

# Comportamiento dinámico de los sedimentos lacustres de la ciudad de México\*

## México city lacustrine silts´ dynamic behavior

Jorge Abraham Díaz-Rodríguez\*\*

### RESUMEN

Síntesis de las investigaciones llevadas a cabo por el Grupo de Investigación *Dinámica de Suelos*, de la Facultad de Ingeniería de la UNAM, sobre el tema del comportamiento cíclico del subsuelo de la ciudad de México. Se presentan resultados sobre el comportamiento esfuerzo-deformación-tiempo, en particular el efecto de la carga cíclica sobre el esfuerzo de fluencia,  $s'_y$ . En lo concerniente a la resistencia, se afirma la existencia de una relación umbral de esfuerzos cíclicos,  $R_D$ , que define dos patrones de comportamiento. Se enfatiza la importancia de considerar el efecto del tiempo en la medición del módulo de rigidez y el amortiguamiento. Se discuten los dos umbrales de deformación, el umbral lineal,  $\gamma_{li}$ , y el umbral de degradación,  $\gamma_{dt}$ . Finalmente se presentan resultados del efecto de la velocidad de deformación,  $\dot{\epsilon}$ , y la influencia de la estructura del suelo sobre la resistencia no drenada.

**Palabras clave:** Subsuelo de México D. F., Dinámica de suelos, Sedimentos lacustres, Sísmica.

### ABSTRACT

Synthesis of an investigation carried out by the: *Soils Dynamics* Investigation Group of the UNAM Engineering School, on the Mexico city underground cyclic behavior topic. These results appeared on the behavior stress-deformation-time, in particular the effect of the cyclic load about the stress flow  $s'_y$ . Concerning resistance, it states the existence of a cyclic efforts threshold relationship,  $R_D$ , that defines two behavior patterns. It emphasises the importance to consider the time effect in measuring the rigidity and cushioning module. The two deformation thresholds, the lineal threshold,  $\gamma_{li}$ , and the degradation threshold,  $\gamma_{dt}$  are discussed. Finally the deformation effect speed,  $\dot{\epsilon}$ 's results, and the floor structure influence, on the undrain resistance, are presented.

**Key words:** Mexico D. F. underground, Soils Dynamics, Lacustrine silts, Seismic.

\* Ponencia presentada en el Primer Seminario de Ingeniería Sísmica - UPTC, 2005.

\*\* Docente investigador, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, c.e.: jadrdiaz@servidor.unam.mx

## INTRODUCCIÓN

La ciudad de México es una de las metrópolis más antiguas del hemisferio occidental. Ocupa una planicie antigua (que fue un lago), rodeada por montañas, y cuenta con más de 16 millones de personas, en un área de aproximadamente 1.500 km<sup>2</sup> (fig. 1).

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 los sedimentos lacustres de la ciudad de México como altamente compresibles, lo que ha dado lugar a intrincados problemas de cimentación para la construcción allí de edificios elevados y de gran peso.



Fig. 1 Vista panorámica de la ciudad de México.

Los sedimentos lacustres de origen volcánico de la ciudad de México presentan propiedades, índice 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 subsuelo de la ciudad de México presenta un ángulo de fricción de 43°, comparable en magnitud con el de las arenas [1, 2, 3].

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 [3]. Esto influye de tal manera en su comportamiento que los suelos no pueden considerarse dentro de una clasificación simple.

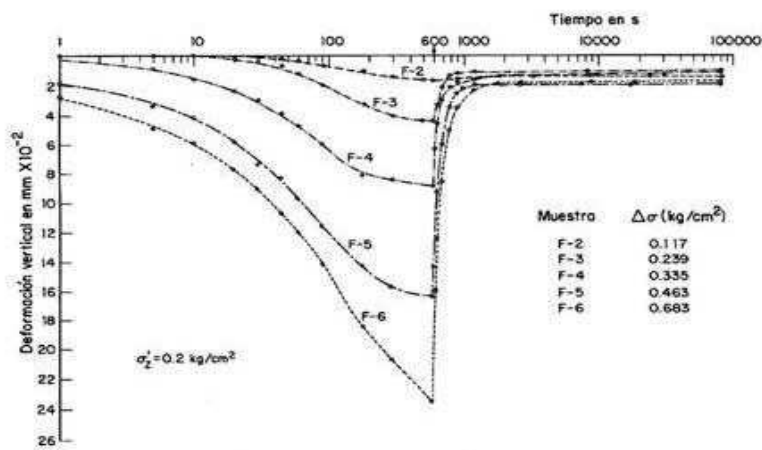
La fluencia es un concepto muy importante para caracterizar el comportamiento esfuerzo-deformación de los suelos ligeramente preconsolidados. El esfuerzo de fluencia,  $\sigma'_y$ , divide la curva de compresibilidad en dos dominios: para esfuerzos inferiores al  $\sigma'_y$ , el comportamiento del suelo es elástico, debido a que 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, ya que está en el dominio desestructurado o normalmente consolidado (NC). Los suelos lacustres de la ciudad de México muestran una excesiva deformación y cambios de volumen con predominante consolidación secundaria cuando se supera dicho esfuerzo de fluencia.

