
COMPORTAMIENTO DINAMICO DE LAS ARCILLAS DE LA CIUDAD DE MEXICO

Jorge Abraham Díaz Rodríguez

Profesor Investigador, División
de Estudios de Posgrado,
Facultad de Ingeniería, UNAM

RESUMEN

Este artículo es una breve síntesis de las investigaciones llevadas a cabo por el Grupo Dinámica de Suelos de la DEPMI-UNAM sobre el tema del comportamiento cíclico de las arcillas de la ciudad de México (ACM). Se presentan resultados sobre el comportamiento esfuerzo-deformación-tiempo de las ACM, en particular del efecto de la carga cíclica sobre el esfuerzo crítico, σ_b . En lo concerniente a la resistencia, se afirma la existencia de una relación umbral de esfuerzos dinámicos, R_D , que define dos patrones de comportamiento de las ACM bajo carga cíclica. Se enfatiza la importancia de considerar el efecto del tiempo en la medición del módulo de rigidez y el amortiguamiento de las ACM. Basado en resultados de corte simple cíclico, se propone una forma alterna para definir la relación umbral de esfuerzos cíclicos, R_D , a través del trabajo histerético acumulado.

ABSTRACT

This is a brief synthesis of the research carried-out by de Soil Dynamic Group of the DEPMI-UNAM about the cyclic behaviour of Mexico City clays (ACM). Results are presented about the ACM stress-strain-time behaviour, in particular the effect of cyclic loading on the critical stress, σ_b . In relation with the resistance, it is proposed the existence of a dynamic stress ratio threshold R_D which defines two types of behaviour of the ACM under cyclic load. The importance of considering the effect of time in the experimental determination of the shear modulus and damping of the ACM is stressed. Based on cyclic simple shear ACM tests, an alternative definition of R_D in terms of the hysteretic accumulated work is proposed.

1. INTRODUCCION

Gran parte de nuestro país está sujeto a la ocurrencia de sismos severos, razón por la cual uno de los problemas de importancia nacional está relacionado con los sismos y sus efectos sobre el comportamiento de depósitos naturales de suelo, cimentaciones y estructuras de tierra y enrocamiento.

La ciudad de México está situada en un área de elevada sismicidad. Chávez (1984, 1992) ha mostrado el impacto que sobre el riesgo sísmico y la seguridad estructural estimadas para la ciudad de México tiene la aceleración máxima esperada en los depósitos de suelos blandos cuando ocurren sismos de subducción o de intraplacas. El sismo que sufrió la ciudad capital en 1957 dejó un antecedente de lo que podría ocurrir a esta urbe si se presentaba un sismo de mayor magnitud. Nuevamente, los sismos de septiembre de 1985 evidenciaron la gran vul-

nerabilidad de la ciudad de México ante los desastres naturales. Causaron, entre otros graves daños, que algunos edificios tuvieran asentamientos excesivos y otros llegaran hasta el volcamiento de la estructura, lo cual puso de manifiesto nuevamente la urgente necesidad de atender la investigación sobre el comportamiento dinámico del subsuelo de la ciudad de México.

Todos los materiales poseen una estructura interna, es decir, presentan una serie de elementos repetitivos que en su conjunto constituyen la esencia del material y dan origen a propiedades particulares. Aquí el término estructura con relación al suelo tiene un significado amplio que combina los efectos de: arreglo geométrico, composición (química y mineralógica) y fuerzas de interacción entre partículas.

Puede decirse en general que los suelos arcillosos tienen una estructura compleja. Por lo mismo, las arcillas de la ciudad de México de origen lacustre y volcánico son mezclas complejas de minerales arcillosos y no arcillosos, que desafían nomenclatura sencilla, son arcillas *sui generis*; heterogéneas, volcánicas, lacustres, con una gran proporción y variedad de microorganismos que forman parte de la estructura, con sales disueltas, grasas de origen animal y materia orgánica.

El subsuelo de la ciudad de México, específicamente la formación arcillosa superior, es un material excepcional, su contenido de agua a menudo excede 500%, su índice de plasticidad comúnmente excede de 300%, su porosidad es de 90%, lo que significa que el 90% de su volumen es agua. Estas propiedades poco usuales han dado origen a intrincados problemas de cimentación, lo cual ha requerido el estudio de su comportamiento mecánico (Zeevaert, 1943, 1982 y 1988; Marsal y Mazari, 1959).

El comportamiento estático de las arcillas de la ciudad de México puede establecerse como sigue: cuando se somete a esfuerzos inferiores a un cierto esfuerzo crítico, 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.

La solución de un grupo importante de problemas que involucra el comportamiento dinámico de suelos requiere básicamente el estudio de tres aspectos: a) la determinación de las deformaciones inducidas por carga cíclica, b) la cuantificación de los efectos de la aplicación de un número preestablecido de ciclos de carga sobre las propiedades de resistencia al esfuerzo cortante y c) la determinación de las propiedades dinámicas (Módulo G y relación de amortiguamiento λ) en un rango amplio de deformaciones. Estos temas, entre otros de gran importancia, pertenecen a la dinámica de suelos.

Con base en lo anterior, se puede afirmar que la investigación experimental del comportamiento dinámico de las arcillas de la ciudad de México tiene un doble propósito: contribuir al conocimiento básico sobre el cual se fundamenta su modelación y aportar datos útiles sobre las propiedades dinámicas que posibilite sus aplicaciones a problemas de la práctica.

Por tanto, surgió la necesidad de desarrollar un proyecto basado en la interrelación docencia-investigación denominado Grupo Dinámica de Suelos, con la finalidad de formar personal capaz de estudiar, explicar y predecir el comportamiento dinámico de los suelos.

Este artículo es una breve síntesis de las investigaciones llevadas a cabo por el Grupo Dinámica de Suelos de la DEPMI-UNAM, el cual tiene su sede en el Laboratorio de Dinámica de Suelos de la DEPMI (Díaz Rodríguez, 1988b).

2. ESFUERZO-DEFORMACION-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, lo cual puede 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.

Con base en lo anterior, surge la necesidad de investigar el efecto de la aplicación de carga cíclica sobre las propiedades esfuerzo-deformación-tiempo de muestras inalteradas de las arcillas típicas de la ciudad de México.

Díaz Rodríguez y Casales Galván (1983) diseñaron un dispositivo (mesa vibratoria miniatura) de un grado de libertad (Fig. 1a.), mediante el cual aplicaron carga repetida de bajo nivel de esfuerzo ($\approx 2\%$ de la carga estática) a muestras inalteradas, confinadas mediante un anillo metálico flotante.

