

01121
67



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

EFFECTO DEL HUNDIMIENTO REGIONAL EN LAS PROPIEDADES GEOTÉCNICAS DE LAS ARCILLAS EN LA ZONA DE LAGO

TESIS

Presentada a la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México, como requisito para obtener el título de

INGENIERO CIVIL

Presenta:

María Patricia Hernández Valdés

TESIS CON
FALLA DE INGEN

DIRECTOR DE TESIS:
DR. VÍCTOR MANUEL TABOADA URTUZUÁSTEGUI

MÉXICO, D.F., CIUDAD UNIVERSITARIA

Junio de 2003

la Dirección General de Bibliotecas.
a difundir en formato electrónico e impreso
intenido de mi trabajo recepcionado.
NOMBRE: María Patricia Hernández Valdés
FECHA: 26 de Junio de 2003
[Firma]

A



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

**TESIS CON
FALLA DE
ORIGEN**



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA
DIRECCIÓN
FING/DCTG/SEAC/UTIT/040/03

Señorita
MARÍA PATRICIA HERNÁNDEZ VALDÉS
Presente

En atención a su solicitud me es grato hacer de su conocimiento el tema que propuso el profesor DR. VICTOR M. TABOADA URTUZUASTEGUI, que aprobó esta Dirección, para que lo desarrolle usted como tesis de su examen profesional de INGENIERO CIVIL.

"EFECTO DEL HUNDIMIENTO REGIONAL EN LAS PROPIEDADES GEOTECNICAS DE LAS ARCILLAS EN LA ZONA DE LAGO"

- INTRODUCCIÓN
- I. CARACTERÍSTICAS GEOLÓGICAS Y ZONIFICACIÓN DEL VALLE DE MÉXICO
 - II. ESTRATIGRAFÍA Y PROPIEDADES GEOTÉCNICAS DE LA ZONA DE LAGO
 - III. HUNDIMIENTOS REGIONALES EN LA ZONA DE LAGO
 - IV. EFECTO DEL HUNDIMIENTO REGIONAL EN LAS PROPIEDADES GEOTECNICAS DE LA ZONA DE LAGO
 - V. CONCLUSIONES

Ruego a usted cumplir con la disposición de la Dirección General de la Administración Escolar en el sentido de que se imprima en lugar visible de cada ejemplar de la tesis el Título de ésta.

Asimismo le recuerdo que la Ley de Profesiones estipula que deberá prestar servicio social durante un tiempo mínimo de seis meses como requisito para sustentar Examen Profesional.

Atentamente
"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"

Cd. Universitaria a 4 Abril 2003.

EL DIRECTOR

M. C. GERARDO FERRANDO BRAVO
GFB/GMP/mstg.

AGRADEZCO

A Dios

*Por permitirme estar aquí y
brindarme las fuerzas
necesarias para levantarme
cuando siento caer.*

A mis padres

*Gracias por todo lo que a lo largo
de su vida y después de ella
dejaron en mí, donde quiera que
estén.....EN SU HONOR....*

A mis hermanos

Gabi

*Porque siempre me diste ánimo,
haciéndome reír en los momentos mas complicados....*

Linda

*Gracias por creer en mi, por comprenderme
y tolerarme en todo momento, por ser mi
consejera y mas grande amiga.....*

Pedro

*Gracias por tu apoyo, amor
y confianza.....*

G

*A la Universidad Nacional
Autónoma de México y a la
Facultad de Ingeniería por
haberme dado la oportunidad de
ser parte de ellas y formarme
moral y profesionalmente.*

*A todos y cada uno de mis
maestros que supieron sembrar
en mí la inquietud de la
superación y el conocimiento.*

E

Dr. Víctor Taboada

*Mi admiración y respeto.
Muchas gracias por tu ayuda,
paciencia y apoyo durante la
realización de esta tesis y sobre
todo gracias por estar cuando
más lo necesite.*

*Ing. José Luis Esquivel Ávila
Ing. Fernando Favela Lozoya
M.I. Juan Carlos Fernández
Casillas
M.I. Roberto Magaña del Toro*

*Agradezco el haber accedido a
la invitación para formar parte
del jurado, su disposición y el
tiempo dedicado a la revisión de
este trabajo.*

F

A mis amigos

*De los que aprendí mucho, por
estar siempre en las buenas y en
las malas, por compartir horas
de desvelo, trabajo y triunfo.*

A mis compañeros

*Por su agradable compañía y
sobre todo por el gusto de
haberlos conocido*

*Yesenia Cerrud, Carlos Ardila y
Pánfilo Pérez.*

A ti, Martín

*Porque me inyectas vida y me animas para
ser mejor día con día,
nunca dejaras de estar en mi corazón.....*

EFECTO DEL HUNDIMIENTO REGIONAL EN LAS PROPIEDADES GEOTECNICAS DE LAS ARCILLAS EN LA ZONA DE LAGO

	pág.
INTRODUCCIÓN	1
I. CARACTERÍSTICAS GEOLÓGICAS Y ZONIFICACIÓN DEL VALLE DE MEXICO	
I.1 Antecedentes	3
I.2 Geología	3
I.3 Zonificación	8
I.3.1 Zona de lago	9
I.3.2 Zona de transición	9
I.3.3 Zona de lomas	11
II. ESTRATIGRAFÍA Y PROPIEDADES GEOTÉCNICAS DE LA ZONA DE LAGO	
II.1 Antecedentes	13
II.2 Estratigrafía típica	13
II.3 Propiedades índice	17
II.4 Propiedades mecánicas	19
III. HUNDIMIENTOS REGIONALES EN LA ZONA DE LAGO	
III.1 Antecedentes	25
III.2 Subcuencas de la zona de lago	27
III.2.1 Subcuenca de Zumpango	28
III.2.2 Subcuencas ciudad de México, Texcoco y Chalco-Xochimilco	29
III.3 Hundimiento regional en la zona de lago	32
III.4 Estudio teórico sobre el hundimiento regional	37
III.4.1 Teoría del Dr. Nabor Carrillo	37
IV. EFECTO DEL HUNDIMIENTO REGIONAL EN LAS PROPIEDADES GEOTÉCNICAS DE LA ZONA DE LAGO	
IV.1 Antecedentes	45
IV.2 Sitio Secretaría de Comunicaciones y Transportes	
IV.2.1 Ubicación	46
IV.2.2 Variación de los espesores arcillosos	47
IV.2.3 Propiedades índice	50
IV.2.4 Propiedades mecánicas	52
IV.2.4.1 Perfil de resistencia	54
IV.2.4.2 Resistencia no drenada	56
IV.2.4.3 Carga de preconsolidación	58

H

IV.3 Sitio Central de Abasto Oficinas	
IV.3.1 Ubicación	61
IV.3.2 Variación de los espesores arcillosos	61
IV.3.3 Propiedades índice	64
IV.3.4 Propiedades mecánicas.....	67
IV.3.4.1 Perfil de resistencia	68
IV.3.4.2 Resistencia no drenada	70
IV.3.4.3 Carga de preconsolidación	70
CONCLUSIONES	74
BIBLIOGRAFÍA.....	77

4

INTRODUCCIÓN

La extracción de agua del subsuelo provoca siempre la consolidación de los estratos afectados a causa de que el peso sobre un cierto nivel es compartido por los sólidos y el agua; sin embargo la magnitud del asentamiento y su tiempo de ocurrencia depende de la deformabilidad de la estructura sólida, del espesor y de la permeabilidad del estrato.

El estudio sistemático del subsuelo permite desde el año de 1946 (Nabor Carrillo) cuantificar los hundimientos generados y el efecto que este causa sobre las características geológicas y geotécnicas del valle de México.

Originalmente el fenómeno de hundimiento se presentó en el primer cuadro de la ciudad, en el que paulatinamente se ha reducido la extracción de agua, sin embargo se ha incrementado en otras en las últimas décadas, particularmente en la zona oriente registrándose incrementos de esfuerzos efectivos en los depósitos del suelo que se traducen en consolidación de los estratos de arcilla.

A partir del año de 1959 (Marsal y Mazari) se han generado nuevas técnicas de investigación geotécnica, exploraciones y ensayos de laboratorio que permiten obtener información fidedigna de las propiedades del subsuelo, gracias a este esfuerzo, han sido explorados y analizados los efectos de los abatimientos piezométricos y el consecuente hundimiento regional en la arcilla del valle de México.

Objetivo.

El objetivo de este trabajo es conocer y comparar los efectos generados de la evolución en las propiedades índice y mecánicas de las arcillas de la ciudad de México en la zona de lago, considerando la información estratigráfica disponible de sondeos realizados en los años de 1986 y 2000.

Alcances

Dado que el efecto del hundimiento en el comportamiento de las arcillas no permite ser generalizado, solo se comparan las características mecánicas e índice de los depósitos arcillosos en los sitios Central de abasto oficinas (CAO) y Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT) ubicados en la zona de lago en el valle de México.

Contenido de la tesis

Capítulo 1

Se presentan las características geológicas del valle de México y de acuerdo a sondeos realizados en diversos lugares de la cuenca se describen de igual forma las formaciones y zonificación en general.

Capítulo 2

De forma breve se presentan aspectos generales de la estratigrafía, así como de las propiedades índice y mecánicas de las arcillas del valle de México, particularmente de la zona de lago.

Capítulo 3

Basándose en el perfil del subsuelo en la zona lacustre de la cuenca de México, se presenta la estratigrafía de otras tres subcuencas que la conforman; adicionalmente se muestran las principales causas que originan el hundimiento regional en dicha zona.

Capítulo 4

Los resultados generados de exploraciones geotécnicas realizadas en los años 1986 y 2000 son comparados con el objeto de cuantificar el efecto del hundimiento regional en las características mecánicas e índice de los estratos arcillosos en los sitios CAO y SCT.

Finalmente se exponen las conclusiones basadas en la comparación de los resultados observados.

CAPITULO I

CARACTERÍSTICAS GEOLÓGICAS Y ZONIFICACIÓN DEL VALLE DE MÉXICO

I.1 Antecedentes

En el extremo sur del altiplano mexicano (mesa de Anáhuac o Central) se localiza el valle de México, en la provincia fisiográfica del eje neovolcánico (fig.1.1), se trata de una cuenca cerrada que se conoce indistintamente como cuenca o valle de México; se encuentra limitada al norte por las sierras de Tepotzotlan y Pachuca; al sur por las sierras del Ajusco y Cuauhtzin (o Chichinautzin); al este por los llanos de Apan y la Sierra Nevada (en la cual se encuentran los volcanes Popocatepetl e Iztaccíhuatl), y al oeste por las sierras de las Cruces, Monte Alto y Monte Bajo, hacia el centro de la cuenca y de O-E se encuentra la sierra de Guadalupe. En la parte sur, en dirección E-O, se extiende la sierra de Santa Catarina.

La cuenca tiene un área de 7160 km² (de los cuales 2050 km² corresponden a la zonas bajas), longitud de 110 km en dirección N-S, y anchura de 80 km en dirección E-O. Su parte más baja tiene una altitud de 2236 msnm. Hacia la cuenca fluye gran cantidad de ríos o arroyos pequeños, entre los que destacan los ríos Cuautitlán, Tlalnepantla, de los Remedios, Churubusco y Texcoco; estas corrientes de agua dieron origen a seis lagos: de norte a sur, Zumpango, Xaltocan, San Cristóbal, Texcoco, Xochimilco y Chalco. Actualmente solo existen porciones de los lagos de Zumpango, Texcoco y Xochimilco.

I.2 Geología

El valle de México, constituye un vaso natural azolvado, en el que se depositaron productos de erosión de dos sierras laterales y la sierra de Pachuca, así como de numerosos volcanes del Sur, activos en los últimos 700 000 años. La cortina natural que represó la cuenca fué la sierra del Chichinautzin que se extiende entre la Sierra de Zempoala en el Oeste y las bases del Popocatepetl en el este, apoyándose en el centro en el macizo del Tepozteco.

La condición actual del relleno cuaternario de la cuenca de México es el resultado de procesos geológicos, volcánicos y tectónicos que se inician en el Terciario Medio.

La base volcánica del Terciario Medio de la cuenca de México, representado por la formación Xochitepec, esta afectado por dos sistemas de fracturas y fallas. Uno, el más antiguo corre de SW a NE; el otro y subsecuente corre de SE a NW. Ambos sistemas han creado hundimientos escalonados, así como fosas y pilares; es muy difícil definir con claridad las estructuras individuales de este tectonismo, en vista de la escasez de afloramientos de rocas de esta edad en la cuenca.

Características geológicas y zonificación del valle de México

Las zonas bajas están cubiertas por depósitos aluviales y lacustres del cuaternario; de la misma edad se supone la serie volcánica basáltica de Cerro Gordo, Chimalhuacán, Cerro de la Estrella, Chiconautla y la sierra del Chichinautzin que cerro al valle en la parte sur. Posteriormente se crearon las elevadas sierras al Este y al Oeste de la cuenca de México: la de las Cruces y la de la Sierra Nevada; estas sierras son producto de numerosa actividad volcánica y constituyen alineamientos dirigidos al NNW.

Desde el punto de vista geológico, las formaciones más superficiales de la cuenca se dividen en Tarango, Tacubaya, Becerra y Totolsingo (fig. 1.2).

La formación Tarango, del Pleistoceno superior, esta constituida en su parte más superficial por arena cementada con carbonato de calcio, con algo de limo en las capas superiores y con grava en las capas inferiores; una de estas costras constituye la primera capa dura. Se encuentra también ceniza volcánica blanca del tamaño de arena fina. Estratificadas entre estas dos capas de arena se encuentra arcilla lacustre de alto contenido de agua. Esta formación aflora al oeste y suroeste, se prolonga hasta el fondo de la cuenca, y constituye la base de los depósitos mas recientes. Sobre estos suelos se deposito la Formación Tacubaya

La formación Tacubaya, (Marsal y Mazari, 1959), esta constituida por arcillas (de alta compresibilidad con lentes de arena) producto de la deposición de cenizas volcánicas muy finas que fueron transportadas por aire o agua hacia los lagos de la cuenca.

Las formaciones Becerra y Totolsingo contienen estratos de aluvión y polvo volcánico con abundancia de fósiles.

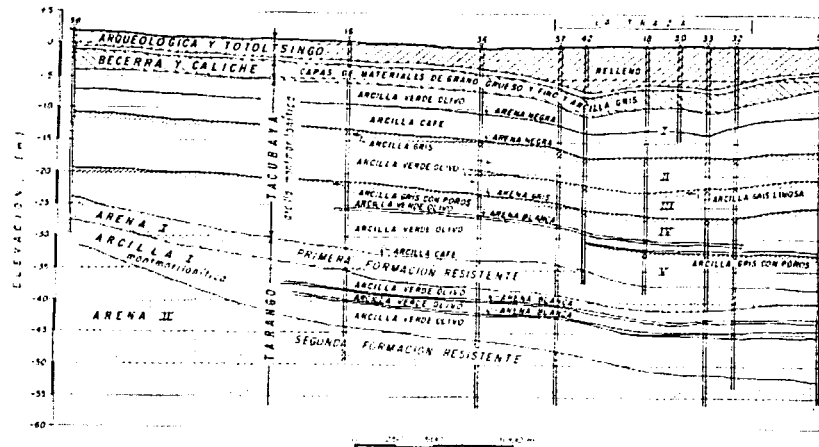


Fig. 1.2 Corte estratigrafico en la zona de lago (Prof. Zeevaert, 1953).

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Capítulo I

En el SW de la cuenca de México, la evidencia morfológica, así como datos derivados de los pozos, permiten reconstruir al pie de las Lomas, entre el Cerro de Chapultepec en el Oeste y el Peñón de los Baños en el Este, un valle importante que corre desde la Sierra de Guadalupe hasta el espacio entre la Sierra de Zempoala y el Tepozteco.

El valle recibía cuatro importantes afluentes:

En el Norte el Río Hondo

en el centro los ríos de Mixcoac y Contreras y

en el sur el Río Ajusco sepultado hoy por lavas.

Al conjunto se unía en el espacio situado entre el Peñón de los Baños y el Cerro de la Estrella un gran valle proveniente del NE y que aportaba las aguas de la zona de Pachuca.

El Cerro del Ajusco, se trata del alineamiento caracterizado por la Sierra de Santa Catarina; aunque repetido en numerosas hileras de conos de tezontle en las cumbres de la Sierra de Chichinautzin. Este tectonismo dio origen primero a andesitas, enseguida a andesitas basálticas y finalmente en el Cuaternario Superior abrió paso a las grandes masas de basaltos que construyeron la mencionada sierra del Chichinautzin, con un volumen aproximado de 1000 km³ de lava.

Las partes centrales de la cuenca alejadas de los bordes, eventualmente fueron llenándose con depósitos limo-arenosos, los cuales se interstratificaron con suelos y capas de cenizas y pómez provenientes de las erupciones volcánicas originadas principalmente en el Sur. A medida que se rellenaba la cuenca fueron apareciendo lagos, principalmente en las partes centrales bajas y en el sur. Finalmente, en las épocas glaciales de los últimos 100 000 años y debido a las lluvias abundantes pudieron formarse cuerpos de agua importantes, que a veces se unían en un solo gran lago.

En relación a los lagos se puede establecer una división en dos:

- lagos formados en las partes bajas, que constituyeron vasos de evaporación y por ello fueron salobres; se trata de los lagos Xaltocan y Texcoco
- lagos que se formaron al pie de la sierra de Chichinautzin, que fueron nutridos continuamente por materiales prolíficos y que por ello fueron de agua dulce.

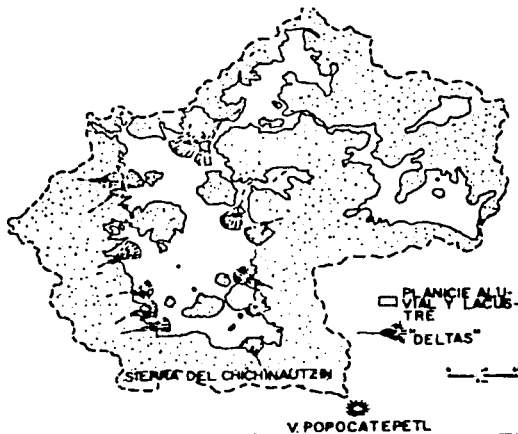
El antiguo lago de Tenochtitlan representa un caso intermedio, habiendo sido casi siempre dulce debido a los manantiales de Chapultepec y Tlalpan y a las importantes aportaciones de arroyos de las lomas; sin embargo su límite oriental con el lago de Texcoco fué siempre dinámico, avanzando y retrocediendo las aguas salobres del último de acuerdo con el régimen de lluvias. Dependiendo de las condiciones climáticas, húmedas o secas, glaciales o interglaciares, los lagos iban creciendo o reduciéndose; así los depósitos lacustres del centro de la cuenca por el área al NW de Chimalhuacán, alcanzan un espesor de 70 m a 80 m, disminuyendo al Este y Oeste acusando debajo del Zócalo unos 60 m y desapareciendo al pie de las lomas de Chapultepec. Intercalados en la formación de arcillas lacustres aparece entre 30 m y 40 m una capa dura debajo de gran parte de la ciudad de México, la cual desaparece hacia el centro del vaso de Texcoco.

Características geológicas y zonificación del valle de México

Esta capa es testigo de una época seca en la que se redujeron considerablemente los lagos centrales.

Es posible establecer los siguientes puntos que rigen en la estratigrafía de la cuenca de México:

- A partir de los abanicos volcánicos se puede notar en el relleno aluvial una transición de clásticos que varían de gruesos a finos a medida que uno se acerca al centro de la cuenca (fig.1.3).
- Se establece que en el Sur de la Cuenca el contacto entre los basaltos y los depósitos aluviales y lacustres es abrupto, ya que de los basaltos nunca bajaron arroyos que transportaron clásticos; esto se debe a la gran permeabilidad de las formaciones basálticas que provocaban la infiltración de las lluvias.
- Se establece que en el centro de la cuenca se depositaron arenas finas, limos y arcillas, en vista de que hasta aquí los arroyos solamente podían transportar material muy fino, el cual se mezclaba con los depósitos de tolvaneras originadas en las sierras.
- Lagos subrecientes y recientes. Entre ellos los lagos centrales por formarse en vasos de evaporación, fueron salobres. En ellos se depositaron, debido a las aportaciones de aguas lodosas, arcillas floculadas ricas en agua. En tales lagos no podían desarrollarse turbas. Por el contrario, en los lagos de Chalco y Xochimilco, que se extendían a los pies de la sierra del Chichinautzin y que eran de agua dulce y limpia las arcillas depositadas eran mas escasas y menos ricas en agua. En estos lagos abundaban los residuos fósiles (turbas).
- La elevada actividad volcánica en el sur de la cuenca de México. Es debido a esta actividad que los depósitos en la región de Chalco y Xochimilco abundan en gruesas capas de cenizas basálticas y estratos de pómez, mientras que tales productos escasean en la parte central y norte de la cuenca.



TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Fig. 1.3 Abanicos de clásticos en las márgenes del relleno aluvial (Mooser, 1978).

1.3 Zonificación

Con base en la descripción geológica, los sondeos realizados en diversos lugares del Valle y la disposición de las grandes masas observadas superficialmente, se distinguen tres zonas importantes:

1. Zona de lago
2. Zona de lomas
3. Zona de transición

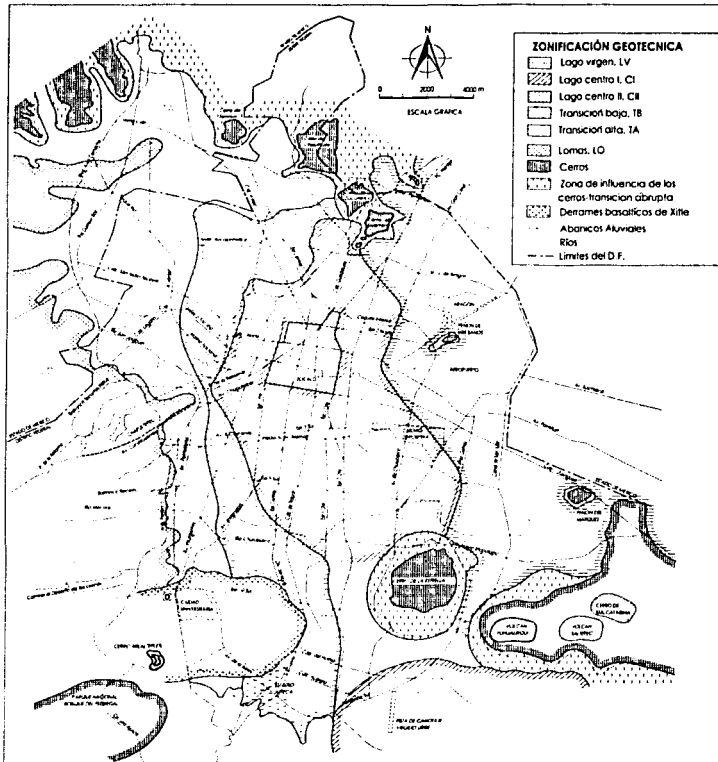


Fig. 1.4 Zonificación estratigráfica del valle de México (Modificado de Gutiérrez, 2001).

I.3.1 Zona de lago

Un sondeo en ella, exhibe los siguientes estratos principales, descritos a partir de la superficie del terreno:

1. Depósitos areno-arcillosos o limosos, con abundancia de restos arqueológicos, o bien rellenos artificiales que en algunos puntos de la Ciudad llegan hasta 10 m de profundidad.
2. Arcillas volcánicas extraordinariamente compresibles, de variados colores y consistencias comprendidas entre blanda y media, intercaladas con pequeñas capas o lentes de arena; su potencia total oscila de 15 m a 32 m.
3. La primera capa dura, de unos 3 m de espesor, constituida por suelos arcillosos o limo-arenosos, compactos y rígidos, se encuentra a 33 m bajo la superficie aproximadamente.
4. Arcillas volcánicas de características semejantes a las de la formación superior, aunque mas comprimidas y resistentes; este manto tiene una potencia comprendida entre 4m y 14 m.
5. Depósitos de arena con grava, separados por estratos de limo o arcilla arenosa.