## 1. COMPORTAMIENTO ESFUERZO-DEFORMACIÓN-TIEMPO

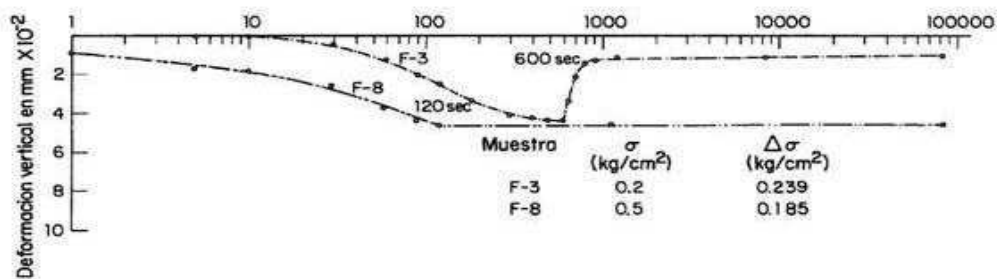
Cuando se induce una carga cíclica (debida a sismos, explosiones, vibración de maquinaria, tránsito de vehículos, etc.) a una masa de suelo, se provocan cambios en el estado de esfuerzos de dicha masa, que pueden causar un incremento de la deformación y, como consecuencia, un incremento de la presión de poro. La disipación del incremento de la presión de poro da origen a una deformación volumétrica y, por tanto, al asentamiento correspondiente.

Díaz-Rodríguez y Leyte-Guerrero [4] 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 presentaron una tendencia de reducción del esfuerzo de fluencia  $\sigma'_y$ . Este efecto pudo deberse a la reorientación de las partículas del suelo, equivalente a un remoldeo parcial provocado por la aplicación del esfuerzo cíclico.

En la fig. 2a se presenta la evolución de la deformación vertical con el tiempo, tanto durante (10 min) 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



a) Curvas deformación - tiempo



b) Comparación de curvas deformación - tiempo

Fig. 2. Resultados del efecto de carga cíclica en muestras confinadas lateralmente (Díaz-Rodríguez y Leyte-Guerrero, 1989).

presentó una recuperación elástica muy importante.

La fig. 2b presenta una comparación entre dos muestras consolidadas a distinto esfuerzo estático (0,2 y 0,5 kg/cm<sup>2</sup>) y amplitudes de esfuerzo cíclico de 0,24 y 0,19 kg/cm<sup>2</sup>, respectivamente. Se puede decir que 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 kg/cm<sup>2</sup>) 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.

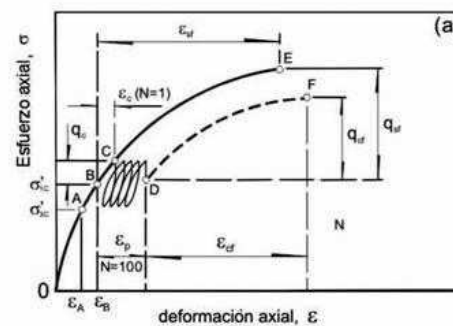
## 2. RESISTENCIA

Un subsuelo blando puede dar origen a hundimientos diferenciales o irregulares de la cimentación antes de la ocurrencia de un sismo, lo que reduce la capacidad estructural de una edificación, o bien, durante el sismo es factible que se presenten hundimientos del inmueble por las oscilaciones a que el subsuelo y la estructura se someten, lo cual puede llegar al extremo de producir esfuerzos en el subsuelo que conduzcan a la falla, por haberse excedido la capacidad de carga del terreno; por otra parte, en edificios muy esbeltos, las oscilaciones dan origen a que el momento de volteo se incremente, al grado de que en un caso extremo se provoque su volcamiento.

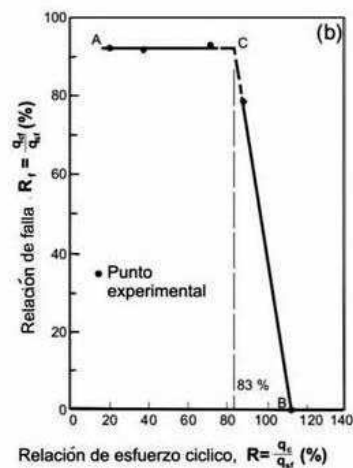
En forma simple, un elemento de suelo debajo de una cimentación puede considerarse sujeto a un estado inicial de esfuerzos al que se le superpone un esfuerzo vertical cíclico representativo de un sismo. Los ensayos de laboratorio consisten en someter un espécimen de suelo a un estado estable de consolidación anisotrópica y después aplicarle carga cíclica que simule la acción sísmica.