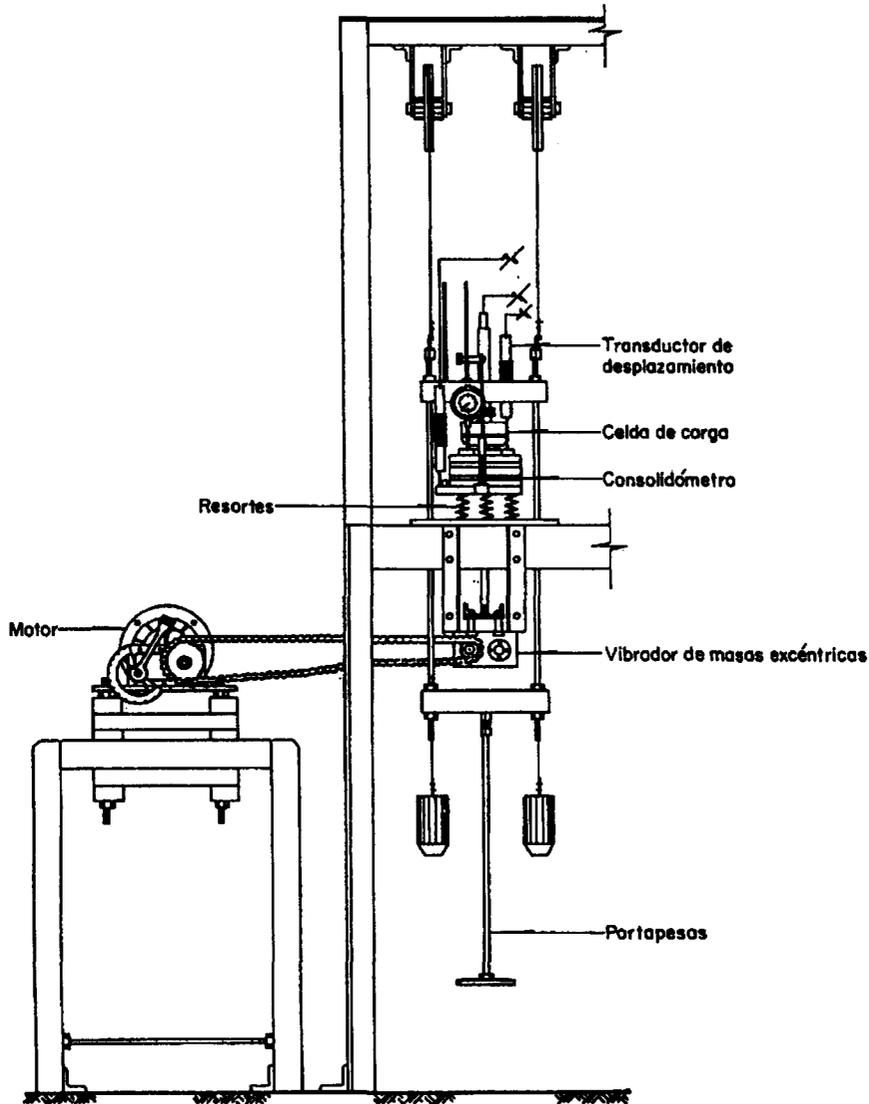


Fig. 1a Esquema del consolidómetro dinámico versión 1983

El procedimiento seguido para cada muestra consistió en: La realización de ensayos de consolidación unidimensional hasta un esfuerzo vertical predeterminado; después de 24 hrs. de aplicado dicho esfuerzo, se sometió la muestra a una secuencia de vibraciones armónicas con una frecuencia $\Omega = 7.6$ Hz; la secuencia de vibraciones consistió en la aplicación de la carga cíclica con duración de 1, 5, 10 ó 20 min; después de cada aplicación se dejó transcurrir 24 hrs. (únicamente manteniendo la carga estática) con objeto de observar la evolución de la deformación con el tiempo.

Después de concluída la secuencia de vibraciones, se aplicó el siguiente esfuerzo vertical estático y una nueva secuencia de vibraciones. Los resultados indicaron dos patrones de comportamiento:

- a) Para esfuerzos estáticos inferiores al esfuerzo crítico, la secuencia de vibraciones induce deformaciones que son equivalentes a las que se obtienen mediante la aplicación del incremento en forma estática sostenida durante 24 hrs.
- b) Para esfuerzos estáticos mayores que el esfuerzo crítico, la carga dinámica induce deformaciones que resultan mayores que las que ocasiona la aplicación del incremento de esfuerzos en forma estática. En este caso, la relación del incremento de deformación inducida por carga dinámica entre el inducido por carga estática resulta mayor que la unidad, el cual pudiera considerarse como un factor de deformación dinámica.

Otro estudio (Díaz Rodríguez y Casales Galván, 1986) confirmó las conclusiones anteriores y además permitió conocer que la aplicación de carga cíclica acelera la deformación del suelo mediante un proceso que puede ser diferente al provocado por carga estática.

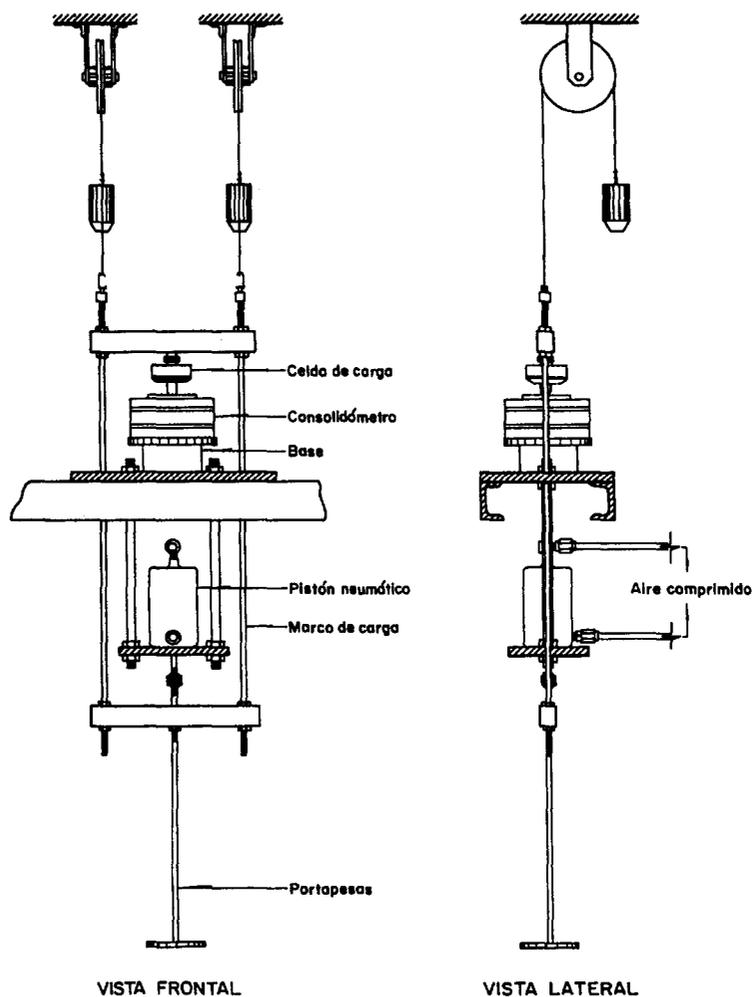


Fig. 1b Esquema del consolidómetro dinámico versión 1989

Con objeto de aplicar carga repetida con un mejor control de las variables (amplitud y frecuencia), se desarrolló una nueva versión del consolidómetro dinámico (Fig. 1b), que consta de un sistema de aplicación de carga estática, un actuador neumático, un sistema de control de carga y un sistema de registro. El dispositivo permite aplicar carga estática y carga repetida, actuando por separado o simultáneamente, esto le da una gran versatilidad, no obstante, su diseño es de gran sencillez.

