



**UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE MÉXICO**

**FACULTAD DE ESTUDIOS
SUPERIORES ARAGÓN**

***CORRELACIONES ENTRE ALGUNAS PROPIEDADES
ÍNDICE Y MECÁNICAS DE LAS ARCILLAS DE LA
CUENCA DE MÉXICO.***

TESIS

COMO REQUISITO PARA OBTENER EL GRADO DE

INGENIERA CIVIL

PRESENTA:

YVETTE HERNÁNDEZ RAMÍREZ

DIRECTOR:

DR. EFRAÍN OVANDO SHELLEY

MÉXICO, D.F. 2015



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.

ÍNDICE

| | |
|--|-----------|
| DEDICATORIA | |
| AGRADECIMIENTOS | |
| NOMENCLATURA | 1 |
| LISTA DE FIGURAS..... | 2 |
| LISTA DE TABLAS | 4 |
| RESUMEN..... | 5 |
| 1. INTRODUCCIÓN | 6 |
| JUSTIFICACIÓN | 7 |
| OBJETIVOS | 8 |
| 2. CONTEXTO | 9 |
| 2.1 GEOLOGÍA HISTÓRICA DE LA REGIÓN | 9 |
| 2.1.2 <i>La cuenca</i> | 11 |
| 2.2 CARACTERÍSTICAS DE LA CUENCA DE MÉXICO..... | 13 |
| 2.2.1 <i>Zonificación geotécnica</i> | 13 |
| 2.3 ESTRATIGRAFÍA..... | 17 |
| 2.3.1 <i>Estratigrafía de la Zona del Lago</i> | 17 |
| 2.3.2 <i>Estratigrafía de la Zona de Transición</i> | 18 |
| 2.3.3 <i>Estratigrafía de la Zona de Lomas</i> | 18 |
| 3.MARCO REFERENCIAL..... | 19 |
| 3.1 CONCEPTOS BÁSICOS DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS DEL SUELO | 20 |
| 3.1.1 <i>Propiedades Índice</i> | 21 |
| 3.1.2 <i>Propiedades Mecánicas</i> | 23 |
| 3.1.2 <i>Límites de consistencia</i> | 23 |
| 3.2 CONSOLIDACIÓN | 26 |
| 3.2.1 <i>Fundamentos de la consolidación</i> | 27 |
| 3.3 COMPRESIBILIDAD | 30 |
| 3.3.1 <i>Parámetros de compresibilidad</i> | 30 |

| | |
|---|-----------|
| 3.4 CORRELACIONES ENTRE PARÁMETROS DE COMPRESIBILIDAD Y PROPIEDADES ÍNDICE..... | 41 |
| 3.5 MUESTREO..... | 54 |
| 4. MARCO METODOLÓGICO | 56 |
| 4.1 INFORMACIÓN RECOPIADA | 57 |
| 4.2 PROCESAMIENTO DE INFORMACIÓN | 58 |
| 4.2.1 Obtención del parámetro de deformabilidad (λ) | 58 |
| 4.2.2 Elección de las propiedades..... | 67 |
| 4.3 CORRELACIONES..... | 67 |
| 4.3.1 Correlación entre λ y WL..... | 68 |
| 4.3.2 Correlación entre λ y IP..... | 70 |
| 4.3.3 Correlación entre λ y W_o | 71 |
| 4.3.4 Correlación entre λ y e | 72 |
| 4.4 SALINIDAD..... | 73 |
| 5.CONCLUSIONES | 77 |
| REFERENCIAS | 79 |
| ANEXO A | 82 |
| ANEXO A TABLA DE LAS PROPIEDADES ÍNDICE (ASA LAGO Y T2) | 82 |
| ANEXO B | 84 |
| ANEXO B CURVAS DE COMPRESIBILIDAD (ASA LAGO Y T2) | 84 |
| ANEXO C | 92 |
| ANEXO C TABLA DEL CONTENIDO DE AGUA, W_o (%). (ASA LAGO Y T2) | 92 |

"La Mecánica de Suelos llegó a la frontera entre la ciencia y el arte. Yo uso el término "arte" para indicar los procesos mentales que conducen a resultados satisfactorios sin la ayuda del razonamiento lógico paso a paso... Para adquirir la competencia en el campo de la ingeniería de movimientos de tierra hay que convivir con el suelo. Uno debe amarlo y observar su desempeño no sólo en el laboratorio sino también en el campo, para familiarizarse con muchas de sus múltiples propiedades que no están descritas en los registros de perforación ... "

Karl Terzaghi.

DEDICATORIA

A Dios por ser mi guía en esta hermosa etapa de mi vida, por esas bendiciones, esa fortaleza y sabiduría brindada para afrontar cada obstáculo.

A mi madre Josefina Ramírez Morales, por ser madre y padre a la vez, por esos consejos para ser la mejor hija, hermana, amiga, estudiante. Por acompañarme en los momentos de tristeza y felicidad. Gracias por tu incondicional apoyo.

A mi hermana Tania Hernández Ramírez por enseñarme que no debo decaer ante los problemas que enfrente. A mi pequeño hermano Alexander Rojas Ramírez por ser un angelito que da alegría a nuestras vidas. Ambos son los mejores compañeros de mi vida.

AGRADECIMIENTOS

Deseo agradecer a la *Universidad Nacional Autónoma de México*, en especial a la *Facultad de Estudios Superiores Aragón* por la formación brindada, a cada uno de mis profesores que me instituyeron para ser una persona ética.

Al *Instituto de Ingeniería de la UNAM*, por brindarme el apoyo económico y haberme alojado en sus instalaciones para la realización de esta tesis.

Un especial agradecimiento al *Dr. Efraín Ovando Shelley* por la oportunidad brindada y aquellos consejos y orientación para el desarrollo de este trabajo. Gracias por su confianza.

A la *M. en I. Karla Ivonne Gutiérrez Vázquez* y al *Ing. Juan Alfonso González Sakaguchi* por su orientación y consejos durante esta etapa.

Mi mas profundo agradecimiento a mis compañeros y amigos del Instituto de Ingeniería de la UNAM, a la *M. en I. Renata González Rodríguez*, *Ing. Diana Ximena Beltrán Herrera*, *Ing. Tomasa Ramos Ramos* y al *M. en I. Félix Sosa Contreras*. Por formar parte de este trabajo.

NOMENCLATURA

| | |
|------------|--|
| e | <i>Relación de vacíos</i> |
| V_v | <i>Volumen de vacíos</i> |
| V_s | <i>Volumen de sólidos</i> |
| n | <i>Porosidad</i> |
| V | <i>Volumen</i> |
| v | <i>Volumen específico</i> |
| S | <i>Grado de saturación</i> |
| V_w | <i>Volumen de agua</i> |
| ω | <i>Contenido de agua</i> |
| W_w | <i>Peso del agua</i> |
| W_s | <i>Peso de sólidos</i> |
| θ | <i>Contenido de agua volumétrico</i> |
| ρ | <i>Densidad</i> |
| G_s | <i>Densidad de sólidos</i> |
| γ_w | <i>Peso unitario del agua</i> |
| γ | <i>Peso unitario</i> |
| γ_d | <i>Peso unitario seco</i> |
| λ | <i>Pendiente de la curva de compresibilidad en el tramo virgen</i> |

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 Geología y morfología de la Cuenca. (Santoyo V. et. al., 2005).

Figura 2.2 Antiguos lagos sobre los que se posa actualmente la Ciudad de México.

Figura 2.3 Zonificación geotécnica de la Ciudad de México (Santoyo V. et. al., 2005).

Figura. 3.1 Relaciones entre fases de una muestra de un suelo (Díaz-Rodríguez, 2014).

Figura 3.2 Estados, límites e índice de liquidez de un suelo.

Figura 3.3 Curva de consolidación (Barnes, 2000).

Figura 3.4 Curva de compresibilidad de un espécimen de suelo.

Figura 3.5 Curva de compresibilidad: Relación de vacíos vs logaritmo del esfuerzo efectivo (Al-Khafaje, 1992).

Figura 3.6 Índice de compresibilidad C_c y de descarga C_s .

Figura 3.7 Línea de consolidación del suelo n_{cl} y de descarga u_{rl} .

Figura 3.8 Determinación del tiempo de consolidación y el coeficiente de consolidación secundaria. (Leoni J., 2008).

Figura 3.9 Relación entre el índice de compresión y el límite líquido para arcillas normalmente consolidadas de Medellín (Maturana Franco. et al, 1994).

Figura 3.10 a) índice de compresión vs límite líquido; b) índice de compresión vs contenido de agua; c) $\frac{C_c}{1+e_0}$ vs contenido de agua.

Figura 3.11: a) Datos medidos y líneas ajustadas del índice de plasticidad vs. C_c , C_r y C_α del sitio 1; b) Valores Medidos y línea ajustada del índice de plasticidad vs. C_c del sitio 2; c) Comparación de datos medidos y línea calculada del límite líquido vs. C_c del sitio.

Figura 3.12 Drenaje y medición de presión de poro, de acuerdo con los cuatro tipos de pruebas que pueden desarrollarse (Rowe, 1966).

Figura 4.1 Curva de compresibilidad: $\log \sigma'$ vs e .

Figura 4.2 $\ln \sigma'$ vs Volumen específico.

Figura 4.3 Correlación entre el límite líquido y el parámetro λ para arcillas del Valle de México.

Figura 4.4 Correlación entre el índice plástico y el parámetro λ para arcillas del Valle de México.

Figura 4.5 Correlación entre el contenido de agua y el parámetro λ para arcillas del Valle de México.

Figura 4.6 Correlación entre la relación de vacíos y el parámetro λ para arcillas del Valle de México.

Figura 4.7 Correlación corregida entre el contenido de agua y el parámetro λ para arcillas del Valle de México.

LISTA DE TABLAS

Tabla 3.1 Resumen de propiedades índice (Díaz-Rodríguez, 2014).

Tabla 3.2 Correlaciones publicadas para los índices de compresión (AFTER AZZOUZ ET AL 1976) citado por (Carter. et al, 1991).

Tabla 3.3 Propiedades Índice (Karl. et al., 1993).

Tabla 3.4 Ecuaciones del índice de compresión (Sridharan, 2000).

Tabla 3.5 Relaciones empíricas (Budhu, 2010).

Tabla 4.1 Resumen de resultados.

Tabla 4.2 Base de datos.

RESUMEN

La alta compresibilidad de las arcillas que forman parte del suelo del Valle de México ocasiona asentamientos diferenciales que afectan a las edificaciones, principalmente en la antigua zona del lago. Es por ello que el estudio de la compresibilidad adquiere especial prioridad en el ámbito geotécnico.

Con resultados experimentales y la obtención de datos de una recopilación bibliográfica, el presente trabajo tiene por objeto establecer correlaciones entre los parámetros de deformabilidad del suelo y algunas de sus propiedades índice. Las propiedades índice empleadas para establecer correlaciones fueron el límite líquido (W_L), el índice plástico (IP), el contenido de agua (W_o) y la relación de vacíos (e_o).

Estas correlaciones brindan una herramienta práctica para estimar en forma aproximada y preliminar los asentamientos que se presenten en algún sitio o alguna obra determinada. Dichas estimaciones son útiles en la etapa de estudios previos, antes de los cálculos definitivos.

1. INTRODUCCIÓN

El suelo de la Cuenca del Valle de México cuenta con características peculiares, por ende el interpretar su comportamiento ha sido un reto para la ingeniería geotécnica. Este trabajo describe en el primer capítulo de manera general los rasgos geológicos de la Cuenca del Valle de México, así como, los aspectos que influyeron para su formación y las características del suelo en que está conformado.

Tanto las propiedades físicas del suelo como las mecánicas son fundamentales para el análisis y diseño de problemas de ingeniería civil y para la interpretación del comportamiento del suelo en estudio.

La compresibilidad y deformabilidad de las arcillas del Valle de México se evalúan mediante pruebas de consolidación odométrica o unidimensional. Para la realización de estas pruebas se requiere un tiempo comprendido entre dos o tres semanas y las gráficas que resultan de estas pruebas permiten determinar parámetros como el coeficiente de compresibilidad (a_v), coeficiente de compresibilidad volumétrica (m_v), coeficiente de consolidación (C_v), índice de compresión (C_c), índice de descarga (C_s), lambda (λ) y kappa (κ), entre otros. Estos parámetros nos permiten predecir la velocidad y la magnitud de los asentamientos que se desarrollan sobre los estratos arcillosos. Las definiciones de estos parámetros se describen en el capítulo tres.

En este trabajo se exponen los resultados de diversas investigaciones que emplean correlaciones empíricas entre parámetros de deformabilidad y las propiedades índice, con el fin de estimar, de una manera más práctica y sencilla, los asentamientos de un sitio determinado.

El estimar los asentamientos de un suelo con una alta compresibilidad es fundamental en el diseño de cimentaciones. Sin embargo, para obtenerlas se requiere disponer de fondos, a veces cuantiosos, a fin de obtener muestras de buena calidad, inalteradas y además representativas. A esto deben agregarse los costos que suponen la realización de ensayos de estas muestras en el laboratorio así como el tiempo que consumen todas estas actividades. Es por ello que la presente investigación establece correlaciones entre los parámetros de deformabilidad del suelo de la Cuenca del Valle de

México y algunas de sus propiedades índice que nos proporcionen una tendencia de los asentamientos que se producirán al aplicar carga. Para la obtención de las correlaciones se analizaron resultados de muestras inalteradas del ex-Lago de Texcoco realizadas en el consolidómetro y a su vez se incluyó una recopilación de datos de diferentes autores que han desarrollado pruebas de consolidación a arcillas del Valle de México.

JUSTIFICACIÓN

Las estructuras de la ingeniería civil deben tener una apropiada cimentación dependiendo de las características del terreno en que se apoya. Para satisfacer los requisitos de diseño deben considerarse diferentes características como el tipo de suelo, condiciones hidráulicas y los esfuerzos que actúan sobre él, por mencionar algunas.

El asentamiento en cualquier edificación representa un aspecto que debe tratarse con cautela, especialmente cuando está cimentada en estratos de arcilla saturada, como en el caso del Valle de México, en donde las edificaciones suelen presentar asentamientos de gran magnitud debido a la alta compresibilidad del subsuelo, en especial en la antigua zona lacustre.

Las pruebas que se realizan en el laboratorio para la determinación de las propiedades de compresibilidad requieren de un tiempo relativamente largo, por lo que se justifica utilizar correlaciones para estimar estas propiedades a partir de las propiedades índice, las cuales se obtienen mediante ensayos menos laboriosos, menos costos y que consumen mucho menos tiempo. Estas correlaciones no deben usarse en cálculos definitivos pero si permiten estimar el asentamiento que puede llegar a presentar la cimentación, en estudios preliminares.

OBJETIVOS

1. Partiendo del comportamiento de la consolidación y de las características de compresibilidad del suelo en análisis, establecer la relación entre el índice de compresibilidad y el parámetro de deformabilidad (λ).
2. Plantear correlaciones entre el parámetro de deformabilidad (λ) y las propiedades índice y mecánicas para suelos arcillosos, retomando resultados de muestras inalteradas del Valle de México y del ex-Lago de Texcoco.
3. Llevar a cabo un análisis de los resultados obtenidos, para la determinación del parámetro de deformabilidad (λ) de las arcillas, con el fin de establecer correlaciones y así estimar dicho parámetro mediante las ecuaciones resultantes.

2. CONTEXTO

Para poder hablar sobre el subsuelo de la Cuenca de México, es esencial considerar su contexto geológico ya que es fundamental explicar los eventos que dieron lugar a la cuenca y saber dónde se encuentra ubicado geológicamente.

Partiendo de la información presentada en “La Síntesis Geotécnica de la Cuenca del Valle de México”. (Santoyo V. & et. al., 2005). El siguiente capítulo describe de manera general la geología de la Cuenca del Valle de México, entendiendo su estratigrafía, vulcanismo, así como algunas de sus características.

2.1 Geología histórica de la región

Aproximadamente hace 700,00 años la Cuenca de México permaneció abierta por lo que principales acontecimientos que dieron origen y transformación a la Cuenca de México se presentaron cuando una gran actividad volcánica formó una enorme cortina natural (Sierra de Chichinautzin) cerró la cuenca. (Mooser, 1963).

Anteriormente, la cuenca fue parte del mar somero, posteriormente se convirtió en una planicie costera, después en una zona de subducción y finalmente una cuenca lacustre. Estos acontecimientos tuvieron lugar durante el Mioceno, Plioceno y Pleistoceno, respectivamente. A continuación se exponen de manera resumida los principales acontecimientos que dieron origen a la Cuenca de México.

En la época del Mioceno; se originó una intensa actividad volcánica y tectónica en la región donde se encuentra actualmente la Cuenca de México. El basamento volcánico del Terciario Medio fue afectado por fracturas y fallas de la corteza terrestre provocando hundimientos y formando algunas fosas tectónicas.

Durante el Mioceno Tardío el material volcánico formó estructuras en la parte poniente del valle, desviando los ríos existentes (época en que se forma la Sierra de Guadalupe).

Durante el Plioceno la actividad volcánica se caracteriza por los derrames de andesitas basálticas generando el cierre al norte de la cuenca (época en que surge la Sierra de las Cruces al poniente). A finales del Plioceno se producen fracturas con orientación W-E, originando grandes efusiones de basalto que crearon la Sierra de Chichinautzin. Es en esta etapa que surgen los diferentes lagos en la cuenca, provocando el origen de grandes abanicos aluviales sobre los flancos poniente y oriente de la cuenca (conocidos como Formación Taranto). Y con la formación de la Sierra Chichinautzin se formó una represa natural que impidió el drenaje de la cuenca en la parte sur delimitando el sistema fluvial.

2.1.2 La cuenca

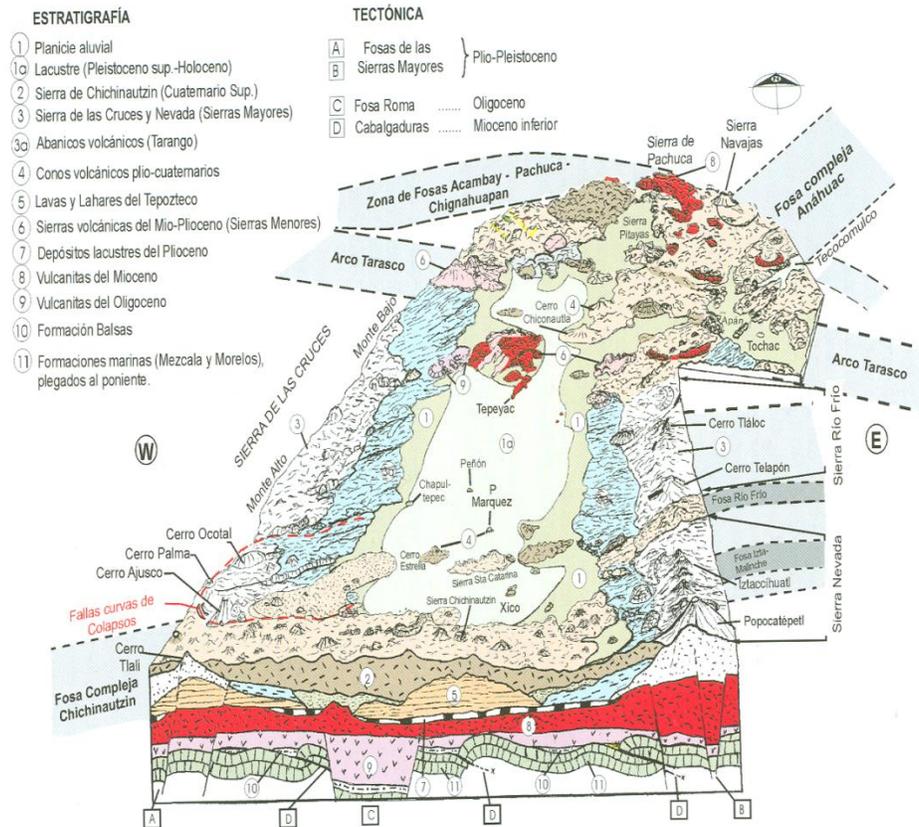


Figura 2.1 Geología y morfología de la Cuenca. (Santoyo V. et al., 2005)

La Figura 2.1 representa de manera resumida la complejidad tectónica de la Sierra del Chichinautzin exponiendo la estratigrafía condensada de la cuenca en un corte a lo largo de ésta, mostrando la Fosa Roma. Además de un extraordinario hinchamiento y hundimiento cortical, repleto de lavas fenobasálticas y basálticas.

A si mismo muestra a la vez la falla tectónica de mayor longitud (Santa Catarina) que se extiende del oriente al poniente del Nevado de Toluca.

Por lo tanto; se considera que durante el Cuaternario, con la formación de la Sierra Chichinautzin, se generó la cuenca, dando origen a pequeños cuerpos de agua, (Figura 2.2) dichos cuerpos de agua permanecían en temporada de lluvia y en épocas de sequía se formaban zonas áridas. Estas condiciones climáticas originaron acumulación de limos, arcillas, arenas y clastos derivados de volcanes y ríos.

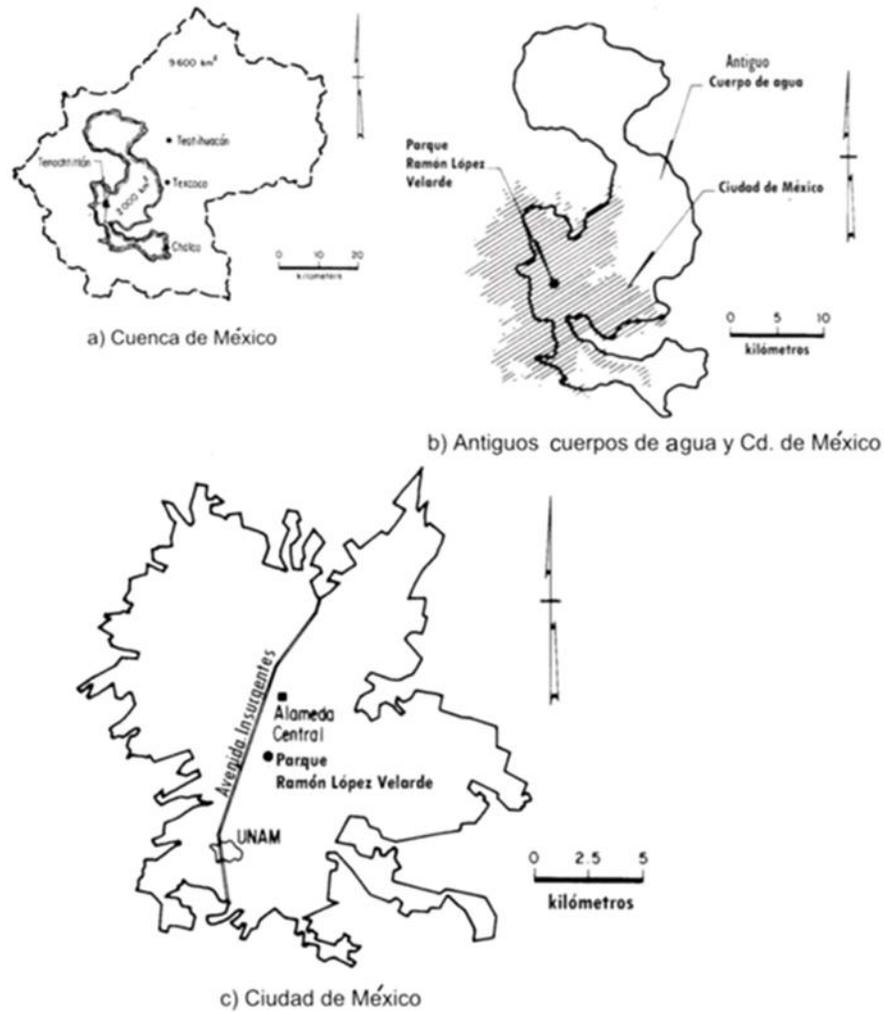


Figura 2.2 Antiguos lagos sobre los que se posa actualmente la Ciudad de México.