Con base en lo anterior, se llevó a cabo un programa de ensayos triaxiales consolidados-no drenados sobre muestras inalteradas del subsuelo

de la ciudad de México. Las muestras ensayadas se extrajeron de una profundidad de 11 m, con un contenido natural de agua promedio,  $w_n$ , del orden de 390%. Los especímenes, después de consolidados anisotrópicamente ( $k = 0,70$ ), se sometieron a la aplicación de carga cíclica con una frecuencia de 0,5 Hz, con niveles de esfuerzo,  $R (= q_c/q_{sf} \times 100)$ , que variaron entre 17,5 y 113,5%, en donde  $q_c$  es la amplitud del esfuerzo cíclico y  $q_{sf}$  es la resistencia base obtenida de una muestra ensayada monotónicamente a la falla sin aplicación previa de carga cíclica. El programa de



a) Esquema del programa de ensayos y definiciones



b) Relación de falla vs relación de esfuerzo cíclico

Fig. 3. Determinación de la relación umbral de esfuerzos cíclicos  $R_b$  [5].

ensayos en forma esquemática aparece en la fig. 3a. Se aplicaron 100 ciclos de esfuerzo; cuando la muestra resistió sin fallar, se realizó un ensayo monotónico a la falla para determinar la resistencia poscíclica,  $q_{cf}$ . Los resultados permitieron conocer un parámetro característico de los suelos de la ciudad de México [5], que se ha denominado relación umbral de esfuerzos dinámicos,  $R_D$  (fig. 3b). Este nuevo parámetro tiene las siguientes características: (a) es aproximadamente una constante y (b) tiene un valor alto,  $R_D \approx 83\%$ . La relación umbral de esfuerzos cíclicos,  $R_D$ , define dos patrones de comportamiento dinámico.

- Para  $R < R_D$  se presenta poco deterioro de la estructura del suelo con los lazos de histéresis cerrados.
- 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.

El efecto de la relación de preconsolidación, OCR, se investigó [6, 7] mediante dos series de ensayos triaxiales cíclicos. Para la serie A, los especímenes se consolidaron isotrópicamente con una presión de confinamiento equivalente a la presión efectiva de sobrecarga de la muestra ( $s'_c = 0.43 \text{ kg/cm}^2$ ), a la cual se designó como  $\text{OCR} = 1$ , estrictamente, este OCR es mayor que uno, si se tiene en cuenta que el esfuerzo de fluencia  $s'_{cy}$  es mayor que el esfuerzo efectivo vertical,  $s'_{ov}$ , sin embargo, para fines de comparación con los resultados de la serie B, en la cual los especímenes se consolidaron con una presión de confinamiento  $s'_c = 0.86 \text{ kg/cm}^2$  y después se efectuó una descarga hasta  $s'_c = 0.43 \text{ kg/cm}^2$ , denotando un  $\text{OCR} = 2$ , resulta conveniente que ambas series de ensayos tengan el mismo esfuerzo de confinamiento, es decir  $s'_c = 0.43 \text{ kg/cm}^2$ .

Los resultados indicaron que existía una clara diferencia de comportamiento entre las series A y B, es decir, los resultados fueron sensibles a la historia de esfuerzos en particular al OCR. En

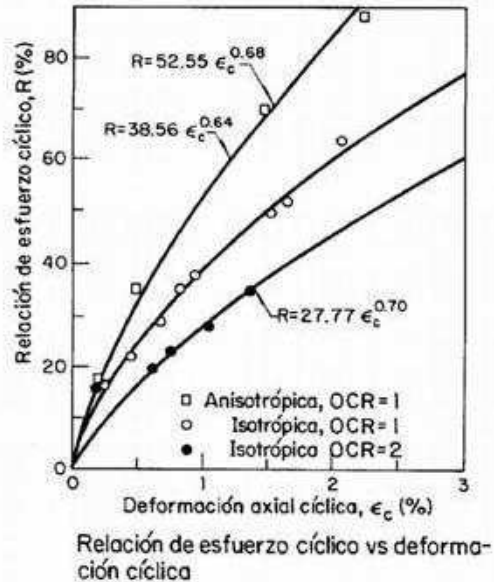


Fig. 4. Resultados de cámara triaxial cíclica.

términos generales, puede decirse que los especímenes con  $\text{OCR} = 2$  resultaron más deformables que aquellos con  $\text{OCR} \approx 1$ . Se obtuvieron expresiones empíricas para la relación de esfuerzos cíclicos en función de la amplitud de deformación cíclica (fig. 4).

### 3. MÓDULO DE RIGIDEZ Y AMORTIGUAMIENTO

La respuesta de un espécimen de suelo durante varios ciclos de carga y descarga, cuando es sometido a una sollicitación cíclica, se manifiesta en las curvas esfuerzo-deformación (lazos de histéresis).

El módulo secante se define como la pendiente de la recta que une los puntos extremos de cada lazo. Por otro lado, es un hecho experimental que la energía liberada durante la descarga es menor que la energía de deformación almacenada durante la carga, lo cual implica pérdida de energía. Las características de absorción de energía del suelo debidas a la fricción interna no-lineal se pueden estimar mediante la relación de amortiguamiento,  $\zeta$ , que se expresa como se indica en la fig. 5.