El resultado más importante obtenido en esta etapa (Díaz Rodríguez y Leyte Guerrero, 1989) consiste en la tendencia observada de reducción del esfuerzo crítico, σ_b , por efecto de la carga repetida. Este efecto se puede deber a la re-orientación de las partículas del suelo, equivalente a un remoldeo parcial provocado por la aplicación de esfuerzo repetido.

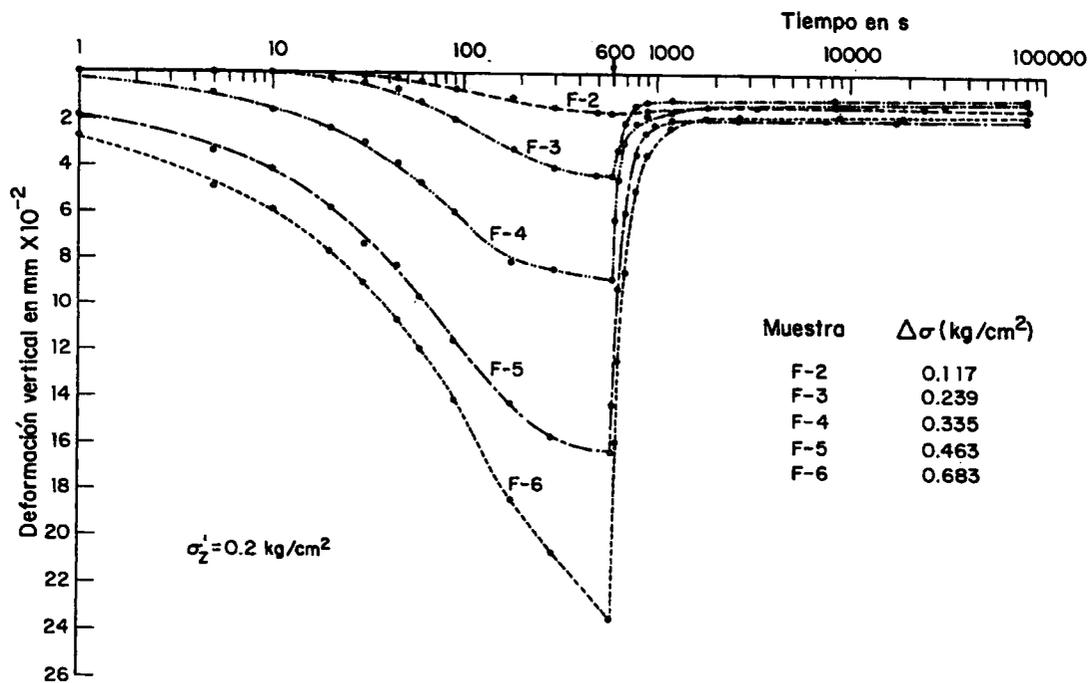


Fig. 2 Curvas tiempo-deformación

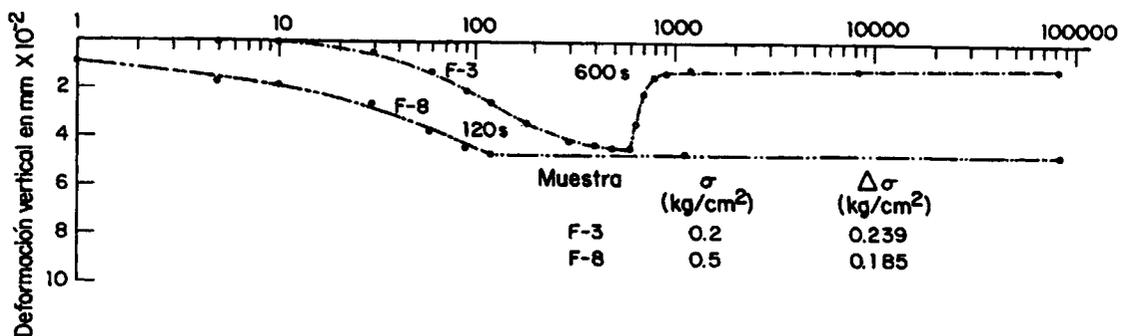


Fig. 3 Comparación de curvas tiempo-deformación

En la figura 2, 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 kg/cm^2 (bastante inferior al esfuerzo crítico), en tanto que las amplitudes del esfuerzo cíclico variaron entre 0.117 a 0.683 kg/cm^2 . Se puede apreciar que a pesar de que las amplitudes del esfuerzo cíclico fueron grandes (0.683 kg/cm^2) el suelo presentó una recuperación elástica muy importante.

La figura 3 presenta una comparación entre dos muestras consolidadas a distinto esfuerzo estático (0.2 y 0.5 kg/cm^2) y amplitudes de esfuerzo cíclico de 0.24 y 0.19 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 kg/cm^2), no se tuvo recuperación. Lo anterior puede considerarse como la influencia del esfuerzo crítico en el comportamiento cíclico de las arcillas de la ciudad de México.

3. 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.