2.2 Características de la Cuenca de México

Es en la parte central de la Faja Volcánica Transmexicana que se localiza la Cuenca de México. Hacia el norte está limitado por las Sierras de Tepetzotlan, Tezontlalpan y Pachuca, al este por los Llanos de Apan y la Sierra de Nevada, al sur por las Sierras de Cuauhtzin y Ajusco y al oeste por las sierras de Las Cruces, Monte Alto y Monte Bajo.

La cuenca tiene un área de 7,160 km², de los cuales 2050 km² corresponden a las zonas bajas. Tiene una longitud de 1,100 km en dirección N-S y una anchura de 80 km en la dirección E-W, su parte más baja tiene una altitud de 2,236m sobre el nivel del mar. Una gran cantidad de ríos o arroyos pequeños fluyen hacia la cuenca, destacando los ríos Cuatitlán, Tlaneplantla, Los Remedios, Churubusco, Texcoco y de la Compañía. (Mazari, 1990).

2.2.1 Zonificación geotécnica

En 1959 Marsal y Mazari presentan la primera zonificación de los suelos del valle; en 1970 Resendiz et al, actualizaron la información del subsuelo. Posteriormente se volvió a actualizar dicha información (Del Castillo, 1978) en un simposio sobre El Subsuelo y la Ingeniería de Cimentaciones en el Área Urbana del Valle de México.

La última versión del plano de zonas geotécnicas se incorporó a las Normas Técnicas Complementarias en el año 2004. De la información actualizada sobre la zonificación geotécnica de la Cuenca del Valle de México se expone lo siguiente:

Zona del lago. Se caracteriza por sus grandes espesores de arcillas blandas de alta compresibilidad; se ha dividido en tres subzonas atendiendo la importancia de dos factores:

- Espesor y propiedades de la costra superficial.
- La consolidación inducida en cada sitio.

Subzonas de Zona Lago:

Lago Virgen (LV). Se identifica como arcillas en condición virgen a las más blandas de lo que ahora es el vaso del ex-Lago de Texcoco. Pero debido al desarrollo de esa zona, las sobrecargas han aumentado e intensificado el bombeo profundo.

Lago Centro I (LCI). Comprende el sector no colonial de la ciudad y ha estado sujeto a las sobrecargas pequeñas y grandes. Las propiedades mecánicas del subsuelo en esta zona interpretan una condición intermedia del Lago Virgen y las del Lago Centro II.

Lago Centro II (LCII). Se asocia a la antigua traza de la ciudad; dicha zona ha presentado variedad de cargas por lo que se presentan las siguientes condiciones:

- ✓ Arcillas firmemente consolidadas debido a los rellenos y sobrecargas de construcciones.
- ✓ Arcillas blandas, ligadas a lugares como jardines y al alojamiento de plazas, durante un tiempo prolongado.
- ✓ Arcillas muy blandas, localizada en la intersección de los antiguos canales. Sin olvidar que la presentación de las arcillas muy blandas también se debe a efectos del bombeo del subsuelo.

Zona de Transición. En esta zona los depósitos profundos se ubican a 20m de profundidad, o menos; constituida por estratos arenosos y limo arenosos intercalados con capas de arcilla lacustre. Está representada por subzonas debido a la proximidad con la Zona de Lomas y del espesor de suelos relativamente blandos. Las subzonas alta y baja poseen características de resistencia al corte.

Subzonas de Zona de Transición.

Transición Alta (TAL): es la más cercana a las Lomas el cual, debido a depósitos aluviales cruzados, presenta una estratigrafía irregular.

Transición Baja (TBA): presenta una estratigrafía compleja. Los espesores y propiedades de los materiales pueden presentar diferencias importantes dependiendo de la ubicación.

Transición Abrupta (TAB): zona en que las arcillas lacustres están intercaladas con numerosos lentes de materiales erosionados de los cerros y hasta lentes delgados de travertino silificado.

Zona de Lomas. Caracterizada por rocas o suelos que fueron depositados fuera del ambiente lacustre, en los que pueden existir depósitos arenosos en estado suelto o cohesivos relativamente blandos. Es frecuente la presencia de oquedades en rocas, de cavernas y túneles excavados en suelos. Debido a las condiciones inestables de compacidad y cementación afectan la estabilidad de las excavaciones.

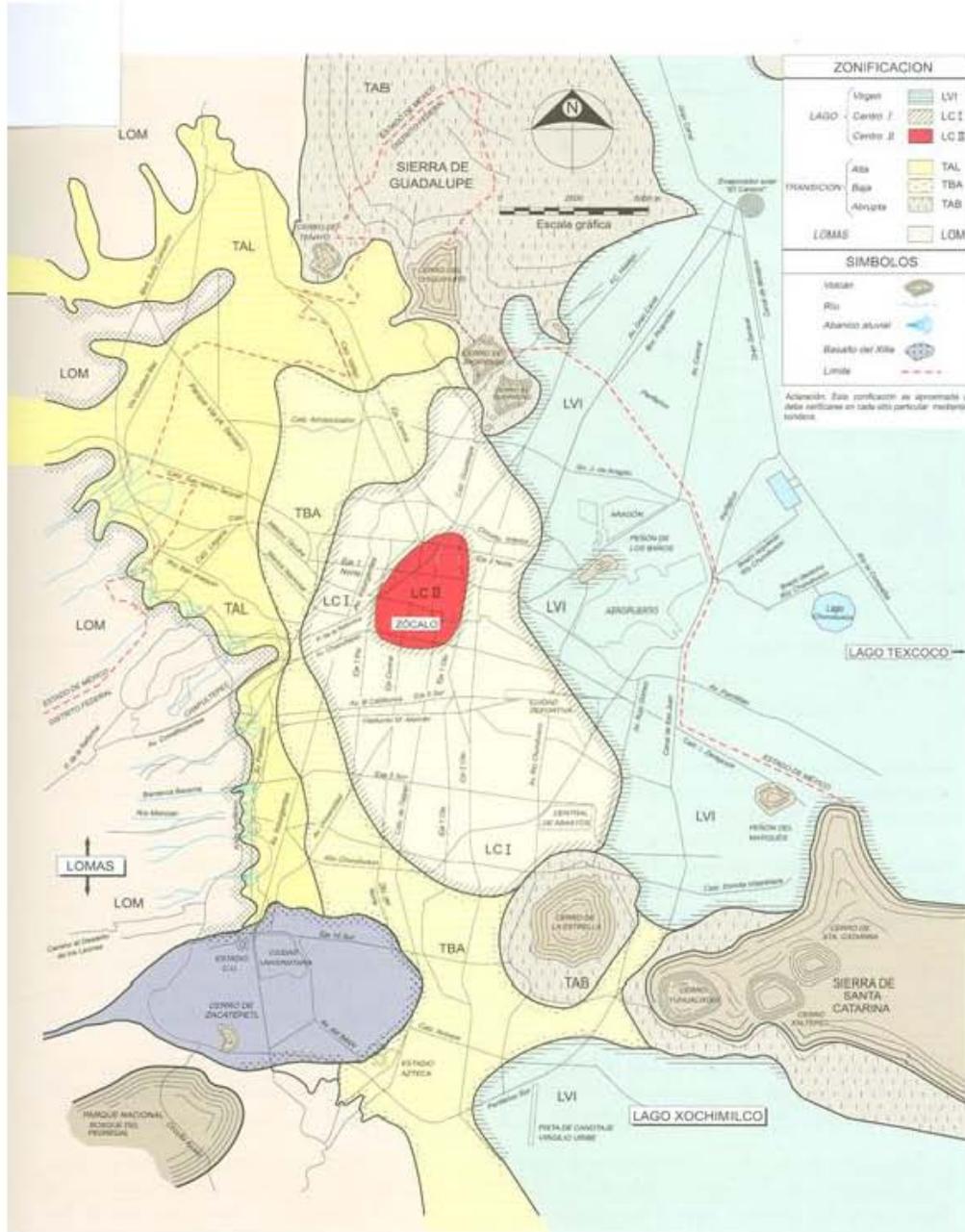


Figura 2.3 Zonificación geotécnica de la Ciudad de México (Santoyo V. et. al., 2005).

2.3 Estratigrafía

Las investigaciones contribuidas por los profesores Raul J. Marsal y Marcos Mazari en 1959 en su libro titulado *El subsuelo de la Ciudad de México*, y la interpretación de la secuencia estratigráfica de los depósitos lacustres presentados en la Conferencia Internacional de Mecánica de Suelos de Roma por el Dr. Leonardo Zeevaert , permitieron seguir realizando investigaciones posteriores sobre el subsuelo de la ciudad. (Santoyo V. & et. al., 2005)

2.3.1 Estratigrafía de la Zona del Lago.

La estratigrafía de la Zona de Lago se describe de la siguiente manera:

Costra superficial. Constituida por distintos rellenos artificiales como lo son: 1) Relleno artificial, 2) Suelo blando y 3) Costra seca.

Serie arcillosa superior (FAS). Cuenta con un espesor entre 25 y 50 m. Compuesta por arcillas blandas o muy blandas interrumpidas o intercalados por lentes duros.

Capa dura (CD). En el que predominan limos-arenas y suelos limosos; dicha capa presenta una estratigrafía compleja ya que presenta dificultad para realizar muestreo, otra característica es la variabilidad en espesor y resistencia que presenta.

Formación arcillosa inferior (FAI). Cuenta con un espesor de 15 m al centro del lago, desapareciendo en las orillas; está constituido por capas de arcilla separadas por lentes duros.

Depósitos profundos (DP). Integrados por materiales granulares como arenas y gravas aluviales limosas.

2.3.2 Estratigrafía de la Zona de Transición

Estos depósitos se distinguen por formar una franja entre suelos lacustres y las sierras que resaltan en la Zona de Lago. Estos depósitos de transiciones pueden clasificarse como: Transición interestratificada (acumulación de acarrees fluviales) y abrupta (está en contacto con las arcillas lacustres de roca volcánica).

2.3.3 Estratigrafía de la Zona de Lomas

Resultado de las erupciones de grandes volcanes andesíticos estratificados; destacando los materiales siguientes: tobas y lahares fracturados, depósitos de arenas pumíticas y lahares de arenas azules, así como lahares poco compactados y depósitos glaciales y fluvioglaciales.

Por lo que hay que tomar en cuenta que estos materiales son vulnerables al intemperismo así como también por la acción de sismo.

3.MARCO REFERENCIAL

Los suelos arcillosos poseen la característica de la plasticidad la cual es aquella propiedad que posee un material capaz de soportar deformaciones, sin un cambio elástico, sin variación volumétrica apreciable y sin agrietarse o desmoronarse.

Todo material experimenta deformación cuando se le aplica carga. La deformación de la mayoría de los suelos aun con cargas pequeñas se desarrolla en el transcurso del tiempo, el esfuerzo aplicado, la velocidad de deformación y las propiedades del material.

Para evaluar la resistencia y deformación de los suelos se debe tomar en cuenta sus propiedades físicas y mecánicas, pues son las que rigen su comportamiento es decir tener los fundamentos para la predicción de asentamientos que se producirán en los estratos del suelo cuando estos son sometidos a incrementos de esfuerzos por la aplicación de una carga.

3.1 Conceptos básicos de las propiedades físicas del suelo

El suelo se caracteriza por ser un material variable y complejo constituido por tres fases que lo distinguen FASE sólida, FASE líquida y FASE gaseosa (Figura 3.1). Por ello que, para fines del análisis y diseño de problemas de ingeniería civil, se requiere conocer las propiedades físicas y químicas, así como el comportamiento del material, además de los ensayos que permiten conocer dichas propiedades.

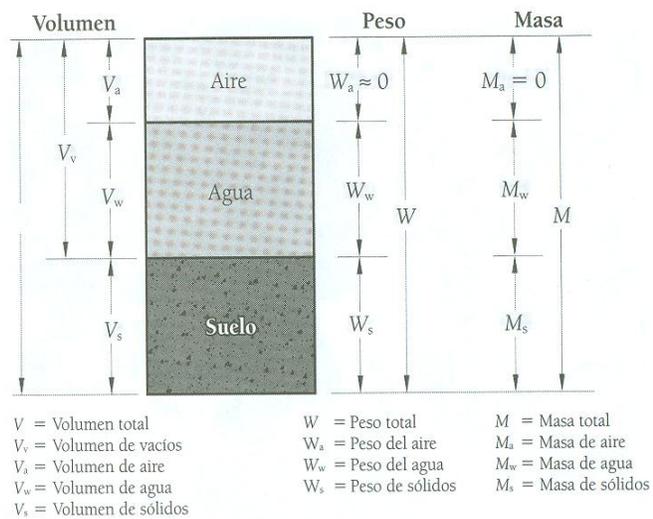


Figura 3.1 Relaciones entre fases de una muestra de un suelo (Díaz-Rodríguez, 2014)

Desde la perspectiva de la mecánica de suelo las propiedades físicas se pueden clasificar en:

- a) Propiedades Índice
- c) Propiedades Mecánicas

3.1.1 Propiedades Índice

Las propiedades índice sirven para identificar o distinguir un suelo cualitativamente, estas describen de manera sintetizada en la Tabla 3.1

Tabla 3.1 Resumen de Propiedades Índice (Díaz-Rodríguez, 2014)

| Propiedad | Descripción | Ecuación | Rango |
|-------------------------|---|------------------------------------|--|
| Relación de vacíos (e) | El volumen no ocupado por los sólidos se conoce como volumen de vacíos (aire, agua o una combinación de ambos). | $e = \frac{V_v}{V_s}$ | 0 a ∞ |
| Porosidad | Es la relación entre el volumen de vacíos y el volumen total. | $n = \frac{V_v}{V} \times 100\%$ | 0% (fase solida) 100% (espacio vacío) |
| Volumen específico (v) | | $v = 1 + e$ | |
| Grado de saturación (S) | La cantidad de agua puede expresarse como una fracción del volumen de vacíos. | $S = \frac{V_w}{V_v} \times 100\%$ | 0% (suelo seco) 100% (suelo saturado) |

| | | | |
|--------------------------------|---|------------------------------------|--------------|
| Contenido de agua (ω) | Relación entre el peso del agua y el peso de la materia sólida. (expresada en porcentaje) | $w = \frac{W_w}{W_s} \times 100\%$ | 0 a ∞ |
|--------------------------------|---|------------------------------------|--------------|

Otra definición relacionada con el contenido de agua es contenido de agua volumétrico (θ).

$$\theta = \frac{V_w}{V} \times 100\% \quad 3.1$$

De manera que la densidad de masa (ρ) definida como ($\frac{M}{V}$); se vincula con la densidad de sólidos (G_s), sintetizando dicho concepto como la relación entre el peso unitario de sólidos y el peso unitario del agua.

$$G_s = \frac{W_s}{\gamma_w} \quad 3.2$$

Mientras que el término peso unitario (γ) se define como el peso del suelo entre el volumen unitario ($\frac{W}{V}$) expresado en $\frac{kN}{m^3}$. A veces es conveniente conocer el peso unitario de un suelo el cual se denomina peso unitario (γ_d).

$$\gamma_d = \frac{W_s}{V} \quad 3.3$$

3.1.2 Propiedades Mecánicas

Tanto las propiedades índice como las propiedades mecánicas tienen cierta vinculación, de manera que las propiedades mecánicas se definen como aquellas que son indispensables para el diseño y análisis de la mecánica de suelos. (La obtención de estas es a través de muestras inalteradas o directamente en el sitio). Algunas de ellas son:

- ✚ Permeabilidad
- ✚ Compresibilidad
- ✚ Resistencia al esfuerzo cortante

3.1.2 Límites de consistencia

Albert Mauritz Atterberg, creó un método para describir la consistencia de los suelos arcillosos con contenidos de agua variable. Cuando el contenido de agua es bajo el suelo se comporta como un sólido, mientras que si el contenido de agua es alto el suelo se comporta como un líquido, es decir, dependiendo del contenido de agua que presente el suelo se clasifica en estados básicos: sólido, semisólido, plástico y líquido.

La transición de estado semisólido a plástico es el límite plástico, y de estado plástico a líquido es el límite líquido. Esos límites se conocen como Límites de Atterberg, que a continuación se describen:

Límite Líquido (LL); se define como el contenido de agua que el suelo presenta (mezcla suelo-agua) pasa a un estado líquido.

Límite Plástico (LP); contenido de humedad con el cual el suelo deja de ser plástico y se transforma en un sólido semiplástico.

Índice de Plasticidad (I_p); es la diferencia entre el límite líquido y el límite plástico de un suelo.

Límite de Contracción (W_s); el contenido de humedad con el cual cesa la contracción de secado bajo un esfuerzo constante.

Índice de liquidez; se define mediante la relación:

$$IL = \frac{W - W_p}{I_p} \quad 3.4$$

Donde:

W es el contenido de agua *in situ*.

Es por medio del índice de liquidez que se expresa la consistencia relativa de un suelo arcilloso en su estado natural.

Cuando el contenido de agua del suelo se encuentra entre el límite líquido y límite plástico, el índice de liquidez toma valores de 1 y 0. Arcillas sensitivas presentan un contenido de agua mayor que el límite líquido. ($IL > 1$)

La Figura 3.2 ilustra los conceptos de estados, límites de consistencia e índice de liquidez en los suelos.

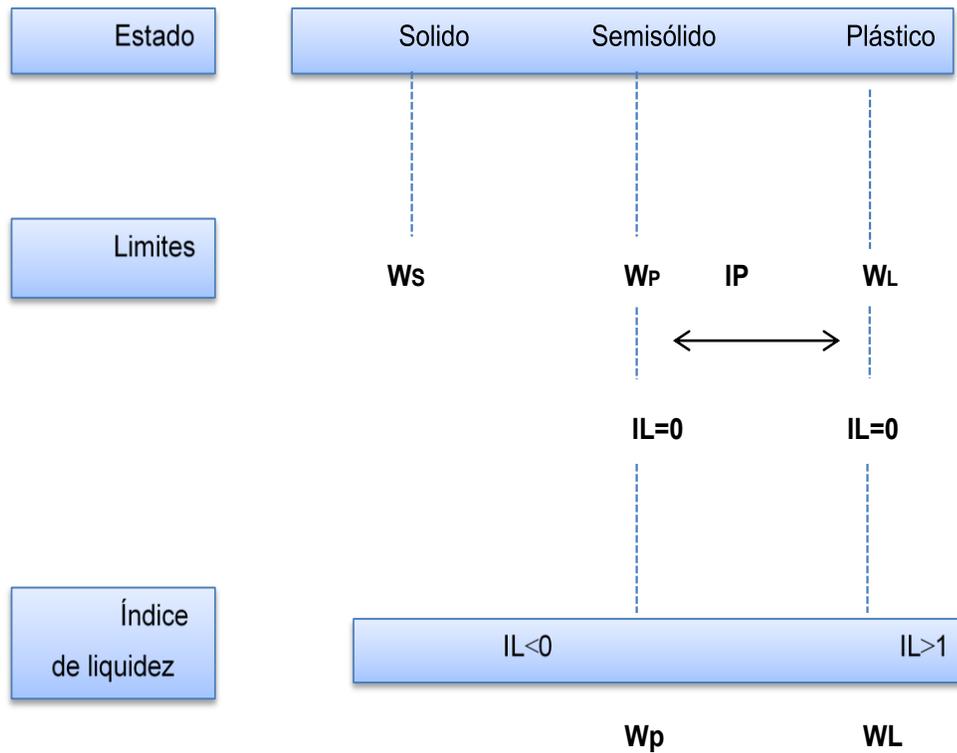


Figura 3.2 Estados, límites e índice de liquidez de un suelo.

3.2 Consolidación

Es 1981, se empieza a disertar sobre los problemas relacionados con el proceso de consolidación, Francis Collinwood ingeniero norteamericano (Dimitri, 1947) menciona lo siguiente: *“En la mayoría de los casos es suficiente alcanzar un terreno natural y sano, de calidad conocida. Pero siempre hay que perforarlo hasta una profundidad suficiente para asegurar que no está soportado por un material semifluido o compresible el cual con el tiempo puede ceder y provocar peligrosos inconvenientes”*.

Así como también Sooy Smith expone las causas de los asentamientos de algunas zonas de la ciudad de Chicago, así como también la expulsión de agua de la arcilla en el proceso de consolidación (Dimitri, 1947).

Sin embargo es hasta 1925 que Terzaghi establece la ecuación diferencial de consolidación, publicada en su *Erdbaumechanik*. El estudio teórico realizado por Terzaghi para el fenómeno de consolidación unidimensional, se basa en determinar una ecuación en el que los valores de la presión y la relación de vacíos puedan ser calculados en cualquier punto y tiempo de consolidación del espécimen en estudio.

El análisis que Terzaghi llevó a cabo para el proceso de consolidación se resume en los siguientes puntos (Franco, 2007):

- ✚ El suelo es homogéneo.
- ✚ El suelo está totalmente saturado.
- ✚ El agua y las partículas sólidas son incompresibles.
- ✚ Se cumple la Ley de Darcy para el flujo de agua.
- ✚ El coeficiente de permeabilidad k es constante.
- ✚ El suelo se encuentra lateralmente confinado y los esfuerzos normales tanto efectivos como totales son iguales para todos los puntos de cualquier

sección horizontal a través del estrato, y para cualquier etapa del proceso de consolidación.

- ✚ Se cumple el principio de esfuerzos efectivos.
- ✚ Las condiciones de frontera son constante en su potencial, lo que se traduce en un espesor constante.
- ✚ Compresión y flujo unidimensional.

Terzagui describe el fenómeno de consolidación como el proceso que incluye un decremento en el contenido de agua de un suelo saturado, sin que se presente un reemplazo del agua por aire.

3.2.1 Fundamentos de la consolidación

El fenómeno de consolidación en los suelos ha sido un tema ampliamente estudiado como se menciona en los párrafos anteriores. Dicho fenómeno se genera bajo la acción de una carga. Por lo tanto, cualquier material experimenta deformación al ser expuesta a un esfuerzo. La actuación del suelo en comparación con materiales estructurales; bajo la acción de cargas menores, presenta una deformación mayor a la de los materiales estructurales, generándose la deformación en un transcurso de tiempo

Al aumentar esfuerzo a un estrato de suelo saturado y compresible la presión de poro aumenta debido a que el agua existente en los poros absorbe parte de la carga a la que es sometido el suelo, la transferencia de carga origina cambios de volumen en la masa de suelo, semejantes al volumen de agua drenada. La presión de poro se presenta de manera inmediata en suelos permeables debido al rápido a la rapidez que el agua fluye en los poros generándose un asentamiento inmediato y una consolidación paulatina mientras que en suelos pocos permeables (suelos arcillosos) ocurre lo contrario, es decir

la disipación toma su tiempo. La deformación del suelo se presenta en dos mecanismos ocurriendo simultáneamente:

- 1) Expulsión de agua y/o de los poros del suelo.
- 2) Distorsión angular; producida por la rotación y el desplazamiento de partículas.

La **consolidación** se define de manera general; como el asentamiento del suelo dependiente del tiempo teniendo como resultado la disminución de volumen (disipación de la presión de poro), resultado del aumento por carga o esfuerzos efectivos.

De acuerdo con (Das, 1999) el asentamiento del suelo se produce por la aplicación de cargas, presentándose en tres etapas:

1. Asentamiento inmediato, por la deformación elástica del suelo ya sea seco, húmedo y saturado.
2. Asentamiento por consolidación primaria, presentándose la expulsión del agua que ocupa los espacios vacíos generándose un cambio de volumen.
3. Asentamiento por consolidación secundaria, es el resultado del ajuste plástico de la estructura del suelo este proceso se visualiza en suelos saturados cohesivos.