Es algo impreciso hablar de lazo de histéresis, ya que dicho lazo no es cerrado, es decir, no regresa exactamente al comienzo, pero normalmente las diferencias de ciclo a ciclo son pequeñas, por lo que puede considerarse adecuada la idealización.

La fig. 6 muestra la variación del módulo de Young equivalente,  $E_{eq}$ , normalizado con respecto a  $q_{sf}$ . Se puede apreciar el efecto de la OCR y del tipo de consolidación. Cabe hacer notar que a pesar de que las muestras no son del mismo sitio y, en consecuencia, tienen propiedades índice diferentes, los resultados siguen tendencias bien definidas.

La relación entre la deformación axial y el amortiguamiento se presenta en la fig. 7. Se aprecia que la relación de amortiguamiento equivalente,  $\zeta$ , sigue una tendencia lineal en el rango de deformaciones estudiadas, tanto para

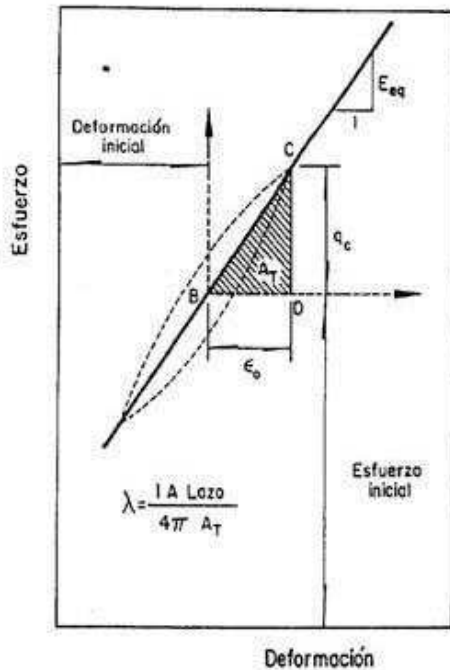


Fig. 5. Lazo de histéresis y definiciones.

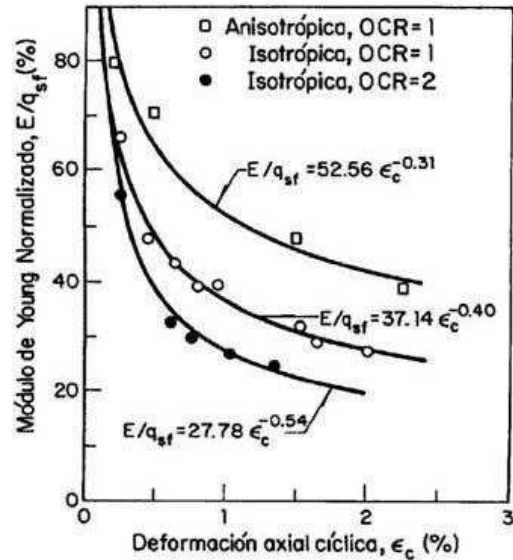


Fig. 6. Módulo de Young equivalente normalizado vs. deformación cíclica.

diferentes valores del OCR como para tipo de consolidación. Aunque las rectas resultan cercanas, se pueden diferenciar unas de otras según la condición estudiada.

Mediante la combinación de columna resonante y corte simple cíclico, se investigó el módulo de rigidez,  $G$ , y la relación de amortiguamiento, en un amplio rango de deformaciones [8]. La

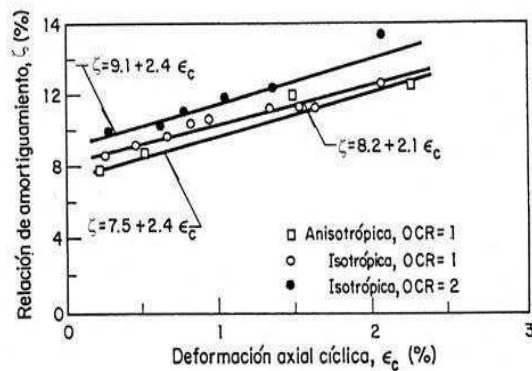


Fig 7. Relación de amortiguamiento.

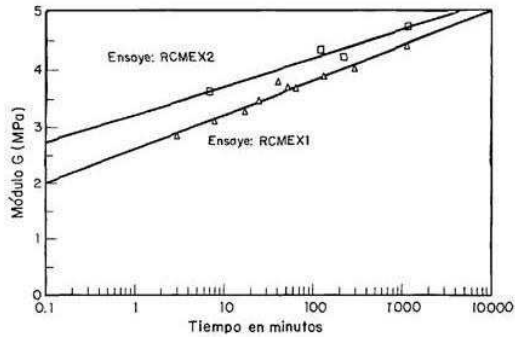


Fig. 8. Módulo de rigidez vs. duración del confinamiento.