En algunos lugares se ha encontrado una tercera formación compresible integrada por arcillas volcánicas, a 65 m de profundidad. Entre las causas principales de estas diferencias debe citarse a la historia de las cargas aplicadas en la superficie del terreno particularmente en la zona ocupada por los monumentos Aztecas y de la Colonia; un caso excepcional es el realizado en el Palacio Nacional, donde la formación arcillosa superior se ha comprimido de tal manera que su espesor actual es de solo 20 m.

I.3.2 Zona de transición

En general se tienen superficialmente los depósitos arcillosos o limosos orgánicos de la formación Becerra, cubriendo a estratos de arcilla volcánica muy compresibles y de espesores variables, intercalados con capas de arena limosa compacta o arena limpia, los cuales descansan sobre potentes mantos en los que el material predominante es la grava y la arena. Los problemas de capacidad y de asentamientos diferenciales pueden ser muy críticos, especialmente cuando se trata de construcciones extensas sometidas a condiciones de carga muy diferentes lo cual ocurre frecuentemente en esta zona por corresponder al sector industrial de la ciudad (Atzacapotzalco, Vallejo y Guadalupe).

En la zona de transición se han reconocido tres condiciones típicas:

1. Progresiva, en que la formación rocosa aparece cubierta por depósitos de origen aluvial, a su vez subyacentes a las capas mas recientes de arcilla lacustre.
2. Interestratificada, característica de regiones en que las fases aluvial y lacustre se suceden en forma alternada, dando lugar a la intercalación de mantos blandos arcillosos con otros de matriz granular contaminados por finos, generalmente duros y mas resistentes.
3. Abrupta, que se distingue porque los depósitos lacustres están en contacto con la formación rocosa, tapizada por derrumbes o suelo residual.

Capítulo I

Puede clasificarse también dentro de la condición 2, el caso de derrames de lava sobre arcillas o suelos aluviales, cubiertos por otras capas más recientes de la formación lacustre o acarreos fluviales; esta disposición se ha encontrado en algunos lugares circundantes al Cerro de la Estrella.

Esta zonificación según las fronteras establecidas por Marsal y Mazari en 1959, fue incorporada a los reglamentos de construcciones de 1966 y 1976 para el Distrito Federal sin otro objetivo que servir de referencia a las normas sobre seguridad estructural de las edificaciones. En estos reglamentos se cambió la nomenclatura de zonas de lomas, transición y lago por zonas I, II y III, respectivamente. Se agregó una zona IV para cubrir la expansión de la mancha urbana hacia sitios prácticamente inexplorados desde el punto de vista geotécnico. El reglamento de construcciones de 1976, define cada una de las tres zonas en términos del espesor de la capa compresible superficial, aceptando como zona de lomas aquellos lugares donde existe un máximo de 3 metros de material compresible sobre roca o tepetate, zona de transición la que tiene de 3 a 20 metros de material compresible y zona de lago cuando hay más de 20 metros de arcilla compresible sobre capas firmes profundas.

Tomando en cuenta el criterio de zonificación de Marsal y Mazari (1959) y la información obtenida por la Comisión de Vialidad y Transporte Urbano (COVITUR) durante la construcción del sistema de transporte colectivo METRO, en términos generales se establecen subdivisiones tanto en la zona de transición como en la zona de lago, de acuerdo con su estratigrafía y características geotécnicas particulares.

Zona de transición, se subdivide en:

1. transición alta. Es la subzona de transición adyacente a la zona de lomas, en donde la frecuencia y disposición de los depósitos aluviales cruzados varían de acuerdo con la cercanía a antiguas barrancas.
2. Transición baja. Es la subzona de transición vecina a la zona de lago, en donde se encuentra una capa arcillosa superior con intercalaciones de estratos limo-arenosos de origen aluvial. Los espesores y propiedades de los materiales pueden tener variaciones importantes en cortas distancias, dependiendo de la posición relativa que guarde el sitio con respecto a las corrientes de antiguos ríos y barrancas.

Zona de Lago, se subdivide en:

1. Lago Virgen. Corresponde al sector oriente del lago de Texcoco, cuyos suelos prácticamente han mantenido sus propiedades mecánicas desde su formación.
2. Lago Centro I. Esta asociada al sector no colonial de la ciudad que se desarrolló desde principios de este siglo, en donde las sobrecargas aplicadas únicamente se deben a construcciones pequeñas y medianas.

3. Lago centro II. Corresponde con la antigua traza de la ciudad, donde la historia de cargas aplicadas en superficie y el intenso bombeo para abastecer de agua a la ciudad, han producido un incremento en la resistencia de los estratos de arcilla por efecto de la consolidación inducida. Esta situación ha provocado que en esta subzona se presenten las siguientes situaciones extremas:
 - Arcillas fuertemente consolidadas por efecto de rellenos y grandes sobrecargas de construcciones aztecas y coloniales.
 - Arcillas blandas asociadas a lugares que han alojado plazas y jardines durante largos periodos de tiempo.
 - Arcillas muy blandas en los cruces de antiguos canales.

I.3.3 Zona de lomas

La zona de lomas incluye las faldas de la Sierra de Guadalupe, la Serranía de las Cruces y se le adicionan las partes altas de los cerros del Peñón de los Baños, Peñón del Marques y el Cerro de la Estrella.

Esta formada por suelos areno-limosos (tobas) compactos, de alta capacidad de carga y baja deformabilidad, se incluyen los derrames de basalto del Pedregal, detectándose varios tipos de suelo que pueden clasificarse en:

1. Tobas estables aun bajo la acción erosiva del agua, compuestas por mezclas de arena y grava en proporciones variables, cementadas por una matriz de suelos finos con alta capacidad de carga. Estos suelos aparecen con mayor frecuencia al norte de la zona poniente y especialmente en la zona alta de las lomas de Chapultepec en que aparecen conglomerados de gran capacidad de carga. Cuando estos suelos aparecen limpios son los mejores para utilizarse como agregados pétreos; sin embargo su localización no se puede ubicar en un plano, pues depende en gran medida de las condiciones en que se depositaron, y en la mayoría de los casos han sido cubiertos por emisiones volcánicas. En estas zonas se localizan las cavernas que una vez se explotaron para obtener materiales de construcción y que actualmente constituyen un peligro para construcciones de todo tipo.
2. Tobas inestables bajo la acción erosiva del agua. Estos suelos están compuestos en gran proporción por arcilla de plasticidad media a alta con cementación pobre. Es muy probable que en estas zonas hayan existido bosques que mantenían cierto equilibrio contra la erosión, el cual fue alterado por la remoción de árboles creando zonas inestables. Se encuentran con mayor frecuencia al sur de la zona poniente, en algunas barrancas en la zona de las Águilas.
3. Suelos pumíticos. Dentro de las formaciones características de la zona se encuentran espesores variables entre 1 y 3 metros de arena pumítica limpia, estos materiales sufren rotura de granos si se someten a presiones de contacto altas (25 kg/cm^2). Los estratos en que aparecen son sensiblemente horizontales y con gran frecuencia se ubican entre capas de mucho mayor dureza. En algunas ocasiones se encuentran mezclas de arena pumítica con suelos finos que disminuyen en cierto grado su compresibilidad por rotura.

Capítulo I

4. Rellenos. Debido al intenso crecimiento que tiene la ciudad hacia la zona pétreo, los proyectos cada vez se encuentran con terrenos mas accidentados. En algunos casos se ha tratado de aprovechar las barrancas rellenándolas con material mal compactado. Los problemas de hundimientos que ocurren después de la primera saturación son críticos y continúan aun después de varias estaciones de lluvia.
5. Suelos de origen eólico. Se tiene noticia que al pie de la sierra de Guadalupe se encuentran eventualmente depósitos de arena suelta que sufren hundimientos bruscos bajo cargas dinámicas. Los espesores que tienen estos suelos son del orden de 4 metros.
6. Roca basáltica. En una gran parte de la zona Sur se tienen derrames de lava con distintos grados de fracturamiento y oquedad, en los cuales se puede observar los tipos de basalto columnar y vesicular. Las partes sanas del basalto pueden llegar a tener las mayores resistencias encontradas en el valle.

CAPITULO II

ESTRATIGRAFÍA Y PROPIEDADES GEOTÉCNICAS DE LA ZONA DE LAGO

II.1 Antecedentes

En el Plioceno, entre la aparición de las sierras de las Cruces y Río Frío y el cierre total de la cuenca durante el Cuaternario Superior (que corresponde a la formación de la Sierra de Chichinautzin), existían dos grandes valles que drenaban hacia el Sur de la cuenca de México en el Río Amacuzac, el más grande corría paralelo a la sierra de las Cruces y pasaba por lo que ahora es Xochimilco; mientras que el menor corría paralelo a las faldas de la Sierra Nevada hasta llegar a Cuautla. En el proceso de evolución de estos valles se formaron acarreos aluviales que alcanzaron un espesor hasta de 1,000 metros. Posteriormente, ocurrió el cierre de la cuenca y se inicio la formación de los depósitos lacustres (Tarango, Tacubaya, Becerra y Totolsingo) en los que yacen depósitos provenientes de la sedimentación de ceniza volcánica transportada por aire o por corrientes de agua hacia los lagos de la cuenca.

De esta clasificación de origen geológico se derivan las definiciones para la llamada zona de lago (zona lacustre) de la ciudad de México : Manto superior, Formación Arcillosa Superior, Capa Dura, Formación Arcillosa Inferior y Depósitos Profundos; las tres ultimas capas corresponden a la formación Tarango. Las definiciones anteriores se aplican a la zona lacustre de la ciudad de México y de Texcoco.

En 1952, fue posible elaborar la zonificación del área urbanizada atendiendo a las características mas significativas del subsuelo, siendo factible el distinguir tres zonas: Lomas(zona I). En las estribaciones de la Sierra de las Cruces, al oeste del valle, en general formada por suelos poco compresibles y de alta resistencia al cortante
Transición (zona II). Caracterizada por una secuencia variable de estratos aluviales intercalados con arcillas blandas similares a las del lago.
Lago (zona III) Ubicada en el sector oriente del valle, se caracteriza por grandes espesores de arcilla blanda lacustre, la cual subyace a una costra endurecida por secado solar cuyo espesor varia en cada sitio dependiendo de su historia de cargas.

II.2 Estratigrafía típica

En el área entre los lagos de Texcoco y Xochimilco, así como en todas las exploraciones de Xochimilco se encuentra con frecuencia arena estratificada con arcilla, de características diferentes a las observadas en la ciudad de México; mientras que en el lago de Texcoco y en el de la ciudad de México las capas de arena son muy escasas y solo aparece la primera capa dura como una unidad continua en ambos lagos; se debe considerar que las aportaciones de los lagos de Texcoco y de la ciudad de México, provienen de ríos que escurren sobre zonas impermeables arrastrando sólidos; mientras

que las mayores aportaciones de los lagos de Xochimilco y Chalco provienen de manantiales que afloran al pie de los derrames basálticos.

La zona de lago (fig.2.1), ubicada en el oriente y antiguamente ocupada por el lago de Texcoco en la que se tienen depósitos lacustres blandos y compresibles hasta profundidades de 50 m a 60 m apoyados en suelos mas duros y rígidos, estratigráficamente consta de cinco grupos:

a) Manto Superficial

Depósitos areno-arcillosos o limosos con abundancia de restos arqueológicos, o bien rellenos artificiales que en algunos puntos de la ciudad llegan hasta 10 m de profundidad. Constituido por arcillas consolidadas por secado, arenas limosas y limos arcillosos con un contenido de agua promedio de 61%; su espesor medio es de 1.5 metros, el cual aumenta en las zonas cercanas a la Sierra de Guadalupe a 6 m aproximadamente. En las zonas de inundación permanente y en aquellas recientemente expuestas a secado, no es apreciable este estrato o tiene unos cuantos centímetros de espesor. En la zona lacustre esta formación se encuentra surcada por innumerables grietas rellenas con materiales eólicos y con una profundidad superior a 4 metros, por lo que penetran en el estrato subyacente. Únicamente existen rellenos en las cercanías del Bordo Xochiaca, en la intersección del bordo Poniente con el camino Peñón-Texcoco y en la zona del Aeropuerto.

b) Formación arcillosa superior (FAS)

Suelos que corresponden a la formación Tacubaya, con un espesor de entre 15m y 32 m. Constituida por depósitos de arcilla de origen lacustre, altamente compresibles, intercalada por estratos arenosos, limo-arenosos y de vidrio volcánico a diversas profundidades; destacándose una capa de arena negra en estado suelto, en ocasiones limosa, con espesor variable entre 0.2 y 2 metros, a profundidades comprendidas entre 3 metros en las zonas Norte y Oriente, de 3 a 8 metros en la zona Poniente y de 12 metros en Ciudad Netzahualcoyotl; su contenido de agua medio es de 44%, de alta plasticidad, que muestra espesores y resistencias variables. Sobre este estrato arenoso se localizan las arcillas con menor resistencia al corte, con un contenido de agua promedio de 294% y los valores máximos superiores a 600%.

Su espesor varía, en dirección Norte-Sur de 17 metros aproximadamente en el Caracol a mas de 40 m en el bordo Xochiaca, en dirección Oriente-Poniente, varía entre 38 y 17 m del kilómetro 3 al 13 del camino Peñón-Texcoco.

En el sur del Caracol, la FAS, se encuentra intercalada por estratos limo-arenosos de mayor espesor lo que indica su proximidad con la zona de transición; el contenido de agua medio de esta formación es de 303%.

c) Capa dura

La constituyen primordialmente suelos limo-arenosos, arenosos y limosos intercalados en ocasiones por arcilla. Su contenido de agua medio es de 59% y su resistencia a la penetración estandar tiene valores extremos de 8 a más de 50 golpes.

En el lago de Texcoco, esta capa varia de 3.5 m en el norte y oriente hasta desaparecer en ocasiones en la vecindad de Ciudad Netzahualcoyotl. En la zona poniente es muy complicado identificarlo con precisión, ya que en ella proliferan depósitos compactos y sueltos con propiedades semejantes a la de la capa dura.

Los sondeos realizados en esta zona demuestran que por lo menos ocurrieron dos ciclos de sequía, que provocaron el secado de los suelos y en consecuencia el endurecimiento, generándose suelos limosos y limo-arenosos, que pueden estar irregularmente cementados con carbonatos de calcio. En general esta capa tiene lentes intercalados de arcillas, que corresponden a los ciclos húmedos de este periodo geológico.

Otra característica de la capa dura es la variación en espesor y resistencia, que aumenta en forma gradual del oriente al poniente, debido a que al conservar el antiguo lago un tirante mínimo debilito la formación de esta capa; adicionalmente, la erosión de cauces superficiales adelgazó el espesor, provocándole también inestabilidades locales.

Los lentes duros intercalados entre los suelos blandos de la serie arcillosa superior, son costras de secado solar y arenas basálticas o pumíticas; su espesor puede ser desde 0.20 hasta 2 metros, con resistencia a la penetración muy variable, los lentes se utilizan como marcadores de la estratigrafía, es decir, permiten separar los diferentes substratos arcillosos, lo que es útil para guiar el muestreo selectivo, el material que forma los lentes es notoriamente mas permeable que las arcillas, por lo que su presencia es definitiva en la rapidez de consolidación de los estratos arcillosos.

Primera capa dura

Es una secuencia de lentes de arena y de limos-arenosos con limos arcillosos, la cual se localiza a profundidades variables, desde los 13 m hasta los 30 m y tiene un espesor que varia de 2 a 4 metros, observandose algunas intercalaciones de suelo arcilloso blando entre los estratos de suelo duro.

Segunda capa dura

También llamada depósitos profundos superiores, esta formada por arenas compactas con cierta cementación y limos, en su mayoría de naturaleza granular aunque con gran contenido de finos. Presenta espesores que varían de 5 a 7 m y valores de resistencia a la penetración estándar mayores a 100 golpes.

d) Formación Arcillosa Inferior (FAI)

Del mismo origen y características que la formación arcillosa superior se diferencia de ésta por su menor contenido de agua medio, que es de 255%. La forman arcillas menos compresibles, de consistencia media a alta y presentan un esfuerzo cortante mayor que en

la formación arcillosa superior; se localizan también lentes y estratos limo-arenosos y de vidrio volcánico, siendo estos mas frecuentes que en la FAS.

Tiene un espesor variable entre 20 metros al centro del lago, disminuyendo hacia la periferia a 3 metros en la zona oriente; en la zona poniente su espesor decrece rápidamente de la Vía Morelos hasta desaparecer en la Sierra de Guadalupe.

Existe dentro de los depósitos profundos una formación compresible de espesor superior a 6 m, la que se considera como tercera formación arcillosa y cuyo contenido de agua medio es de 147%, con valores máximos del orden de 280%. En la zona industrial de Xalostoc se encontró a partir de 46 m de profundidad, con un espesor de 14 m. Estos depósitos arcillosos son mas consistentes que las arcillas de FAI, y se encuentran hasta una profundidad de 50 metros con espesores de 7 a 10 m.

e) Depósitos Profundos Superiores

Depósitos de arena con grava separados por estratos de limo o arcilla arenosa. Conocidos también como segunda capa dura, están constituidos por limos, arenas finas y limosas muy compactas, tiene una profundidad comprendida entre 24 m en la parte oriente, a mas de 64 m en las inmediaciones del Bordo Xochiaca. Tiene un contenido de agua cercano al 50% y su resistencia a la penetración estándar es mayor de 50 golpes.

Depósitos Profundos Inferiores

Se trata de suelos granulares (depósitos de arena con grava) muy compactos, parcialmente cementados.

Subyacente a la anterior formación, se localizan estratos arenosos, limosos y limo-arenosos, que en ocasiones contienen arcilla y gravas. Su contenido medio de agua es de 37%.

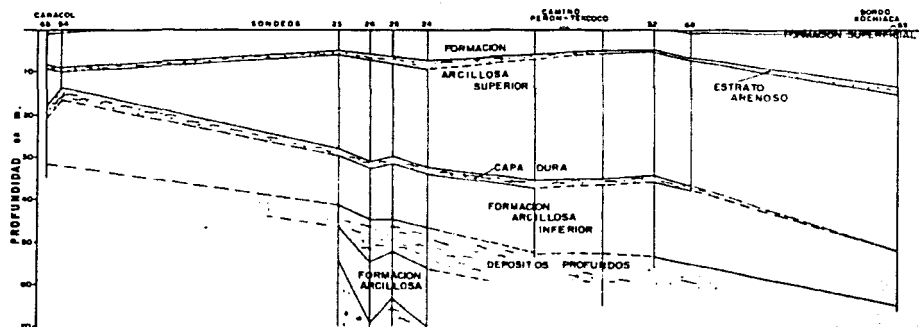


Fig. 2.1. Perfil del lago de Texcoco. Dirección N-S (Murillo y García, 1978).

II.3 Propiedades índice

Desde el punto de vista mineralógico, la arcilla del valle de México, ha sido estudiada por diferentes autores, Zeevaert (1973) la describe como arcilla limosa orgánica que contiene grandes cantidades de fósiles, ostracodos y diatomeas, así como ceniza y vidrio volcánico; estima que solo el 40% de las partículas es menor de 2 micras y de estas el 50% es montmorilonita o bentonita y contiene de 5% a 10% de materia coloidal orgánica. Se hace notar que al tacto la arcilla, en su estado natural, es en general frágil y quebradiza. Marsal y Mazari (1959) señalan que entre el 22% y 63% de las partículas que componen la arcilla del valle es menor de 2 micras y que contienen entre 1% y 7% de materia orgánica. Sus conclusiones son similares, en general, a las de Zeevaert, excepto que clasifican a la arcilla como ílitica; sin embargo hacen notar que se encuentran otros minerales arcillosos y que los resultados de sus estudios mineralógicos no son concluyentes.

Habitualmente se da por asentado que las arcillas del lago de Texcoco fueron formadas en un medio salino (el contenido salino del agua intersticial disminuye con la profundidad hasta llegar a convertirse en agua dulce (Marsal y Mazari, 1959)), mientras que las del lago Xochimilco-Chalco se sedimentaron en un medio mas favorable al crecimiento de vida vegetal y animal; debido a la presencia de mayor cantidad de materia orgánica en las arcillas de Xochimilco-Chalco.

Determinaciones sistemáticas de contenidos de agua mediante límites de Atterberg (Tabla 2.1) y compresión simple en muestras cúbicas, respaldan la afirmación de que los materiales arcillosos son heterogéneos y que sus propiedades varían en forma inestable.

Un indicador de los más importantes en la arcilla del Valle es el contenido de agua. En la formación arcillosa superior del lago de Texcoco se pueden tener valores entre 150% y 500%, en la inferior entre 100% y 200%. Las arcillas de Xochimilco-Chalco tienen sus contenidos de agua variables entre 150% y 350% hasta 110 m de profundidad.

El límite líquido de las arcillas del lago de Texcoco varía entre 100% y 500% y el plástico entre 40% y 100%, con valores medios de 236% y 76%, respectivamente (Marsal y Mazari, 1959).

La densidad media de sólidos de las arcillas es de 2.4 con valores extremos de 2.1 y 2.6. La relación entre el valor máximo de resistencia y el valor residual en prueba Triaxial UU, CU o CD es entre 1.2 kg/cm² y 2.0 kg/cm²; depende en alto grado de la presión confinante o, en el caso de los ensayos CU y CD, de la relación de esfuerzos principales de consolidación.

La resistencia de la arcilla a la penetración del cono, qc, es un indicador tanto de la resistencia no drenada del material como del perfil estratigráfico (fig. 2.2).

Tabla 2.1 Valores medios de propiedades índice (Murillo y Morales , 1991).

Propiedad	Contenido de agua w (%)	Limite Líquido w_L (%)	Limite Plástico w_p (%)	Densidad de sólidos γ_s (kg/m ³)	Relación de vacíos e	Resistencia al corte c_u (kPa)
Formación						
Superficial	61	99	44	2500	1.7	14.7
FAS	303	301	71	2460	7.3	12.7
CD	59	71	37	2530	1.2	86.3
FAI	255	242	66	2450	5.9	31.4
DP Superiores	49	94	47	2420	1.5	53.0
TFA	147	182	68	2270	3.5	47.1
DP Inferiores	37	48	25			

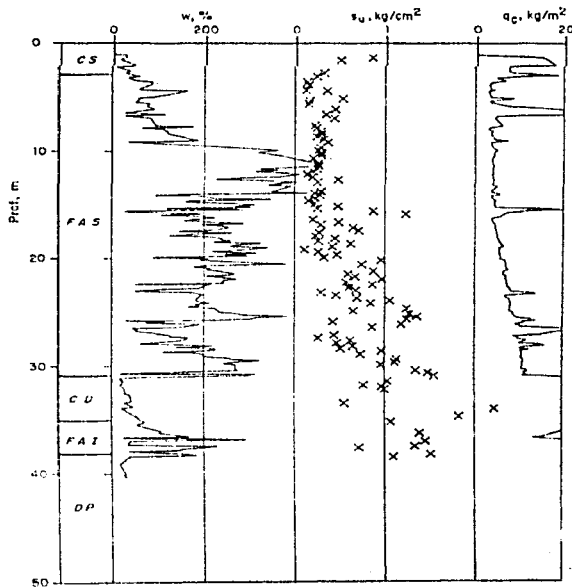


Fig. 2.2 Comparación entre resistencia de punta q_c , contenido de agua w , resistencia no drenada s_u y perfil estratigráfico (Jaime, 1987).

