

COMPORTAMIENTO MONOTÓNICO DE SUELOS DIATOMÁCEOS¹

Jorge Abraham Díaz-Rodríguez²

Resumen: Hay varios sitios en el mundo donde se ha detectado la presencia de microfósiles (diatomeas) en los depósitos naturales de suelo (ej., la ciudad de México y la Bahía de Osaka, Japón). Estos depósitos naturales de suelos que contienen diatomeas (suelos diatomáceos) se caracterizan por tener propiedades físicas y mecánicas singulares, que no siguen las correlaciones obtenidas y aceptadas para la mayoría de los suelos. Las diatomeas son ejemplos sobresalientes de materiales naturales micro y nano-estructurados que pueden afectar las propiedades de los suelos. Sin embargo, la interacción entre las diatomeas, las partículas de arcilla y el agua requiere una investigación adicional. Mientras las diatomeas se usan en muchas aplicaciones científicas, su uso en la ingeniería geotécnica es escaso. Teniendo en cuenta sus características únicas, hay un gran potencial para utilizar diatomeas en el desarrollo de suelos diseñados para aplicaciones en ingeniería geotécnica y geo-ambiental. Este artículo presenta la investigación realizada sobre mezclas artificiales de diatomita-kaolinita utilizando el equipo de corte simple, bajo condiciones no drenadas. Los resultados muestran que las características de las curvas esfuerzo-deformación son dependientes del contenido de diatomeas. Con base en los resultados de esta investigación y tomando en cuenta la presencia de diatomeas en el suelo volcánico-lacustre de la ciudad de México, se sugiere una explicación de algunas de sus propiedades.

Palabras clave: ángulo de fricción, diatomeas, mezclas de suelo, suelos de la ciudad de México.

MONOTONIC BEHAVIOR OF DIATOMACEOUS SOILS

Abstract: There are several sites in the world where diatom microfossils have been detected in soil deposits (*e.g.*, Mexico City, Mexico, and Osaka Bay, Japan). These natural soil deposits have singular physical and mechanical properties that do not follow the empirical relations that are well-established for soils. However, the specialized literature on the topic is scarce. The unicellular algae known as diatoms are outstanding examples of micro- and nanostructured material in nature that may control mechanical and hydraulic properties of soils. However, comprehensive studies on the interaction between diatoms, clay particles and water are non-existent. While diatoms are used in many engineering and scientific applications, very few geotechnical applications utilize diatoms. Yet, given their unique characteristics, there is great potential for utilizing diatoms in the development of engineered particulate materials for geotechnical and geoenvironmental applications. Simple shear tests were performed in this study to investigate undrained shear strength of artificial mixtures of diatomite-kaolin. The stress-strain curves show different characteristics depending on diatom content. Taking into account the presence of diatoms microfossils in Mexico City sediments, some of their unique engineering properties can be well explained.

Keywords: diatom microfossils, diatomite, friction angle, Mexico City soils, soil mixtures, strength.

INTRODUCCIÓN

Hay varios sitios en el mundo donde se ha detectado la presencia de microfósiles (diatomeas) en los depósitos naturales de suelo (ej., la ciudad de México; la Bahía de Osaka, Japón; California, EUA; los sedimentos marinos, entre otros). Estos depósitos naturales de suelos que contienen diatomeas (suelos diatomáceos) se caracterizan por

¹ Artículo recibido el 23 de agosto de 2011 y aceptado para publicación el 15 de noviembre de 2011.

² Profesor de Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, México DF, E-mail: jadrdez@unam.mx

tener propiedades físicas y mecánicas singulares, que no siguen las bien establecidas correlaciones geotécnicas entre propiedades índice y los parámetros de deformación y resistencia. Sin embargo, la literatura especializada sobre el tema es muy escasa, por lo que constituye un magnífico campo de investigación para explicar las causas y mecanismos responsables de dicho comportamiento.

Los antiguos ambientes lacustres constituyen una fuente importante de estudio, ya que guardan información en los sedimentos de la cuenca en que se formaron y de las condiciones ambientales que alguna vez prevalecieron en su entorno. Uno de los indicadores biológicos más importantes en los sedimentos lacustres son las diatomeas.