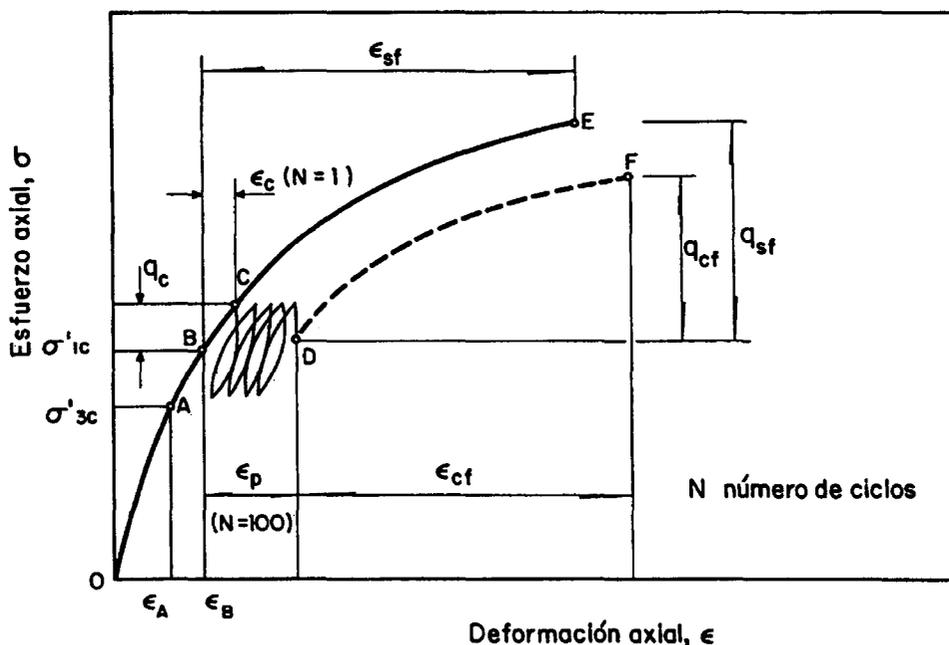


Fig. 4 Esquema del programa de ensayos y definiciones

La investigación (O'Reilly et al. 1989) ha mostrado que un suelo cohesivo sometido a carga monotónica incrementa su resistencia al aumentar la velocidad de aplicación de carga. Otros estudios (Dobry y Vucetic, 1987) indican que el comportamiento bajo carga cíclica difiere considerablemente del de carga monotónica, presentándose la reducción del módulo de deformación del suelo, lo que se conoce como ablandamiento, y la pérdida de resistencia al esfuerzo cortante, debido al deterioro de la estructura del suelo por la carga cíclica.

En forma simple, un elemento de suelo debajo de una cimentación puede considerarse sujeto a un esfuerzo inicial constante 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 de esfuerzos y permitirle que alcance una condición estable, después de lo cual se le aplica carga cíclica que simule la acción sísmica.

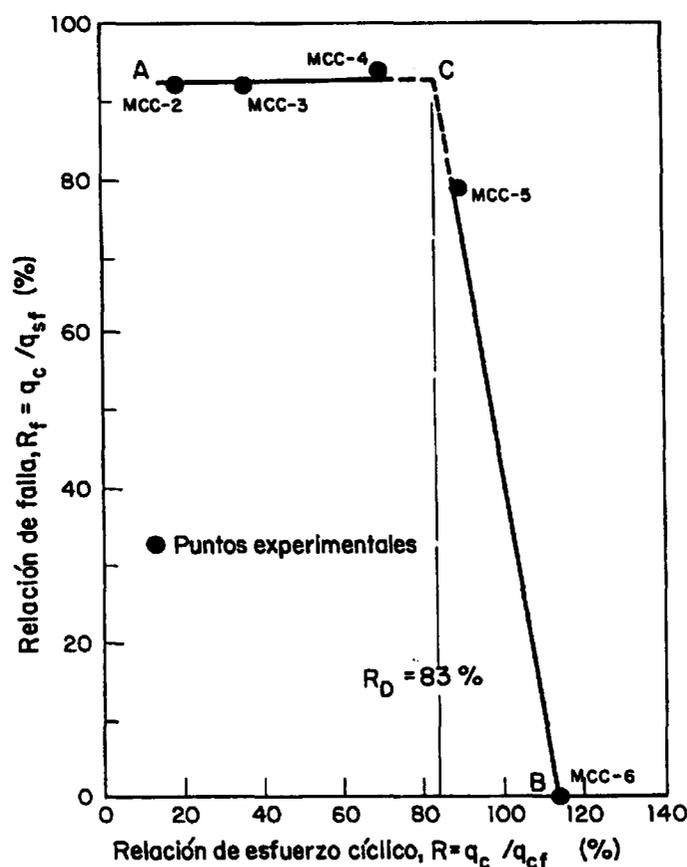


Fig. 5 Relación de falla vs Relación de esfuerzo cíclico (Díaz Rodríguez, 1989)

Con base en lo anterior, se elaboró un amplio y ambicioso programa de ensayos triaxiales consolidados-no drenados sobre muestras inalteradas del subsuelo de la ciudad de México. Para una primera etapa, las muestras ensayadas se extrajeron de una profundidad de 11 m, con un contenido natural de agua promedio, ω_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 ensayos en forma esquemática aparece en la figura 4. Se apli-

caron 100 ciclos de esfuerzo, cuando la muestra resistió sin fallar, se realizó un ensaye monotónico a la falla para determinar la resistencia poscíclica q_{sf} . Los resultados permitieron conocer un parámetro característico de las arcillas de la ciudad de México (Díaz Rodríguez, 1989) y que se ha denominado relación umbral de esfuerzos dinámicos, R_D (Fig. 5). Este nuevo parámetro tiene las siguientes características: (a) que es aproximadamente una constante y (b) que tiene un valor alto, es decir una $R = R_D \approx 83\%$. La relación umbral de esfuerzos dinámicos, R_D , define dos patrones de comportamiento dinámico de las arcillas 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.
- b) Para $R > R_D$ se presenta un gran deterioro con lazos de histéresis abiertos, y por tanto una marcada reducción de la resistencia al esfuerzo cortante.

Se obtuvieron tres relaciones empíricas entre: el módulo de Young equivalente normalizado, E_{cq}/q_{sf} , la relación de esfuerzos, R , y la relación de amortiguamiento, λ , con la amplitud de deformación cíclica, ϵ_c .

