



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
MAESTRÍA EN INGENIERÍA CIVIL – GEOTECNIA

EFFECTO DE LOS MICROFÓSILES EN LA COMPRESIBILIDAD DE MEZCLAS
CAOLINITA-DIATOMITA

TESIS
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:
MORENO ARRIAGA ARTURO

TUTOR:
DR. JORGE ABRAHAM DÍAZ RODRÍGUEZ
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
MAESTRÍA EN INGENIERÍA CIVIL – GEOTECNIA

CIUDAD UNIVERSITARIA, CDMX; AGOSTO DE 2018



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



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.

JURADO ASIGNADO:

Presidente: M.I. AGUSTÍN DEMÉNEGHI COLINA

Secretario: DR. JESÚS HUGO MEZA PUESTO

Vocal: DR. JORGE ABRAHAM DÍAZ RODRÍGUEZ

1 er. Suplente: M.I. OMAR G. RAMÍREZ CALDERÓN

2 d o. Suplente: DR. VICTOR JIMÉNEZ ARGÜELLES

Lugar donde se realizó la tesis:

LABORATORIO DE DINÁMICA DE SUELOS, DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE
PODGRADO, FACULTAD DE INGENIERÍA, UNAM.

TUTOR DE TESIS:

DR. JORGE ABRAHAM DÍAZ RODRÍGUEZ

FIRMA

Dedicatoria

A mi madre, por creer en mí en los momentos más importantes de mi vida. A mi padre, por enseñarme el valor del trabajo con su infinita paciencia. A mis hermanos, por ser mis mejores amigos y cómplices. A mi tío Jorge, por su apoyo incondicional.

Agradecimientos

A mi alma mater, la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), por ser la piedra angular en mi formación académica y laboral.

A mi jefe, tutor de tesis y mentor; el Dr. Jorge Abraham Díaz Rodríguez, por su total apoyo para mi crecimiento personal y laboral.

A mis sinodales, por su tiempo, dedicación y asesoría; las cuales enriquecieron el presente trabajo.

Al Ing. Pedro Moreno Carrizales por su apoyo técnico en el laboratorio.

A todos aquellos que de alguna u otra forma contribuyeron con sus consejos y apoyo durante la realización de este proyecto. A todos y cada uno de ustedes, gracias.

ÍNDICE	PÁGINA
Resumen.....	iv
<i>Abstract</i>	v
Palabras clave.....	v
Notación.....	vi
Lista de figuras	viii
Lista de tablas	xi

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

1.1 Objetivo y alcances	3
1.1.1 Objetivo.....	3
1.1.2 Alcances.....	3
1.2 Antecedentes	4
1.3 Consolidación y compresibilidad	5
1.4 Microfósiles	8
1.4.1 Micropaleontología.....	10
1.4.1.1 Observación de los microfósiles.....	11
1.4.2 Microfósiles calcáreos, silícicos y orgánicos.....	12
1.4.2.1 Microfósiles calcáreos.....	14
1.4.2.2 Microfósiles silícicos.....	15
1.4.3 Ostrácodos.....	16
1.4.4 Diatomeas.....	18
1.5 Suelos diatomáceos	24
1.5.1 Microfósiles, formadores de sedimentos.....	25
1.5.2 Sedimentos de diatomeas.....	26
1.6 Suelos arcillosos	27
1.6.1 Estructura.....	29
1.6.2 Caolinita, Illita y montmorillonita.....	30
1.7 El suelo Volcánico-Lacustre de la Ciudad de México	32
1.7.1 Características.....	34
1.7.2 Composición.....	34

CAPÍTULO 2. PROPIEDADES ÍNDICE DE LAS MEZCLAS CAOLINITA-DIATOMITA.

2.1	Introducción	38
2.2	Descripción de los materiales que componen las mezclas	38
2.2.1	Diatomita.....	39
2.2.2	Caolinita.....	43
2.3	Programa experimental	45
2.4	Pruebas para la obtención de las Propiedades Índice	45
2.4.1	Límites de consistencia o de Atterberg.....	46
2.4.2	Contenido de agua.....	51
2.4.3	Densidad de sólidos.....	52
2.4.4	Relación de vacíos.....	53

CAPÍTULO 3. ETAPA EXPERIMENTAL: MEZCLAS CAOLINITA-DIATOMITA.

3.1	Introducción	55
3.2	Medidas de seguridad ante la manipulación de los materiales	55
3.2.1	Peligros de la Exposición a la Tierra de Diatomeas.....	56
3.2.2	Peligros de la Exposición a la Caolinita.....	56
3.2.3	Equipo de seguridad utilizado en la manipulación de los materiales.....	57
3.3	Descripción de los equipos mecánicos	57
3.3.1	Consolidómetro Gigante.....	58
3.3.2	Edómetro o Consolidómetro de Palanca.....	59
3.3.2.1	Prueba con anillo flotante.....	63
3.4	Preparación de mezclas Caolinita – Diatomita (K-D)	63
3.4.1	Mezclado de los materiales.....	64
3.4.2	Llenado del molde para el Consolidómetro Gigante.....	68
3.5	Pre-consolidación de las muestras	70
3.5.1	Montaje en el Consolidómetro Gigante.....	71
3.5.2	Captura de datos.....	72
3.5.3	Descarga, extracción y almacenamiento.....	73
3.6	Consolidación de las mezclas Caolinita- Diatomita (K-D)	76
3.6.1	Ensayo de Consolidación Unidimensional.....	76
3.6.2	Labrado de la probeta.....	77
3.6.3	Montaje de la probeta y aplicación de esfuerzos.....	79
3.6.4	Descarga y extracción de la probeta ensayada.....	82

CAPÍTULO 4. PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS.

4.1 Introducción.....	85
4.2 Propiedades índice.....	85
4.2.1 Límites de Atterberg.....	85
4.2.2 Densidad de sólidos.....	88
4.2.3 Relación de vacíos.....	89
4.3 Compresibilidad.....	90
4.3.1 Comportamiento Esfuerzo – Deformación	90

CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones.....	95
5.2 Recomendaciones para futuras investigaciones.....	95

REFERENCIAS.....	96
-------------------------	-----------

ANEXO: gráficas de consolidación y compresibilidad.....	I a XVII
--	-----------------

RESUMEN:

Los suelos diatomáceos, son aquellos que en su composición contienen microfósiles de diatomeas, los cuales le confieren propiedades físicas y mecánicas fuera de lo convencional. Dichas propiedades están aparentemente ligadas a la porosidad, rugosidad y forma geométrica de los microfósiles. El presente trabajo estudia el comportamiento de mezclas preparadas con una proporción porcentual de diatomeas que va aumentando con respecto al caolín. A la vez que se incrementa el contenido de diatomeas en la mezcla, aumenta su límite líquido y plástico, así como su compresibilidad y actividad; por otro lado, se presenta una disminución en su densidad de sólidos y peso seco unitario. Las pruebas se realizaron con ayuda de un edómetro aplicando esfuerzos con un LIR=1 y un LID= 24 hr, las mezclas se prepararon con un contenido de agua cercano a su límite líquido. El objetivo principal de esta investigación es estudiar las propiedades de compresibilidad de las mezclas artificiales de caolinita-diatomita. Se realizó una serie de ocho ensayos de consolidación unidimensional (la proporción de la diatomita con respecto al caolín fue de: 0%, 5%, 10%, 15%, 20%, 40%, 60% y 100%) para conocer la contribución del contenido de diatomita sobre la compresibilidad de un suelo arcilloso. Existen varias localidades en el mundo donde los microfósiles de diatomeas constituyen una proporción significativa de la composición natural de los depósitos de suelo (por ejemplo, Ciudad de México, México; Osaka Bay, Japón; Ciudad de Bogotá, Colombia; California, EU). Los depósitos naturales de suelos que contienen diatomeas, tienen propiedades mecánicas e índice singulares que no siguen las bien establecidas ecuaciones empíricas, relacionándose las propiedades índice con los parámetros de resistencia y deformación. Teniendo en cuenta la presencia de microfósiles de diatomeas en los sedimentos de la Ciudad de México, se tratará de explicar el comportamiento de dicho suelo con base en los resultados de esta investigación.

ABSTRACT:

The diatomaceous soils are those that in their composition contain microfossils of diatoms, which give them physical and mechanical properties, outside the conventional. These properties are apparently linked to the porosity, roughness and geometric shape of the microfossils. The present work contemplates mixtures prepared with a percentage proportion of diatoms that increases with respect to the kaolin, as the diatom content increases to the mixture, increases its liquid and plastic limit, as well as its compressibility and activity; On the other hand a decrease in its specific gravity and unit dry weight. The tests were performed with odometer with an application of LIR = 1 and LID = 24 hr., the mixtures were with a water content close to its liquid limit. The focus of this investigation is the compressibility properties of diatomite-kaolinite artificial mixtures. A series of eight one-dimensional consolidation tests was carried out to know the contribution of the diatomite content on the compressibility of a clayey soil. There are several (localities in the world where diatom microfossils constitute a significant proportion of the natural composition of the soil deposits (e.g., Mexico City, Mexico; Osaka Bay, Japan; Bogota City, Colombia; California, USA, and others). These natural soil deposits have singular index and mechanical properties that do not follow the well-established empirical equations, relating index properties with strength and deformation parameters. Taking into account the presence of diatom microfossils in Mexico City sediments, some of their unique engineering properties could be well explained, based on the results of this investigation.

Palabras clave: mezclas caolín-diatomita, diatomeas, ostrácodos, microfósiles, caolinita, compresibilidad, consolidación, suelo volcánico lacustre de la Ciudad de México.

NOTACIÓN

Símbolo	Descripción	Unidad
Å	Amnstrongs	µm
a_v	Coefficiente de compresibilidad	-
C_c	Índice de compresión	-
C_v	Coefficiente de consolidación	-
D	Diatomita (<i>diatomite</i>)	-
D-K	Mezcla Diatomita-Caolinita (<i>Diatomite-Kaolinite</i>)	-
CDMX	Ciudad de México	-
e	Relación de vacíos	-
e_{crit}	Relación de vacíos crítica	-
e_{max}	Relación de vacíos máxima	-
e_{min}	Relación de vacíos mínima	-
G_s	Densidad de sólidos	-
g	Gramos	g
hr	Horas	hr
in	Pulgadas	in
I_p	Índice de plasticidad	-
K_0	Coefficiente de empuje de tierras en reposo	-
K	Permeabilidad	m/s
K	Caolinita (<i>kaolinite</i>)	-
L, l	Longitud	m
LIR	Relación de incremento de esfuerzos	-
LID	Duración del incremento de esfuerzo	hr
m	Metros	m
mm	Milímetros	mm
m_v	Coefficiente de variación volumétrica	-
n	Porosidad	-
N	Fuerza normal	kPa
N	Newton	N
OCR	Relación de preconsolidación	-
%	Porcentaje	%
Pa	Pascales	Pa
s	Segundos	s
S	Grado de saturación	%
SEA	Sociedad Española de Arcillas	-
T	Tiempo	s
T_v	Factor de tiempo	-
U	Grado de consolidación	%
V	Volumen	m ³
V_a	Volumen de aire	m ³
V_s	Volumen de sólidos	m ³
V_v	Volumen de vacíos	m ³
V_w	Volumen de agua	m ³

ΔV	Cambio de volumen	m^3
v	Volumen específico	m^3
W	Peso del suelo	gr
W_s	Peso de sólidos	gr
W_w	Peso de agua	gr
w	Contenido de agua	%
w_s	Límite de contracción	%
w_L	Límite líquido	%
w_P	Límite plástico	%
γ	Peso unitario	kN/m^3
γ_d	Peso unitario seco	kN/m^3
γ_w	Peso unitario del agua	kN/m^3
ε	Deformación axial	%
ρ	Densidad	kg/m^3
σ	Esfuerzo normal	kPa
σ'_y	Esfuerzo de fluencia	kPa
u	Presión de poro	kPa

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1.4.1 Microfósil (Díaz-Rodríguez, *et al.*, 1998)
- Figura 1.4.2 Nanofósiles (a) y microfósiles (b)
- Figura 1.4.3 Microscopio electrónico de barrido
- Figura 1.4.4 Microfósil calcáreo
- Figura 1.4.5 Microfósil silíceo
- Figura 1.4.6 Microfósil orgánico
- Figura 1.4.7 Ostrácodos vivos. (A) 1.4 mm, (B) hembra con huevecillos, 19 mm, (C) Ostrácodo no marino, Japón
- Figura 1.4.8 Morfología de las partes blandas de un ostrácodo
- Figura 1.4.9 Diferentes morfologías de un microfósil de diatomea
- Figura 1.4.10 Visualización de la frústula que compone una diatomea
- Figura 1.4.11 Morfología y simetría: dos grupos a) Radial- CENTRALES. b) Bilateral- PENNALES
- Figura 1.4.12 Areolas, estrías y rafe. a) estrías y aureolas, b) rafe
- Figura 1.6.1 Diferentes estructuras
- Figura 1.6.2 Estructura de la Caolinita
- Figura 1.6.3 Apilamiento de láminas de caolinita
- Figura 1.6.4 Estructura de la Montmorillonita e Illita
- Figura 1.7.1 La Cuenca de México: a) antiguo cuerpo de agua de 2000 km², b) Antiguos lagos de la Cuenca de México y ríos alimentándose
- Figura 2.2.1 Principales yacimientos de diatomita en la República Mexicana
- Figura 2.2.2 Los principales estados productores de caolín en México
- Figura 2.4.1 Estados de un suelo y sus límites de consistencia
- Figura 2.4.2 Copa de Casagrande
- Figura 2.4.3 Prueba del cono de penetración
- Figura 2.4.4 Rollo de suelo para la obtención del límite plástico
- Figura 2.4.5 Relación entre fases de una muestra de suelo

LISTA DE FIGURAS (Continuación)...

Figura 3.2.1 Equipo de seguridad utilizado

Figura 3.3.1 Consolidómetro gigante

Figura 3.3.2 Esquema de un edómetro típico

Figura 3.3.3 Diagrama de esfuerzo de un edómetro típico

Figura 3.3.4 Configuración de una prueba de consolidación con anillo flotante

Figura 3.4.1 Peso de la mezcla en seco con respecto al aumento de diatomita

Figura 3.4.2 Ejemplo para utilizar la gráfica “Peso seco de la Mezcla”

Figura 3.4.3 Recubrimiento del recipiente durante su reposo

Figura 3.4.4 Mezclado de los materiales

Figura 3.4.5 Llenado del cilindro

Figura 3.4.6 Molde lleno

Figura 3.5.1 Montaje del cilindro en el consolidómetro gigante

Figura 3.5.2 Diagrama del Sistema de adquisición de datos

Figura 3.5.3 Extracción de la muestra después de la pre-consolidación

Figura 3.5.4 Mezcla recubierta para su almacenamiento

Figura 3.6.1 Muestra contenida en el anillo

Figura 3.6.2 Corte de la mezcla pre-consolidada

Figura 3.6.3 Mezcla almacenada en anillos pre-cortados

Figura 3.6.4 Labrado de la probeta

Figura 3.6.5 Probeta contenida en el anillo flotante

Figura 3.6.6 Arreglo de la probeta

Figura 3.6.7 Ejecución de la prueba

Figura 3.6.8 Diagrama de un edómetro en funcionamiento

Figura 3.6.9 Diagrama del Sistema de adquisición de datos (2)

Figura 3.6.10 Extracción de la probeta

LISTA DE FIGURAS (Continuación)...

Figura 4.2.1 Límite líquido

Figura 4.2.2 Índice de plasticidad

Figura 4.2.3 Densidad de sólidos de las mezclas

Figura 4.2.4 Relación de vacíos inicial en las mezclas

Figura 4.2.5 Deformación Volumétrica vs Esfuerzo efectivo

Figura 4.2.6 Índice de compresibilidad

Figura 4.2.7 Índice de compresibilidad de Shiwakoti

Figura 4.2.8 Deformación volumétrica vs contenido de diatomita

LISTA DE TABLAS

Tabla 1.4.1 Biocrón conocido de los microfósiles más comunes

Tabla 1.4.2 Distribución estratigráfica de algunos géneros de diatomeas

Tabla 1.6.1 Límites de tamaño de partículas

Tabla 2.3.1 Mezclas Diatomita-Caolinita (D-K)

Tabla 2.4.1 Rango de valores límite de los minerales de arcilla

Tabla 2.4.2 Características de los conos más utilizados

Tabla 2.4.3 Densidad de sólidos de minerales de arcilla

Tabla 3.5.1 Incrementos en Consolidómetro Gigante

Tabla 4.2.1 Límites de consistencia de cada mezcla

Tabla 4.2.2 Comparativa de tesis anteriores con la actual

Tabla 4.2.3 Valores de la deformación volumétrica contra esfuerzo efectivo

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

INTRODUCCIÓN.

El suelo de la Ciudad de México (CDMX), es uno de los suelos más atípicos, debido a sus características y comportamiento único, presentando un ángulo de fricción interna de 43° , un contenido de agua de entre 400% hasta 600% y un índice de plasticidad y compresibilidad alto, en comparación a la mayoría de los suelos, (Lo, 1962; Mesri *et al*, 1975; Díaz-Rodríguez *et al* 1992, 1998). Es por ello que varios investigadores se han dado a la tarea de responder por qué este suelo es tan particular y cuál es la causa de éstas características únicas. Es importante destacar que, en sus inicios constructivos, se desconocía de que estaba compuesto el suelo.

Los aztecas en el año 1325 fundaron la gran Ciudad de Tenochtitlan, con el paso del tiempo identificaron la alta compresibilidad del suelo, por ello sus edificaciones se encuentran sobre pilotes de madera (Enciso de la Vega, 1980) los cuales ayudaron en gran medida a evitar el hundimiento de sus templos. A pesar de éstas precauciones, presentaron considerables asentamientos, un ejemplo es “Templo Mayor” (*Huey Teocalli*, Templo principal en náhuatl). De acuerdo a los trabajos del arqueólogo Matos Moctezuma, posiblemente estemos ante una de las edificaciones con mayor asentamiento registrado. La observación está fundamentada debido a que los españoles destruyeron las edificaciones a nivel de piso, dejando hasta la segunda etapa debajo del nivel de terreno.

En 1985 Mazari, Marsal y Alberro; presentan un detallado informe acerca del asentamiento de “Templo Mayor”, en dicho artículo muestran una gráfica del registro de asentamientos presentados durante prácticamente todo el siglo XX, de la zona del lago de Texcoco, así como de la zona centro de la CDMX, en ella se puede constatar que los asentamientos se deben principalmente a dos motivos: la extracción de agua del subsuelo y a la alta compresibilidad del mismo. Justo es aquí en donde surge la mayor pregunta. ¿A qué se debe la alta compresibilidad en el subsuelo lacustre de la CDMX?

Propiamente sería complejo responder ésta pregunta, pero un enfoque se tiene en el contenido de microfósiles del subsuelo de la CDMX. Mesri, Marsal, Zeevaert, entre otros; manifestaron la presencia de microfósiles en el subsuelo de la CDMX.

Los microfósiles son de ostrácodos y en mayor medida nanofósiles de diatomeas.

❖ 1.1 Objetivo y alcances.

• 1.1.1 Objetivo.

Estudiar el comportamiento en compresión unidimensional de las mezclas de Caolín-Diatomita. Se fabricaron 8 mezclas, las cuales corresponderán a 100% Caolinita (K), 5% Diatomea (D) – 95K, 10D – 90K, 15D – 85K, 20D – 80K, 40D – 60K, 60D – 40K y 100D. Obtener sus propiedades índice.

Con los resultados de cada ensayo realizado en laboratorio, se obtendrá una posible tendencia del comportamiento con respecto al aumento porcentual de diatomita, enfocado a la influencia que tienen los nanofósiles en la compresibilidad de las mezclas.

• 1.1.2 Alcances.

El suelo de la CDMX se caracteriza por estar compuesto de arcilla del tipo Montmorillonita (en nuestro estudio utilizaremos caolinita), que contiene bases de hierro e illita, además de un gran número de componentes; por ello sería imposible pensar que, a través de las mezclas antes mencionadas, lo reproduzcamos. Por lo anterior, nuestro estudio solo se limita a la interpretación de la compresibilidad entre una arcilla del tipo caolinita y los nanofósiles, concretamente de diatomeas y mostrar un análisis de resultados con base en el aumento porcentual de

nanofósiles en la mezcla, enfocado a sus propiedades índice y a las pruebas de consolidación.

❖ 1.2 Antecedentes.

En el mundo hay una gran cantidad de depósitos naturales de microfósiles, la mayoría de ellos de tipo marino y lacustre. El suelo de la Ciudad de México ha sido estudiado desde hace más de medio siglo por reconocidos investigadores, los cuales han aportado grandes descubrimientos acerca de su comportamiento, desde el punto de vista geotécnico. **Zeevaert en 1949, Marsal en 1959**, así como **Lo en 1962 y Mesri en 1975** y más recientemente **Díaz-Rodríguez**; éstos investigadores han contribuido con trabajos que ponen al Suelo de la Ciudad de México, como uno de los más estudiados desde el aspecto geotécnico.

El suelo de la Ciudad de México está compuesto hasta de un 65% de diatomeas, siendo éstas las que le dan un comportamiento completamente atípico. Éstas propiedades únicas han llamado la atención de varios investigadores, los cuales han encontrado, un contenido natural de agua (w) de hasta 600%, un índice de plasticidad (I_P) cercano a 350%, un índice de compresibilidad (C_c) de hasta 10, así como una densidad de sólidos baja y el ángulo de fricción interna con un valor máximo de 47° (Lo 1962; Mesri *et al.* 1975; Díaz- Rodríguez *et al.* 1992; Díaz - Rodríguez *et al.* 1998).

Uno de los primeros artículos en mencionar el alto ángulo de Fricción interna es **Lo** en 1962, ya sea en condición remoldeada o inalterada. Menciona que el valor de 47° medido, es comparable en magnitud a las de arenas y gravas, siendo inesperadamente alto.

Mesri en 1975, realiza un estudio de composición del suelo de la CDMX. El análisis indicó que se tiene de 5 a 10% de partículas de tamaño arena (<4.76 mm), la mayoría de las cuales son oolitos* (*pequeñas esferas carbonatadas de

origen sedimentario) calcáreos; de 55 a 65% se compone de microfósiles silíceos de tamaño limo, en su mayoría diatomeas; del 20 a 30% está compuesto de partículas tamaño arcilla, de los cuales un 10% estimado es esmectita (montmorillonita) y el resto sílice biogénico (formados primariamente a partir de los remanentes de organismos marinos) y volcanogénico (los cuales son el resultado de actividad volcánica); el restante 5 a 10% se compone de materia orgánica.

El presente trabajo muestra una serie de pruebas de compresibilidad, las cuales nos ayudan a visualizar el comportamiento de los suelos a medida que el contenido de microfósiles va en aumento. Como ya se mencionó, es prácticamente imposible lograr una representación exacta de cada suelo, pero podríamos hacer una comparativa con base en el porcentaje de microfósiles encontrado en dicho suelo y con la mezcla artificial más cercana.

❖ **1.3 Consolidación y compresibilidad.**

∇ **Consolidación.**

Cuando un estrato de suelo saturado está sometido a un incremento de esfuerzos, la presión de poro aumenta repentinamente. En suelos arenosos que son altamente permeables, el drenaje causado por el incremento en la presión de poro se lleva a cabo inmediatamente. La salida del agua va acompañada por una reducción del volumen de la masa del suelo, generándose un asentamiento. Debido al rápido drenaje del agua de los poros en los suelos arenosos, el asentamiento inmediato y la consolidación se efectúan simultáneamente. Sin embargo, no es el caso para suelos arcillosos, ya que tienen baja permeabilidad y su asentamiento por consolidación depende del tiempo (Braja, 2001).

El asentamiento total generalmente consta de tres partes: compresión inmediata o elástica, consolidación primaria y compresión secundaria (este trabajo de tesis está enfocado a la consolidación primaria o simplemente consolidación):

- (1) La compresión inicial tiene lugar casi simultáneamente con la aplicación de un incremento de carga en una prueba de consolidación y antes de comenzar el drenaje. Esto se debe a la compresión de pequeñas bolsas de gas dentro de los espacios y en parte a las superficies de contacto en la celda y en el marco de la carga. Una pequeña proporción se debe a la compresión elástica, que es recuperable cuando se elimina la carga. Esta fase es responsable de una desviación de la curva teórica cerca del comienzo de un incremento de carga. En suelos relativamente rígidos altamente permeables, la inclusión de algo de drenaje, es decir, consolidación, es inevitable durante esta fase.

- (2) La consolidación es la compresión dependiente del tiempo debido a la disipación del exceso de presión de poro bajo carga, y se explica por la teoría de consolidación de Terzaghi. Si el suelo tiene acceso al agua cuando se elimina la carga, puede producirse una pequeña recuperación (hinchazón, sobre todo en arcillas expansivas como la bentonita). Esta fase se relaciona estrechamente con la curva teórica para la mayoría de las arcillas.