LAS DIATOMEAS

Las diatomeas son algas microscópicas fotosintéticas que crecen en ambientes de agua dulce o salada, pero rica en sílice disuelta. Un factor decisivo para la presencia de sílice disuelta en un cuerpo de agua es la existencia de actividad volcánica en el área.

La frústula o esqueleto de las diatomeas está compuesta de sílice opalina o biogénica. Es simétrica en forma, con una gran proporción de vacíos, decoradas con un patrón único de características del tamaño de nanómetros (poros, canales, espinas). Tienen una superficie rugosa con protuberancias y muescas (Round et al., 1990).

La morfología de las diatomeas se ilustra en la Figura 1. Las formas más usuales son cilíndricas, esféricas o de disco circular; con dimensiones comprendidas entre 1 a 500 micras.

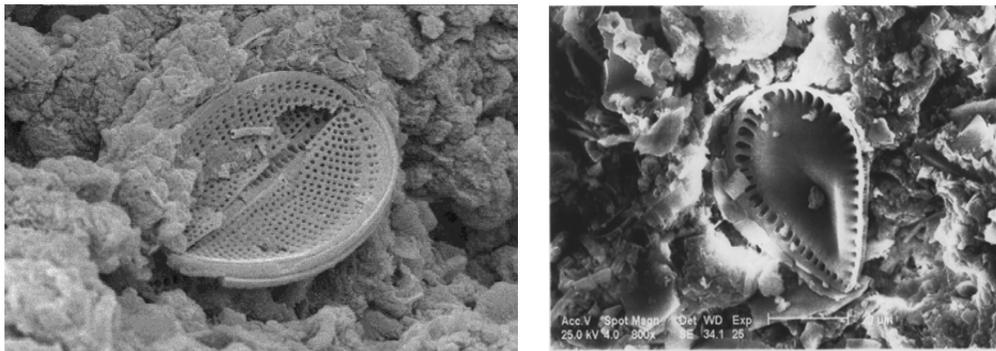


Figura 1: Fotomicrografías de diatomeas (Díaz-Rodríguez et al., 1998)

La diatomita o tierra de diatomeas es una roca sedimentaria, porosa y de bajo peso volumétrico que se forma con la acumulación y compactación de las frústulas de diatomeas. La diatomita es inerte, con una composición de aproximadamente 90% de sílice y el resto son óxidos de hierro y aluminio. Tiene una gran capacidad de absorción y una extensa área superficial (Antonides, 1998).

El interés de la ingeniería en las diatomeas radica en que son ejemplos sobresalientes de materiales micro y nano-estructurados que afectan las propiedades físicas, mecánicas e hidráulicas de los suelos.

LOS SUELOS VOLCÁNICO-LACUSTRES DE LA CIUDAD DE MÉXICO

La cuenca de México, donde está situada la ciudad de México, ocupa un área de 9,600 km², es predominantemente una planicie lacustre, localizada a 2,250 m sobre el nivel medio del mar. Hace 700,000 años las erupciones volcánicas cerraron la cuenca con una enorme cortina natural, la sierra del Chichinautzin, lo que originó un lago de 2,000 km². El lago se fue rellenando con materiales producto de la desintegración de las rocas, materiales piroclásticos, gravas y arenas transportadas por las corrientes fluviales. Otros constituyentes son productos finos y ultrafinos de ceniza volcánica que fueron generados por las erupciones volcánicas, que enriquecieron con sílice disuelta las aguas del lago, lo cual produjo la proliferación de diatomeas.

Los suelos de la ciudad de México se formaron en un ambiente lacustre biológicamente activo. El intemperismo químico tomó lugar en el sistema de vacíos de los sedimentos depositados y provocó la disolución de los granos de ceniza volcánica, y la reprecipitación de nuevos minerales. El resultado, 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 de la ciudad de México no pueden considerarse dentro de una clasificación convencional. Según Mesri, Rokhsar & Bohor (1975), la fracción tamaño limo constituye el 65% del suelo de la ciudad de México y está constituida principalmente por diatomeas o fragmentos de éstas.

