta la evolución de la deformación vertical con el tiempo, tanto durante como posterior a la aplicación de carga. La amplitud del esfuerzo estático se mantuvo constante e igual a  $0.2 \text{ kg/cm}^2$  (inferior al esfuerzo de fluencia), en tanto que las amplitudes del esfuerzo cíclico variaron entre  $0.117$  a  $0.683 \text{ kg/cm}^2$ . Se puede apreciar que a pesar de que las amplitudes del esfuerzo cíclico fueron grandes ( $0.683 \text{ kg/cm}^2$ ), el suelo presentó una recuperación elástica muy importante.

La Figura 12b presenta una comparación entre dos muestras consolidadas a distinto esfuerzo estático ( $0.2$  y  $0.5 \text{ kg/cm}^2$ ) y amplitudes de esfuerzo cíclico de  $0.24$  y  $0.19 \text{ kg/cm}^2$  respectivamente. Se puede apreciar el efecto de la carga estática: en el caso de menor esfuerzo estático, la recuperación de las deformaciones es grande; en cambio, en el caso de esfuerzo estático mayor ( $0.5 \text{ kg/cm}^2$ ) no se tuvo recuperación. Lo anterior confirma el efecto del esfuerzo de fluencia  $\sigma'_Y$  en el comportamiento cíclico del subsuelo de la ciudad de México.

### Resistencia al cortante

La Figura. 13 muestra el esquema del programa de ensayos que permitió conocer un parámetro muy importante sobre el comportamiento dinámico del subsuelo de la ciudad de México (Díaz-Rodríguez, 1989a) denominado *relación umbral de esfuerzos cíclicos*,  $R_D (= q_c/q_{sf})$ . Este parámetro define dos patrones de comportamiento dinámico del subsuelo de la ciudad de México: a) para  $R < R_D$  se presenta poco deterioro de la estructura de suelo con los lazos de histéresis cerrados, y b) para  $R > R_D$  se presenta un gran deterioro de la estructura del suelo con lazos de histéresis abiertos, y por tanto una marcada reducción de la resistencia al esfuerzo cortante.

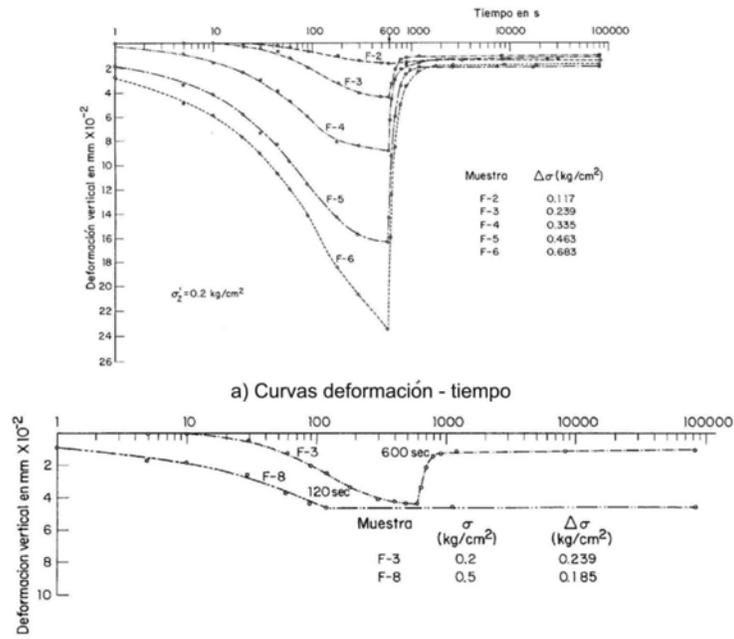


Figura 12: Resultados del efecto de carga cíclica en muestras confinadas lateralmente.

