

Caracterización geomecánica de los suelos de Iztapalapa, México, para evaluar el fracturamiento causado por deformación diferencial



2011 Pan-Am CGS
Geotechnical Conference

Dora Carreón Freyre

Centro de Geociencias, UNAM, Queretaro, México

Marcos González Hernández

Centro de Geociencias, UNAM-CERG Delegación Iztapalapa

Mariano Cerca

Centro de Geociencias, UNAM, Queretaro, Queretaro

Raúl Gutiérrez Calderón, C. Alejandra Jiménez Sánchez

CERG-Delegación Iztapalapa, México City, México

ABSTRACT

The area covered by the municipality of Iztapalapa is located within the Basin of Mexico formed by the interaction of faults and volcanic activity. According to the geotechnical zonation of the city, the Iztapalapa area mainly includes lacustrine and hills areas. The higher elevations in the Iztapalapa area correspond to volcanic rocks that outcrop in the Sierra de Santa Catarina, Cerro de la Estrella, and Peñón del Marques. The valley is composed of volcanic and pyroclastic materials interbedded with fluvial and lacustrine sediments. The rapid weathering of volcanic ashes generates a pumicite rich soil with clay incipient minerals similar to gels. The clays of Mexico City are well known because of their complex mechanical behaviour. Understanding this behaviour and its origin is of the uppermost importance for an accurate assessment of ground deformation. We present a systematic characterization of the physical and the mechanical properties of clayey materials associated to the fluvio-lacustrine processes of the recent history of Iztapalapa.

RESUMEN

El área cubierta por la Delegación Iztapalapa está localizada dentro de la Cuenca de México, formada por la interacción de fallas y actividad volcánica. De acuerdo a la zonificación geotécnica de la ciudad, el área de Iztapalapa comprende principalmente zonas lacustres y de lomas. Las elevaciones en Iztapalapa corresponden a rocas volcánicas que afloran en la Sierra de Santa Catarina, Cerro de la estrella y el Peñón del Marques. La zona del valle está constituida por secuencias de depósitos piroclásticos intercalados con sedimentos fluviales y lacustres. La rápida alteración de ceniza volcánica genera suelos pumiciticos y minerales incipientes arcillosos similares a geles. Las arcillas de la Ciudad de México son conocidas por la complejidad de su comportamiento mecánico. El entendimiento del comportamiento de los materiales y de sus causas es de gran importancia para la adecuada evaluación de la deformación del terreno. En este estudio se presenta la caracterización sistemática de propiedades físicas y mecánicas de materiales arcillosos asociados a los procesos fluvio-lacustres de la historia reciente de Iztapalapa.

1 INTRODUCCION

Una frecuente problemática en las zonas urbanas de México se asocia con la subsidencia y fracturamiento del subsuelo. Estos fenómenos se agudizan cada vez más y su origen se debe a diversos procesos tanto de origen natural (heterogeneidad de materiales de origen lacustre, fluvial y volcánico y eventual presencia de fallas geológicas activas); como antropogénico (explotación excesiva de los mantos acuíferos). La combinación de estos procesos puede originar que los materiales geológicos se deformen de manera diferencial.

Los primeros reportes de subsidencia del terreno en la Ciudad de México abarcan desde finales del siglo XIX con una tasa de hundimiento variable entre 3 y 5 cm/año, actualmente se presenta una tasa de 5 a 7 cm al año (Díaz, 2006); lo que ha provocado que en algunas zonas existan grandes asentamientos. Una de las zonas con mayor hundimiento de la Ciudad es la planicie lacustre de la Delegación Iztapalapa, en donde se asocia comúnmente con el fracturamiento del subsuelo. Este

fenómeno fue reportado desde la década de los 60 del siglo pasado; a finales de la década de los 80 y principios de los 90 se iniciaron estudios de cartografía, geotecnia e ingeniería geológica de las fracturas en zonas específicas de la Delegación.

El presente trabajo pretende lograr un mejor entendimiento de las condiciones de deformación de los materiales lacustres de la Delegación Iztapalapa y de su relación con el fracturamiento causado por asentamientos diferenciales.

2 ANTECEDENTES

La Ciudad de México cubre un área aproximada de 9,600 km² y se ubica sobre una planicie lacustre rellena de materiales de origen fluvio-lacustre y volcánico, que constituyen secuencias heterogéneas en composición y estructura. En la zona de Iztapalapa, se puso en operación la primera etapa de aprovechamientos de agua en 1957, con un bombeo de 0.5 m³/s, en los alrededores

del Peñón del Marqués. Del Castillo Muris reportó en 1978 un sistema de fracturamiento que tendía a ser paralelo a las curvas del nivel del flanco suroeste de la misma estructura volcánica, en donde se demolieron edificaciones de más de dos pisos debido al movimiento y deformación del terreno. Desde ese tiempo se propuso que el origen de este fracturamiento era la explotación del acuífero en la zona.