Los suelos de la ciudad de México son singulares, en el contexto de muchos otros suelos naturales (Díaz-Rodríguez et al., 1992; Díaz-Rodríguez, 2003). Tienen una superficie específica ($S_s = 40\text{-}350 \text{ m}^2/\text{g}$), relación de vacíos ($e = 3\text{-}9$), límites de Atterberg ($w_L = 140 - 380\%$; $w_p = 5 - 112\%$), actividad ($A = 1\text{-}8$) y un ángulo de fricción ($\phi = 43 - 47^\circ$). La velocidad de propagación de ondas de cortante es constante con la profundidad, en los primeros 40 m ($V_s = 70 - 90 \text{ m/s}$). El esfuerzo de fluencia σ'_y es mayor que el esfuerzo vertical efectivo *in situ* σ'_{v0} . La aparente preconsolidación se debe a la diagénesis (Díaz-Rodríguez y Santamarina, 2001). De ahí que las propiedades y el comportamiento de los suelos de la ciudad de México presenten retos de interpretación que contradicen el comportamiento clásico de los suelos.

MEZCLAS ARTIFICIALES DIATOMITA-CAOLINITA

Se realizó un estudio en mezclas artificiales diatomita-caolinita para conocer la influencia del contenido de diatomita en las propiedades de resistencia de dichas mezclas. El programa experimental consistió en elaborar cinco mezclas: la diatomita (D) se mezcló con la caolinita (K) en proporciones de 0% de diatomita (100K), 20% de diatomita (20D + 80K), 40% de diatomita (40D + 60K), 60% de diatomita (60D + 40K) y 100% diatomita (100D). Todas las mezclas se prepararon con base en proporciones en peso seco. La diatomita y la caolinita que se usaron en esta investigación son materiales comercialmente disponibles en México.

Preparación de mezclas

Las mezclas se homogeneizaron en seco, se colocaron en el tazón de una mezcladora y se agregó la cantidad de agua destilada necesaria para que la mezcla tenga la consistencia cercana al límite líquido. La mezcla húmeda se colocó en capas en un molde cilíndrico de 12.9 cm de diámetro y 16 cm de altura. El molde se usó como celda de consolidación, la cual se colocó en un marco de consolidación, en donde se le aplicó un esfuerzo vertical de 130 kPa, este esfuerzo se mantuvo constante por 28 días. Al término de los 28 días se extrajo la muestra del molde y se procedió a labrar los especímenes y a su correspondiente ensayo.

Ensayos de laboratorio

Las pruebas índice se realizaron de acuerdo con la normas ASTM. Para determinar la resistencia al esfuerzo cortante de las mezclas, se utilizó un equipo de corte simple, tipo NGI (Bjerrum y Landva, 1966). Los especímenes de suelo, de 70 mm de diámetro y 20 mm de altura, se colocaron dentro de una membrana flexible con un confinamiento proporcionado por un conjunto de anillos planos de teflón. El espécimen de suelo se sometió a un esfuerzo vertical efectivo de consolidación σ'_{vc} y a un esfuerzo horizontal efectivo de consolidación $\sigma'_{hc} = K_0 \cdot \sigma'_{vc}$. No se realizó la saturación de especímenes mediante contra presión, ya que se utilizó el concepto de ensayos a volumen constante, manteniendo la altura del espécimen fija (Finn y Vaid, 1977).

Durante los ensayos no se midió la presión de poro en forma directa, ésta se infirió del cambio de esfuerzo vertical (Finn y Vaid, 1977; Dyvik et al., 1987). Los ensayos monotónicos de deformación controlada se efectuaron a una velocidad de deformación $\dot{\epsilon} = 1.5\%/h$.

Se realizaron dos series de ensayos monotónicos no drenados. La Serie NC sobre especímenes normalmente consolidados, con un esfuerzo $\sigma'_{vc} = 260 \text{ kPa}$ ($OCR = 1$). La serie OC sobre especímenes preconsolidados, primero se consolidaron a un esfuerzo $\sigma'_{vc} = 260 \text{ kPa}$ y después se descargaron a un esfuerzo $\sigma'_{vc} = 130 \text{ kPa}$, lo que indujo un $OCR = 2$.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La Tabla 1 muestra los límites de Atterberg, el peso volumétrico seco y la actividad de las muestras ensayadas. Los límites de Atterberg se incrementan con el aumento del contenido de diatomita, sin embargo, el índice de plasticidad decrece. La actividad ($= I_p/\%$ de tamaño $\leq 2\mu\text{m}$) muestra un aparente incremento con el aumento del contenido de diatomeas. Algunos suelos diatomáceos naturales, también presentan valores altos de actividad, a pesar de que la fracción arcillosa no es alta. Shiwakoti et al. (2002) sugieren que las partículas de diatomeas no se comportan como partículas inertes; por el contrario, se comportan como partículas activas, tipo los minerales de arcilla. Lo anterior puede indicar que la actividad no es un buen parámetro para evaluar la contribución de pequeñas partículas porosas que no son minerales de arcilla.