TESIS CON
 FALLA DE ORIGEN

En general se distinguen dos perfiles representativos de resistencia de cono en el lago de Texcoco, uno correspondiente a la parte virgen, con valores medios entre 2.5 y 5 kg/cm² para la FAS (fig. 2.2), y el segundo, correspondiente a la zona del centro de la ciudad (precargada), con resistencia media entre 5 y 10 kg/cm². Para obtener la resistencia no drenada del suelo a partir de los datos del cono se utiliza la ecuación:

$$s_u = q_c / N_k \quad (2.1)$$

en la cual

S_u resistencia no drenada
 q_c resistencia de cono
 N_k factor de correlación

Con los datos obtenidos se tiene que $N_k = 14$ para el caso de las arcillas de la FAS de ambas zonas del lago de Texcoco (Montañez, 1983). Para la zona Xochimilco-Chalco, se distinguen dos perfiles de resistencia de cono; el primero, en la parte no urbanizada, con valores medios de q_c de 2 kg/cm² a 8 kg/cm² desde la superficie hasta 60 m de profundidad, el segundo, en la zona urbanizada, con valores entre 4 kg/cm² y 13 kg/cm² de 0 m a 40 m de profundidad; no se cuenta con información suficiente para determinar el valor de N_k .

La exploración mediante la prueba de penetración estandar en la arcilla del valle permite extraer muestras alteradas del suelo para su clasificación y obtención de algunas propiedades índice, sin embargo, el número de golpes de la prueba de penetración estándar, N , es poco confiable en este caso, pues muchas veces la herramienta se hunde por peso propio o con un golpe.

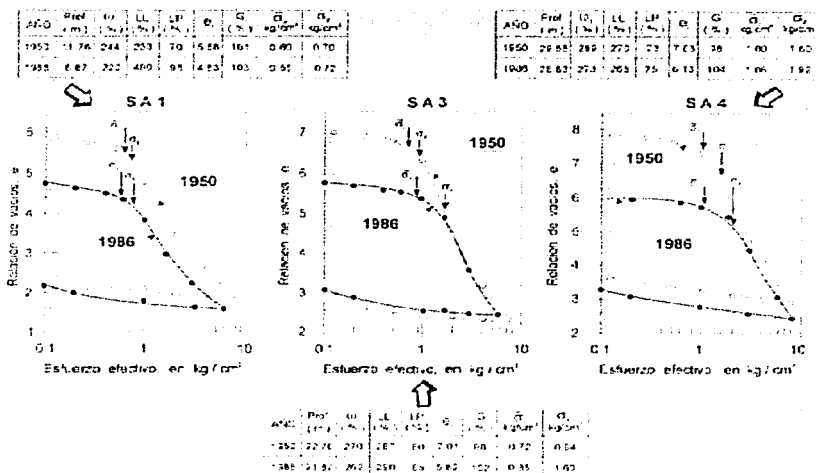
II.4 Propiedades mecánicas

La arcilla del Valle es una de las más permeables, por tener relaciones de vacíos muy altas (6-12). Su permeabilidad representativa es 1×10^{-7} cm/seg. Son altamente compresibles ($m_v = 0.1$ cm²/kg). Teniendo en cuenta su permeabilidad cabría esperar que la consolidación primaria sucediera muy lentamente, lo cual no ocurre debido a la presencia de capas delgadas de vidrio volcánico, arenas y fósiles y fisuras en el suelo.

En las curvas deformación-tiempo, obtenidas en ensaye de consolidación unidimensional con especímenes de 8 cm de diámetro y 2 cm de altura, se observa que el tiempo para alcanzar el 100% de la consolidación primaria es entre 2 y 6 minutos en promedio (para niveles de esfuerzo menores que la carga de preconsolidación). En estas mismas curvas se ve que la consolidación secundaria es muy importante. El coeficiente C_α (definido como la pendiente del tramo recto final de la curva deformación-tiempo) tiene valores medios entre 0.1 y 0.001 y depende del nivel de esfuerzos.

La compresibilidad es una de las propiedades más significativas de las arcillas de la ciudad de México, y depende de la estructura sólida y de la historia de cargas que se

ha sometido (secado, hundimiento por explotación de acuíferos, construcciones y rellenos), como puede apreciarse en la fig. 2.4.



Nota: Los criterios de superposición de las curvas fueron:

- Que fueran representativas de la misma unidad estratigráfica
- Que la variación del contenido de agua inicial no excediera 10%

Fig. 2.4 Comparación de curvas de compresibilidad, sitio centro Urbano Presidente Juárez, entre 1950 y 1986 (Jaime y Méndez, 2002).

Las características de compresibilidad resultan más desfavorables en la zona de lago se consideran dos zonas, una similar a la virgen y otra en que las arcillas se encuentran preconsolidadas por bombeo. Los coeficientes de compresibilidad medios (a_v), en la proximidad de la carga de preconsolidación (σ'_{p0}), son de 0.042 y 0.016 kPa⁻¹ para las formaciones arcillosas superior e inferior respectivamente, con máximos de 0.1 kPa⁻¹ que se presentan bajo la parte afectada por secado de la FAS y disminuyen con la profundidad. La figura 2.5 muestra el perfil típico de la zona afectada por bombeo profundo.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Estratigrafía y propiedades geotécnicas de la zona de lago

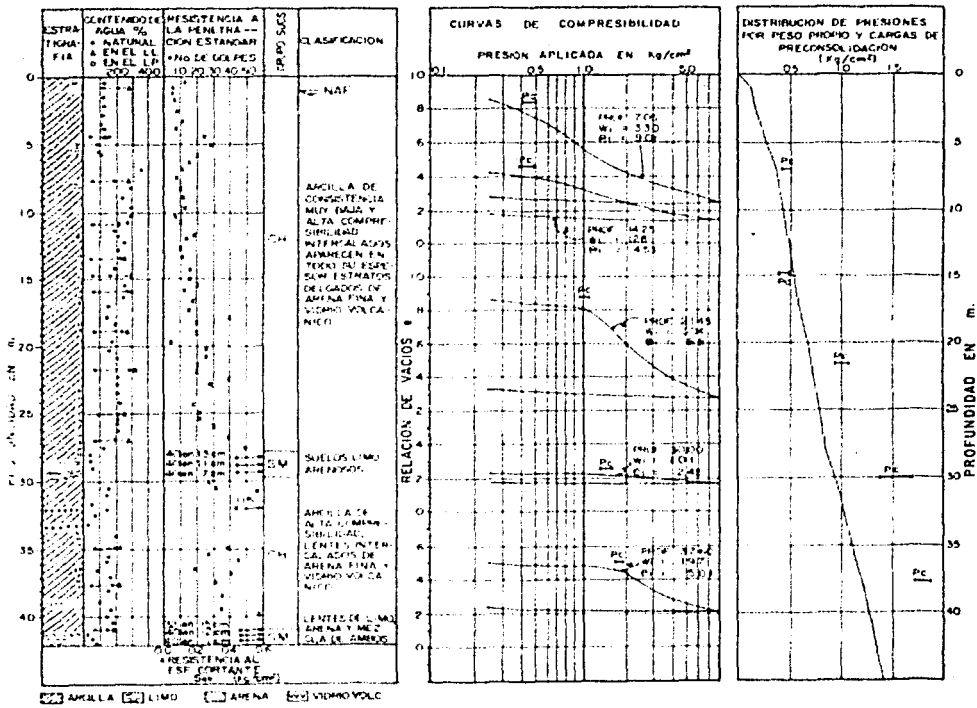


Fig. 2.5 Perfil de la zona afectada por bombeo, propiedades índice y mecánicas (Murillo, 1978).

La resistencia de las formaciones arcillosas se consigna en la tabla 2.2. Resultado de pruebas de compresión no confinada, triaxiales no consolidada no drenada (UU) y de veleta in situ. Las menores resistencias se presentan a poca profundidad, entre la capa superficial y el estrato arenoso de la FAS, con un valor medio de 10.8 kPa y mínimos de 5 kPa. La sensibilidad de las arcillas (St), varía entre 2 y 40, con valor medio de 3.17 en pruebas in situ. Las pruebas triaxiales y de veleta se realizaron con equipos especialmente diseñados para los suelos blandos del lago de Texcoco.

TESIS CON
 FALLA DE ORIGEN

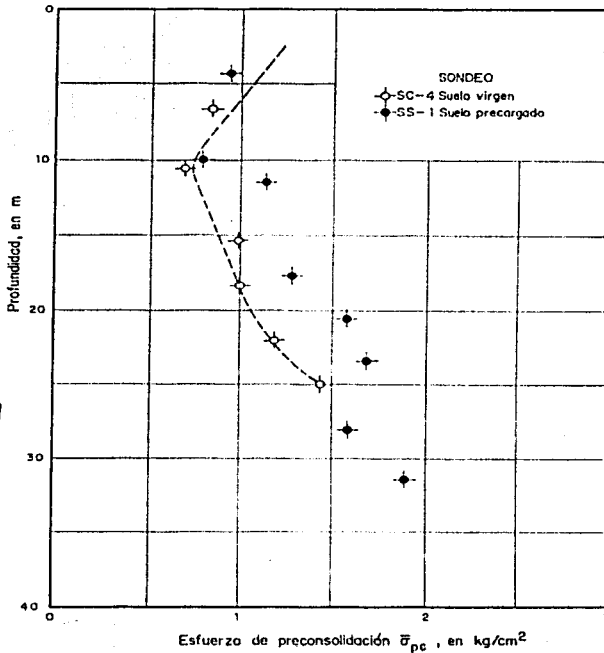
Tabla 2.2 Resistencia al esfuerzo cortante (Murillo y Morales, 1991).

Formación	C_{uq} (kpa)	C_u (kpa)	C_{vmax} (kpa)	C_{vR}	S_t
FAS	12.7	20.9	21.4	6.3	3.17
FAI	26.5	38.5	51.6		

C_{uq} cohesión en compresión no confinada; C_u cohesión en Triaxial (UU);
 C_{vmax} y C_{vR} cohesión in situ, máxima y residual; S_t sensibilidad de las arcillas

Por otro lado, las pendientes de las ramas virgen y de recompresión de las curvas *e-versus* $-\log p$ de la arcilla tienen una relación entre 8 y 12; es decir, si los esfuerzos superan la carga de preconsolidación, el material muestra deformaciones muy grandes, mientras que en la rama de recompresión estas deformaciones son un orden de magnitud menores, aunque también grandes (Jaime, 1987).

Las cargas de preconsolidación de arcilla decrecen con la profundidad, en la parte cercana de la superficie, y a los 15 m y 20 m empiezan a crecer rápidamente (figura 2.5).



TESIS CON
 FALLA DE CARGEN

Fig. 2.5 Cargas de preconsolidación (Jaime, 1987).

A pesar de que el nivel de aguas freáticas es muy superficial en el valle, es común encontrar que a profundidades variables la presión del agua intersticial sufre abatimiento, especialmente cerca de la primera capa dura y de los depósitos profundos.

Respecto a la resistencia no drenada de las arcillas determinada en pruebas Triaxiales UU se observa que en la FAS del lago de Texcoco virgen varía entre 0.15 y 0.30 kg/cm² y en la zona precargada entre 0.30 y 0.65 kg/cm². La arcilla se encuentra con frecuencia fisurada en su estado natural (se observa que las fallas ocurren en grietas preexistentes), razón por la cual en el ensayo de compresión simple se obtienen valores de resistencia erráticos y menores que en la Triaxial UU.

En el ensayo Triaxial CU las muestras de arcilla muestran un ángulo medio de fricción interna en términos de esfuerzos totales $\phi_{cu}=20^{\circ}$ y una cohesión entre 0.1 y 0.4 kg/cm², que aumenta con la profundidad.

En pruebas triaxiales consolidadas no drenadas (CU), se determinó que el ángulo de fricción interna aparente (Φ_u), se reduce de 41 a 34^o cuando la velocidad de deformación cambia de 94 a 0.045%/ hora y que a largo plazo, el ángulo de fricción aparente es de 29^o, en términos de los esfuerzos efectivos (Alberro e Hiriart, 1973).

En triaxiales consolidadas drenadas (CD) en compresión y extensión, se obtuvieron ángulos de fricción interna (Φ'), de 45 y 50^o respectivamente.

CAPITULO III

HUNDIMIENTOS REGIONALES EN LA ZONA DE LAGO

III.1 Antecedentes

A la llegada de los españoles, el valle de México lo constituía el lago de Texcoco, cuyas aguas eran saladas por el contenido de salitre de su lecho y el lago de Chalco, estos lagos formaban parte de una gran planicie rodeada de montañas cubiertas por pinos, encinos, robles y numerosos ríos pequeños. En su estado natural, la cuenca tenía una serie de lagos, desde los de agua dulce en el extremo superior, hasta los salados del extremo más bajo, en los que se concentraba la sal debido a la evaporación. La corriente de agua subterránea originaba numerosos manantiales al pie de las montañas, así como pozos en el valle. Como los lagos estaban a diferente altura, el agua de Chalco se desbordaba con frecuencia sobre el de Texcoco. Debido a la falta de desagües los habitantes del valle se encontraban a menudo con desbordamientos en los niveles de los lagos, a los que solo les bastaba la presencia de veranos lluviosos.

El aumento en los niveles de los lagos ocasionó daños cuantiosos debido al asentamiento de indígenas que para el año 1450, se había extendido hacia las superficies ganadas al agua. Como consecuencia a estos asentamientos se construyeron bordos y diques de contención, dividiendo desde entonces el lago de Texcoco y la parte occidental del valle a la que se le dió el nombre de laguna de México.

Hacia el año de 1555 se diseñó y construyó el bordo de Nezahualcoyotl, de más de doce kilómetros de longitud y cuatro metros de ancho, como protección a la gran Tenochtitlan de las continuas inundaciones (fig.3.1). Sin embargo, en los años 1604 y 1607 ocurrieron graves inundaciones, provocadas principalmente por los escurrimientos del río Cuautitlan, como consecuencia se autorizó la construcción de un túnel en la zona de Nochistongo, al noroeste del valle de México (fig. 3.2), poco tiempo después ocurrieron derrumbes que inutilizaron el túnel por lo que se decidió sustituirlo por un tajo o zanja, que pudo ser terminada después de 160 años de trabajo. En 1846 es descubierta una nueva forma de abastecimiento de agua potable subterránea proveniente de los pozos artesianos, iniciándose así una excesiva perforación de pozos (Orozco y Berra, 1864); la extracción creciente de agua de pozo, combinada con los métodos artificiales de drenado del valle, provocó que muchos manantiales naturales se secaran, que los lagos menguaran y que el agua del subsuelo perdiera presión, con la subsecuente consolidación de las formaciones de arcilla lacustre sobre las que se asienta la ciudad.

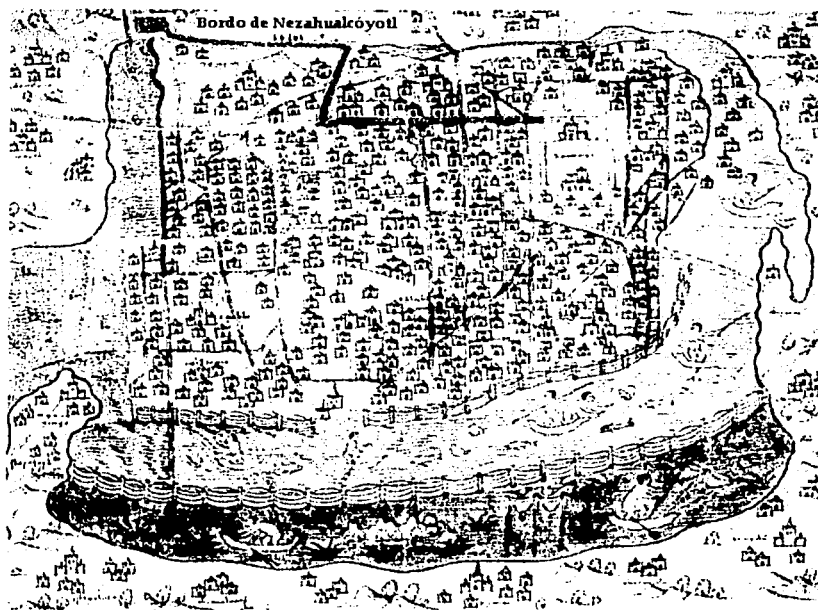


Fig. 3.1 Tenochtitlan México según Alonso de Santa Cruz en 1560 (DGCOH, 1990).



Fig. 3.2 Forma y levantado de la ciudad de México según Juan Gómez de Transmonte en 1628 (DGCOH, 1990).

A principios de 1856 se realizó un concurso para el proyecto de las obras de desagüe; el plan más completo y mejor calificado fué el del ingeniero Francisco Garay, que comprendía el Gran Canal de desagüe y el primer túnel de Tequisquiac, ambas obras se inauguraron en el año de 1900, y a pesar de haber sido un gran esfuerzo, de ninguna manera había logrado la solución total. En 1930 se terminó la primera red de drenaje por gravedad, consistente en un sistema de tuberías que descargaban al Gran Canal en el lago de Texcoco. Como consecuencia del crecimiento demográfico y de la expansión urbana este sistema se volvió insuficiente para una población que se había duplicado en diez años y que en 1940 era casi de dos millones de habitantes.

En esa época hubo varias inundaciones graves en las partes bajas de la ciudad, ya que además otro problema se había añadido: el hundimiento cada vez mas acelerado del suelo, ocasionado por la sobreexplotación de los recursos acuíferos, que deterioró el sistema y disminuyó su capacidad para desalojar las aguas del valle, lo que motivó la ampliación del gran canal y la construcción del segundo túnel de Tequisquiac, ambas obras descargan en el río Tula que a su vez desemboca en el río Moctezuma y este en el Panuco.

Desde principios del siglo XX hasta 1936, los hundimientos de la ciudad de México se mantuvieron en el orden de cinco centímetros por año. Al aumentar la demanda de agua se inicio la perforación de pozos profundos, y entre 1938 y 1948, el hundimiento en el distrito federal se incremento a 18 centímetros por año, para llegar después a 30 y 50 centímetros anuales. En 1960 se construyeron el interceptor y el emisor del poniente, con objeto de recibir y desalojar las aguas del oeste de la cuenca, descargándolas a través del tajo de Nochistongo.

En 1975 se inauguró el sistema de drenaje profundo de la ciudad de México, que descarga sus aguas también en el río Tula. Estas obras hidráulicas y otras complementarias han evitado inundaciones como las de antaño pero por otro lado han contribuido a la desecación casi total de los lagos del valle, como consecuencia de la extracción del agua potable de los acuíferos (Jaime, 1988).

III.2 Subcuencas de la zona de lago

Basándose en datos geofísicos y de sondeos, se considera que la zona lacustre del valle esta conformada por la subcuenca de Zumpango, al norte, la subcuenca ciudad de México, al centro y al poniente, la subcuenca Texcoco al centro-oriente, y la subcuenca Chalco-Xochimilco al sur.

Para todas estas subcuencas la elevación de 2240 metros sobre el nivel del mar representa el limite de la superficie del lago en su formación original y presentan algunas características especiales que se mencionan a continuación.

III.2.1 Subcuenca de Zumpango

Del perfil de materiales encontrados en las perforaciones efectuadas para la instalación de piezómetros, se desprende que la estratigrafía de esta subcuenca es diferente de la de las otras tres subcuencas. Las depresiones piezométricas registradas a partir de 50 m de profundidad son grandes (fig. 3.13) y aumentan anualmente más de un metro, (boletín 10. mecánica de suelos,1986).

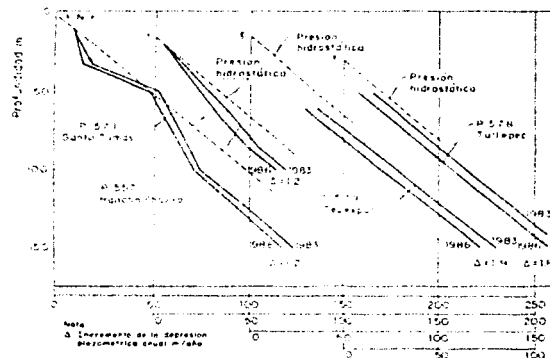


Fig. 3.13 Observaciones piezométricas. Subcuenca Zumpango (Mazari et al, 1992).

En la región noreste de esta subcuenca, hacia Pachuca, el subsuelo es esencialmente rocoso y los abatimientos piezométricos son pronunciados, sobre todo en la cercanía de las zonas industriales (fig.3.14, fraccionamiento industrial la Paz) en donde pareciera existir, una recarga o un acuitardo a 180 m de profundidad aproximadamente.

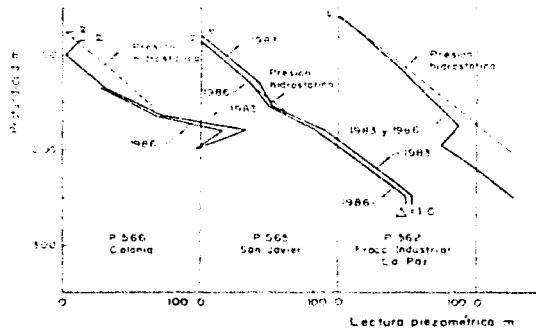
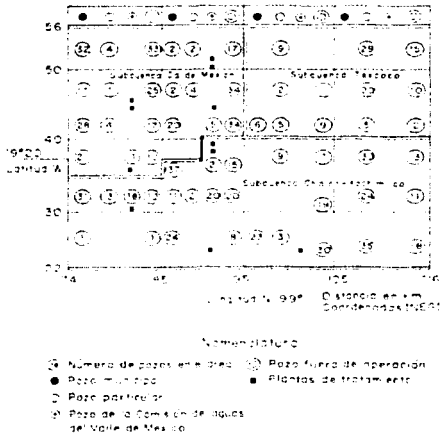


Fig. 3.14. Observaciones piezométricas. Frontera noreste de la subcuenca de Zumpango (Mazari et al, 1992).

La región sur-este de esta subcuenca abastece de agua potable el norte de la ciudad de México mediante el campo de pozos de bombeo de Chiconautla (Al inicio del proyecto Chiconautla el número de pozos era 15 y en la actualidad son 53, proporcionando un gasto de 4.5 m³/s.).Las extracciones de agua en la subcuenca de Zumpango han creado, por tanto, un decremento notable a profundidad, de las presiones piezométricas. Sin embargo las aguas ahí utilizadas para riego, al reingresar en los acuíferos de la zona como agua de recarga compensan, en parte los efectos del gasto de agua extraída por bombeo, que se ha tratado también de reducir mediante la construcción de bordos que almacenan agua en la llamada laguna de Zumpango.

III.2.2 Subcuencas ciudad de México, Texcoco y Chalco-Xochimilco

El subsuelo de estas tres subcuencas esta formado por depósitos lacustres, esencialmente arcillosos en su parte superior, y todas ellas además sometidas a un bombeo intenso, en la figura 3.15, se muestra la distribución de los pozos así como los gastos totales extraídos en cada una de las subcuencas.



Subcuenca	No. de pozos activos	No. de pozos fuera de operación	Gasto promedio por pozo l/s	Gasto total m ³ /s
Ciudad de México	143	170	58	8.29
Texcoco	76	37	68	5.17
Chalco-Xochimilco	273	152	99	27.03
Total	492	359		40.49

Fig. 3.15 Número y distribución espacial de pozos en las subcuencas de la ciudad de México, Texcoco y Chalco-Xochimilco. (Lesser et al, 1990)

Capítulo III

A partir de la veda decretada en 1954, para los pozos localizados en la ciudad, la velocidad de hundimiento ha sido regular y del orden de 6 cm/año, sin embargo de acuerdo con los datos presentados en la figura 3.16, en las zonas periféricas del área urbana, la velocidad de hundimiento alcanza magnitudes de 30 cm/año en Cd. Nezahualcoyotl, de 20 cm/año en la cercanía del aeropuerto, y de 15 cm/año en su vecindad con la subcuenca de Chalco-Xochimilco, afectada por un bombeo intenso aunque relativamente reciente.

En relación a la zona norponiente del exlago de Texcoco está sufrió durante muchos años los efectos de la extracción de agua, en los suelos permeables localizados a profundidades de 30 y 60 m. En Texcoco se estima que los hundimientos totales entre el año 1940 y el año 2001 exceden los 8 m. Es interesante señalar que la mayor parte de este hundimiento ha ocurrido en los últimos treinta años.