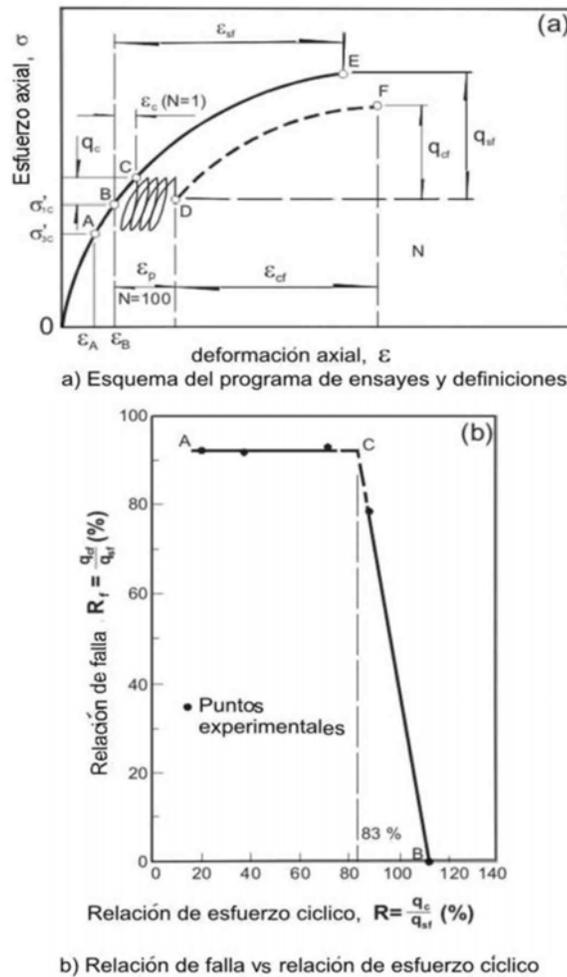


Figura 13: Determinación de la relación umbral de esfuerzos cíclicos.

### Módulo de rigidez y amortiguamiento

La evolución del módulo de rigidez,  $G$  ( $= \tau/\gamma$ ), durante el proceso de consolidación, muestra que para pequeñas deformaciones ( $8 \times 10^{-5}$  a  $2 \times 10^{-4}$ ) se incrementa en forma lineal con el logaritmo del tiempo de consolidación, sin presentarse ningún quiebre que permita distinguir la terminación de la consolidación primaria e inicio de la secundaria. Este resultado sugiere que los efectos del tiempo deben tomarse en cuenta en la selección del módulo  $G$  a partir de resultados de laboratorio.

La evolución de la relación de amortiguamiento,  $\zeta$  ( $= c/c_c$ ), durante el proceso de consolidación mostró que el amortiguamiento decrece en forma lineal con el logaritmo del tiempo de consolidación sin presentarse ningún quiebre al completarse la consolidación primaria. Lo anterior confirma que los efectos del tiempo deben ser tomados en cuenta al medir el amortiguamiento,  $\zeta$ , a partir de ensayos de laboratorio.

La curva de reducción del módulo  $G$  con la amplitud de deformación,  $\gamma$ , normalizada respecto al módulo  $G_{\text{máx}}$  para pequeñas deformaciones y la variación del amortiguamiento se presenta en la Figura 14. En dicha figura se observa que el módulo  $G$  es aproximadamente constante para deformaciones hasta de 0.1%, lo cual implica un comportamiento lineal bastante grande en comparación con los resultados publicados en la literatura especializada para otros suelos arcillosos (Dobry y Vucetic, 1987).