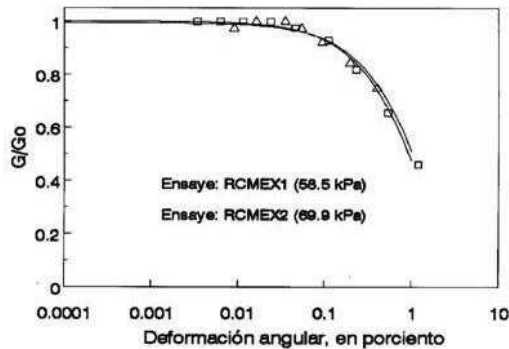


Fig. 9. Curvas de reducción del módulo normalizado.

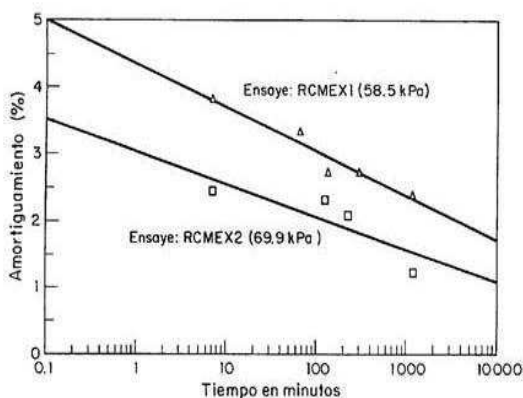


Fig. 10. Amortiguamiento vs. tiempo.

evolución del módulo  $G$  durante el proceso de consolidación se presenta en la fig. 8; los resultados mostraron que el módulo  $G$  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.

Las curvas de reducción del módulo  $G$  con la amplitud de deformación,  $\gamma$ , normalizadas respecto al módulo  $G_0$  ( $G_{m\acute{a}x}$ ) para pequeñas deformaciones se presentan en la fig. 9. En esta se observa que el efecto de la presión de confinamiento desaparece, asimismo, el módulo  $G$  es aproximadamente constante para deformaciones hasta de 0,1%.

La evolución de la relación de amortiguamiento durante el proceso de consolidación se presenta en la fig. 10; los resultados mostraron 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,  $V$ , a partir de ensayos de laboratorio.

La fig. 11 presenta los resultados combinados de columna resonante y corte simple cíclico, tanto para la curva de reducción del módulo normalizado como para el amortiguamiento.

Recientemente, Díaz-Rodríguez y Santamarina [9] reorganizaron la información y reinterpretaron el trabajo efectuado por Díaz-Rodríguez y colaboradores, en término de los niveles de deformación. A continuación se describirán tres regiones de deformación y su correspondiente determinación.

#### 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

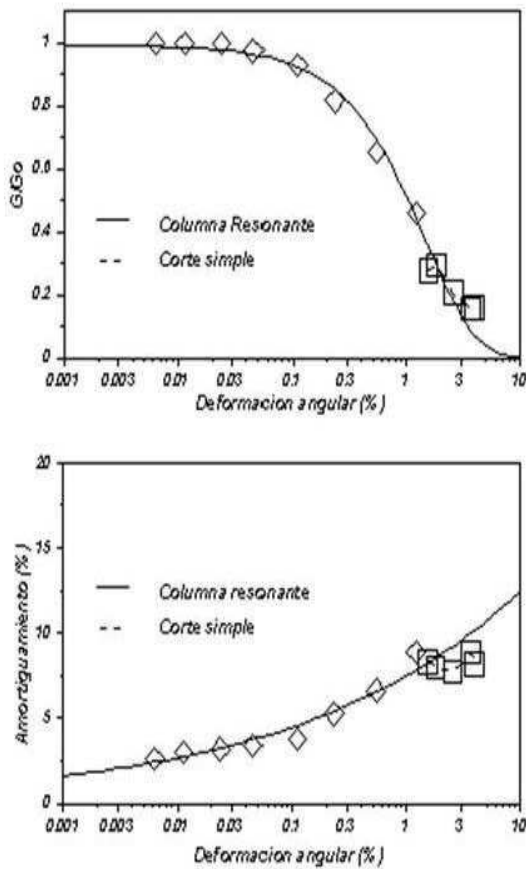


Fig 11. Módulo de rigidez y amortiguamiento [8].

características físico-químicas del suelo bajo consideración. Díaz-Rodríguez y López-Flores [10] 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 fig. 12a presenta la variación del módulo  $G_{\max}$  para una secuencia típica de ensayo.

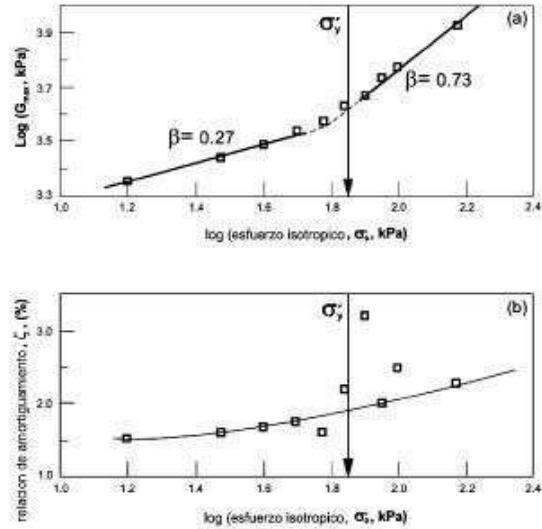


Fig. 12. Módulo G y amortiguamiento  $\zeta$  [9].