Adicionalmente se identificaron sitios que en los últimos años han presentado velocidades de hundimiento regional entre 41 y 49 cm/año; su ubicación coincide con los depósitos de suelo principalmente arcillosos de mayor espesor, cuya historia de cargas es escasa. Cabe señalar que debido al desarrollo del hundimiento en función del tiempo, los sitios que han presentado los mayores asentamientos no siempre coinciden con los que acusan las mayores velocidades de hundimiento registradas en los últimos años.

Hundimientos regionales en la zona de lago

La información para la generación de este plano fue proporcionada por la DGGM

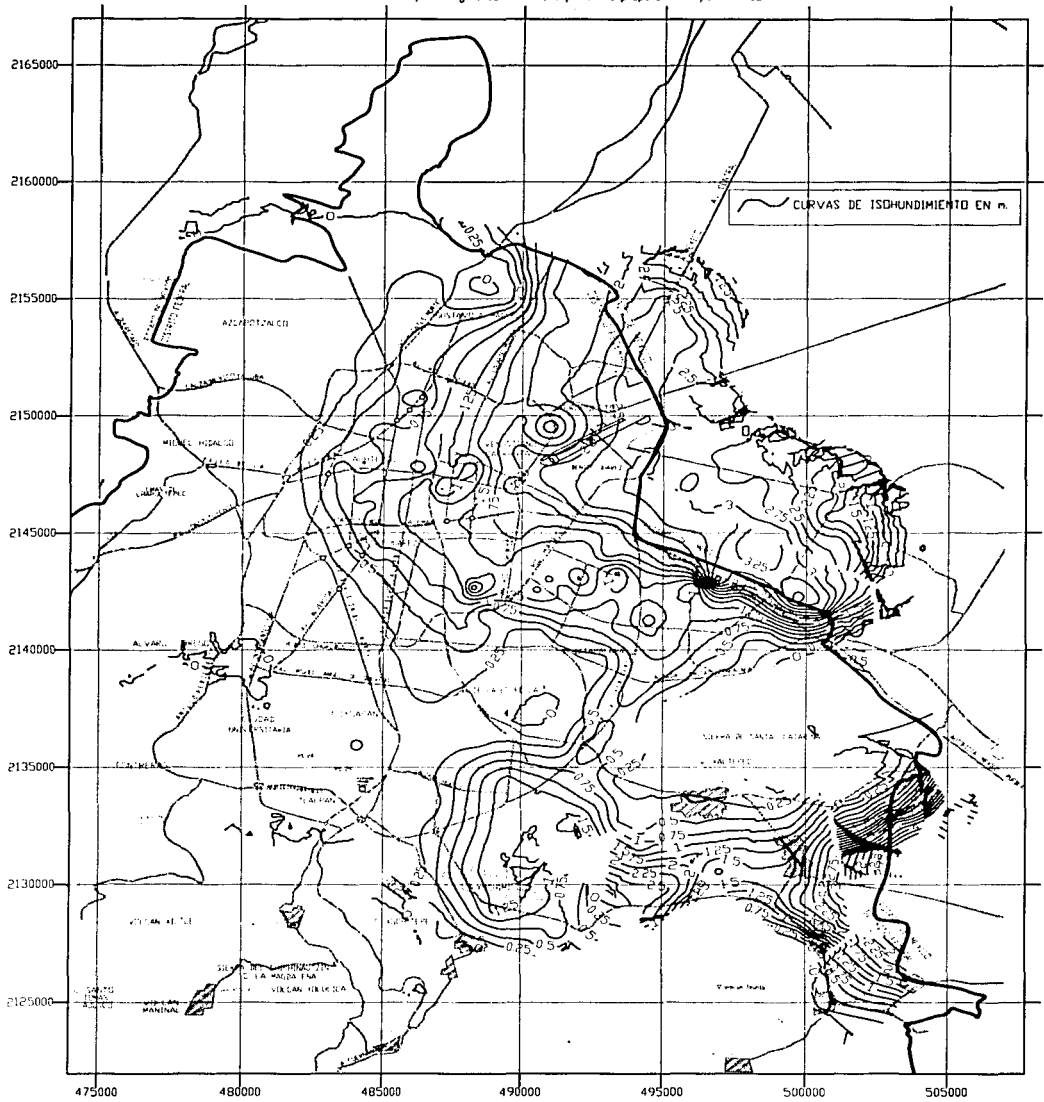


Fig. 3.16 Curvas de isohundimientos

TESIS CON
FALTA DE ORIGEN

III.3 Hundimiento regional en la zona de lago

Los primeros estudios indicadores del Hundimiento Regional en el valle de México, son dados a conocer por Téllez Pizarro en 1899, posteriormente en 1925, Roberto Gayol, informó a la Sociedad de Ingenieros y Arquitectos de México, el proceso de hundimiento del valle y la causa probable de este fenómeno; considerando el abatimiento del nivel freático causado por la red de desagüe, fundamenta su afirmación en nivelaciones realizadas en la zona céntrica de la ciudad y el lago de Texcoco (cabe señalar, que en esa época se debatía que la diferencia de niveles entre la ciudad y el lago se debía al azolvamiento de este último).

José A. Cuevas entre los años 1920 y 1930 (Zeevaert,1973), fue el continuador de las ideas de R. Gayol y propone al Dr. Nabor Carrillo estudiar la influencia de la explotación de pozos para agua, sobre el hundimiento.

En 1948, el Dr. Nabor Carrillo, explica el hundimiento empleando técnicas de la naciente mecánica de suelos y señalando como su causa la consolidación de los mantos de arcilla (que se manifiesta por la pérdida gradual del espesor de los depósitos de origen lacustre que caracterizan al valle) debido a incrementos de esfuerzos efectivos provocados por la disminución de la presión del agua intersticial del subsuelo apoyándose en uno de los conceptos fundamentales enunciados por Karl Terzaghi: la relación que existe entre esfuerzos totales y efectivos.

El hundimiento regional que ocurre en el valle de México, inducido principalmente por la extracción de agua subterránea, es producto del fenómeno de consolidación a que están sujetos los depósitos de suelo que lo constituyen, estos ocurren dentro de cada estrato o substrato de arcilla siendo proporcionales a las pérdidas de presión de poro que han ocurrido en ellos y a su compresibilidad, aunque está también es función de los esfuerzos efectivos y de la historia de cargas. Bajo la acción de las cargas impuestas por estructuras, el suelo se vuelve menos compresible y mas resistente. En los sitios donde no existen estructuras o estas son pequeñas y de poca altura, el suelo sigue siendo altamente compresible; sin embargo, el subsuelo en la zona central de la ciudad presenta variaciones notables, principalmente de compresibilidad, aun entre lugares poco distantes. Las grandes obras y monumentos arquitectónicos coloniales del centro histórico sufrieron hundimientos diferenciales pues se cimentaban con un sistema que solo evitaba las fallas por capacidad de carga en el corto plazo pero no los asentamientos excesivos por consolidación; algunos de estos problemas se atribuyen a las inundaciones que periódicamente asolaban a la ciudad. En la fig. 3.3 se puede apreciar el hundimiento medio observado en el periodo comprendido entre los años 1900 a 1990.

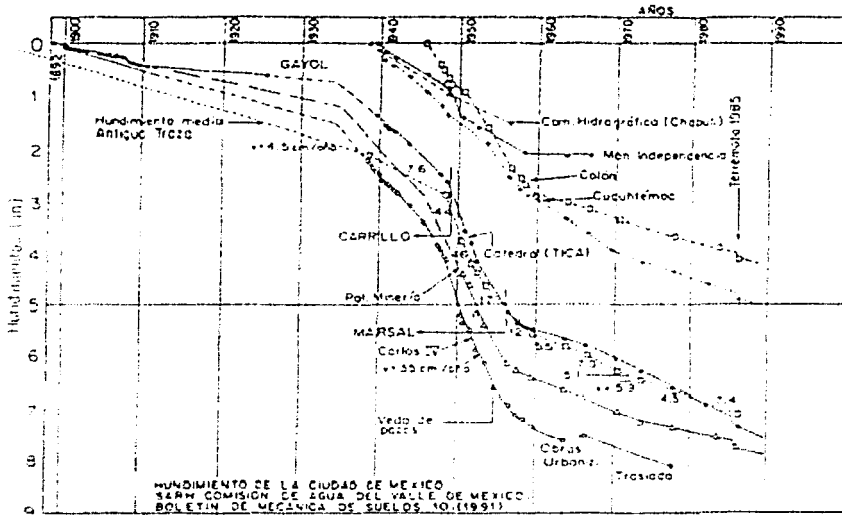


Fig. 3.3. Hundimientos en la ciudad de México (Mazari et al, 1992).

Considerando que los hundimientos no son uniformes dentro de la masa de suelo; en un sitio dentro del atrio del sur de la Catedral Metropolitana, por ejemplo, se instalaron bancos de nivel profundo diseñados especialmente para quedar aislados del campo de desplazamientos producido por el hundimiento regional (Tamez et al, 1992). Se instaló un banco superficial y otros a 40, 60, 80 y 100 metros de profundidad. Después de nivelarlos periódicamente entre el 26 de marzo de 1991 y el 4 de mayo de 1992, se concluyó que en este sitio, 54% del hundimiento total superficial ocurre por la compresión de los suelos que se encuentran entre 0 y 40 metros de profundidad; 15% se debe a las deformaciones que tienen lugar entre 40 y 60 metros y el 31% restante entre esta última profundidad y 80 metros; recientemente se ha visto que el banco de nivel profundo localizado a 100 m bajo el nivel del terreno, también se hunde con respecto al banco fijo de Atzacualco, a razón de 1 o 2 cm/año. La distribución de hundimientos obtenida en ese lugar se muestra en la fig. 3.4.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

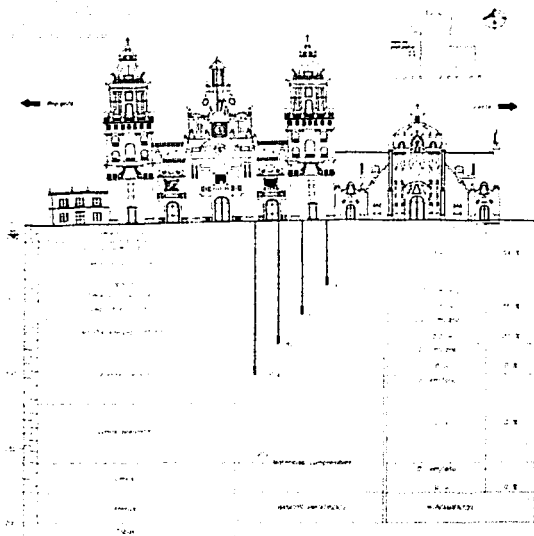


Fig. 3.4 Distribución de hundimientos en marzo de 1991 (Tamez et al, 1992).

Durante el periodo observado, la velocidad de hundimiento regional total en ese sitio era de 7.2 cm/año. Actualmente existen otros sitios cercanos en donde las velocidades de hundimiento exceden los 10 cm/año, como se muestra en la fig.3.5 para dos puntos localizados en el zócalo de la ciudad de México. Recientemente se han reportado valores considerablemente más grandes en la subcuenca de Xochimilco-Chalco y en el NE de la zona lacustre donde se han llegado a registrar velocidades de hundimiento de mas de 30 cm/año.

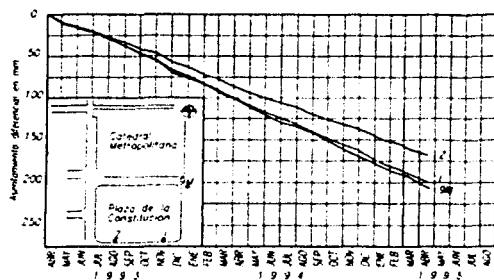


Fig. 3.5 Asentamientos superficiales observados en la ciudad de México (Ovando y Takahashi, 1998).

La existencia de los lagos en el valle, tenía como efecto un nivel piezométrico superficial y por efecto de la recarga en las serranías se presentaba artesianismo en la capa dura y depósitos profundos. La desecación de los lagos y la intensa explotación del acuífero han provocado fuertes pérdidas piezométricas, que manifiestan un abatimiento de 1.1 m/año a profundidad mayor de 200 metros, y los Depósitos Profundos Superiores tienen pérdidas de 0.63 m/año para el periodo comprendido entre los años 1985 a 1990, lo que incrementa la velocidad del hundimiento regional, con valores medios de 16.5 cm/año, 23.6 cm/año, 22.7 cm/año y 28.0 cm/año para los periodos de 1972 a 1977, de 1977 a 1982, de 1982 a 1987 y de 1987 a 1990 respectivamente, con máximos de 33 cm/año al centro del exlago (Murillo, 1990).

Aunado al fenómeno de consolidación del subsuelo se observa que la extracción del agua de la arcilla da lugar al desarrollo de estados de tensión provocando la formación de grietas y fisuras verticales (fig. 3.6), debido a que la masa del suelo se encoge de manera diferencial tanto de las formaciones lacustres como aluviales de la ciudad de México (algunas de estas evidencias se presentan en el lago de Texcoco, Ecatepec, Colonia Roma, Coapa, etc).

El agrietamiento común de la zona lacustre no presenta dirección preferencial y por lo general no se manifiesta desnivel; la máxima separación reportada ha sido del orden de 1 metro (Reséndiz et al, 1970); en observaciones realizadas por el Ing. Rodrigo Murillo (en un campo de pozos de 3000 x 1200 m con explotación intensiva, para formar el lago Dr. Nabor Carrillo en Texcoco), se registraron aberturas hasta 1.6 m, profundidades superiores a 6 m, la longitud máxima de las fracturas fue del orden de 500 m y su trayectoria era cercana a la línea recta en la periferia del campo de bombeo y circular o radial a los pozos. Estas grietas en general no atraviesan construcciones de importancia, sino que se desvían o desaparecen al acercarse a edificaciones que evitan los cambios de contenido de agua de los estratos arcillosos superficiales por evaporación o por lluvia.

Debido a que la zona afectada por el agrietamiento se ha extendido hacia el oriente, norte y sur de la zona lacustre, con mayor frecuencia se presentan fisuras en la cercanía a las zonas de transición, como la sierra de Guadalupe, Chimalhuacán, Ixtapaluca, Peñón del Marqués, La Estrella y Xochimilco, en las que se observa una consolidación mas rápida provocando incluso deslizamientos de las capas superficiales inclinadas, como en el caso de la ladera de Peñón de los Baños (Marín, 1978).

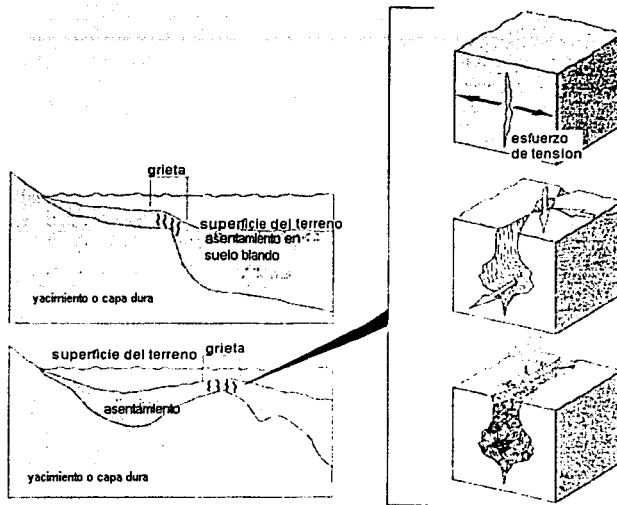


Fig. 3.6. Crecimiento progresivo de grietas o fisuras verticales.

Además del abatimiento de presiones del agua que es generalizado, existen dos causas locales de importancia en el proceso del hundimiento regional.

1. Influencia del desagüe de la ciudad en el hundimiento. De acuerdo con la información existente, en la región del lago ocupada por la ciudad, el nivel de agua freática (NAF) se hallaba a 1.5 m bajo la superficie. En la actualidad se encuentra a una profundidad comprendida entre 2 y 3 m. al parecer, la caída del NAF ocurrió entre 1905 y 1910 poco tiempo después de instalado el sistema de drenaje. Esto indujo sobre los mantos de arcilla un incremento en los esfuerzos efectivos de 1 t/m^2 . Considerando la estratigrafía y las propiedades mecánicas, el hundimiento medio atribuido a la caída del NAF en la zona cubierta por el drenaje es del orden de 1 m.
2. Influencia de las cargas superficiales en el hundimiento. Los edificios de la época hispana, eran de 2 y 3 pisos en la zona céntrica de la ciudad. Se estima que el incremento de esfuerzos provocado por las construcciones, no es mayor de 2 t/m^2 en promedio. El asentamiento total correspondiente a las cargas de los edificios debe ser menor de 1.50 m y por consideraciones similares a la caída del NAF, es aceptable suponer que el proceso de consolidación inducido por tales cargas haya terminado antes del siglo pasado (Méndez, 1991).

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

III.4 Estudios teóricos sobre el hundimiento

Basado en la teoría de la consolidación, se presentan el estudio desarrollado por el doctor Nabor Carrillo en 1947. Los resultados de los estudios teóricos se pueden comparar con los datos de nivelación para comprobación de los métodos.

III.4.1 Teoría del Dr. Nabor Carrillo

Análisis Teórico basado en la teoría de Karl Terzaghi, sobre consolidación de mantos arcillosos, debido a Nabor Carrillo.

Un depósito de arcilla compresible, homogéneo, de espesor H , cubierto por una capa superficial permeable y apoyado sobre una formación arenosa, es sujeto a los efectos de una pérdida constante de presión (Δ_p) en su base inferior; el nivel freático mantiene su posición relativa a la superficie del terreno. Antes de provocarse el abatimiento (Δ_p), la distribución de presiones en el agua era la hidrostática de equilibrio o sea, lineal con la profundidad representada por una recta de 45° en la figura 3.7.

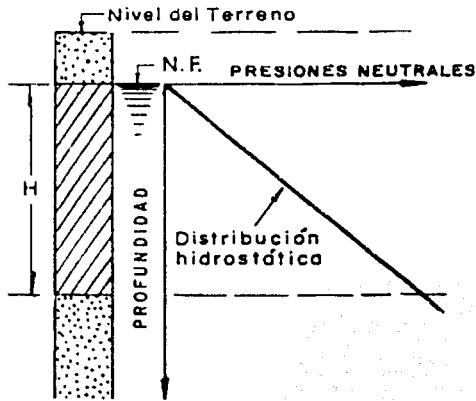


Fig. 3.7. Distribución de presiones neutrales durante el proceso de consolidación provocado por una depresión Δ_p constante (Marsal y Mazari, 1959).

Al producirse la caída de presión Δ_p se inicia un proceso de consolidación, la arcilla se comprime por las fuerzas de filtración y la ley según la cual varían las presiones en el agua, al transcurrir un cierto tiempo t , como se muestra en la figura 3.8.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

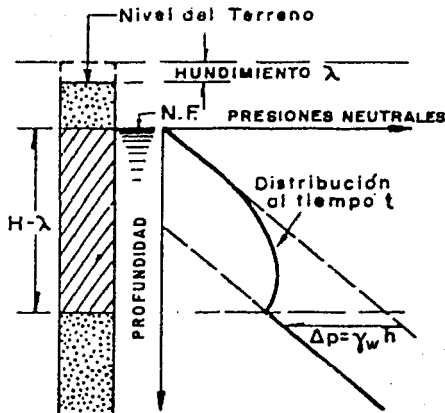


Fig. 3.8. Distribución de presiones neutrales durante el proceso de consolidación provocado por una depresión Δ_p constante (Marsal y Mazari, 1959).

Después de pasado un periodo de tiempo suficientemente largo, la distribución de presiones neutrales es otra vez una función lineal de la profundidad, pero su pendiente resulta igual a:

$$1 - \frac{\Delta_p}{\gamma_w (H - \lambda_f)}$$

donde

γ_w es el peso específico del agua y

λ_f el hundimiento producido por la depresión Δ_p , esta causa en el depósito de arcilla un incremento medio de esfuerzos efectivos igual a:

$$\Delta \sigma = \frac{\Delta_p}{2} = \frac{\gamma_w h}{2}$$

como puede apreciarse en la figura 3.9.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

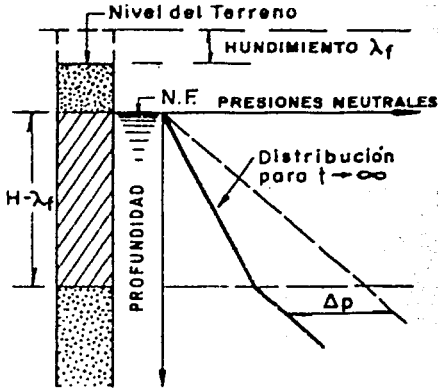


Fig. 3.9. Distribución de presiones neutrales durante el proceso de consolidación provocado por una depresión Δp constante (Marsal y Mazari, 1959).

De acuerdo con la teoría de consolidación propuesta por K. Terzaghi, el exceso de presión hidrostática media \bar{u} en el manto compresible está dado por la expresión:

$$\bar{u}_0 = \Delta \sigma \sum_{m=0}^{\infty} \frac{2}{M^2} \exp(-M^2 T) \quad (3.1)$$

donde:

$$M = \frac{\pi}{2} (2m + 1)$$

$m=0,1,2,\dots$ (serie de números naturales)

Tomando en cuenta la definición de el factor tiempo:

$$T = \frac{c_v t}{H^2} \quad (3.2)$$

donde:

c_v es el coeficiente de consolidación
 t , tiempo transcurrido y
 H , el espesor del manto de arcilla.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

el flujo de agua inducido por la compresión del suelo, no concurre en la frontera superior, de ahí que en la expresión 3.2, figure el espesor total del manto arcilloso.

Capítulo III

La evolución del hundimiento en el tiempo (λ) es calculado con la relación entre esfuerzos y deformaciones:

$$\frac{\lambda}{\lambda_f} = 1 - \frac{\bar{u}}{\Delta\sigma} \quad (3.3)$$

en la que:

$$\lambda_f = \frac{H}{1+e_i} a_v \Delta\sigma \quad \text{Hundimiento total por consolidación}$$

donde:

a_v es el coeficiente de compresibilidad

e_i la relación de vacíos inicial

involucrando las expresiones 3.1, 3.2 y el hundimiento total, se obtiene:

$$\lambda = \frac{H}{1+e_i} a_v \frac{\Delta_p}{2} \left[1 - \sum_{m=0}^{\infty} \frac{2}{M^2} \exp(-M^2 T) \right] \quad (3.4)$$

siendo válido para las deformaciones del suelo causadas por la consolidación primaria.

Para la ciudad de México debe considerarse que la depresión Δ_p en los estratos permeables subyacentes a la formación arcillosa no es constante, por lo que es conveniente considerar para el planteamiento del problema lo siguiente:

Conocida la ley de hundimiento y las propiedades mecánicas de la formación arcillosa, determinar la variación de las presiones neutras en los estratos permeables inferiores y comprobar si coincide con las mediciones piezométricas.

La ley de hundimientos puede suponerse compuesta de tres etapas distintas en donde la velocidad de asentamiento λ' es prácticamente constante, entonces:

$$\lambda = \lambda' t \quad (3.5)$$

Si se considera que el NF se mantiene fijo con respecto a la superficie del terreno durante el proceso de consolidación, equivale a suponer que el estrato arenoso tiene suficiente alimentación de agua para que se cumpla la condición mostrada en la fig. 3.9, por lo tanto el incremento de esfuerzos en la formación compresible es igual a:

$$\Delta\sigma = \frac{\Delta_p}{2} = \frac{\gamma_w h}{2} \quad (3.6)$$

Donde h es la carga de agua equivalente a la depresión Δ_p .