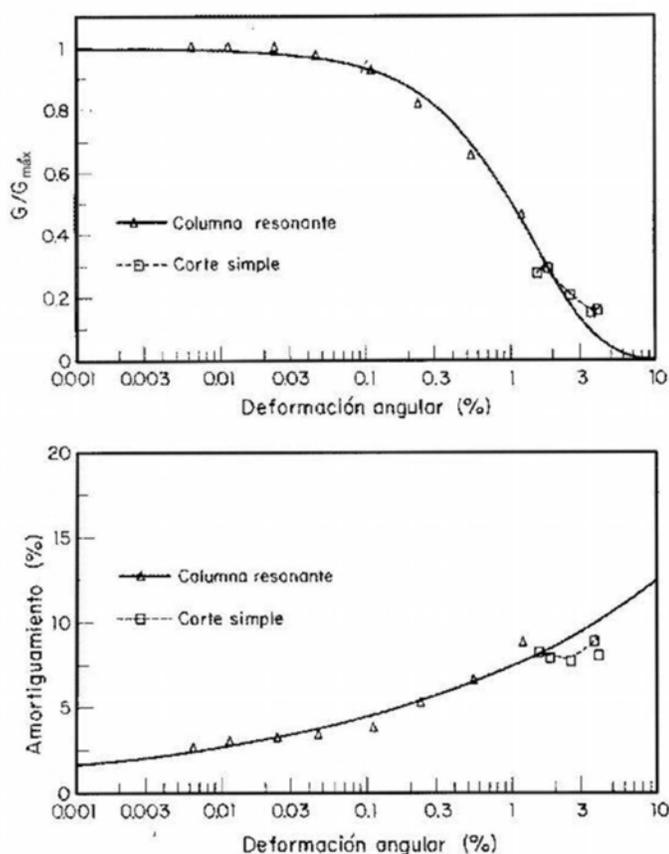


Figura 14: Módulo G y amortiguamiento  $\zeta$ .

Recientemente, Díaz-Rodríguez y Santamarina (2001) reorganizaron la información y reinterpretaron el trabajo efectuado por Díaz-Rodríguez y colaboradores, en término de los niveles de deformación, lo que permitió definir dos umbrales de deformación para los suelos de la ciudad de México: (a) el umbral de deformación lineal,  $\gamma_{\text{tl}}$ , que separa la región de pequeñas deformaciones de la región de deformaciones medias y (b) el umbral de deformación de degradación  $\gamma_{\text{td}}$ , que separa las regiones de deformaciones medias de la región de grandes deformaciones. A continuación se describirán las tres regiones de deformación.

#### ➤ Región de pequeñas deformaciones

La variación de la rigidez y el amortiguamiento en la región de pequeñas deformaciones depende del estado de esfuerzos y de las características físico-químicas del suelo bajo consideración. Díaz-Rodríguez y López-Flores (1999) efectuaron un extenso programa de ensayos utilizando columna resonante. Los esfuerzos de consolidación isotrópica

( $\sigma'_c$ ) cubrieron un amplio rango, desde esfuerzos muy pequeños ( $\sigma'_c < \sigma'_y$ ) hasta esfuerzos que superaron el esfuerzo de fluencia ( $\sigma'_c > \sigma'_y$ ).

La Figura 15 presenta la variación del módulo  $G_{\text{máx}}$  para una secuencia típica de ensayo. Los datos se ajustaron a una relación del tipo:

$$G_{\text{máx}} = \chi \sigma'_c{}^\beta$$

donde  $\chi$  y  $\beta$  son constantes de regresión. Se identifican dos regiones:

- Para esfuerzos  $\sigma'_c < \sigma'_y$ ,  $\beta = 0.27$
- Para esfuerzos  $\sigma'_c > \sigma'_y$ ,  $\beta = 0.73$

Como referencia, se proporcionan los exponentes para varios materiales:

- Para arenas densas no cementadas  $\beta \approx 0.4$
- Para arenas sueltas no cementadas  $\beta \approx 0.5$
- Caolinita NC  $\beta \approx 0.6$
- Bentonita NC  $\beta \approx 0.85$

Estos datos muestran que:

- $\beta$  es mayor en suelos finos, donde los efectos de la doble capa son importantes
- $\beta$  es mayor para materiales sueltos
- $\beta$  es menor en suelos que han experimentado diagénesis, cementación o sobreconsolidación (Cascade y Santamarina, 1996; Santamarina y Aloufi, 1999).