Los datos se ajustaron a una relación del tipo:

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

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 tienen los siguientes valores:

- 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 [11].

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

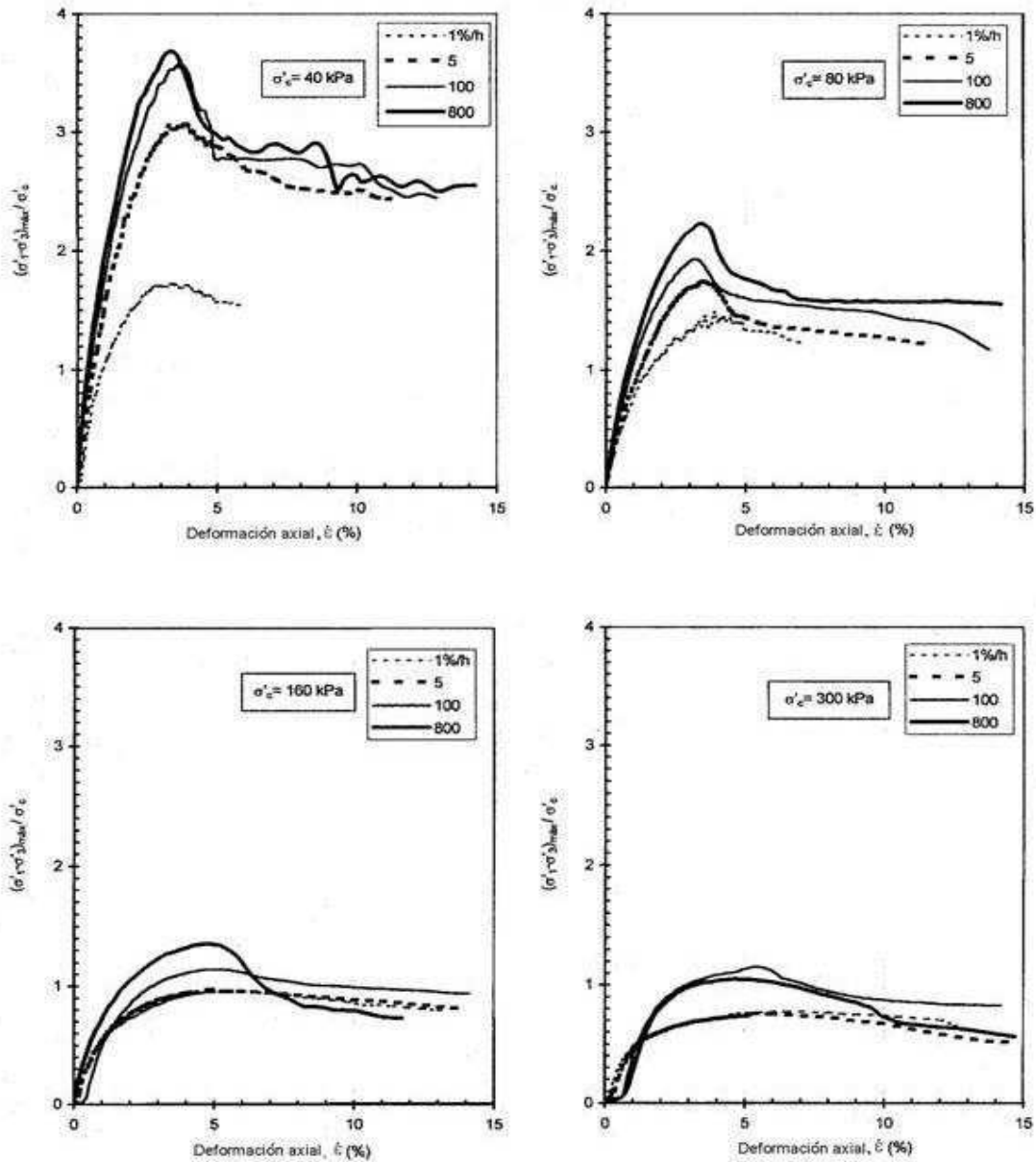


Fig. 13. Efecto de la velocidad de deformación y el esfuerzo confinante (Díaz-Rodríguez y Martínez-Vásquez, 2005).

valor de  $\beta = 0,27$  en la zona estructurada donde  $\sigma'_c < \sigma'_y$ .

La fig. 12b 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  $\zeta$  aumenta en forma importante, para después continuar con la tendencia señalada en la fig. 12.

Con base en la fig. 11, se puede determinar el umbral de deformaciones lineales,  $\gamma_{lt}$ , que separa la región de pequeñas deformaciones de la región de deformaciones medias.