La carencia de un ensaye de laboratorio para predecir el asentamiento de una masa de suelo dio origen a la prueba de consolidación unidimensional (Terzagui 1925) llevada a cabo en un odómetro o consolidómetro. En dicho equipo se ensaya una probeta de suelo generándole incrementos, los datos obtenidos del ensaye se representan en una curva típica que tenga por abscisas los valores de los tiempos transcurridos, en escala logarítmica y como ordenadas las lecturas del extensómetro (deformación) en escala natural. Dichas curvas se llaman de consolidación (Figura 3.3) y se genera una para cada

incremento de carga que se realiza en el ensaye del consolidómetro. En dichas gráficas se observan 3 etapas:

Etapa 1: Compresión inicial; que es el resultado de la generación de precarga.

Etapa 2: Consolidación primaria; durante la expulsión del agua de los poros, el exceso de presión de poro es gradualmente transferido como un aumento de esfuerzo efectivo.

Etapa 3: Consolidación secundaria; se presenta después a la disipación total del exceso de presión de poro del agua, cuando se genera una deformación del espécimen. Lo que se debe al reajuste plástico de la estructura del suelo.

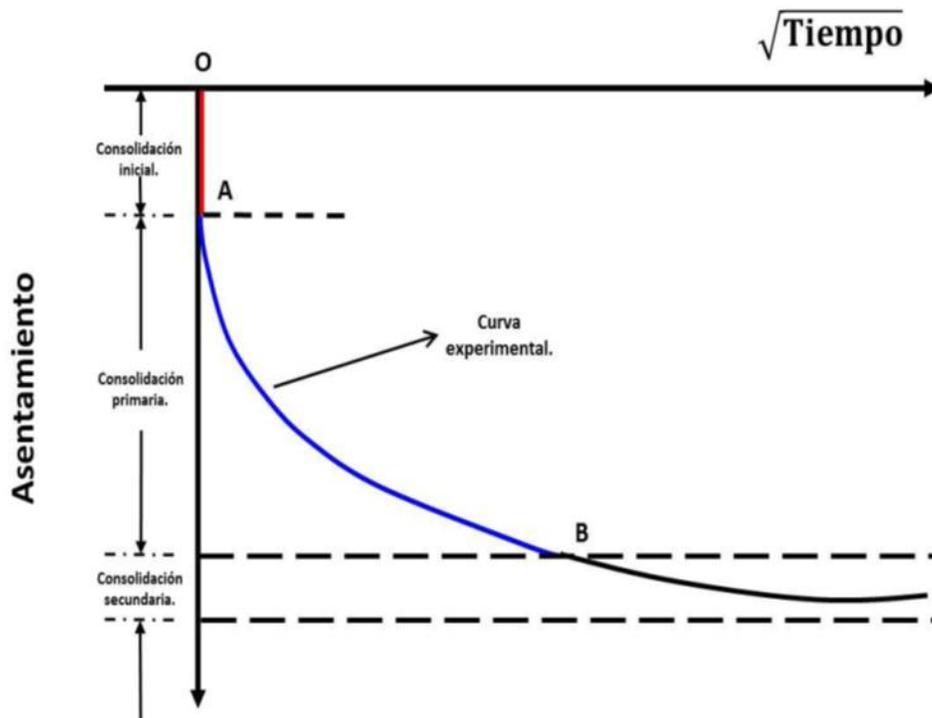


Figura 3.3 Curva de consolidación (Barnes, 2000)

Estas gráficas son básicas para la determinación de los parámetros de compresibilidad del suelo.

3.3 Compresibilidad

La **compresibilidad** se define como la propiedad de un suelo en el cual al aumentar el incremento de esfuerzos $\Delta\sigma$ tiende a disminuir el volumen. Se expresa como la relación entre el cambio de volumen Δv y la magnitud del incremento de esfuerzo aplicado $\Delta\sigma$. Esta propiedad es independiente del tiempo.

3.3.1 Parámetros de compresibilidad

A partir de las gráficas tiempo-deformación que se obtienen de los ensayos de laboratorio, se obtiene la curva relación de vacíos-esfuerzo efectivo denominada curva de compresibilidad permitiendo relacionar la variación de vacíos con el esfuerzo vertical efectivo σ'_v aplicado. Esta gráfica es fundamental para obtener parámetros de compresibilidad del suelo. En la Figura 3.4 se muestra una curva característica de compresibilidad.

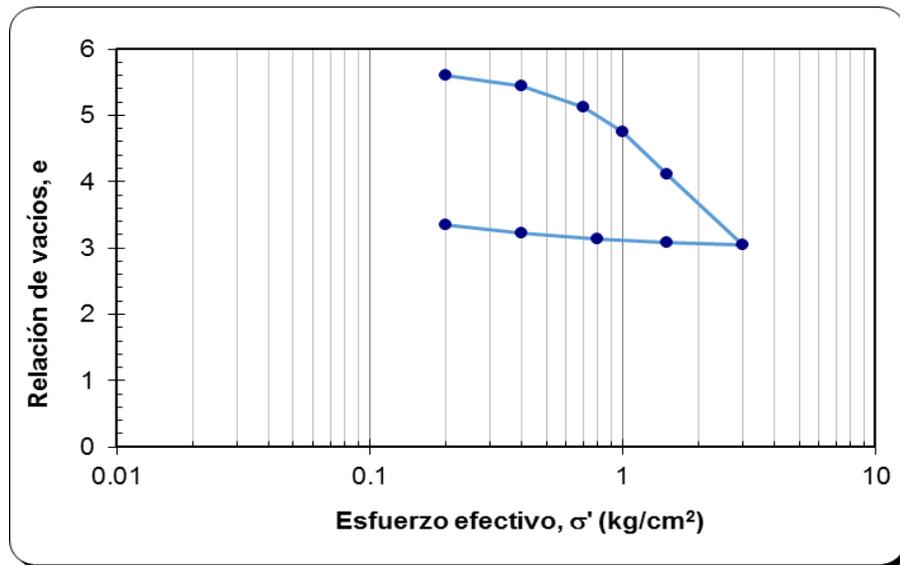


Figura 3.4 Curva de compresibilidad de un espécimen de suelo

Durante la prueba de consolidación, el espécimen en ensaye presentará un pequeño cambio en la relación de vacíos (es decir una pequeña compresión), siempre y cuando la presión total aplicada sea menor que la presión de sobrecarga efectiva máxima en el campo a la que el suelo fue sometido en un pasado. Y si la presión total aplicada al espécimen es mayor que la presión efectiva máxima en el pasado, el cambio en la relación de vacíos que surgirá será mucho mayor, por lo que la relación $e - \log \sigma'$ es lineal con una pendiente inclinada.

Con base en la historia de esfuerzos que presenta una arcilla, podemos observar en una curva de compresibilidad dos tramos con diferente comportamiento, que a continuación se describen:

1. **Preconsolidación.** De acuerdo a la Figura 3.5 se observa la curva del tramo AB (se presenta una línea con pequeña pendiente) que representa la transición entre la condición estructurada y la desestructurada; por lo que en esta etapa se define el concepto esfuerzo de preconsolidación (esfuerzo máximo que ha soportado el suelo en estudio, en toda su historia geológica). Respecto al esfuerzo de preconsolidación, se define la relación de preconsolidación (OCR) expresándose:

$$OCR = \frac{\sigma'_p}{\sigma'_v} \quad 3.5$$

Donde:

σ'_p =Esfuerzo de preconsolidación.

σ'_v =Esfuerzo vertical efectivo.

2. **Normalmente Consolidado.** Es el esfuerzo o esfuerzos efectivos en el que el suelo no ha sufrido, a los que tiene en el momento de estudio; es decir, es la presión de sobrecarga efectiva presente en el suelo. De manera gráfica se expone en la Figura 3.5 (tramo BC) como aquella línea recta que tiene como característico una pendiente grande denominada índice de compresión (**C_c**).

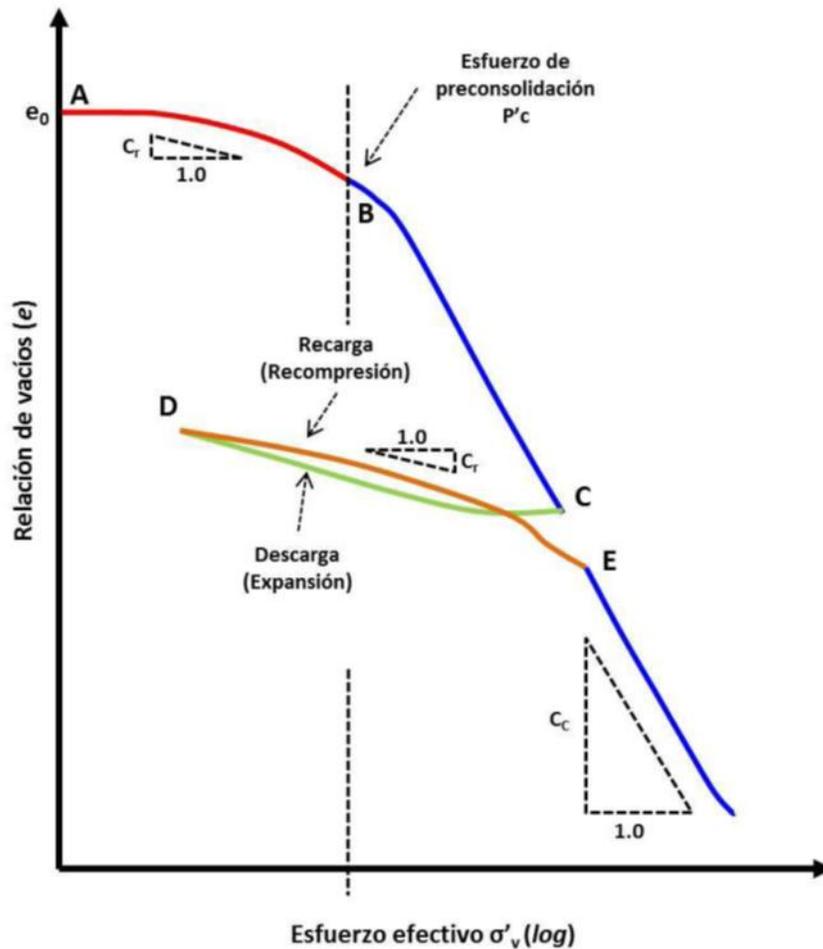


Figura 3.5 Curva de compresibilidad: Relación de vacíos vs logaritmo del esfuerzo efectivo (Al-Khafaje, 1992)

Existen diversos parámetros que se determinan a partir de las gráficas de consolidación y compresibilidad. Estos parámetros permiten predecir la velocidad y la magnitud de los asentamientos que desarrollan las estructuras cimentadas sobre suelos cohesivos. A continuación se presenta la definición y las ecuaciones utilizadas para la obtención de dichos parámetros.

- ✚ **Coefficiente de compresibilidad (a_v).** Es la variación de la relación de vacíos con respecto al esfuerzo aplicado.

$$a_v = \frac{\Delta e}{\Delta \sigma'_v} \quad 3.6$$

- ✚ **Coefficiente de compresibilidad volumétrica (m_v).** Se define como el cambio de volumen por unidad por incremento de esfuerzo efectivo. El cambio de volumen puede expresarse en términos del cambio de relación de vacíos o del espesor de volumen. Las unidades en que se expresa m_v son (cm^2/kg).

$$m_v = \frac{1}{1 + e_0} \frac{e_0 - e_1}{\sigma'_1 - \sigma'_0} \quad 3.7$$

$$m_v = \frac{a_v}{1 + e_0} \quad 3.8$$

- ✚ **Coeficiente de consolidación (c_v).** El coeficiente de consolidación c_v indica la rapidez con la que se disipa la presión de poro una vez aplicado el incremento de carga. (Flores Castrellón, 2009).

La determinación del c_v , para un incremento de carga dado sobre una muestra de suelo, se lleva a cabo a partir de pruebas de consolidación unidimensional de laboratorio; existen dos métodos gráficos comúnmente usados para su determinación. Uno de ellos es el método del logaritmo del tiempo propuesto por Casagrande y Fadum (1940) y el otro es el método de la raíz cuadrada del tiempo sugerido por Taylor (1942). (Das, 1999).

Este coeficiente disminuye conforme el límite líquido aumenta. Además depende de la permeabilidad k y de la compresibilidad volumétrica del suelo.

Para el cálculo del coeficiente de consolidación en cada incremento de carga se utiliza la siguiente expresión:

$$C_v \frac{T \cdot H^2}{t} \quad 3.9$$

Donde:

C_v = Coeficiente de consolidación.

T =Factor cuyo valor es 0.197 para el 50% de la consolidación primaria y 0.848 para el 90%.

H =Longitud del máximo camino de drenaje durante un incremento de carga dado. Si la muestra es drenada doblemente, el valor de H será la mitad de la altura del espesor del estrato.

t =Tiempo para el correspondiente factor de tiempo, obtenido de la curva de consolidación.

- ✚ **Índice de compresión (C_c)**. Expone la variación del índice de vacíos con respecto al logaritmo de los esfuerzos aplicados, para su cálculo se utiliza la siguiente ecuación:

$$C_c = \frac{\Delta_e}{\log \frac{\sigma_{0+1}}{\sigma_0}} = \frac{e_0 - e_{0+1}}{\log \frac{e_{0+1}}{e_0}} \quad 3.10$$

Donde:

e_0 =Relación de vacíos para un estado determinado.

σ_0 =Esfuerzo inicial antes de aplicar el incremento.

- ✚ **Índice de descarga (C_s)**. Es apreciable menor magnitud que el índice de compresión, y generalmente se determina por pruebas de laboratorio (Das Braja, 2001) citado por (Lizeth, 2013). En la mayoría de los casos se observa que:

$$C_s \approx \frac{1}{5} \text{ a } \frac{1}{10} C_c \quad 3.11$$

Este índice de expansión se define a través de la rama de descarga con la siguiente ecuación:

$$C_s = \frac{\Delta e}{\log \frac{\sigma_{0+1}}{\sigma_0}} = \frac{e_0 - e_{0+1}}{\log \frac{e_{0+1}}{e_0}} \quad 3.12$$

✚ λ , κ . Parámetros de deformabilidad del suelo que pueden obtenerse mediante una prueba de odómetro o de resultados de pruebas triaxiales bajo la teoría del estado crítico.

Cuando los resultados de ensayos de odómetro se grafican con el eje X en escala logarítmica (\log_{10}), la respuesta en carga y descarga se describe usando el índice de compresibilidad C_c y de descarga C_s , (Figura 3.6) tal que la ecuación de compresión es:

$$v = v_c - C_c \log_{10} \sigma_v \quad 3.13$$

La ecuación de descarga es

$$v = v_s - C_s \log_{10} \sigma_v \quad 3.14$$

Donde v_c y v_s son las intersecciones con $\sigma_v = 1$

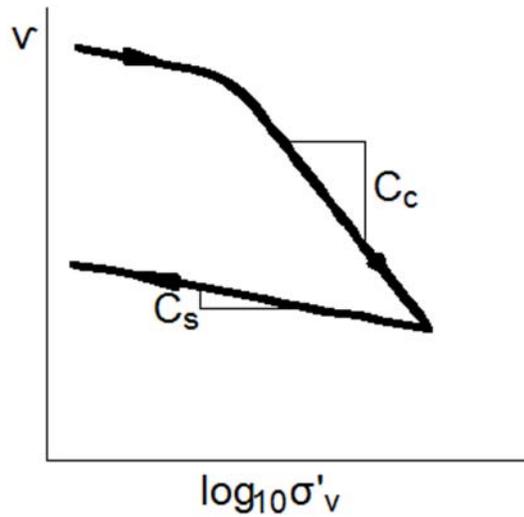


Figura 3.6 Índice de compresibilidad C_c y de descarga C_s

Mientras que para la compresión isotrópica del suelo la ecuación para la línea de consolidación normal (NCL, siglas en inglés Normal Consolidation Line) en la gráfica de compresión con escala logarítmica natural es:

$$v = v_\lambda - \lambda \ln p' \quad 3.15$$

Y la ecuación para la línea de descarga es:

$$v = v_\kappa \kappa \ln p' \quad 3.16$$

Donde λ y κ son las pendientes de las líneas de v_λ , v_κ son las intersecciones de estas líneas con la recta $p'=1$ (presión de referencia igual a la unidad), Figura 3.7.

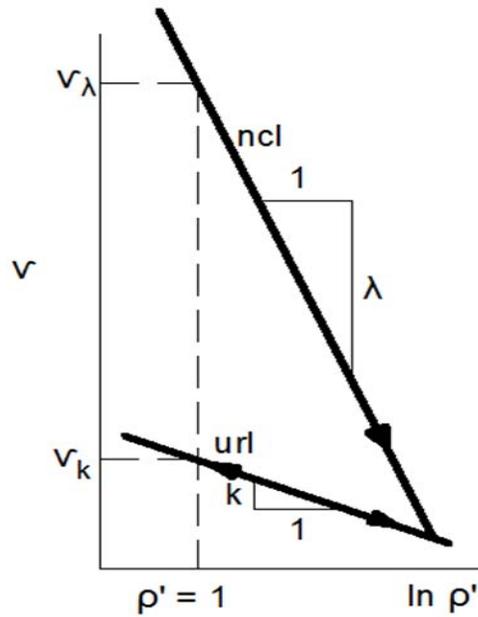


Figura 3.7 Línea de consolidación del suelo ncl y de descarga url

Se puede suponer que las líneas de consolidación normal y de expansión para la consolidación isotrópica y unidimensional son paralelas y que tienen las mismas pendientes (λ y κ). La principal diferencia entre las ecuaciones 3.13 y 3.14 y las ecuaciones 3.15 y 3.16 es el uso de \log_{10} y \ln , por lo tanto las pendientes pueden relacionarse:

$$C_c = \lambda \ln 10 \approx 2.3\lambda \quad 3.17$$

$$C_s = \kappa \ln 10 \approx 2.3\kappa \quad 3.18$$

✚ **Índice de compresión secundaria (C_α)**. Representa el cambio de relación de vacíos con el tiempo manteniendo constante el esfuerzo efectivo (Figura 3.8).

Por lo tanto, el índice de compresión secundaria se define como:

$$C\alpha = \frac{\Delta_e}{\log t_2 - \log t_1} = \frac{\Delta_e}{\log \frac{t_2}{t_1}} \quad 3.19$$

Donde:

$C\alpha$ =Índice de compresión.

Δ_e =Cambio en la relación de vacíos.

t_1, t_2 =Tiempo.

✚ **Coefficiente de permeabilidad (K).** En suelos cohesivos se calcula a partir de los resultados del ensayo de consolidación con la fórmula 3.20:

$$k = C_V \cdot m_v \cdot \gamma_w \quad 3.20$$

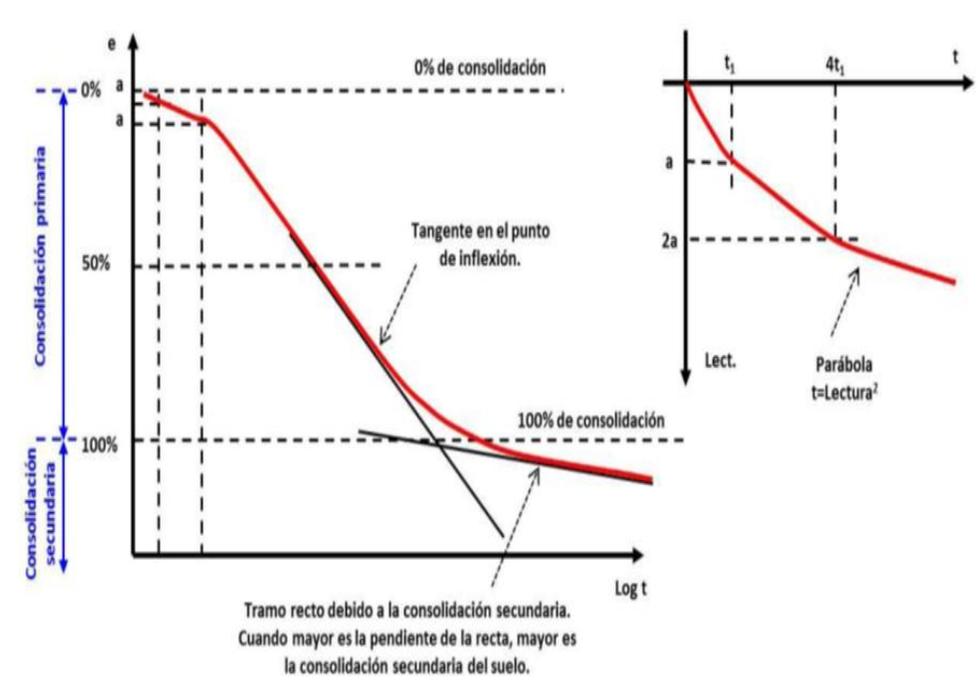


Figura 3.8 Determinación del tiempo de consolidación y el coeficiente de consolidación secundaria. (Leoni J., 2008)

3.4 Correlaciones entre parámetros de compresibilidad y propiedades índice.

El empleo de correlaciones empíricas para expresar a las características de compresibilidad en términos de las propiedades índice del suelo permite estimar el asentamiento que tendrá lugar en un sitio determinado y el tiempo requerido para que el estrato se comprima.

Se han reportado estudios relacionando una propiedad derivada de otra propiedad física a través de procedimientos estadísticos o por otros métodos. En los siguientes párrafos se expondrán investigaciones que se han realizado con base en los parámetros de compresibilidad y su relación.

Skempton (1944), aportó una ecuación que relaciona el índice de compresión con el límite líquido de suelos:

$$C_c = 0.007 LL - 10\% \quad 3.21$$

Terzaghi y Peck (1967) sugieren la siguiente expresión para arcillas normalmente consolidadas de media o baja sensibilidad:

$$C_c = 0.009 LL - 10\% \quad 3.22$$

En los trabajos de Skempton y Northey (1952) y Roscoe *et al.* (1958), Wroth y Wood (1978) se usan los fundamentos de la mecánica de suelos del estado crítico para

deducir una relación entre el índice de compresión y el índice de plasticidad (PI) de arcillas remoldeadas:

$$C_c = \frac{1}{2} PI \cdot G_s \quad 3.23$$

Donde G_s es la densidad de los sólidos del suelo.

Nishida (1956) desarrolló, con base a curvas de compresibilidad (esfuerzo-deformación) y de su pendiente, la siguiente ecuación:

$$C_c = 0.54 e_0 - 0.35 \quad 3.24$$

Nagaraj y Srinivasa Murthy (1983) ampliaron la ecuación de Skempton utilizando la relación de vacíos en el límite líquido para dar una ecuación generalizada de compresibilidad, en un suelo normalmente consolidado (saturado):

$$\frac{e}{e_L} = a - b \log_{10} \sigma'_v \quad 3.25$$

Donde a y b son constantes que varían ligeramente con las condiciones de prueba y el número de datos considerado, σ'_v es la presión efectiva de consolidación, y e es la proporción de huecos del suelo a una presión efectiva (σ'_v) de consolidación.

En la Tabla 3.2 realizada por Azzouz et al (1976) se presenta un resumen de una serie de correlaciones.