Las primeras dos observaciones explican el valor de  $\beta = 0.73$  obtenido en la rama desestructurada donde  $\sigma'_c > \sigma'_y$ . La tercera observación explica el valor de  $\beta = 0.27$  en la zona estructurada donde  $\sigma'_c < \sigma'_y$ .

La Figura 15b muestra la variación de la relación de amortiguamiento  $\zeta$ , con el esfuerzo isotrópico de consolidación, estos datos muestran que:

- $\zeta$  se incrementa con el valor de  $\sigma'_c$
- En la vecindad del esfuerzo de fluencia,  $\sigma'_y$  el valor de  $\zeta$  aumentan en forma importante, para después continuar con la tendencia señalada en la figura.

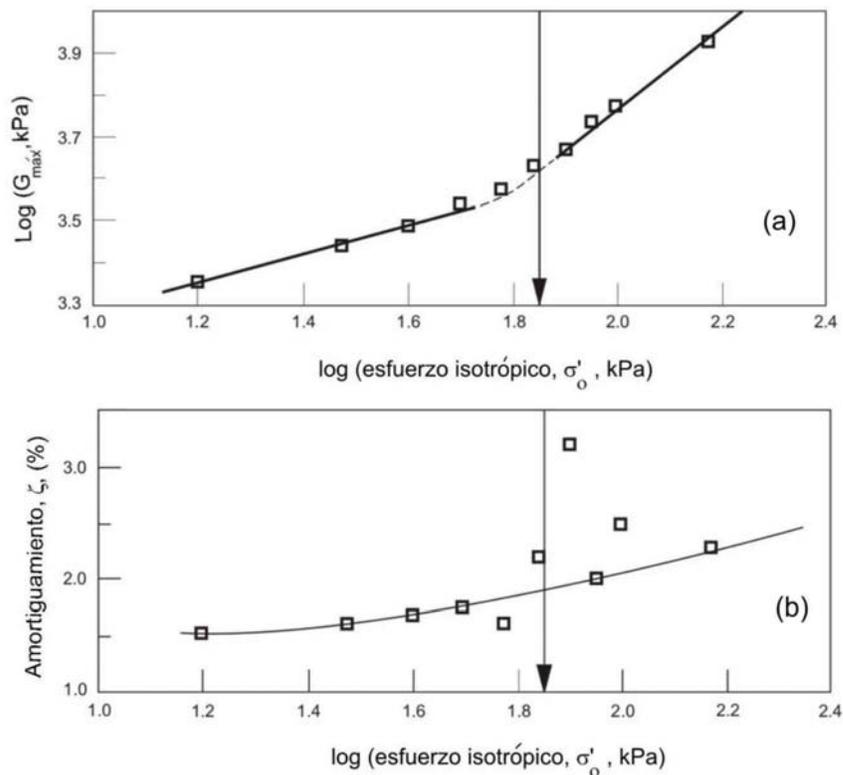


Figura 15: Módulo G y amortiguamiento  $\zeta$ .

➤ Región de deformaciones medias

Un parámetro importante en el comportamiento cíclico de los suelos arcillosos es el índice de plasticidad,  $I_p$ . Los suelos con un  $I_p$  grande tienen una estructura abierta, por tanto, para una deformación específica estos suelos experimentan menor degradación durante la carga cíclica. Lo anterior se verifica en los suelos de la ciudad de México, que presentan un comportamiento poco degradable para deformaciones hasta de 3%, lo que define el umbral de degradación,  $\gamma_{td}$ .

➤ Región de grandes deformaciones

En esta región el suelo de la ciudad de México presenta un gran deterioro debido a la amplitud de las deformaciones y al número de ciclos de carga, la interacción entre partículas cesa y como consecuencia conduce a la falla.