Tabla 1: Propiedades índice de las mezclas diatomita-caolinita.

Mezclas	w_L (%)	w_P (%)	I_p (%)	γ_d (kN/m^3)	Actividad
D+K					
100K	56.4	28.9	27.5	11.06	0.42
20D+80K	58.9	33.7	25.2	10.98	0.48
40D+60K	68.6	46.8	21.8	10.43	0.53
60D+40K	75.5	56.7	18.8	9.48	0.65

La resistencia al esfuerzo cortante de las mezclas de diatomita-caolinita se estudió mediante ensayos no drenados empleando el aparato de corte simple. Los resultados para la Serie NC se muestran en la Tabla 2 y los de la Serie OC en la Tabla 3. La curvas esfuerzo-deformación para $\text{OCR} = 1$ se presentan en la Figura 2, donde también se indica el desarrollo de la presión de poro con la deformación angular. La Figura 2 claramente muestra que las curvas esfuerzo-deformación son dependientes del contenido de diatomita de las mezclas. La resistencia máxima ($\tau_{\text{máx}} = S_u$) se incrementa con el aumento de diatomita. El incremento de resistencia es evidente para contenidos de diatomita mayores de 20%. La deformación necesaria para alcanzar $\tau_{\text{máx}}$ se eleva con el contenido de diatomita. La presión de poro generada durante el proceso de falla decrece con el contenido de diatomita. Un comportamiento similar se observó en los suelos con $\text{OCR} = 2$ (Figura 3).

Tabla 2: Resistencia al esfuerzo cortante de las mezclas de diatomita-caolinita para $\text{OCR} = 1$.

Mezclas	S_u/σ'_v	S_u/σ'_{vc}	ϕ' (grado)	γ_{peak} (%)	u_{peak} (kPa)
D+K					
100K	0.28	0.50	26.6	13.2	115.4
20D+80K	0.31	0.52	27.7	16.4	108.2
40D+60K	0.45	0.63	32	20.2	71.1
60D+40K	0.71	0.76	37	24.8	15.3
100D	0.57	0.75	36.9	23.5	62.9

Tabla 3: Resistencia al esfuerzo cortante de las mezclas de diatomita-caolinita para $\text{OCR} = 2$.

Mezclas	S_u/σ'_v	S_u/σ'_{vc}	ϕ' (grado)	γ_{peak} (%)	u_{peak} (kPa)
D+K					
100K	0.45	0.47	25.2	12	7
20D+80K	0.47	0.48	25.6	13.5	2.6
40D+60K	0.75	0.66	33.5	21.6	-16.6
60D+40K	1.10	0.74	36.7	22.1	-62.7
100D	0.85	0.77	37.8	25	-13

Las trayectorias de esfuerzo para los ensayos en corte simple se presentan en la Figura 4 para OCR = 1 y OCR = 2. Se puede apreciar claramente que las características de dilatación de las muestras de suelo se realzan con el contenido de diatomita.