De las expresiones:

$$\lambda = \lambda' t \text{ y } t = \frac{H^2}{c_v} T$$

el asentamiento λ es igual a:

$$\lambda = \lambda' \frac{H^2 T}{C_v} \quad (3.7)$$

De la expresión 3.3, se tiene que:

$$\lambda = \lambda_f - \left(1 - \frac{\bar{u}}{\Delta\sigma}\right) = \frac{H}{1+e_i} a_v \Delta\sigma \left(1 - \frac{\bar{u}}{\Delta\sigma}\right) \quad (3.8)$$

igualando las expresiones 3.7 y 3.8 :

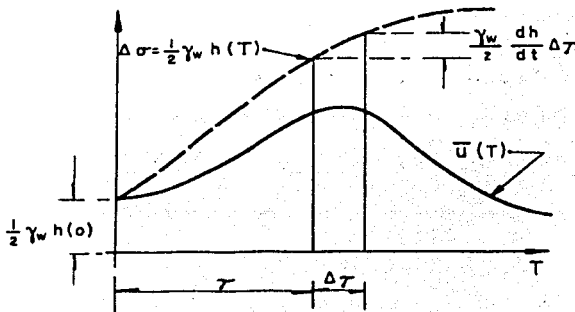
$$\lambda' \frac{H^2 T}{C_v} = \frac{H}{1+e_i} a_v \Delta\sigma \left(1 - \frac{\bar{u}}{\Delta\sigma}\right)$$

$$\left(1 - \frac{\bar{u}}{\Delta\sigma}\right) = \frac{\lambda' H (1+e_i) T}{a_v \Delta\sigma C_v}$$

se obtiene el exceso de presión hidrostática media en el deposito de arcilla:

$$\bar{u} = \Delta\sigma - \frac{\lambda' H (1+e_i) T}{a_v C_v} = \Delta\sigma - \alpha_1 T \quad (3.9)$$

Suponiendo que el abatimiento de presiones $\gamma_w h$ en el estrato permeable inferior, se verificar según la ley de tiempo mostrada en la figura 3.10.



TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Fig. 3.10 Evolución de las depresiones medias en la formación arcillosa (Marsal y Mazari, 1959).

Capítulo III

Su acción puede considerarse equivalente a la suma de incrementos constantes

$$\frac{\gamma_w}{2} \frac{dh}{d\tau} \Delta\tau$$

Aplicados sucesivamente en los instantes τ .

La caída de presiones medias en la formación arcillosa, inducidas por cada uno de aquellos incrementos serán de la forma:

$$\bar{u}_i = \frac{\gamma_w}{2} h'(\tau) \Delta\tau \sum_{m=0}^{\infty} \frac{2}{M^2} \exp < -M^2(T - \tau) > \quad (3.10)$$

donde T es el factor tiempo.

Si se designa con $\gamma_w h(0)$ la depresión existente en el momento inicial, el exceso $\bar{u}(T)$ promedio en el manto compresible resulta:

$$\bar{u}(T) = \frac{\gamma_w}{2} h(0) \bar{u}_0(T) + \frac{\gamma_w}{2} \int_0^T h'(\tau) \bar{u}_0(T - \tau) d\tau \quad (3.11)$$

para $T \geq 0$.

Los abatimientos de la presión en el agua que satura al manto arcilloso son al principio independientes del espesor H, en cambio para valores elevados de T, dichos abatimientos resultan una función lineal del tiempo transcurrido.

La solución teórica del Dr. Nabor Carrillo (1948) es solo valida para un estrato de arcilla y no toma en cuenta los depósitos delgados de arena inferiores (aunque estos deben ser pequeños con respecto al de las arcillas).

A fin de comparar las soluciones encontradas, en la tabla 3.1, Marsal y Mazari (1959) calcularon $\frac{\gamma_w h}{\alpha_1}$ para distintos valores de T comprendidos entre 10^{-3} y 5, observándose que ambas ecuaciones prácticamente coinciden cuando $0.1 \leq T \leq 0.2$ y a partir de $T=2.0$, las diferencias son muy importantes por lo que se considera la solución mas aceptable en el intervalo $0 \leq T \leq 2$ como:

$$h(t) = \frac{4}{\Pi} \frac{\alpha_1}{\gamma_w} \sqrt{T} = 2.31 \frac{H(1+e_i)}{a_v c_v \gamma_w} \lambda' \sqrt{T} \quad (3.12)$$

donde:

$$\alpha_1 = \frac{H(1+e_i)\lambda'}{a_v c_v}$$

Y la ecuación

$$h(t) = \frac{\alpha_1}{\gamma_w} [-0.408 \exp(-10.05T) - 0.256 \exp(-54.89T) + 1.99T + 0.664] \quad (3.13)$$

Para valores del factor tiempo mayores que 0.2.

Tabla 3.1. Comparación de las soluciones (3.12) y (3.13) (Marsal y Mazari, 1959).

T Factor tiempo	$\frac{\gamma_w h}{\alpha_1}$ (ecuación 3.11)	$\frac{\gamma_w h}{\alpha_1}$ (ecuación 3.12)
0.001	0.073	0.020
0.01	0.231	0.167
0.1	0.732	0.713
0.2	1.05	1.01
1.0	2.31	2.66
2.0	3.27	4.66
5.0	5.16	10.66

CAPITULO IV

EFFECTO DEL HUNDIMIENTO REGIONAL EN LAS PROPIEDADES GEOTECNICAS DE LA ZONA DE LAGO

IV.1 Antecedentes

En el año de 1987, el instituto de ingeniería de la UNAM, realizó estudios geotécnicos en los sitios Central de Abasto Oficinas (CAO), (Jaime et al, 1987) y Secretaria de Comunicaciones y Transportes (SCT) (Jaime et al, 1986) con el propósito de obtener información acerca de las características dinámicas y estáticas de ambos sitios.

Posteriormente, en el año 2000 se regreso a los sitios antes mencionados utilizando las mismas técnicas de exploración y laboratorio, con el objeto de cuantificar el efecto del hundimiento regional en las características geotécnicas de los estratos arcillosos; para obtener la información requerida y cumplir con los objetivos de esta investigación, se efectuó la exploración y muestreo geotécnico hasta una profundidad equivalente a la alcanzada en los sondeos efectuados después de los sismos de septiembre de 1985.

Con base en esta información, durante los trabajos de muestreo se fue modificando el proceso de extracción de muestras inalteradas dependiendo de la dureza de los suelos, por medio de dos tipos diferentes de muestreadores: el tubo de pared delgada con camisa TGC-1, y tubo de pared delgada convencional, garantizando así la recuperación de casi la totalidad de los estratos arcillosos, teniendo pérdida de material en algunas profundidades donde se encontraron estratos de arena.

IV.2 Secretaría de Comunicaciones y Transportes

IV.2.1 Ubicación

El sitio de investigación se localiza en Av. Xola y Av. Universidad (fig. 4.1) en los patios de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT), en el lado sur del edificio B; actualmente se encuentra instrumentado con acelerómetros tanto en pozo como en superficie.

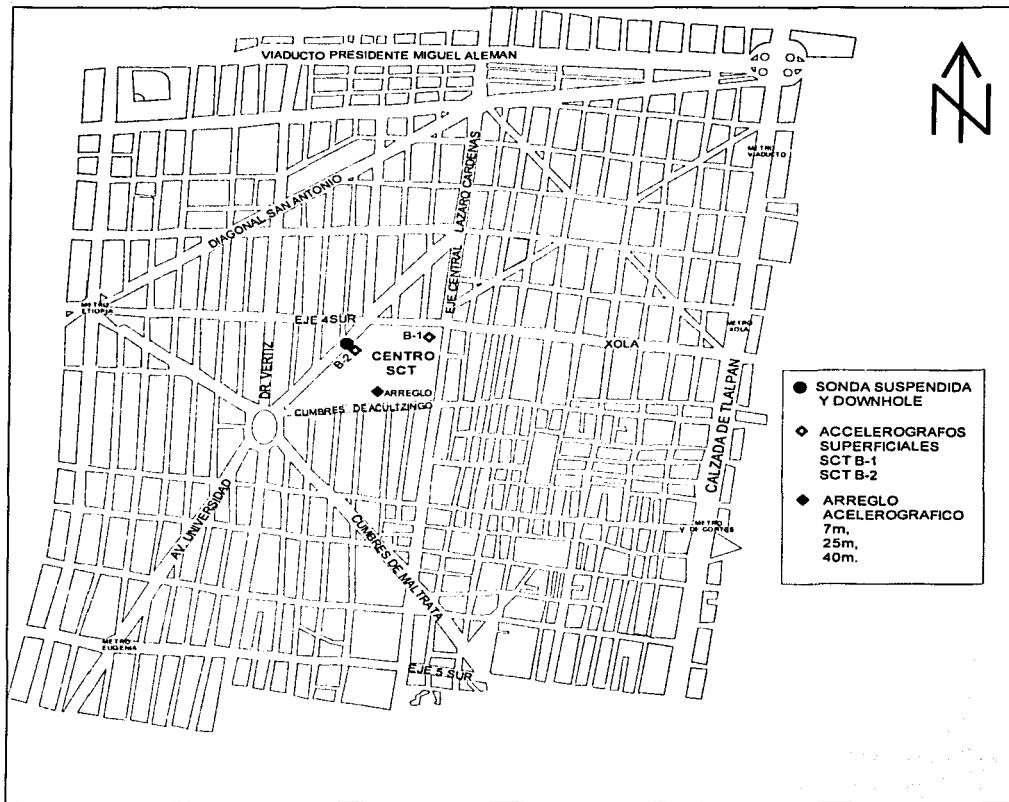


Fig. 4.1 Croquis de localización del sondeo continuo y acelerómetros en 1986 dentro de los patios de la SCT (Jaime et al,1986).

La exploración de sondeo continuo y cono eléctrico realizados en 1986, se localizan a 9 m con respecto a la misma realizada en el año 2000, como puede apreciarse en la figura 4.2. La separación horizontal del sondeo continuo con respecto al cono eléctrico realizados en el año 2000 en este mismo sitio es de 3.5 m(fig. 4.2).

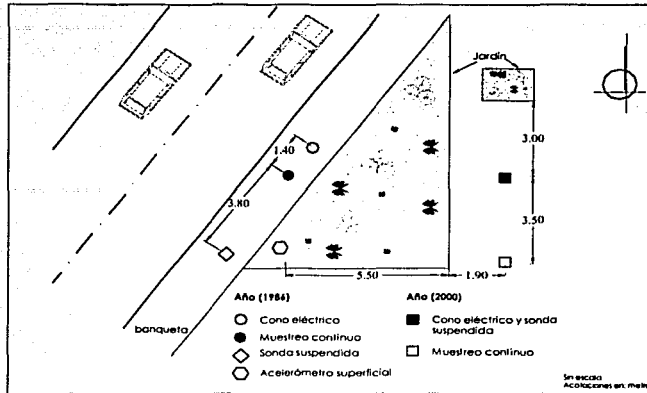


Fig. 4.2 Croquis de localización de los sondeos de campo, realizados en el sitio SCT en los años 1986 y 2000 (Franco, 2002).

La exploración y muestreo geotécnico se apoya en dos sondeos verticales, con las siguientes características:

1. obtención de un muestreo continuo inalterado hasta una profundidad de 40 m
2. utilización del cono eléctrico para determinar la resistencia de punta (q_c) a la profundidad de 30 m.

Para llevar a cabo el primer sondeo se emplearon alternadamente el muestreador de tubo de pared delgada con camisa TGC-1 (el cual tiene la ventaja de que sus deformaciones y cambios con respecto al lugar son mínimos; para estratos puramente cohesivos) y el tubo abierto de pared delgada (conocido como tubo Shelby) que permitió obtener muestras del subsuelo relativamente inalteradas.

El propósito al hacer uso del cono eléctrico fué determinar la variación de la resistencia a la penetración de punta y fricción del cono; la interpretación de estos parámetros permitió definir con precisión cambios en las condiciones estratigráficas del sitio y estimar la resistencia al corte de los suelos mediante correlaciones empíricas.

IV.2.2 Variación de los espesores arcillosos

En las figuras 4.3 y 4.4 se presenta el perfil estratigráfico del sitio, se puede apreciar cómo el patrón de cambios del límite líquido es semejante al del contenido de agua natural, en lo que se refiere a sus variaciones con la profundidad y orden de magnitud. A las profundidades de 19.75, 23.40 y 27.55 metros se aprecia que el límite líquido es mayor al de 1986, esto quizás se deba a la composición mineralógica de la arcilla que en ocasiones se encuentra con pequeños estratos de minerales (caolín, atapulgita y amorfos) o con manchas irregulares de ceniza volcánica, lo cual tiene una gran influencia en sus propiedades índice.

Capítulo IV

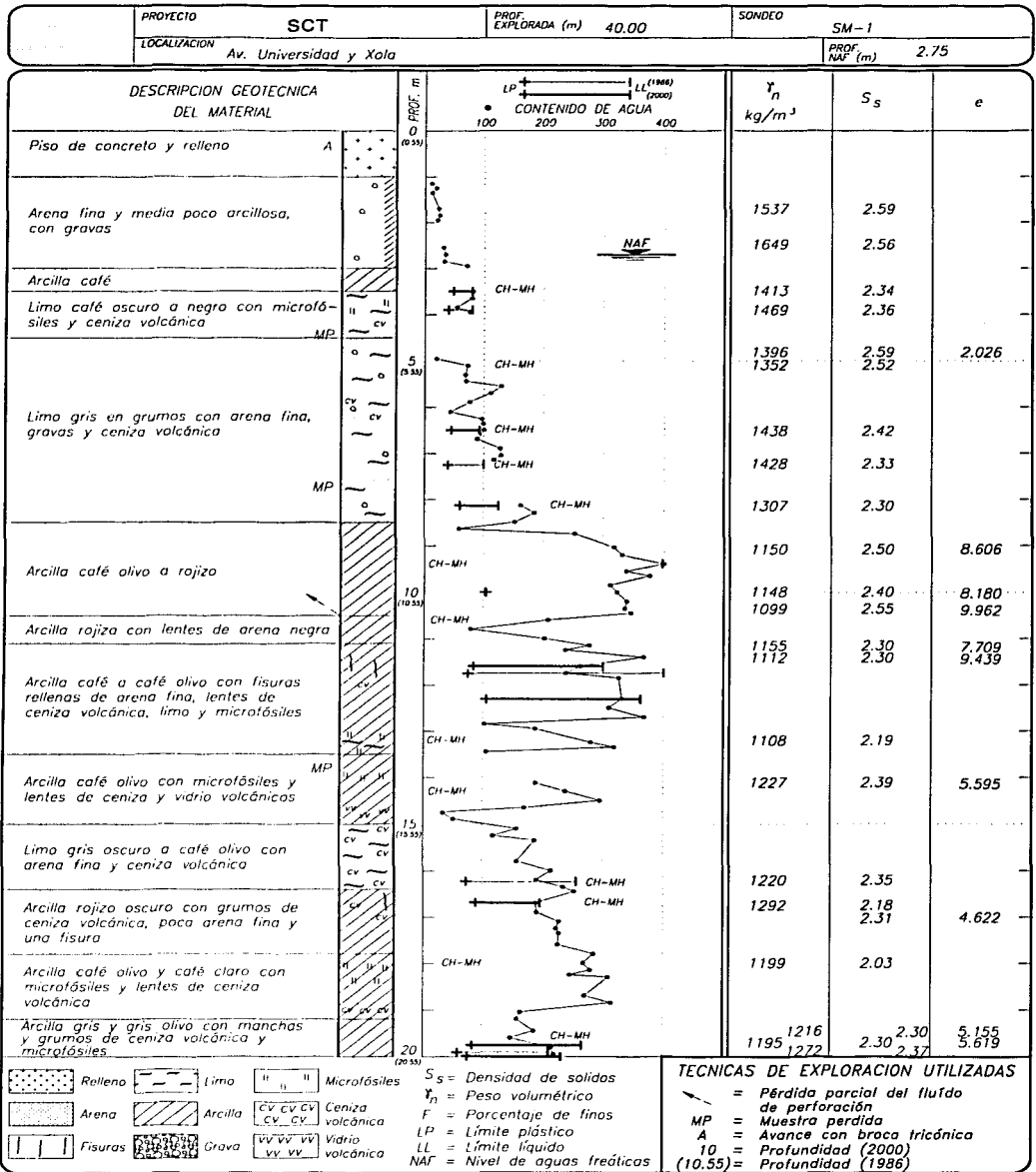


Fig. 4.3 Perfil estratigráfico que incluye los límites de plasticidad medidos en los años 1986 y 2000 en el sitio SCT (Franco, 2002).

Efecto del hundimiento regional en las propiedades geotécnicas de la zona de lago

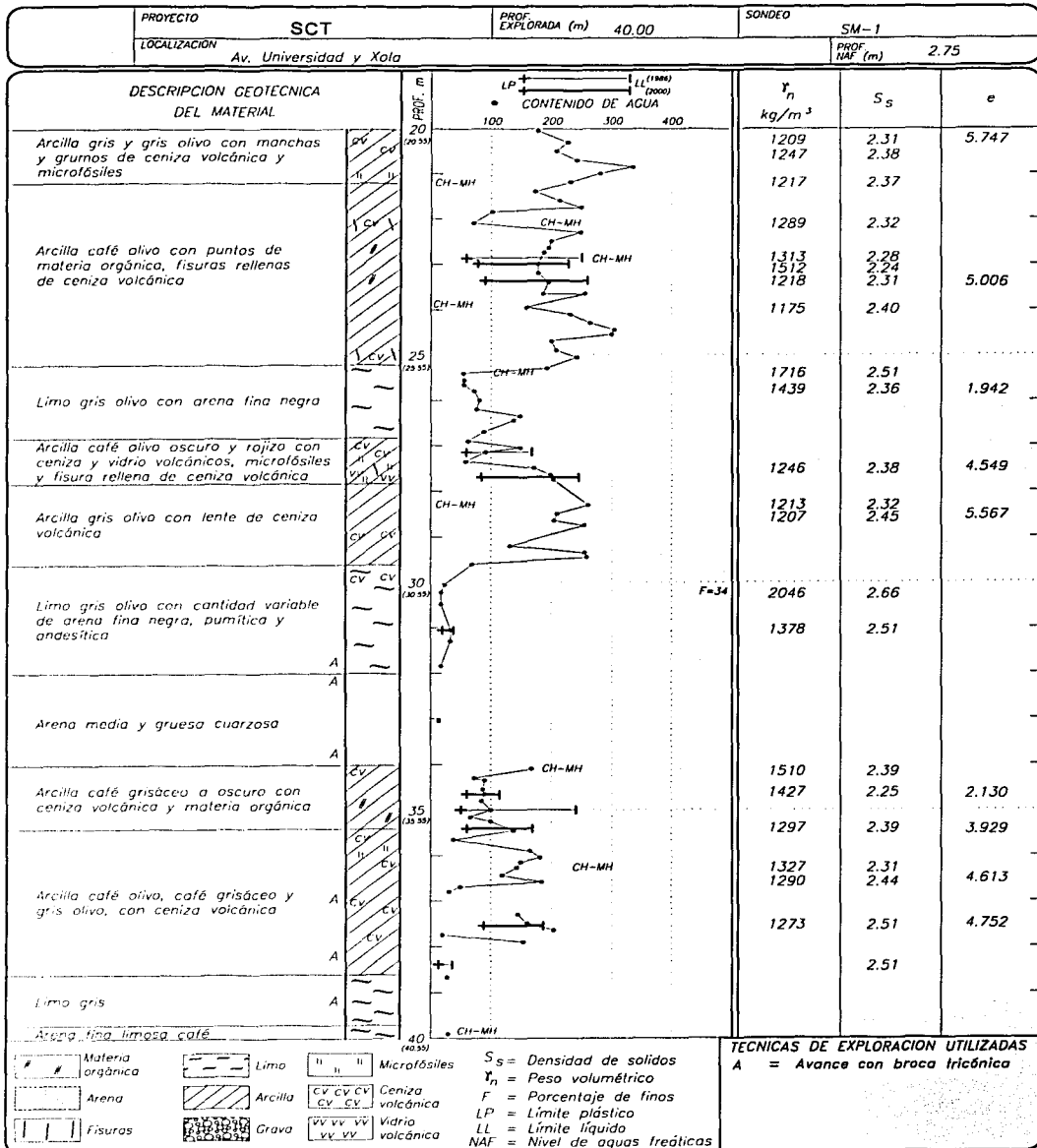


Figura 4.4 Perfil estratigráfico que incluye los límites de plasticidad medidos en los años 1986 y 2000 en el sitio SCT (Franco, 2002).

IV.2.3 Propiedades índice

Las propiedades índice fueron obtenidas de muestras representativas a distintas profundidades de cada estrato de suelo que se considero homogéneo y consisten en: contenido de agua, índice de plasticidad, relación de vacíos, densidad de sólidos y peso volumétrico.

Contenido de agua

En la fig 4.5 se presenta la gráfica del contenido de agua *versus* profundidad (hasta 40 m), obtenida en los años de 1986 y 2000. Para la primer formación arcillosa superior se determino un valor hasta de 411% (para las arcillas y limos arcillosos) con valores promedio de 300% y para los materiales de relleno y costra superficial se tuvo un intervalo de 10 a 110%.

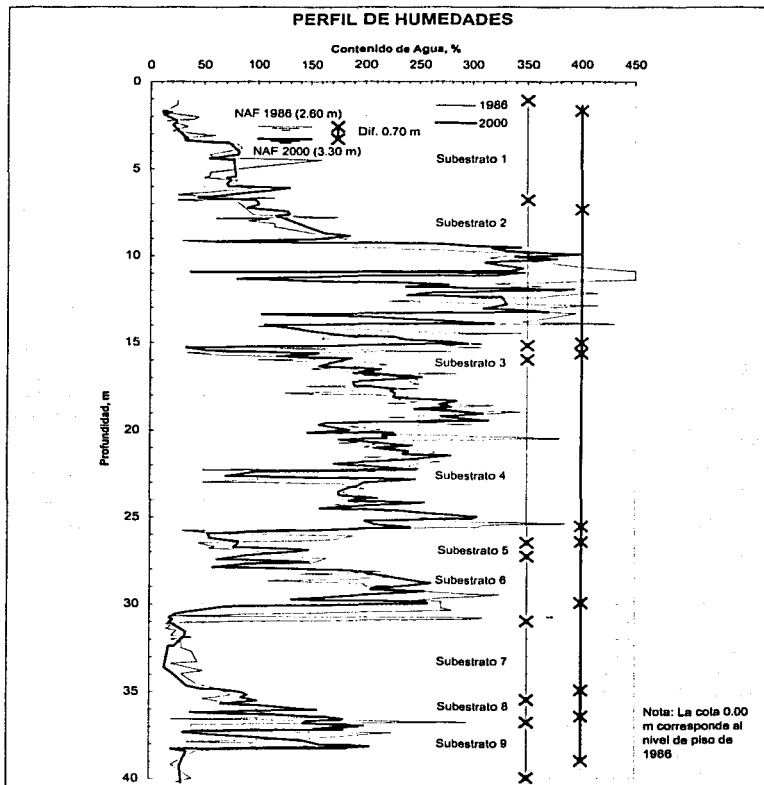


Figura 4.5 Perfiles de contenido de agua medidos en los años 1986 y 2000 en el sitio SCT (Franco, 2002).

Efecto del hundimiento regional en las propiedades geotécnicas de la zona de lago

Para interpretar la variación del contenido de agua, el perfil estratigráfico se dividió en nueve substratos, en la tabla 4.1 se muestran los valores promedio calculados a partir de los perfiles de agua de los años 1986 y 2000.

Tabla 4.1 Cambio del contenido de agua del año 1986 al 2000.