## RECOMENDACIONES PARA LA CARACTERIZACIÓN

La caracterización de un sitio o depósito incluye: planeación, muestreo, ensayos *in-situ*, ensayos geofísicos, ensayos de laboratorio, estudios específicos, interpretación y conclusiones. En muchas ocasiones no se puede realizar por un individuo, sino que es necesario combinar esfuerzos, capacidades y habilidades de varias personas o mejor aún, de varios grupos de investigación o de varias universidades.

Toda caracterización de un sitio o depósito debe aclarar las incertidumbres sobre la variabilidad natural de los suelos, las limitaciones de los ensayos *in-situ*, las dificultades en obtener muestras inalteradas, las limitaciones de los ensayos de laboratorio, y el comportamiento complejo de los suelos involucrados.

En particular, para la caracterización del subsuelo de la ciudad de México se recomienda:

- Obtener muestras inalteradas usando tubo muestreador con un diámetro  $\geq 12.5$  cm.
- Usar una relación  $\Delta\sigma/\sigma'_0 < 1$ , para obtener las curvas de compresibilidad.
- Utilizar una velocidad de deformación apropiada, para evitar subestimaciones o sobreestimaciones en la determinación de propiedades de resistencia.

## COMPORTAMIENTO DEL SUELO PARA DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN

Los suelos lacustres de la ciudad de México han sido fuente de muchos problemas serios de ingeniería. Los tres principales problemas a los que se enfrentan los ingenieros durante el diseño y construcción de edificaciones y cimentaciones son:

- Las propiedades singulares de los sedimentos lacustres
- El hundimiento regional
- La alta sismicidad

Lo relativo a las propiedades, tanto físicas, químicas, mineralógicas, hidráulicas y mecánicas (estáticas y dinámica) ya se mencionaron en los párrafos anteriores.

### El hundimiento regional

El hundimiento de la ciudad de México se descubrió desde 1891, mediante mediciones se encontró que la velocidad del hundimiento variaba entre 3 a 5 cm/año. En 1947 las velocidades habían aumentado de 15 a 30 cm/año, y actualmente se tiene una velocidad de 5 a 7 cm/año. En muchos lugares de la ciudad de México se tienen fuertes asentamientos de la superficie del terreno, lo que provoca fisuras y grietas. En el caso de los pilotes de fricción, la adhesión del suelo al pilote se reduce considerablemente y se provocan asentamientos irregulares debido a la reducción de la capacidad de carga de dichos pilotes.

### Sismicidad

La actividad sísmica observada en la zona central y meridional de México, se debe principalmente a la subducción de las placas Rivera y Cocos bajo la placa de Norteamérica, a la interacción de las placas Rivera, Cocos y del Caribe y también a la actividad cortical superficial en el continente.

Varios eventos sísmicos han producido daños importantes en la ciudad de México desde hace siglos, por ejemplo el sismo de subducción del 7 de abril de 1845, el cual produjo intensidades en la ciudad de México de VIII (MMI). Otro ejemplo es el sismo de subducción de 1957,  $M_s = 7.6$ , con una distancia epicentral de aproximadamente 350 km, produjo el colapso o daños importantes sobre numerosas construcciones localizadas en la zona lacustre, en cambio las construcciones localizadas en la zona firme o de transición tuvieron pocos daños.

La vulnerabilidad de la ciudad de México se confirmó a gran escala con el sismo ocurrido frente a las costas de Michoacán y Guerrero el 19 de septiembre de 1985. El epicentro se localizó en el punto de coordenadas 18.141° N, 102.707° W con una profundidad focal de 16 km. y una distancia epicentral de aproximadamente 380 km. A partir de los acelerogramas registrados se concluyó que la amplificación de las ondas sísmicas en la zona lacustre con respecto a la zona firme, fue de 10 a 100 veces, la aceleración máxima alcanzó valores de 170 cm/seg<sup>2</sup> (Chávez 1999).