El fracturamiento en la superficie y subsuelo de la Delegación Iztapalapa se empezó acentuar a finales de la década de los 80 y principio de los 90 del siglo XX. Ovando-Shelley y Montiel (1989) documentaron la presencia de fracturas en la zona suroeste de la Delegación Iztapalapa en los límites con la Delegación Tláhuac. Durante los últimos años el fracturamiento han afectado de manera importante la infraestructura urbana de Iztapalapa, actualmente se tienen 14,000 viviendas

dañadas por este fenómeno. Sin embargo la extracción excesiva de agua subterránea no es el único factor que condiciona el fracturamiento del subsuelo. El sector Noreste de Iztapalapa es una de las partes con mayor deformación, la secuencia estratigráfica consta de materiales arcillosos lacustres en ocasiones intercalados con materiales volcánicos, lo que puede generar una deformación plástica y un comportamiento mecánico diferencial.

En este trabajo se presenta la caracterización geomecánica de los materiales lacustres provenientes de las colonias de Iztapalapa más afectadas por deformación plástica y diferencial: Jacarandas, San Sebastián Tecoloxtitla y Santa María Aztahuacán. La localización de los sitios estudiados se muestra en el mapa de la Figura 1.

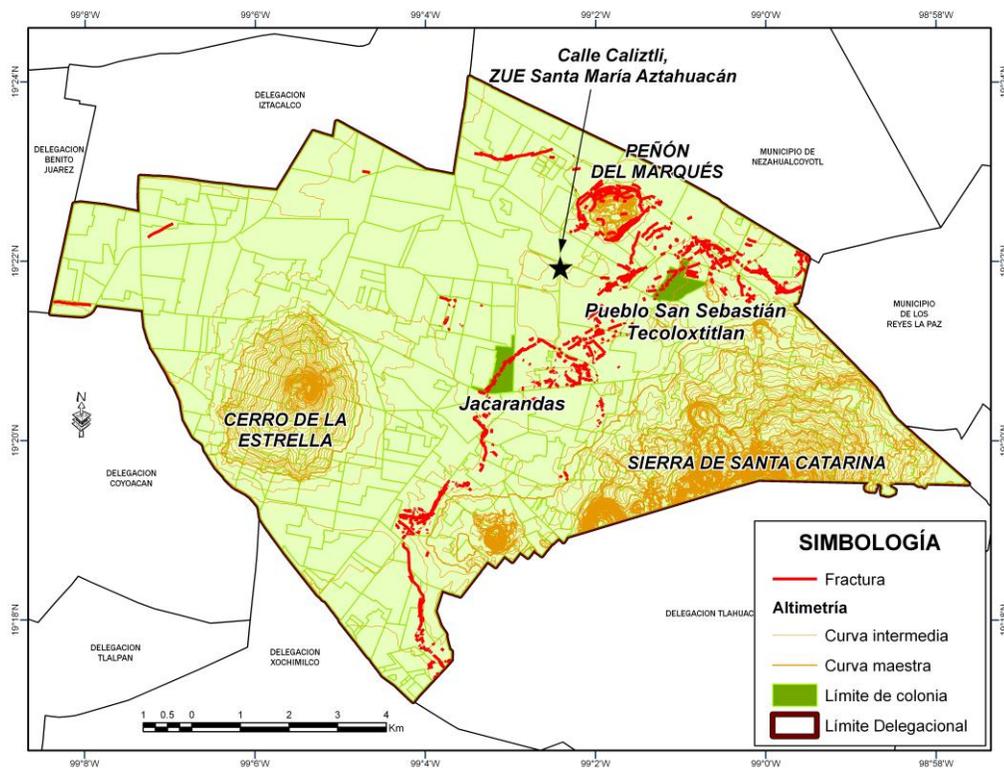


Figura 1. Localización de los sitios estudiados en la Delegación Iztapalapa en las Colonias: Sta. Ma. Aztahuacán, Jacarandas y San Sebastián Tecoloxtitla. Las curvas de nivel denotan las estructuras volcánicas principales. Las fracturas cartografiadas presentan con líneas rojas.

3 CONTEXTO GEOLÓGICO Y MORFOLÓGICO

3.1 Condiciones regionales

La morfología de la Cuenca de México se debe a la interacción de procesos volcánicos y estructurales desde el Oligoceno-Mioceno (Mooser et al., 1974). La Ciudad de México ocupa aproximadamente el 16 % de la Cuenca y se extiende sobre su parte suroccidental. El subsuelo de la ciudad está conformado por rocas sedimentarias del

Cretácico Superior, secuencias volcánicas del Terciario, y secuencias del Cuaternario que incluyen material piroclástico, depósitos aluviales y sedimentos de origen lacustre (Mooser, 1975).

La Delegación Iztapalapa se localiza hacia el extremo medio-oriental de la Ciudad ocupando el 7.5 % de su superficie total. A partir de estudios regionales de geología y geofísica, De Cserna et al. (1987) proponen la existencia de dos fallas geológicas con orientación NE-SW; la primera, N50E, parece cruzar Iztapalapa por

debajo los cerros de la Estrella y el Peñón del Marques y la segunda, N70-80E, podría estar relacionada con la formación de la Sierra de Santa Catarina (compuesta por 9 edificios volcánicos alineados).

3.2 Condiciones locales

El territorio de la Delegación Iztapalapa presenta tres estructuras volcánicas principales: la Sierra de Santa Catarina, Peñón del Marques y El Cerro de la Estrella. Alrededor de estas elevaciones se encuentra una planicie que formó parte del lago de Texcoco, compuesta por materiales arcillosos, limosos, sedimentos fluviales y en menor proporción materiales de origen volcánico (depósitos de caída y flujos piroclásticos principalmente).