ESTRATO	1986 (w_{1986})		2000 (w_{2000})		$(w_{1986} - w_{2000})$ Diferencia entre Contenido de Agua, %	$\left(\frac{w_{2000} - w_{1986}}{w_{1986}}\right)$ Variación del Contenido de Agua, %
	Prof. m	Promedio del Contenido de Agua, %	* Prof. m	Promedio del Contenido de Agua, %		
SUBESTRATO 1	1.00-6.80	56.57	1.70-7.35	62.61	+ 6.04	+10.68
SUBESTRATO 2	6.80-15.25	263.64	7.35-15.05	250.45	- 13.19	-5.00
SUBESTRATO 3	15.25-16.00	157.14	15.05-15.75	137.66	- 19.48	-12.40
SUBESTRATO 4	16.00-26.50	215.74	15.75-25.65	214.15	- 1.59	-0.74
SUBESTRATO 5	26.50-27.35	93.13	25.65-26.45	84.37	- 8.76	-9.41
SUBESTRATO 6	27.35-31.00	194.84	26.45-30.00	164.47	- 30.37	-15.59
SUBESTRATO 7	31.00-35.50	40.45	29.95-35.05	39.10	- 1.35	-3.45
SUBESTRATO 8	35.50-36.80	144.17	35.05-36.25	101.49	- 29.60	-20.53
SUBESTRATO 9	36.80-40.00	119.29	36.25-39.55	116.95	- 2.34	-1.96

* Profundidades referidas con los sondeos del nivel de banqueta de 1986

La diferencia entre los promedios del contenido de agua del año 2000 y el de 1986 se presentan en la columna seis, el signo positivo (+) de las columnas seis y siete, indican un aumento en el contenido de agua con el tiempo, causado por la heterogeneidad de los materiales en el substrato, el signo negativo (-) representa una disminución del contenido de agua con respecto al reportado en 1986. El valor de la columna siete representa el porcentaje de la variación del contenido de agua con respecto al año de 1986.

El contenido de agua tiende a disminuir en la parte superior e inferior del perfil, manteniendo casi el mismo valor en la parte central (substrato 4). La disminución del contenido de agua en la parte superior puede ser debida al descenso del nivel freático, ya que éste bajó 0.70 m, mientras que los estrato inferiores, se ven mas afectados por el abatimiento piezométrico producido por el bombeo profundo.

Índice de plasticidad

Debido a la consolidación y el abatimiento piezométrico en el valle de México, el índice de plasticidad a lo largo del perfil estratigráfico tiende a disminuir, esta variación es considerada como consecuencia del contenido de materia orgánica o al sometimiento de secados severos.

La heterogeneidad de las diferentes series arcillosas que componen la estratigrafía del subsuelo lacustre del valle de México, es reflejada mediante la variación relativamente pequeña de los límites plásticos (tabla 4.2).

Capítulo IV

Tabla 4.2 Resultados obtenidos de las pruebas de índice de plasticidad en los años de 1986 y 2000.

1986				2000				Prof. Equiv.	Diferencia IP	Aumento (+) ó Disminución (-)
Prof. (m)	LL	LP	IP	Prof. (m)	LL	LP	IP			
3.90	80	40	40	3.50	80	48	32	3.90	-8	-20%
7.63	100	40	60	6.50	90	45	45	7.25	-15	-25%
				8.10	125	55	70		+10	+17%
12.25	400	77	323	11.65	298	81	217	11.75	-106	-33%
				12.30	363	105	258		-65	-20%
17.20	255	72	183	16.90	205	92	113	16.25	-70	-38%
20.98	212	60	152	19.75	265	85	180	19.90	+28	+18%
				20.30	230	77	153		+1	+0.6%
24.25	255	60	195	23.00	125	75	50	22.90	-145	-74%
				23.40	259	90	169		-26	-13%
28.75	165	60	105	27.55	246	82	164	27.20	+59	+56%
32.70	40	20	20	-	-	-	-	31.10	-	-
36.68	240	52	188	34.65	116	62	54	35.00	-134	-71%
				35.40	170	61	109		-79	-42%
40.20	38	15	23	36.65	130	47	83	38.40	+60	+100%

Relación de vacíos

Los valores obtenidos en los ensayos oscilaron entre 1.89 y 9.96; ubicándose los valores mayores a una profundidad de 7 a 12 m con un intervalo de 7.10 a 9.96; mientras que los valores menores se encontraron a la profundidad de 0 a 7 m.

Densidad de sólidos

La variación de esta característica en las arcillas es significativa, no obstante que los especímenes pertenezcan a un mismo estrato, al desarrollarse las pruebas para la obtención de esta propiedad se registraron valores comprendidos en un rango que va de 2.030 a 2.669, y un valor medio de 2.42

Peso volumétrico

Para la obtención del peso volumétrico se seleccionaron especímenes a distintas profundidades representativas de los estratos, obteniéndose valores que oscilan entre 1109 y 1477 kg/m³ (figuras 4.4 y 4.5).

IV.2.4 Propiedades mecánicas

Para la obtención de las propiedades mecánicas se llevaron a cabo pruebas triaxiales UU y CU, el equipo utilizado para el ensaye fue la cámara Triaxial INING 2 del Instituto de Ingeniería (1969), de estos ensayos se presentaron curvas esfuerzo-deformación axial así como la envolvente de los círculos de Mohr para catorce diferentes profundidades, cuyos resultados se presentan en la tabla 4.3.

Efecto del hundimiento regional en las propiedades geotécnicas de la zona de lago

Tabla 4.3 Resultados de pruebas triaxiales UU.

# MUESTRA	PROF. MEDIA (m)	PROF. R E A L (m)	c_1	G_{w1}	γ_s (kg/m ³)	G_s	w_1 (%)	q_u (kg/cm ²)	E_1 (kg/cm ²)	E_{50} (kg/cm ²)	σ_3 (kg/cm ²)	σ_d (kg/cm ²)	σ_1 (kg/cm ²)	ϵ_r (%)
5-1A	4.90	4.85-4.95	2.026	100	1396	2.588	78.27	0.44	0.60	0.45	0.37	0.88	1.25	8.86
9-1A	9.00	8.90-9.10	8.606	100	1150	2.501	344.11	0.43	0.40	0.34	0.38	0.85	1.23	4.0
9-1B	9.00	8.90-9.10	8.606	100	1137	2.501	344.11	0.39	0.40	0.35	0.88	0.79	1.67	4.06
10-1A	9.80	9.75-9.85	8.180	100	1147	2.396	341.41	0.22	0.35	0.22	0.40	0.45	0.85	8.37
10-1B	9.80	9.75-9.85	7.974	100	1143	2.396	332.80	0.19	0.35	0.21	0.90	0.39	1.29	8.74
11-1A	10.60	11.10-11.20	7.453	100	1147	2.302	323.77	0.40	0.39	0.39	0.41	0.81	1.22	3.27
11-1B	10.60	11.10-11.20	7.709	100	1146	2.302	334.87	0.38	0.40	0.38	0.91	0.76	1.67	3.27
11-1C	10.60	11.10-11.20	7.101	100	1155	2.302	308.47	0.46	0.70	0.46	1.41	0.92	2.33	4.08
15-1A	14.15	14.10-14.20	5.158	100	1227	2.394	215.46	0.40	0.70	0.47	0.59	0.79	1.38	3.20
15-1B	14.15	14.10-14.20	5.595	100	1204	2.394	233.72	0.48	0.66	0.56	1.09	0.96	2.05	3.60
15-1C	14.15	14.10-14.20	5.554	100	1123	2.394	232.00	0.48	0.66	0.55	1.59	0.96	2.55	3.59
18-2A	16.90	16.85-16.95	4.622	100	1209	2.307	200.33	0.68	0.70	0.67	0.67	1.36	2.03	3.55
18-2B	16.90	16.85-16.95	4.470	100	1234	2.307	193.77	0.70	0.80	0.62	1.17	1.39	2.56	3.56
18-2C	16.90	16.85-16.95	4.480	100	1222	2.307	194.20	0.72	0.80	0.77	1.67	1.43	3.10	3.41
21-3A	19.75	19.70-19.80	4.788	100	1195	2.299	208.28	0.53	1.06	0.92	0.72	1.05	1.77	1.57
21-3B	19.75	19.70-19.80	5.619	100	1186	2.299	244.43	0.63	1.60	1.07	1.22	1.25	2.47	2.75
21-3C	19.75	19.70-19.80	5.299	100	1193	2.299	230.47	0.78	1.14	0.96	1.72	1.56	3.28	6.56
25-3A	23.40	23.35-23.45	5.006	97	1209	2.305	210.80	1.10	1.40	1.18	0.88	2.21	3.09	3.28
25-3B	23.40	23.35-23.45	4.857	100	1218	2.305	210.71	1.24	1.80	1.13	1.38	2.49	3.87	2.87
25-3C	23.40	23.35-23.45	4.888	100	1222	2.305	212.06	1.20	2.40	1.18	1.88	2.41	4.29	2.78
31-2A	27.55	27.50-27.60	4.339	100	1246	2.375	182.70	1.44	2.80	1.50	0.93	2.87	3.80	3.01
31-2B	27.55	27.50-27.60	4.462	100	1237	2.375	187.89	1.57	3.60	1.82	1.43	3.14	4.57	3.15
31-2C	27.55	27.50-27.60	4.549	100	1230	2.375	191.52	1.33	3.28	1.96	1.93	2.65	4.58	3.04
32-2A	28.50	28.45-28.55	5.567	100	1207	2.453	226.95	1.48	2.00	1.51	0.97	2.95	3.92	2.53
44-1A	34.65	34.60-34.70	2.130	100	1427	2.254	89.11	1.60	3.50	0.81	0.97	3.21	4.18	6.28
48-3A	36.65	36.60-36.70	4.613	100	1286	2.437	189.29	1.26	1.50	1.41	1.22	2.51	3.73	3.81
48-3B	36.65	36.60-36.70	4.328	100	1280	2.437	174.35	1.39	2.30	1.64	1.72	2.78	4.50	4.71
48-3C	36.65	36.60-36.70	4.394	100	1290	2.437	180.32	1.44	3.50	2.16	2.22	2.87	3.66	2.37
50-2A	37.55	37.50-37.60	4.748	100	1273	2.509	189.25	1.46	3.00	1.99	1.25	2.91	4.16	3.93
50-2B	37.55	37.50-37.60	4.751	100	1255	2.509	189.26	1.29	4.56	1.69	1.75	2.58	4.33	3.35
50-2C	37.55	37.50-37.60	4.752	100	1250	2.509	189.38	1.53	5.25	1.50	2.25	3.06	5.31	3.64

IV.2.4.1 Perfil de resistencia

En los perfiles de resistencia de punta q_c , obtenidos con el cono eléctrico se observa el hundimiento desarrollado : 1.05 m en 14 años, lo que equivale a 7.5 cm por año (fig. 4.6).

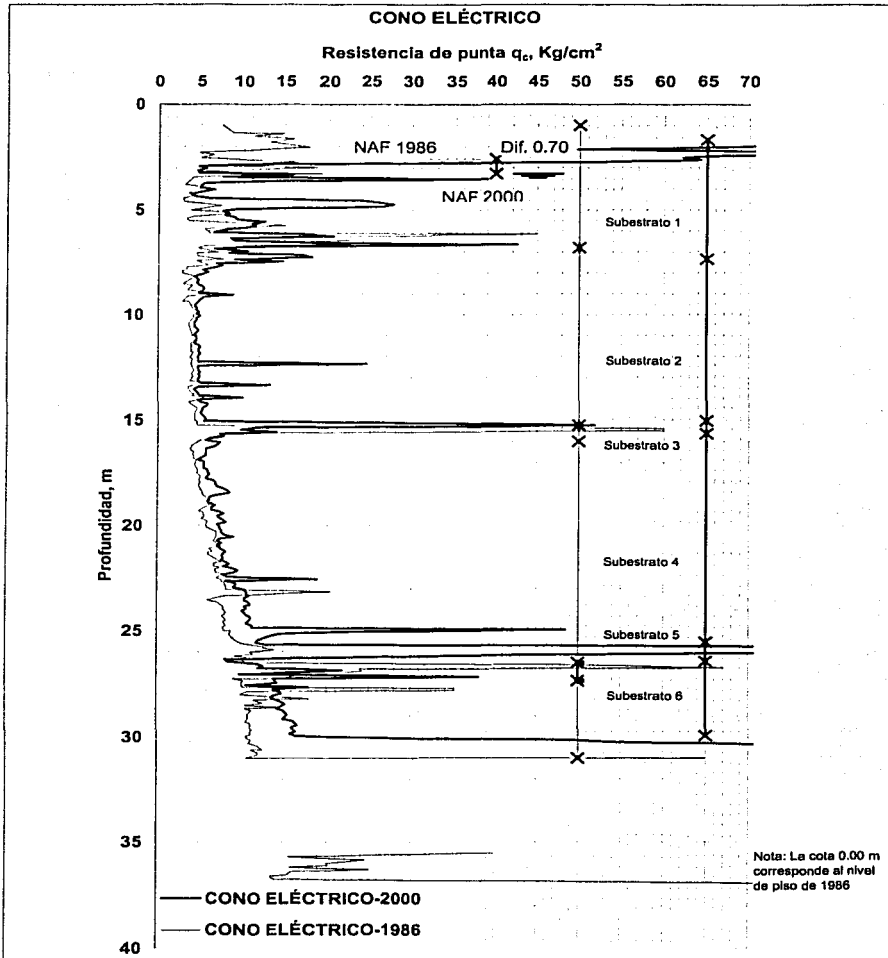


Figura 4.6 Perfil de resistencia de punta, q_c , del cono eléctrico medidos en los años de 1986 y 2000 en el sitio SCT (Franco, 2002).

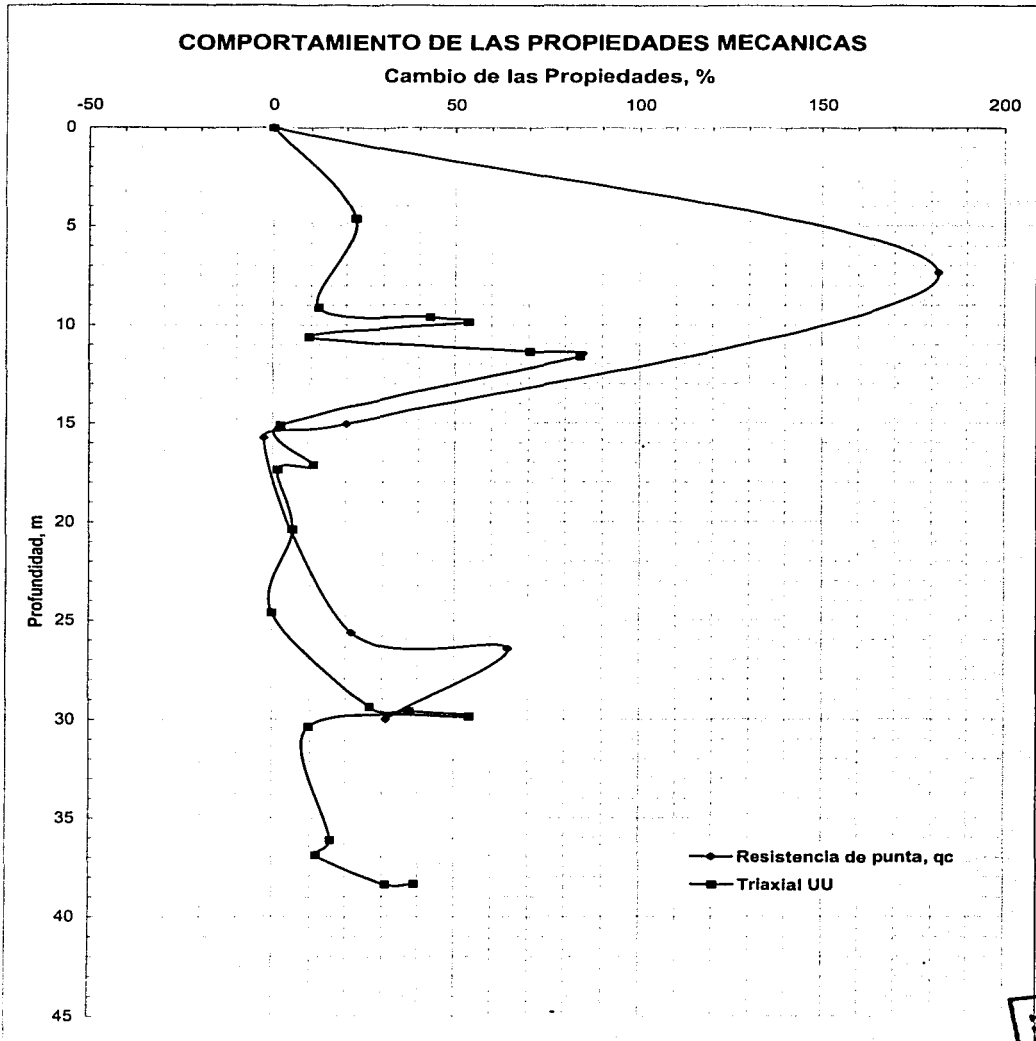


Figura 4.6a Variación de las propiedades mecánicas con la profundidad en el año 2000, (%) (Franco, 2002).

Considerando los perfiles de resistencia de punta (años 1986 y 2000), puede observarse con respecto al primer estrato arcilloso (localizado entre los 7.5 m y 15.0 m de profundidad) un incremento en la resistencia y la similitud existente en las pendientes de

TESIS
FALLA DE
J.N

Capítulo IV

ambos perfiles. En la segunda serie arcillosa localizada entre los 16.0 y 30.0 m, se observa también un incremento en la resistencia de punta, pero ésta es mayor a medida que se aumenta la profundidad.

Para analizar y comparar los resultados obtenidos del perfil de cono se subdividió la formación arcillosa superior (FAS) en 6 substratos hasta 31.00 m de profundidad.

Substrato 1, (costra superficial). La resistencia aumenta significativamente hasta en un 181.96 % (tabla 4.4), esto se debe en parte al descenso del nivel freático (considerado del orden de 0.70 m), por los abatimientos piezométricos y posiblemente también a cargas no permanentes, ya que esta área donde se realizó el sondeo es un área destinada a estacionamiento.

Substrato 3, se observa una disminución en la resistencia del 2.36%, generada probablemente a que el lente de arena no es totalmente homogéneo, ya que contiene arcilla.

Substrato 5. La resistencia aumenta en un 64.59%, debido al abatimiento piezométrico que se ve reflejado en el aumento de esfuerzos efectivos y consecuentemente en la resistencia del material debido a la consolidación desarrollada.

Substratos 2, 4 y 6, presentan un aumento en su resistencia entre 20 a 31 %, siendo los espesores de los estratos de arcilla más importantes. En el substrato 6 con respecto al 2 y 4, existe un incremento en la resistencia; debido a que es el tramo que está adyacente a la capa dura, y en ella es donde se tiene la mayor influencia del abatimiento piezométrico del sitio.

Tabla 4.4 Aumento de resistencia de punta, q_c , del año 1986 al 2000.

ESTRATO	1986		2000		Diferencia de Resistencia (kg/cm ²)	Aumento de Resistencia (%)
	Prof. (m)	q_c , Prom. (kg/cm ²)	* Prof. (m)	q_c , Prom. (kg/cm ²)		
SUBESTRATO 1	1.00-6.80	9.66	1.70-7.35	27.24	17.58	181.96
SUBESTRATO 2	6.80-15.25	4.80	7.35-15.05	5.77	0.96	20.03
SUBESTRATO 3	15.25-16.00	26.19	15.05-15.75	25.57	-0.62	-2.36
SUBESTRATO 4	16.00-26.50	7.35	15.75-25.65	8.94	1.59	21.68
SUBESTRATO 5	26.50-27.35	29.87	25.65-26.45	49.16	19.29	64.59
SUBESTRATO 6	27.35-31.00	12.27	26.45-30.00	16.07	3.80	30.99

* Todas las profundidades de los perfiles del año 2000 están referenciados a los sondeos de nivel de banqueta del año de 1986.

IV.2.4.2 Resistencia no drenada

En el perfil del cono eléctrico, se manejaron equivalencias para situar las muestras obtenidas en el año 2000, a profundidades colindantes a las ensayadas en el sondeo de 1986 (tabla 4.5). Con la finalidad de hacer una equivalencia en los ensayos de pruebas triaxiales UU, se consideró que el sondeo de cono eléctrico de 1986, se realizó a una profundidad de 40 m, y el del año 2000 a 30 m.

Efecto del hundimiento regional en las propiedades geotécnicas de la zona de lago

Tabla 4.5 Relación de aumento de resistencia no drenada, q_u , del año 1986 al 2000 (Franco, 2002).

AÑO	#MUESTRA	PROF. m	RESISTENCIA q_u , kg/cm ²	% DE AUMENTO	PROF. EQUIVALENTE m	# DE ENSAYE	AÑO	# MUESTRA	PROF. m	RESISTENCIA q_u , kg/cm ²
1986	5-3	4.62	0.36	22.22	4.75	1	2000	5-1A	4.90 (5.45)	0.44
1986	11-3	9.12	0.37	12.16						
1986	12-2	9.62	0.29	43.10	9.50	2	2000	9-1A	9.05	0.43
1986	12-3	9.87	0.27	53.70			2000	9-1B	9.05 (9.60)	0.40
1986	13-3	10.62	0.21	9.52	10.55	3	2000	10-1A	9.80	0.23
							2000	10-1B	9.80 (10.35)	0.20
1986	14-3	11.37	0.27	70.37			2000	11-4A	11.15	0.41
1986	15-1	11.62	0.25	84.00	11.70	4	2000	11-4B	11.15	0.38
							2000	11-4C	11.15 (11.70)	0.46
1986	19-3	15.12	0.48	2.08	15.00	5	2000	15-1A	14.15	0.40
							2000	15-1B	14.15	0.49
							2000	15-1C	14.15 (14.70)	0.49
1986	22-2	17.12	0.65	10.77			2000	18-2A	16.90	0.68
1986	22-3	17.37	0.71	1.41	17.40	6	2000	18-2B	16.90	0.70
							2000	18-2C	16.90 (17.45)	0.72
1986	26-3	20.37	0.74	5.40	20.50	7	2000	21-3A	19.75	0.53
							2000	21-3B	19.75	0.63
							2000	21-3C	19.75 (20.30)	0.78
1986	32-2	24.62	1.25	0.00	24.70	8	2000	25-3A	23.40	1.11
							2000	25-3B	23.40	1.25
							2000	25-3C	23.40 (23.95)	1.21
1986	38-3	29.37	1.14	26.32			2000	31-2A	27.55	1.44
1986	39-1	29.62	1.12	37.72	29.35	10	2000	31-2B	27.55	1.57
							2000	31-2C	27.55 (28.10)	1.33
1986	39-2	29.87	0.96	54.17						
1986	40-1	30.37	1.35	9.63	30.10	11	2000	32-2A	28.50 (29.05)	1.48
1986	48-3	36.12	1.39	15.83						
1986	49-3	36.87	1.45	11.81	36.20	12	2000	44-1A	34.65 (35.20)	1.61
							2000	48-3A	36.65	1.26
1986	51-3	38.37	1.10	30.91	38.30	13	2000	48-3B	36.65	1.39
							2000	48-3C	36.65 (37.20)	1.44
							2000	50-2A	37.55	1.46
1986	51-3	38.37	1.10	39.09	39.20	14	2000	50-2B	37.55	1.29
							2000	50-2C	37.55 (38.10)	1.53

(x) Profundidad referenciada al sondeo de 1986

x Profundidad de comparación entre comparación de sondeos

En relación a los resultados obtenidos en las pruebas triaxiales rápidas UU, se puede apreciar el incremento de la resistencia en los estratos superficiales hasta una profundidad de 15.12 m y en los estratos localizados por debajo de la capa dura a partir de los 29.37 m, siendo atribuible este efecto al descenso del nivel freático y los abatimientos piezométricos, respectivamente; por otra parte, las muestras ubicadas en la parte media entre las profundidades de 17.12 m a 24.62 m, no mostraron un incremento en la resistencia.

IV.2.4.3 Carga de preconsolidación

Con objeto de mostrar como el esfuerzo de preconsolidación ha adquirido cambios con respecto al tiempo, se desarrollaron pruebas de compresibilidad, que corroboran el hundimiento regional y el abatimiento piezométrico que aún se manifiesta en el valle de México y en las zonas circunvecinas, los resultados obtenidos de los ensayos realizados y los valores correspondientes a los años de 1986 y 2000, se presentan en la tabla 4.6.