- (3) La compresión secundaria continúa después de que la presión de poro en exceso de la fase primaria se haya disipado. El mecanismo es complejo, pero se cree que la compresión secundaria se debe al continuo movimiento de las partículas a medida que la estructura del suelo se ajusta al esfuerzo efectivo cada vez mayor. La compresión secundaria no suele recuperarse al eliminar la carga aplicada, aunque se ha observado hinchazón secundaria, por ejemplo, en las turbas. En muchas aplicaciones, solo la fase de consolidación se usa para la estimación de asentamientos. Para las arcillas inorgánicas suele ser la más significativa de las tres fases, y el establecimiento de la magnitud de la consolidación y de la curva de consolidación-tiempo, junto con los parámetros derivados, son los principales objetivos de una prueba de consolidación de laboratorio. La fase primaria es la única que se puede llamar apropiadamente “consolidación”. Sin embargo, en las turbas y arcillas altamente orgánicas, la

fase de compresión secundaria es de mayor importancia, y si se toma durante un período de tiempo lo suficientemente largo puede exceder la cantidad de consolidación de la fase primaria (Head, 1988).

Bajo cargas, todos los suelos se asentarán, provocando el hundimiento de estructuras. Si el asentamiento no se mantiene en un límite tolerable, el uso deseado de la estructura será afectado y la vida útil de diseño puede verse reducida. Las estructuras llegan a asentarse de manera uniforme o no uniforme. La última condición se llama asentamiento diferencial y es a menudo la consideración de diseño crucial (Budhu, 2010).

▽ **Compresibilidad.**

El asentamiento debido a la compresión unidimensional resulta solamente de la disminución en el volumen de los huecos y puede ser analizado en términos de esfuerzo vertical efectivo.

En un suelo se distinguen tres fases constituyentes: sólida, líquida y gaseosa. La fase sólida está compuesta por partículas minerales, las cuales forman el esqueleto del suelo. Esta estructura forma oquedades que son ocupadas por las fases líquida y gaseosa.

Todos los suelos experimentan deformación a consecuencia de un cambio en las condiciones de esfuerzo. Si las oquedades del suelo están en su totalidad llenas de agua, es decir, si se trata de un suelo saturado, la compresión del suelo se dará como resultado del escape del agua contenida en las oquedades. La compresión gradual de un suelo bajo tales condiciones, cuando actúan sobre él fuerzas gravitatorias tales como las producidas por la misma deposición de los estratos o las estructuras levantadas sobre el suelo, se llama consolidación.

Por lo tanto, la compresibilidad del suelo se debe a la facilidad con la que los granos cambian de posición debido al tipo y rigidez de la estructura del suelo; entendiendo que la estructura del suelo se define, no solo como el arreglo geométrico de sus componentes, sino como el enlace entre las partículas.

❖ 1.4 Microfósiles.

Según Armstrong (2005), los microfósiles siendo una manta delgada y blanca, cubren una sexta parte de la superficie terrestre. Visto bajo microscopio, podemos visualizar un sinnúmero de formas, las cuales se asemejan a infinidad de objetos de la vida cotidiana, que van desde un balón de fútbol, hasta un jarrón chino y más. Algunos de ellos brillan con un lustre vidrioso y otros son blancos azucarados.

Cualquier organismo muerto que sea vulnerable a los procesos naturales de sedimentación y erosión puede ser llamado fósil. Microfósiles (**figura 1.4.1**) son aquellos restos en cuyo estudio se requiera de un microscopio en todas sus partes.

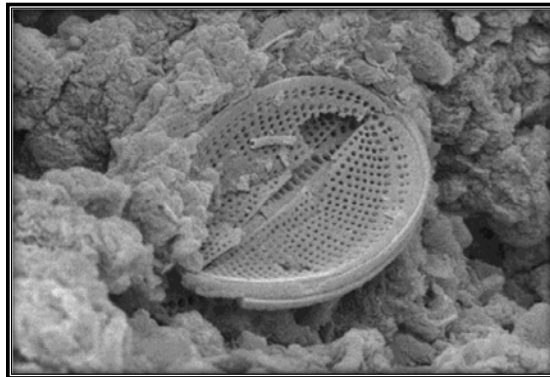


Figura 1.4.1 Microfósil (Díaz-Rodríguez, *et al.*, 1998)

Al estudio de los microfósiles se le denomina correctamente micropaleontología. Sin embargo, ha habido una tendencia a restringir este

término a los estudios de microfósiles de paredes minerales (foraminíferos y ostrácodos), a diferencia de la palinología el estudio de microfósiles de paredes orgánicas.

Es de destacar que, en todas sus vertientes, ya sea macropaleontología, micropaleontología o palinología; se comparten objetivos idénticos: desentrañar la historia de la vida y de su superficie terrestre.

Armstrong (2005) recalca la importancia que tiene el estudio de los microfósiles. La mayoría de los sedimentos contienen microfósiles, dependen en gran medida de la edad geológica, el medio ambiente de deposición y el tipo de sedimentación. Un ejemplo de sedimentos con mayor abundancia son las arenas de arrecife en los mares, 10 cm³ de sedimento puede contener más de 10,000 especímenes individuales y más de 300 especies, dicha muestra puede representar cientos de miles de años de acumulación de especímenes. En contraposición, es improbable que los macrofósiles de una muestra tan pequeña excedan de unas pocas decenas de especímenes o especies. Debido a que los microfósiles son tan pequeños y abundantes (en su mayoría menos de 1 mm) pueden ser recuperados de pequeñas muestras una gran cantidad de ellos.

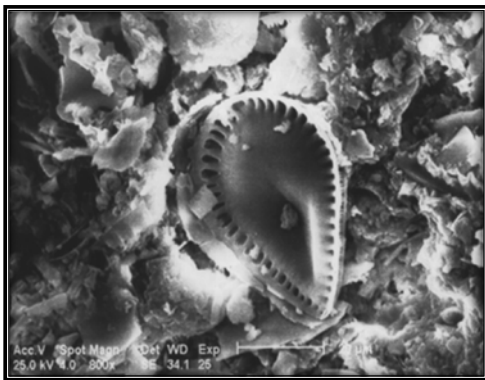
Un geólogo se basa en los microfósiles para obtener la edad geológica de una roca, por tanto, es común que se contraten a micropaleontólogos para aprender más acerca de las rocas.

Los microfósiles ahora proporcionan la principal evidencia para la evolución orgánica a través de más de tres cuartas partes de la historia de la Tierra. Es también a los microfósiles que la ciencia se volverá en la búsqueda de la vida en otros planetas.

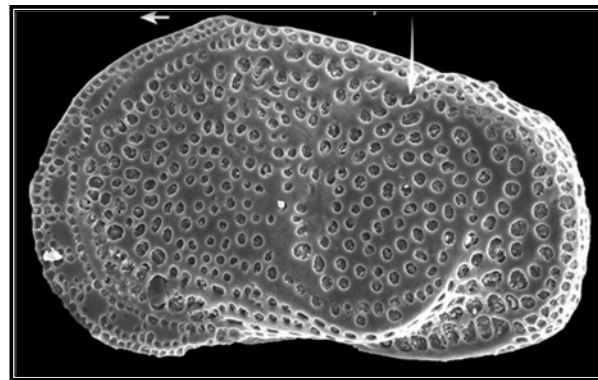
- **1.4.1 Micropaleontología.**

La Micropaleontología es la disciplina que estudia la vida del pasado y la evolución de la biosfera a partir de los fósiles de pequeño tamaño, por lo cual se emplean técnicas especiales de muestreo, preparación y observación con el microscopio.

Cuando se intenta delimitar la Micropaleontología se percibe que no tiene fronteras bien trazadas, pues realmente el microscopio se utiliza también para la observación de detalles estructurales en el estudio de los fósiles más grandes. Se suelen denominar Nanofósiles a los de tamaño inferior a $63\ \mu\text{m}$, y microfósiles al resto (**figura 1.4.2**), que no suelen sobrepasar 1 mm (E. Molina, ed., 2004).



a) Nanofósil de Diatomea



b) Microfósil de Ostrácodo

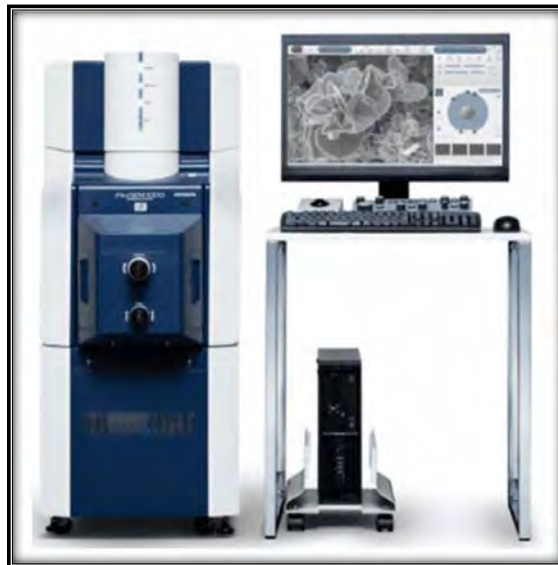
Figura 1.4.2 Nanofósiles (a) (diatomea Díaz-Rodríguez *et al.*, 2011) y microfósiles (b) (Ostrácodo modificado de Horne *et al.*, 2012)

La Micropaleontología es parte de la Paleontología, ambas contribuyen a la resolución de los mismos problemas paleontológicos y bioestratigráficos; tal es el estudio de muestras de sondeos y de rocas que aparentemente son estériles, pero que sin embargo suelen contener abundantes microfósiles. La abundancia de microfósiles en las rocas sedimentarias y con continuidad en el registro fósil, permiten realizar estudios estadísticos y establecer series evolutivas con mucha mayor precisión que cuando tratamos con macrofósiles.

▪ **1.4.1.1 Observación de los microfósiles.**

La comercialización del microscopio electrónico de barrido (M.E.B., **figura 1.4.3**) ha permitido un considerable progreso, se ha vuelto indispensable en los laboratorios universitarios e industriales, a pesar de su alto costo. Su principio se basa en las reacciones eléctricas de un objeto sometido a un bombardeo de electrones en un alto vacío. Para obtener una imagen electrónica de la superficie de un objeto, se barre éste con la sonda. Los electrones emitidos por la superficie son recogidos por un detector de centelleo y modulan el haz del tubo de un osciloscopio con un barrido sincronizado con el microscopio. De este modo es como la imagen aparece en la pantalla, la cual es una representación absolutamente fiel de la superficie del objeto.

El material a observar debe ser deshidratado, mediante congelación y secado al vacío, para poder soportar el alto vacío del microscopio electrónico. El objeto, después de deshidratado, se pega sobre el portaobjetos y se le aplica una finísima capa de oro o de carbono, evaporado al vacío sobre la superficie, para hacerlo conductor y permitir que refleje los electrones (G. Bignot, 1988).



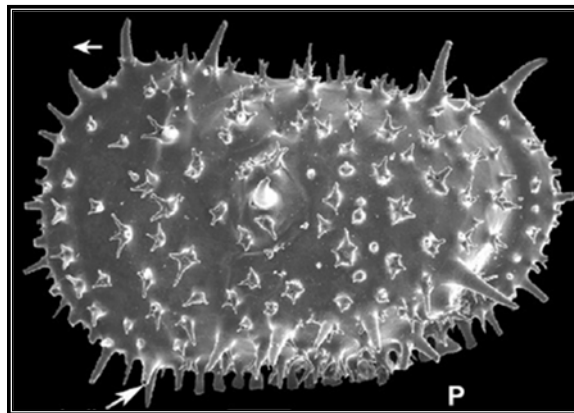
**Figura 1.4.3 Microscopio electrónico de barrido
(The FlexSEM 1000 VP-SEM, hitachi-hightech.com)**

- **1.4.2 Microfósiles Calcáreos, silíceos y orgánicos.**

La micropaleontología se subdivide en varias ramas, según la composición química de los fósiles. Así tendremos como microfósiles más importantes los **orgánicos, silíceos, calcáreos y fosfáticos.**

Dentro de los microfósiles **orgánicos**, los grupos más importantes, son: acritarcas, quitinozoarios, dinoflagelados, polen y esporas; dentro de los **silíceos**: radiolarios, *diatomeas*, silicoflagelados y silicofitolitos; dentro de los **calcáreos**: foraminíferos, nanoplancton calcáreo y *ostrácodos*, y dentro de los **fosfáticos**: los conodontes.

La composición de los diversos grupos de microfósiles es entonces variable: puede ser de **carbonato de calcio** (mineral similar al de los caracoles, **figura 1.4.4**), **fosfato de calcio** (mineral similar al de los huesos), **sílice** (vidrio, **figura 1.4.5**), **esporopolenina** (compuesto orgánico vegetal extremadamente resistente, **figura 1.4.6**), **quitina** (materia orgánica animal también muy resistente), y otros menos abundantes (D. Perea – G. Daners – M. Verde, 2008).



**Figura 1.4.4 Microfósil calcáreo
(ostrácodo, modificado de Horne *et al.*, 2012)**

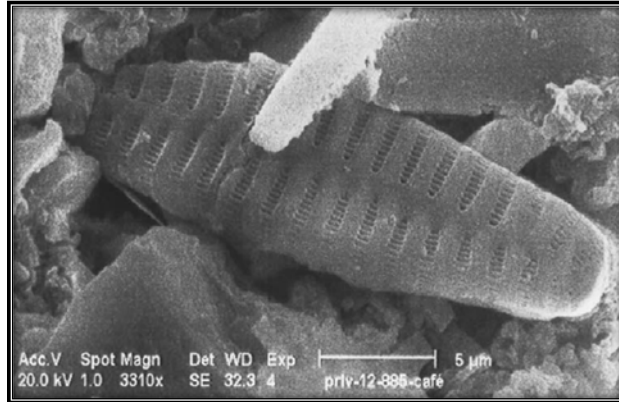


Figura 1.4.5 Microfósil silíceo
(diatomea, modificado de Díaz- Rodríguez *et al.*, 2003)

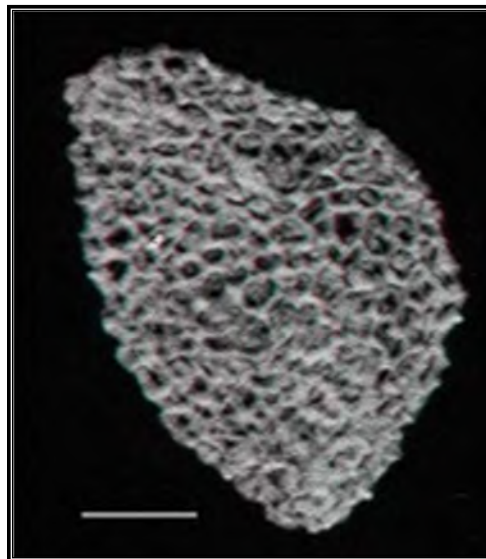
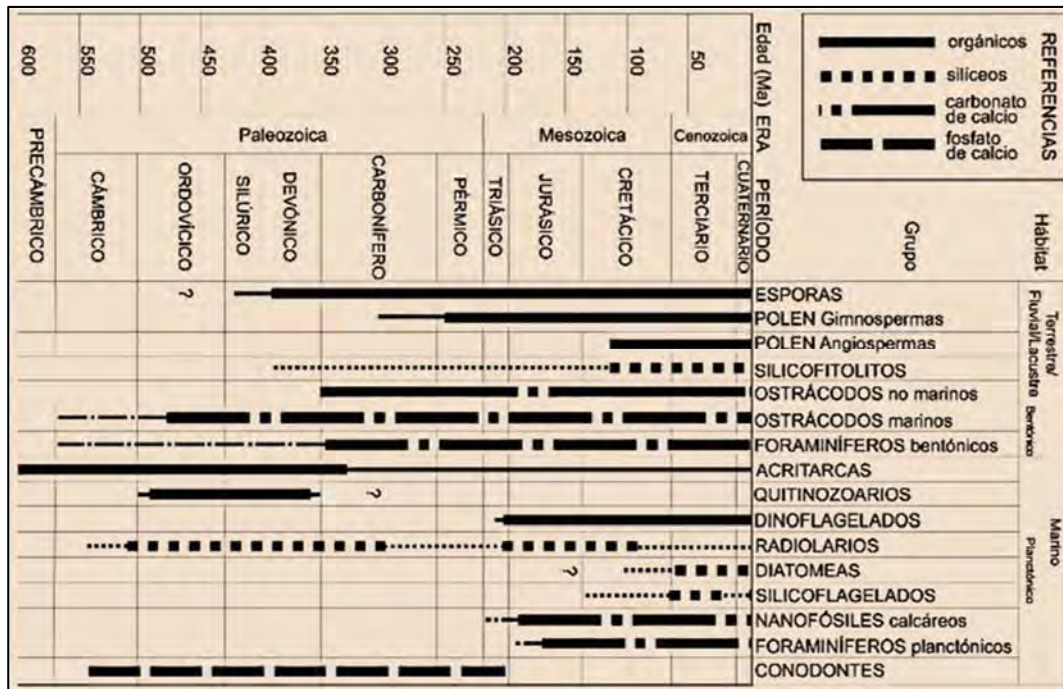


Figura 1.4.6 Microfósil orgánico
(polen, modificado de Peter A. Hochuli *et al.*, 2013)

La **tabla 1.4.1** muestra las eras geológicas y la aparición de los microfósiles a lo largo de los distintos periodos, indicando el grupo al que pertenecen, reagrupados acorde a su hábitat, destacando los terrestres y marinos, las porciones de mayor grosor ilustran los momentos de principal relevancia estratigráfica (Gloria Daners y Mariano Verde, 2008).

Tabla 1.4.1 Biocrón conocido de los microfósiles más comunes (D. Perea – G. Daners – M. Verde *et al.*, 2008).



▪ **1.4.2.1 Microfósiles calcáreos.**

En general los organismos incorporan en sus esqueletos el calcio, algunos bajo la forma de carbonato y otros bajo la forma de fosfato, normalmente a los que lo incorporan en forma de carbonato es a los que se les denomina calcáreos.

El carbonato de calcio es uno de los minerales más comunes en los esqueletos de animales, encontrándosele también en ciertos vegetales marinos. Por este motivo es de esperar que el ámbito de los microfósiles calcáreos, nos enfrentemos a una abundancia de organismos tan diferentes como artrópodos, protozoarios, algas, esponjas y partes de organismos microscópicos. También se incluyen en este grupo a las especies de animales de pequeño tamaño, por ejemplo, gasterópodos, bivalvos, crustáceos, etcétera (D. Perea – G. Daners – M. Verde, 2008).

El nanoplancton calcáreo es el más importante, ya que forma parte de los sedimentos marinos desde el Triásico, y ha sido muy utilizado para el análisis bioestratigráfico y para la correlación a escala mundial. La mayor parte de los Nanofósiles calcáreos pertenecen a los cocolitofóridos clasificados dentro de Haptophyta (G. Bignot, 1988).

La presencia de los microfósiles calcáreos comienza a finales del Precámbrico e inicios del Cámbrico, llegando hasta el presente.

Estos organismos que biomineralizan el carbonato de calcio son importantes formadores de rocas, un ejemplo es la creta o tiza, roca carbonática formada por la acumulación de cocolitofóridos y foraminíferos planctónicos.

- **1.4.2.2 Microfósiles silíceos.**

Los microfósiles silíceos proceden de esqueletos que inicialmente están formados por ópalo (sílice amorfa o sílice hidratada, es decir, está compuesto de dióxido de silicio, lo mismo que el cuarzo). El ópalo es a menudo un elemento fosilizador de animales y plantas, dichos esqueletos son frágiles, susceptibles a disolverse completamente antes o después de su fosilización. Por lo general están incluidos en rocas compactas, haciendo difícil su estudio (G. Bignot, 1988).

En este grupo encontraremos representantes de diferentes reinos. En algunos casos se trata de esqueletos externos de organismos, en otros, internos; pueden ser partes de organismos o también inclusiones minerales en ciertos órganos. En la mayor parte de los casos, la afinidad biológica de los microfósiles silíceos es conocida y los organismos son clasificados dentro de los niveles taxonómicos correspondientes, mientras que en otros se utiliza, al igual que para muchos palinomorfos (partículas de dimensiones comprendidas entre 5 y 500 μm , compuestas de materia orgánica) una clasificación exclusivamente morfológica

(estudio de un organismo y sus respectivas características). D. Perea – G. Daners – M. Verde, 2008.

Los microfósiles silíceos han sido, durante mucho tiempo, descuidados por los paleontólogos, aunque durante el siglo XIX fueron coleccionados y representados en ciertas obras de carácter artístico. Su interés geológico ha sido reconocido cuando los sondeos en los fondos oceánicos nos han permitido examinar series continuas de sedimentos cenozoicos con microfósiles silíceos (G. Bignot, 1988).

- **1.4.3 Ostrácodos.**

Los Ostrácodos son uno de los grupos más diversos de crustáceos vivos, son los más abundantes de los artrópodos fósiles (invertebrados de simetría bilateral cuyo cuerpo está formado por anillos) y están identificadas cerca de 33 000 especies vivas y fósiles. Los Ostrácodos son Crustáceos pequeños, con dos válvulas calcáreas que se articulan por encima de la región dorsal del cuerpo formando su caparazón. Los Ostrácodos eran originalmente marinos y probablemente bentónicos (organismos que habitan en el fondo marino), pero algunos ostrácodos se adaptan a una vida semi-terrestre que viven en el suelo húmedo y la hojarasca.

Los Ostrácodos son ampliamente utilizados en la bioestratigrafía (estudio de los estratos basado en los fósiles), en la determinación de paleoambientes (ambientes antiguos) y paleoclimatología (estudio de los cambios en el clima tomadas en la escala de toda la historia de la Tierra) y son indispensables como indicadores de antiguas riberas y distribuciones de placas (Armstrong, 2005), la **figura 1.4.7** muestra la fotografía de algunos ostrácodos vivos.

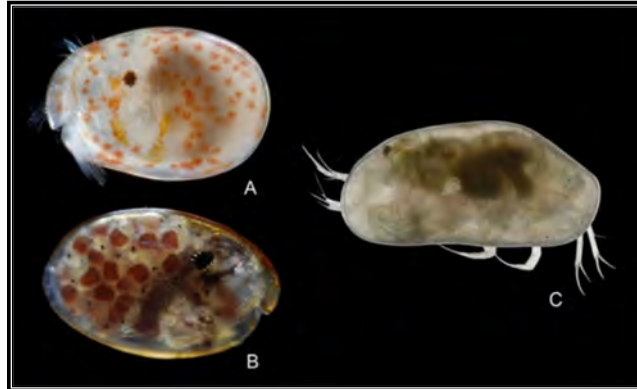


Figura 1.4.7 Ostrácodos vivos. (A) 1.4 mm, (B) hembra con huevecillos, 19 mm, (C) Ostrácodo no marino, Japón (Modificado de Horne *et al.*, 2012).

El animal tiene un cuerpo sin fragmentación aparente, con la cabeza y el tórax mal delimitados, que está protegido, junto con los apéndices, por un caparazón calcáreo, cuyas valvas están dorsalmente unidas por un ligamento elástico. El cuerpo cuelga, como un saco, del interior de este caparazón; esta unido a él por la región dorsal, fijándose lateralmente a las dos valvas mediante paquetes musculares (G. Bignot, 1988), la **figura 1.4.8** muestra la morfología de un ostrácodo.

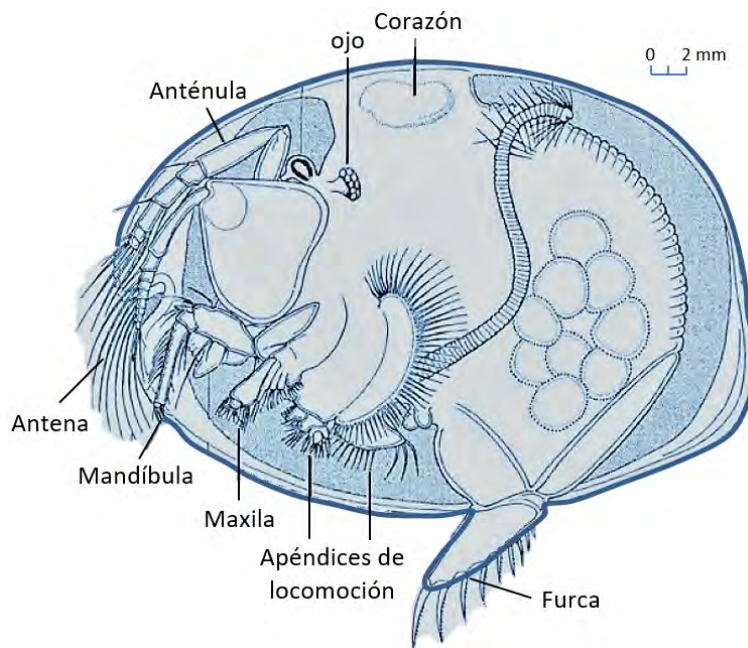


Figura 1.4.8 Morfología de las partes blandas de un ostrácodo (Modificado de E. Molina *et al.* 2004)

Las partes orgánicas de los ostrácodos, incluyendo los apéndices, se suelen destruir durante los primeros procesos bioestratigráficos (estudio de los procesos de fosilización que acontecen desde el momento en que se genera un resto susceptible de convertirse en fósil hasta que se produce su fosilización).

Sin embargo, las valvas suelen mineralizarse, lo que les confiere un considerable potencial de fosilización, siendo bastante frecuentes en los sedimentos.