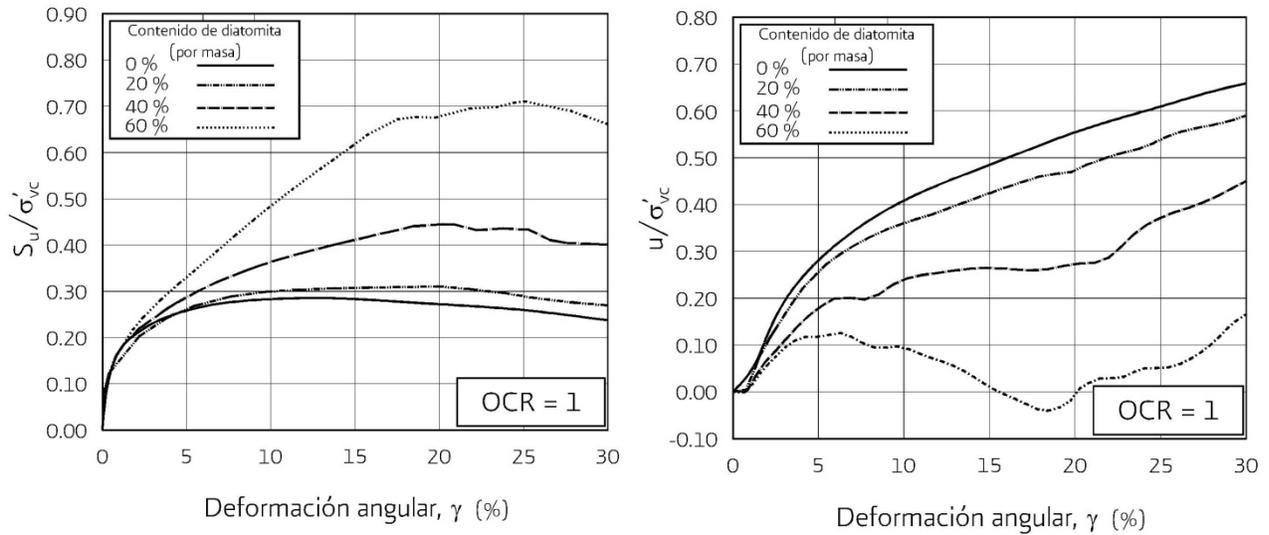


Figura 2: Curvas esfuerzo-deformación de ensayos de corte simple no drenado (OCR=1).

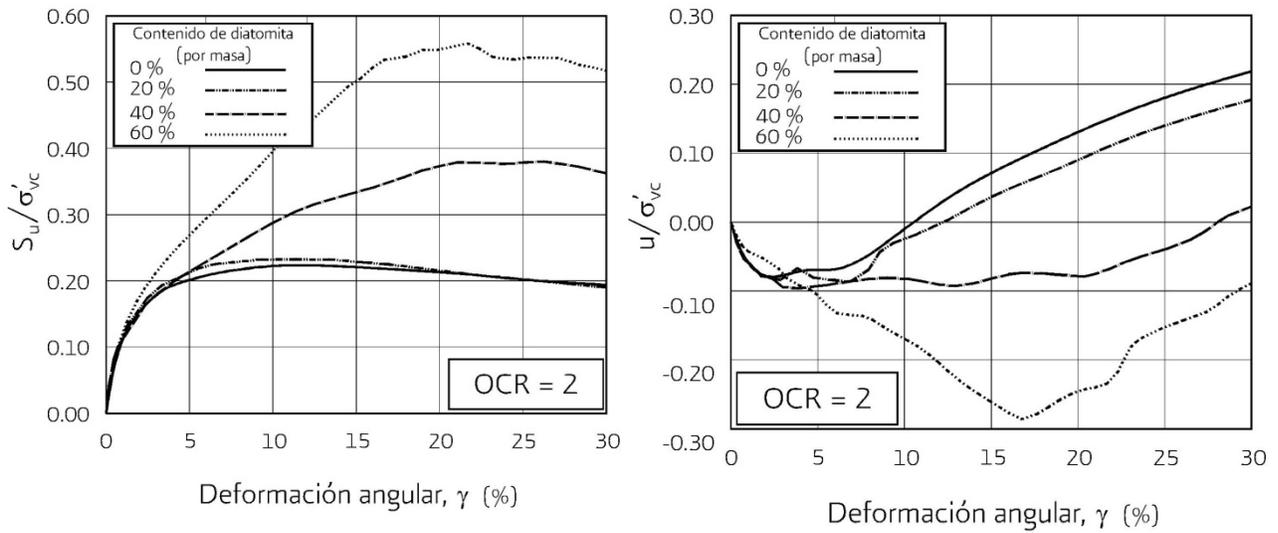


Figura 3: Curvas esfuerzo-deformación de ensayos de corte simple no drenado (OCR = 2).