#### *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,  $\gamma_{lt}$ .

#### *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.

## **4. VELOCIDAD DE DEFORMACIÓN**

El conocimiento sobre este tema indica que la resistencia de los suelos arcillosos bajo condición de carga dinámica monotónica es mayor que la resistencia obtenida en

condiciones estáticas, en las cuales la velocidad de aplicación de carga es muy pequeña.

En ensayos estáticos, las condiciones de drenaje se especifican como drenadas o no drenadas, sin embargo, en ensayos con velocidades de aplicación de carga mayores que 0,5% por minuto, es difícil conocer bajo qué condiciones de drenaje se realiza el ensayo, aun manteniendo las válvulas de drenaje del equipo abiertas, tanto de la cabeza como de la base, ya que se puede presentar exceso de presión de poro en la parte media del espécimen.

Generalmente, la presión de poro decrece con el incremento de la velocidad de deformación; una posible explicación es que la velocidad de deformación afecta el movimiento de las partículas de suelo durante la deformación, impidiendo que las partículas sigan trayectorias de mínima resistencia y obligándolas a moverse por encima unas de otras, provocando dilatación y la correspondiente reducción de la presión de poro, y, por consiguiente, un aumento de su resistencia.

La fig. 13 muestra las curvas esfuerzo desviador normalizado vs. la deformación axial, para ensayos triaxiales CU, para cuatro presiones de confinamiento ( $\sigma'_c = 40, 80, 160$  y  $300$  kPa) y cuatro velocidades de deformación ( $\dot{\epsilon} = 1, 5, 100$  y  $800\%/h$ ). Los resultados sugieren que el esfuerzo desviador máximo para  $\dot{\epsilon} = 800\%/h$  fue 214% mayor que el valor correspondiente a una  $\dot{\epsilon} = 1\%/h$ , para un esfuerzo  $\sigma'_c = 40$  kPa, inferior al esfuerzo de fluencia ( $\sigma'_y = 95$  kPa). La deformación axial fue esencialmente independiente de la velocidad de deformación ( $= 3.5\% \pm 0.24$  SD).

Para una presión de confinamiento  $\sigma'_c = 80$  kPa, la diferencia fue 150%; en este caso, la presión de confinamiento está más cerca de  $\sigma'_y$ . Para presiones de confinamiento superiores al esfuerzo de fluencia, los porcentajes fueron 142% y 136% para presiones de confinamiento de 160 y 300 kPa, respectivamente. La

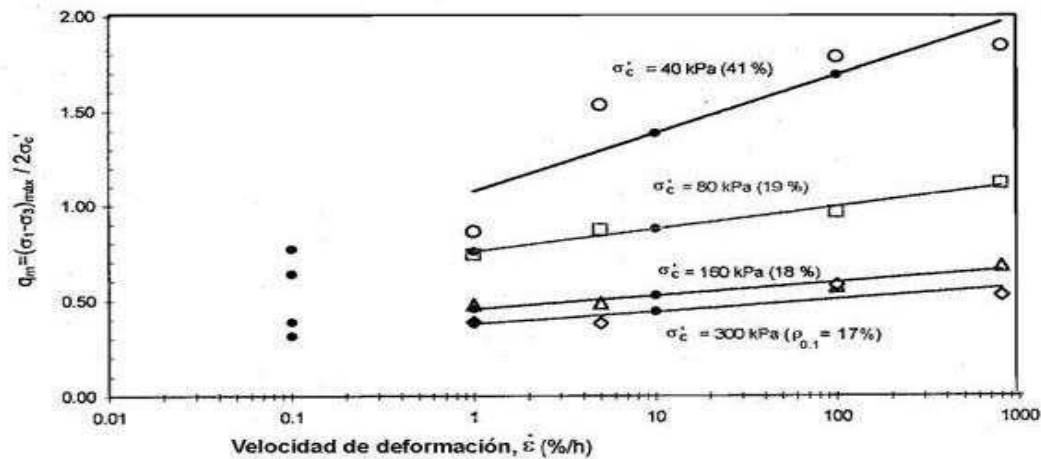


Fig. 14. Cambio en la resistencia no-drenada con la velocidad de deformación (Díaz-Rodríguez y Martínez-Vásquez, 2005).

deformación axial fue de  $5\% \pm 0,36$  SD y  $5,38\% \pm 0,57$  SD, respectivamente. Lo anterior muestra la disminución del porcentaje al pasar de la rama estructurada a la rama desestructurada o NC.

La fig. 14 muestra el cambio de la resistencia no-drenada descrita por el parámetro  $\rho_{0.1}$  [12], definido como el cambio de la resistencia no-drenada para un cambio en la velocidad de deformación de 10 veces, dividida por la resistencia medida para una  $\dot{\epsilon} = 0.1\%/h$ . Los valores obtenidos fueron 41% y 17% para esfuerzos confinantes de 40 y 300 kPa.