- **1.4.4. Diatomeas.**

El nombre de la diatomea se deriva de la palabra griega *diatemnein* 'para cortar' (dia = a través de + *temnein* = cortar) ya que las celdas de estas algas unicelulares se dividen en dos mitades o dos valvas o frústulas. Las diatomeas son microorganismos unicelulares o coloniales eucariotas (**figura 1.4.9**) y se encuentran en casi todos los tipos de ambientes acuáticos y semiacuáticos. Las diatomeas tienen paredes celulares distintivas y altamente diferenciadas (exoesqueleto) compuestas por partículas nanométricas de sílice biogénica (Round *et al.*, 2000)

Son algas unicelulares con pigmentos fotosintéticos, las cuales son *Chrysofitas** (*unicelulares y autótrofas), que poseen grandes cloroplastos color verde oliva o pardo. La célula tiene un tamaño promedio de 40 a 50 μm (Bignot, 1988). Su pared celular se silicifica para formar una frústula, que comprende dos valvas, una superponiendo la otra como la tapa de una caja (**figura 1.4.10**). Son los principales productores primarios marinos y desempeñan un papel particularmente importante en los presupuestos de carbono, sílice y nutrientes del océano moderno. Las especies vivas son extremadamente sensibles a las condiciones físicas y químicas, por lo que proporcionan una valiosa información para los estudios de la calidad del agua moderna y para la reconstrucción de los ambientes pasados (Armstrong, 2005).

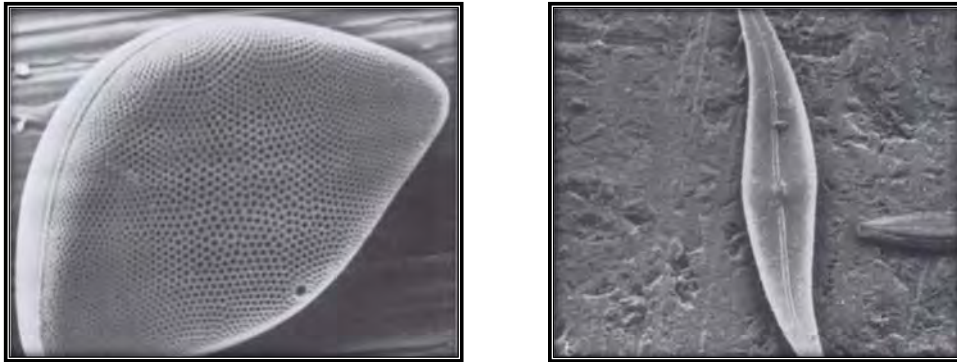


Figura 1.4.9 Diferentes morfologías de un microfósil de diatomea (modificado de Round, F. E., Crawford, R. M. 2000)

Agrupan tanto a especies planctónicas* (*desarrollan su ciclo de vida en una columna de agua) como a bentónicas* (*principalmente desarrollan su ciclo de vida en el sedimento) de ambientes marinos y continentales (E. Molina, ed., 2004).

Viven en casi todo tipo de ambientes acuáticos y semi-acuáticos que están expuestos a la luz, y sus restos pueden acumularse en números enormes en diatomita. Las diatomeas son los principales productores primarios marinos y desempeñan un papel particularmente importante en los presupuestos de carbono, sílice y nutrientes del océano moderno (Armstrong, 2005).

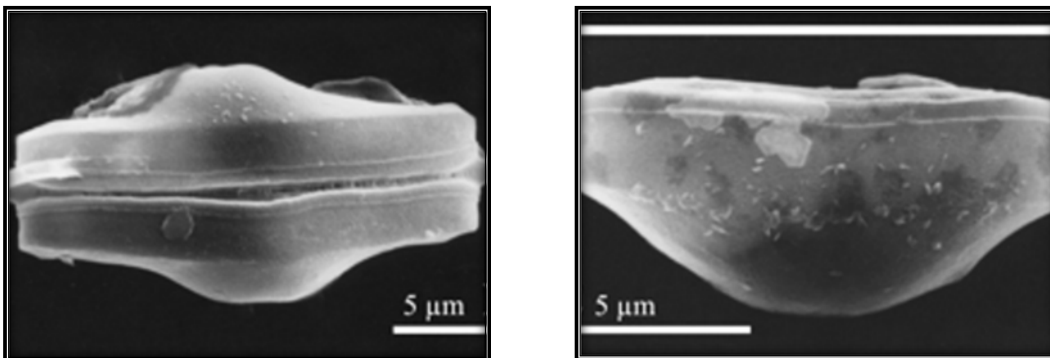


Figura 1.4.10 Visualización de la frústula que compone una diatomea (modificado de Sunesen, 2008)

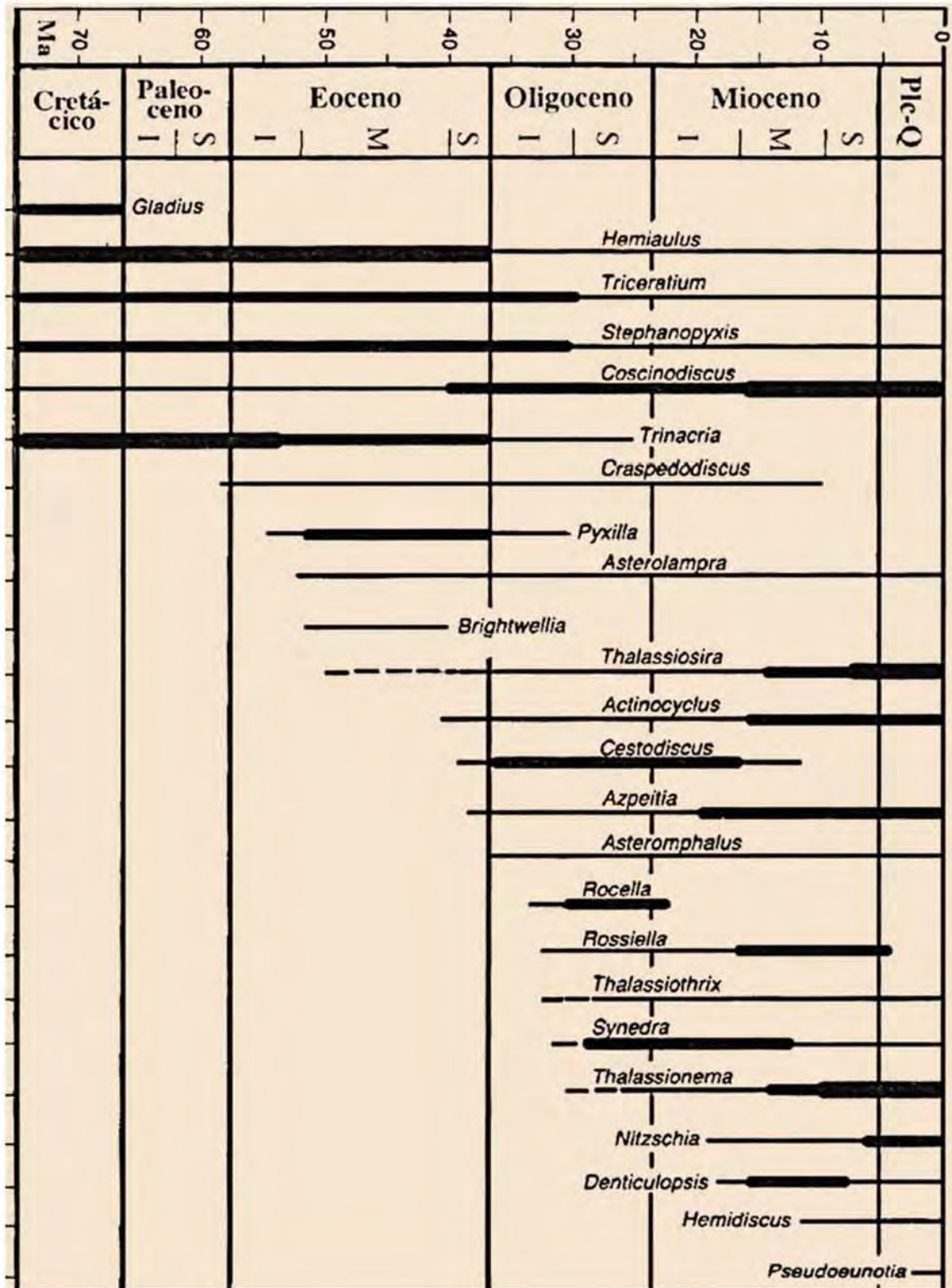
▽ Aparición geológica.

Las diatomeas son un grupo evolutivo relativamente reciente con el origen del antepasado común considerado como 200 y 190 millones de años antes del presente. Como punto de referencia, el origen de esta "primera diatomea" es aproximadamente de 60 a 70 millones de años más joven que los dientes especializados encontrados en mamíferos (Smol-Stoermer, 2010).

Sin embargo, varios autores dan el origen de las diatomeas dentro del Cretácico inferior (150 millones de años). Los yacimientos cretácicos, todos de origen marino, han proporcionado 70 géneros y 300 especies de "Centrales"; esta abundancia sugiere que las diatomeas han debido aparecer con anterioridad, aunque no hayan dejado rastro en el registro fósil. En el Eoceno (54 m.a.) aparecen las primeras "Pennales" y al mismo tiempo se produce el comienzo de su conquista de las aguas dulces. En el Oligoceno (37 m.a.) desaparecen varios géneros, y el Mioceno (24 m.a.) se caracteriza por la aparición de numerosos géneros y por el máximo desarrollo de las diatomeas, con una gran diversificación de las Pennales y predominancia de las centrales.

Actualmente, aún están representados la mitad de los géneros miocenos, y las Pennales son más abundantes que las Centrales. En conjunto, es un grupo biológico de evolución lenta; se estima que un 15 % de las especies actuales, estaban representadas en el Eoceno, y que un 6% lo estaban ya en el Cretácico superior (Bignot, 1988). La **tabla 1.4.2** muestra la aparición a lo largo de varias eras geológicas, de algunos géneros de diatomeas.

Tabla 1.4.2 Distribución estratigráfica de algunos géneros de diatomeas
(modificado de Molina, ed., 2004)



▽ **Clasificación.**

La clasificación de las diatomeas se ha basado tradicionalmente en la forma de su frústula y la estructura (Armstrong, 2005).

La División Bacillariophyta se subdivide comúnmente en dos clases: Centrobacillariophyceae (centrales) y Pennabacillariophyceae (pennales). Las características resumidas de dichas categorías son las siguientes:

- 1) Eupodiscales: valvas circulares, espinas comunes.
- 2) Rhizosoleniales: valvas cilíndricas, elongadas.
- 3) Biddulphiales: valvas angulares.
- 4) Fragilariales: valvas lineales, lanceoladas o espatuladas. Sin rafe.
- 5) Eunotiales: valvas arqueadas. Rafe rudimentario sin nódulo central
- 6) Achnanthes: valvas ovaladas y cuneiformes con rafe en una valva.
- 7) Naviculales: valvas de lanceoladas a ovaladas. Rafes verdaderos en las dos valvas, con nódulos polares y central.
- 8) Surirellales: valvas de morfología variable. Rafe periareal sin nódulos.

Una propuesta más reciente sobre la clasificación de las diatomeas es la publicada en el trabajo de Round *et al.* (1990). Estos autores reconocen tres clases dentro de la División Bacillariophyta: Clase Coscinodiscophyceae (que agrupa a todas las diatomeas centradas), Clase Fragilariophyceae (que incluye a aquellas diatomeas peonadas que no presentan rafe) y Clase Bacillariophyceae (que reúne a las diatomeas con rafe).

▽ **La frústula.**

Alrededor del 95% de la pared celular en las diatomeas se impregna con sílice opalina. Del 10 al 30% del área de la superficie de la válvula está cubierta por pequeños poros llamados aureloas (**figura 1.4.12**), cuya disposición es también significativa para la clasificación. En promedio representa del 15 al 20% del peso total seco de la célula, aunque en las especies planctónicas poco silicificadas sólo

representa un 1% (diatomeas del tipo Pennales) y en *Coscinodiscus* (diatomeas del tipo central) llega a representar un 47% (Hernández, 2000).

Su forma varía según las especies, siempre deriva del esquema sencillo: epivalva e hipovalva; pueden ser idénticas o distintas, acoplándose una con otra generando una banda conectiva. Los cíngulos pueden tener una o varias bandas, la mayoría de las veces son bilaminares aunque pueden estar formadas por una sola lámina, siempre perforadas por poros o areolas (**figura 1.4.12**).

De acuerdo a su morfología y simetría se clasifican en dos grandes grupos: Centrales y Pennales (**figura 1.4.11**).

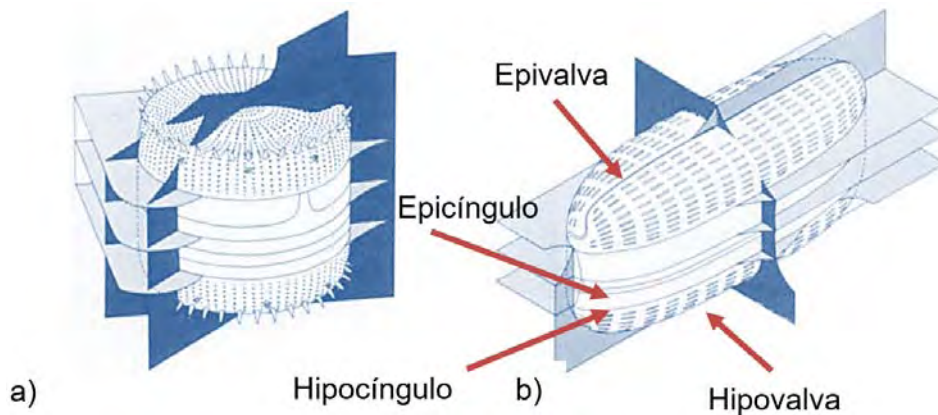


Figura 1.4.11 Morfología y simetría: dos grupos a) Radial- CENTRALES. b) Bilateral- PENNALES (modificado de Round-Crawford, 2000).

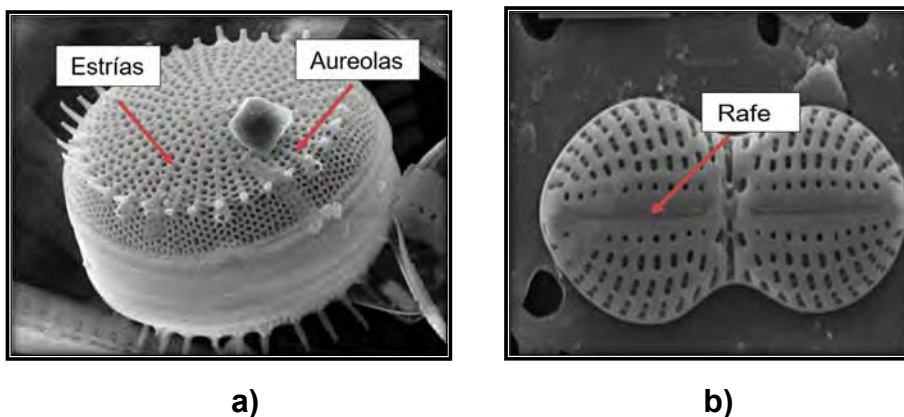


Figura 1.4.12 Areolas, estrías y rafe. a) estrías y aureolas, b) rafe (modificado de Smol-Stoermer, 2010)

▽ **Alimentación.**

Las diatomeas son seres vivos autótrofos, los cuales tiene la capacidad de sintetizar todas las sustancias esenciales para su metabolismo a partir de sustancias orgánicas, de manera que para su nutrición no necesitan de otros seres vivos.

Producen su propia masa celular y materia orgánica a partir del dióxido de carbono, que es inorgánico y utilizan sustancias químicas como fuente de energía. Se clasifican como quimiolitotróficos debido a que utilizan la oxidación de compuestos inorgánicos, como el anhídrido sulfuroso o compuestos ferrosos (Odum, 2005).

Forman el primer eslabón de la cadena de alimenticia, siendo la base de seres vivos heterótrofos, los cuales utilizan a los autótrofos como alimento, tal es el caso de lo ostrácodos, que se alimentan de diatomeas.

❖ **1.5 Suelos Diatomáceos.**

Un suelo diatomáceo es un suelo que contiene un porcentaje de diatomeas significativamente alto (> 10%) para influir en su comportamiento geotécnico. Aquellos suelos que contienen nanofósiles se caracterizan por tener propiedades atípicas. Éstos suelos, como ya se mencionó, presentan alta compresibilidad, ángulos de fricción interna altos, contenidos de agua cercanos al 400%, permeabilidad y porosidad alta.

El desarrollo de microfósiles de origen silícico se manifiesta favorablemente en zonas con alta actividad tectónica, tal como es el caso del suelo de la CDMX, la cual se encuentra rodeada de distintos volcanes, además de ser suelos de origen lacustre, por ello se le denomina como Suelo Volcánico – Lacustre.

Los microorganismos silíceos representan aproximadamente dos tercios del suelo de la CDMX. El suelo Volcánico-Lacustre se compone en gran parte de microfósiles, principalmente esqueletos silíceos (frústulas) y fragmentos esqueléticos de diatomeas. Estas muestras de suelo de la Ciudad de México son diatomeas impuras. La producción de diatomeas se rige directamente por el contenido de sílice disuelto de agua. Al parecer, las grandes cantidades de sílice liberadas por la ceniza volcánica a medida que se sometió a la intemperie iniciaron una gran a floración de diatomeas en las aguas del lago Pleistoceno del Valle de México.

Otro ejemplo de suelos diatomáceos es de la Bahía de Osaka en Japón, la cual en el contexto de la construcción del “Aeropuerto internacional de Kansai”, intensifico sus estudios acerca de la relación que tiene el suelo con el contenido de diatomeas (Tanaka & Locat *et al* 1999), enfatizando la correlación que existe entre los suelos con microfósiles y las propiedades índice. En un par de estudios en la cercanía a la Bahía de Osaka, se encontraron sedimentos de diatomeas, los cuales estaban poco consolidados a profundidades por debajo de los 400 m en el fondo marino, lo que lo clasifica como suelo altamente compresible.

Con base en los ejemplos anteriores, podemos observar la importancia que tienen los microfósiles en el comportamiento, propiedades índice, características físicas y mecánicas de los suelos; por ello es importante encontrar las causantes de tan particulares características y comportamientos.

- **1.5.1 Microfósiles, formadores de sedimentos.**

Los organismos fósiles, en especial los políperos y las algas calcáreas, desempeñan un papel importante en la formación de rocas, siendo responsables de la formación de rocas sedimentarias. Por acumulación de sus restos, forman sedimentos, pero los microbiontes participan en la litogénesis (procesos físico-químicos en la generación de rocas) de una forma indirecta.

Se tienen varios ejemplos de acumulación bioclástica, del cual, el más importante es el de los sedimentos que se están acumulando en los fondos oceánicos, a causa de la deposición continua de restos de microbiontes planctónicos, procedentes de las aguas superficiales. Si el fondo está por encima de la profundidad de desaparición de la calcita, los esqueletos calcáreos no han sido corroídos y se acumulan formando un cieno (sedimento) de cocolitos y foraminíferos planctónicos. A mayor profundidad, desaparecen los esqueletos calcáreos, concentrándose en cambio las frústulas de diatomeas y las cápsulas de radiolarios.

En el fondo de los lagos, la sedimentación orgánica es menos importante. En algunos casos, el amontonamiento de frústulas de diatomeas, forma un depósito que por su aspecto y por su consistencia, ha merecido el nombre de fieltro orgánico; en otros lagos, constituyen por su acumulación, cienos ricos en materia orgánica.

- **1.5.2 Sedimentos de diatomeas.**

Las diatomeas requieren luz y por lo tanto se limitan a la zona fótica* (*zona donde penetra el sol <200 m) durante la vida. Cada especie tiene una preferencia por una masa de agua particular, con rangos distintivos de temperatura, salinidad, acidez, concentraciones de oxígeno y minerales. (Armstrong, 2005).

La productividad de diatomeas es alta donde los niveles de nutrientes son altos. Las diatomeas se están formando en tres áreas principales en la actualidad: debajo de las aguas subárticas del hemisferio norte; debajo de las aguas subantárticas del hemisferio sur; y en un cinturón ecuatorial alrededor de los océanos Índico y Pacífico, relacionado con un cinturón de surgencia ecuatorial (fenómeno oceanográfico que consiste en el movimiento vertical de las masas de agua, de niveles profundos hacia la superficie). Estos depósitos ecuatoriales tienen un espesor de 4 a 6 m y pueden contener más de 400 millones de válvulas

por gramo. Dichas vastas acumulaciones de diatomeas también requieren condiciones ideales (por ejemplo, lejos de las líneas costeras) con alta solubilidad de CaCO_3 , comúnmente encontradas cerca de actividad volcánica.

El agua de mar moderna contiene un alto porcentaje de sílice, en parte debido a la cantidad de sílice eliminada de la solución por biomineralización de diatomeas. Esto significa que las frústulas de las diatomeas son propensas a la disolución por la presión del agua a grandes profundidades o bajo condiciones alcalinas.

❖ 1.6 Suelos arcillosos.

Independientemente del origen del suelo, los tamaños de las partículas, que conforman un suelo, varían en un amplio rango. Los suelos son llamados grava, arena, limo o arcilla, dependiendo del tamaño predominante de sus partículas. Para describir los suelos por el tamaño de sus partículas, varias organizaciones desarrollaron límites de tamaño. **La tabla 1.6.1** muestra los límites desarrollados por el Instituto Tecnológico de Massachusetts (MIT), el Departamento de Agricultura de Estados Unidos (USDA), la Asociación Americana de Funcionarios de Carreteras Estatales y del Transporte (AASHTO), el Cuerpo de Ingenieros del Ejército de Estados Unidos, y la Oficina de Restauración de Estados Unidos (Braja M., 2001)

La propiedad de granos más importante de los materiales de suelo de grano fino es la composición mineralógica. Si las partículas del suelo son menores que aproximadamente 0.002 mm, la influencia de la fuerza de gravedad sobre cada partícula es insignificante en comparación con la de las fuerzas eléctricas que actúan en la superficie de la partícula. Se dice que un material en el que la influencia de las cargas de superficie es predominante está en el estado coloidal.

Las partículas coloidales del suelo consisten principalmente en minerales arcillosos que se derivan de los minerales rocosos por meteorización, teniendo estructuras cristalinas que difieren de sus minerales de origen.

Tabla 1.6.1 Límites de tamaño de partículas (Braja M., 2001)

Nombre de la organización	Tamaño del grano (mm)			
	Grava	Arena	Limo	Arcilla
Instituto Tecnológico de Massachusetts (MIT)	> 2	2 a 0.06	0.06 a 0.002	< 0.002
Departamento de Agricultura de Estados Unidos (USDA)	> 2	2 a 0.05	0.05 a 0.002	< 0.002
Asociación Americana de Funcionarios del Transporte y Carreteras Estatales (AASHTO)	76.2 a 2	2 a 0.075	0.075 a 0.002	< 0.002
Sistema unificado de clasificación de suelos (U.S. Army Corps of Engineers; U.S. Bureau of Reclamation; American Society for Testing and Materials)	76.2 a 4.75	4.75 a 0.075	Finos (es decir, limos y arcillas) < 0.075	

Las propiedades coloidales que distinguen mejor la fracción arcilla del suelo de arenas y limos son:

1. la arcilla coloidal posee en alto grado la propiedad de absorber agua. A diferencia de las partículas de limo y arena, las arcillas contienen el agua dentro de las células del coloide, por otro lado, desarrollan una plasticidad y cohesión altas.
2. los cambios en el contenido de agua de la arcilla coloidal van acompañados de cambios notables de volumen. Esto ha sido comprobado por las grietas que se forman en los suelos arcillosos al secarse (contracción).

3. las arcillas coloidales presentan la propiedad de la plasticidad cuando están asociadas con ciertas proporciones de agua. En este punto, la arcilla se distingue claramente de la arena y el limo, puesto que el limo más fino carece de esta propiedad.

4. la arcilla coloidal da carácter cohesivo a los suelos. Si una cantidad de limo libre de arcilla se humedece y moldea en forma de ladrillo, se verá que el ladrillo se desmenuza a la menor tensión al secarse. Cuando la arcilla coloidal está presente, aunque sea en cantidades relativamente pequeñas, el suelo moldeado, una vez seco, posee considerable resistencia a las tensiones aplicadas (Terzaghi-Peck-Mesri, 1996)

❖ 1.6.1 Estructura.

Durante la deposición, las partículas minerales se disponen en armazones estructurales que llamamos tejido de suelo (**Figura 1.6.1**). Cada partícula está en contacto aleatorio con partículas vecinas. El entorno bajo el cual se produce la deposición influye en el marco estructural que se forma. En particular, el entorno electroquímico tiene la mayor influencia en el tipo de tejido de suelo que se forma durante la deposición de suelos de grano fino.

Durante la deposición de las partículas de suelos de granos finos, se forman dos tipos comunes de tejido del suelo: floculados y dispersos. Una estructura floculada, formada en un ambiente de agua salada, resulta cuando muchas partículas tienden a orientarse paralelas entre sí (**figura 1.6.1 a**). Una estructura floculada, formada en un ambiente de agua dulce, resulta cuando muchas partículas tienden a orientarse perpendicularmente entre sí (**figura 1.6.1 b**). Una estructura dispersa se produce cuando la mayoría de las partículas se orientan paralelas entre sí (**figura 1.6.1 c**).