$$E_{cq}/q_{sf} = 52.56\epsilon_c^{-0.31} \quad (1)$$

$$R = 52.55\epsilon_c^{0.68} \quad (2)$$

$$\lambda = 7.5 + 2.4\epsilon_c \quad (3)$$

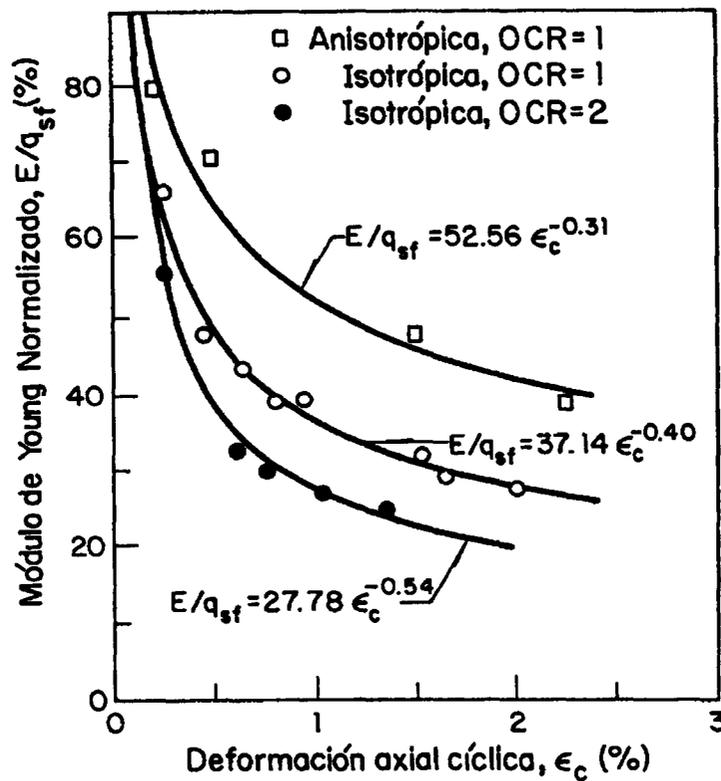


Fig. 6 Módulo de Young equivalente normalizado vs deformación cíclica

El efecto de la relación de preconsolidación, OCR, se investigó (García Cabana, 1987; Díaz Rodríguez, 1988a) 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 ($\sigma'_c = 0.43 \text{ kg/cm}^2$) a la cual se designó como $\text{OCR} = 1$, estrictamente este OCR es mayor que uno, si se tiene en cuenta que el esfuerzo crítico σ_b , es mayor que el esfuerzo efectivo vertical, σ_{oi} , 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, $\sigma'_c = 0.86 \text{ kg/cm}^2$ y después se efectuó una descarga hasta $\sigma'_c = 0.43 \text{ kg/cm}^2$, denotando un $\text{OCR} = 2$, resulta conveniente que ambas series de ensayos tengan el mismo esfuerzo de confinamiento es decir $\sigma'_c = 0.43 \text{ kg/cm}^2$.

Los resultados indican que existe una clara diferencia de comportamiento entre las series A y B, es decir los resultados son sensibles a la historia de esfuerzos en particular al OCR. Se obtuvieron expresiones empíricas para la relación de esfuerzos cíclicos, Módulo de Young equivalente normalizado y relación de amortiguamiento, en función de la amplitud de deformación cíclica y la OCR.

En términos generales, puede decirse que los especímenes con $\text{OCR}=2$ resultaron más deformables que aquellos con $\text{OCR} \approx 1$.

Al comparar el comportamiento de especímenes anisótricamente consolidados e isotrópicamente consolidados así como el efecto de la OCR (Fig. 6), se puede observar (Díaz Rodríguez, 1989b) que los resultados están bien definidos y siguen un comportamiento no errático.

La relación entre R versus ϵ_c se muestra en la figura 7 e indica que las muestras anisótricamente consolidadas son menos deformables que las consolidadas isotrópicamente.

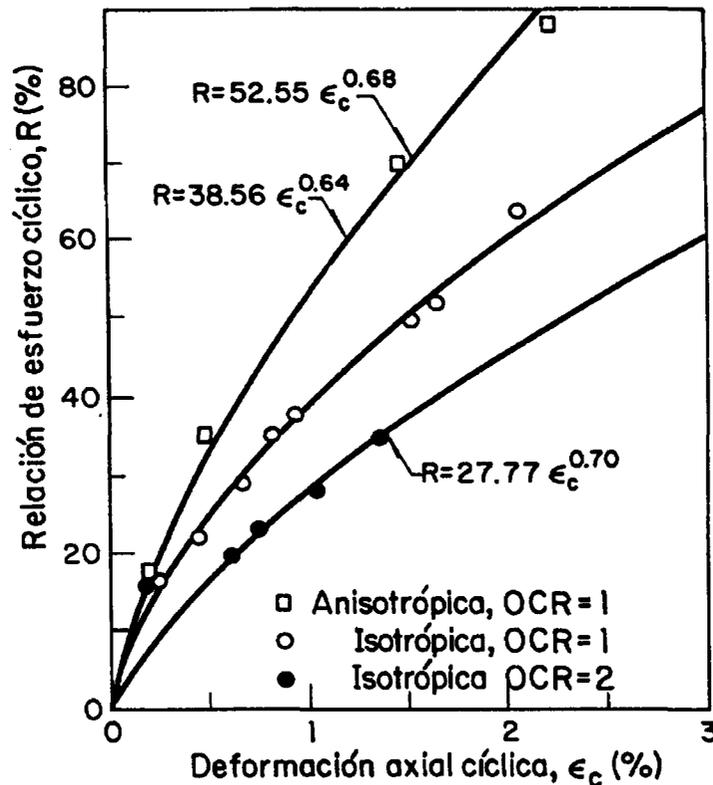


Fig. 7 Relación de esfuerzos cíclicos vs deformación cíclica

Para muchas arcillas, un parámetro principal en el comportamiento dinámico es el índice de plasticidad, IP (Dobry y Vucetic, 1987, Romo et al, 1989); las arcillas con un IP grande se supone tienen una estructura abierta, por tanto, para una deformación especificada estos suelos experimentan menor degradación durante la carga cíclica. Las arcillas de las ciudad de México tienen un IP grande, por tanto, deben tener una estructura muy flexible, que requiere una deformación grande para que se desarrolle un comportamiento no-lineal.

Tomando en cuenta que el trabajo histerético, W , se define como el área encerrada por el lazo de histéresis y representa la energía total pérdida durante cada ciclo, Díaz-Rodríguez (1993) basado en resultados de corte simple cíclico, propuso la curva del trabajo histerético acumulado con el número de ciclos, como una forma alterna para definir R_D . Cuando $R < R_D$ el trabajo histerético acumulado con el número de ciclos es lineal, el suelo no disipa mucha energía. A mayores niveles ($R > R_D$) el patrón fue diferente, la gráfica es no lineal, con mucho mayor energía disipada por ciclo y una considerable degradación.

4. MODULO DE RIGIDEZ Y AMORTIGUAMIENTO

La respuesta de un espécimen de suelo durante un ciclo completo de carga y descarga cuando es sometido a una sollicitación cíclica se manifiesta en la curva esfuerzo-deformación (lazo de histéresis).