Con el trabajo conjunto desarrollado entre el Centro de Geociencias y el Centro de Evaluación de Riesgo Geológico en el territorio de la Delegación Iztapalapa (Carreón-Freyre et al., 2010) se han identificado 3 sistemas principales de fracturamiento: (a) el primero con una orientación NE-SW delimitado por el borde de la Sierra de Santa Catarina, (b) el segundo con orientación WNW-ESE coincide con el límite del lago de Texcoco durante el siglo XIX y, (c) y el sistema de fracturas de tensión que rodean al Peñón del Marqués (ver mapa de la Figura 1). La distribución y orientación de las fracturas muestra que no es posible establecer un mecanismo general que explique sus condiciones de generación y propagación. Se realizó el análisis de 900 trazas de fracturamiento cartografiadas en la superficie de la Delegación Iztapalapa y se determinó una longitud media de 82 m, lo que indica un grado de afectación importante a la infraestructura urbana. De acuerdo con su orientación, el 60 % de estas trazas corresponden al sistema de fracturamiento NE-SW, el 25 % al sistema NW-SE, y el 15 % de orientación variable, lo que comprueba que la orientación preferencial de los planos de debilidad en la zona.

En este trabajo se discute principalmente la deformación plástica que se asocia a las propiedades físicas de materiales limo-arcillosos.

4 CARACTERIZACION GEOMECANICA DE LOS SUELOS LACUSTRES DE IZTAPALAPA

4.1 Mineralogía de los materiales lacustres de la Ciudad de México.

En los lagos de la Cuenca de México, las arcillas se originan por la alteración química de rocas volcánicas basálticas. Los iones y partículas resultantes de esta alteración son transportados y depositados en cuencas en donde continúan su transformación por procesos de oxidación, reducción, hidratación y carbonatación (Carreón-Freyre, 2006; Gama et al., 1998). Los minerales arcillosos que predominan en el subsuelo de la de la Ciudad de México son las Montmorillonitas (Esmectitas), Caollinitas y Alofanos (Zeevaert, 1953; Marsal y Mazari, 1959; Peralta y Fabi, 1989). La Montmorillonita se forma principalmente en zonas de lago en el cual el drenaje es restringido con aportaciones importante de Fe y Mg y se caracteriza por retener grandes cantidades de agua dentro de su estructura, por lo que presentan los valores

más altos de plasticidad (Hillier en Velde, 1995). La formación de Alofanos (denominados inicialmente geles amorfos) se debe a la alteración de materiales piroclásticos de caída (cenizas) en tiempos relativamente cortos (Velde, 1995).

La variación mineralógica de los materiales limo-arcillosos tiene una relación directa con su estructura y permeabilidad, lo se puede traducir en variaciones de compresibilidad y provocar la deformación diferencial y fracturamiento del subsuelo (Carreón et al., 2006). Los estudios sobre la mineralogía de las arcillas de la Ciudad de México, se han enfocado en entender la variación de sus propiedades (contenidos de agua entre 300 y 400 %, índices de plasticidad de 200 a 300 % e Índices de Compresibilidad de 10) (Díaz-Rodríguez, 2006; Díaz-Rodríguez et al., 1998).

4.2 Descripción de perfiles de suelo en los sitios de estudio seleccionados

En los párrafos siguientes se describe la variación de propiedades físicas y mecánicas de materiales arcillosos en tres sitios de estudio, ubicados en la porción Centro-Noreste de la planicie lacustre de la Delegación Iztapalapa, en las colonias: Santa María Aztahuacán, Jacarandas y San Sebastián Tecoloxtitla (ver localización en el mapa de la Figura 1 y los perfiles de suelo presentados en la Figura 4).

Los resultados presentados fueron obtenidos en el Laboratorio de Caracterización de Suelos del Centro de Evaluación de Riesgo Geológico (CERG) de la Delegación Iztapalapa y en el Laboratorio de Mecánica Multiescalar de Geosistemas (LAMMG) del Centro de Geociencias de la UNAM. Se determinaron: contenidos de agua y materia orgánica, límites de consistencia (Atterberg), densidad de sólidos por el método del Picnómetro (también denominada Densidad Real), granulometría de partículas gruesas por el método de tamices y de partículas finas por el método del Hidrómetro de Bouyoucos. Cada muestra se clasificó de acuerdo al SUCS (Sistema Unificado de Clasificación de Suelos). Además, en muestras selectas se determinó la resistencia al corte en un aparato de corte directo y en un aparato triaxial (pruebas tipo UU) y la compresibilidad con carga incremental en consolidómetros mecánicos y en un consolidómetro automatizado con control de presión de poro.

4.2.1 Santa María Aztahuacán

La zona de Santa María Aztahuacán se localiza en la parte nororiental de Iztapalapa, hacia el sur del Peñón del Marqués, en la zona denominada lacustre de acuerdo a la zonificación geotécnica para Desarrollo Urbano de la Ciudad. De acuerdo a la cartografía realizada, en esta zona se presentan trazas de fracturamiento superiores a los 100 m de longitud y desplazamiento verticales de aproximadamente un metro. Las trazas presentan orientaciones asociadas a los sistemas de fracturamiento NE-SW y NW-SE. Un ejemplo de estas fracturas se presenta en la fotografía de la Figura 2.