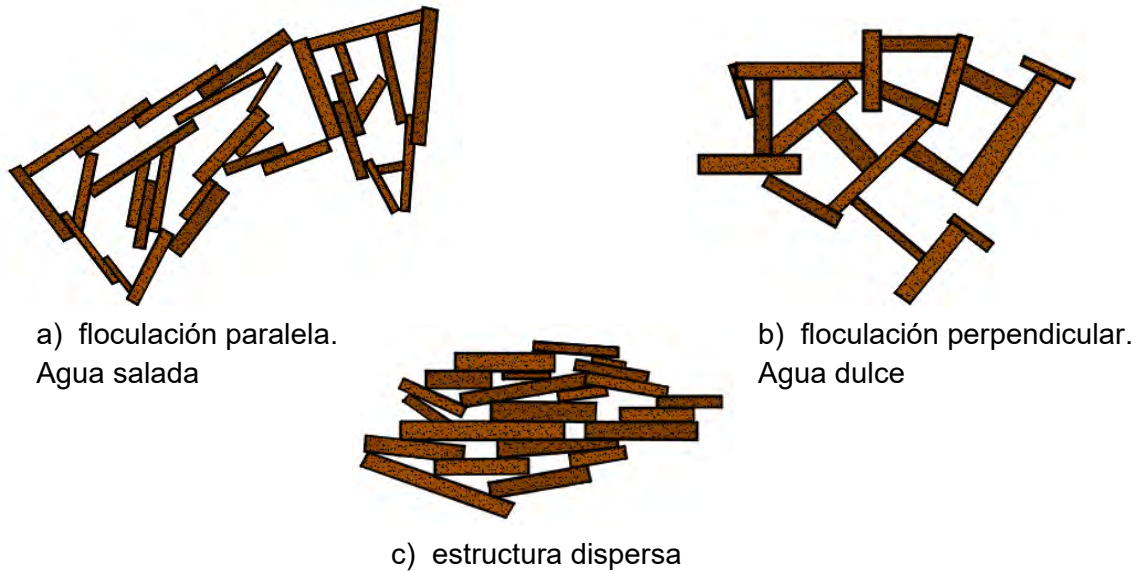


Figura 1.6.1 Diferentes estructuras

❖ 1.6.2 Caolinita, Illita y montmorillonita.

Caolinita (kaolinite): tiene una estructura que consiste en una lámina de sílice y una lámina de alúmina unidas entre sí, en una capa de aproximadamente 7.2 Å de espesor y apiladas repetidamente (**Figura 1.6.2**). Las capas se mantienen unidas por enlaces de hidrógeno. Las capas fuertemente apiladas resultan de numerosos enlaces de hidrógeno. La caolinita es común en arcillas en regiones tropicales húmedas. La superficie específica de la caolinita oscila entre 10 y 20 m² por gramo (Budhu, 2011).

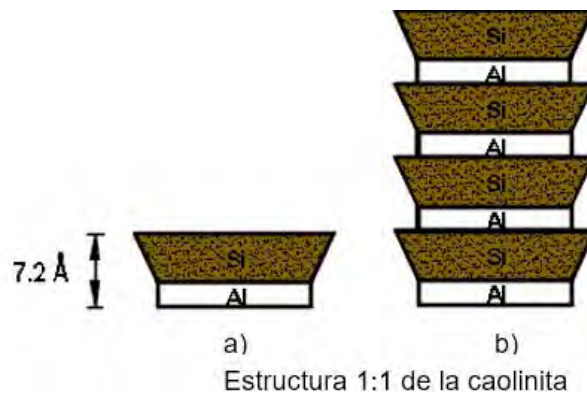


Figura 1.6.2 Estructura de la Caolinita

La **figura 1.6.3** muestra una imagen obtenida con ayuda de un Microscopio Electrónico de Barrido, del apilamiento de las láminas de caolinita.

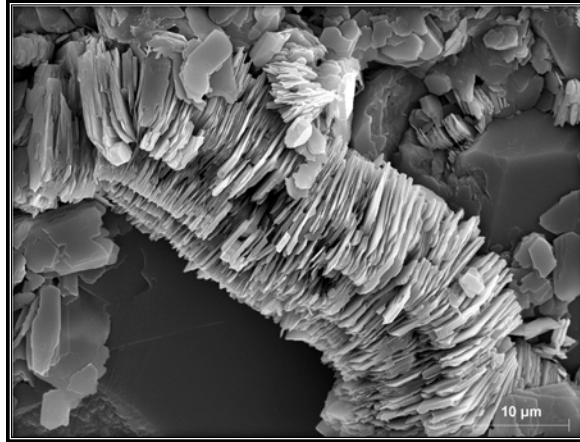


Figura 1.6.3 Apilamiento de láminas de caolinita (SEA, 2018)

Montmorillonita: tiene una estructura similar a la illita, pero las capas se mantienen unidas por fuerzas débiles de van der Waals. La montmorillonita pertenece a la familia de la arcilla esmectita. Es una esmectita de aluminio con una pequeña cantidad de Al^{3+} reemplazada por Mg^{2+} . Esto provoca una inequidad de carga que se equilibra con cationes intercambiables Na^+ o Ca^{2+} y agua orientada (**Figura 1.6.4 a**). El área superficial por unidad de masa (superficie específica) de las arenas es típicamente 0.01 m^2 por gramo, mientras que para arcillas es tan alta como $1,000 \text{ m}^2$ por gramo.

Illita: consiste en capas repetidas de una hoja de aluminio intercalada por dos láminas de silicato (**Figura 1.6.4 b**). Las capas, cada una de espesor 10 \AA , se mantienen unidas por iones de potasio. Su superficie específica oscila entre 65 y 100 m^2 por gramo. Debido a las grandes superficies de los suelos de grano fino, las fuerzas superficiales influyen significativamente en su comportamiento en comparación con los suelos de grano grueso. La interacción arcilla-agua, unida a las grandes superficies, da lugar a que las arcillas tengan mayor capacidad de retención de agua en un gran número de espacios de poros más pequeños en comparación con los suelos de grano grueso.

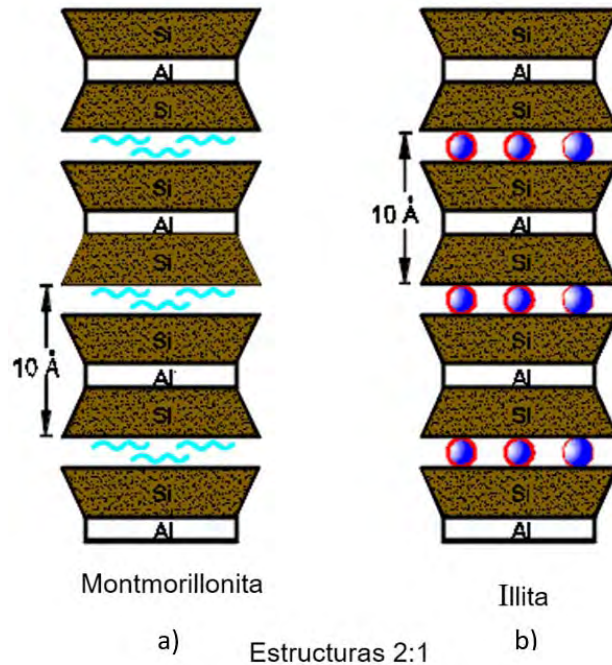


Figura 1.6.4 Estructura de la Montmorillonita e Illita

- **1.7 El suelo Volcánico-Lacustre de la Ciudad de México.**

La cuenca de México se ubica en la parte central de la Faja Volcánica Transmexicana, en la provincia fisiográfica del eje neovolcanico. Hacia el Norte está limitado por las Sierras de Tepetzotlán, 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 (Marsal, 1959).

Como es sabido, la Ciudad de México está asentada en su mayor parte, sobre el antiguo Lago de Texcoco (**figura 1.7.1 a**). El Valle de la Ciudad de México es una cuenca cerrada que fue llenada por el agua durante la época del Pleistoceno (**figura 1.7.2 b**). Según Zeevaert (1982), los restos de rocas, las arcillas residuales, los materiales piroclásticos, las gravas y las arenas, que representan los productos de desintegración de las rocas andesíticas de las

colinas circundantes, se erosionaron gradualmente y los elementos más finos fueron transportados por agua a la cuenca.

Las erupciones volcánicas fueron acompañadas por explosiones de vapor formando densas nubes que contenían finas cenizas volcánicas y otros materiales piroclásticos que se depositaron como una lluvia en la superficie del lago (lo cual produjo la proliferación de diatomeas). Parte de la fina ceniza volcánica se descompone en minerales de arcilla. El sedimento contiene un gran porcentaje de diatomeas y ostrácodos, cuya estructura porosa da al suelo una proporción de vacíos muy alta y un índice de plasticidad elevado (Díaz-Rodríguez, 1992).

La cuenca de México, donde está situada la ciudad de México, ocupa un área de 9,600 km², es predominantemente una planicie lacustre, localizada a 2,250 m sobre el nivel medio del mar. Hace 700,000 años las erupciones volcánicas cerraron la cuenca con una enorme cortina natural, la sierra del Chichinautzin, lo que originó un lago de 2,000 km² (Díaz-Rodríguez, 2011).

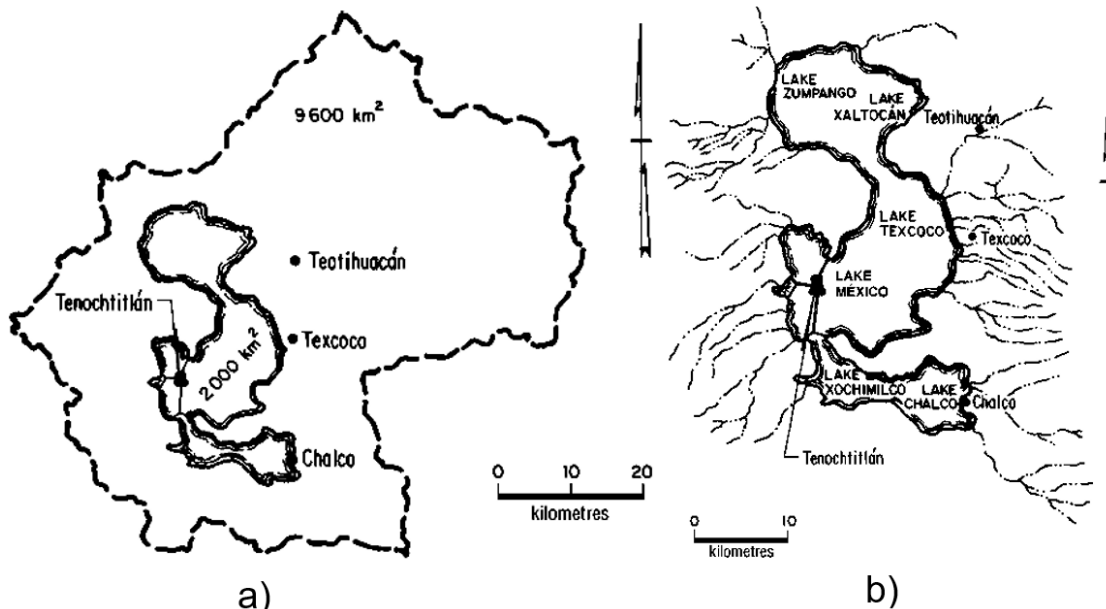


Figura 1.7.1 La Cuenca de México: a) antiguo cuerpo de agua de 2000 km², b) Antiguos lagos de la Cuenca de México y ríos alimentándose (Díaz-Rodríguez, 1998).

- **1.7.1 Características.**

El suelo volcánico-lacustre de la Ciudad de México es un ejemplo clásico de un suelo difícil e inusual. Se ha descrito como muy orgánico, montmorillonítico, tixotrópico y muy sensible (Lo, 1962).

Algunas propiedades físicas de la arcilla se resumen de la siguiente manera (Díaz-Rodríguez, 1992):

- Contenido de agua natural = 460%.
- Límite líquido = 550%.
- Límite plástico = 57%.
- Índice de plasticidad = 493%.
- Relación de vacíos = 12,2.
- Densidad de sólidos = 2.65.

La microestructura de los suelos implica los efectos combinados de tejido, composición química, constitución mineralógica y fuerzas inter-partículas. Así, la microestructura de un suelo refleja todas las facetas de la composición e historia del suelo, incluyendo el ambiente electroquímico, la tasa de acumulación, la turbulencia durante la sedimentación (Díaz-Rodríguez, 1998).

- **1.7.2 Composición del suelo de la Ciudad de México descrita por distintos investigadores.**

Zeevaert de 1949 a 1957, describe la arcilla de la Ciudad de México como una arcilla orgánica limosa compuesta de grandes cantidades de fósiles, ostrácodos y diatomeas muy finas, así como partículas de ceniza y vidrio. Encontró que el 40% de las partículas tenía menos de 2 μm de tamaño y el 50% de esta fracción de tamaño arcilloso era montmorillonita, siendo el resto principalmente material esquelético y cenizas.

Marsal y Mazari (1959) indican que entre el 22% y el 63% de las partículas componentes son menores de 2 μm , y que hay de un 3 a 21% de contenido de carbonato, 1 a 7% de materia orgánica y un alto contenido de diatomeas y ostrácodos. Marsal y Mazarí concluyeron que el contenido de arcilla podría clasificarse como illita.

Leonards y Girault (1961). Sus muestras contenían aproximadamente 8-10% de materia orgánica y una pequeña cantidad de calcita. Basándose en la difracción de rayos "X" y el análisis térmico diferencial, el material restante se identificó como amorfo y se clasificó como alofán (suelos provenientes de cenizas volcánicas). Leonards y Girault concluyeron que no había evidencia de la presencia de montmorillonita o illita.

Lo (1962) reveló que consistía principalmente en materiales amorfos. Se identificó una parte de los materiales amorfos como fragmentos de diatomeas y se consideró que el resto era probablemente material volcánico más o menos alterado. La muestra contenía 4% de materia orgánica y 10% de calcita. Además, la difracción de electrones detectó una cantidad desconocida de montmorillonita, que se consideró de baja cristalinidad, ya que la difracción de rayos "X" fracasó parcialmente al detectarla. Basándose en el análisis químico del agua porosa, los cationes intercambiables del contenido de montmorillonita se identificaron como sodio y potasio.

Mesri (1975) menciona que la fracción limosa, que constituye hasta el 65% del suelo de la Ciudad de México, parece estar compuesta de microfósiles, principalmente de conchas silíceas y fragmentos de conchas de diatomeas. Las características básicas de las diatomeas silíceas, la esmectita intercalada y la materia orgánica se combinan para dar al suelo de la CDMX sus inusuales propiedades físicas.

Whitman (1987) comparó los perfiles típicos de velocidad de onda de corte en varias ciudades donde se piensa que las condiciones locales del suelo influyen en la naturaleza e intensidad del movimiento sísmico terrestre y concluyó que la situación en la Ciudad de México difiere claramente de otros casos. Los principales parámetros necesarios para evaluar la respuesta del sitio son el módulo de cortante dependiente de la deformación G y la relación de amortiguamiento, a pesar del contenido de agua muy alto. Además, los sedimentos de la Ciudad de México presentan una proporción de amortiguamiento muy baja, es decir, 4 a 5% para una deformación de corte de 1.5%. En este contexto, los suelos de la Ciudad de México son el caso más extremo en la familia de suelos plásticos y lineales.

Díaz Rodríguez desde 1986 ha publicado artículos basados en investigaciones referentes al Suelo de la Ciudad de México, siendo su primer artículo para la entonces Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos (hoy SMIG): “Deformación unidimensional de la arcilla de la Ciudad de México”. Su último artículo (basado en el suelo de la CDMX) es de 2016, “*Constant rate of strain consolidation of Mexico City soil*”. Con los más de 30 años de trabajo de investigación, se ha encargado de descifrar el increíble comportamiento de éste atípico y muy complejo Suelo Diatomáceo. Hoy en día es el investigador activo con mayor reconocimiento en el estudio de éste suelo tan enigmático.

Es por todo lo anterior, que el suelo de la CDMX da un enorme campo de estudio, para tratar de comprender lo que las diatomeas provocan en el comportamiento de los llamados **Suelos Diatomáceos**. Por lo tanto y como parte de este trabajo, se tratará de visualizar, la influencia que tienen estos seres nanoscópicos en el comportamiento Geotécnico de los suelos.

CAPÍTULO 2

PROPIEDADES ÍNDICE DE LAS MEZCLAS CAOLINITA-DIATOMITA

❖ 2.1 Introducción.

De manera tradicional, el suelo se define como un material terroso orgánico e inorgánico que se encuentra sobre de la corteza terrestre. Los suelos comúnmente son visualizados como un ente sólido y homogéneo, en realidad es un medio poroso, el cual se encuentra en las tres fases, sólida, líquida y gaseosa. Éstas características y propiedades físicas, contribuyen en gran medida para controlar parámetros como la permeabilidad, compresibilidad y resistencia al corte.

La parte sólida resulta de suma importancia en el comportamiento general de los suelos. La mineralogía de las partículas, así como su forma, distribución, tamaño y superficie específica; se convierten en factores predominantes en el comportamiento de la masa del suelo, estos factores determinan si es dominado por fuerzas mecánicas, capilares o eléctricas; y cómo responderá el material a las tensiones hidrostáticas o de cortante (Fam & Santamarina, 2001).

Díaz-Rodríguez (2014) nombra al suelo como un material Natural, Particulado y Multifásico; dando una nueva definición a lo tradicionalmente establecido, utilizando términos que hacen referencia al ámbito de la geotecnia.

❖ 2.2 Descripción de los materiales que componen las mezclas.

Como el título de esta tesis lo indica, los materiales utilizados son **Caolinita y Diatomita** (tierra de diatomeas). Dichos materiales se han adquirido con proveedores comerciales.

La “diatomita” comercialmente se vende con el nombre de "Harina de Concha Fósil", “Tierra de diatomeas”, “Tierra diatomácea” o simplemente “Diatomita”. Tanto la caolinita como la diatomita vienen pulverizadas, la primera en costales de papel y la segunda en bolsas selladas.

- **2.2.1 Diatomita.**

La diatomita es una roca silíceas, sedimentaria de origen biogénico, compuesta por esqueletos fosilizados de frústulas de diatomeas. Es una tiza, suave, friable (de fácil pulverización), terrosa, de grano fino, roca sedimentaria silíceas, generalmente de color claro (blanco si es puro, comúnmente de color gris en la naturaleza, y según se informa en raras ocasiones incluso negro). Es finamente poroso, de muy baja densidad (flotando sobre agua al menos hasta su saturación), químicamente inerte en la mayoría de los líquidos y gases; con una baja conductividad térmica y un punto de fusión bastante alto.

Como consecuencia de su coeficiente de conductibilidad eléctrica extremadamente reducido y la resistencia permanente a las temperaturas más variables, la diatomita es un aislante muy utilizado (SE, 2016).

Tierra de diatomeas es un nombre alternativo común pero lógicamente más apropiado para el sedimento no consolidado o menos litificado* (*proceso, generalmente de compactación y cementación, por el cual los sedimentos se convierten en rocas sedimentarias). Los depósitos resultan de una acumulación en los océanos o aguas dulces de la sílice amorfa. Los restos óseos fosilizados cuentan con un tamaño de menos de 1 μm a más de 1 mm, pero son típicamente de 10 a 200 μm de ancho y tienen una amplia variedad de formas. Algunas de las especies viven en pantanos e incluso en corteza húmeda, pero son más abundantes en agua iluminada por el sol y que sea constantemente enriquecida con nutrientes adecuados, además de sílice disuelta (Antonides, 1997).

Los principales depósitos en el mundo, se han caracterizado por ser de tipo seco, en donde la diatomita se presenta como material de peso liviano.

La presencia de diatomeas está relacionada con zonas volcánicamente activas. Debido a que se desarrollan en cuerpos de agua con sílice disuelto, se asume que la sílice la aportan las erupciones volcánicas (Shiwakoti et al., 2002).

▽ **Composición y características.**

En general, los bloques secos de mineral crudo típicamente muestran entre 80% y 90% (a veces 95%) de sílice (SiO_2), además de alúmina (2% a 4% atribuido principalmente a minerales de arcilla) y hematita (mineral compuesto de óxido férrico) 0.5% a 2%, con un análisis por pérdida de ignición de 4% a 6%. El mineral en sitio contiene del 10% al 65% de agua (2% a 10% en la estructura opalina).

Una roca seca cruda puede absorber 1.5 a más de 3 veces su peso de agua. El punto de fusión de la diatomita varía de 1,000 °C a 1750 °C (Durham, 1973, p 192; Breese, 1994, p 398). Otras de sus características se enlistan a continuación:

- Área superficial 10 a 30 m^2/g (la calcinación la reduce de 0.5 a 5 m^2/g)
- Índice de refracción 1.4 a 1.46 (la calcinación la incrementa a 1.49)
- Dureza (Mohs) 4.5 a 5 (la calcinación la incrementa de 5.5 a 6)
- La densidad aparente (base seca) *in situ* varía de 0.32 a 0.64 g/cm^3 .
- Absorción de aceite: 120 g/100 g de aceite
- pH 7.0
- Cerca de 10,000 especies (sumando actuales y extintas)

▽ **Algunos depósitos de tierra diatomácea en el mundo.**

Los depósitos comerciales en todo el mundo son de agua dulce (lacustre) del Mioceno al Pleistoceno (es decir, se formaron de 24 millones a 100 mil años atrás), aunque los depósitos menos comunes en los océanos tienden a ser más grandes. Algunos depósitos marinos son más del doble de antiguos (Cretáceo), por lo

general, presumiblemente, se han transformado en otras formas de sílice. Hay depósitos más jóvenes, algunos se desarrollan incluso hoy en día.

A nivel mundial, muchos depósitos, especialmente del tipo marino más viejo, se han encontrado en áreas costeras expuestas a algunos efectos volcánicos. Los depósitos de los lagos, especialmente localidades, también suelen mostrar alguna asociación con la actividad volcánica, sin embargo, hay depósitos de lago actualmente en las tierras bajas muy alejadas de la actividad volcánica (por ejemplo, Florida).

Hay muchos depósitos conocidos en el litoral del Pacífico: de Chile a Colombia, de Japón-Corea y el este de China, y el Sudeste de Asia y Australia; otros están en Europa Occidental y Europa Oriental, Oriente Medio y África Oriental. La mayoría de los depósitos son de menos de 5 millones de toneladas y sólo muy pocos son más de 50 millones de toneladas (Antonides, 1997).

En el 2014, la producción mundial se estimó en 2.3 millones de toneladas. Estados Unidos lidera la producción de diatomita con el 40% de la producción mundial, seguido de China 19%. Perú 6%, Argentina y Dinamarca, ambos con 4% y México con el 3.7% (Secretaría de economía; perfil de mercado de la diatomita, 2016).

▽ **Producción en México.**

Actualmente, las entidades federativas que producen diatomita en nuestro país son el estado de Jalisco (99.7%) y el estado de Michoacán (0.23%). En el estado de Jalisco, la mina San Nicolás, en Zacoalco de Torres se tienen yacimientos con grandes reservas y buena calidad, con impurezas como arcillas y materia orgánica. La estructura mineralizada está formada por una capa o manto de diatomita con espesor de unos centímetros hasta 20 m. El yacimiento es de un origen sedimentario lacustre (**figura 2.2.1**).



Figura 2.2.1 Principales yacimientos de diatomita en la República Mexicana (S. E., perfil de mercado de la diatomita, 2013)

▽ **Algunos usos.**

La diatomita para los Antiguos griegos, fue utilizada como un abrasivo y en la fabricación de bloques ligeros para construcción. En 535 D.C., se utilizaron bloques de diatomita para la cúpula de 30 metros de diámetro de la Iglesia de Santa Sofía en Estambul, Turquía. Sin embargo, hasta a mediados de 1800 sería de interés industrial en Europa. Uno de los primeros usos en ese momento sería como ladrillo aislante. En la década de 1860 se convirtió en el absorbente y estabilizador preferido de nitroglicerina utilizado por Alfred Noble para hacer dinamita. Maryland fue el sitio de la primera producción estadounidense de diatomita en 1884. A finales de la década de 1880, un depósito muy puro, enorme cerca de Lompoc, condado de Santa Bárbara, California; desde entonces se convirtió en el foco de interés y ha seguido dominando los mercados mundiales.

Hoy en día la diatomita tiene múltiples usos: en filtros, cerámica, papel, hule, pinturas, plásticos, como absorbente para derrames industriales, pesticida, abono, en la industria alimenticia, como aislante térmico y muchos más usos.

- **2.2.2 Caolinita.**

El caolín es un silicato de aluminio hidratado, producto de la descomposición de rocas feldespáticas principalmente. El término caolín se refiere a arcillas en las que predomina el mineral de caolinita. Sus principales características son: tamaño de 2 a 0.2 μm , peso específico 2.6, dureza 2, color blanco (aunque puede tener diversos colores debido a las impurezas), brillo generalmente terroso mate, higroscópico* (*absorbe agua en pequeñas cantidades) y plasticidad de baja a moderada. Otras propiedades importantes son inercia ante agentes químicos, es inodoro, aislante eléctrico, moldeable, de fácil extrusión, resiste altas temperaturas, no es tóxico ni abrasivo y tiene facilidad de dispersión (S.E., 2014).

Las principales entidades productoras de caolín son: Veracruz, Guanajuato, e Hidalgo. Otros estados productores son: Zacatecas, Jalisco y Chihuahua (**Figura 2.2.2**) los yacimientos de caolín en México son muy irregulares, se presentan en diversas calidades, tamaños muy heterogéneos y con impurezas como óxidos de hierro, cuarzo y sílice. La mayor parte de los yacimientos de caolín se encuentran en terrenos ejidales.



Figura 2.2.2 Los principales estados productores de caolín en México (S.E., 2014)

▽ **Origen.**

Los depósitos de arcillas pueden ser provenientes tanto de basaltos como de rocas piroclásticas intemperizadas, las cuales al ser alteradas cambiaron en su litología, dando lugar a la formación de arcillas de diferente tipo, principalmente caolinítico. Las alteraciones que se observan son oxidación, lateritización (formación de laterita por pérdida de sílice) y caolinización (pierden los iones alcalinos en presencia de agua y en ambientes ácidos).