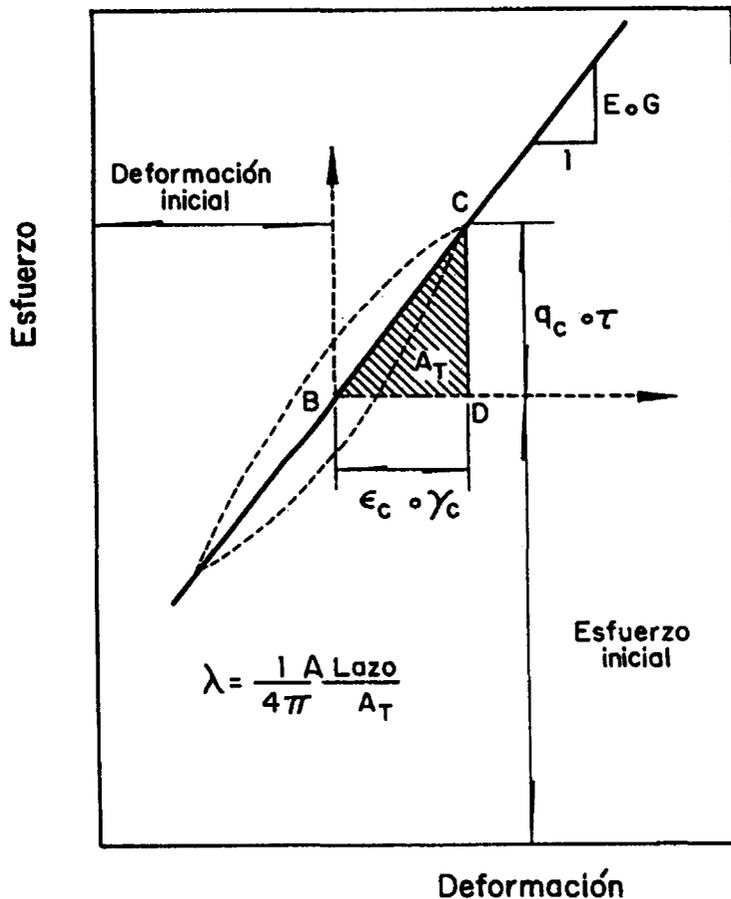


Fig. 8 Lazo de histéresis y definiciones

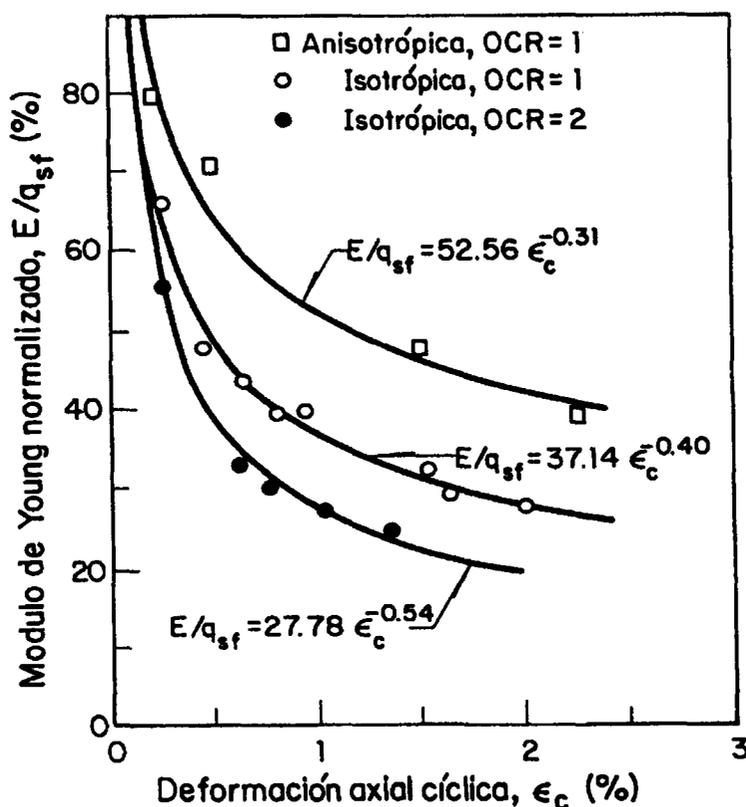


Fig. 9 Módulo de Young equivalente

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 idealizarse como se muestra en la figura 8. A partir de dicha figura es posible calcular el módulo secante y la relación de amortiguamiento. Estos parámetros varían con la amplitud de la deformación alcanzada.

El módulo secante se define como la pendiente de la recta que une los puntos extremos del 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 equivalente, λ , la cual se expresa como:

$$\lambda = \frac{1}{4\pi} \frac{\text{Área del lazo de histéresis}}{\text{Área del triángulo}}$$

En las figuras 9 y 10, se presentan los resultados obtenidos mediante cámara triaxial cíclica (Díaz-Rodríguez, 1989).

La figura 9 muestra la variación del módulo de Young equivalente, 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 como consecuencia con propiedades índice diferentes, los resultados siguen tendencias bien definidas.