Tabla 3.2 Correlaciones publicadas para los índices de compresión (AFTER AZZOUZ ET AL 1976) citado por (Carter. et al, 1991)

| Ecuación | Aplicabilidad |
|--|--|
| $C_c = 0.007 (LL - 7)$ | Arcillas remoldeadas |
| $C_{c\varepsilon} = 0.208e_0 + 0.0083$ | Arcillas de Chicago |
| $C_c = 17.66 \times 10^{-5} w_n^2 + 5.93 \times 10^{-3} w_n - 1.35 \times 10^{-1}$ | Arcillas de Chicago |
| $C_c = 1.15 e_0 - 0.35$ | Todas las arcillas |
| $C_c = 0.30 e_0 - 0.27$ | Suelo cohesivo, limos, arcilla limosa, arcilla |
| $C_c = 1.15 \times 10^{-2} w_n$ | Turbas y limo orgánico, arcilla |
| $C_c = 0.75 e_0 - 0.50$ | Suelos de muy baja plasticidad |
| $C_{c\varepsilon} = 0.156e_0 + 0.0107$ | Todas las Arcillas |
| $C_c = 0.01w_n$ | Arcillas de Chicago |

A partir de ensayos realizados por Hough (1957) en suelo cohesivo, limo, arcilla, arcilla limosa y suelo inorgánico. Obtuvo la relación entre el índice de compresión (C_c) con la relación de vacíos (e_0):

$$C_c = 0.4049 e_0 - 0.3216 \quad 3.26$$

Así como también la relación entre el índice de compresión (C_c) y el contenido de agua (W_n):

$$C_c = 0.0102 W_n - 9.15 \quad 3.27$$

Cozzolino (1961) pudo encontrar una relación estadística entre C_c y e o W_L . Concluyendo que no existía una relación estadística significativa en ambas combinaciones. Además de aplicar métodos de regresión múltiple descifrando que C_c se puede expresar en función de ambas variables.

Al realizar estudios en la Facultad de Minas Colombia (Maturana Franco & et al, 1994) se llevó a cabo una comparación de los valores de la ecuación 3.22 (postulada por Terzagui y Peck) y los valores que se generaron en los suelos del Valle de Aburra. El resultado de la comparación de valores conllevó a que la ecuación 3.22 se propusiera de la siguiente manera:

$$C_c = M w_L - 10\% \quad 3.28$$

Donde M es un coeficiente a determinar, conociendo los valores de C_c y W_L . Para los resultados de las pruebas que se revisaron, M tuvo un valor promedio igual a 0.0032 (muestra inalterada de arcilla normalmente consolidada), Figura 3.9.

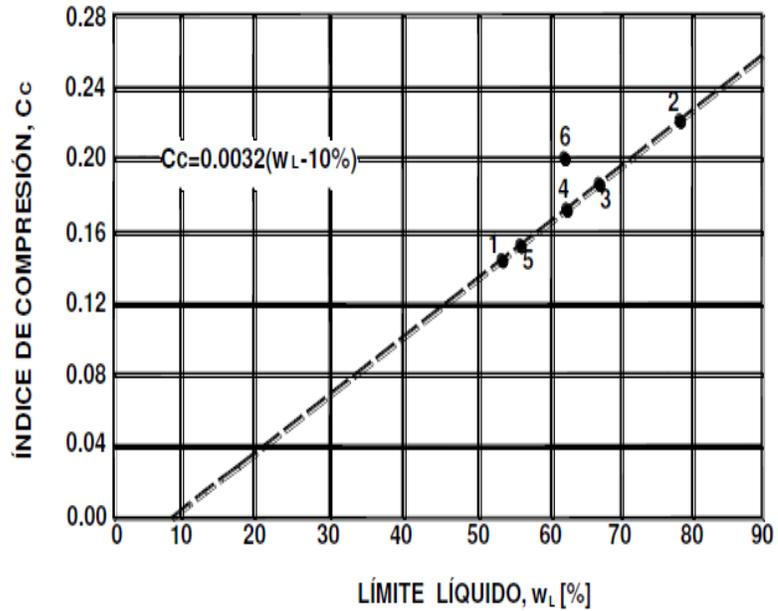


Figura 3.9 Relación entre el índice de compresión y el límite líquido para arcillas normalmente consolidadas de Medellín (Maturana Franco. et al, 1994)

Para el caso de algunas arcillas egipcias se llevó a cabo una evaluación estadística para correlacionar las características de compresibilidad con el contenido de agua natural y la relación de vacíos *in-situ* (Abdrabbo, 1990). En la evaluación estadística se generó la siguiente correlación:

$$C_c = 0.0063 w_L - 10 \quad 10\% < w_L < 110\% \quad 3.29$$

Por otro lado en la Figura 3.10a se exponen correlaciones entre el índice de compresión C_c con el límite líquido (propuesto por Terzaghi y Peck (1967)) y el índice de compresión (propuesto por Bowles (1979)) así como una comparación entre las propiedades de las arcillas egipcias y de otros países.

Mientras que en la Figura 3.10b se propone la siguiente ecuación para la correlación del índice de compresión C_c con el contenido de agua W_n :

$$C_c = 0.0066\omega_n \quad 20\% < \omega_n < 140\% \quad 3.30$$

La Figura 3.10c muestra que mientras más aumente el contenido de agua de las arcillas, a su vez aumenta el valor $\frac{C_c}{1+e_0}$. La figura nos permite indicar que los valores de $\frac{C_c}{1+e_0}$ de arcillas egipcias varían entre 0.05 y 0.4 con 80% de estos valores se encuentran 0.05 y 0.2. La correlación que se realizó entre $\frac{C_c}{1+e_0}$ y el contenido de agua se expresa mediante la siguiente ecuación:

$$\frac{C_c}{1+e_0} = 0.095 + 0.00114\omega_n \quad 20\% < \omega_n < 120\% \quad 3.31$$

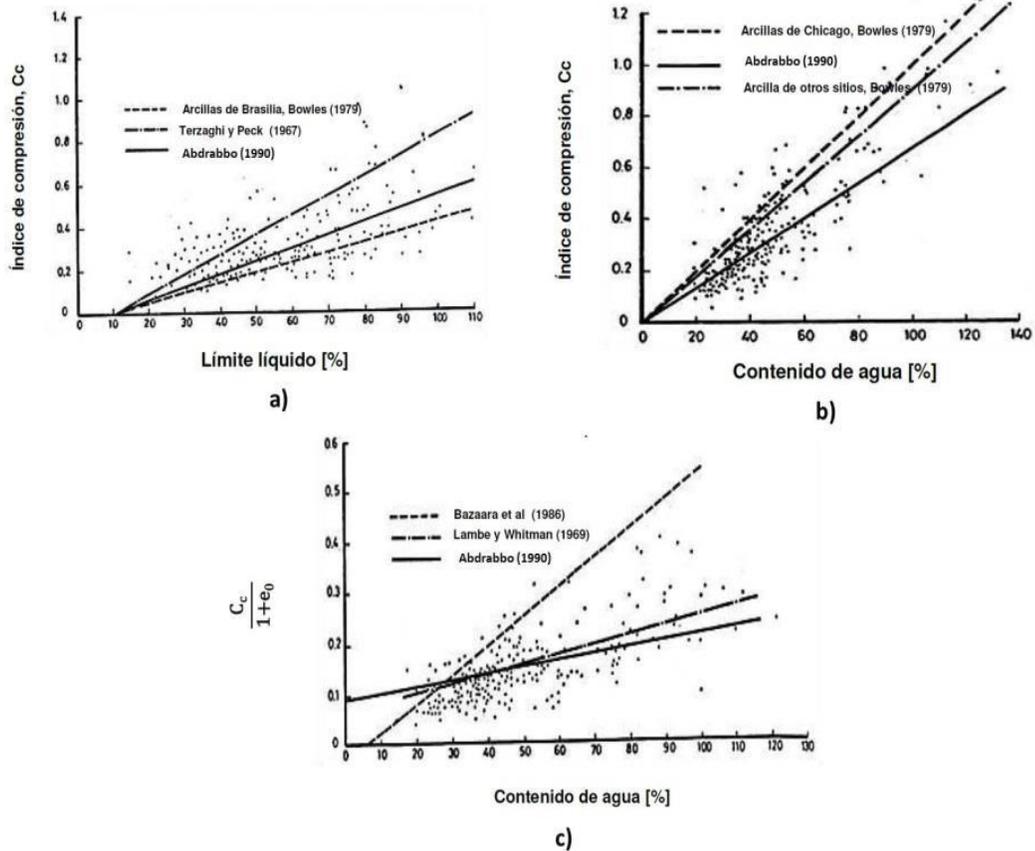


Figura 3.10 a) índice de compresión vs límite líquido; b) índice de compresión vs contenido de agua; c) $\frac{C_c}{1+e_0}$ vs contenido de agua.

Las arcillas del sur de Saskatchewan fueron objetivo de estudio para la evaluación de las cargas y variaciones litológicas de los depósitos debido a las glaciaciones (E. Karl, 1993). En la Tabla 3.3 se definen las propiedades de los suelos el cual se determinaron las características físicas a través de una examinación visual de muestras tomadas de los núcleos. Se seleccionaron 10 sitios en los cuales se extrajeron las muestras para la realización de las pruebas. Por lo tanto los resultados de los coeficientes de consolidación c_v variaron entre 0.42 y 2.31 $m^2/año$ disminuyendo solamente en suelos altamente plásticos.

Tabla 3.3 Propiedades Índice (Karl. et al., 1993)

| Formacion | Sitio | Wn (%) | Wp (%) | WL (%) | Pl (%) | Cc | | Cs | No. Muestras |
|----------------------------|---------------------|--------|--------|--------|--------|------|------|------|--------------|
| | | | | | | 1 | 2 | | |
| Battleford | | | | | | | | | |
| Unidad superior de arcilla | Goodale Farm | 20.1 | 13.9 | 37.2 | 23.3 | 0.18 | 0.22 | 0.06 | 10 |
| | Sutherland overpass | 17.5 | 12.1 | 21.8 | 9.7 | 0.12 | 0.12 | 0.03 | 3 |
| Unidad inferior | Delisle | 14.3 | 13.4 | 28.8 | 15.4 | | | | 6 |
| | Goodale Farm | 14.4 | 11.6 | 28.3 | 16.7 | 0.12 | 0.13 | 0.03 | 4 |
| | GarsonRiver | 12.4 | 11.8 | 22.6 | 10.8 | 0.14 | 0.16 | 0.05 | 5 |
| | Sutherland overpass | 10.8 | 11.7 | 26.2 | 14.5 | 0.12 | 0.15 | 0.03 | 2 |
| Floral | Alameda | 16.3 | 15.6 | 35.5 | 19.9 | 0.19 | 0.23 | 0.07 | 12 |
| | WellSchvally | 13.2 | 12.3 | 35.2 | 22.9 | 0.19 | 0.22 | 0.05 | 4 |
| | Delisle | 16.2 | 15.9 | 39.8 | 23.9 | 0.2 | 0.22 | 0.09 | 10 |
| | Goodale Farm | 11 | 12.5 | 28 | 15.5 | 0.13 | 0.17 | 0.05 | 7 |
| | Saskatoon | 12.1 | 11.8 | 29.4 | 17.6 | 0.15 | 0.17 | 0.04 | 9 |
| | Beatty | 9.7 | 12.6 | 25.9 | 13.3 | 0.16 | 0.21 | 0.04 | 5 |
| Warman | Saskatoon | 18.4 | 15.6 | 43.8 | 28.2 | 0.26 | 0.29 | 0.09 | 7 |
| | Warman | 22.9 | 17.1 | 51.9 | 34.8 | 0.26 | 0.28 | 0.09 | 7 |
| Dundurn | Beatty | 15.3 | 16 | 39.5 | 23.5 | 0.2 | 0.27 | 0.08 | 7 |
| | Sutherland overpass | 14.7 | 15.7 | 41.3 | 25.6 | 0.2 | 0.25 | 0.07 | 7 |
| Mennon | Sutherland overpass | 14.1 | 13.4 | 35.1 | 21.7 | 0.21 | 0.26 | 0.08 | 7 |

A partir de ensayos en probetas de suelo con un diámetro de 75 mm Yin (1999) citado por (Lizeth, 2013) determinó el índice de compresión, el índice de recompresión, el coeficiente de consolidación secundaria, y el coeficiente de consolidación. Por lo que estableció correlaciones con el índice de plasticidad con dichos parámetros (Figura 3.11), las ecuaciones resultantes se exponen a continuación:

$$C_c = 0.0138Pl + 0.00732 \quad 3.32$$

$$C_r = 0.00219Pl - 0.0104 \quad 3.33$$

$$C_\alpha = 0.0003691Pl - 0.00055 \quad 3.34$$

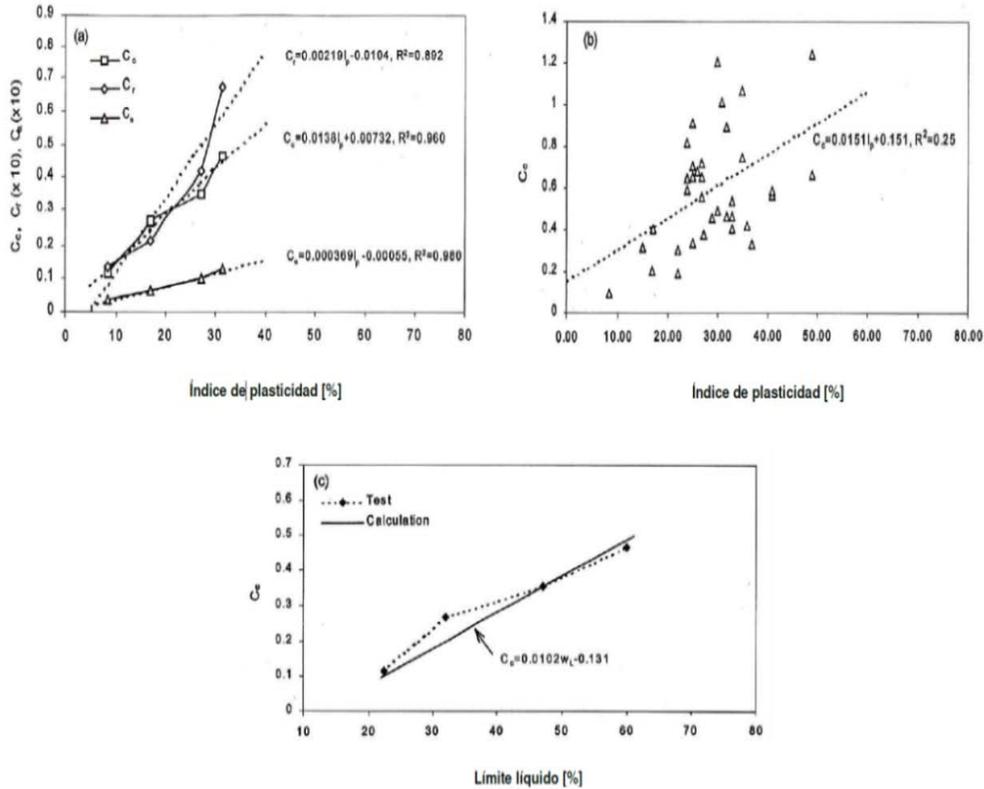


Figura 3.11: a) Datos medidos y líneas ajustadas del índice de plasticidad vs. C_c , C_r y C_α del sitio 1; b) Valores Medidos y línea ajustada del índice de plasticidad vs. C_c del sitio 2; c) Comparación de datos medidos y línea calculada del límite líquido vs. C_c del sitio

En la figura 3.11c se ilustra la comparación entre valores calculados y los datos medidos utilizando la ecuación 3.35

$$C_c = 0.01102\omega_L - 0.131 \quad 3.35$$

El índice de compresión, el índice de recompresión y el coeficiente de consolidación incrementa conforme aumenta el límite líquido. Por lo tanto se confirma que los valores obtenidos se aproximan a los medidos.

Otras correlaciones posteriores se presentan en la Tabla 3.4 y en la Tabla 3.5 exponiendo a diferentes investigadores utilizando varios parámetros, incluyendo límite líquido, contenido de humedad natural, inicial en relación de vacíos *in situ*, unidad de peso seco, el índice de plasticidad, y la relación de vacíos en el límite líquido.

La disponibilidad de tantas ecuaciones sugiere que ninguno es completamente satisfactorio para generalizar y correlacionar con el índice de compresibilidad u otras propiedades.

Tabla 3.4 Ecuaciones del índice de compresión (Sridharan, 2000)

| Ecuación | Aplicabilidad | Referencia |
|----------------------------------|--------------------------------------|-----------------------|
| $C_c = 0.007(w_L - 10)$ | Arcillas remoldeadas | Skempton, 1994 |
| $C_c = 0.0046(w_L - 9)$ | Arcillas de Brasil | Cozzolino, 1961 |
| $C_c = 0.009(w_L - 10)$ | Arcillas normalmente consolidadas. | Terzaghi y Peck, 1967 |
| $C_c = 0.006(w_L - 9)$ | Arcillas con $\omega_L < 100\%$ | Azzouz et al., 1976 |
| $C_{c10} = 0.009(w_L - 8)$ | Arcillas de la Bahía de Osaka | Tsuchida, 1991 |
| $C_{c10} = 0.009w_L$ | Arcilla de la Bahía de Tokio | Tsuchida, 1991 |
| $C_c = 0.01(w_n - 5)$ | Todas las arcillas | Azzouz et al., 1976 |
| $C_c = 0.01(w_n)$ | Todas las arcillas | Koppula, 1981 |
| $C_c = 0.01(w_n - 7.549)$ | Todas las arcillas | Herrero, 1983 |
| $C_c = 0.0115w_n$ | Arcillas y limos orgánicos | Bowles, 1989 |
| $C_c = 1.15(e - e_0)$ | Todas las arcillas | Nishida, 1956 |
| $C_c = 0.29(e_0 - 0.27)$ | Suelos inorgánicos | Hough, 1957 |
| $C_c = 0.35(e_0 - 0.5)$ | Suelos orgánicos | Hough, 1957 |
| $C_c = 0.246 + 0.43(e_0 - 0.25)$ | Arcillas Motley de San Pablo, Brasil | Cozzolino, 1961 |
| $C_c = 1.21 + 1.055(e_0 - 1.87)$ | Tierras bajas de Santos, Brasil | Cozzolino, 1961 |
| $C_c = 0.75(e_0 - 0.50)$ | Suelos con plasticidad | Sowers, 1970 |

Continuación. Tabla 3.4 Ecuaciones del índice de compresión (Sridharan, 2000)

| | | |
|--|---|----------------------------------|
| $C_c = 0.208e_0 + 0.0083$ | Arcillas de Chicago | Bowles 1989 |
| $C_c = 0.156e_0 + 0.0107$ | Todas las arcillas | Bowles, 1989 |
| $C_c = 0.2e^{1.6}$ | Suelos recientemente sedimentados naturalmente | Shorten, 1995 |
| $C_c = 0.5 \frac{\gamma_w}{\gamma_d}^{2.4}$ | Todo tipo de suelos | Herrero, 1980 |
| $C_c = 0.185 G_s \gamma_w \gamma_d^{-2} - 0.144$ | Todo tipo de suelos | Herrero, 1983 |
| $C_c = 0.5PIG_s$ | Todas las arcillas remoldeadas y normalmente consolidadas | Wroth y Wood, 1978 |
| $C_c = 0.329 + 0.027 w - w_p + 0.0133l_p + ACT^{-1}$ | Todas las arcillas remoldeadas y normalmente consolidadas | Carrier, 1985 |
| $C_c = 0.2237e_L$ | Todas las arcillas remoldeadas y normalmente consolidadas | Nagaraj y Srinivasa Murthy, 1983 |
| $C_c = 0.2343e_L$ | Todas las arcillas remoldeadas y normalmente consolidadas | Nagaraj y Srinivasa Murthy, 1986 |
| $C_c = 0.274e_L$ | Arcillas y arenas mezcladas | Nagaraj <i>et al.</i> , 1995 |

Nota: ACT, actividad; C_c , índice de compresión; C_{c10} , índice de compresión con presión de consolidación, $p = 10 \text{ kg/cm}^2$; e , relación de vacíos a una presión específica; e_L , relación de vacíos respecto al límite líquido; e_0 , relación de vacíos inicial o en sitio; G_s , densidad de sólidos; w_L , límite líquido; w_n , contenido de agua natural de un suelo considerado remoldeado; w_p , límite plástico; PI, índice de plasticidad.

Tabla 3.5 Relaciones empíricas (Budhu, 2010)

| Relaciones empíricas | Referencia |
|-------------------------------------|------------------------|
| $C_c = 0.40(e_0 - 25)$ | Azzouz et al., 1976 |
| $C_c = 0.37(e_0 + 0.003LL - 0.34)$ | Azzouz et al., 1976 |
| $C_c = 0.00234LL G_s$ | Nagaraj y Murthy, 1986 |
| $C_r = 0.15(e_0 + 0.007)$ | Azzouz et al., 1976 |
| $C_r = 0.003(w + 7)$ | Azzouz et al., 1976 |
| $C_r = 0.126(e_0 + 0.003LL - 0.06)$ | Azzouz et al., 1976 |
| $C_r = 0.000463 LL G_s$ | Nagaraj y Murthy, 1985 |
| $C_c = 1.35PI$ | Schofield y Wroth 1968 |

Nota: w , contenido natural de agua (%); LL , límite líquido (%); e_0 relación de vacíos y PI índice de plasticidad.

En los anteriores párrafos se han expuesto diferentes correlaciones empíricas las cuales se han desarrollado en diferentes partes del mundo, presentadas por distintos autores. Estas correlaciones simplifican el cálculo de los asentamientos y el tiempo para llevar a cabo esta actividad. Sin embargo, todas estas correlaciones sólo son aproximaciones que no deben de ninguna manera emplearse en los cálculos o análisis definitivos, a menos de que se carezca de cualquier otro dato experimental.

3.5 Muestreo

El interés de saber más sobre el fenómeno de consolidación en los suelos a permitido que se desarrolle la creación de diferentes instrumentos donde se lleven a cabo pruebas de consolidación en suelos compresibles.

De manera resumida en los siguientes párrafos se expondrá las características de la celda Rowe la cual es el equipo en que se realizaron las pruebas que se analizan en el presente trabajo.

Este instrumento permite un análisis de las propiedades y el comportamiento de los suelos compresibles. Permitiendo aplicar distintas condiciones de drenaje y cargas a una muestra de suelo que se encuentra confinada por un anillo. El comportamiento que presenta el suelo al ser cargado se distingue cuando se genera la expulsión de agua de forma controlada originando un cambio de volumen.

La celda permite la realización de pruebas de consolidación de varios tipos (diferenciando la carga, el tipo de muestra y las condiciones de drenaje). Por lo que las muestras que se pueden considerar para dicho equipo son las siguientes:

- a) Muestras inalteradas.
- b) Muestras remoldeadas, preconsolidadas en la celda a partir del remoldeo de la muestra.
- c) Muestras compactadas o remoldeadas en otro sitio y transportadas a la celda como material inalterado.
- d) Muestras compactadas en el cuerpo de la celda por compresión estática o compresión dinámica.

Los factores más relevantes en el desarrollo de los diferentes ensayos en la celda Rowe son: control del drenaje, la presión de poro inicial y la presión que podía ser alcanzada posteriormente.

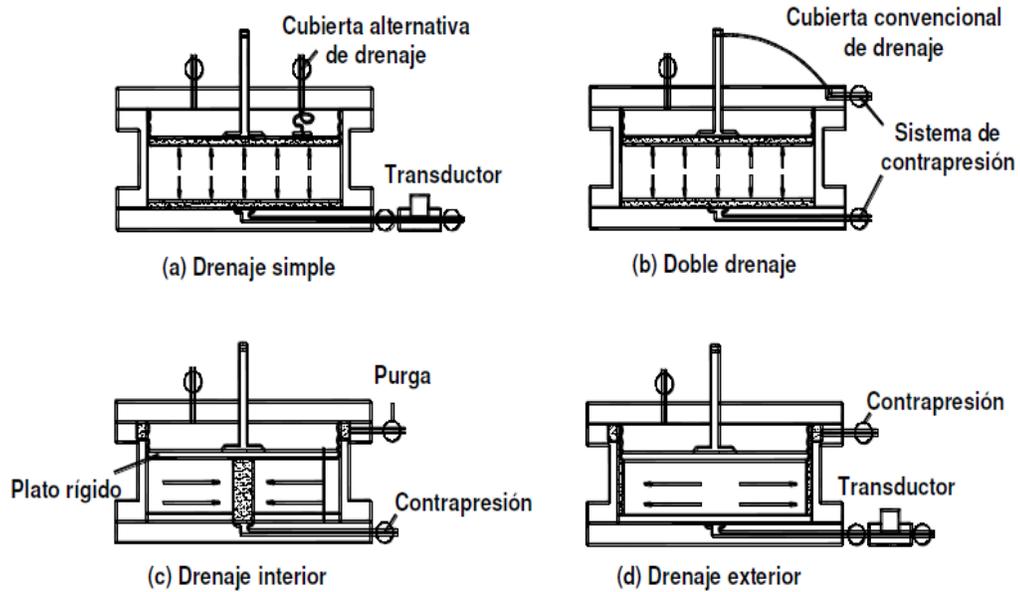


Figura 3.12 Drenaje y medición de presión de poro, de acuerdo con los cuatro tipos de pruebas que pueden desarrollarse (Rowe, 1966).