En Chihuahua, México, existe un afloramiento de rocas riolíticas alteradas por soluciones hidrotermales, dando como resultado un depósito de caolín con óxidos de fierro, volviéndose a profundidad más compacta y sin impurezas.

En el estado de Jalisco, en el municipio de Etzatlán, se ha detectado caolín originado debido a la influencia de hidrotermalismo controlado por fracturamiento que afectó a las tobas riolíticas, alterando y transformando a los feldespatos en minerales arcillosos. Este caolín se puede clasificar como silicoso.

En el municipio de Zinapécuaro, Michoacán, el yacimiento de caolín detectado se considera como hidrotermal, de temperaturas moderadas (entre 200°-300°C), originado a causa de la alteración de las riolitas por corrientes geotermales que fluyen por diversas fracturas de las mismas. En este caolín se observa un alto contenido de sílice, así como también la presencia de óxidos de fierro, feldespatos potásicos y material arcilloso, entre otros.

▽ **Usos.**

Podría tener aplicación en las industrias de la cerámica, refractaria y de pintura; papel, vidrio, pinturas, plásticos, agroquímicos, farmacéutica, cosméticos, material eléctrico, caucho, hules, forraje, aislantes térmicos, etc.

❖ **2.3 Programa experimental.**

Se realizó un estudio para visualizar la influencia de los microfósiles de diatomeas sobre la compresibilidad del suelo, utilizando mezclas artificiales de diatomita y caolinita (D-K). El programa experimental a seguir en esta investigación consistió en la elaboración de 8 pruebas (**Tabla 2.3.1**):

Tabla 2.3.1 Mezclas Diatomita-Caolinita (D-K)

Mezclas (%)								
Diatomita	0	5	10	15	20	40	60	100
Caolinita	100	95	90	85	80	60	40	0

La prueba requiere de dos etapas, en la primera se pre-consolidan las mezclas, con la finalidad de simular las condiciones de consistencia y estructura; que se tendrían a una profundidad de 10 m en el subsuelo de la CDMX (preparación de mezclas, capítulo 3.4).

La segunda se desarrolla en el edómetro (consolidómetro de brazo), para el cual se labran las muestras pre-consolidadas y se montan con el método de “anillo flotante”. Con un LIR = 1 y un LID = 24 hr. Aplicándose cinco incrementos de esfuerzo, comenzando en 12.5 kPa y terminando con 200 kPa.

❖ **2.4 Pruebas para la obtención de las Propiedades Índice.**

La descripción física de los suelos se hace a través del tamaño de sus partículas, color, olor, textura; sin embargo, estos métodos representan solamente el primer paso en la descripción adecuada de los materiales, que debe completarse con otros procedimientos que nos proporcionen resultados cuantitativos que puedan relacionarse a las propiedades físicas que le son de interés al ingeniero geotecnista.

Las pruebas necesarias para este objeto se conocen como pruebas de clasificación, y los resultados, como propiedades índice (Peck, 1982).

- **2.4.1 Límites de consistencia o de Atterberg.**

El concepto de un suelo como material que puede presentarse en varios estados, según su contenido de agua, resulta muy útil. Cuanto mayor sea la cantidad de agua que contiene un suelo, menor será la interacción entre partículas adyacentes y más se aproximará el suelo en su comportamiento al de un líquido. Siendo la relación de la cantidad de agua adsorbida sobre la superficie de las partículas del suelo (vea capítulo 1.6.2).

La **figura 2.4.1** muestra un esquema en relación a los límites de consistencia, en ella es posible observar el concepto de Índice de Plasticidad (I_P). La determinación de los límites, resulta muy útil para la identificación y clasificación de suelos.

Debe tenerse presente, que todos los “Límites” e “Índices”, con la excepción del límite de contracción, se determinan en suelos que se han remoldeado para formar una mezcla uniforme suelo-agua. Por lo tanto, los límites no dan indicación alguna sobre la estructura del suelo (Lambe, 2004).

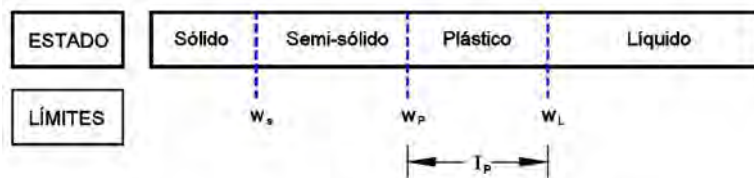


Figura 2.4.1 Estados de un suelo y sus límites de consistencia

El límite de líquido (w_L), el límite plástico (w_P) y el límite de contracción (w_s) se conocen colectivamente como los límites de Atterberg, según el científico sueco

A. Atterberg, que los definió por primera vez para la clasificación de los suelos agrícolas en 1911. Originalmente se determinaron mediante simples pruebas. Los procedimientos fueron definidos más precisamente para propósitos de ingeniería geotécnica por el profesor Arturo Casagrande en 1932.

El dispositivo mecánico que diseñó para determinar el límite líquido todavía se conoce como la Copa de Casagrande, pero éste ahora ha sido sustituido en gran parte del mundo por los varios tipos de cono (Penetrómetro), que tiene numerosas ventajas sobre ese aparato.

Las pruebas para determinar el límite líquido y plástico son con base a las normas **ASTM D4318** (la **figura 2.4.2** muestra la copa de Casagrande) y **BS1377: Parte 2** (la **figura 2.4.3** muestra una imagen del cono de penetración). Son con mucho las pruebas índice más utilizadas (Head, 1992). La **tabla 2.4.1** muestra rangos típicos de valores de w_L e I_P para las arcillas.

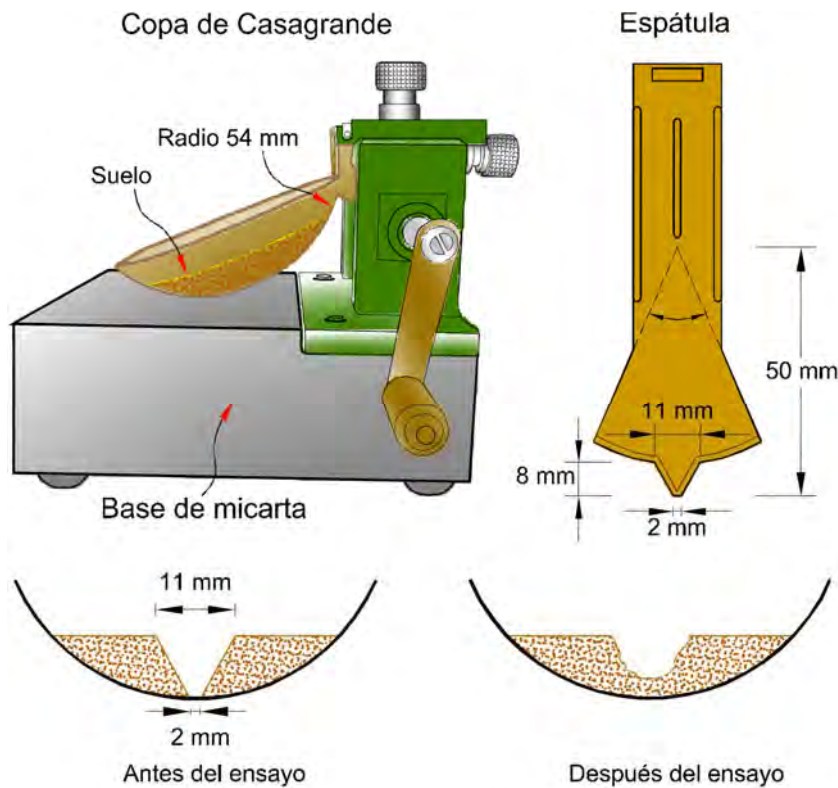


Figura 2.4.2 Copa de Casagrande

Tabla 2.4.1 Rango de valores límite de los minerales de arcilla (Head, 1992)

Mineral de arcilla	Límite líquido	Índice de plasticidad
Caolinita	40-60	10-25
Illita	80-120	50-70
Montmorillonita de sodio	700	650
Otras montmorillonitas	300-650	200-550
Suelos granulares	20 o menos	0

∇ Límite líquido (w_L).

La norma **ASTM D4318**, contempla básicamente que el límite líquido se encuentra cuando la hendidura (las dos partes del suelo separadas por la espátula) se logre unir, en cuando menos una distancia de $\frac{1}{2}$ in (13 mm), durante 25 golpes de la copa. Al ser complicado encontrar dicho punto, se toma la lectura de varios para con ellos lograr una tendencia y con base a ésta determinar el punto donde concuerda el contenido de agua con los 25 golpes.

También contempla la posibilidad de aplicar una ecuación y utilizar un solo punto para con ello encontrar el contenido de agua. Dicha expresión matemática no se considera aconsejable, debido a que se pueden cometer errores al momento de realizar la prueba única, dejando una gran incertidumbre acerca del valor obtenido.

La norma británica **BS1377**, contempla la obtención del límite líquido mediante un cono, el cual es hincado, la penetración contemplada para la visualización del w_L es con relación al tipo de cono utilizado, en el caso de éste trabajo, se optó por el cono inglés, el cual tiene un ángulo de 30° en su ápice y un peso de 80 g; dicho cono debe lograr una penetración de 20 mm (**figura 2.4.3**). Al igual que en el método de la Copa de Casagrande, se obtienen diferentes contenidos de agua para lograr una tendencia y con ello obtener el punto de contenido de agua, para el cual el cono se hinca a la profundidad mencionada. La

tabla 2.4.2 muestra los conos más utilizados, así como su peso y penetración a la cual se encuentra el límite líquido.

Tabla 2.4.2 Características de los conos más utilizados

Tipo de cono	Ángulo del cono (°)	Masa del cono (g)	Penetración para el w_L (mm)
Sueco	60	60	10
Inglés	30	80	20
Ruso	30	76	10
Indio	31	148	25.4

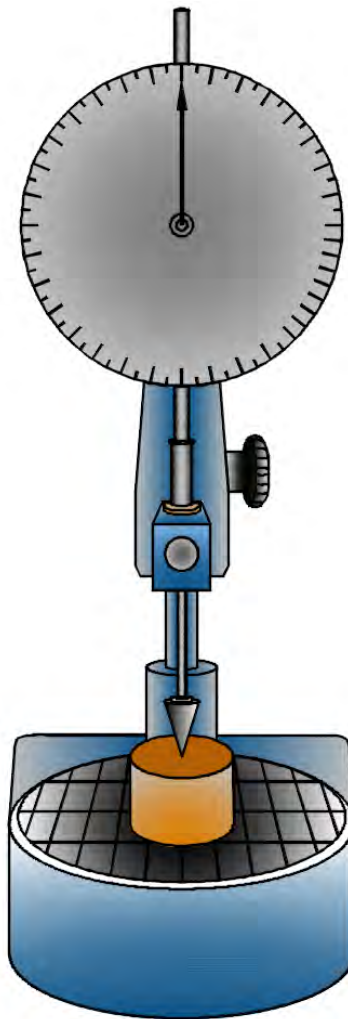


Figura 2.4.3 Prueba del cono de penetración

∇ Límite plástico (w_p).

Tanto la norma **ASTM D431**, como la norma **BS1377**, contemplan la obtención del límite plástico, como el punto más bajo de contenido de agua en el cual el suelo aún es plástico. Ambas normas describen la realización de un rollo de suelo de un grosor de 3 mm (previamente es amasado y remoldeado al igual que como se hace en la prueba de w_L), haciéndose rodar para provocar la pérdida de agua, hasta lograr visualizar ligeras grietas en el rollo de suelo, la **figura 2.4.4** ilustra el agrietamiento. Por lo general ésta prueba se realiza a la par de la prueba de w_L , debido a que la preparación, el secado y pesado de las muestras, son muy similares. Para la obtención del límite plástico del presente trabajo, se utilizó la norma ASTM D 431.

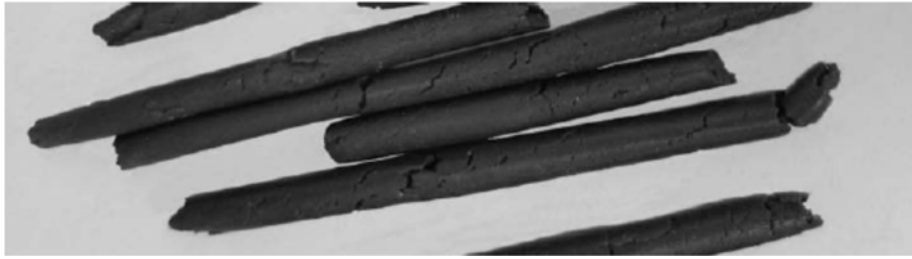


Figura 2.4.4 Rollo de suelo para la obtención del límite plástico (Budhu, 2011)

Varios autores han propuesto ecuaciones para la obtención del límite plástico, basándose en la línea de tendencia del Límite Líquido (Feng ,2000). Por la experiencia obtenida en la realización de las pruebas de límite plástico en este trabajo, no se recomienda utilizar las distintas ecuaciones propuestas, para éste caso particular, las mezclas arrojan resultados atípicos, tomando en cuenta que nuestro material se puede considerar como un “Suelo diatomáceo”.

Índice de plasticidad (I_p): es la diferencia entre el límite líquido y el límite plástico. Dejando visualizar de forma cuantitativa el rango en el cual el material se encuentra en su estado plástico.

$$I_p = w_L - w_p$$

∇ Actividad.

Es la relación que se tiene entre el índice de plasticidad y la fracción de partículas tamaño arcilla, Skempton (1953) encontró que graficando éstos dos parámetros, se podía tener la pendiente de la recta, este valor se obtiene de la siguiente forma:

$$A = \frac{I_p}{\% \text{ de tamaño } \leq 2 \mu\text{m}}$$

- **2.4.2 Contenido de agua (w).**

Este método de ensayo cubre la determinación en laboratorio del contenido de agua por masa de suelo, roca y materiales similares donde la reducción en masa por secado se debe a la pérdida de agua. Algunas disciplinas, como la ciencia del suelo, necesitan determinar el contenido de agua sobre la base del volumen. Tales determinaciones están más allá del alcance de este método de ensayo (**ASTM 2216-98**). Se entiende por "contenido de agua" a la masa de agua que se puede eliminar del suelo por calentamiento de 105 a 110°C, expresada como un porcentaje de la masa seca durante un periodo aproximado de 18 a 24 horas.

El término "material sólido" usado en ingeniería geotécnica, supone típicamente que significa: partículas minerales naturales de suelo y roca; que no son fácilmente solubles en agua. Por lo tanto, el contenido de agua en materiales que contienen materia extraña (como cemento y similares), pueden requerir un tratamiento especial o una definición calificada del contenido de agua (Head, 1992; Vol. 1).

Cuando los suelos contengan sólidos solubles, contaminantes químicos, cementantes, etcétera; requerirán de un tratamiento especial, considerando distintas temperaturas y tiempos de secado, así como precauciones sanitarias.

- **2.4.3 Densidad de sólidos (Gs).**

La densidad de los sólidos de suelos se usa en varios cálculos de la geotecnia. Su determinación se realiza en un ambiente controlado, como el de un laboratorio. La **tabla 2.4.3** muestra los valores aproximados de Gs en los minerales de arcilla.

La mayoría de los minerales de arcilla, tienen un valor de Gs dentro de un rango general de 2.6 a 2.9 (Braja, 2001).

Tabla 2.4.3 Densidad de sólidos de minerales de arcilla

Mineral de arcilla	Densidad de sólidos, Gs
Caolinita	2.6
Illita	2.8
Montmorillonita	2.65 – 2.80

El valor de Gs se obtiene en la práctica, como la relación entre el peso de los sólidos y el volumen de agua que desaloja a la temperatura ambiente. Al valor obtenido se le hace una corrección por temperatura.

Las partículas gruesas contienen, generalmente aire atrapado en los poros impermeables, que solo podría eliminarse rompiendo las partículas en granos más finos, por lo que la densidad obtenida en esos casos será una “**densidad aparente**”. En la geotecnia, generalmente interesa la “densidad aparente” de las partículas integrales y, por tanto, las partículas que se utilicen en la determinación de densidades no deben ser molidas.

El valor Gs interviene en la mayor parte de los cálculos de la geotecnia y en ocasiones, también para su clasificación (SRH, 1970).

La obtención de la densidad de sólidos para el presente trabajo, se basó en el “**Manual de Mecánica de Suelos**” emitido por la Secretaría de Recursos

Hidráulicos (SRH,1970) y en la norma **ASTM D 854**. Existe la norma **BS1377: Part 2:1990:8.3**, la cual es nombrada “Botella de densidad o Pequeño Picnómetro”. Es aplicable para la obtención de la densidad de sólidos de partículas finas (< 2 mm).

Head en su manual “*Soil laboratory testing, vol. 2*”, menciona dicha norma, pero además agrega sugerencias para enriquecer la técnica.

Peso específico seco (γ_d) o peso por unidad de volumen, se define como el peso del suelo entre el volumen unitario.

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

- **2.4.4 Relación de vacíos (e).**

La relación de vacíos es la que se establece entre el volumen de vacíos y el volumen de sólidos. Puede variar teóricamente entre 0 a ∞ . La **figura 2.4.5** muestra la relación entre fases de una muestra de suelo.

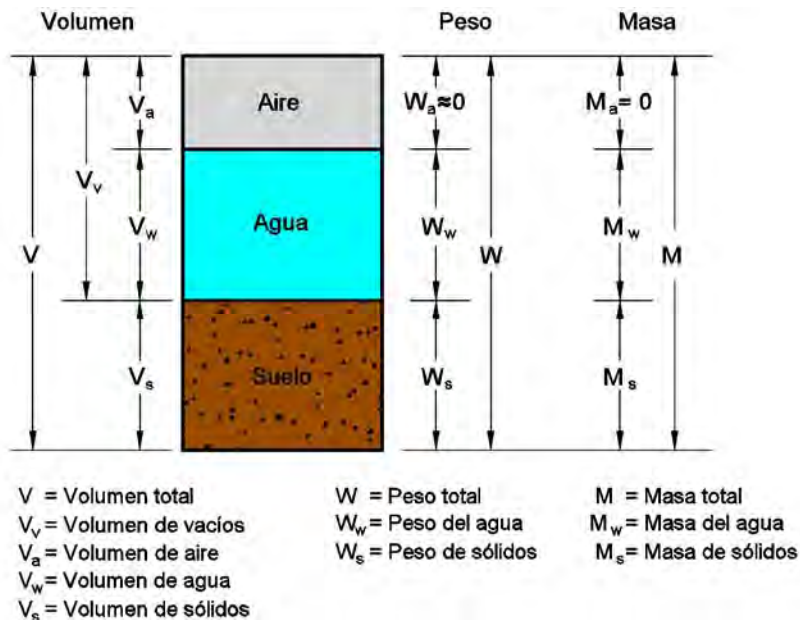


Figura 2.4.5 Relación entre fases de una muestra de suelo

CAPÍTULO 3

ETAPA EXPERIMENTAL DE LAS MEZCLAS CAOLINITA-DIATOMITA

❖ 3.1 Introducción.

De acuerdo con la línea de investigación del Dr. Jorge A. Díaz Rodríguez, acerca de las mezclas Caolín-Diatomita, se han realizado dos tesis de maestría: la primera en el año 2007, con el título “Influencia de las diatomeas en la resistencia al corte del caolín”, cuyo autor es Oliver E. Nava Tristán; la segunda en 2009, “Comportamiento cíclico de suelos diatomáceos”, por Jorge A. López Molina.

El presente trabajo hará referencia a las tesis antes mencionadas en el capítulo 4, mediante una tabla comparativa y mostrando su aportación a la línea de investigación “Caolinita – Diatomita”.

En éste capítulo se hará una descripción del trabajo en el laboratorio al momento de realizar las pruebas, comenzando con las medidas de seguridad, la descripción de los equipos, la preparación de las mezclas y la realización de la prueba.

A demás el presente capítulo, pretende dejar un antecedente de los por menores a los que se enfrentarán al realizar las pruebas y concejos de cómo solucionarlos, todo ello como ya se mencionó, con la finalidad de dejar un enriquecimiento a la línea de investigación (mezclas Caolinita-Diatomita).

❖ 3.2 Medidas de seguridad ante la manipulación de los materiales caolinita y diatomita.

El riesgo más significativo acerca de la manipulación de los materiales es su inhalación, debido a que son partículas muy finas (de 75 a 2 μm). Para minimizar el riesgo de inhalación de la diatomita o caolinita, el polvo debe ser manejado en un área ventilada, se aconseja utilizar equipo de protección (ver capítulo 3.2.3).

- **3.2.1 Peligros de la Exposición a la Tierra de Diatomeas.**

- ▽ **Peligros de inhalación.**

El mayor peligro de la tierra de diatomeas surge del hecho de que es un polvo principalmente de sílice. La sílice inhalada al llegar a los pulmones, puede causar una serie de enfermedades como la silicosis y tuberculosis. Si se produce una exposición prolongada a esta sustancia existe la probabilidad de contraer cáncer. Debido a lo anterior, el fabricante hace hincapié en que es un producto venenoso. Se le aconseja al lector informarse acerca de estos y más peligros.

- ▽ **Riesgo de irritación.**

Las partículas de la Tierra de Diatomeas en polvo, pueden causar irritación debido a su tamaño nanoscópico y propiedades abrasivas. Si una persona se expone a dicho polvo, éste puede entrar en los ojos enrojeciéndolos e irritándolos temporalmente. El polvo también puede irritar las paredes de la garganta, el interior de la nariz y en las manos; por lo que debe manipularse con equipo de protección como mascarilla, en el caso de las vías respiratorias, y guantes de látex o nitrilo, en el caso de las manos.

- **3.2.2 Peligros de la Exposición a la caolinita.**

La caolinita debido al tamaño natural de sus partículas (2 μm) es un polvo muy fino, como ya se hizo mención, debe evitarse su inhalación. Debido a su alta dispersión, se deben tomar precauciones, ya que rápidamente se produce una concentración molesta en el aire producto de su pulverización.

Aunque en general la caolinita es utilizada de forma benéfica, debe tenerse cuidado con su uso, ya que no todas las muestras de caolinita pueden ser ingeridas. Uno de los efectos podría ser una alergia a la arcilla o producir una cierta irritación en la piel, esto se da en muy raros casos y en pieles muy sensibles.

- **3.2.3 Equipo de seguridad utilizado en la manipulación de los materiales.**

Para evitar la inhalación de los polvos, tanto de la caolinita como de la tierra de diatomeas, se utilizó una “Mascarilla de Media Cara” con dos filtros, fabricados con un “Medio filtrante electroestático” para partículas, de cartuchos reemplazables con certificación NIOSH (Instituto Nacional para la Seguridad y Salud Ocupacional, por sus siglas en inglés). Para la protección ocular se utilizaron unos lentes de seguridad transparentes, evitando la entrada de partículas de polvo en los ojos; guantes de látex para las manos, previniendo una posible irritación en la piel al tener contacto con los dos materiales (**figura 3.2.1**) y una bata larga de algodón. Además, se manipulo en un área de grandes dimensiones.



Figura 3.2.1 Equipo de seguridad utilizado

❖ **3.3 Descripción de los equipos mecánicos.**

Este sub-capítulo muestra los equipos utilizados en la realización de las pruebas de compresibilidad, así como una breve explicación de los pasos realizados antes y durante la ejecución de los ensayos.

La descripción de los equipos será puntualizando sus características físicas principales, además de una breve mención de su funcionamiento.

Los apartados 3.4 a 3.6 describen la formación de las mezclas, su pre-consolidación, extracción, almacenaje, labrado, montaje y desmontaje de las probetas; con la intención de que los lectores tomen conciencia del tiempo y esfuerzo implementado en cada una de las mezclas, además de ser el caso, tengan las bases suficientes para hacer una reconstrucción del proceso y poder repetirlas, si fuese de su interés.

- **3.3.1 Consolidómetro Gigante.**

La finalidad del Consolidómetro Gigante es el de pre-consolidar las mezclas, dándoles una estructura y consistencia tal que simule las condiciones a las que se encuentra el suelo de la CDMX, a una profundidad aproximada de 10 m con un esfuerzo de 130 kPa.

El aparato está conformado por una caja metálica con dimensiones de 40 × 80 cm y una altura de 40 cm. Tiene tres paredes metálicas y una de acrílico al frente (para poder visualizar la probeta), un marco de acero, un vástago conectado a una plataforma que a su vez sostiene las cargas aplicadas; dicho vástago aplica el esfuerzo sobre una placa metálica con un balín entre ellos. También consta de dos cilindros metálicos de un diámetro de 13 cm y una altura de 16 cm los cuales contienen las muestras, las piedras porosas y la ya mencionada placa metálica. Para la medición de su deformación, se utiliza un transductor de desplazamiento (LVDT), la **figura 3.3.1** muestra el Consolidómetro Gigante.