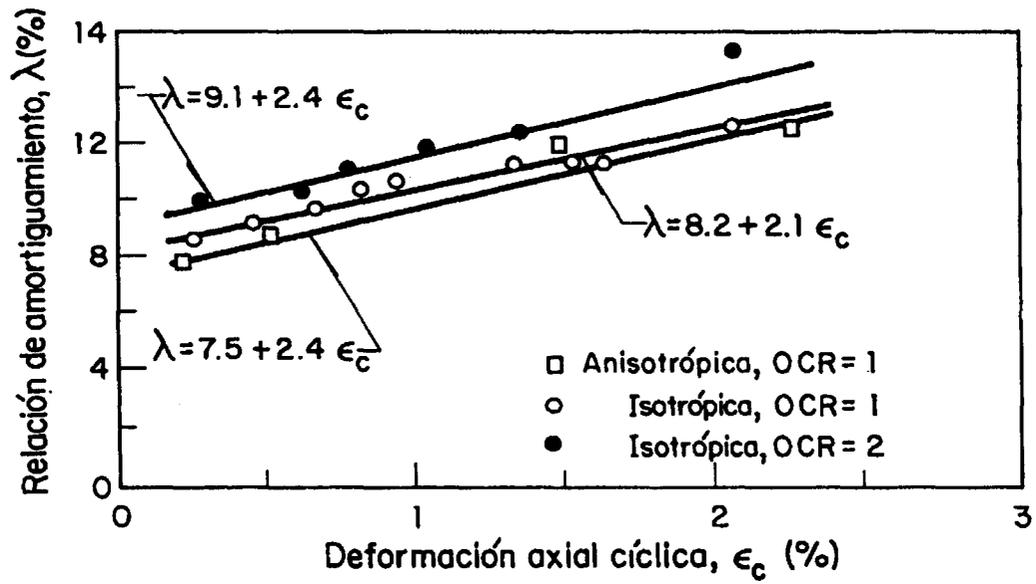


Fig. 10 Relación de amortiguamiento

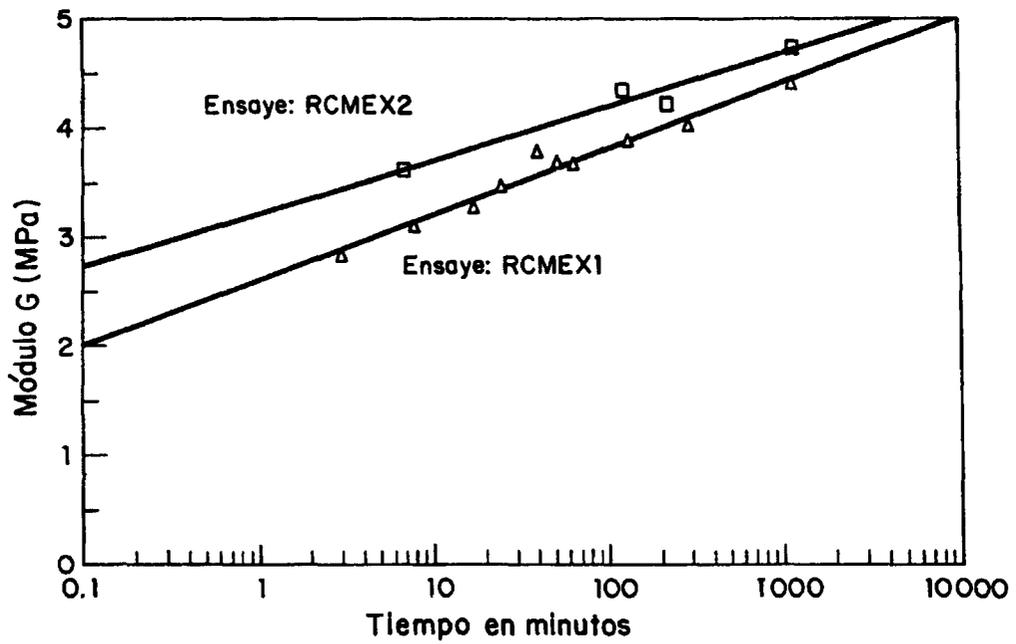


Fig. 11 Módulo de rigidez vs duración del confinamiento

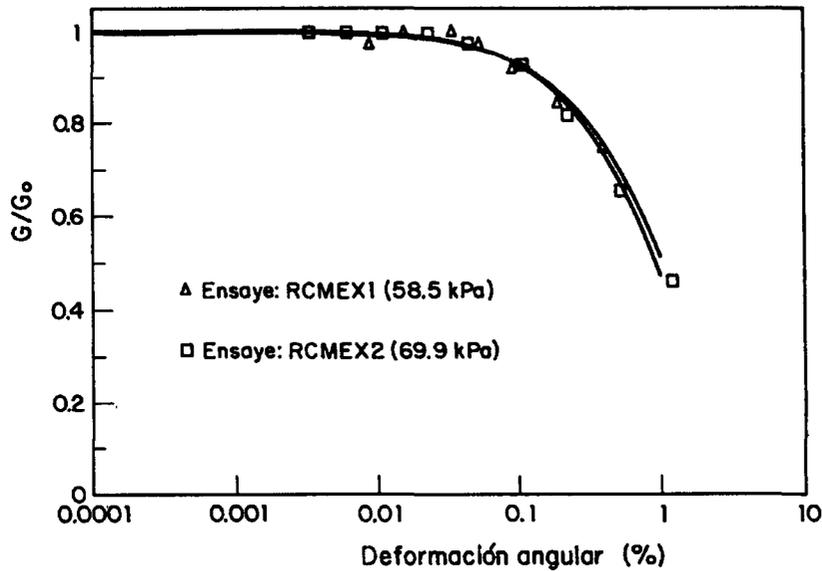


Fig. 12 Curvas de reducción del módulo normalizado

La relación entre la deformación axial y el amortiguamiento se presenta en la figura 10. Se aprecia que la relación de amortiguamiento equivalente, λ , sigue una tendencia lineal en el rango de deformaciones estudiadas tanto para diferentes OCRs 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 (Díaz-Rodríguez, 1992).

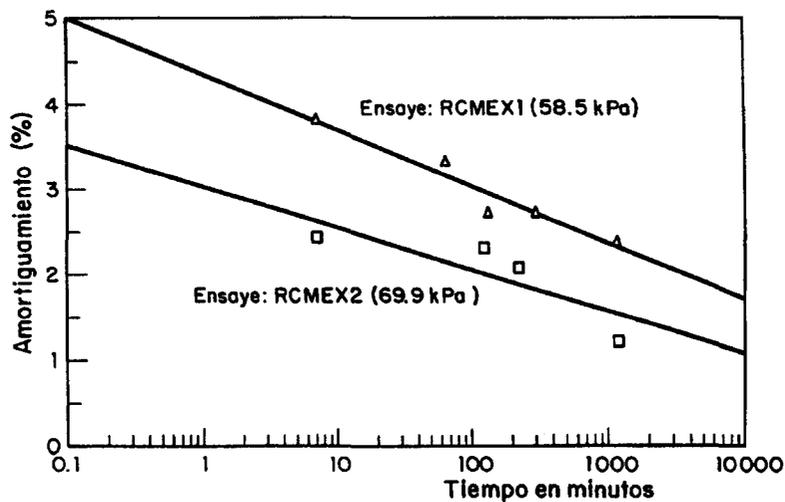


Fig. 13 Amortiguamiento vs tiempo

La evolución del módulo G durante el proceso de consolidación se presenta en la figura 11, los resultados mostraron que el módulo G para pequeñas deformaciones (8×10^{-5} a 2×10^{-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 para esfuerzo de confinamiento inferior al esfuerzo crítico ($OCR \approx 2$) los efectos del tiempo deben tomarse en cuenta en la selección del módulo G a partir de resultados de laboratorio.

Las curvas de reducción del módulo G con la amplitud de deformación, γ , normalizadas respecto al módulo G_0 para pequeñas deformaciones se presentan en la figura 12. En dicha figura se observa que el efecto de la presión de confinamiento desaparece, asimismo el módulo G es aproximadamente constante para deformaciones hasta de 0.1%. Fig. 14 Módulo y amortiguamiento

Si la frontera que separa el comportamiento lineal y el no-lineal, es arbitrariamente definida como el valor de γ para el cual $G/G_0 = 0.80$. Las arcillas de la ciudad de México tienen el comportamiento lineal más grande entre todas las arcillas que se han estudiado en la literatura: $G/G_0 = 0.80$ para $\gamma \approx 0.3\%$.