Figura 2. Afectación de la infraestructura urbana en la Colonia Santa María Aztahuacan de la Delegación Iztapalapa.

En este sitio se estudió una secuencia de dos metros de profundidad cuyo perfil y la variación de sus propiedades con la profundidad se presenta en la Figura 3A. Se observa que el contenido de agua a mayor profundidad supera al límite líquido de los materiales, que coincide con el incremento de material arcilloso. El contenido de materia orgánica es bajo, la estructura de las partículas desciende con la profundidad lo que se refleja en la disminución de densidad de sólidos. Se analizó una muestra de esta secuencia (de 1.25 m de profundidad) por el método de Difracción de Rayos X. El difractograma muestra la presencia de Montmorillonita lo que explica su alta capacidad de retención de agua y la alta plasticidad de estos materiales, clasificados como CH de acuerdo al SUCS (capa de color rojo en la Figura 3A).

4.2.2 Jacarandas

La Colonia Jacarandas se ubica en la planicie lacustre central de Iztapalapa, en donde el fracturamiento local presenta orientaciones variables características de deformación plástica, pero a nivel regional presenta una dirección preferencial NE-SW que coincide con la orientación principal del fracturamiento. El sitio está clasificado como de transición suave en la zonificación vigente. Los sondeos geotécnicos perforados en la zona hasta 30 metros de profundidad (Tequio, 2008) reportan que hacia la parte NW de la colonia, en donde el hundimiento es mayor, se tienen más de 20 m de un material arcilloso de color verde. Hacia el SE el espesor de la arcilla verdosa disminuye a 10 m y se los estratos arcillosos se encuentran intercalados con capas de 3 m de espesor de arenas volcánicas compactas de color negro (secuencias de flujos piroclásticos). A diferentes profundidades se reportan también depósitos lacustres

con un alto contenido de fósiles, lo que indica variaciones importantes en los antiguos niveles de lago.

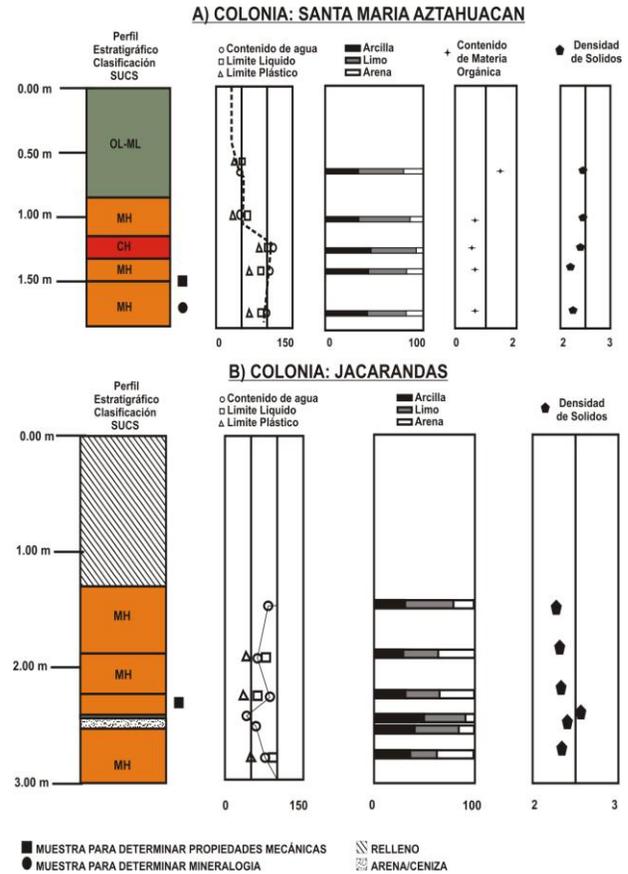


Figura 3. Secuencia lacustre somera en las Colonias (A) Santa María Aztahuacan; y (B) Jacarandas. Variación de las propiedades físicas de los materiales con la profundidad. Lo cuadros negros indican las muestras seleccionadas para determinación de propiedades mecánicas. Se indica la clasificación SUCS por estrato.

De acuerdo a los levantamientos de campo realizados por el CEREG, el sitio de estudio en Jacarandas se está hundiendo alrededor de 0.5 cm por mes. Los estudios topográficos de detalle registran desplazamientos verticales acumulados que varían de 5 a 100 cm. En este sitio se excavó una zanja que permitió caracterizar los primeros 3 m de la secuencia. Los materiales son limos de alta plasticidad (MH) con intercalaciones de cenizas volcánicas. En la Figura 3B se presenta el perfil de suelo caracterizado y la variación de sus propiedades físicas hasta 3 m de profundidad. Se observa que el contenido de agua varía entre 50 a 90 % y que en algunos casos, donde el contenido de agua es muy alto, se eleva el contenido arcilloso por encima del 30% (proporción en peso). Cabe remarcar que por debajo de los 2 m de profundidad el contenido de agua natural es mayor que su límite líquido lo que indica que el suelo se puede comportar como un fluido.