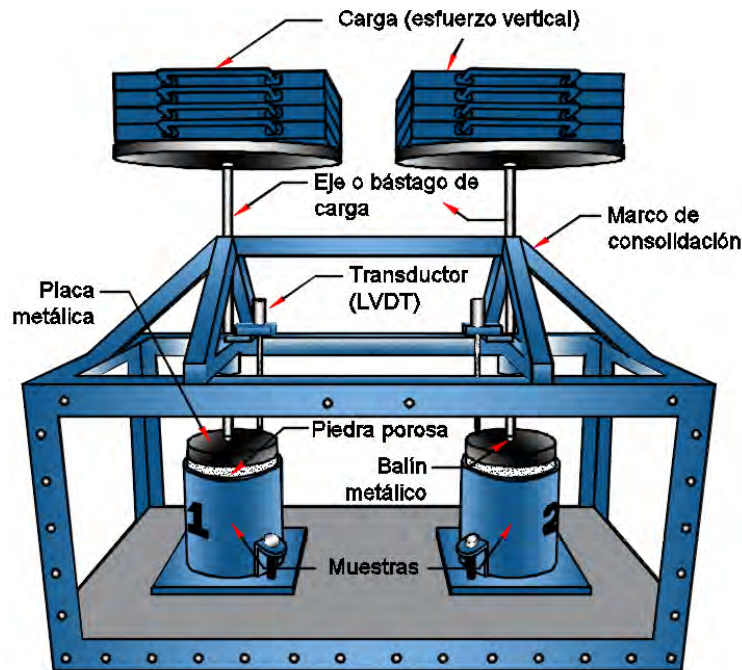


Figura 3.3.1 Consolidómetro gigante

- **3.3.2 Edómetro o Consolidómetro de brazo.**

Probablemente la Consolidación a largo plazo les ha llamado la atención a varias personas en la historia de la humanidad, pero fue Terzaghi (1925), el cual propuso un enfoque teórico para el proceso de consolidación, diseñando el primer aparato de consolidación que llamó “Edómetro” (del griego oidema, hinchazón). A principios de la década de 1930, las pruebas de consolidación de especímenes de diversos tamaños se llevaron a cabo en los Estados Unidos y fueron informadas por Casagrande (1932), Gilboy (1936) y Rutledge (1935). La teoría matemática de la consolidación fue publicada por Terzaghi y Frohlich en 1936.

En 1938, Skempton del *Imperial College*, Londres, desarrolló un edómetro para un espécimen grueso de 1 in, con base al principio de Casagrande, utilizando una rueda de bicicleta para soportar el esfuerzo del contrapeso en la viga. En 1945, Nixon diseñó un edómetro más compacto para un espécimen de 3 in de diámetro y 1 in de altura. Otras máquinas, basadas en el mismo principio, fueron desarrolladas

por los principales fabricantes de equipos de pruebas, y muchas todavía están en uso hoy en día (Head, 1992).

El edómetro utilizado en esta prueba pertenece a la marca ELE, el aparato está rígidamente construido para asegurar una distorsión mínima del marco, con tres proporciones de carga. Tiene una capacidad máxima de 8,800 kPa, para un diámetro interno del anillo de 50 mm.

La prueba de consolidación unidimensional, llamada prueba de edómetro, se utiliza para encontrar C_c , C_v , m_v , etc. La permeabilidad (k), también se puede calcular a partir de los datos de prueba. **La figura 3.3.2** muestra un arreglo similar a la configuración de una prueba de edómetro. Los detalles de la prueba y los procedimientos se describen en la norma ASTM D 2435 (otras normas para realizar la prueba son "AASTO T216-07" y "BS1377: Part 5"). Es importante considerar la calibración del equipo.

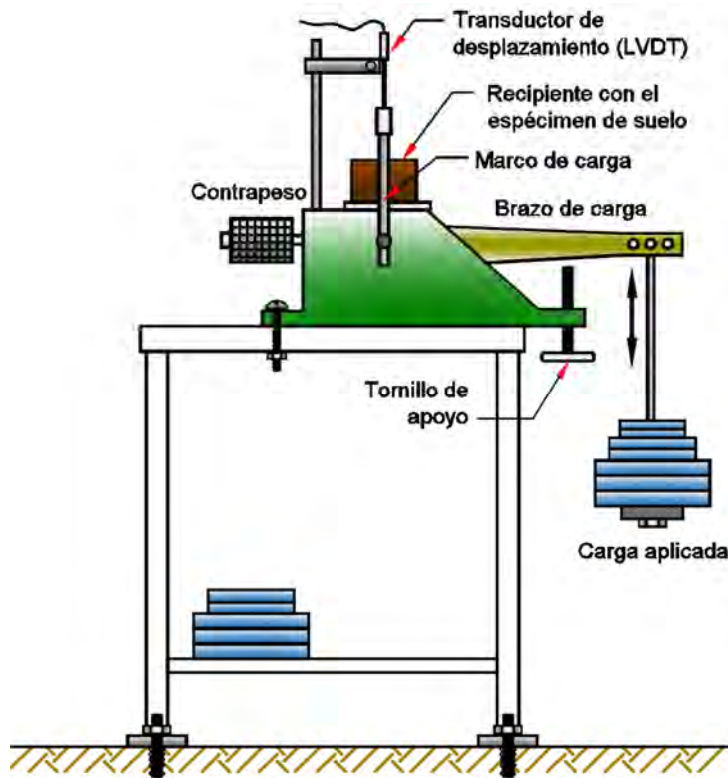


Figura 3.3.2 Esquema de un edómetro típico

La **figura 3.3.3** ilustra el diagrama de esfuerzos de un edómetro típico, el cual está basado en el principio de “Palanca de Arquímedes”, logrando amplificar la fuerza mecánica aplicada a la probeta. Como lo muestra la figura, la palanca está diseñada para lograr esfuerzos a tres proporciones (1:9, 1:10 y 1:11). La palanca gira en el punto “A” y el contrapeso equilibra los esfuerzos debido al propio peso de la barra, el marco con el que se aplica el esfuerzo en la probeta y la base donde se colocan las pesas; dicho contrapeso tiene el movimiento de un tornillo, al girarlo se aleja o se acerca al punto “A” para lograr un adecuado equilibrio.

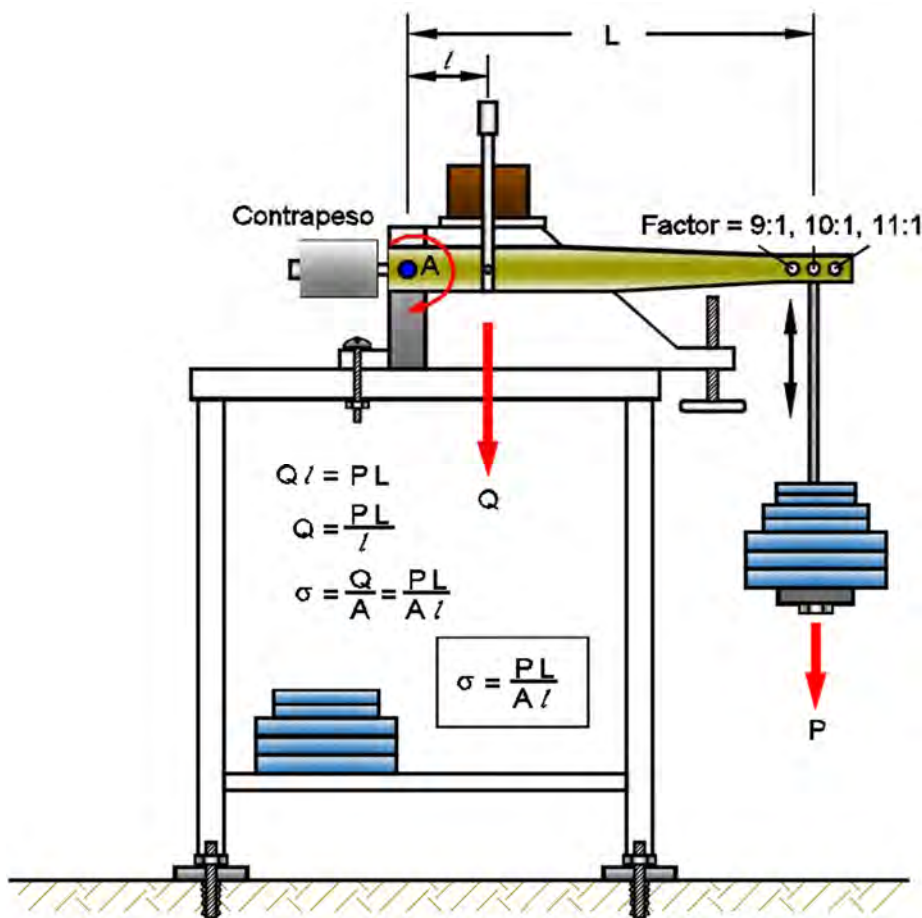


Figura 3.3.3 Diagrama de esfuerzo de un edómetro típico

▽ Propósito.

La prueba de consolidación se utiliza para la determinación de las características de consolidación de suelos de baja permeabilidad. Los dos parámetros normalmente requeridos son:

- (1) La compresibilidad del suelo (expresada en términos de la relación de vacíos, y el logaritmo del esfuerzo aplicado), es una medida cuantitativa de la deformación del suelo cuando se le aplica un esfuerzo. *
- (2) El comportamiento relacionado con el tiempo, que indica la tasa de asentamiento y, por lo tanto, el tiempo en el cual tendrá lugar el fin de la consolidación (también llamada consolidación primaria). *

*(1) Cuando una carga, como la debida a una cimentación, se coloca en el suelo, se producirá cierto grado de asentamiento, incluso si el esfuerzo se encuentra dentro de la Capacidad de Carga del suelo. Los asentamientos dentro de límites tolerables a veces son de mayor importancia en el diseño de cimientos, que las limitaciones impuestas por los requisitos de capacidad de carga derivados de la resistencia al corte.

*(2) Los asentamientos en arenas y gravas tienen lugar en poco tiempo (debido a su casi súbita disipación del exceso de presión de poro), generalmente a medida que avanza la construcción, y estos raramente causan problemas importantes. Sin embargo, en suelos arcillosos, debido a su baja permeabilidad, los asentamientos pueden tener lugar durante períodos más largos: meses, años, décadas, e incluso siglos, después de la finalización de la construcción. Los estimados de la tasa de asentamiento y del tiempo dentro del cual la consolidación estará prácticamente completa son, por lo tanto, factores importantes en el diseño de la cimentación (Head, 1992).

▪ 3.3.2.1 Prueba con anillo flotante.

Una probeta de suelo está confinada en un anillo de metal rígido, para este caso, se sustituyó el anillo metálico por uno de un material mucho más liviano, “Nylamid®”. La muestra es labrada dentro del anillo y éste es colocado entre dos piedras porosas en un recipiente cilíndrico lleno de agua, como se muestra en la **figura 3.3.4**, el cual es un arreglo de “anillo flotante”, lo que permite una deformación en la parte inferior y superior de la probeta, permitiendo un flujo hidráulico por ambas caras. Una placa metálica montada en la parte superior de la piedra porosa, transmite el esfuerzo vertical (σ) a la muestra de suelo.

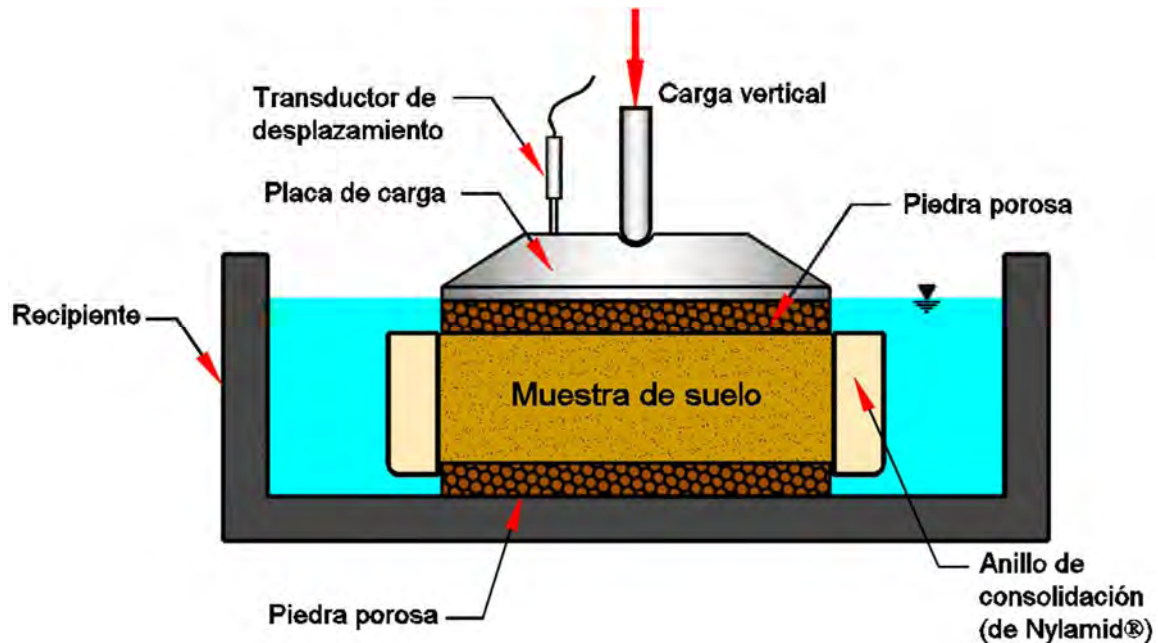


Figura 3.3.4 Configuración de una prueba de consolidación con anillo flotante

❖ 3.4 Preparación de mezclas Caolinita – Diatomita (K-D).

La Tierra de diatomeas es un material harinoso al tacto y la caolinita es jabonoso; al combinarse ambos materiales producen una mezcla pegajosa (por las propiedades de la arcilla) y un tanto rasposa (por el tamaño de partículas de la diatomita). En los siguientes párrafos se hace la descripción de su mezclado.

- **3.4.1 Mezclado de los materiales.**

La preparación de las mezclas radica en el porcentaje que tendrá una respecto de la otra, para así obtener su cantidad en peso seco. El motivo por el cual se determinará el peso seco de la muestra, se basa en el tamaño del molde que se utilizará para su pre-consolidación (ver capítulo 3.3.1).

Experimentalmente se obtuvo una gráfica que indica la cantidad de “Peso seco de la Mezcla” necesaria para llenar el molde del Consolidómetro Gigante, con un volumen de 2,124 cm³, basada en el límite líquido de cada una de las mezclas (obtenidos previamente y presentados en el **capítulo 4**), y contar con una pequeña cantidad residual, con la que se puedan realizar un par de pruebas (contenido de agua o reafirmación del límite líquido y plástico). La **figura 3.4.1** muestra la gráfica.



Figura 3.4.1 Peso de la mezcla en seco con respecto al aumento de diatomita

La **figura 3.4.1** tiene en el eje de las ordenadas el “Peso Seco de la Mezcla”, en el de las abscisas el “Porcentaje de diatomita en la muestra” y en la parte inferior se muestra el “Límite líquido (w_L)” de la mezcla, aumentando conforme se incrementa el porcentaje de diatomita en la mezcla. El w_L nos indicará la cantidad de agua necesaria para realizar la mezcla (para la obtención del w_L véase el capítulo 2.5.1). En la gráfica se visualiza la disminución del peso del material seco, debido al aumento del límite líquido, ya que el agua ocupa cada vez más volumen del contenedor.

Como un punto a observar, la gráfica cambia de pendiente en aproximadamente un 16 o 17% de diatomita en la mezcla. Éste punto tomará mayor relevancia en el capítulo 4.

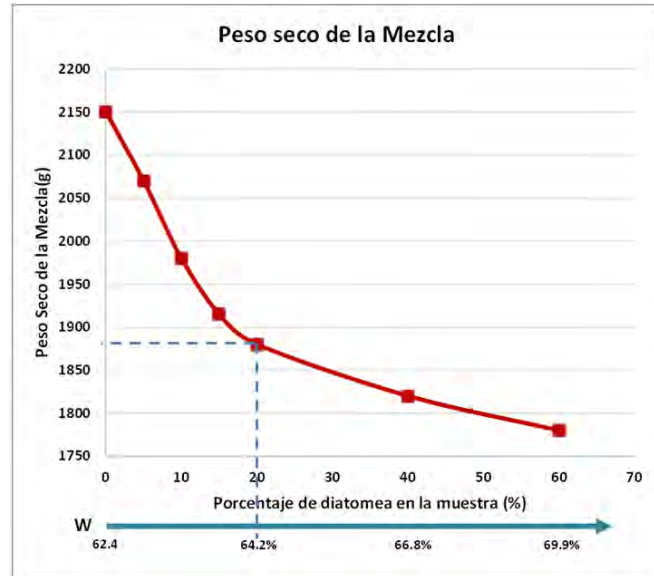
Se le hace énfasis al lector que los límites líquidos podrían variar ligeramente con respecto de otras mezclas con los mismos materiales (puede aumentar o disminuir, debido al lugar de procedencia de cada material), lo anterior no influye en gran medida con el volumen de la mezcla.

➤ **A continuación, se muestra un ejemplo para el uso de la figura 3.4.1.**

Se desea hacer el llenado del molde del Consolidómetro Gigante, con una mezcla 80% Caolinita – 20% Diatomita.

Paso 1. Se traza una línea perpendicular al eje de las abscisas en el porcentaje de diatomita, para éste caso 20% diatomita, donde intersekte la curva trazar una línea horizontal hacia el eje de las ordenadas (**figura 3.4.2**).

Figura 3.4.2 Ejemplo para utilizar la gráfica “Peso seco de la Mezcla”



Paso 2. La línea vertical nos indicará en la parte inferior el Límite Líquido (w_L) de la mezcla, obteniéndose una lectura de $w_L = 64.2\%$.

Paso 3. En el eje de las ordenadas (indicado por la línea horizontal), nos muestra el “Peso Seco de la Mezcla”, se puede leer aproximadamente $P_{SM} = 1880$ g.

Paso 4. Multiplicar el P_{SM} por el porcentaje de diatomita (20%) para obtener P_D , la diferencia entre el P_{SM} y el P_D será el peso de la caolinita en la mezcla (P_K).

$$P_D = P_{SM} \times \%D = 1880 \times 20\%(D) = 376 \text{ g}$$

$$P_K = P_{SM} - P_D = 1880 - 376 = 1,504 \text{ g}$$

Paso 5. Multiplique P_{SM} por w_L , para obtener el peso del agua de la mezcla (P_A).

$$P_A = P_{SM} \times w_L = 1880 \times 64.2\% = 1,206.96 \text{ g}$$

Paso 6. Finalmente sume los pesos para obtener el peso total de la mezcla (P_T).

$$P_T = P_D + P_K + P_A = 3,086.96 \text{ g}$$

Una vez hecho el pesaje de los materiales se procede a su mezclado, el cual se hará primero en estado seco y después con el agua destilada necesaria para tener la mezcla en su límite líquido. Se recomienda dejar reposar el agua destilada agregada a los sólidos durante al menos 12 hr (para facilitar el mezclado) dentro del cuarto húmedo, durante este lapso el recipiente se cubrirá con plástico adherente (**Figura 3.4.3**) para evitar la pérdida de agua.

Pasado el tiempo de reposo, se comienza el mezclado de los materiales con ayuda de una Batidora eléctrica (**figura 3.4.4 a**). Se recomienda utilizar el “gancho para masa” a una velocidad baja. La **figura 3.4.4 b**, muestra los materiales ya mezclados.



Figura 3.4.3 Recubrimiento del recipiente durante su reposo



a)



b)

Figura 3.4.4 Mezclado de los materiales

- **3.4.2 Llenado del molde para el consolidómetro gigante.**

Una vez realizada la mezcla húmeda, se deja reposar durante 24 hr dentro del cuarto húmedo, de la misma forma que se muestra en la **figura 3.7**. El motivo del reposo en la mezcla, es asegurar que se ha dado el tiempo suficiente para que las moléculas de agua rodeen las moléculas de los materiales sólidos y haya una adecuada repartición del agua en toda la mezcla.

Para realizar el llenado del molde del Consolidómetro Gigante con la mezcla, se necesitan un par de materiales.

Materiales a utilizar: dos piedras porosas con un diámetro de 12.7 cm (ligeramente menor al diámetro interno del molde), papel filtro, una lámina plástica y una placa metálica de 12.7 cm de diámetro (\emptyset), distribuyendo el esfuerzo ejercido por el vástago sobre la cara superior de la mezcla.

Dentro del molde se encuentra la Lámina Plástica, ésta tiene una longitud equivalente al interior del molde (40.9 cm) y una altura superior a la del molde (22 cm), ésta lámina plástica tiene dos funciones: la primera es evitar que la mezcla se quede pegada al molde y la segunda es ocupar al máximo la altura del molde tratando de obtener el mayor número de probetas.

Hay que tener presente que la muestra debe contener la menor cantidad de aire atrapado para evitar la formación de burbujas en la muestra.

La técnica utilizada es formar capas al interior del cilindro en forma circular, yendo de las paredes del molde al centro. Para esta labor se utiliza una espátula delgada, con ella se asemejará el untado de “mermelada en un pan”, donde la mermelada es nuestra mezcla y el pan la pared del cilindro, lo anterior debe realizarse con cuidado y paciencia, la **figura 3.4.5** muestran el llenado del cilindro.

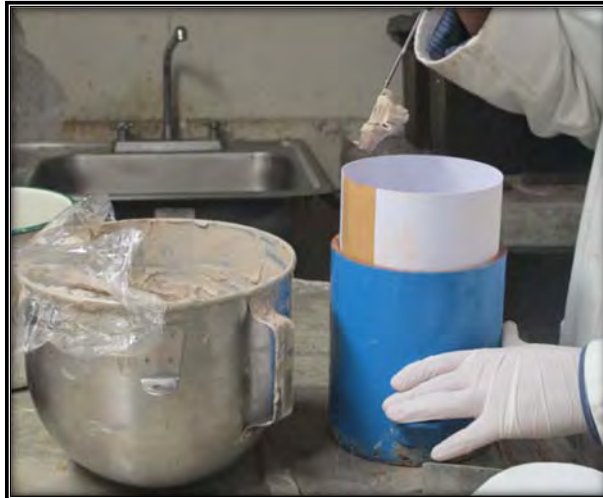


Figura 3.4.5 Llenado del cilindro

La **figura 3.4.6** muestra en dos imágenes el resultado del llenado del cilindro, en el inciso (a) muestra la piedra porosa superior y el inciso (b) la placa metálica.

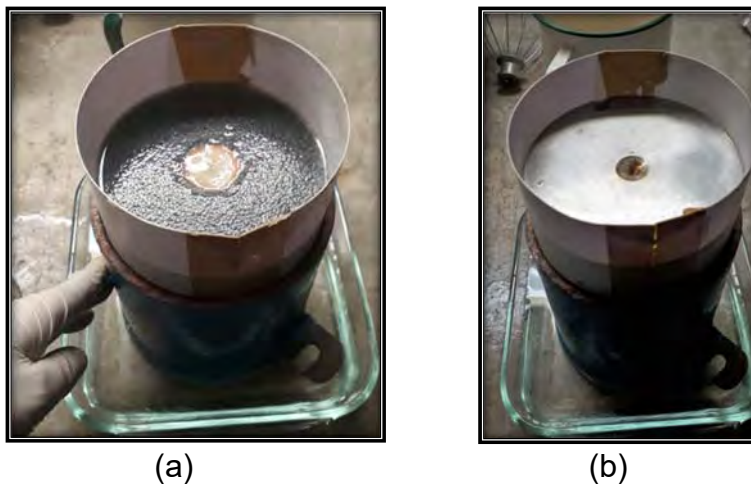


Figura 3.4.6 Molde lleno

La **figura 3.4.7** muestra lo descrito con anterioridad, esquematizando cada componente de nuestro molde y como aprovechar al máximo la altura del mismo.

es que se optó por la pre-consolidación de las mezclas, para darles una estructura a nuestras mezclas y poder hacer una ligera semejanza con el suelo de la CDMX.

- **3.5.1 Montaje en el Consolidómetro gigante.**

Una vez que se tiene el cilindro con la mezcla como lo muestra la **figura 3.4.7**, se lleva el molde hacia donde se encuentra el Consolidómetro Gigante para realizar la prueba. Se aconseja trasportarlo envuelto en una franela húmeda para evitar la pérdida de agua al salir del Cuarto Húmedo.

Se etiquetará el molde con la mezcla que contiene y la fecha en la que se inicia el montaje. El arreglo físico al que se tiene que llegar se muestra en la **figura 3.5.1**, en donde se puede ver que las cargas se irán aplicando por etapas.

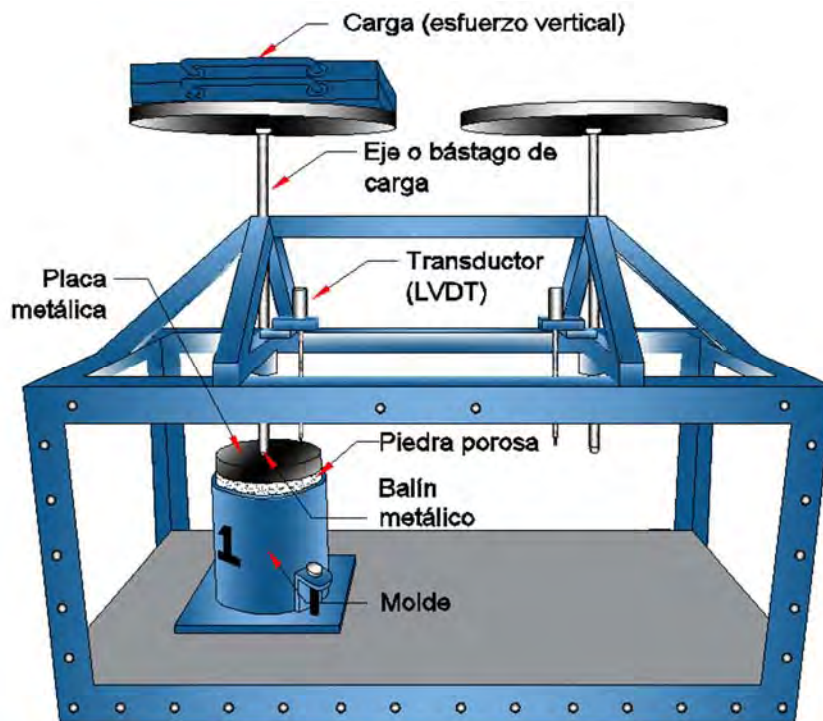


Figura 3.5.1 Montaje del cilindro en el consolidómetro gigante

El esfuerzo total al que estará sometida la mezcla es de 130 kPa, se aplicarán en 5 incrementos de 26 kPa, a cada 24 horas. Una vez alcanzado el esfuerzo total, se dejará durante 28 días (4 semanas), tomando lecturas de su deformación con ayuda de un transductor de desplazamiento, *LVDT* por sus siglas en inglés (*Linear Variable Differential Transformer*). Para evitar que la muestra pierda agua, se mantendrá el cilindro sumergido en agua, para ello la cámara se encuentra sellada, permitiendo el llenado total y a través de su ventana frontal de acrílico, es posible visualizar la muestra.