Tabla 4.6 Resultados obtenidos de las pruebas de compresibilidad en 1986 y 2000.

AÑO DE ENSAYE	# MUESTRA	PROF. MEDIA m	γ_1 k/m ³	w _l %	w _r %	e _i	e _r	G _s	G _{wl}	σ_{pc} k/cm ²	σ' k/cm ²	OCR	NAF m
1986	15-3	12.20	1153	471.88	257.41	11.04	5.25	2.428	98.78	0.70	0.78	0.90	2.60
2000	13-1	12.30	1169	324.30	172.05	8.24	2.80	2.546	100.00	1.10	0.66	1.66	2.75
1986	26-3	20.37	1272	251.28	170.70	5.39	3.07	2.314	106.11	1.65	0.96	1.72	2.60
2000	21-2	19.60	1216	225.40	157.77	5.15	2.93	2.299	100.00	1.83	0.72	2.54	2.75
1986	47-3	35.37	1456	56.45	54.92	1.25	1.07	2.094	104.13	1.10	1.55	0.71	2.60
2000	43-2	34.30	1477	85.47	73.52	2.05	1.45	2.429	100.00	3.91	1.15	3.48	2.75

Los ensayos de consolidación llevados a cabo para comparar el esfuerzo de preconsolidación y las propiedades índice con las muestras ensayadas en 1986, se realizaron a profundidades de:

- 12.30 m (muestra número 13-1, fig. 4.7). Se obtuvo una relación de vacíos inicial de $e_i=8.20$ y final $e_r=2.80$ observándose una disminución comparada con la muestra del año de 1986 ($e_i=11.04$, $e_r=5.25$); y un esfuerzo de preconsolidación de 1.10 kg/cm², que referido al del año de 1986 (0.70 kg/cm²) resulta mayor.

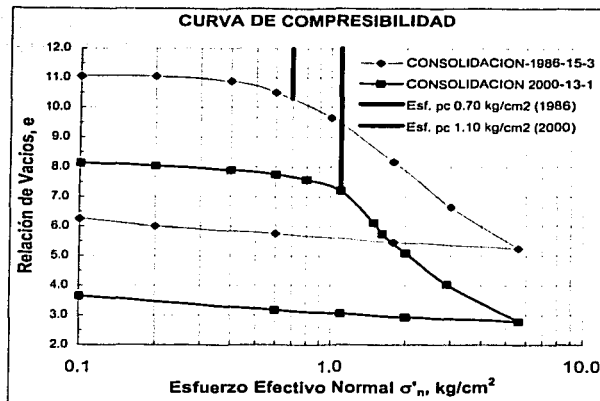


Figura 4.7 Curva de compresibilidad, muestra 13-1 (2000) versus 15-3 (1986) (Franco, 2002).

- 19.60 m(muestra 21-2, fig. 4.8). El esfuerzo de preconsolidación aumentó de un valor de 1.65 kg/cm² que se tenía en 1986 a 1.83 kg/cm² en el año 2000. La relación de vacíos para el año 2000(5.15) disminuyó con respecto a la de 1986 (5.39) al inicio de la etapa de recompresión. En la etapa de descarga se observa cómo las trayectorias tienden a ser semejantes al inicio, pero al final la etapa de descarga de la muestra ensayada en 1986 parece haberse dejado expandiendo un lapso mayor, por lo que la muestra se recupera aún más que en las anteriores descargas, por esta razón las relaciones de vacíos finales son diferentes.

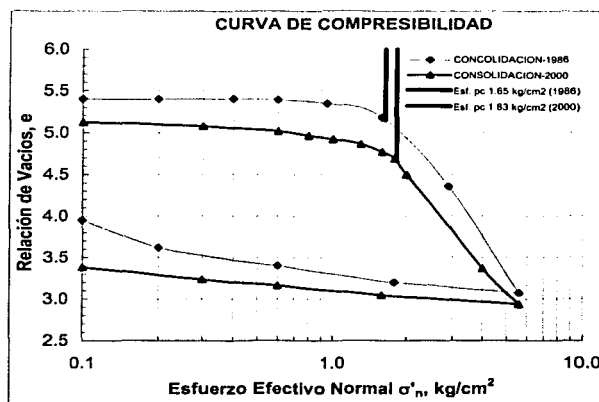


Figura 4.8 Curva de compresibilidad, muestra 21-2 (2000) versus 26-3 (1986) (Franco, 2002).

- 34.30 m (muestra 43-2, fig. 4.9). Debido a la presencia de lentes de arena y a la escasez de material para la realización de ensayos a esta profundidad los resultados presentados solo son proporcionados como información adicional para futuros estudios, ya que no existe coincidencia con respecto al ensaye del año de 1986

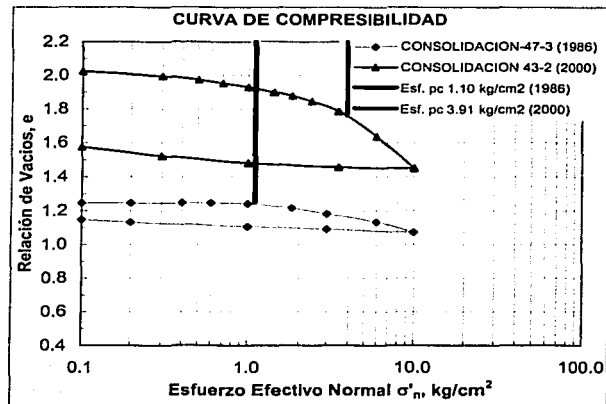


Figura 4.9 Curva de compresibilidad, muestra 43-2 (2000) versus 47-3 (1986) (Franco, 2002).

IV.3 Central de Abasto Oficinas.

IV.3.1 Ubicación

El sitio Central de Abasto Oficinas (CAO) se encuentra localizado entre la avenida río churubusco y los ejes 5 y 6 sur, en el área de oficinas, según se muestra en la figura 4.10.

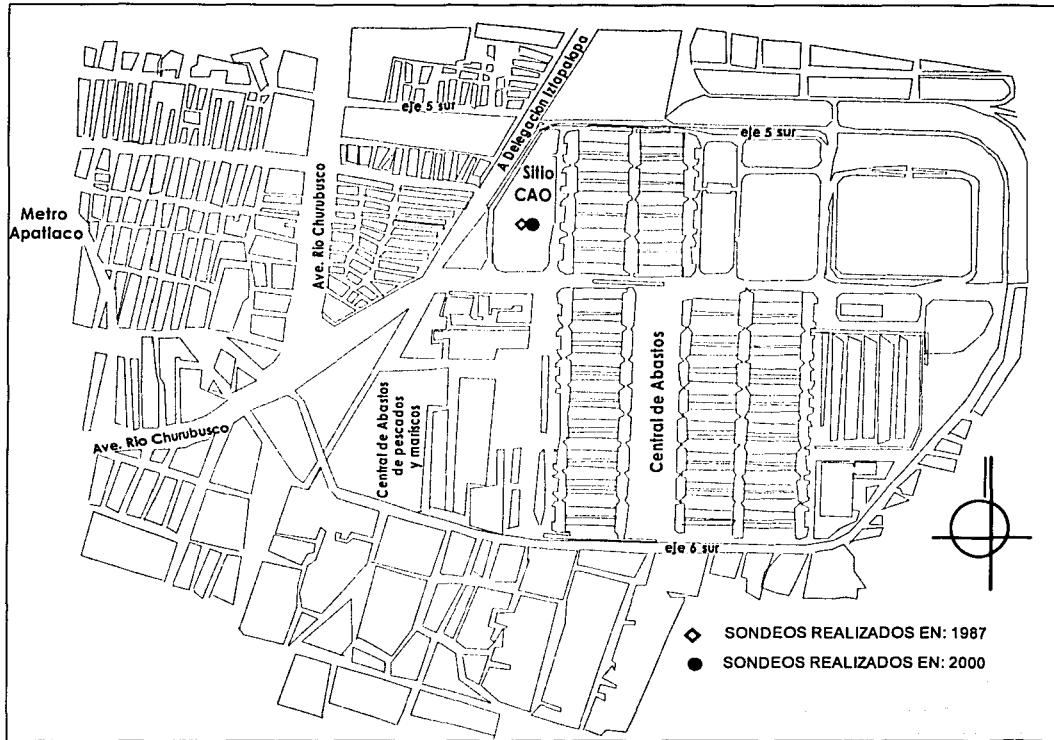


Fig. 4.10 Localización de sitio CAO (Pérez, 2003).

IV.3.2 Variación de los espesores arcillosos

En la fig. 4.11 se presenta el perfil estratigráfico del sitio; en el que se observan las siguientes generalidades:

- Capa de relleno, profundidad de 0.0 m a 1.0 m. Formada por tezontle y desperdicio de construcción.

- Costra superficial, profundidad de 1.0 m a 7.8 m. Caracterizada por limo café oscuro a gris olivo de consistencia alta con lentes de arena fina y ceniza volcánica.
- Serie arcillosa superior, profundidad de 7.8 m a 40.6m. Constituida por arcillas de consistencia muy blanda de varias tonalidades: café olivo, gris olivo, gris oscuro y café rojizo, con intercalaciones de limo gris, microfósiles, ceniza volcánica y arena.
- Primera capa dura, profundidad de 40.6 a 44.0 m (profundidad máxima explorada). Se observa limo con arena fina negra, pumítica y andesítica.

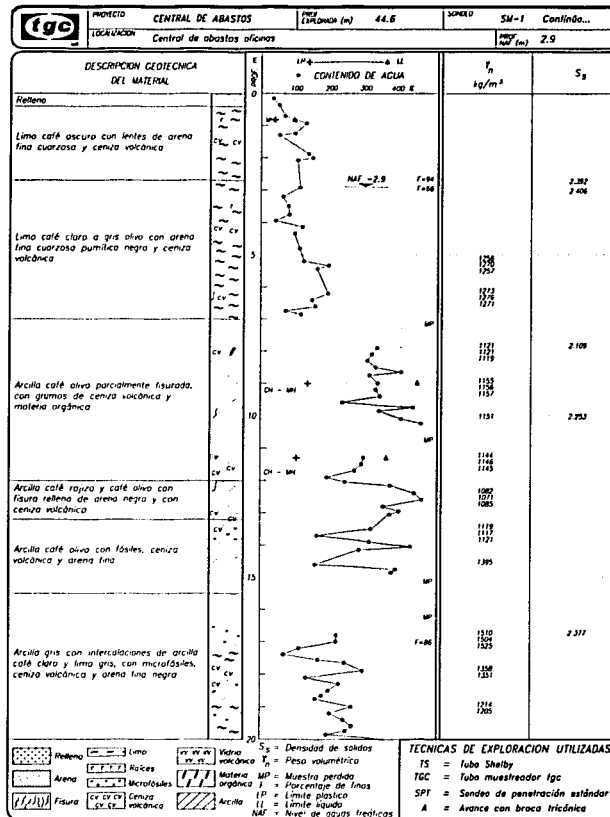


Fig. 4.11 Perfil estratigráfico del sitio central de abasto oficinas (Olin, 2003).

Efecto del hundimiento regional en las propiedades geotécnicas de la zona de lago

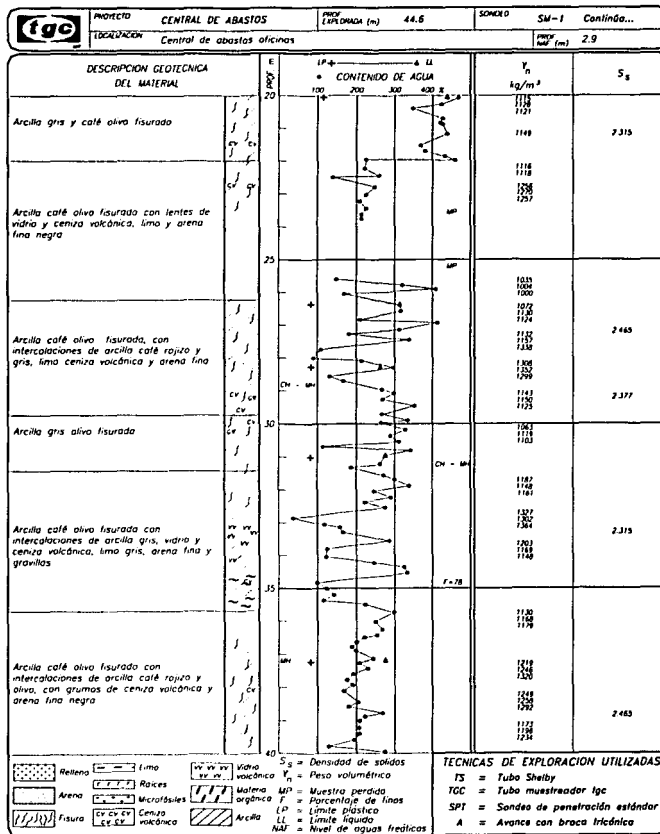


Fig. 4.11 Perfil estratigráfico del sitio central de abasto oficinas (Olin, 2003).
(continuación)

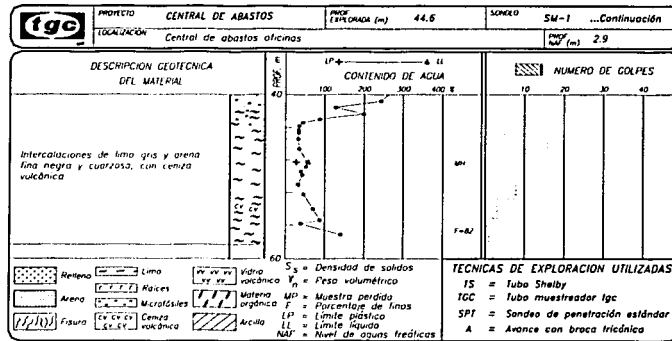


Fig. 4.11 Perfil estratigráfico del sitio central de abasto oficinas (Olin, 2003).
(continuación)

IV.3.3 Propiedades índice

De acuerdo a la formación estratigráfica y la comparación realizada de los substratos similares se obtuvieron las propiedades índice que consisten en: contenido de agua, índice de plasticidad, densidad de sólidos y peso volumétrico.

Contenido de agua

Los valores de contenido de agua para los diferentes estratos, presentan en cuanto a la variación del año 2000 con respecto al año 1987, incrementos de 0% a 67% y decrementos de 0% a 233% (tabla 4.7).

TESIS CON
FALLA DE CUBIEN

Efecto del hundimiento regional en las propiedades geotécnicas de la zona de lago

Tabla 4.7 Comparación del contenido de agua (Olin, 2003).

COMPARACIÓN DEL CONTENIDO DE AGUA.						
COSTRA SUPERFICIAL.			VARIACIÓN	NOTAS		
ESPESOR (m)	W % (1987)	W % (2000)				
0.0 - 5.0	50	50	0	La primera formación estratigráfica, las variaciones indican que existe un decremento debido a la extracción de agua freática.		
	120	142	+18			
	200	110	+82			
	110	60	+83			
	40	40	0			
SERIE ARCILLOSA SUPERIOR						
5.0 - 15.5	190	190	0	En toda la formación de la serie arcillosa superior se presentan más los decrementos de agua excesivos, esto es debido a que los estratos más superficiales sufren la caída del NAF, y como consecuencia se presentan esfuerzos de tensión en el agua en la parte superior del estrato arcillosos. Aunque también existen algunos incrementos, esto es debido a que existen lentes de ceniza volcánica y arena fina. Por tanto no se puede definir un numero exacto de variación.		
	210	140	+16			
	250	160	0			
	200	60	+50			
	340	320	+26			
	430	340	+233			
	490	430	+6			
	360	220	+64			
	425	440	+14			
	390	390	-67			
	270	150	-3			
	390	420	0			
	410	380	+8			
	15.5 - 29.5	110	70		+57	En toda la formación de la serie arcillosa superior se presentan más los decrementos de agua excesivos, esto es debido a que los estratos más superficiales sufren la caída del NAF, y como consecuencia se presentan esfuerzos de tensión en el agua en la parte superior del estrato arcillosos. Aunque también existen algunos incrementos, esto es debido a que existen lentes de ceniza volcánica y arena fina. Por tanto no se puede definir un numero exacto de variación.
		330	300		+10	
550		237	+132			
230		158	+45			
400		200	+100			
490		270	+81			
480		200	+140			
420		190	+121			
345		345	0			
410		410	0			
440		360	+22			
410		460	-11			
400		460	+15			
420		418	+0.48			
360		222	+62			
460		380	+39			
380		210	+81			
462		430	+7			
330		170	+94			
380		340	+12			
110	80	+38				
470	300	+56				
410	340	-6				
305	320	+28				
350	280	+9				
200	320	+9				
29.5 - 41.0	360	350	+3	En toda la formación de la serie arcillosa superior se presentan más los decrementos de agua excesivos, esto es debido a que los estratos más superficiales sufren la caída del NAF, y como consecuencia se presentan esfuerzos de tensión en el agua en la parte superior del estrato arcillosos. Aunque también existen algunos incrementos, esto es debido a que existen lentes de ceniza volcánica y arena fina. Por tanto no se puede definir un numero exacto de variación.		
	280	190	+47			
	350	300	+17			
	295	275	+7			
	320	270	+19			
SERIE ARCILLOSA SUPERIOR						
29.5-41.0	395	290	+36	En toda la formación de la serie arcillosa superior se presentan más los decrementos de agua excesivos, esto es debido a que los estratos más superficiales sufren la caída del NAF, y como consecuencia se presentan esfuerzos de tensión en el agua en la parte superior del estrato arcillosos. Aunque también existen algunos incrementos, esto es debido a que existen lentes de ceniza volcánica y arena fina. Por tanto no se puede definir un numero exacto de variación.		
	350	295	+19			
	220	100	+120			
	295	120	+146			
	120	180	-33			
	260	275	-5			
	250	240	+4			
	230	230	0			
	260	262	-0.76			
	242	238	+2			
PRIMERA CAPA DURA						
41.0 - 44.6	30 42	-28	-28	La capa dura no se aprecia el decremento de contenido de agua, porque los estratos profundos sufren menor la extracción del agua.		

* Los valores positivos indican un decremento y los negativos un incremento con respecto a 1987.

Capítulo IV

Índice de plasticidad

El límite plástico presenta una variación irregular con la profundidad, sus valores varían entre 39% y 290%. Los valores correspondientes para cada una de las profundidades indicando el tipo de material de acuerdo a la carta de plasticidad se presentan en la tabla 4.8. Con respecto al índice de plasticidad se tiene una ligera disminución del 30%, el cual se correlaciona con la disminución del contenido de agua.

TABLA 4.8 Comparación del límite líquido, plástico e índice de plasticidad

COMPARACIÓN DEL LIMITE LIQUIDO, PLASTICO E INDICE DE PLASTICIDAD.									
PROF.	1987			2000			PROF. EQUIV.	DIFERENCIA I.P.	DECREMENTO
	L.L.	L.P.	I.P.	L.L.	L.P.	I.P.			
(m)	%	%	%	%	%	%	(m)	%	%
COSTRA SUPERFICIAL									
0.0-5.0				89	53	36	0.6	-	-
SERIE ARCILLOSA SUPERIOR									
5.0-41.0	360	80	280	360	88.5	272	8.8	+8	-2.9
	300	80	220	449	101.8	347	12.1	-127.3	+37
	160	56	110				8.4	+110	-
	360	75	285	426	134	292	20.4	-7	+2.3
	360	62	298	321	95	226	26.3	+72	-32
	72	25	47	251	83	168	28.6	-121	+72
	250	50	200	274	92	182	31.1	+18	-9.9
	212	83	129	312	161	151	37.1	-22	+15
PRIMERA CAPA DURA									
41.0-44.6	330	60	270	61	39	21	45.4	+249	-1186

*Nota: los valores positivos indican un incremento con respecto a 1987

Densidad de sólidos

En relación a la densidad de sólidos se tiene una variación de -2.6% a +5.6% (tabla 4.9) la cual es producto de errores propios del ensaye; esto indica que las partículas sólidas no han presentado cambios.

Tabla 4.9 Reporte de la densidad de sólidos.

Resultados de la densidad de sólidos				
PROF.	Ss			
(m)	1987	2000	Diferencia Ss	%
COSTRA SUPERFICIAL				
0.0-5.0	2.42	2.39	-0.03	-1.2
SERIE ARCILLOSA SUPERIOR				
5.0-41.0	2.31	2.25	-0.06	-2.6
	2.36	2.38	+0.02	+0.8
	2.31	2.31	0	+0
	2.27	2.38	+0.11	+4.8
	2.34	2.47	+0.13	+5.6
	2.36	2.46	+0.10	+4.2

*Nota: los valores positivos indican incremento respecto a 1987

Peso volumétrico

En la tabla 4.10 se presentan los valores del peso volumétrico, para el estudio de 1987 y 2000, donde se observan valores muy similares. La variación del peso volumétrico con la profundidad no muestra una tendencia clara debido a variaciones propias del suelo en una misma muestra, sin embargo el porcentaje en los parámetros fluctúa entre -17.8% y +30.3%.

Tabla 4.10 Reporte del peso volumétrico.

RESULTADOS DEL PESO VOLUMÉTRICO.				
PROF.	γ_v			
(m)	1987	2000	γ_v	γ_v
	kg/cm ³	kg/cm ³	kg/cm ³	%
SERIE ARCILLOSA SUPERIOR				
5.0-41.0	1205	1120	-85	-7
	1145	1156	+11	+1
	1400	1151	-249	-17.8
	1145	1145	0	+0
	1138	1079	-59	-5.2
	1121	1119	-2	-0.2
	1131	1395	+264	+23.3
	1161	1513	+352	+30.3
	1136	1355	+219	+19.3
	1162	1121	-41	-3.5
	1260	1202	-58	-4.6
	1143	1012	-131	-11.5
	1162	1160	-2	-0.2
	1215	1331	+116	+9.5
	1262	1159	-103	-8.2
	1235	1266	+31	+2.5

*Nota: los valores positivos indican incremento respecto a 1987

IV.3.4 Propiedades mecánicas

La exploración con sondeo de cono eléctrico y mixto, fueron las técnicas utilizadas para la obtención de las propiedades mecánicas del sitio; desarrollándose pruebas triaxiales rápidas UU y CU sin medición de poro.

Con relación a las pruebas triaxiales CU los resultados obtenidos de los módulos tangenciales iniciales, para deformaciones del 0% a 3% obtenidos en 1987 son menores a aquellos evaluados en el 2000, debido a la influencia que la consolidación de los depósitos arcillosos indujo durante 13 años; considerando lo anterior y con la finalidad de alcanzar las deformaciones para las cuales las resistencias residuales se presentan, se realizaron pruebas con deformación controlada obteniéndose los siguientes resultados.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Tabla 4.11. Resultados de pruebas triaxiales CU en el sitio central de abasto oficinas.

Profundidad (m)	Cohesión (Kg/cm ²)		ϕ (°)		Observaciones
12.7	0.10	0.19			El ángulo de falla es de 19°, se obtuvieron los mismos resultados de resistencia
32.0	0.13	0.27	20	15	Los valores de ϕ variaron 5% y la cohesión aparente se incrementó un 100%
37.5	0.12	0.3	21	18	El ángulo de fricción disminuye y la cohesión se incrementa

Las envolventes de falla obtenidas en el año 2000 fueron muy semejantes o ligeramente menores a las del año 1987, este resultado puede ser atribuido al muestreo, el labrado de probetas o a la existencia de fisuras en las formaciones de donde se extrajeron las muestras.

IV.3.4.1 Perfil de resistencia

Los perfiles de resistencia de punta q_c , (fig. 4.12), presentan un incremento en la costra superficial (290%) y en la primera capa dura (230%), generado por la desecación y la extracción de agua en mantos profundos.

La resistencia disminuye en la parte media de la serie arcillosa superior (10%) aproximadamente a 17 m de profundidad, debido a las fisuras que presenta el suelo.

El hundimiento observado es de 80 cm en 13 años que equivale a 6.15 cm por año.