4.2.3 San Sebastián Tecoloxtitla

El pueblo de San Sebastián Tecoloxtitla se localiza en la parte nororiental de Iztapalapa, en una zona lacustre, posiblemente una bahía de depósito que se comunicaba con el lago del Texcoco (ver localización en el mapa de la Figura 1). Aunque se encontraba en la zona lacustre los depósitos son heterogéneos y compuestos de materiales lacustres, fluviales y rocas volcánicas. Debido a la heterogeneidad de los materiales y a la fuerte deformación registrada en la zona se seleccionó este sitio para la realización de un sondeo geotécnico mixto de 15 m de profundidad, con recuperación selectiva de muestra intacta. La descripción del perfil de suelo recuperado y la variación de sus propiedades con la profundidad se presenta en la Figura 3C. En la gráfica de de contenido de agua se observa un incremento a partir de los 5 m de profundidad hasta casi 250 % lo que explica la alta deformabilidad de la secuencia. A los 15 m la humedad disminuye de manera abrupta debido a la presencia de un lente arenoso, sin embargo se mantiene por encima de su límite líquido.

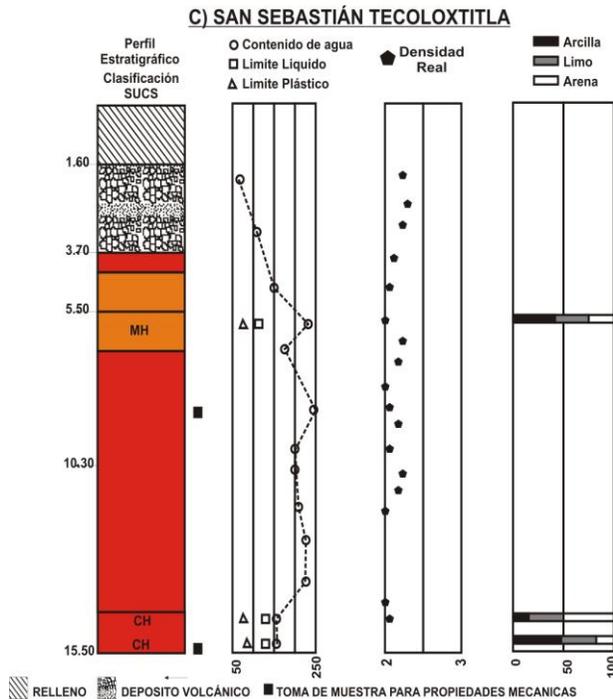


Figura 3C. Secuencia lacustre somera en la Colonia San Sebastián Tecoloxtitla. Variación de las propiedades físicas de los materiales con la profundidad. Los cuadros negros indican las muestras seleccionadas para determinación de propiedades mecánicas. Se indica la clasificación SUCS por estrato.

En superficie se presenta una acentuada deformación plástica hacia diferentes direcciones aunque el fracturamiento presenta una orientación preferencial NE-SW. Los estudios geotécnicos realizados en la zona hasta 25 m de profundidad (Tequio, 2008) reportan material limo-arcilloso intercalado con depósitos de arena y grava de color negro con un espesor aproximado de 6

metros y capas de ceniza con un espesor de 2 metros. Estos materiales corresponden con un depósito piroclástico de caída que se ha clasificado como material granular, uniforme, no cohesivo, erosionable y potencialmente colapsable.

A partir del trabajo de cartografía realizado se han registrado desniveles del terreno que varían de 5 a 20 m y pendientes variables entre 15 y 35°. Dentro de la zona de mayor hundimiento se encuentra una estructura elevada que puede corresponder a un domo volcánico cubierto por los sedimentos del antiguo lago.

4.3 Determinación de propiedades mecánicas en muestras selectas

4.3.1 Compresibilidad

Para la caracterización de la deformabilidad de los materiales lacustres se realizó un análisis detallado de sus condiciones de consolidación y la evaluación de su compresibilidad. En la Figura 4 se presenta una gráfica de consolidación típica de los limos (MH) de la Colonia Jacarandas que muestra un rápido desplazamiento del agua libre con un esfuerzo aplicado de solo 0.5 kg/cm². Son materiales normalmente consolidados, con un contenido de agua que varía del 50 al 80 % e Índices de Plasticidad variables entre 20 y 30 %.

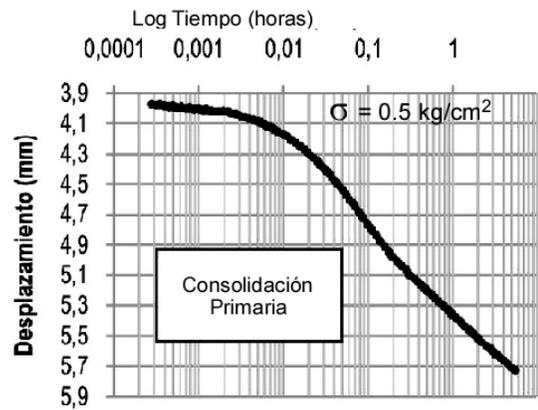


Figura 4. Gráfica de Consolidación de una muestra de la Colonia Jacarandas, Iztapalapa de 2 m de profundidad.