La **tabla 3.5.1** muestra los incrementos aplicados al Consolidómetro Gigante, en ella es posible ver los kilogramos aplicados y al esfuerzo al que se llega; se aconseja aplicar el primer incremento un día lunes, con la finalidad de aplicar los demás en el resto de la semana (a cada 24 horas).

Tabla 3.5.1 Incrementos en Consolidómetro Gigante

Incremento	Peso (kg)	Esfuerzo (kPa)
1	18	17
2	40	34
3	79	63
4	122	95
5	168	130

- **3.5.2 Captura de datos.**

La captura de datos se hace a través de un transductor de desplazamiento (*LVDT*), una Unidad Autónoma de Adquisición de Datos (*ADU*), una computadora y un software especializado (como lo muestra el diagrama de la **figura 3.5.2**).

La ADU se encarga de la captura de lecturas de un fenómeno físico (Sistema Análogo), para generar con ello una señal (sistema digital) capaz de ser procesada por una computadora personal (PC) y pueda proyectarse en pantalla para el usuario.



Figura 3.5.2 Diagrama del Sistema de adquisición de datos

El software se encuentra diseñado para tomar una serie de lecturas. La primera de ellas es inmediata, la siguiente a los 9 segundos y así sucesivamente hasta acumular un total de 42 lecturas. Las primeras lecturas son muy continuas, éstas se van espaciando cada vez más hasta llegar a un intervalo que va de 2 a 3 hr entre cada una. Las lecturas son almacenadas para su posterior procesamiento. En primera instancia el software nos muestra un par de gráficas con base en la información que se genera en tiempo real. Una vez terminada la prueba, los datos pueden ser extraídos en un formato que permite procesarlos en una hoja de cálculo.

- **3.5.3 Descarga, extracción y almacenamiento de las muestras.**

- ▽ **Descarga.**

La descarga de los esfuerzos se hizo de 26 kPa cada media hora. Se debe tomar precaución ya que pueden lastimarse la espalda al retirar los pesos. El desmontaje de las pesas (esfuerzos) se va alternando en las dos muestras montadas en el Consolidómetro Gigante. En ésta etapa se tomaron lecturas para cada decremento y se almacenó en una base de datos que esperamos sea de utilidad para los futuros tesisistas que continúen con la línea de investigación.

Se aconseja llevar la muestra al cuarto húmedo, envuelta en una franela para evitar la pérdida de agua y a que gotee mientras se transporta.

▽ Extracción.

La forma más sencilla de retirar la placa metálica y piedra porosa superior; es metiendo a los costados de la “lámina plástica” una espátula delgada e ir aflojando las paredes (de plástico) y así facilitar la salida al simplemente poner de costado la muestra. Se recomienda dejar la piedra porosa inferior ya que servirá de soporte al momento de extraer la muestra.

Una vez retirada la placa metálica, la piedra superior y el papel filtro; se comenzará la extracción de la muestra. Para éste paso se utilizará un alambre de aproximadamente 3 mm de grosor, introduciéndolo pegado a las paredes del molde y desplazando la mezcla en toda la circunferencia, desde la parte superior hasta la inferior, retirando los residuos para generar un espacio entre la mezcla y la pared del molde, la **figura 3.5.3** ilustra la forma de extraer la mezcla.

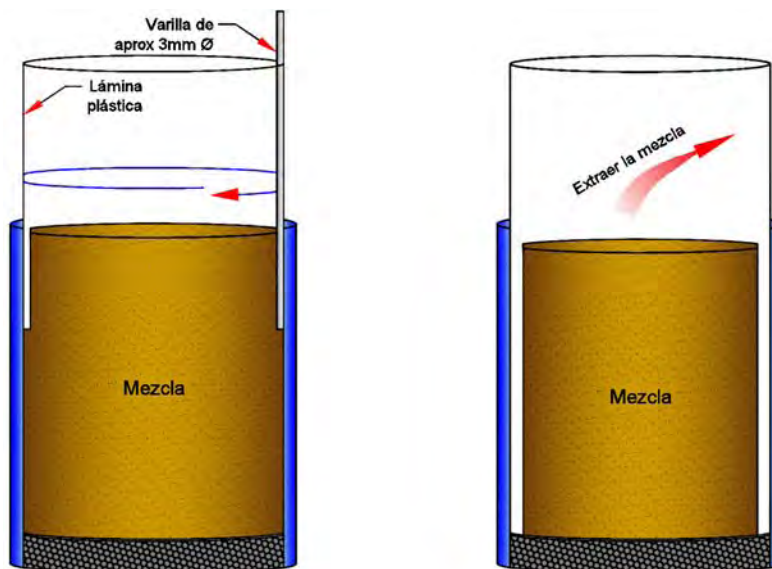


Figura 3.5.3 Extracción de la muestra después de la pre-consolidación

▽ Almacenamiento.

Las mezclas no siempre se utilizarán de forma inmediata a su extracción, por ello es importante recubrirla para evitar, en la medida de lo posible, la pérdida del contenido de agua. Una de las formas más utilizadas es el uso de plástico adherente, tela tipo “manta de cielo” y parafina. La aplicación de la parafina se realiza con ayuda de una bocha, previo calentamiento para poder manipularla de forma líquida. La parafina es un material que alcanza altas temperaturas, se recomienda tomar precauciones en su manipulación para evitar quemaduras.

El primer paso es envolver la mezcla con plástico adherente, esto reducirá la pérdida de agua. Posteriormente, se le coloca la tela alrededor de toda la muestra. Se recomienda, utilice la misma parafina para colocar la tela (como una especie de pegamento). **Precaución: no olvide el sentido de la aplicación del esfuerzo, coloque una pequeña marca, por ejemplo, una flecha vertical o una “x” que indique cuál es la cara superior.**

Una vez puesta la tela, se recubre con parafina con dos o tres capas, lo importante es que la mezcla dure varios días o semanas en las condiciones en cómo fue extraída. La **figura 3.5.4** muestra una fotografía del resultado de recubrir y etiquetar una mezcla.



Figura 3.5.4 Mezcla recubierta para su almacenamiento

❖ 3.6 Consolidación de las mezclas Caolinita – Diatomita (K-D).

La consolidación de las probetas está enfocada a obtener el comportamiento de las mezclas al aumentar su esfuerzo vertical, reduciendo su volumen (debido al expulsión del agua), lo cual provoca una deformación (vea capítulo 1.3).

- **3.6.1 Ensayo de Consolidación Unidimensional.**

La necesidad de un ensayo de laboratorio para predecir el asentamiento de una estructura, dio origen a la prueba de “Consolidación Unidimensional”. Ésta prueba asemeja a un estrato de suelo que en su parte superior e inferior tiene estratos altamente permeables (gravas o arenas), al que se le está sometiendo a un esfuerzo, por ejemplo, el peso de un edificio; el elemento de suelo está sujeto a una condición de deformación predominantemente vertical con muy pequeña o nula deformación lateral. Para conseguir ésta condición, la muestra se coloca dentro de un anillo y se le aplica el esfuerzo por medio de un edómetro o consolidómetro de brazo (Díaz-Rodríguez, 2014).

El “anillo flotante” original ha sido sustituido por uno de Nylamid®, un plástico ligero y de alta resistencia; debido a que el original era muy pesado siendo metálico, lo que provocaba que se desprendiera de la probeta por peso propio, la **figura 3.6.1** muestra el anillo.



Figura 3.6.1 Muestra contenida en el anillo

- **3.6.2 Labrado de la probeta.**

Una prueba de consolidación exitosa, radica en tener cuidado en cada uno de los pasos, el correcto labrado de la probeta nos ayudará a tener resultados más confiables. Una “probeta” recibe éste nombre, al momento que la muestra se encuentra lista para realizar el ensayo.

Como ya se mencionó, la altura del molde del Consolidómetro Gigante es de 16 cm. La altura promedio de la mezcla después de su pre-consolidación es de unos 12 cm (depende de la mezcla), lo que nos permitirá tener 3 partes con una altura aproximada de 4 cm cada una y un diámetro de al menos 10 cm, como lo muestra la **figura 3.6.2**. El corte se realiza con ayuda de un “Careador” (de madera) y un cortador (de alambre delgado). Es recomendable humedecer el Careador para evitar fricción en sus paredes y a la vez prevenir la pérdida de agua de la mezcla.

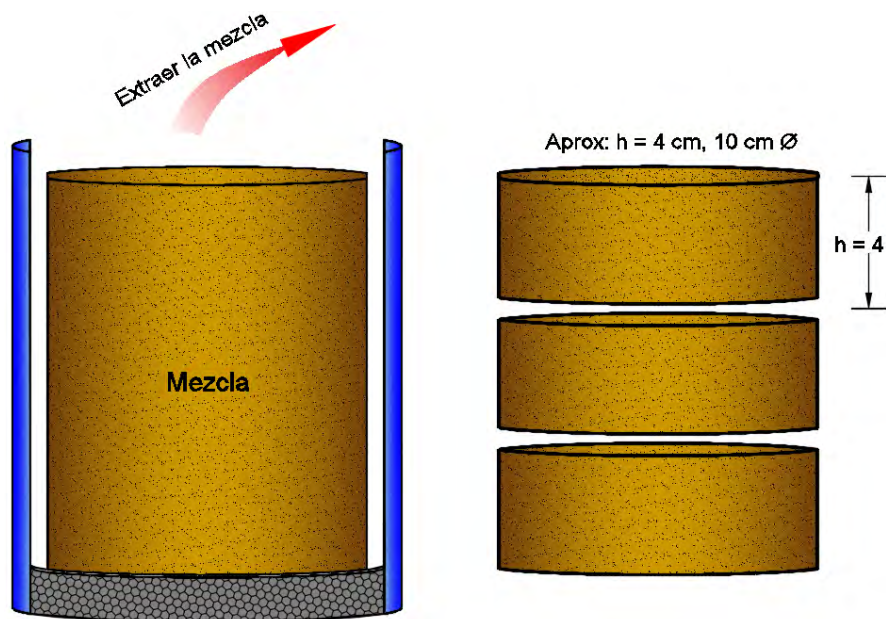


Figura 3.6.2 Corte de la mezcla pre-consolidada



Figura 3.6.3 Mezcla almacenada en anillos pre-cortados

En la fotografía de la **figura 3.6.3** es posible observar una técnica distinta de almacenamiento, basada en el principio de un tubo Shelby, en el que se utilizó un tubo de PVC (Policloruro de Vinilo) seccionado en 3 partes de 4 cm cada uno. Cada tramo es pegado uno con otro de forma consecutiva y lineal; para que, al momento de realizar la prueba, solo se corte el tramo de material necesario.

El labrado se realiza con ayuda de un “torno”, esto permitirá girar el anillo mientras con una “Cuchilla de corte” se aminora la circunferencia de la muestra, hasta igualarla al diámetro interno del anillo, ésta acción se realiza a la vez que se le imprime fuerza con la otra mano para lograr que la mezcla se introduzca en el anillo. Se recubre de una ligera capa de aceite de silicón el anillo en su parte interna, para facilitar el deslizamiento, éste además de servir como lubricante, nos ayudará a mantener la pared interna sellada.

La **figura 3.6.4** ilustra el labrado de la probeta. El anillo es fijado en la base para después poner la mezcla sobre éste, teniendo la precaución de colocarla en el sentido en que fue aplicado el esfuerzo de pre-consolidación. La cuchilla de corte forma una especie de pirámide invertida permitiendo la entrada del material. Los residuos sirven para la obtención del contenido de agua, por ello será importante tener un par de cápsulas listas, previamente pesadas y membretadas.

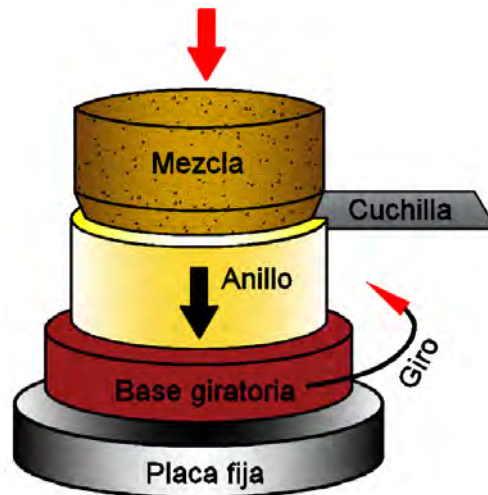


Figura 3.6.4 Labrado de la probeta

- **3.6.3 Montaje de la probeta y aplicación de esfuerzos.**

Como parte de la preparación del edómetro, debe realizarse una prueba de calibración. Éstas están enfocadas a certificar que las lecturas generadas durante la prueba, sean correctas. Se recomienda realizar la prueba con una probeta rígida, con el fin de conocer la deformación propia del equipo y que no se tome como parte del desplazamiento de la probeta.

▽ **Montaje de la probeta.**

La **figura 3.6.5** ilustra el anillo de confinamiento conteniendo la probeta, una vez que se tiene de ésta forma, se saca del cuarto húmedo envuelto en franela para evitar la pérdida de agua. Se pesa y se lleva al edómetro, para éste momento ya se metieron a hervir las piedras porosas durante al menos 10 minutos y se han recortado los papeles filtro (superior e inferior)



Figura 3.6.5 Probeta contenida en el anillo flotante

Para centrar el anillo (recordemos que la prueba se hará con un anillo flotante) dentro de la cazuela metálica, se toma como referencia el marco con el que se aplica el esfuerzo, éste a su vez tiene un vástago que interactúa directamente con la placa metálica que distribuye la aplicación de la carga en toda el área de la probeta. El centrado del conjunto se realizará con un gancho de alambre, esto permite empujar la piedra porosa junto con el anillo, la **figura 3.6.6** ilustra el centrado del anillo y el arreglo que tiene la probeta (piedra porosa – papel filtro – probeta – papel filtro – piedra porosa – placa metálica – vástago).

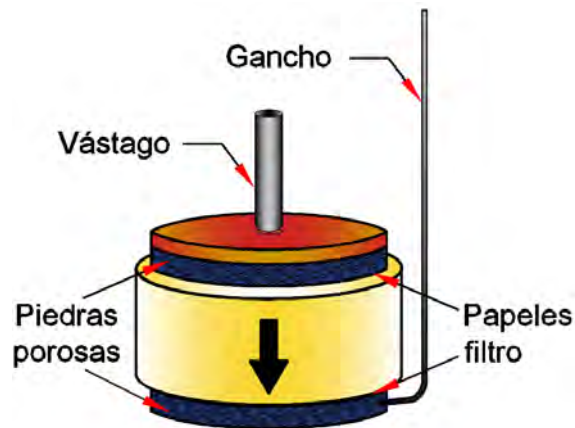


Figura 3.6.6 Arreglo de la probeta

▽ **Aplicación de esfuerzos.**

La aplicación de los esfuerzos está ligada a la presión que se desea alcanzar, para todas las mezclas se inició con una pequeña carga de 5 kPa, ésta carga se nombró “Carga de Contacto”, ya que con ella tendremos certeza de que todas las piezas se encuentran como un conjunto.

La carga inicial es de 12.5 kPa, con un LIR = 1, por lo que se aplica un incremento del 100%, a lo anterior se le llamaría “doblar las cargas” (ver norma ASTM D2435). Los esfuerzos se van aplicando hasta llegar a los 200 kPa. El edómetro en sus condiciones originales está hecho para soportar más cargas (ver

capítulo 3.3.2), pero por cuestiones de seguridad para el equipo y la persona que realiza las pruebas, se decidió solo alcanzar los 200 kPa, ya que el esfuerzo aplicado puede deformar permanentemente el equipo o las pesas al ser tantas, pueden causar alguna lesión a quien las coloca.

La cazuela fue llenada en su totalidad de agua para evitar que la probeta pierda agua durante el tiempo en que se realiza la prueba, algunos autores no recomiendan ésta acción debido a que se podría alterar la probeta, ya que en la mayoría de los casos se desconoce el tipo de suelo, por ejemplo, se pueden tener arcillas expansivas.

El arreglo de la cazuela que contiene la probeta, el marco que aplica el esfuerzo a través del vástago, el brazo de palanca, los pesos para aplicar los incrementos de esfuerzo y el transductor de desplazamiento; es mostrado en las **figuras 3.6.7 y 3.6.8.**

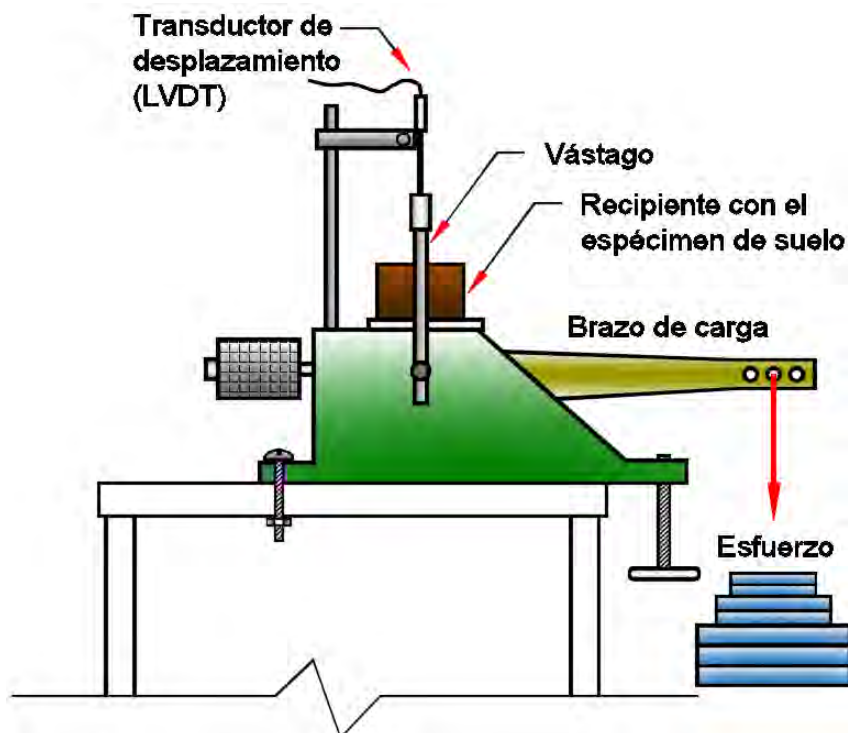


Figura 3.6.7 Diagrama de un edómetro en funcionamiento

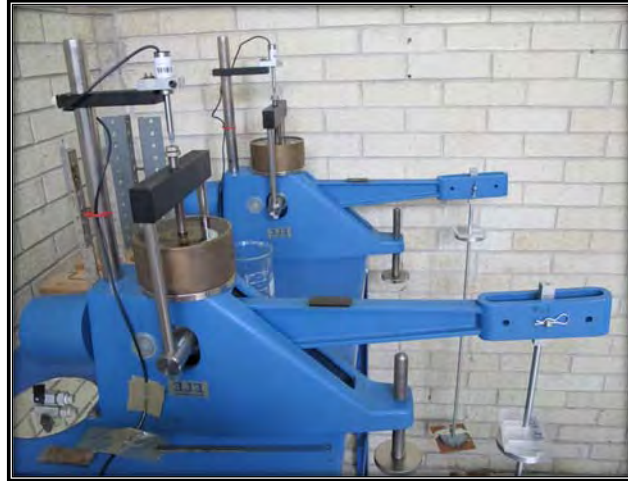


Figura 3.6.8 Ejecución de la prueba

Al igual que en el Consolidómetro Gigante, para el Edómetro se tiene un diagrama de la Adquisición de Datos generados por el fenómeno físico de desplazamiento vertical que ocurre durante la consolidación. La información es recolectada de la forma que lo muestra la **figura 3.6.9**.



Figura 3.6.9 Diagrama del Sistema de adquisición de datos (2)

- **3.6.4 Descarga y extracción de la probeta ensayada.**

▽ **Descarga.**

Las descargas se realizaron una cada hora, por lo que en 5 horas se desmonto la probeta del edómetro. Aun cuando el registro de las descargas no son un objetivo

del presente trabajo, se tomó nota de ello con la intención de saber el comportamiento y tener un registro para las futuras investigaciones por parte de del personal o tesis de los del Laboratorio de Dinámica de Suelos.

∇ **Extracción de la probeta.**

La extracción de la probeta contenida en el anillo flotante se realiza con dos piedras porosas, éstas son empujadas por la parte superior y se recorre el anillo hacia arriba, lográndose la expulsión de la muestra sobre una capsula para ser pesada (la **figura 3.6.10** ilustra la técnica).

La probeta se lleva al horno eléctrico durante 24 horas a 110 °C (para conocer su peso seco), se han comparado los pesos de “mezclas” que solo permanecen durante 18 hr dentro del horno y se ha constatado que logran ser secadas de igual forma que cuando se dejan durante 24 hr, éste dato puede ser de importancia sobre todo cuando los tiempos de trabajo son muy justos.

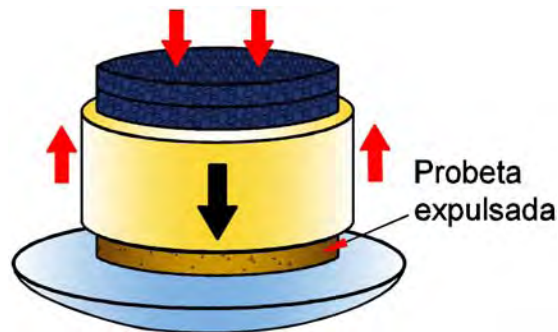


Figura 3.6.10 Extracción de la probeta

Finalmente, los datos son recolectados de la computadora, para ser procesados de acuerdo a nuestras necesidades. Los resultados del presente trabajo son mostrados en el **capítulo 4**.

CAPÍTULO 4

PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

❖ 4.1 Introducción.

En éste apartado se presentan los resultados obtenidos de las propiedades índice y los datos generados con base a la compresibilidad de las probetas. Se hará un análisis de los resultados basados en la información generada por las pruebas y se hará una comparativa con los datos de las pruebas realizadas en investigaciones anteriores (de la línea de investigación de las mezclas Caolinita – Diatomita).

❖ 4.2 Propiedades índice.

- 4.2.1 Límites de Atterberg.

La **tabla 4.2.1** muestra los resultados obtenidos de límites de consistencia para cada una de las mezclas.

Tabla 4.2.1 Límites de consistencia de cada mezcla

Mezcla		w _L (%) copa	w _L (%) cono	w _P (%)	I _P [%]
Diatomita	Caolinita				
0	100	56.2	62.4	34.9	27.5
5	95	57.6	62.9	35.661	27.239
10	90	58.3	63.2	37.157	26.043
15	85	58.82	63.72	38.813	24.907
20	80	59.34	64.24	39.04	25.2
40	60	59.56	66.76	44.96	21.8
60	40	62.62	69.92	51.12	18.8
100	0		-	-	-

En la **tabla 4.2.2** se comparan los límites obtenidos en el presente trabajo y los obtenidos por Nava-Tristán y López Molina en 2007 y 2009, respectivamente.

Tabla 4.2.2 Comparación de los resultados anteriores con los actuales

Autor de tesis		Nava-Tristán			López-Molina			Moreno-Arriaga		
Mezcla		W _L	W _P	I _P	W _L	W _P	I _P	W _L	W _P	I _P
Diatomita	Caolinita									
0	100	58.7	31.3	27.4	56.4	28.9	27.5	62.4	34.9	27.5
5	95	58.8	32.8	26				62.9	35.66	27.24
10	90	59	34	25				63.2	37.16	26.04
15	85							63.72	38.81	24.91
20	80	59.3	36.6	22.7	58.9	33.7	25.2	64.24	39.04	25.2
30	70	65.8	42.9	22.9				-	-	-
40	60				68.6	46.8	21.8	66.76	44.96	21.8
60	40				75.5	56.7	18.8	69.92	51.12	18.8
100	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Las **figuras 4.2.1 y 4.2.2**; muestran las gráficas de los datos presentados en la tabla 4.2.2.