4. MARCO METODOLÓGICO

Para elaborar este trabajo, se considera como base los resultados de ensayos de celda Rowe de 16 muestras inalteradas, de las cuales 12 muestras se clasifican en este trabajo como **ASA LAGO** (Aeropuertos y Servicios Auxiliares-Lago) mientras que las cuatro restantes se clasifican como **T2** (Terminal 2) las cuales provienen de la zona del ex-Lago de Texcoco. Esta información fue proporcionada por el Dr. Osvaldo Flores Castrellón responsable del laboratorio de mecánica de suelos del Instituto de Ingeniería (II-UNAM). Además, con el objetivo de enriquecer la base de datos, se incluyeron los resultados de ensayos de consolidación odométrica realizados por diversos investigadores previamente, citado por (Acevedo Valle, Determinación experimental del índice de compresión en las arcillas del Valle de México y la relación que guarda con las propiedades índice., 2014). Cabe mencionar, que todo el trabajo experimental se realizó en el laboratorio de mecánica de suelos del Instituto de Ingeniería de la UNAM.

Una vez actualizada la base de datos, se establecen una serie de correlaciones estadísticas con el parámetro lambda (λ), que caracteriza la deformabilidad del suelo y las propiedades índice de las arcillas del Valle de México.

4.1 Información recopilada

El tener conocimiento de las propiedades del subsuelo es de suma importancia en la ingeniería geotécnica ya que así se podrá interpretar el comportamiento del suelo. De manera resumida se destacan las características de las propiedades índice de las muestras ASA LAGO y T2: (véase **Anexo A. Tabla A1 y Tabla A2**)

- **Contenido de agua.** Los valores de los suelos analizados están en un rango entre 100 - 360%.
- **Límites de consistencia.** Los valores obtenidos del límite líquido (W_L) varían de 165% a 340% y en el límite plástico (W_p) varían de 44% a 160%.
- **Relación de vacíos.** Los resultados de los ensayos analizados oscilaron entre 3 y 10.
- **Densidad de sólidos.** Los valores de los resultados de los ensayos analizados están comprendidos entre 2.4 y 3.4.

Para el Valle de México, el contenido de agua es uno de los indicadores más importantes de la arcilla, cuyos valores en la formación arcillosa superior oscilan entre 150% y 500%, mientras que en la inferior se presenta entre 100% y 200%; la relación de vacíos los valores se encuentran en un rango de 4 y 12.

4.2 Procesamiento de información

4.2.1 Obtención del parámetro de deformabilidad (λ)

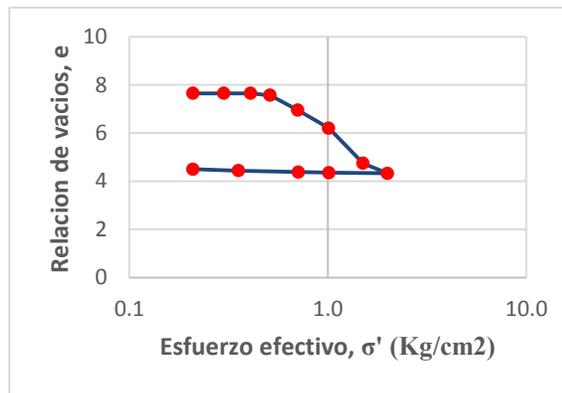


Figura 4.1 Curva de compresibilidad: $\log \sigma'$ vs e.

Los resultados de las pruebas de consolidación unidimensional se construyen usualmente graficando el logaritmo base diez del esfuerzo ($\log \sigma'$) en el eje de las abscisas y la relación de vacíos (e_0) en el eje de las ordenadas (Figura 4.1). Sin embargo para el tema en estudio se sugiere que la curva de compresibilidad se grafique en escala $\ln \sigma'$ vs volumen específico (V).

Como se menciona en el apartado 3.3.1, el parámetro lambda (λ) es la pendiente de la rama virgen de la curva de compresibilidad del suelo y representa la capacidad del suelo para deformarse, en modelos de comportamiento esfuerzo-deformación-presión de poro como los que se incluyen en las utilerías de los programas de elemento finito como son Plaxis y en programas de diferencias finitas como FLAC, mismos que se usan en forma cada vez más extendida en las oficinas de cálculo y consultoría geotécnica de nuestro país.

Para obtener los valores de λ de las muestras ASA LAGO y T2 (Tabla 4.1) se analizan las curvas de compresibilidad presentadas en escala $\ln \sigma'$ vs volumen específico (V). Considerando dos puntos en el tramo que representen la pendiente de dicha recta (Figura 4.2).

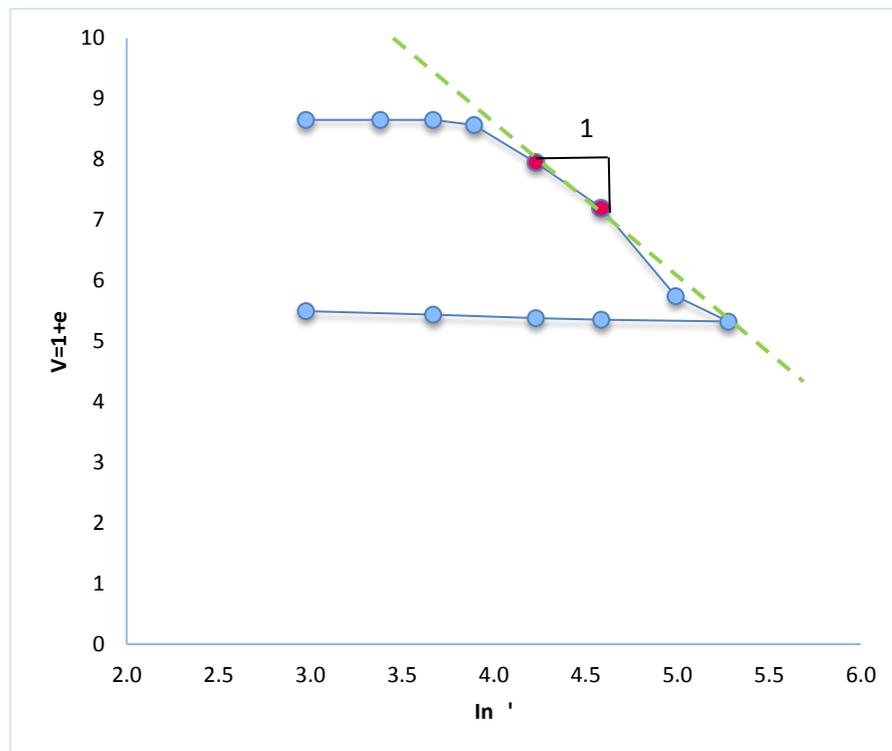


Figura 4.2 $\ln \sigma'$ vs Volumen específico.

Ver **Anexo B** curvas de compresibilidad de ASA LAGO y T2.

Tabla 4.1 Resumen de resultados

| No. Mta | Origen | Profundidad [m] | λ |
|---------|---|-----------------|-----------|
| 1 | Instituto de Ingeniería (Muestras ASA LAGO) | 2Mi-M1 | 2.094 |
| 2 | | 2Mi-M3 | 2.601 |
| 3 | | 2Mi-M4 | 2.096 |
| 4 | | 4Mi-M3 | 1.553 |
| 5 | | 4Mi-M4 | 2.434 |
| 6 | | 4Mi-M5 | 1.124 |
| 7 | | 3Mi-M3 | 1.835 |
| 8 | | 6Mi_M2 | 2.512 |
| 9 | | 6Mi-M3 | 2.254 |
| 10 | | 6Mi-M4 | 1.694 |
| 11 | | 6Mi-M5 | 2.608 |
| 12 | | 9Mi-M6 | 2.4 |
| 13 | T2 | 1N T2 M16 | 2 |
| 14 | | 1N T2 M24 | 3.154 |
| 15 | | 1N T2 M31 | 1.646 |
| 16 | | 1N T2 M41 | 2.139 |

Para los datos de Acevedo (2014) el tratamiento para obtener el parámetro λ (Tabla 4.2) se obtiene a partir de la ecuación 3.17.

$$C_c = \lambda \ln 10 \approx 2.3\lambda \quad 3.17$$

Donde, C_c es la pendiente de la curva de compresión en el espacio $e - \log \sigma_v$. (Ver 3.3.1).

La Tabla 4.2 muestra las propiedades y las características de compresibilidad de un total de 215 registros de compresión.

Tabla 4.2 Base de datos

| Origen | Profundidad [m] | w _L [%] | w _p [%] | PI [%] | G _s | Relaciones gravimétricas Iniciales | | C _c | λ |
|----------------|-----------------|--------------------|--------------------|---------|----------------|------------------------------------|--------|----------------|-------|
| | | | | | | w _o [%] | e | | |
| Acevedo (2014) | ----- | 83.000 | 47.214 | 35.786 | 2.480 | 96.460 | 2.690 | 0.780 | 0.339 |
| | ----- | 83.000 | 47.214 | 35.786 | 2.480 | 114.000 | 3.090 | 1.730 | 0.752 |
| | ----- | 83.000 | 47.214 | 35.786 | 2.480 | 110.465 | 2.940 | 1.440 | 0.626 |
| | ----- | 83.000 | 47.214 | 35.786 | 2.480 | 104.000 | 2.810 | 1.140 | 0.496 |
| | 19.60-19.80 | 199.800 | 55.278 | 144.522 | 2.776 | 140.990 | 4.220 | 1.940 | 0.843 |
| | 13.00 - 13.90 | 130.500 | 58.653 | 71.847 | 2.351 | 116.100 | 2.840 | 2.060 | 0.896 |
| | 2.80-2.95 | 174.000 | 75.805 | 98.195 | 2.558 | 278.630 | 7.550 | 3.630 | 1.578 |
| | 19.0-19.9 | 282.500 | 63.889 | 218.611 | 2.807 | 134.060 | 4.560 | 2.180 | 0.948 |
| | 11.00-11.20 | 187.700 | 47.214 | 140.486 | 2.606 | 193.270 | 5.260 | 3.270 | 1.422 |
| | 7.7-7.9 | 402.000 | 87.692 | 314.308 | 2.819 | 409.897 | 12.180 | 8.350 | 3.630 |
| | 7.5-7.7 | 417.500 | 82.257 | 335.243 | 2.745 | 303.823 | 8.380 | 5.520 | 2.400 |
| | 10.80-11.0 | 152.000 | 53.050 | 98.950 | 2.616 | 163.520 | 4.560 | 2.900 | 1.261 |
| | 4.40-4.60 | 316.450 | 68.411 | 248.039 | 3.137 | 308.240 | 9.890 | 6.270 | 2.726 |
| | 14-00-14.90 | 281.900 | 84.797 | 197.103 | 2.757 | 248.430 | 7.310 | 5.790 | 2.517 |
| | 6.50-7.40 | 231.000 | 137.840 | 93.160 | 2.355 | 183.960 | 4.480 | 3.570 | 1.552 |
| | 22.60-22.80 | 453.000 | 184.690 | 268.310 | 2.502 | 164.500 | 9.270 | 9.140 | 3.974 |
| | 4.50-5.10 | 307.000 | 140.390 | 166.610 | 2.604 | 319.580 | 8.360 | 5.700 | 2.478 |
| | 11.70-11.90 | 430.000 | 135.500 | 294.500 | 2.370 | 299.500 | 7.490 | 5.090 | 2.213 |
| | 28.40-28.60 | 340.000 | 105.640 | 234.360 | 2.804 | 224.380 | 6.650 | 6.660 | 2.896 |
| | 11.60-11.80 | 350.050 | 105.240 | 244.810 | 2.694 | 268.270 | 7.390 | 6.470 | 2.813 |
| | 9.40-9.60 | 152.800 | 67.990 | 84.810 | 2.460 | 75.037 | 1.850 | 0.710 | 0.309 |
| | 16.00-16.20 | 280.500 | 86.485 | 194.015 | 2.960 | 243.490 | 7.450 | 5.970 | 2.596 |
| | 15.80-16.00 | 260.500 | 52.700 | 207.800 | 2.880 | 260.700 | 7.950 | 4.900 | 2.130 |
| | 11.20-11.40 | 296.000 | 55.200 | 240.800 | 2.850 | 320.000 | 9.200 | 5.620 | 2.443 |
| | ----- | 284.440 | 47.600 | 236.840 | 2.340 | 312.860 | 7.420 | 5.160 | 2.243 |
| | ----- | 275.000 | 79.900 | 195.100 | 2.350 | 253.250 | 6.140 | 3.230 | 1.404 |
| ----- | 66.690 | 37.430 | 29.260 | 2.710 | 107.070 | 3.100 | 1.210 | 0.526 | |

| Origen | Profundidad [m] | w _L [%] | w _p [%] | PI [%] | G _s | Relaciones gravimétricas Iniciales | | C _c | λ |
|----------------|-----------------|--------------------|--------------------|---------|----------------|------------------------------------|--------|----------------|-------|
| | | | | | | w _o [%] | e | | |
| | ----- | 66.690 | 37.430 | 29.260 | 2.710 | 107.070 | 3.040 | 1.140 | 0.496 |
| Ayala (2011) | 19.10 | 276.200 | 103.770 | 172.430 | 2.580 | 161.090 | 3.280 | 1.510 | 0.657 |
| | 19.10 | 276.200 | 103.770 | 172.430 | 2.580 | 161.090 | 4.590 | 4.110 | 1.787 |
| | 16.00 | 191.470 | 77.400 | 113.980 | 2.470 | 201.920 | 5.160 | 3.250 | 1.413 |
| | 34.40 | 235.680 | 76.270 | 159.410 | 2.630 | 196.720 | 5.170 | 6.840 | 2.974 |
| | | 69.030 | 34.370 | 35.660 | 2.720 | 36.360 | 0.990 | 0.140 | 0.061 |
| | 3.40 | 370.310 | 114.410 | 255.900 | 2.630 | 160.520 | 4.720 | 9.960 | 4.330 |
| | 51.60 | 182.820 | 85.600 | 97.220 | 2.430 | 94.880 | 2.570 | 1.190 | 0.517 |
| | 6.20 | 313.710 | 92.410 | 221.300 | 2.890 | 339.560 | 8.040 | 6.910 | 3.004 |
| | 8.00 | 266.970 | 106.460 | 160.510 | 3.060 | 290.070 | 8.770 | 9.010 | 3.917 |
| Vázquez (2009) | 6.00 | 169.620 | 47.920 | 121.700 | 2.340 | 136.490 | 4.060 | 3.280 | 1.426 |
| | 9.00 | 183.350 | 57.640 | 125.710 | 2.440 | 155.610 | 4.190 | 2.310 | 1.004 |
| Hidalgo (2006) | 47.20 | 255.800 | 71.400 | 184.400 | 2.530 | 242.700 | 3.130 | 5.520 | 2.400 |
| | 47.20 | 255.800 | 71.400 | 184.400 | 2.530 | 223.300 | 5.650 | 4.680 | 2.035 |
| | 34.40 | 244.100 | 92.300 | 151.800 | 2.730 | 246.600 | 7.540 | 4.910 | 2.135 |
| | 34.40 | 244.100 | 92.300 | 151.800 | 2.730 | 229.400 | 6.550 | 4.430 | 1.926 |
| | 22.35 | 385.000 | 141.000 | 244.000 | 2.580 | 274.200 | 7.260 | 5.620 | 2.443 |
| Carreón (2006) | 1.84 | 364.000 | 211.000 | 153.000 | 2.130 | 290.000 | 5.900 | 0.780 | 0.339 |
| | 2.44 | 141.000 | 92.000 | 49.000 | 2.090 | 88.000 | 4.200 | 2.140 | 0.930 |
| | 3.75 | 164.000 | 102.000 | 62.000 | 1.530 | 91.000 | 1.580 | 0.390 | 0.170 |
| | 7.39 | 260.000 | 162.000 | 98.000 | 1.750 | 154.000 | 2.150 | 0.410 | 0.178 |
| | 9.20 | 151.000 | 59.000 | 92.000 | 2.060 | 199.000 | 2.350 | 1.300 | 0.565 |
| | 11.90 | 215.000 | 91.000 | 124.000 | 2.250 | 195.000 | 3.700 | 1.990 | 0.865 |
| | 1.70 | 200.000 | 100.000 | 100.000 | 2.160 | 234.000 | 4.500 | 2.420 | 1.052 |
| | 14.80 | 215.000 | 104.000 | 111.000 | 2.060 | 204.000 | 4.400 | 1.640 | 0.713 |
| Ovando (2006) | 3.80 | 131.400 | 55.120 | 76.280 | 2.330 | 194.000 | 4.520 | 2.930 | 1.274 |
| | 2.00 | 386.800 | 113.510 | 273.290 | 2.570 | 433.000 | 11.200 | 6.700 | 2.913 |
| | 3.60 | 277.200 | 52.850 | 224.350 | 2.950 | 282.000 | 8.350 | 5.800 | 2.522 |
| | 5.80 | 347.000 | 92.850 | 254.150 | 2.570 | 213.000 | 5.440 | 3.450 | 1.500 |
| | 8.40 | 182.800 | 69.820 | 112.980 | 2.600 | 158.000 | 4.130 | 2.600 | 1.130 |
| | 22.00 | 152.000 | 62.790 | 89.210 | 2.600 | 174.000 | 4.200 | 1.990 | 0.865 |
| | 37.40 | 149.600 | 50.400 | 99.200 | 2.470 | 168.000 | 4.160 | 1.360 | 0.591 |
| | 33.20 | 247.000 | 63.980 | 183.020 | 2.660 | 227.000 | 6.040 | 5.540 | 2.409 |
| | 40.80 | 172.000 | 87.270 | 84.130 | 2.760 | 135.000 | 3.930 | 2.730 | 1.187 |
| | 27.40 | 214.000 | 95.550 | 118.450 | 2.520 | 197.000 | 4.980 | 4.300 | 1.870 |

| Origen | Profundidad [m] | w _L [%] | w _p [%] | PI [%] | G _s | Relaciones gravimétricas Iniciales | | C _c | λ |
|--------|-----------------|--------------------|--------------------|---------|----------------|------------------------------------|--------|----------------|-------|
| | | | | | | w _o [%] | e | | |
| | 24.00 | 202.000 | 59.620 | 142.380 | 2.310 | 189.000 | 4.390 | 2.300 | 1.000 |
| | 9.80 | 192.000 | 62.740 | 129.260 | 2.500 | 252.000 | 6.260 | 4.130 | 1.796 |
| | 6.60 | 402.000 | 121.140 | 280.860 | 2.670 | 202.000 | 5.950 | 5.400 | 2.348 |
| | 3.60 | 327.000 | 86.320 | 240.680 | 2.500 | 423.000 | 10.690 | 9.630 | 4.187 |
| | 22.20 | 262.000 | 42.050 | 219.950 | 2.870 | 215.000 | 6.160 | 4.930 | 2.143 |
| | 18.20 | 280.200 | 5.130 | 224.070 | 2.860 | 310.000 | 8.850 | 6.810 | 2.961 |
| | 14.20 | 198.000 | 48.650 | 149.350 | 2.840 | 248.000 | 7.030 | 4.490 | 1.952 |
| | 11.20 | 235.000 | 59.510 | 175.490 | 2.850 | 325.000 | 9.280 | 4.810 | 2.091 |
| | 45.40 | 146.010 | 85.530 | 60.480 | 2.620 | 172.000 | 4.480 | 2.900 | 1.261 |
| | 22.60 | 241.000 | 93.860 | 148.140 | 2.810 | 238.000 | 6.670 | 5.440 | 2.365 |
| | 8.40 | 311.000 | 63.970 | 247.030 | 2.820 | 335.000 | 9.410 | 6.560 | 2.852 |
| | 2.60 | 151.000 | 40.790 | 110.210 | 2.830 | 158.000 | 4.460 | 2.210 | 0.961 |
| | 39.20 | 206.000 | 38.320 | 167.680 | 2.740 | 203.000 | 5.530 | 5.050 | 2.196 |
| | 33.70 | 248.800 | 47.280 | 201.520 | 2.730 | 355.000 | 9.670 | 8.730 | 3.796 |
| | 3.35 | 318.000 | 82.260 | 235.740 | 2.870 | 278.000 | 8.170 | 4.500 | 1.957 |
| | 21.10 | 234.500 | 67.230 | 167.270 | 2.780 | 315.000 | 8.760 | 6.670 | 2.900 |
| | 12.30 | 213.500 | 45.450 | 168.050 | 2.810 | 257.000 | 7.220 | 2.490 | 1.083 |
| | 6.30 | 118.000 | 45.680 | 72.320 | 2.660 | 91.000 | 2.500 | 1.050 | 0.457 |
| | 11.60 | 342.000 | 58.040 | 283.960 | 2.880 | 459.000 | 13.220 | 10.140 | 4.409 |
| | 4.60 | 217.000 | 70.490 | 146.510 | 2.960 | 290.000 | 8.540 | 4.830 | 2.100 |
| | 34.20 | 325.000 | 49.990 | 275.010 | 2.980 | 295.000 | 8.760 | 8.610 | 3.743 |
| | 28.20 | 297.800 | 84.370 | 213.430 | 3.040 | 342.000 | 10.340 | 9.360 | 4.070 |
| | 44.50 | 203.000 | 55.000 | 148.000 | 3.030 | 246.000 | 7.450 | 5.370 | 2.335 |
| | 22.00 | 143.200 | 65.910 | 77.290 | 2.920 | 326.000 | 9.470 | 6.530 | 2.839 |
| | 33.40 | 374.000 | 95.060 | 278.940 | 2.530 | 425.000 | 10.770 | 7.020 | 3.052 |
| | 26.40 | 468.000 | 123.320 | 344.680 | 2.890 | 489.000 | 14.100 | 10.050 | 4.370 |
| | 18.80 | 346.900 | 84.730 | 262.170 | 2.460 | 384.000 | 9.420 | 8.190 | 3.561 |
| | 13.00 | 396.370 | 103.000 | 293.370 | 2.570 | 426.000 | 10.990 | 6.760 | 2.939 |
| | 9.00 | 363.000 | 90.350 | 272.650 | 2.460 | 372.000 | 9.260 | 5.790 | 2.517 |
| | 4.40 | 397.000 | 175.640 | 221.360 | 2.600 | 392.000 | 10.230 | 7.240 | 3.148 |
| | 46.60 | 198.000 | 58.790 | 139.210 | 2.930 | 164.000 | 4.950 | 4.190 | 1.822 |
| | 33.60 | 278.000 | 67.040 | 210.960 | 2.510 | 271.000 | 6.800 | 6.590 | 2.865 |
| | 18.60 | 198.000 | 58.790 | 139.210 | 2.690 | 181.000 | 4.890 | 2.620 | 1.139 |
| | 10.60 | 250.000 | 72.770 | 177.230 | 2.560 | 248.000 | 6.370 | 4.100 | 1.783 |
| | 4.60 | 156.000 | 53.680 | 102.320 | 2.580 | 134.000 | 3.480 | 1.360 | 0.591 |