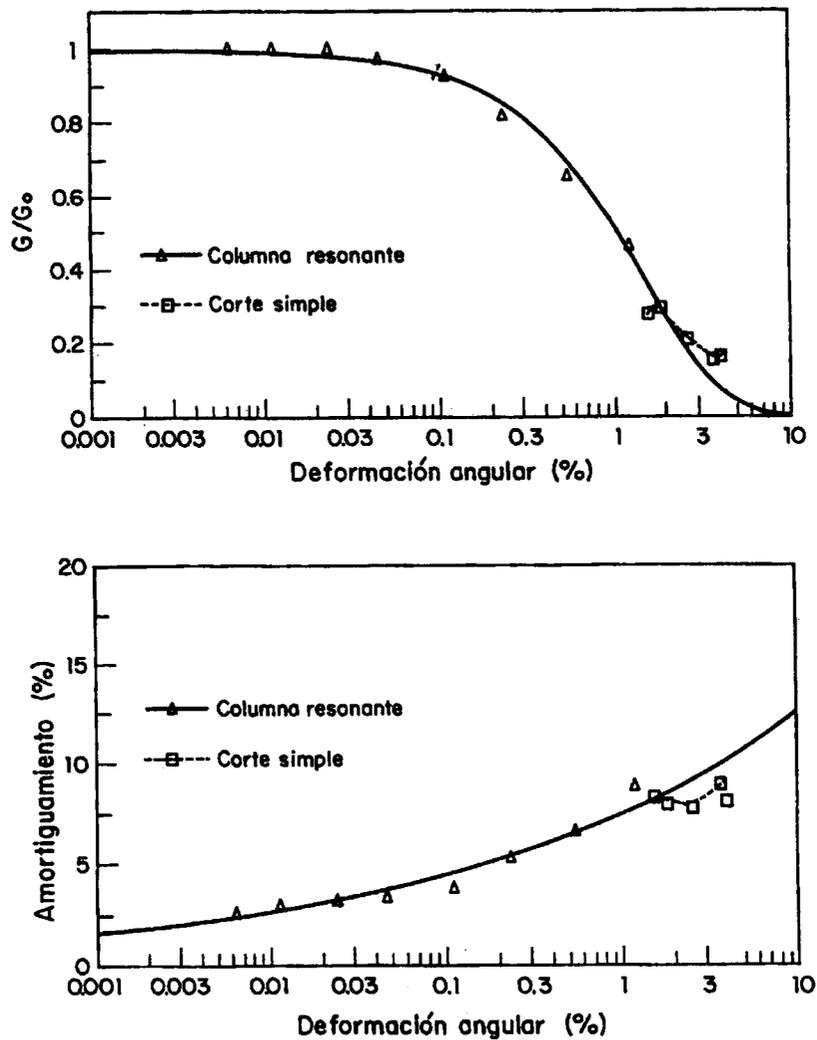


Fig. 14 Módulo y amortiguamiento

La evolución de la relación de amortiguamiento durante el proceso de consolidación se presenta en la figura 13, 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, λ , a partir de ensayos de laboratorio.

La figura 14 presenta los resultados combinados de columna resonante y corte simple cíclico, tanto para la curva de reducción del módulo normalizado como para el amortiguamiento. Se aprecia una buena congruencia de resultados.

5. CONCLUSIONES

Los resultados presentados apoyan las conclusiones siguientes:

1. Las arcillas de la ciudad de México (ACM) exhiben propiedades atípicas debido a su origen volcánico y lacustre.
2. La aplicación de carga cíclica de muy pequeña amplitud de esfuerzos ocasiona deformaciones, cuya magnitud está relacionada con el esfuerzo crítico.
3. La carga cíclica puede acelerar el proceso de consolidación e incluso modificar el esfuerzo crítico.
4. Existe una relación umbral de esfuerzo dinámico, 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.
5. 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 de las ACM.
6. La curva de reducción del módulo con la deformación da una deformación umbral de 0.1% indicando que las ACM tienen el comportamiento lineal más grande entre todas las arcillas.
7. Las gráficas del trabajo histerético acumulado versus el número de ciclos, para distintas relaciones de esfuerzos cíclicos, R , permiten proponer una forma alterna para definir la relación umbral de esfuerzos dinámicos, R_D .

6. REFERENCIAS

- Chávez, M. and D. de León, (1984), "Reliability of nonlinear systems with uncertain parameters and random seismic excitation", VIII WCEE, San Francisco, Cal., Vol. IV: 435-441.
- Chávez, M. (1992), "Seismic hazard and structural safety in Mexico City", X WCEE, Madrid, Vol. X: 5797-5802.
- Díaz-Rodríguez, J. A. y Casales Galván, C. (1983), "Efecto de vibraciones en el proceso de consolidación de un suelo cohesivo", VII Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, Puebla, Puebla: 259-268.
- Díaz Rodríguez, J. A. y Casales Galván, C. (1986), "Deformación unidimensional de la arcilla de la ciudad de México, por vibraciones", Simposium Los sismos de 1985: Casos de Mecánica de Suelos, Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, México, D.F.: 301-308.
- Díaz Rodríguez, J. A. (1988a), "Overconsolidated Mexico City clay under cyclic loading", Ninth World Conference on Earthquake Engineering, Tokio-Kyoto, Japan(III): 29-34.

- Díaz Rodríguez, J. A. (1988b), "Grupos de trabajo académico: una opción para la docencia", XII Reunión Nacional de Mecánica de Suelos, Monterrey, N.L.
- Díaz Rodríguez, J. A. (1989a), "Behavior of Mexico City clay subjected to undrained repeated loading", *Canadian Geotechnical Journal* 26(1): 159-162.
- Díaz Rodríguez, J. A. (1989b), "Effect of repeated loading on the strength of Mexico City clay", 4th International Conference on Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Mexico, D.F.: 197-208.
- Díaz Rodríguez, J. A. y Leyte Guerrero, F. (1989), "Consolidation of Mexico City clay under repeated loading" XII International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Río de Janeiro, Brasil (1/10): 33-37.
- Díaz Rodríguez, J. A. Leroueil, S. y Alemán, J.D. (1992) "Yielding of Mexico City clay and other natural clays", *J. Geotech. Engrg. Div., ASCE* 118(7): 981-995.
- Díaz Rodríguez, J. A. (1992), "On dynamic properties of Mexico City clay for wide strain range", Tenth World Conference on Earthquake Engineering, Madrid (3): 1257-1262.
- Díaz Rodríguez, J. A. (1993), "Comportamiento de la arcilla de la ciudad de México en corte simple cíclico", X Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, Puerto Vallarta, México: 585-590.
- Dobry, R. y Vucetic, M. (1987), "Dynamic properties and seismic response of soft clay deposits", *Proc. International Symposium on Geotechnical Engineering of Soft Soils, México, Vol. 2.*
- García Cabana, M. (1987), "Efecto de la carga cíclica en muestras isotrópicamente consolidadas de la ciudad de México", Tesis de Maestría, DEPFI, UNAM.
- Marsal, R.J. y Mazari, M. (1959), "El subsuelo de la ciudad de México", Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, México.
- O'Reilly, M.P., Brown, S.F. y Overy, R.F. (1989), "Viscous effects observed in tests on an anisotropically consolidated silty clay", *Geotechnique* 39(1): 153-158.
- Romo, M.P. et al (1989), "Local site effects on Mexico City ground motions", *Proc. ICSMFE, Vol. 3: 2001-2009.*
- Zeevaert, L. (1943), "An investigation of the engineering characteristics of the volcanic lacustrine clay deposit beneath Mexico City", Tesis doctoral, University of Illinois, Urban, U.S.A.
- Zeevaert, L. (1982), "Foundation engineering for difficult subsoil conditions", 2nd ed., Van Nostrand-Reinhold Co., New York
- Zeevaert, L. (1988), "Sismo-Geodinámica de la Superficie del Suelo", Editora e Impresora International, México.