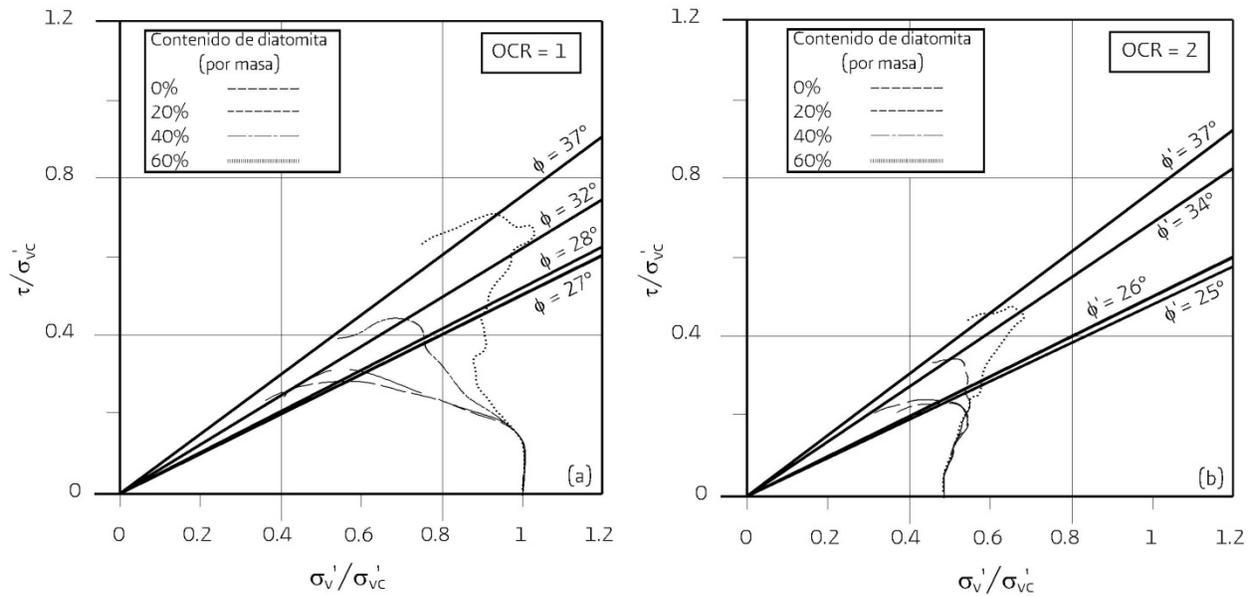


Figura 4: Trayectorias de esfuerzos no drenados para OCR = 1 y OCR = 2.

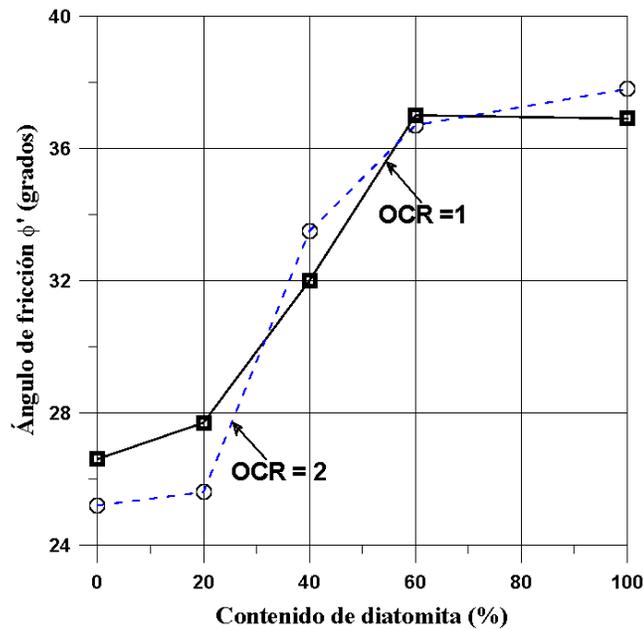


Figura 5: Relación entre ϕ' y el contenido de diatomita.

La relación entre el ángulo de fricción interna, ϕ' , y el contenido de diatomita para OCR = 1 y OCR = 2 se muestra en la Figura 5. El incremento de ϕ' para un incremento en el contenido de diatomita hasta del 20% es pequeño, 2.3% para OCR = 1 y 2% para OCR = 2; sin embargo, para contenidos de diatomita de 40% y 60%, el incremento es enorme (25.3% y 41%, respectivamente) para OCR = 1 y (33% y 45%, respectivamente) para OCR = 2.