## 5. CONCLUSIONES

- Los sedimentos lacustres de la ciudad de México son uno de los geomateriales más interesantes y sorprendentes del mundo. Factores físicos, químicos, mineralógicos y climatológicos han sido importantes en el desarrollo y subsecuente comportamiento.
- Los suelos de la ciudad de México son mezclas complejas de minerales cristalinos y no cristalinos (amorfos), que no pueden ser clasificados dentro de una nomenclatura simple; son sedimentos heterogéneos

volcánico lacustres con una variedad de microorganismos que adicionan compuestos solubles, generados por la disolución parcial de sus exoesqueletos, que forman parte de la microestructura del suelo, lo cual influye en forma muy importante en el comportamiento mecánico observado en la práctica de la ingeniería de cimentaciones.

- Los suelos de la ciudad de México (ACM) exhiben propiedades atípicas debido a su origen volcánico y lacustre.
- La aplicación de carga cíclica de muy pequeña amplitud de esfuerzos ocasiona deformaciones, cuya magnitud está relacionada con el esfuerzo de fluencia.
- La carga cíclica puede acelerar el proceso de consolidación e incluso modificar el esfuerzo de fluencia.
- Existe una relación umbral de esfuerzos cíclicos,  $R_D$ , que define dos patrones de comportamiento de las arcillas: (a) para una  $R < R_D$  se presenta poco deterioro de la estructura del suelo con lazos de histéresis cerrados, (b) para  $R > R_D$  se presenta un gran

deterioro, con lazos de histéresis abiertos, y una marcada reducción de la resistencia al esfuerzo cortante.

- El módulo de rigidez y el amortiguamiento son dependientes del tiempo de consolidación, por tanto la variable tiempo debe ser tomada en cuenta al medir propiedades dinámicas.
- La curva de reducción del módulo con la deformación sugiere una deformación lineal umbral,  $\gamma_{il} = 0.03\%$ , indicando que los suelos de la ciudad de México tienen el comportamiento lineal más grande entre muchos de los suelos arcillosos.
- La deformación umbral de degradación,  $g_{td}$ , tiene un valor de aproximadamente 3%.
- La resistencia no-drenada de los suelos lacustres de la ciudad de México es afectada por la velocidad de deformación y el esfuerzo de fluencia.

## 6. REFERENCIAS

- [1] K. Y. Lo: «Shear strength properties of a sample of volcanic material of the valley of Mexico». *Géotechnique* 12(4): 303-318, 1962.
- [2] J. A. Díaz-Rodríguez, S. Leroueil y J. D. Alemán: «Yielding of Mexico City clay & other natural clays», *Journal of Geotech. Engrg. Div.*, ASCE 118(7): 981-995, 1992.
- [3] J. A. Díaz-Rodríguez, R. Lozano-Santa Cruz, V. M. Dávila-Alcocer, E. Vallejo & P. Girón: «Physical, chemical, & mineralogical properties of Mexico City: a geotechnical perspectiva». *Canadian Geotech. Journal* 35(4): 600-610, 1998..
- [4] J. A. Díaz-Rodríguez y F. Leyte Guerrero: «Consolidation of Mexico City clay under repeated loading», *XII International Conference on Soil Mechanics & Foundation Engineering*, Río de Janeiro, Brasil (1/101989): 33-37.
- [5] J. A. Díaz-Rodríguez: «Behavior of Mexico City clay subjected to undrained repeated loading», *Canadian Geotechnical Journal* 26(1): 159-162, 1989.
- [6] M. García-Cabana: «Efecto de la carga cíclica en muestras isotrópicamente consolidadas de la ciudad de México», Tesis de Maestría, DEPMI, UNAM, 1987.
- [7] J. A. Díaz-Rodríguez: «Overconsolidated Mexico City clay under cyclic loading», *Ninth World Conference on Earthquake Engineering*, Tokio-Kyoto, Japan (III): 29-34, 1988.
- [8] J. A. Díaz-Rodríguez: «On dynamic properties of Mexico City clay for wide strain range», *Tenth World Conference on Earthquake Engineering*, Madrid (3): 1257-1262, 1992.
- [9] J. A. Díaz-Rodríguez & J. C. Santamarina: «Mexico City soil behavior at different strains – observations & physical interpretation». *Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering*, ASCE 127(9): 783-789, 2001.
- [10] J. A. Díaz-Rodríguez & L. López-Flores: «A study of microstructure using resonant-column tests». *Earthquake Geotechnical Engineering*, Seco e Pinto (ed.), 1: 89-94, 1999.
- [11] G. Cascante & J. C. Santamarina: «Interparticle contact behavior & wave propagation». *J. Geotech. Engrg.*, ASCE 122(10): 831-839, 1996.
- [12] J. Graham, M. L. Noonan & K. V. Lew: «Yield states and stress strain relationships in a natural plastic clay». *Canadian Geotechnical Journal* 20(3): 501-516, 1983.

Fecha de recepción: 26 de septiembre de 2005

Fecha de aprobación: 2 de diciembre de 2005