Por tanto, el diseño de cimentaciones debe tomar en cuenta la acción de las ondas sísmicas en la superficie del suelo y la cimentación.

## REFERENCIAS

- Arellano, A. R. (1953). Estratigrafía de la Cuenca de México. *Congreso Científico Mexicano*, México, Vol. 3, pp. 172-187.
- Bryan, K. (1948). Los suelos complejos y fósiles de la altiplanicie de México, en relación a los cambios climáticos. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, Tomo XIII, México.
- Cascade, G. y Santamarina, J.C. (1996). "Interparticle contact behavior and wave propagation". *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, Vol. 122, No. 10, pp. 831-839.
- Chávez M. (1999). Estudios de microzonación sísmica en México y su impacto en la evaluación de la vulnerabilidad sísmica de las construcciones: una revisión breve. *XCNIS Vol 2*, pp. 889-898, Morelia, México.
- De Cserna, Z. et al. (1988). Estructura geológica, gravimétrica, sísmica y relaciones neotectónicas regionales de la Cuenca de México. Inst. de Geología, UNAM, México, Boletín 104, 71 p.
- Díaz-Rodríguez, J.A. (1989a). "Behavior of Mexico City clay subjected to undrained repeated loading". *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 26, No. 1, pp. 159-162.
- Díaz Rodríguez, J.A. y Leyte Guerrero F., (1989b). Consolidation of Mexico City clay under repeated loading. *XII International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Río de Janeiro, Brasil, Vol 1, pp. 33-37
- Díaz-Rodríguez, J.A. Leroueil, S. y Alemán, J.D. (1992). "Yielding of Mexico City clay and other natural clays". *Journal of Geotechnical Engineering, Division, ASCE*, Vol 118, No. 7, pp. 981-995.
- Díaz-Rodríguez, J. A., Lozano-Santa Cruz, R., Dávila-Alcocer, V.M., Vallejo, E. y Girón, P. (1998). "Physical, chemical, and mineralogical properties of Mexico City: a geotechnical perspective", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 35, No. 4, pp. 600-610.
- Díaz-Rodríguez, J. A. y López-Flores, L. (1999). A study of microstructure using resonant-column tests. *Earthquake Geotechnical Engineering*, Seco e Pinto (ed.), Vol. 1, pp. 89-94.
- Díaz-Rodríguez, J.A. y Santamarina, J.C. (2001). "Mexico City soil behavior at different strains – observations and physical interpretation". *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE*, Vol. 127, No. 9, pp. 783-789.
- Dobry, R. and Vucetic, M. (1987). Dynamic properties and seismic response of soft clay deposits. *Proceedings of the International Symposium on the Geotechnical Engineering of Soft Soils*. Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, México. Vol. 2, pp. 49-85.
- Fries, C. Jr. (1960). Geología del estado de Morelos y de partes adyacentes de México y Guerrero, región de México. Instituto de Geología, UNAM, Boletín 60, 23 p.
- Foreman, F. (1955). "Study of two cores from lake sediments of the Mexico City Basin", *Bulletin of the Geological Society of America*, Vol. 88, pp. 475-510.
- Graham, J., Noonan, M.L. y Lew, K.V. (1983). "Yield states and stress-strain relationships in a natural plastic clay". *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 20, No. 3, pp. 502-516.
- Gomez-Looh, B. (1987). Análisis por difracción de rayos X de las arcillas del subsuelo de la ciudad de México. Tesis de licenciatura, Facultad de Química, UNAM, México.
- Johnson, L.J. (1964). "Occurrence of Regularly Interstratified Chlorite-Vermiculite as a Weathering Product of Chlorite in a Soil". *Am. Mineral*, Vol. 49, pp. 556-572.
- Libby, W. F. (1955). Radiocarbon Dating. 2<sup>nd</sup> Edition, University of Chicago, Chicago, Illinois, 124 p.
- Lo, K.Y. (1962). Shear strength properties of a sample of volcanic material of the valley of Mexico. *Geotechnique*, Vol. 12, No. 4, pp. 303-318.
- Marín-Córdova S. y Aguayo-Camargo J. E. (1989). *Evolución geológica de la Cuenca de México e importancia de sus rasgos estructurales*. Ecología Urbana (volumen especial ). Sociedad Mexicana de Historia Natural.
- Marín-Córdova S. et al. (1986). *Sistemas mayores de fallamiento en la Cuenca de México y su relación con la sísmica*. Resúmenes de la VIII Convención Geol. Nal., México, D. F.
- Marsal, R.J. y Mazari, M. (1959). The Subsoil of Mexico City. Contribution to the *First Panamerican Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Ciudad de México, México.
- Marsal, R.J. y Salazar-Resines, J. (1960). Pore pressure and volumetric measurements in shear tests. *Proceedings of the ASCE Research Conference on Shear Strength of Cohesive Soils*, Boulder, Colorado, pp. 965-983.
- Mesri, G. Rokhsar, A., y Bohor, B.F. (1975). "Composition and compressibility of typical samples of Mexico City clay", *Geotechnique*, Vol. 25, No. 3, pp. 527-554.