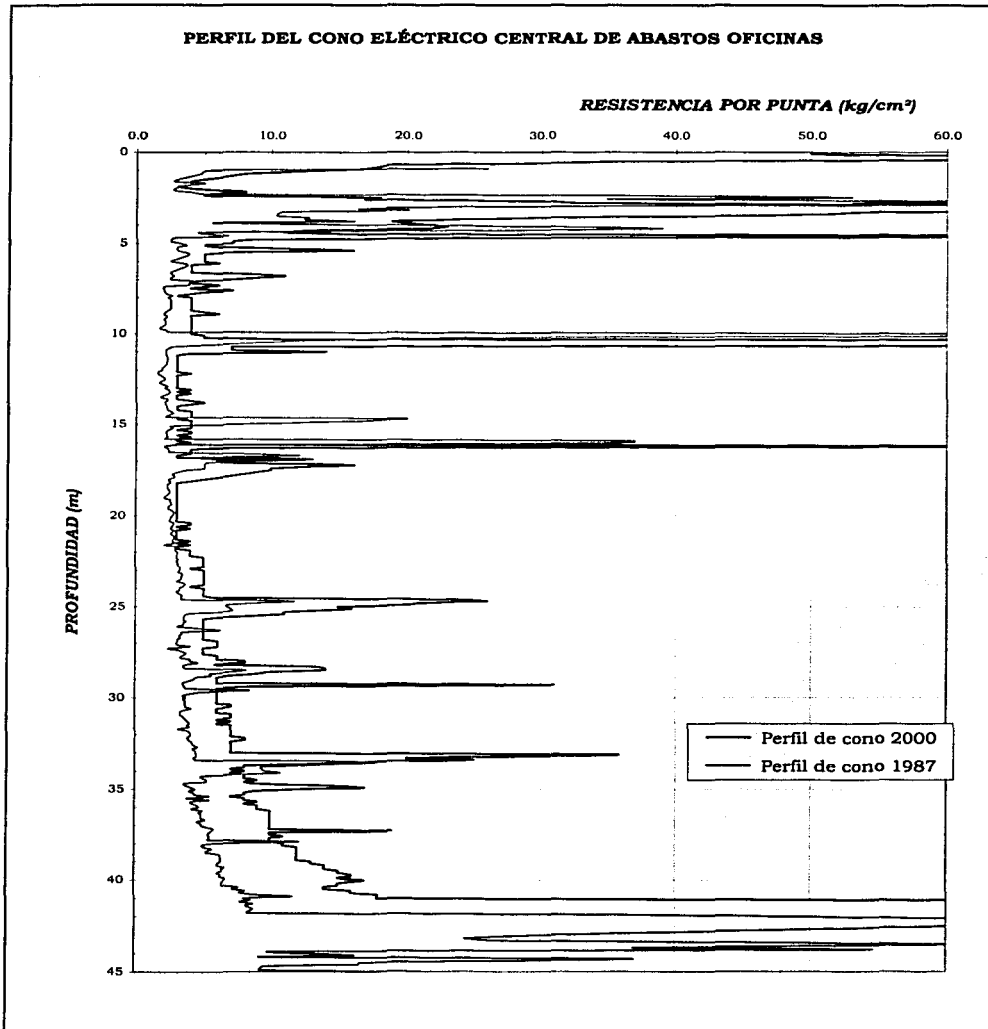


Fig. 4.12 Perfil de resistencia de punta (Olin, 2003).

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

IV.3.4.2 Resistencia no drenada

Al comparar los resultados de las pruebas UU realizados en el año 2000 y referidos a la profundidad equivalente al año 1987 (tabla 4.11), se observa un aumento de la resistencia en la serie arcillosa superior con incrementos del 60% a 140%; los valores máximos se presentan en los lentes interestratificados de arena, siendo la causa principal la adherencia intermolecular; que se intensifica con la compresión del suelo bajo la acción de los esfuerzos efectivos verticales y horizontales (σ'_v y σ'_h , respectivamente); así como a la desecación de la superficie de la arcilla (debido a que las moléculas de agua son expulsadas del espacio entre los minerales, provocando la reducción de la distancia entre partículas).

Tabla 4.12. Comparación de resistencia en condiciones no consolidada-no drenada (Olin, 2003).

COMPARACIÓN DE RESISTENCIA EN CONDICIONES NO CONSOLIDADA-NO DRENADA.														
COSTRA SUPERFICIAL														
1987							2000							VARIACIÓN %
MUES TRA	PROF. m	σ_c kg/cm ²	γ kg/cm ³	w %	e	Cuu Kg/cm ²	MUES TRA	PROF. m	σ_c kg/cm ²	γ kg/cm ³	w %	e	Cuu Kg/cm ²	
4-3	4.05	0.5	1.264	103	2.98	0.44	10	6.1	0.49	1.31	154.8	3.76	0.5	+13.6
8-3	7.25	0.6	1.491	81		0.16	11	8.6	0.55	1.16	150	4.36	0.18	+12.5
SERIE ARCILLOSA SUPERIOR														
15-1	12.33	0.78	1.115	413		0.29	15	12.3	0.58	1.13	397.8	10	0.49	+69
16-2	13.39	0.80	1.111	352	8.40	0.30	16	13.4	0.60	1.16	316.9	7.53	0.5	+66
17-3	14.45	0.81	1.139	295		0.18	17	14.7	0.64	1.14	290.3	7.66	0.27	+50
25-2	20.59	1.02	1.167	364		0.28	21	20.6	0.8	1.13	353.2	9.12	0.56	+100
27-1	21.93	1.03	1.153	394	8.9	0.25	24	23.0	0.83	1.2	215.1	5.67	0.6	+140
30-3	24.85	1.12	1.164	197		0.25	26	26.6	0.85	1.14	353.6	10.22	0.42	+60
35-3	28.75	1.12	1.472	72		0.38	28	28.6	0.87	1.17	287.3	6.75	0.69	+82
37-2	30.19	1.13	1.083	288		0.25	29	29.7	0.89	1.16	282.1	7.24	0.32	+28
39-1	31.53	1.15	1.162	277		0.27	31	31.5	0.91	1.16	275.5	7.4	0.39	+44
41-1	33.13	1.17	1.174	324	7.12	0.29	33	33.5	0.95	1.15	261.4	6.5	0.3	+3
44-1	35.53	1.2	1.195	283	6.5	0.22	34	34.4	0.97	1.16	263.5	5.56	0.5	+127
45-2	36.59	1.22	1.255	241		0.59	36	35.5	1.00	1.18	239.1	5.91	0.5	-15
48-2	38.99	1.25	1.278	199	4.7	0.58	38	38.0	1.05	1.23	184.9	4.8	0.55	-5

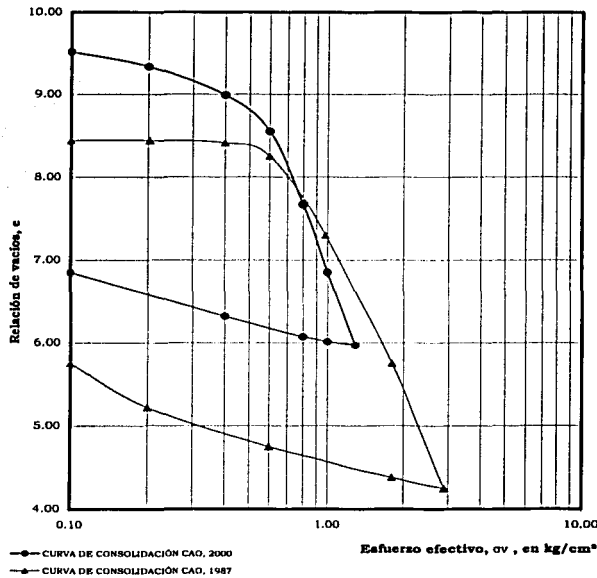
IV.3.4.3 Carga de preconsolidación

La información obtenida de los esfuerzos de preconsolidación tuvieron como base los siguientes criterios; la muestra es representativa de la misma formación estratigráfica y el contenido de agua no excede el 10%

Efecto del hundimiento regional en las propiedades geotécnicas de la zona de lago

Los ensayos se realizaron a la profundidad de:

- 12.6 m. El esfuerzo de preconsolidación disminuyó de $\sigma_{pc1987}=0.69\text{kg/cm}^2$ a $\sigma_{pc2000}=0.45\text{kg/cm}^2$. Esto se debe a que la relación de vacíos inicial de la muestra ensayada en el 2000 es mayor que la de 1987 ($e_{2000}=9.67$ y $e_{1987}=8.45$), implicando que no se trata del mismo material. Los datos se presentaron como información adicional para futuros estudios del sitio (fig.4.13).

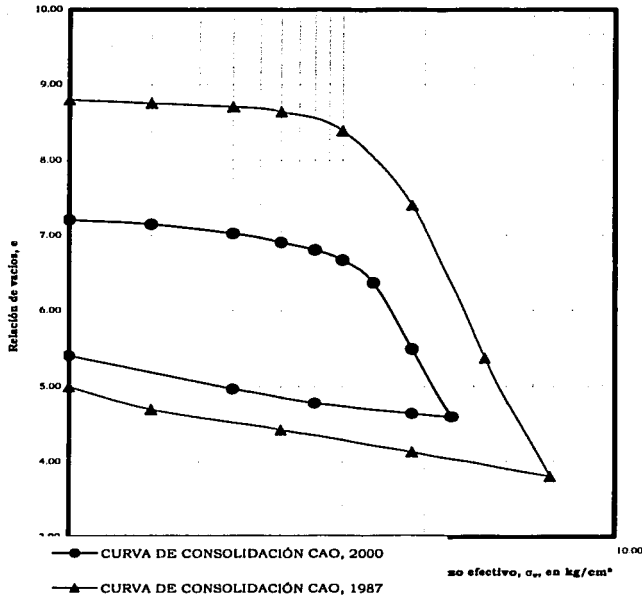


1987			2000		
NAP:	2.30	m	NAP:	2.90	m
Sondeo:	SM-1		Sondeo:	SM-1	
Muestra:	15-3		Muestra:	15-2	
Profundidad:	12.85	m	Profundidad:	12.50	m
w_i =	371.48	%	w_i =	378.19	%
e_i =	8.45		e_i =	9.67	
σ_o =	0.69	kg / cm ²	σ_o =	0.59	kg / cm ²
σ_{pc} =	0.69	kg / cm ²	σ_{pc} =	0.45	kg / cm ²
OCR =	1		OCR =	0.76	
s_u =			s_u =	2.45	
S_v =	101.5	%	S_v =	95.78	%

TESIS CON
 FALLA DE ORIGEN

Fig. 4.13 Variación de carga de preconsolidación, CAO (Olin, 2003).

- 31.2 m. La carga de preconsolidación se incremento un 10%. Esto indica el mismo tipo de comportamiento que el contenido de agua, es decir entre más cerca se encuentre el estrato arcilloso a la primer capa dura el incremento en la carga de preconsolidación por el efecto de bombeo profundo aumenta (fig.4.14).

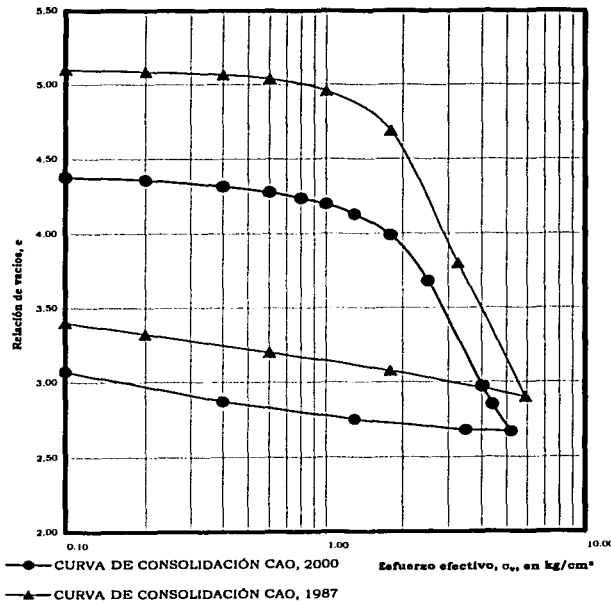


	1987			2000	
NAF:	2.3	m	NAF:	2.90	m
Sondeo:	SM-1		Sondeo:	SM-1	
Muestra:	38-3		Muestra:	31-2	
Profundidad:	31.25	m	Profundidad:	31.30	m
w _i =	377.22	%	w _i =	267.15	%
e _i =	8.83		e _i =	7.30	
σ _v =	1.06	kg / cm ²	σ _v =	1.2	kg / cm ²
σ _{pc} =	1.2	kg / cm ²	σ _{pc} =	1.3	kg / cm ²
OCR =	1.13		OCR =	1.08	
s _v =			s _v =	2.69	
S _v =	99.50	%	S _v =	98.43	%

Fig. 4.14 Variación de carga de preconsolidación, CAO (Olin, 2003).

Efecto del hundimiento regional en las propiedades geotécnicas de la zona de lago

- 37.7 m. La carga de preconsolidación se incremento un 20%. El comportamiento es similar al del ensaye anterior; observándose en ambas curvas de compresibilidad, que los tramos de recompresión y virgen son paralelos (fig.4.15).



NAF:	1987		NAF:	2000	
Sondeo:	2.3	m	Sondeo:	2.90	m
Muestra:	SM-1		Muestra:	SM-1	
Profundidad:	46-3		Profundidad:	38-3	
	37.65	m		37.80	m
w_i =	224.41	%	w_i =	177.97	%
e_i =	5.05		e_i =	4.40	
σ_o =	1.24	kg / cm ²	σ_o =	1.05	kg / cm ²
σ_{pc} =	1.60	kg / cm ²	σ_{pc} =	1.90	kg / cm ²
OCR =	1.29		OCR =	1.81	
s_a =			s_a =	2.47	
S_i =	103.90	%	S_i =	99.20	%

Fig. 4.15 Variación de carga de preconsolidación, CAO (Olin, 2003).

TESIS CON
FALTA DE ORIGEN

CONCLUSIONES

Las variantes observadas en relación a la resistencia no drenada, la cohesión y los esfuerzos de preconsolidación presentados en los estudios geotécnicos de los sitios CAO y SCT, a causa de los abatimientos piezométricos (particularmente en los estratos arcillosos adyacentes a la capa dura), reflejan incrementos de esfuerzos efectivos y por lo tanto una consolidación en el suelo.

Los estratos arcillosos susceptibles a asentamientos se ubican entre la superficie del terreno y un intervalo de aproximadamente 40 m de profundidad. Si se tiene en cuenta que debido a la extracción de agua, los estratos arcilloso del subsuelo se han consolidado en forma diferente, se puede comprender que el mismo incremento de esfuerzos inducido por el abatimiento piezométrico, sea causa de hundimientos mayores donde no hubo sobrecargas superficiales (rellenos y construcciones) o estas fueron reducidas.

Por otro lado, en la periferia de la zona de lago la pérdida de presión en el agua del subsuelo ocasionada por el bombeo, presenta de igual forma grietas y deformaciones en las estructuras, provocadas por el hundimiento diferencial.

Los resultados de las observaciones generadas en los años 1987 y 2000 referente a los sitios Central de Abasto Oficinas y Secretaria de Comunicaciones y Transportes, presentan un hundimiento promedio de 6.15 cm/año y 7.5 cm/año, respectivamente.

De la información presentada se concluye que:

Para el sitio Central de Abasto Oficinas:

El nivel de aguas freáticas, NAF, disminuyó 0.50cm en 13 años. Sin embargo, esta disminución no es atribuida a la extracción del agua en los estratos profundos, sino a la alimentación subterránea de los estratos permeables.

La variación del contenido de agua disminuyó a lo largo de toda la serie arcillosa, siendo mas evidente en la parte superior e inferior de la serie arcillosa superior, teniendo una disminución de 240% y 150%, respectivamente.

El esfuerzo de preconsolidación aumentó en la serie arcillosa superior, calculándose un 10% y 20% de incremento a las profundidades de 31.2m y 37.7m, respectivamente.

Conclusiones

La resistencia de punta, q_c , presento un incremento a lo largo de toda la serie arcillosa, principalmente en la costra superficial y la primera capa dura, en un 290% y 230%, respectivamente; así como un decremento de un 10% en la parte media de la serie arcillosa superior (17.0m), vinculado a las fisuras naturales que presenta el estrato. Para el sitio SCT:

El nivel de aguas freáticas disminuyo 0.70 m debido a los abatimientos piezométricos en el valle de la ciudad de México en 15 años.

El contenido de agua tiende a disminuir más en la parte superior e inferior del perfil teniendo una disminución del 12.40 % y 20.53 %, respectivamente.

El perfil de resistencia de punta q_c de cono eléctrico permite interpretar los incrementos en el estrato siendo esta más marcada en la parte superficial e inferior, teniendo un aumento de 181.96 % y 64.59 %, respectivamente.

La resistencia no drenada q_u , tiende a ser más notable en las parte superior e inferior del perfil, con un aumento de 84.00 % y 54.00%, respectivamente.

El esfuerzo de preconsolidación se incremento un 57 % en la parte superior; mas del 100% en la parte inferior y 11% en la parte media del perfil.

La explotación de los acuíferos y el consecuente abatimiento de las presiones hidrostáticas han modificado las propiedades geotécnicas de los estratos profundos hacia la superficie, por tanto es importante considerar las características evolutivas en el diseño geotécnico de cimentaciones y edificios tanto en condiciones estáticas como dinámicas.

BIBLIOGRAFÍA

1. Alberro, J. e Hiriart, G. (1973). Resistencia a largo plazo de la arcilla de la ciudad de México. Series del Instituto de Ingeniería No. 317. Universidad Nacional Autónoma de México.
2. Benhumea, M. y Vázquez, A. (1988), Estudios Geofísicos del Valle de México. Subdirección de Construcción. Unidad de estudios de Ing. Civil. CFE.
3. Carrillo N., (1948) Influence of the artesian wells in the sinking of Mexico City. Contribution to the second international conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Rotterdam.
4. Cruickshank, C. (1982). El sistema hidráulico del Distrito Federal. Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica.
5. Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica. 1990. El sistema de Drenaje Profundo de la Ciudad de México.
6. Franco, F.(2002). Evaluación de las propiedades geotécnicas del sitio Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT) a 15 años del sismo de 1985.Tesis de Maestría. División de Estudios de Posgrado, Facultad de Ingeniería. Universidad Nacional Autónoma de México.
7. Gutierrez, C.E. (2001). Comunicación personal.
8. Jaime, A. (1987). Características dinámicas de la arcilla del valle de México. Tesis Doctoral. Universidad Nacional Autónoma de México.
9. Jaime, A. (1988). Geotecnia y sismicidad en el valle de México. Series del Instituto de Ingeniería, UNAM(D-29).
10. Jaime, A. y Méndez, E. (2002). Evolución de las propiedades de la arcilla de la ciudad de México. XXI Reunión Nacional de Mecánica de Suelos. Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos.
11. Jaime, A., Resendiz, D., Romo, M. P.,(1988).El subsuelo del valle de México: Propiedades Dinámicas y Zonificación. Revista Ingeniería, vol. LVIII Núm 2. pág. 5 a 25. UNAM.
12. Jaime, A., Romo, M. y Ovando, E., (1986). Características Estáticas y Dinámicas del Suelo en el Sitio SCT. Instituto de Ingeniería. Proyecto 6504
13. Jaime, A., Romo, M y Ovando, E.(1987).Características del suelo en el sitio central de abasto oficinas. Instituto de Ingeniería. Proyecto 6504
14. Lesser-Illades, J., Sánchez-Díaz, F y González-Posadas, D.(1990). Aspectos geohidrológicos de la ciudad de México. Ingeniería Hidráulica en México. pág. 52 a 60.
15. Marín, G. (1978). Un mecanismo de falla generado por el abatimiento piezométrico. Simposio El subsuelo y la ingeniería de cimentaciones en el área urbana del valle de México. Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos. pág.192 a 194.
16. Marsal, R.J. y Graue, R. (1969), El subsuelo del lago de Texcoco. Volumen Nabor Carrillo, Secretaría de Hacienda y Crédito Publico, México.

Bibliografía

17. Marsal, R.J. e Hiriart, F. (1969), El hundimiento de la ciudad de México. Volumen Nabor Carrillo, Secretaría de Hacienda y Crédito Público, México.
18. Marsal, R.J. y Mazari, M. (1959), El subsuelo de la Ciudad de México. UNAM. Edición 1962.
19. Marsal, R.J. y Mazari, M. (1959). El subsuelo de la ciudad de México. Contribución del Instituto de Ingeniería, UNAM, al I Congreso Panamericano de Mecánica de Suelos e Ingeniería de Fundaciones, México.
20. Mazari, M., Mazari, M., Ramírez, C. y Alberro, J. (1992). Efectos de la extracción de agua en la zona lacustre del valle de México. Volumen Raúl J. Marsal. Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos. pág.38 a 47.
21. Méndez, E. (1991). Evolución de las propiedades de la arcilla de la ciudad de México. Tesis licenciatura. Instituto Politécnico Nacional.
22. Montañez, L. (1983). Exploración con cono eléctrico en la ciudad de México. Tesis Maestría. Universidad Nacional Autónoma de México.
23. Mooser, F. (1978), Geología del Relleno Cuaternario de la Cuenca de México. El subsuelo y la ingeniería de cimentaciones en el área urbana del valle de México. Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos. pág. 9 a 13.
24. Moreno, G. (1978). El subsuelo y la ingeniería de cimentaciones en el área urbana del valle de México. Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos. pág.186 a 191.
25. Murillo, R. (1990). Sobreexplotación del acuífero de la cuenca del valle de México; efectos y alternativas. El subsuelo de la cuenca del valle de México y su relación con la ingeniería de cimentaciones a cinco años del sismo. Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos. pág. 109 a 118.
26. Murillo, R. y García, G. (1978). Exlago de Texcoco. El subsuelo y la ingeniería de cimentaciones en el área urbana del valle de México. Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos. pág.51 a 82.
27. Murillo, R. y Morales, R. (1991). El subsuelo del Exlago de Texcoco. IX Congreso Panamericano de Mecánica de Suelos e Ingeniería de Fundaciones. Viña del Mar, Chile. Vol. I, pág. 213 a 225.
28. Olin, G.(2003). Características y propiedades del sitio Central de Abasto Oficinas, a 15 años del sismo de 1985. Tesis de Maestría. Instituto Politécnico Nacional. Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura.
29. Orozco y Berra, 1864. Memoria para la Carta Hidrográfica del Valle de México.
30. Ovando, E. y Takahashi, V. (1998). Cambios y evolución de las propiedades del subsuelo de la ciudad de México, implicaciones en la preservación de su patrimonio arquitectónico. Revista Ingeniería Civil. CICM. No.348. pág. 39 a 47.
31. Pérez, P. (2003). Comportamiento cíclico de la arcilla de la ciudad de México en los sitios SCT y CAO : a 15 años del sismo de 1985. Tesis Maestría. División de Estudios de Posgrado, Facultad de Ingeniería. Universidad Nacional Autónoma de México.
32. Reséndiz, D, Springall, G. Rodríguez J. M. y Esquivel, R. (1970). Información reciente sobre las características del subsuelo y la práctica de la ingeniería de cimentaciones en la ciudad de México. V Reunión Nacional de Mecánica de Suelos. Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos.

33. Santoyo, E. Y Gutiérrez, C.E. (1990). Estratigrafía y muestreo inalterado de los suelos lacustres del valle de México. El subsuelo de la cuenca del valle de México y su relación con la ingeniería de cimentaciones a cinco años del sismo. Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos.pág.37 a 55.
34. Tamez, E., Santoyo E. y Cuevas, A.(1992). La Catedral y el Sagrario Metropolitanos: control del comportamiento de sus cimentaciones. Volumen Raúl J. Marsal. Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos. pág. 61 a 130.
35. 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. Ciencias Físicas y Matemáticas. Universidad Nacional Autónoma de México.
36. Zeevaert, L. (1973). Foundation engineering for difficult subsoil conditions. Van Nostrand Reinhold, Huntington, Nueva York.