El valor de S_u/σ'_{vc} de las mezclas ensayadas se relaciona con su OCR en la Figura 6. Para cada mezcla ensayada, se observa un incremento de S_u/σ'_{vc} con el contenido de diatomeas. En la Figura 6, la región sombreada, delimitada

por dos líneas rectas inclinadas, corresponden a los datos publicados por Ladd y Foott (1974) para arcillas con plasticidad comprendida entre $I_p = 12$ y $I_p = 75$. Los resultados de la ciudad de México (Díaz-Rodríguez y Santamarina, 2001) se ubican claramente arriba de los datos de Ladd & Foott (1974). Los datos de la ciudad de México se pueden aproximar (Wood, 1990) mediante:

$$\left(\frac{S_u}{\sigma'_{vc}}\right)_{OC} = \left(\frac{S_u}{\sigma'_{vc}}\right)_{NC} \cdot OCR^\beta = 0.85 \cdot OCR^{0.75}$$

El valor $\left(\frac{S_u}{\sigma'_{vc}}\right)_{NC}$ para los suelos de la ciudad de México es de 0.85; sin embargo, para otros suelos, dicho valor está comprendido entre 0.18 y 0.40. En general, se pueden esperar mayores valores de $\left(\frac{S_u}{\sigma'_{vc}}\right)_{NC}$ para suelos con efecto de tiempo (“aging”) y con mayor plasticidad (Bjerrum y Simons, 1960; Bjerrum, 1972). El exponente $\beta = 0.75$ es similar para otros suelos arcillosos. La Figura 6 muestra que la mezcla 100K presenta valores de $\frac{S_u}{\sigma'_{vc}}$ de 0.20 y 0.45 para $OCR = 1$ y $OCR = 2$, respectivamente; estos valores se ubican en la zona sombreada. Para contenidos de diatomita de 40% y 60%, los valores se ubican fuera de la zona sombreada y se acercan a los datos de la ciudad de México.

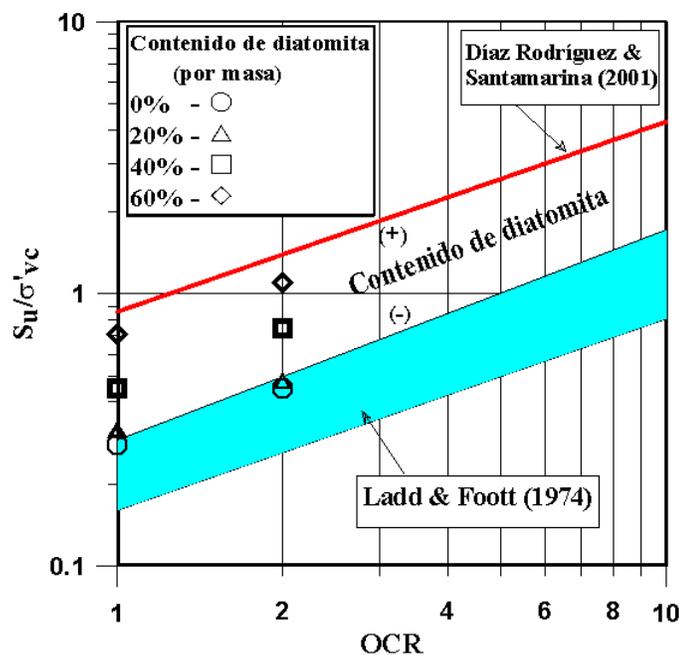


Figura 6: Efecto del contenido de diatomita sobre S_u/σ'_{vc} para $OCR = 1$ y $OCR = 2$.

Las propiedades singulares de los sedimentos volcánico-lacustres de la ciudad de México, tales como el contenido de agua, los límites de Atterberg, la actividad, la baja densidad y el alto ángulo de fricción, se pueden explicar con base en la presencia de diatomeas en dichos suelos.