| Origen | Profundidad [m] | w _L [%] | w _p [%] | PI [%] | G _s | Relaciones gravimétricas Iniciales | | C _c | λ |
|-----------------------|-----------------|--------------------|--------------------|---------|----------------|------------------------------------|--------|----------------|-------|
| | | | | | | w _o [%] | e | | |
| | 13.50 | 60.400 | 32.320 | 28.080 | 2.500 | 47.000 | 1.240 | 0.160 | 0.070 |
| | 2.60 | 74.050 | 39.480 | 34.570 | 2.500 | 94.000 | 2.430 | 1.340 | 0.583 |
| | 8.80 | 146.000 | 63.570 | 82.430 | 2.930 | 202.000 | 6.280 | 3.690 | 1.604 |
| | 17.50 | 205.000 | 80.650 | 124.350 | 2.990 | 182.000 | 5.660 | 1.590 | 0.691 |
| | 12.90 | 81.400 | 63.570 | 17.830 | 2.620 | 104.000 | 2.960 | 1.320 | 0.574 |
| | 3.20 | 162.000 | 58.220 | 103.780 | 2.630 | 262.000 | 7.190 | 6.080 | 2.643 |
| | 16.02 | 279.000 | 74.010 | 204.990 | 2.650 | 230.000 | 6.100 | 3.920 | 1.704 |
| | 8.20 | 142.500 | 59.170 | 83.330 | 2.810 | 130.000 | 4.210 | 2.170 | 0.943 |
| | 22.15 | 81.200 | 33.410 | 47.790 | 2.590 | 89.000 | 2.370 | 1.020 | 0.443 |
| | 17.70 | 240.300 | 50.520 | 189.780 | 2.640 | 221.000 | 5.940 | 4.030 | 1.752 |
| | 8.70 | 178.000 | 63.970 | 114.030 | 2.520 | 178.000 | 4.960 | 2.390 | 1.039 |
| | 4.60 | 140.800 | 55.420 | 85.380 | 2.460 | 162.000 | 4.250 | 1.970 | 0.857 |
| | 10.60 | 233.500 | 52.270 | 181.230 | 2.490 | 221.000 | 5.500 | 4.160 | 1.809 |
| | 14.00 | 212.250 | 44.470 | 167.780 | 2.310 | 210.000 | 4.840 | 2.760 | 1.200 |
| | 18.20 | 187.500 | 38.850 | 149.650 | 2.510 | 188.000 | 4.730 | 3.360 | 1.461 |
| | 25.17 | 140.400 | 75.460 | 64.940 | 2.420 | 100.000 | 2.610 | 0.690 | 0.300 |
| | 19.70 | 170.200 | 45.830 | 124.370 | 2.670 | 161.000 | 4.300 | 3.330 | 1.448 |
| | 8.20 | 295.000 | 44.930 | 250.070 | 2.460 | 282.000 | 6.990 | 6.810 | 2.961 |
| | 20.20 | 188.000 | 53.320 | 134.680 | 2.600 | 185.000 | 5.040 | 3.650 | 1.587 |
| | 12.30 | 220.000 | 70.040 | 149.960 | 2.700 | 275.000 | 7.510 | 5.440 | 2.365 |
| | 7.20 | 206.000 | 71.580 | 134.420 | 2.810 | 388.000 | 11.150 | 6.720 | 2.922 |
| | 3.38 | 94.000 | 40.910 | 53.090 | 2.720 | 96.000 | 2.600 | 0.930 | 0.404 |
| | 24.90 | 121.600 | 40.520 | 81.080 | 2.320 | 191.000 | 4.420 | 3.800 | 1.652 |
| | 16.40 | 255.000 | 76.180 | 178.820 | 2.440 | 322.000 | 8.160 | 7.320 | 3.183 |
| | 13.00 | 78.200 | 54.070 | 24.130 | 2.480 | 111.000 | 2.860 | 1.420 | 0.617 |
| | 7.40 | 292.000 | 62.570 | 229.430 | 2.360 | 361.000 | 2.560 | 6.160 | 2.678 |
| | 3.60 | 310.000 | 72.280 | 237.720 | 2.370 | 321.000 | 7.650 | 4.820 | 2.096 |
| | 20.10 | 218.000 | 58.000 | 160.000 | 2.720 | 204.000 | 5.580 | 4.200 | 1.826 |
| | 14.40 | 92.000 | 58.000 | 34.000 | 2.660 | 110.000 | 3.030 | 1.310 | 0.570 |
| | 6.20 | 346.000 | 79.810 | 266.190 | 2.700 | 313.000 | 8.560 | 5.280 | 2.296 |
| | 3.20 | 330.000 | 85.970 | 244.030 | 2.680 | 329.000 | 9.180 | 4.690 | 2.039 |
| | 3.00 | 390.000 | 78.780 | 311.220 | 2.980 | 425.000 | 12.680 | 6.170 | 2.683 |
| GEOTEC (2013-TEXCOCO) | | 184.600 | 48.700 | 135.900 | 2.550 | 229.000 | 5.427 | 2.941 | 1.279 |
| | | 208.000 | 40.600 | 167.400 | 2.540 | 230.000 | 5.449 | 5.282 | 2.297 |
| | | 145.100 | 34.500 | 110.600 | 2.420 | 157.000 | 3.686 | 2.955 | 1.285 |

| Origen | Profundidad [m] | w _L [%] | w _p [%] | PI [%] | G _s | Relaciones gravimétricas Iniciales | | C _c | λ |
|--------|-----------------|--------------------|--------------------|---------|----------------|------------------------------------|--------|----------------|-------|
| | | | | | | w _o [%] | e | | |
| | | 160.800 | 31.600 | 129.200 | 2.500 | 209.000 | 5.124 | 4.116 | 1.790 |
| | | 255.500 | 42.100 | 213.400 | 2.540 | 284.000 | 6.817 | 3.923 | 1.706 |
| | | 255.500 | 47.000 | 208.500 | 2.310 | 270.000 | 5.832 | 4.551 | 1.979 |
| | | 152.300 | 40.500 | 111.800 | 2.570 | 182.000 | 4.536 | 5.307 | 2.307 |
| | | 258.400 | 39.400 | 219.000 | 2.560 | 289.000 | 7.168 | 4.184 | 1.819 |
| | | 219.500 | 48.800 | 170.700 | 2.530 | 265.000 | 6.411 | 3.527 | 1.533 |
| | | 184.700 | 39.100 | 145.600 | 2.430 | 182.000 | 4.225 | 3.170 | 1.378 |
| | | 174.700 | 38.300 | 136.400 | 2.420 | 308.000 | 7.049 | 4.947 | 2.151 |
| | | 198.700 | 47.300 | 151.400 | 2.620 | 242.000 | 5.922 | 3.108 | 1.351 |
| | | 217.600 | 38.100 | 179.500 | 2.870 | 230.000 | 6.250 | 5.275 | 2.293 |
| | | 239.000 | 40.700 | 198.300 | 2.860 | 250.000 | 6.609 | 4.930 | 2.143 |
| | | 266.000 | 50.700 | 215.300 | 2.650 | 427.000 | 10.619 | 6.175 | 2.685 |
| | | 184.000 | 37.500 | 146.500 | 2.590 | 148.000 | 3.674 | 2.207 | 0.960 |
| | | 554.200 | 59.300 | 494.900 | 2.420 | 508.000 | 12.321 | 7.274 | 3.163 |
| | | 203.000 | 26.400 | 176.600 | 2.520 | 171.000 | 4.418 | 2.070 | 0.900 |
| | | 201.700 | 53.000 | 148.700 | 2.320 | 213.000 | 5.006 | 2.432 | 1.057 |
| | | 343.300 | 55.600 | 287.700 | 2.450 | 275.000 | 6.338 | 4.928 | 2.143 |
| | | 257.500 | 50.800 | 206.700 | 2.390 | 225.000 | 5.394 | 3.906 | 1.698 |
| | | 282.500 | 62.700 | 219.800 | 2.360 | 190.000 | 4.436 | 2.859 | 1.243 |
| | | 256.500 | 48.300 | 208.200 | 2.660 | 266.000 | 6.930 | 3.608 | 1.569 |
| | | 236.500 | 39.700 | 196.800 | 2.860 | 349.000 | 9.535 | 6.490 | 2.822 |
| | | 156.600 | 33.700 | 122.900 | 2.560 | 219.000 | 5.492 | 4.017 | 1.747 |
| | | 177.800 | 21.600 | 156.200 | 2.610 | 154.000 | 3.810 | 3.370 | 1.465 |
| | | 431.600 | 74.800 | 356.800 | 2.360 | 424.000 | 9.837 | 6.513 | 2.832 |
| | | 180.500 | 36.500 | 144.000 | 2.480 | 149.000 | 3.698 | 1.791 | 0.779 |
| | | 232.100 | 65.100 | 167.000 | 2.230 | 221.000 | 4.916 | 2.261 | 0.983 |
| | | 500.000 | 46.900 | 453.100 | 2.250 | 417.000 | 10.748 | 8.074 | 3.510 |
| | | 277.800 | 64.300 | 213.500 | 2.420 | 290.000 | 6.981 | 3.582 | 1.557 |
| | | 416.500 | 59.200 | 357.300 | 2.430 | 365.000 | 8.698 | 7.289 | 3.169 |
| | | 218.600 | 52.700 | 165.900 | 2.420 | 198.000 | 4.812 | 4.319 | 1.878 |
| | | 422.000 | 58.800 | 363.200 | 2.380 | 396.000 | 9.327 | 6.547 | 2.847 |
| | | 206.500 | 53.100 | 153.400 | 2.270 | 220.000 | 4.926 | 3.762 | 1.636 |
| | | 251.800 | 40.300 | 211.500 | 2.290 | 266.000 | 6.139 | 2.874 | 1.250 |
| | | 374.300 | 63.500 | 310.800 | 2.580 | 382.000 | 9.605 | 7.029 | 3.056 |
| | | 231.600 | 52.500 | 179.100 | 2.360 | 236.000 | 5.613 | 3.454 | 1.502 |

| Origen | Profundidad [m] | w _L [%] | w _p [%] | PI [%] | G _s | Relaciones gravimétricas Iniciales | | Cc | λ |
|---|-----------------|--------------------|--------------------|---------|----------------|------------------------------------|--------|-------|-------|
| | | | | | | w _o [%] | e | | |
| | | 209.000 | 46.300 | 162.700 | 2.470 | 234.000 | 5.683 | 2.839 | 1.234 |
| | | 377.500 | 38.400 | 339.100 | 2.580 | 265.000 | 6.828 | 4.900 | 2.130 |
| | | 320.000 | 52.200 | 267.800 | 2.320 | 419.000 | 9.534 | 5.332 | 2.318 |
| GEOSOL(2014-AICM_T2) | | 305.750 | 73.280 | 232.470 | 2.400 | 321.350 | 8.350 | 5.711 | 2.483 |
| | | 171.800 | 53.610 | 118.190 | 2.390 | 222.560 | 5.720 | 3.473 | 1.510 |
| | | 432.360 | 118.950 | 313.410 | 2.740 | 613.640 | 15.800 | 8.120 | 3.531 |
| | | 382.980 | 60.930 | 322.050 | 2.420 | 373.680 | 9.590 | 3.488 | 1.517 |
| | | 362.670 | 105.650 | 257.020 | 2.490 | 432.450 | 11.340 | 5.637 | 2.451 |
| | | 257.930 | 63.400 | 194.530 | 2.440 | 132.370 | 3.410 | 1.376 | 0.598 |
| | | 298.610 | 112.900 | 185.710 | 2.400 | 307.770 | 7.720 | 5.306 | 2.307 |
| | | 365.090 | 105.820 | 259.270 | 2.360 | 215.430 | 5.770 | 3.654 | 1.589 |
| | | 293.640 | 108.500 | 185.140 | 2.360 | 283.950 | 6.900 | 4.086 | 1.777 |
| Instituto de Ingeniería (Muestras ASA LAGO) | 2Mi-M1 | 229.770 | 44.320 | 185.450 | 2.890 | 213.400 | 6.267 | | 2.094 |
| | 2Mi-M3 | 324.740 | 100.890 | 223.850 | 3.150 | 262.770 | 8.311 | | 2.756 |
| | 2Mi-M4 | 204.230 | 65.360 | 138.870 | 2.990 | 209.600 | 6.327 | | 2.096 |
| | 4Mi-M3 | 223.180 | 82.180 | 141.000 | 3.180 | 202.480 | 5.184 | | 1.553 |
| | 4Mi-M4 | 233.540 | 62.740 | 170.800 | 3.310 | 182.280 | 5.947 | | 2.434 |
| | 4Mi-M5 | 165.750 | 39.170 | 126.580 | 2.770 | 108.430 | 3.104 | | 1.124 |
| | 3Mi-M3 | 222.460 | 92.060 | 130.400 | 2.830 | 201.290 | 6.592 | | 1.835 |
| | 6Mi_M2 | 292.810 | 91.160 | 201.650 | 3.220 | 301.960 | 6.864 | | 2.512 |
| | 6Mi-M3 | 280.990 | 58.680 | 222.310 | 3.320 | 246.750 | 8.385 | | 2.254 |
| | 6Mi-M4 | 223.890 | 59.330 | 164.560 | 3.150 | 186.770 | 6.070 | | 1.694 |
| | 6Mi-M5 | 235.350 | 54.010 | 181.340 | 3.420 | 181.210 | 6.379 | | 2.608 |
| 9Mi-M6 | 236.990 | 75.280 | 161.710 | 2.790 | 119.690 | 3.478 | | 2.4 | |
| T2 | 1N T2 M16 | 317.980 | 157.680 | 160.300 | 2.520 | 361.700 | 9.562 | | 2 |
| | 1N T2 M24 | 341.060 | 129.000 | 212.060 | 2.480 | 320.540 | 10.400 | | 3.154 |
| | 1N T2 M31 | 242.090 | 84.460 | 157.630 | 2.650 | 333.590 | 6.440 | | 1.646 |
| | 1N T2 M41 | 192.280 | 108.910 | 83.370 | 2.460 | 200.340 | 7.265 | | 2.139 |

4.2.2 Elección de las propiedades

Las propiedades índice nos proporcionan una idea del comportamiento del suelo, de manera que dichas propiedades se pueden considerar como variables para la determinación de correlaciones empíricas.

Para el presente trabajo se eligieron las siguientes propiedades: Límite líquido (WL), Índice de plasticidad (IP), Contenido de agua (W_o) y Relación de vacíos (e_o).

4.3 Correlaciones

Los datos por correlacionar con el parámetro λ presentados en la Tabla 4.2 se graficaron con las propiedades índice antes mencionadas como abscisas y a λ en el eje de las ordenadas con lo cual se obtuvo una idea bastante aproximada sobre el tipo de relación que existe entre las dos variables graficadas distinguiéndose el grado en el que el conjunto de puntos se ajusta a una línea recta. Los resultados generados por las gráficas permitieron descartar datos que tenían una variación evidente con respecto al que mostraban con la mayoría de los valores analizados, el cual algunos de los valores no fueron tomados en las correlaciones finalmente obtenidas.

Si disponemos de dos series de datos, con frecuencia es útil conocer si ambas variables están relacionadas y saber la expresión que refleja dicha relación.

Recta de regresión; se llama a sí a la recta que atraviesa el conjunto de puntos y que mejor se ajusta a ellos.

Coefficiente de determinación (R^2); Es una medida de ajuste útil para el análisis de regresión. Se trata de una medida estandarizada que toma valores entre 0 y 1 (0 cuando las variables son independientes y 1 cuando entre ellas existe relación perfecta). Es decir expone el grado de ganancia que podemos obtener al predecir una variable, basándose en el conocimiento que se tiene de otra u otras variables. Otro parámetro estadístico que permite determinar la posible relación lineal existente entre pares de variables es el **coeficiente de correlación**. El coeficiente de correlación está representado por un número entre -1 y +1, el cual mide la tendencia recíproca entre dos

variables que se observan al mismo tiempo. Estos valores representan una relación lineal directa perfecta entre las variables, mientras que el valor de 0 expone que no existe relación lineal.

4.3.1 Correlación entre λ y WL

En el análisis preliminar de información que se realizó, se observó en algunos casos una deficiencia de correlación con el parámetro λ por lo cual se decidió no tomarlos en cuenta, para generar el modelo que se ajustará al comportamiento que presenta λ en función del límite líquido.

En la Figura 4.3 se muestra la correlación positiva que existe entre el límite líquido y λ , teniendo como resultado el siguiente modelo lineal:

$$\lambda = 0.0069W_L + 0.145$$

El coeficiente de correlación determinado entre los valores del límite líquido y λ es de 0.74.

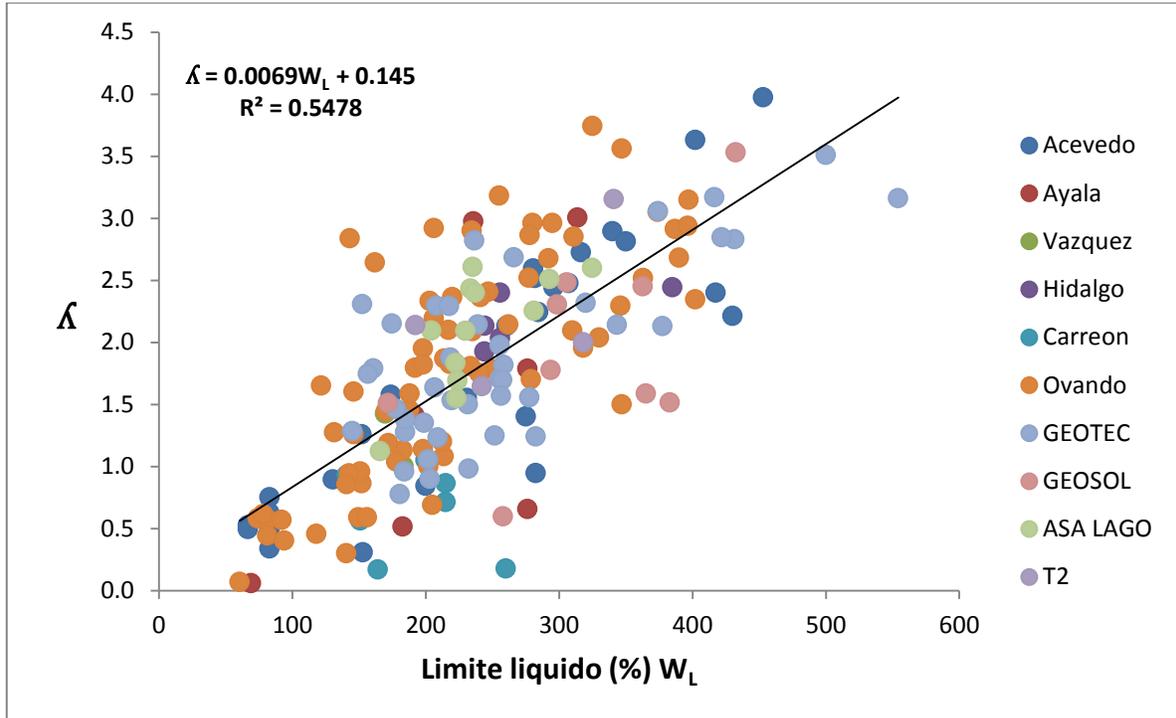


Figura 4.3 Correlación entre el límite líquido y el parámetro λ para arcillas del Valle de México.

4.3.2 Correlación entre λ y IP

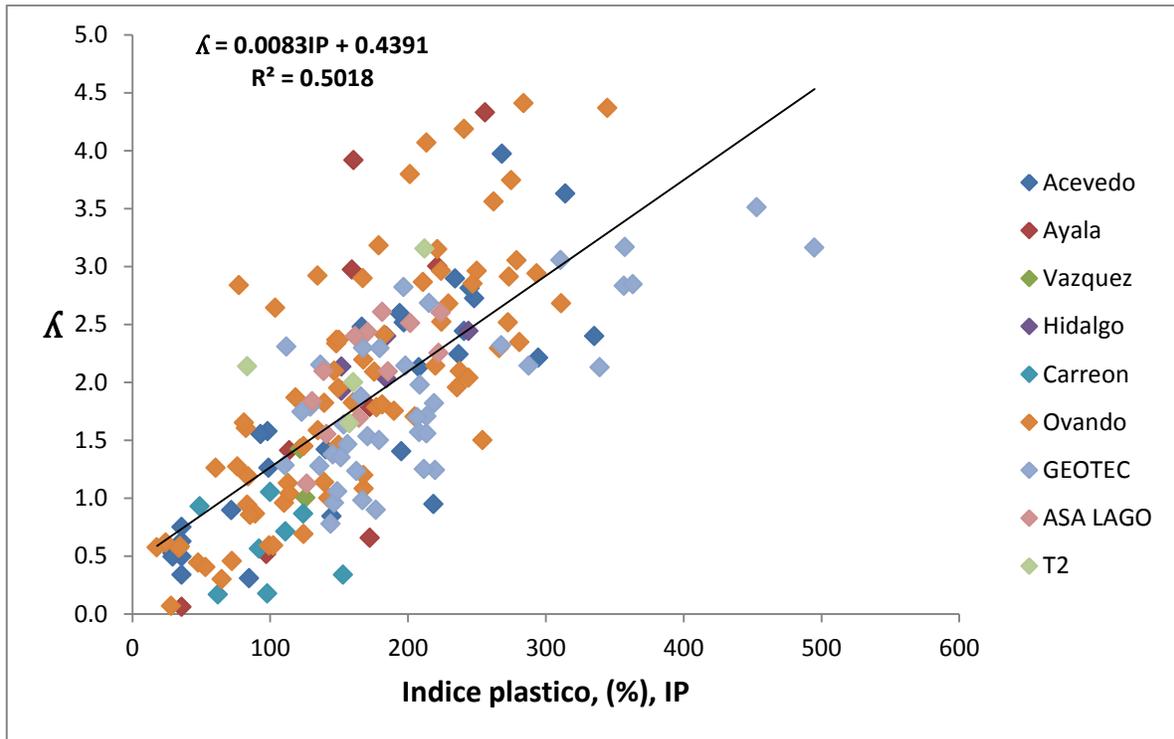


Figura 4.4 Correlación entre el índice plástico y el parámetro λ para arcillas del Valle de México.

La Figura 4.4 muestra la gráfica de dispersión entre el índice plástico y λ , cuya ecuación de correlación es la siguiente:

$$\lambda = 0.0083IP + 0.4391$$

El coeficiente determinado para esta ecuación es de 0.71.

4.3.3 Correlación entre λ y W_o

La ecuación para obtener una aproximación de λ mediante el uso del contenido de agua es la siguiente:

$$\lambda = 0.008W_o - 0.0655$$

El coeficiente de correlación entre los valores del contenido de agua y λ es de 0.82. Debido a la alta correlación existente entre ambas variables, se puede decir que el contenido de agua del suelo da una predicción confiable del parámetro λ .