En la Figura 5 se presentan dos gráficas de consolidación de muestra intacta tomada de 15 m de profundidad, (sondeo geotécnico mixto realizado en la Colonia San Sebastián Tecoloxtitla). Estos materiales se clasificaron como arcillas de alta plasticidad (CH), con valores medios de contenido de agua de 150 % e Índices de Plasticidad variables entre 30 y 70 %. La gráfica de la Figura 5(a) muestra una ruptura en la estructura del suelo al aplicar el tercer incremento de esfuerzo, de 0.25 kg/cm². Wesley (2001) explica este tipo de ruptura cuando los minerales arcillosos que presentan un arreglo estructural abierto. Por otra parte Peralta y Fabi (1989) atribuyó este tipo de deformación al rompimiento de esqueletos porosos comunes en los sedimentos de lago (fósiles y microfósiles), que incrementan la permeabilidad del suelo.

Una vez que la muestra se ha estabilizado con la carga aplicada, presenta una respuesta normal ante el nuevo incremento (0.5 kg/cm^2) como se muestra en la gráfica de la Figura 5(b). En este tipo de materiales la transición entre consolidación primaria y secundaria puede expresarse con cambios variables de pendiente. Se observa que la fase de consolidación secundaria no se alcanza completamente, la pendiente indica una alta velocidad de desplazamiento del agua libre lo que indica la presencia de heterogeneidades en la matriz arcillosa.

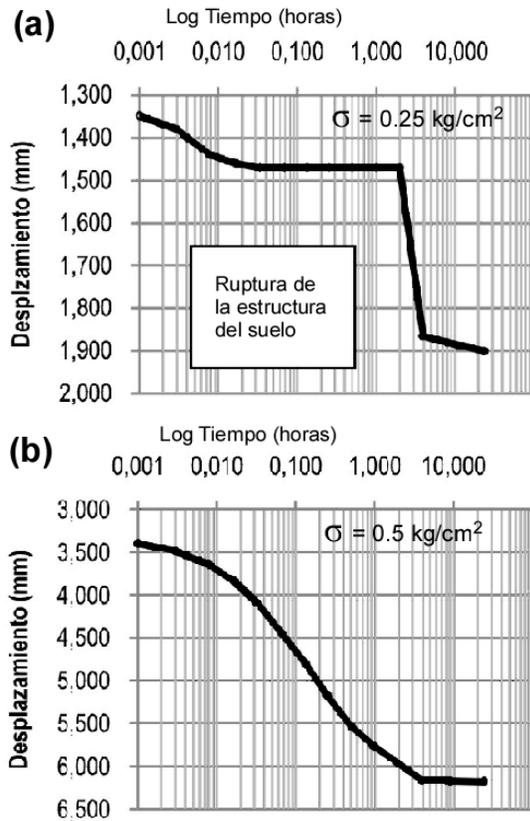


Figura 5. Gráficas de Consolidación de los suelos lacustres de San Sebastián Tecoloxtitla, Iztapalapa. Muestra intacta de 15 m de profundidad: (a) tercer incremento, 0.25 kg/cm^2 ; (b) cuarto incremento, 0.5 kg/cm^2 .

En la Tabla 1 se presentan algunos valores típicos de propiedades físicas y compresibilidad de los materiales lacustres de las colonias Jacarandas y San Sebastián Tecoloxtitla. Estas propiedades se determinaron en las muestras inalteradas marcadas con un cuadro negro en los perfiles de suelo de las Figuras 3B y 3C respectivamente. Las gráficas de compresibilidad, relación de vacíos vs esfuerzo efectivo, correspondientes se presentan en la Figura 6.

Los valores de coeficientes de compresión para las muestras tomadas a diferente profundidad muestran órdenes de magnitud semejantes (0.6-0.8), características de materiales arcillosos. Ambas muestran un comportamiento normalmente consolidado, cuando se

esperaría una preconsolidación en los materiales de mayor profundidad. De igual manera se esperaría una relación de vacíos menor en la muestra de 15 m profundidad acorde a su mayor carga de preconsolidación.

Tabla 1. Propiedades físicas y mecánicas de los materiales lacustres de Jacarandas y San Sebastián Tecoloxtitla.

	Jacarandas	S.S. Tecoloxtitla
Prof. (m)	2	15
C_c^1	0.06	0.08
$P_c \text{ (Kg/cm}^2\text{)}^2$	0.32	2.80
$e \text{ (para } P_c\text{)}^3$	0.56	2.09
SUCS ⁴	MH	CH
W (%) ⁵	68	220
IP (%) ⁶	19	35
S_s^7	2.33	2.21

¹ C_c , Índice de compresión; ² P_c , Carga de pre-consolidación; ³ e , relación de vacíos; ⁴SUCS, Sistema Unificado de Clasificación de Suelos; ⁵W, contenido de agua natural; ⁶IP, índice de plasticidad; ⁷ S_s , densidad de sólidos.