- Mooser, F. (1963). "La cuenca lacustre del Valle de México". *Mesas Redondas sobre Problemas del Valle de México*, Instituto Mexicano de Recursos Naturales Renovables, A. C. México., pp. 12-16.
- Peralta y Fabi, R. (1989). Sobre el origen de algunas propiedades mecánicas de la formación arcillosa superior del valle de México. *Simposio Tópicos Geológicos de la cuenca del valle de México*, SMMS, México.
- Roscoe K.H., Schofield, A.N., y Wroth, C.P. (1958). "On the yielding of soils". *Géotechnique*, Vol. 8, No. 1, pp. 22-52.
- Santamarina, J.C. y Aloufi, M. (1999). Small strain stiffness: a micromechanical experimental study. *Proceedings of Pre-failure Deformation Characteristics of Geomaterials*, Balkema, Rotterdam, pp. 451-458.
- Schlaepfer, C. J. (1968). Resumen de la Geología de la Hoja México, Distrito Federal, Estado de México y de Morelos. Carta Geológica de México. Instituto de Geología, UNAM, México.
- Tavenas, F. y Leroueil, S. (1977). Effects of stresses and time on yielding of clays. *Proceedings of the 9th ICSMFE*, Tokio, Japón, Vol. 1, pp. 319-326.
- Zeevaert, L. (1949). An investigation of the engineering characteristics of the volcanic lacustrine clay deposit beneath Mexico City. *Ph.D. Thesis*, University of Illinois, Urbana, Illinois.
- Zeevaert, L. (1953). Outline of the stratigraphical and mechanical characteristics of the unconsolidated sedimentary deposits in the basin of the Valley of Mexico. *Proc. of the 4<sup>th</sup> Cong. Int. Assoc. Quart. Res. (INQUA)*: 1-14. Rome-Pisa, Italia.
- Zeevaert, L. (1957). "Foundation design and behavior of Tower Latino Americana in México City". *Geotechnique*, Vol. 7, No. 3, pp. 115-133.
- Zeevaert, L. (1957b). "Compensated friction-pile foundation to reduce the settlement of buildings on the highly compressible volcanic clay of Mexico City". *Proceedings of the 4<sup>th</sup> International Conference on Soil Mechanics*, London, U.K., Vol. 2, pp. 81-86.
- Zeevaert, L. (1982). *Foundation Engineering for Difficult Subsoil Conditions*. 2<sup>nd</sup> edition, Van Nostrand-Reinhold Co., New York.
- Zeevaert, L. (1986). Consolidation in the intergranular viscosity of highly compressible soils. Consolidation of Soils: Testing and Evaluation, ASTM STP 892, *American Society for Testing and Materials*, Philadelphia, pp. 257-281.