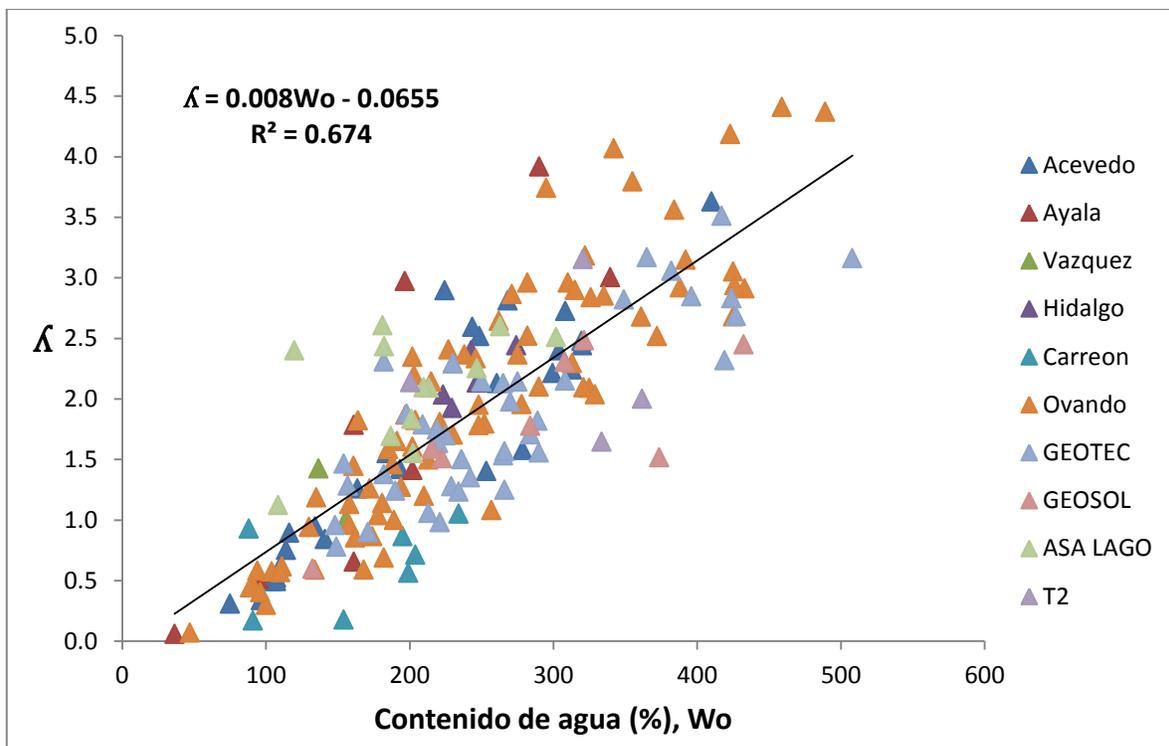


Figura 4.5 Correlación entre el contenido de agua y el parámetro λ para arcillas del Valle de México.

4.3.4 Correlación entre λ y e

La Figura 4.6 muestra la correlación positiva que existe entre la relación de vacíos y λ obteniendo un coeficiente de correlación de 0.86 el más alto de las cuatro correlaciones expuestas. La ecuación representativa de esta relación es:

$$\lambda = 0.3132e - 0.1206$$

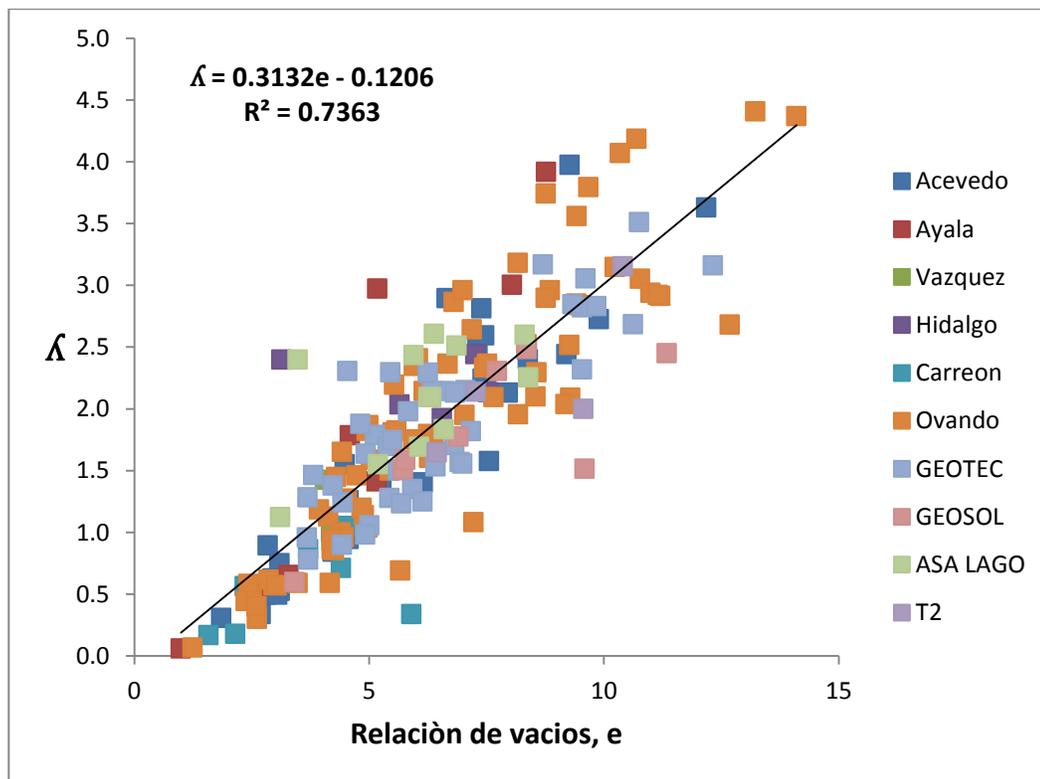


Figura 4.6 Correlación entre la relación de vacíos y el parámetro λ para arcillas del Valle de México.

4.4 Salinidad

La salinidad del agua intersticial es una de las peculiaridades del subsuelo del ex-Lago de Texcoco. Marsal y Graue (1969) llevaron a cabo estudios sobre el contenido de sales para determinar la composición y distribución en el agua de la región. A partir de dicha investigación encontraron carbonatos, bicarbonatos y cloruros de sodio. Posteriormente, en estudios realizados por Murillo en 1978, se reportaron contenidos de sólidos disueltos en la zona centro del ex-Lago de 54,000 mg/l en los primeros 60 m, reduciéndose gradualmente este valor a 1,620 mg/l entre 213 m de profundidad, así como al alejarse hacia la periferia, donde la concentración salina quedaba comprendida entre 232 y 1,613 mg/l para profundidades menores de 200 m (citado por Alanís, 2003).

La densidad de sólidos es un indicador de la concentración salina del agua intersticial del subsuelo del ex-Lago de Texcoco puesto que ambos parámetros son directamente proporcionales. Por lo tanto, al comparar los valores de densidad de sólidos de diferentes estudios, por ejemplo los de Marsal y Graue en 1969 y los de Murillo realizados en 1978, con los de Alanís de 2003, se observa que estos últimos son mayores, lo que indica que la concentración salina se ha incrementado, así mismo, se concluye que la concentración decrece conforme a la profundidad, es decir, las zonas más bajas tienen las concentraciones salinas más altas y viceversa.

La presencia de sales en el agua es un factor que provoca que las propiedades índice como la densidad de sólidos, el contenido de agua, la relación de vacíos y los límites líquido y plástico induce imprecisiones en su determinación, pues al secarse el suelo las sales disueltas en el agua se cristalizan formando parte de los sólidos que se pesan.

Las propiedades índice que se presentan en este trabajo, referentes a la zona del ex-Lago de Texcoco, ASA LAGO y T2 se tendrían que corregir por la salinidad. Por ende, para hacer las correcciones correspondientes se han propuesto las siguientes expresiones de acuerdo con Marsal y Graue (1969).

$$w' = \frac{w}{1 - cw} \dots \dots 4.1$$

$$Gs' = \frac{Gs}{1 + cw} \dots \dots 4.2$$

Donde:

w y Gs, son el contenido de agua y la densidad de sólidos aparentes.

w' y Gs', son el contenido de agua y la densidad de sólidos desprovistas de sales.

c, es la concentración de sales expresada en peso del agua que las contiene disueltas.

Para determinar w' y Gs' es necesario conocer la concentración salina (c) para cada profundidad específica, esto implicaría realizar un análisis químico de cada muestra ensayada debido a la variabilidad del contenido de sales con la profundidad. Por lo tanto para obtener el valor aproximado de c se llega a una nueva ecuación en función de los parámetros aparentes (w y Gs) y de Gs', según Marsal y Graue (1969).

$$c = \frac{Gs - Gs'}{w Gs} \dots \dots 4.3$$

Donde:

Gs', es la incognita

Como ejemplo del efecto de las sales disueltas en la correlación contenido de agua (W_o) y el parámetro lambda (λ) se adoptó la suposición de Alanís (2003) sobre el valor corregido de la densidad de los sólidos, es decir este estudio se adoptó la misma suposición de $G_s'=2.2$. En la ecuación 4.3 se sustituyen los valores de densidad real (G_s) de las muestras ASA LAGO y T2 y el valor de densidad corregida ($G_s'=2.2$) estimándose aproximadamente las concentraciones salinas. Una vez conocida la concentración de sales (c), se pueden estimar los valores corregidos de las muestras antes mencionadas del contenido de agua aplicando la ecuación 4.1 (Ver Anexo C).

Los valores corregidos respecto al contenido de agua de las muestras ASA LAGO y T2, y los valores sin corregir (Acevedo, Ayala, Vázquez por mencionar algunos) se graficaron nuevamente con el parámetro lambda (λ) que se presentan en la Figura 4.7 observándose que la dispersión de datos disminuye en comparación con la Figura 4.5 en la cual la dispersión es mayor y por ende el R^2 difiere más de la unidad.

Es importante aclarar que la corrección de la propiedad índice realizada es únicamente con el contenido de agua, debido a que la corrección de cualquier otra propiedad índice implicaría realizar hipótesis de los valores involucrados, o realizar pruebas en cada muestra para calcular la concentración salina (c), lo cual vuelve el estudio y análisis impráctico, pues se requerirían cantidades muy grandes de suelo para hacer esta determinación la cual, además, resultaría muy onerosa, sin considerar el tiempo que se requeriría para llevarla a cabo.

❖ Corrección de la correlación entre λ y W_o

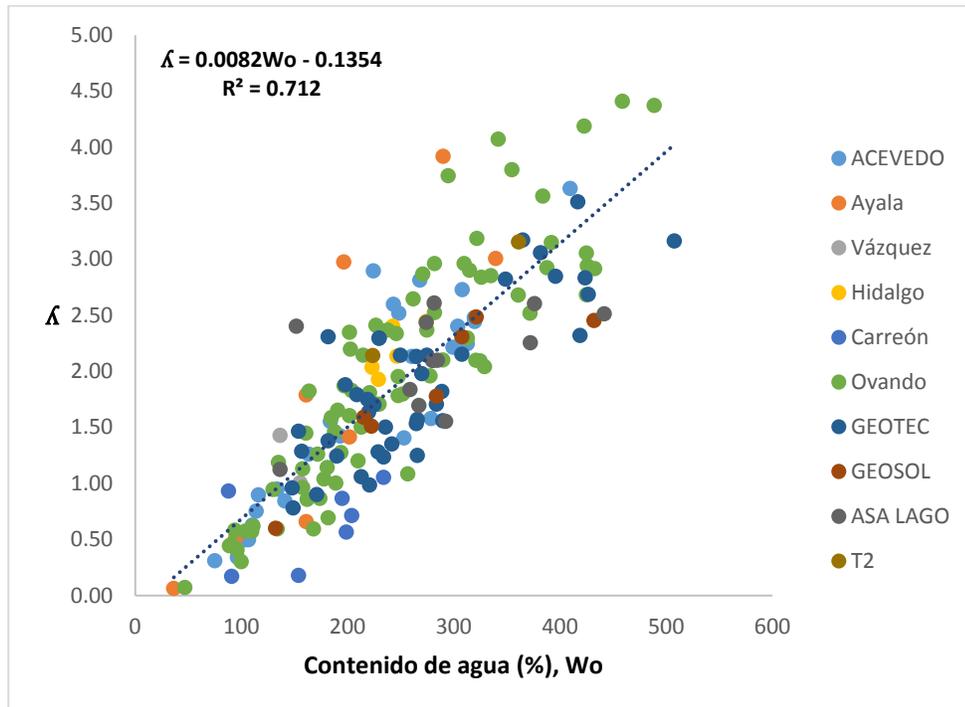


Figura 4.7 Correlación corregida entre el contenido de agua y el parámetro λ para arcillas del Valle de México.

En la Figura 4.7 se muestra la correlación positiva que existe entre el contenido de agua y λ , teniendo como resultado el siguiente modelo lineal:

$$\lambda = 0.0082W_o - 0.1354$$

5. CONCLUSIONES

A partir de los resultados de los ensayos odométricos de las muestras **ASA LAGO** (Aeropuertos y Servicios Auxiliares-Lago), **T2** (Terminal 2) provenientes de la zona del ex-Lago de Texcoco y con la recopilación de ensayos de consolidación odométrica por diversos investigadores se estableció una base de datos. De acuerdo con esa base de datos, se plantearon correlaciones con el parámetro de deformabilidad (λ) y de ello se obtuvieron las siguientes conclusiones:

- Las correlaciones obtenidas brindan al especialista en suelos una herramienta para llevar a cabo un análisis preliminar y aproximado de los parámetros de compresibilidad del sitio en estudio.
- Para la aplicación confiable de las correlaciones en un sitio en particular, es fundamental que sus condiciones geotécnicas sean similares a las del lugar en donde se han obtenido.
- Comparando los resultados de las correlaciones presentadas, para obtener λ se ha demostrado que la relación de vacíos presentó mejor relación, con un coeficiente de correlación de **0.86** y la siguiente ecuación:

$$\lambda = 0.3132e - 0.1206$$

- El uso de correlaciones empíricas entre los parámetros de compresibilidad y las propiedades índice permite estimar en forma aproximada el valor del asentamiento que se producirá en el sitio de estudio.
- Las correlaciones presentadas nunca deberán emplearse en cálculos y estudios definitivos pues para ellos se requieren determinaciones directas mediante ensayos específicos de los parámetros de compresibilidad.

- El alto contenido de salinidad en el agua intersticial del suelo del ex-Lago de Texcoco provoca que algunas de las propiedades índice presenten variabilidad con respecto a los valores típicos que se obtienen en los ensayos de laboratorio, por lo que si se llegara a realizar correcciones a dichas propiedades resultaría impráctico debido a que implicaría realizar hipótesis de los valores involucrados.

Referencias

- Abdrabbo, F., & Mahmoud, M. (1990). Correlations between index tests and compressibility of egyptian clays. *Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Vol. 30 No. 2, 128-132.
- Acevedo Valle, M. E. (2014). *Determinacion experimental del indice de compresion en las arcillas del Valle de Mèxico y la relacion que guarda con las propiedades indice*. Mexico. D.F: Tesis para obtener el grado de ingeniera civil, Facultad de Ingenieria, Universidad Nacional Autonoma de Mexico.
- Acevedo Valle, M. E. (2014). *Determinación experimental del índice de compresión en las arcillas del Valle de México y la relación que guarda con las propiedades índice*. México. D.F: Tesis para obtener el grado de ingeniera civil, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México.
- Alanís, R. G. (2003). *Caracterización geotécnica del ex-Lago de Texcoco*. México D.F: Tesis para obtener el grado de Maestro en Ingeniería. Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México.
- Al-Khafaje, A., W., N., & Andersland, O. B. (1992). *Geotechnical Engineering and Soil Testing*. Nueva York: Oxford University Press.
- Barnes, G. (2000). *Soil mechanics: principles and practice*. Nueva York: Palgrave.
- Budhu, M. (2010). *Soil mechanics and foundations 3rd. Edition*. United States of America: John Wiley & Sons.
- Carter, M., & et al . (1991). *Correlations of soil properties*. London: Pentech Press.
- Das Braja, M. (2001). *Principles of geotechnical engineering*. Nueva York.: International Thomson Publishing.
- Das, B. M. (1999). *Fundamentos de Ingeniería Geotécnica*. México: Thosom Learning.

- Díaz-Rodríguez, J. A. (2014). *Mecánica de Suelos. Naturaleza y propiedades*. México: Trillas.
- Flores Castrellón, O. (2009). *Apuntes del laboratorio de mecánica de suelos*. Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, México: Documento no publicado.
- Franco, E. G. (2007). *"Comportamiento Visco-Plástico del suelo en pruebas de consolidación a velocidad de desplazamiento constante, aplicadas a la determinación de la permeabilidad"*. México: Tesis para obtener el Grado de Maestro en Ingeniería, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México.
- Graue, R., & J. Marsal, R. (1969). *El subsuelo del Lago de Texcoco, El hundimiento de la Ciudad de México proyecto Texcoco, Secretaría de Hacienda y Crédito Público*. México.
- Karl, S., & et al. (1993). Compression Characteristics and index properties of tills and intertill clays in southern Saskatchewan-Canada. *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 30.
- Leoni J., A. (25 de Abril de 2008). *Geotecnia I -guía práctica para el seguimiento de las clases teóricas: consolidación de suelos*. Obtenido de <http://www.ing.unlp.edu.ar/constr/g1/Capitulo%205%20Consolidacion%20de%20suelos.pdf>
- Lizeth, A. C. (2013). *Influencia de las propiedades en el índice de compresión en las arcillas del Valle de México*. México: Tesis para obtener el grado de Maestro en Ingeniería, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México.
- Maturana Franco, E. O., & et al. (1994). *Correlación entre el índice de compresión y el límite líquido para limos y arcillas provenientes del Batolino Antioqueño en el Municipio de Santuario*. Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín: Tesis para obtener el título de Ingeniero Civil.
- Mazari, M. (1990). *Problemas de la Cuenca de México*. México.

Mooser, F. (1963). *La cuenca lacustre del Valle de México*. México: Mesas Redondas sobre Problemas del Valle de México, Instituto Mexicano de Recursos Naturales Renovables, A. C.

Santoyo V., E., & et. al. (2005). *Síntesis Geotécnica de la Cuenca del Valle de México*. Ciudad de México: TGC Geotecnia S. A. de C. V.

Sridharan, A., & H B, N. (2000). Compressibility behaviour of remoulded finegrained soils and correlation with index properties. *Canadian Geotechnical Journal*.

ANEXO A

Anexo A Tabla de las Propiedades Índice (ASA LAGO y T2)

Tabla A1. Propiedades Índice de las muestras ASA LAGO Y T2.

| No. muestra | Origen | Profundidad (m) | W _L (%) | W _p (%) | PI (%) |
|-------------|----------|-----------------|--------------------|--------------------|---------|
| 1 | ASA LAGO | 2Mi-M1 | 229.770 | 44.320 | 185.450 |
| 2 | ASA LAGO | 2Mi-M3 | 324.740 | 100.890 | 223.850 |
| 3 | ASA LAGO | 2Mi-M4 | 204.230 | 65.360 | 138.870 |
| 4 | ASA LAGO | 4Mi-M3 | 223.180 | 82.180 | 141.000 |
| 5 | ASA LAGO | 4Mi-M4 | 233.540 | 62.740 | 170.800 |
| 6 | ASA LAGO | 4Mi-M5 | 165.750 | 39.170 | 126.580 |
| 7 | ASA LAGO | 3Mi-M3 | 222.460 | 92.060 | 130.400 |
| 8 | ASA LAGO | 6Mi-M2 | 292.810 | 91.160 | 201.650 |
| 9 | ASA LAGO | 6Mi-M3 | 280.990 | 58.680 | 222.310 |
| 10 | ASA LAGO | 6Mi-M4 | 223.890 | 59.330 | 164.560 |
| 11 | ASA LAGO | 6Mi-M5 | 235.350 | 54.010 | 181.340 |
| 12 | ASA LAGO | 6Mi-M6 | 236.990 | 75.280 | 161.710 |
| 13 | T2 | 1N T2 M16 | 317.980 | 157.680 | 180.030 |
| 14 | T2 | 1N T2 M24 | 341.060 | 1.290 | 339.770 |
| 15 | T2 | 1N T2 M31 | 242.090 | 84.460 | 157.630 |
| 16 | T2 | 1N T2 M41 | 192.280 | 108.910 | 83.370 |

Nota: W_L, límite líquido; W_p, límite plástico; PI, índice de plasticidad

Tabla A2 Relaciones volumétricas muestras analizadas

| No. muestra | Origen | Profundidad (m) | Gs | W ₀ | e |
|-------------|----------|-----------------|-------|----------------|--------|
| 1 | ASA LAGO | 2Mi-M1 | 2.890 | 213.400 | 6.267 |
| 2 | ASA LAGO | 2Mi-M3 | 3.150 | 262.770 | 8.311 |
| 3 | ASA LAGO | 2Mi-M4 | 2.990 | 209.600 | 6.327 |
| 4 | ASA LAGO | 4Mi-M3 | 3.180 | 202.480 | 5.184 |
| 5 | ASA LAGO | 4Mi-M4 | 3.310 | 182.280 | 5.947 |
| 6 | ASA LAGO | 4Mi-M5 | 2.770 | 108.430 | 3.104 |
| 7 | ASA LAGO | 3Mi-M3 | 2.830 | 201.290 | 6.592 |
| 8 | ASA LAGO | 6Mi-M2 | 3.220 | 301.960 | 6.864 |
| 9 | ASA LAGO | 6Mi-M3 | 3.320 | 246.750 | 8.385 |
| 10 | ASA LAGO | 6Mi-M4 | 3.150 | 166.770 | 6.070 |
| 11 | ASA LAGO | 6Mi-M5 | 3.420 | 181.210 | 6.379 |
| 12 | ASA LAGO | 6Mi-M6 | 2.790 | 119.690 | 3.478 |
| 13 | T2 | 1N T2 M16 | 2.520 | 361.700 | 9.562 |
| 14 | T2 | 1N T2 M24 | 2.480 | 320.540 | 10.400 |
| 15 | T2 | 1N T2 M31 | 2.650 | 333.590 | 6.440 |
| 16 | T2 | 1N T2 M41 | 2.460 | 200.340 | 7.265 |

Nota: Gs, densidad de sólidos; e, relación de vacíos; W₀, contenido de agua.