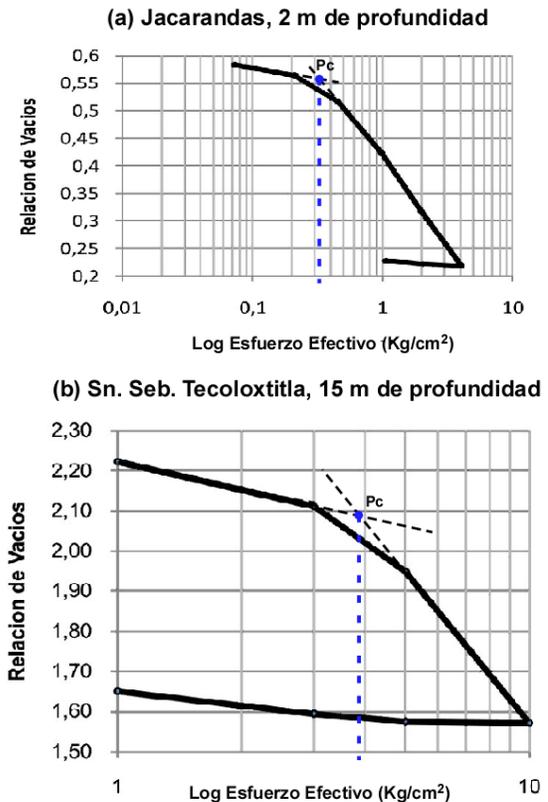


Figura 6. Relación de vacíos en función del esfuerzo efectivo para las muestras inalteradas de (a) la Colonia Jacarandas y (b) la Colonia San Sebastián Tecoloxtitla. Se muestra la estimación gráfica de a carga de preconsolidación (P_c)

Para complementar el análisis del comportamiento mecánico de los materiales lacustres se realizaron

pruebas de resistencia al corte con aparato de corte directo en el laboratorio del CERG; y con aparato triaxial, prueba tipo UU, en el LAMMG (Figura 7). En la Tabla 2 se presentan algunos de los valores obtenidos y se comparan con los reportados en estudios geotécnicos previos para materiales semejantes (Tequio, 2008).

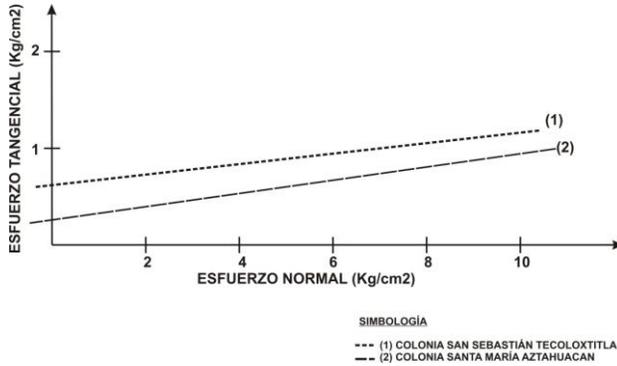


Figura 7. Resistencia al corte de algunos de los materiales estudiados en la zona lacustre de Iztapalapa. (1) CH de San Sebastián Tecoloxtitla; (2) MH de Sta. María Aztahuacán.

Tabla 2. Resultados de determinación de resistencia al corte.

Sitio	Prof. (m)	C ¹ (Kg/cm ²)	Phi ²	SUCS	Laboratorio
Sta. María Aztahuacán	1.5	0.35	11	MH	LAMMG
H. Chavarría	3.1	0.35	20	MH	Tequio
San Sebast. Tecoloxtitla	15.2	0.63	8	CH	CERG
R. Beteta	15.6	0.45	4	CH	Tequio

¹C, Cohesión; ²Phi, Angulo de fricción interna

De acuerdo con los resultados presentados los limos MH de color verdoso de la Colonia Jacarandas deben su plasticidad a la alteración de las cenizas volcánicas que se presentan inter-estratificadas en la secuencia (ver el perfil de la Figura 3B). Estos materiales muestran una alta compresibilidad pero una baja retención de agua, lo que provoca la generación fracturas con los cambios de humedad. Las pruebas de resistencia al corte en los limos (MH) de la Colonia Aztahuacán corroboran la baja cohesión de estos materiales. Por otra parte el ambiente e historia de deposición de las arcillas CH de San Sebastián Tecoloxtitla indican que esta zona lacustre ha propiciado la formación de materiales arcillosos bien estructurados, lo que se corrobora con sus elevados contenidos de agua, índice de plasticidad y relación de vacíos. Se ha identificado Montmorillonita mediante Difracción de Rayos X en materiales semejantes de la planicie lacustre (capa CH de la secuencia de Sta. María Aztahuacán). La composición de estos materiales explicaría que mantengan su elevada relación de vacíos aun a 15 m de profundidad.

5 CONCLUSIONES

La caracterización física de las secuencias lacustres del territorio de la Delegación Iztapalapa presentadas en este trabajo, permite demostrar la estrecha relación existente entre sus condiciones de formación y su comportamiento mecánico. Los materiales limo-arcillosos que rellenan los valles volcánicos pueden presentar una variada composición desde cenizas volcánicas parcialmente alteradas, illitas, esmecticas hasta alofano. Estos materiales tienen propiedades geotécnicas variables aunque generalmente son altamente compresibles y presentan muy baja capacidad de carga. Además, se debe considerar que las secuencias limo-arcillosas se encuentran comúnmente interestratificadas con materiales granulares fluviales y piroclásticos y/o con rocas volcánicas, lo que incrementa la heterogeneidad mecánica de las secuencias y favorece la deformación diferencial y el consecuente fracturamiento. En este estudio se demuestra que una zona catalogada como "lacustre" dista mucho de presentar secuencias arcillosas homogéneas y que la evolución de las condiciones de depósito debe ser considerada para una adecuada evaluación de su vulnerabilidad al fracturamiento.