CONCLUSIONES

Las diatomeas son ejemplos sobresalientes de materiales naturales nano-estructurados que afectan a las propiedades mecánicas, hidráulicas y fisicoquímicas de los suelos. Los suelos volcánico-lacustres de la ciudad de México son suelos diatomáceos. Los resultados obtenidos en esta investigación sugieren una explicación de algunas propiedades de los suelos de la ciudad de México.

Las mezclas artificiales de diatomita-caolinita exhiben las siguientes características: Los límites de Atterberg aumentan con el incremento del contenido de diatomita (CD). Sin embargo, el índice de plasticidad disminuye. La actividad no es un buen parámetro para evaluar la influencia del CD. Las curvas esfuerzo-deformación muestran diferentes características al aumentar el CD. La deformación para alcanzar $\tau_{m\acute{a}x}$ aumenta con

el incremento de CD. Las características de contracción de las mezclas disminuyen al incrementarse el CD. El ángulo de fricción de los suelos aumenta al incrementarse el CD. Los resultados que aquí se presentan sugieren que el contenido de diatomita es el responsable de algunas propiedades de los suelos volcánico-lacustres de la ciudad de México. Nuestro conocimiento sobre la interacción diatomeas, partículas de arcilla y el agua, es muy escaso. Tópicos como el efecto de las frústulas de diatomeas sobre la hidrodinámica y efectos físico-químicos en los suelos requiere nuestra atención.

AGRADECIMIENTO

Dante Fratta proporcionó valiosos comentarios sobre esta investigación. Jorge López-Molina realizó los ensayos de laboratorio. Guadalupe Salinas-Galindo realizó la edición del manuscrito.

REFERENCIAS

- Antonides, L.E., (1998). *Diatomite: U.S. Geological Survey Mineral Commodity Summaries 1998*, p. 56-57.
- Bjerrum, L. (1972). "Embankments on soft ground", *Conference on the Performance of Earth and Earth-Supported Structures*, ASCE, Purdue University, Vol. 2, pp. 1-54.
- Bjerrum, L. y Landva, A. (1966). "Direct simple-shear test on a Norwegian quick clay", *Géotechnique*, Vol. 16, No. 1, pp. 1-20.
- Bjerrum, L. y Simons, N.A. (1960). "Comparison of shear strength characteristics of normally consolidated clays", *Proceedings of the ASCE Research Conference on Shear Strength of Cohesive Soils*, Boulder, Colorado, pp. 711-726.
- Díaz-Rodríguez, J.A. (2003). "Characterization and engineering properties of Mexico City lacustrine soils", in *Characterization and Engineering Properties of Natural Soils*, Balkema Publishers, Vol. 1, pp. 725-755.
- Díaz-Rodríguez, J. A., Leroueil, S. y Alemán, J. D. (1992). "Yielding of Mexico City clay and other natural clays", *Journal of Geotechnical Engineering*, 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 sediments: a geotechnical perspective", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 35, No. 4, pp. 600-610.
- 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*, Vol. 127, No. 9, pp. 783-789.
- Dyvik, R., Berre, T., Lacasse, S. y Raadim, B. (1987). "Comparison of truly undrained and constant volume direct simple shear tests", *Géotechnique*, Vol. 37, No. 1, pp. 3-10.
- Finn, W. D. L. y Vaid, Y. P. (1977). "Liquefaction potential from drained constant volume cyclic simple shear test", *6th World Conference on Earthquake Engineering*, New Delhi, India, Vol. 6, pp. 7-12.
- Ladd, C.C. y Foott, R. (1974). "New design procedure for stability of soft clays", *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 100, No. 7, pp. 763-786.
- Mesri, G., Rokhsar, A. y Bohor, B. F. (1975). "Composition and compressibility of typical samples of Mexico City clay", *Géotechnique*, Vol.25, No. 3, pp. 527-554.
- Round, F. E., Crawford, R. M. y Mann, D. G. (1990). *The diatom: Biology & Morphology of the Genera*, Cambridge University Press, Cambridge, UK, 747 p.
- Shiwakoti, D. R., Tanaka, H., Tanaka, M. y Locat, J. (2002). "Influence of diatom microfossils on engineering properties of soils", *Soils and Foundations*, Vol. 42, No. 3, pp. 1-17.
- Wood, D. M. (1990). *Soil Behaviour and Critical State Soil Mechanics*, Cambridge University Press, Cambridge, UK, 365 p.