ANEXO B

ANEXO B Curvas de compresibilidad (ASA LAGO y T2)

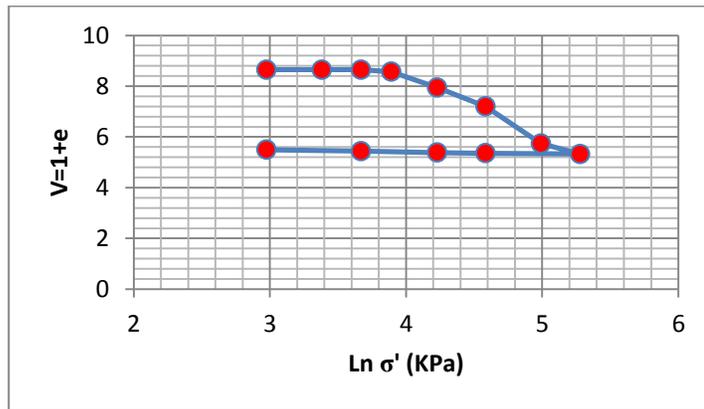


Figura B1. Curva de compresibilidad 1: Volumen específico vs esfuerzo vertical (KPa), $\lambda = 2.094$

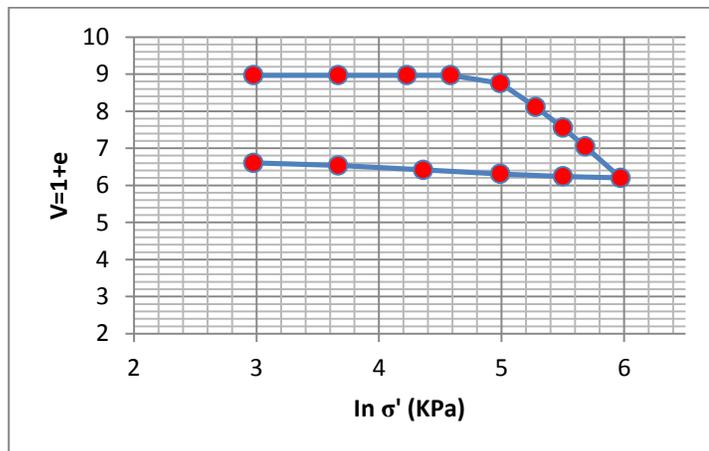


Figura B2. Curva de compresibilidad 2: Volumen específico vs esfuerzo vertical (KPa), $\lambda = 2.601$

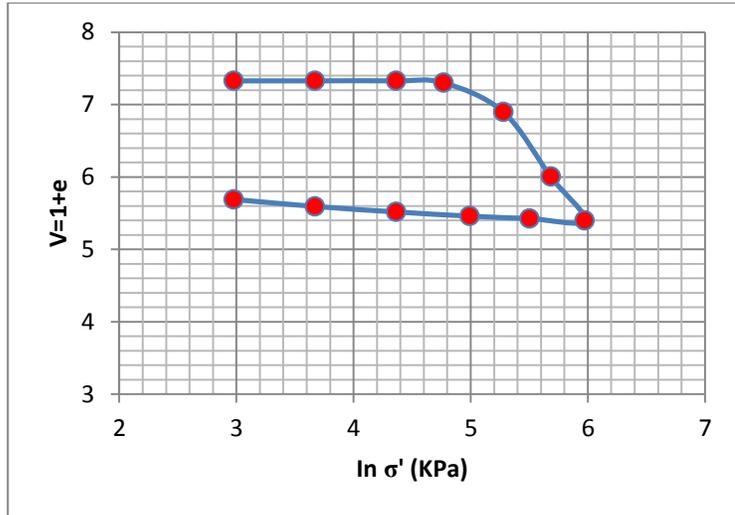


Figura B3. Curva de compresibilidad 3: Volumen específico vs esfuerzo vertical (KPa), $\lambda = 2.096$

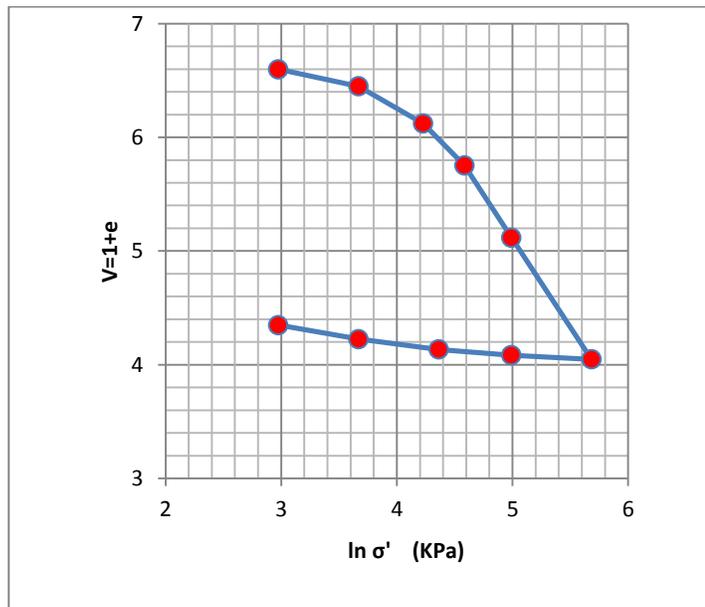


Figura B4. Curva de compresibilidad 4: Volumen específico vs esfuerzo vertical (KPa), $\lambda = 1.553$

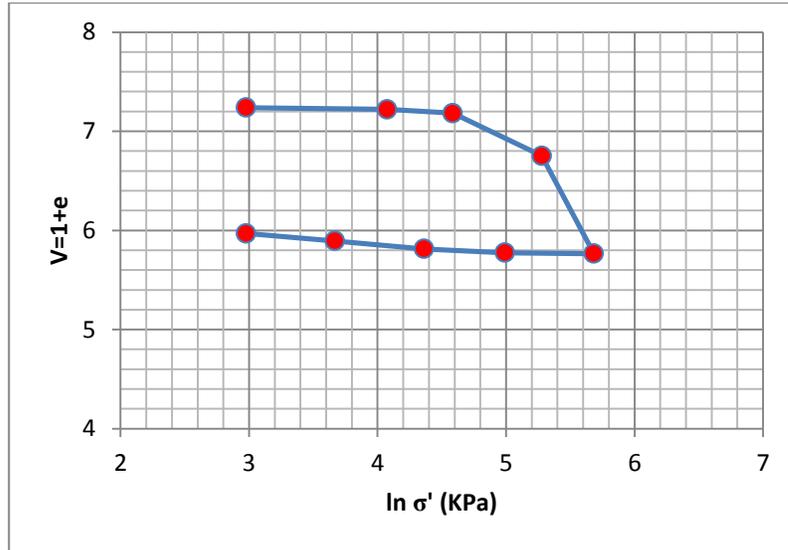


Figura B5. Curva de compresibilidad 5: Volumen específico vs esfuerzo vertical (KPa), $\lambda = 2.434$

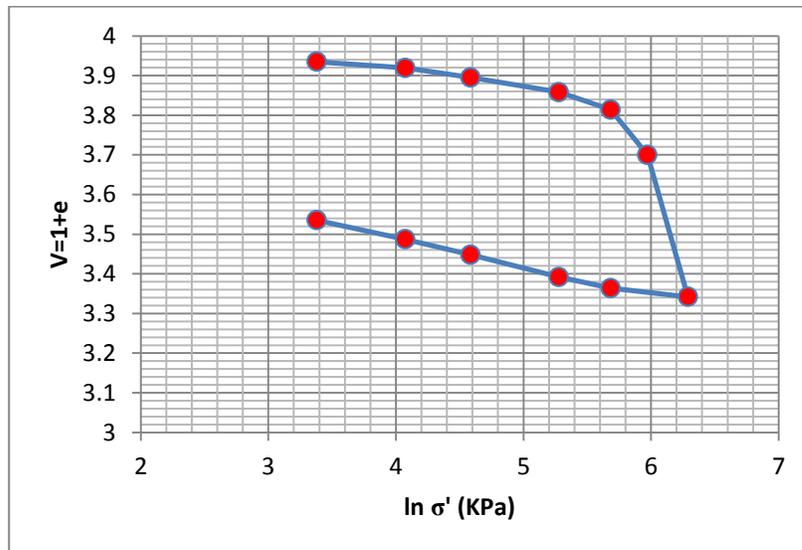


Figura B6. Curva de compresibilidad 6: Volumen específico vs esfuerzo vertical (KPa), $\lambda = 1.124$

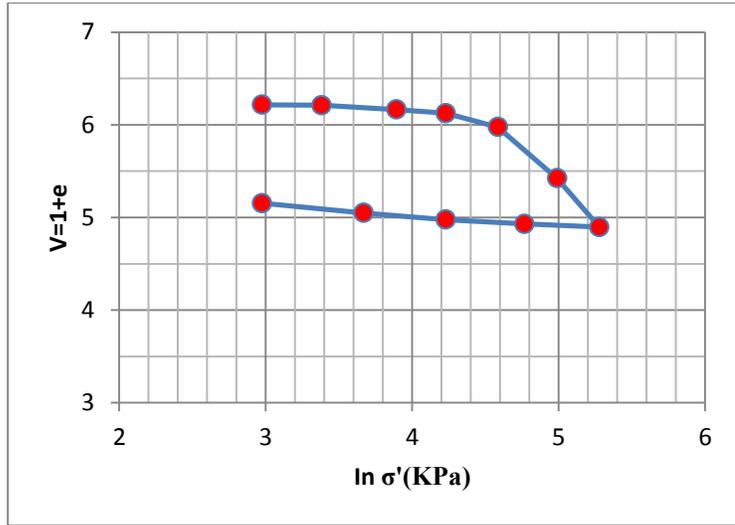


Figura B7. Curva de compresibilidad 7: Volumen específico vs esfuerzo vertical (KPa), $\lambda=1.835$

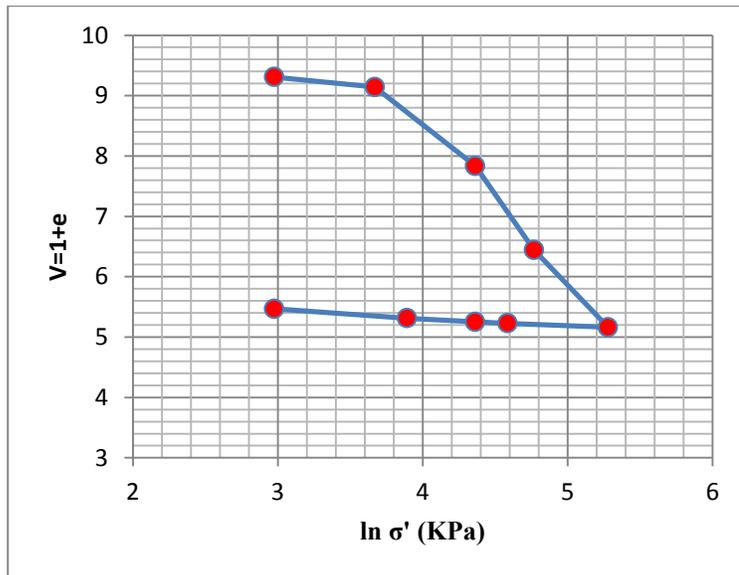


Figura B8. Curva de compresibilidad 8: Volumen específico vs esfuerzo vertical (KPa), $\lambda=2.512$

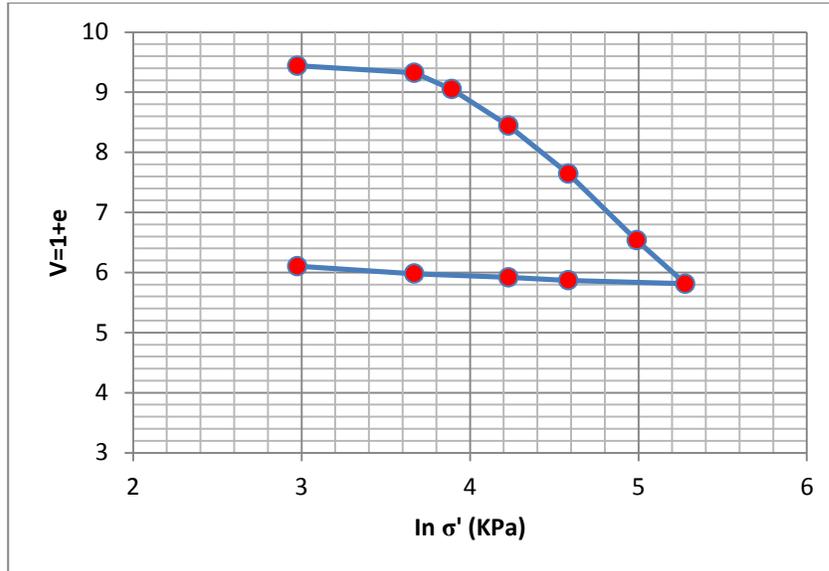


Figura B9. Curva de compresibilidad 9: Volumen específico vs esfuerzo vertical (KPa), $\lambda=2.254$

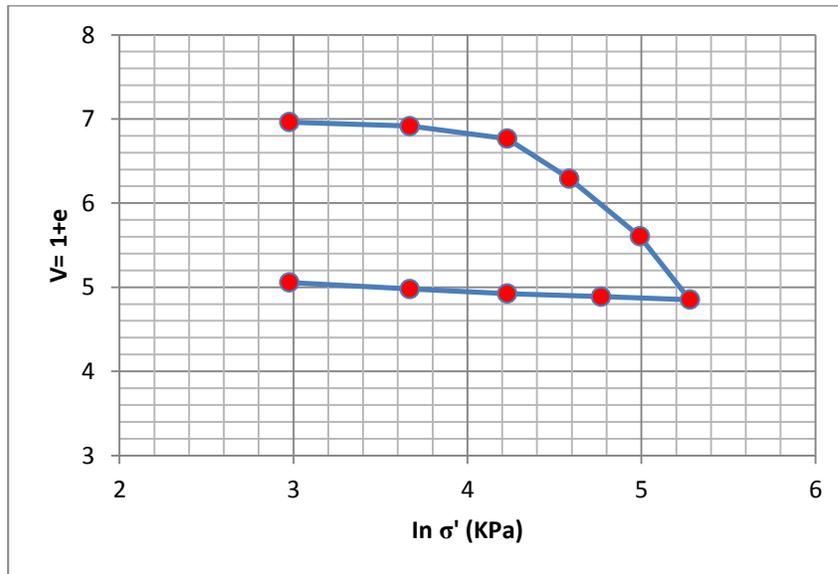


Figura B10. Curva de compresibilidad 10: Volumen específico vs esfuerzo vertical (KPa), $\lambda=1.694$

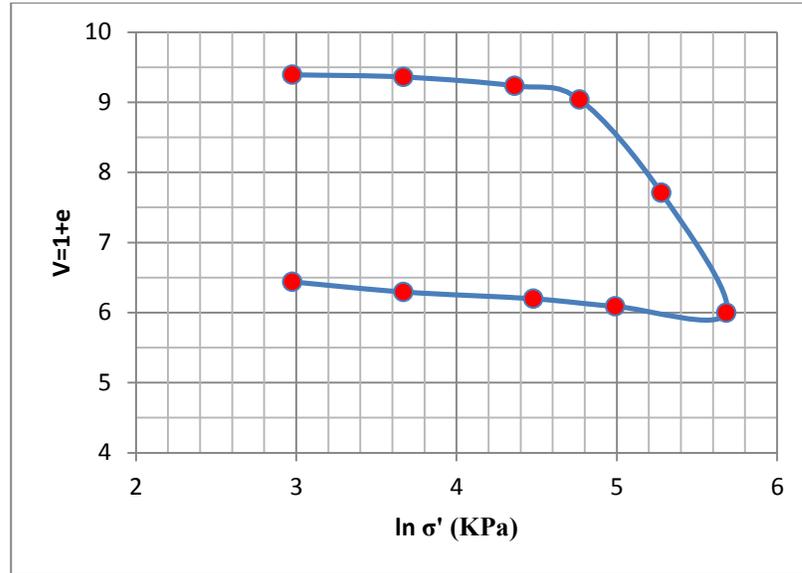


Figura B11. Curva de compresibilidad 11: Volumen específico vs esfuerzo vertical (KPa), $\lambda=2.608$

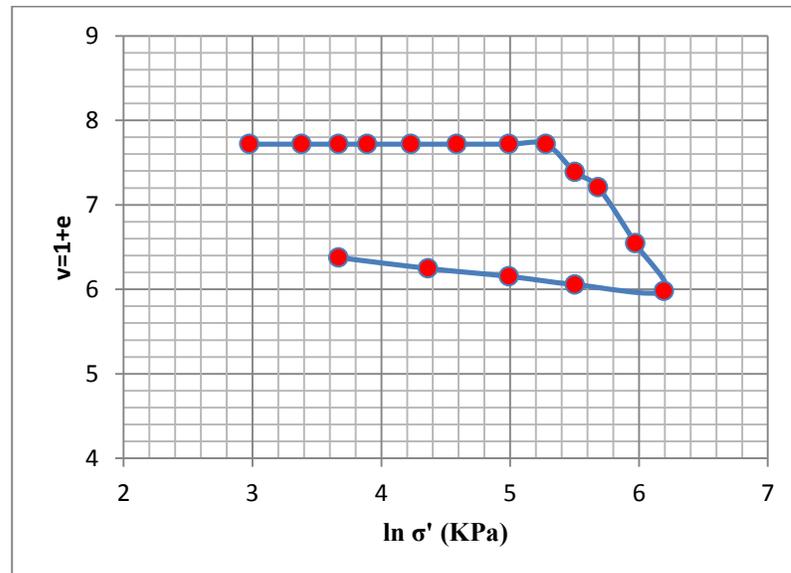


Figura B12. Curva de compresibilidad 12: Volumen específico vs esfuerzo vertical (KPa), $\lambda=2.4$

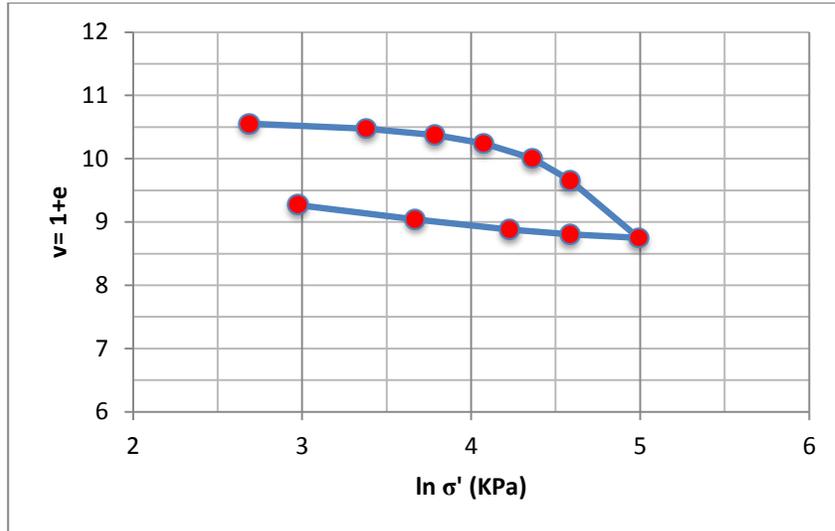


Figura B13. Curva de compresibilidad 13: Volumen específico vs esfuerzo vertical (KPa), $\lambda=2$

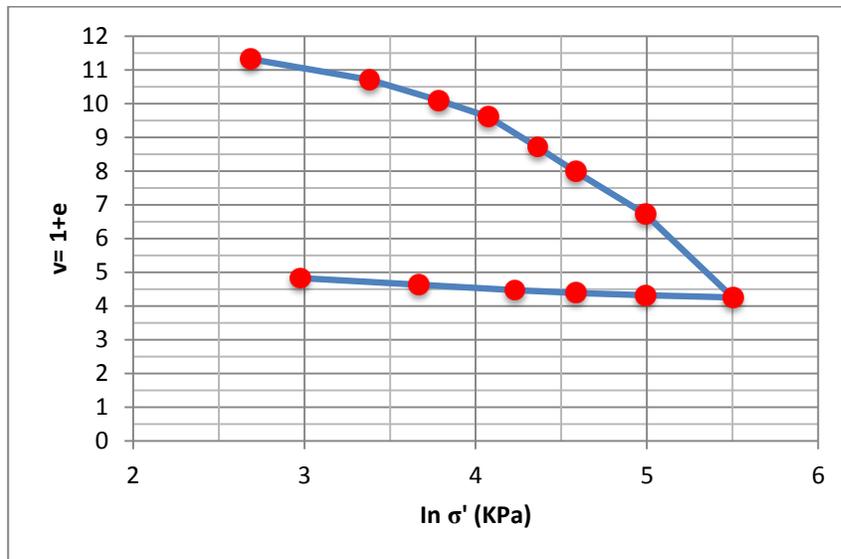


Figura B14. Curva de compresibilidad 14: Volumen específico vs esfuerzo vertical (KPa), $\lambda=3.154$

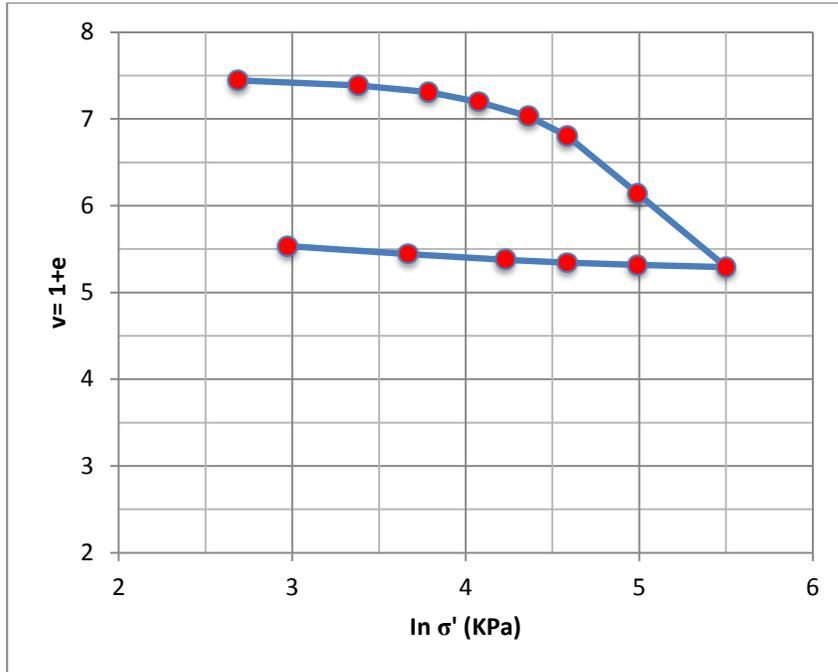


Figura B15. Curva de compresibilidad 15: Volumen específico vs esfuerzo vertical (KPa), $\lambda=1.646$

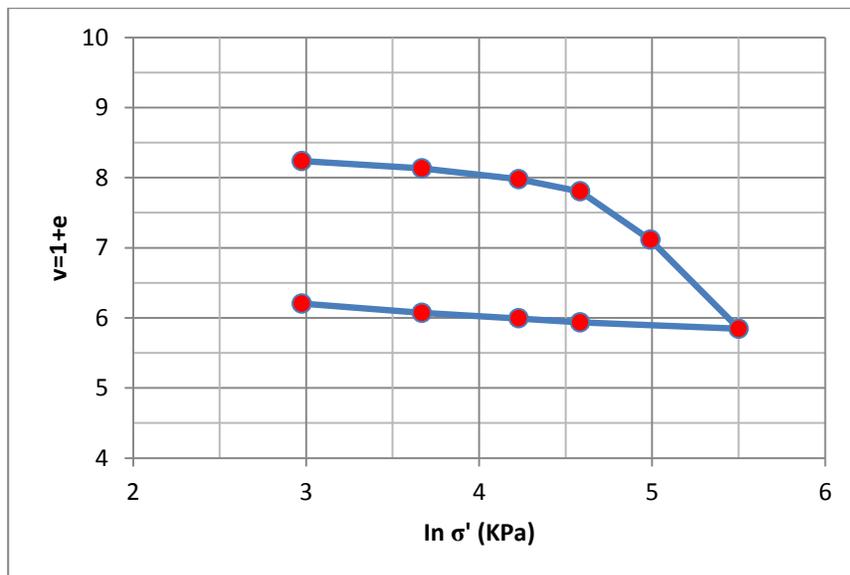


Figura B16. Curva de compresibilidad 16: Volumen específico vs esfuerzo vertical (KPa), $\lambda=2.139$

ANEXO C

Anexo C Tabla del contenido de agua, W_o (%). (ASA LAGO y T2)

Tabla C1. Contenido de agua, W_o (%) de ASA LAGO Y T2.

| No. Mta | Origen | Profundidad | w(%) | w'(%) |
|---------|---|-------------|--------|--------|
| 1 | Instituto de Ingenieria (Muestras ASA LAGO) | 2Mi-M1 | 213.4 | 280.33 |
| 2 | | 2Mi-M3 | 262.77 | 376.24 |
| 3 | | 2Mi-M4 | 209.6 | 284.87 |
| 4 | | 4Mi-M3 | 202.48 | 292.68 |
| 5 | | 4Mi-M4 | 182.28 | 274.25 |
| 6 | | 4Mi-M5 | 108.43 | 136.52 |
| 7 | | 3Mi-M3 | 201.29 | 258.93 |
| 8 | | 6Mi_M2 | 301.96 | 441.96 |
| 9 | | 6Mi-M3 | 246.75 | 372.37 |
| 10 | | 6Mi-M4 | 186.77 | 267.42 |
| 11 | | 6Mi-M5 | 181.21 | 281.70 |
| 12 | | 9Mi-M6 | 119.69 | 151.79 |
| 13 | T2 | 1N T2 M16 | 361.7 | 414.31 |
| 14 | | 1N T2 M24 | 320.54 | 361.34 |
| 15 | | 1N T2 M31 | 333.59 | 401.82 |
| 16 | | 1N T2 M41 | 200.34 | 224.02 |

Nota: w (%), contenido de agua; w'(%), contenido de agua corregido.