RECONOCIMIENTOS

Los autores agradecen el trabajo de caracterización en laboratorio del Sr. Ricardo Carrisoza, laboratorista del LAMMG, de la M.C. Sara Solís Valdez, del Laboratorio de Edafología de Geociencias, y de la Dra. Beatriz Millán Malo del Centro de Física Aplicada (CFATA). Se agradece también el apoyo en campo del Ing. Daniel Blancas del CERG-Iztapalapa.

REFERENCIAS

- Carreón Freyre, D., 2010. Land subsidence processes and associated ground fracturing in Central Mexico. En Carreón Freyre, D., Cerca, M. and Galloway, D.L. (eds.) *Land Subsidence, Associated Hazards and the Role of Natural Resources Development*. IAHS Publication 339, pp. 149-157.
- Carreón-Freyre., D.C., Hidalgo-Moreno C., Hernández-Marín, M., 2006. Mecanismos de fracturamiento de depósitos arcillosos en zonas urbanas. Caso de deformación diferencial en Chalco, Estado de México. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana. Número Especial de Geología Urbana. Tomo LVII (2): 237-250.
- De Cserna S., De la Fuente-Duch, M., Palacios-Nieto, M., Triay, L., Mitre-Salazar, L. M., y Mota-Palomino, R., 1987 (1988). Estructura geológica, gravimetría, sismicidad y relaciones neotectónicas regionales de la cuenca de México. Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, Boletín 104, 71 p.
- Del Castillo-Muris, R. 1978. Ciudad de México. En Memorias del Simposio: El subsuelo y la ingeniería de cimentaciones en el área urbana del Valle de México. Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, 15-50.

- Díaz-Rodríguez, A., Lozano-Santacruz, R., Dávila-Alcocer, V.M., Vallejo, E and Girón, P., 1998. Physical, chemical, and mineralogical properties of México City sediments: a geotechnical perspectiva. *Can. Geotech.J.* 35: 600-610. Canadá.
- Díaz-Rodríguez J.A. 2006. Los suelos lacustres de la Ciudad de México. *Rev. Int. de Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil.* Vol. 6(2).
- Lugo-Hubb, J., Mooser, F., Pérez-Vega, A., Zamorano-Orozco, J. 1996. Geomorfología de la Sierra de Santa Catarina, D. F., México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 11(1), 43-52.
- Marsal, R. J. y Mazari, M. 1959. El subsuelo de la Ciudad de México. Instituto de Ingeniería. U.N.A.M. I Y II: 505p.
- Mooser, F., Nairn, A. E. M., and Negendank, J. F. W., 1974. Palaeomagnetic investigations of the Tertiary and Quaternary igneous rocks: VIII A palaeomagnetic and petrologic study of volcanics of the Valley of Mexico". *Geologischen Rundschau* 63: 451-483.
- Mooser, F., 1975. Historia geológica de la cuenca de México, D. D. F. en: *Memoria de las Obras del Sistema de Drenaje Profundo Del Distrito Federal*, Tomo I, 7-38.
- Ovando-Shelley, E., y Montiel, A. J. 1989. Estudio sobre el problema del agrietamiento en la unidad habitacional Cananea, Iztapalapa. Reporte técnico inédito.
- Peralta y Fabi R., 1989, Sobre el origen de alguna propiedades mecánicas de la formación arcillosa superior del Valle de México. Simposio sobre Tópicos Geológicos de la Cuenca del Valle de México.
- Tequio Ingeniería de Servicios, S. C., 2008. Estudio de mecánica de suelos para la Escuela Primaria Herminio Chavarria. Col. Santa María Aztahuacan, D. T. Cabeza de Juárez. Del. Iztapalapa del D.F. Reporte técnico de estudios.
- Tequio Ingeniería de Servicios, S. C., 2008. Estudio de mecánica de suelos para la Escuela Primaria Madagascar. Col. Jacarandas, D. T. Cabeza de Juárez. Del. Iztapalapa del D.F. Reporte técnico de estudios.
- Tequio Ingeniería de Servicios, S. C., 2008. Estudio de mecánica de suelos para la Escuela Primaria Ramón Beteta. Col. Pueblo de San Sebastián Tecoloxtitla, D. T. Cabeza de Juárez. Del. Iztapalapa del D.F. Reporte técnico de estudios.
- Velde, B., 1995. *Origin and Mineralogy of Clays. Clays and the environment.* Springer-Verlag. 334 p.
- Velde, B., *Composition and mineralogy of Clay Minerals.*
- Hillier, S., *Erosion, sedimentation and sedimentary origin of clays.*
- Wesley L.D., 2001 Consolidation behavior of allophone clays. *Geotechnique*, Vol 51, N° 10, p.901-904.
- Zeevaert, L., 1953. Estratigrafía y problemas de ingeniería en los depósitos de arcilla lacustre de la Ciudad de México. *Memoria del Congreso Científico Mexicano* Vol. 5: 58-70.