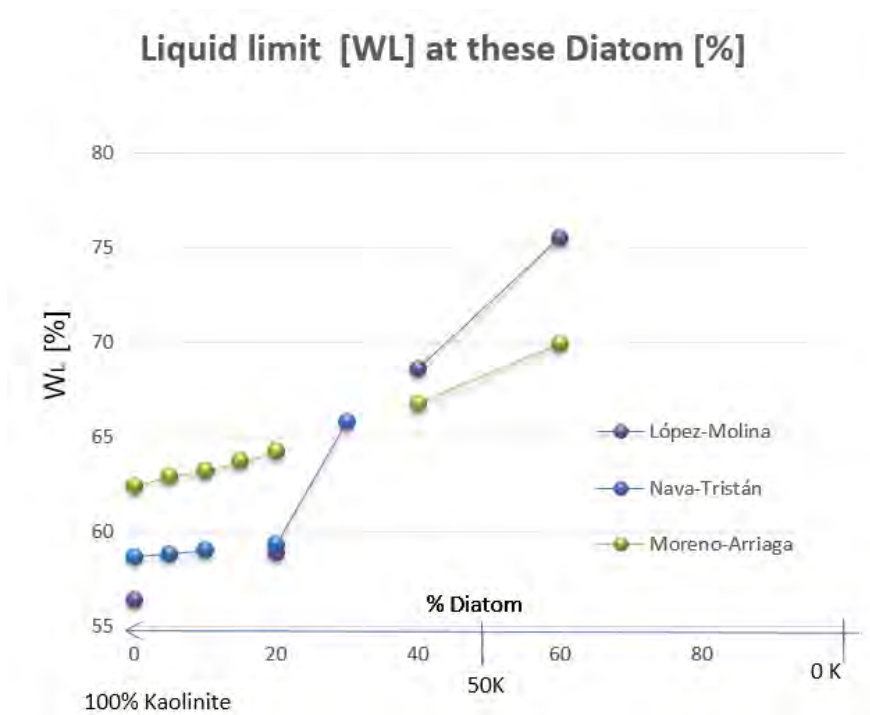


Figura 4.2.1 Límite líquido

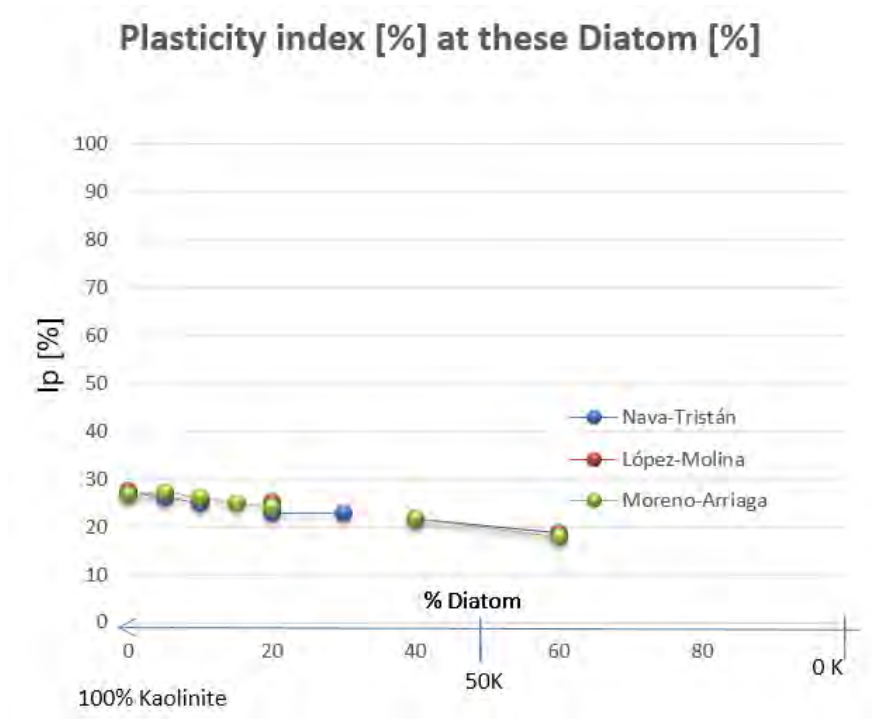


Figura 4.2.2 Índice de plasticidad

En la **figura 4.2.1** se observa como el límite líquido va en aumento conforme el contenido de diatomita en la mezcla se incrementa, las distintas aportaciones dan como resultado que las diatomeas son directamente responsables del aumento de contenido de agua de cualquier suelo. La idea de un aumento en la porosidad de los suelos, es reforzado en lo descrito por algunos investigadores (Losic *et al.*, 2007), donde determinan que la presencia de microfósiles repercute en el aumento de su porosidad y por consiguiente en el incremento del contenido de agua natural.

La **figura 4.2.2** muestra una disminución del índice de plasticidad, decreciendo con la presencia de una mayor cantidad de diatomita en la mezcla, esto puede deberse a la naturaleza no plástica de los microfósiles.

• **4.2.2 Densidad de sólidos.**

Como parte de las propiedades índice de las mezclas, se realizaron las pruebas para la obtención de la densidad de sólidos de cada una ellas, con base en la norma ASTM D 854. La **figura 4.2.3** muestra la tabla de resultados y su respectiva gráfica

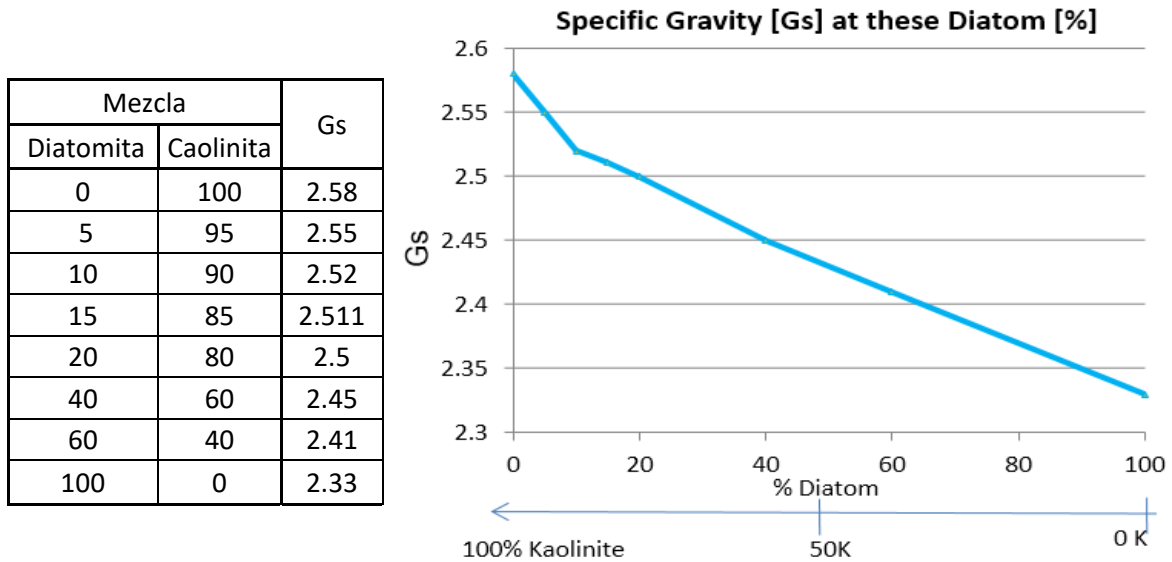


Figura 4.2.3 Densidad de sólidos de las mezclas

Se aprecia que la densidad de sólidos redujo sus valores al aumentar el contenido de diatomita en las mezclas, mientras la muestra 100% caolinita presenta un valor de 2.58, la de 100% diatomita tiene un valor de 2.33, el cual es muy bajo en comparación con cualquier arcilla.

Comparando éstos valores con suelos diatomáceos conocidos, se encontró que son muy cercanos a los obtenidos, por ejemplo, el rango de valores de la densidad de sólidos para el suelo de la Ciudad de México es del orden de 2.4 a 2.5, de acuerdo a lo anterior, el suelo de la CDMX puede contener de 40 a 60% de microfósiles en su composición, lo que concuerda con lo indicado por Mesri (1975), donde menciona que los microfósiles representan hasta un 65% de la muestra.

- **4.2.3 Relación de vacíos.**

La **figura 4.2.4** muestra la relación de vacíos inicial para cada una de las mezclas, ésta va en aumento en relación directa con el incremento de la diatomita en la mezcla.

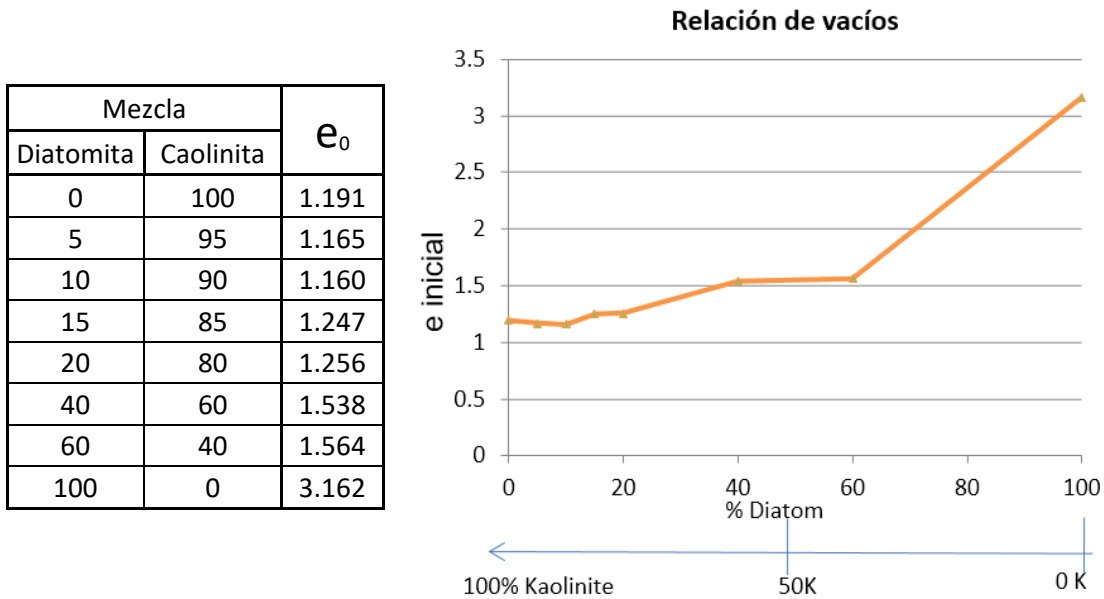


Figura 4.2.4 Relación de vacíos inicial en las mezclas

El fenómeno se atribuye a que la estructura de las diatomeas está compuesta por varias oquedades, dando como resultado una “Estructura abierta”. Es posible concluir que dichos microfósiles, son los causantes del aumento de la relación de vacíos en cada una de las mezclas. De ahí que sea visible que la relación de vacíos sea mayor al aumentar la cantidad de diatomita.

❖ **4.3 Compresibilidad.**

• **4.3.1 Comportamiento Esfuerzo – Deformación.**

Por cada mezcla, se realizaron mínimo cuatro pruebas, esto con la finalidad de corroborar las lecturas y así visualizar un comportamiento constante. En la **tabla 4.2.3** y la **figura 4.2.5**, se muestran las lecturas promedio para cada punto.

Tabla 4.2.3 Valores de la deformación volumétrica contra esfuerzo efectivo

Mezcla		Deformación volumétrica [%] vs esfuerzo [kPa]				
Diatomita	Caolinita	12.5	25	50	100	200
0	100	0.70	1.37	2.63	4.99	8.69
5	95	1.08	1.60	2.83	5.54	9.46
10	90	1.75	2.70	4.37	6.87	10.19
15	85	1.59	2.67	4.88	8.00	11.53
20	80	1.53	2.35	4.12	7.05	10.70
40	60	4.57	5.27	6.45	8.16	10.67
60	40	0.64	1.04	1.83	3.93	7.70
100	0	1.46	2.44	3.88	6.16	9.78

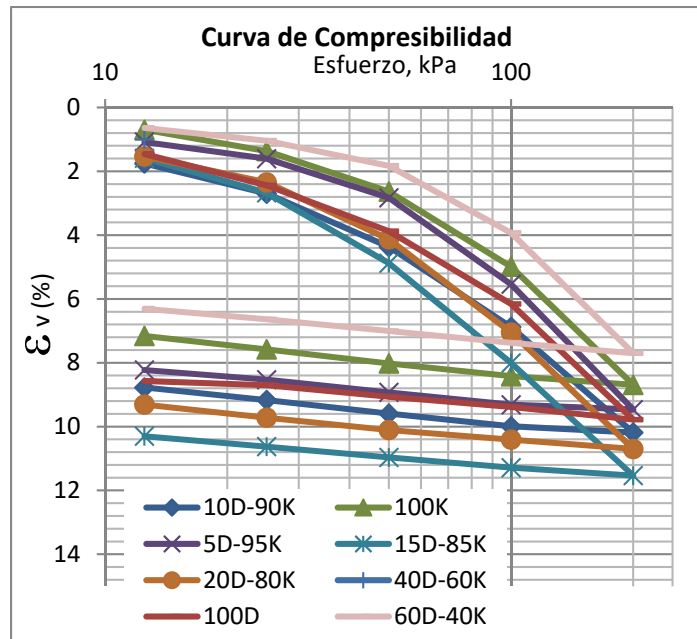


Figura 4.2.5 Deformación Volumétrica vs Esfuerzo efectivo

Con base en las curvas de compresibilidad, se obtuvieron los índices de compresibilidad (C_c), para cada mezcla, la **figura 4.2.6** muestra dichos valores numéricos y a su vez la gráfica del C_c con respecto al aumento de la diatomita en cada mezcla.

Mezcla		C_c
Diatomita	Caolinita	
0	100	0.27
5	95	0.28
10	90	0.24
15	85	0.26
20	80	0.27
40	60	0.21
60	40	0.32
100	0	0.50

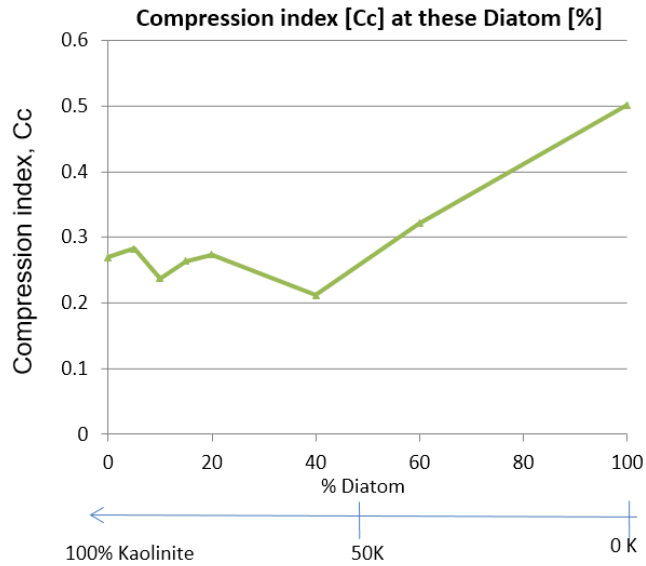


Figura 4.2.6 Índice de compresibilidad

Aunque el comportamiento del Índice de compresibilidad (C_c) no tiene una tendencia definida, sí es posible observar que va en aumento conforme se incrementa el porcentaje de diatomita en las mezclas. Lo anterior confirma los ensayos realizados por Shiwakoti (2002), el cual publica una gráfica donde se aprecia el aumento del C_c conforme se incrementa la diatomita en las mezclas, ver **figura 4.2.7**.

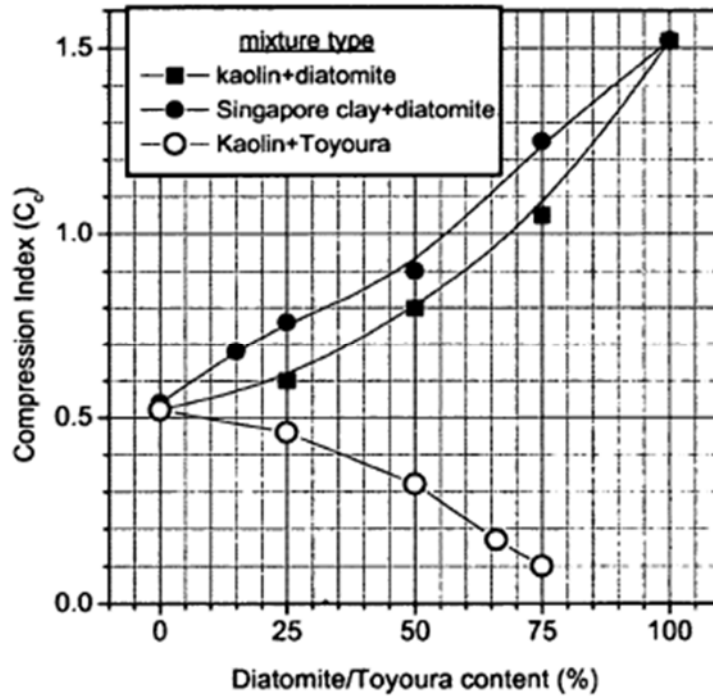


Figura 4.2.7 Índice de compresibilidad de Shiwakoti (2002)

Otra forma de presentar el efecto de los microfósiles en la compresibilidad de las mezclas, es graficando la deformación volumétrica, tomando como constante el esfuerzo efectivo y variando en contenido de diatomita en las mezclas, es la **figura 4.2.8** muestra la influencia que tienen estos fósiles prehistóricos en el comportamiento y cuál es la relación que se tiene de acuerdo al esfuerzo aplicado.

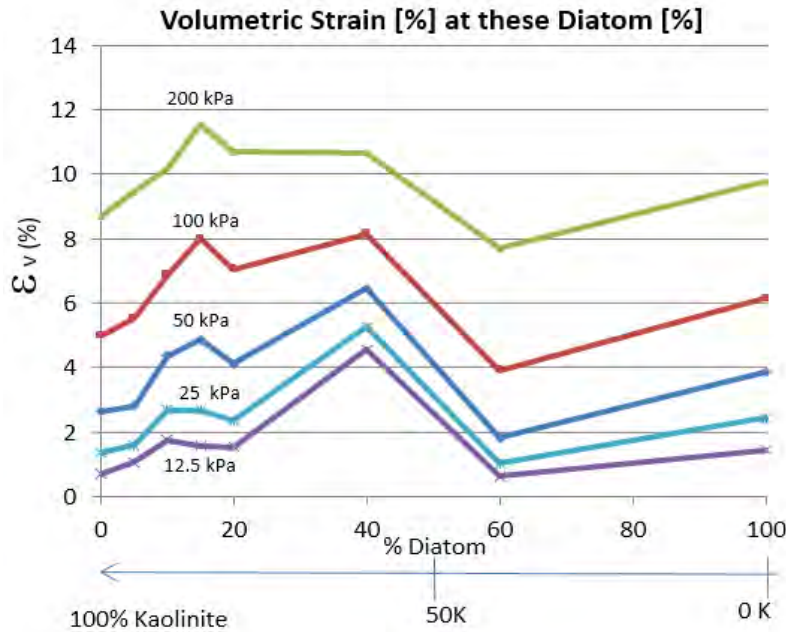


Figura 4.2.8 Deformación volumétrica vs contenido de diatomita

La **figura 4.2.8** muestra claramente el efecto que tienen los microfósiles en la compresibilidad de los suelos, en los primeros esfuerzos aplicados (menores a 50 kPa), la mezcla con el 40% de diatomita, presenta la mayor compresibilidad. Sin embargo, al superarse los 100 kPa, la compresibilidad se incrementa cuando se tiene entre un 10 y 15% de diatomita, esto ratifica la definición de Suelo Diatomáceo, el cual adquiere dicha clasificación a partir de un contenido de 10% de diatomeas.

En las **figuras 3.4.1, 4.2.3, 4.2.4, 4.2.6 y 4.2.8**; se observa un cambio en el comportamiento de las mezclas, ya sea por alguna desviación en la curva, un decremento de la misma o un cambio de pendiente, lo que nos muestra que los suelos diatomáceos son de comportamiento atípico.

También se observa que al incrementar la cantidad de diatomita se presenta un fenómeno irregular, ya que al llegar al 60% de contenido de diatomita se disminuye drásticamente la compresibilidad y al llegar al 100%, vuelve a aumentar.

CAPÍTULO 5

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones.

1. El límite líquido va en aumento conforme se incrementa la diatomita en la mezcla, no así el índice de plasticidad el cual se ve reducido conforme se aumenta el contenido de diatomita.
2. La densidad de sólidos se va reduciendo al aumentar la cantidad de diatomita en la mezcla.
3. La relación de vacíos inicial se ve incrementada conforme se aumenta el contenido de diatomita, concluyendo que los microfósiles dan como resultado una estructura abierta.
4. El índice de compresibilidad (C_c), marca una tendencia a ser incrementado conforme se aumenta el contenido de diatomita en las mezclas.
5. La compresibilidad de las mezclas en los primeros incrementos (igual o menor a 50 kPa) es mayor con un 40% de diatomita. Una vez que supera los 100 kPa, la mayor compresibilidad se observa en la mezcla de 15% de diatomita.

5.2 Recomendaciones para futuras investigaciones relacionadas con el presente trabajo.

Nuestro conocimiento acerca de la interacción entre las diatomeas, las partículas de arcilla y el agua está en sus inicios. Por lo tanto, es necesario profundizar en el estudio de temas como los efectos hidrodinámicos y las reacciones químicas de las fracciones de diatomeas.

REFERENCIAS

Antonides, Lloyd E. (1997). Diatomite. Prior to January 1996, published by the U.S. Bureau of Mines

Armstrong Howard A. (2005). Microfossils. 2a edition. Ed. Blackwell Publishing.

Bignot, Gerard (1988). Los microfósiles. Ed. PARANINFO, S.A. Madrid, España.

Braja M. Das (2001) Fundamentos de ingeniería geotécnica. Cengage Learning Latin Am.

Budhu, Muni (2010). Soil Mechanics and Foundations. Ed. Jhon Wiley & Sons, Inc. 3rd ed.

Daner, Gloria y Verde, Mariano (2008). Fósiles Microscópicos. Fósiles de Uruguay. DIRAC, Facultad de Ciencias.

Díaz-Rodríguez. J. A., Leroueil (1992). Yielding of Mexico City clay and other natural clays. Journal of the Geotechnical Engineering. Vol. 118, No. 7, pp. 981-995.

Díaz-Rodríguez. J. A. (1998), "Physical, Chemical and Mineralogical Properties of Mexico City sediments: a Geotechnical Perspective", Canadian Geotechnical Journal, 35: 600 – 610.

Díaz-Rodríguez. J. A. & Santamarina, J. C. (2001), "Mexico City Soil Behavior at Different Strains: Observation and Physical Interpretation", Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 127:9: 783-789.

Díaz-Rodríguez. J. A. (2003). Characterization and engineering properties of Mexico City lacustrine soils. In Characterization and Engineering Properties of Natural Soils. Balkema Publishers. Vol. 1, 725-755.

Díaz-Rodríguez, J. A. (2011). Monotonic behavior of diatomaceous soils. Geotecnia 233, Órgano Oficial de la Sociedad Mexicana de Ingeniería Geotécnica, A.C., 20-25.

Díaz-Rodríguez, J. A. (2014). Mecánica de Suelos: naturaleza y propiedades. Ed. Trillas. Ciudad de México.

Domínguez, José Manuel., (1992). Las arcillas: el barro noble. Fondo de cultura Económica. Ciudad de México.

Durham, D.L., 1973. Diatomite, in Brobst, D.A., and Pratt, W.P., eds., United States minerals resources: U.S. Geological Survey Professional Paper 820, p. 191-195.

Enciso de la Vega, (1980). Cimentación con pilotes en el Templo Mayor. Naturaleza, México, D.F., UNAM.

Feitosa, M. I. M. & Mesquita, O. N. (1991), Wall-drag effect on diffusion of colloidal particles near surfaces: A photon correlation study. Physical Review A, 44(10): 6677-6685.

Head, K. H. (1992), "Manual of Soil Laboratory Testing: Permeability, Shear Strength and Compressibility Test", ELE International Limited, Vol. 2, London.

Hernandez-Becerril, D. U., (2000). Morfología y taxonomía de algunas especies de diatomeas del género *Coscinodiscus* de las costas del Pacífico mexicano

Hochuli, Peter A.(2013) Angiosperm-like pollen and *Afropollis* from the Middle Triassic (Anisian) of the Germanic Basin (Northern Switzerland).

Horne , David J. *et al* (2012). Ostracoda as proxies for quaternary climate change (cap 1). Departamento de Estratigrafía y Paleontología. Universidad del País Vasco.

Krutak, P.R. 1972. Some relationships between grain size of substrate and carapace size in modern brackish-water Ostracoda. *Micropalaeontology* 18, 153-159.

Lambe (2004). *Mecánica de Suelos*. Ed. Limusa. Instituto Tecnológico de Massachusetts.

López Molina J. (2009). Comportamiento Cíclico de Suelos Diatomáceos. México, D.F., Tesis de maestría. UNAM.

Lo, K.Y. (1962). Shear strength properties of a sample of volcanic material of the Valley of Mexico, *Géotechnique*, Vol. 12, No. 4, pp. 303-318.

Locat, J., Tremblay, H., Leroueil, S., Tanaka, H. & Oka, F. (1996), Japan and Québec clays: their nature and related environmental issues. In *Proceedings of the 2nd international Congress on Environmental Geotechnics*, Osaka, Japan: 127-132.

Locat, J. and Tanaka H. (2001). A new class of soils: fossiliferous soils. *Proceedings of the 15th International Conference on Soil Mechanics & Geotechnical Eng.*, Istanbul, Turkey. pp.:2295-2300.

Losic, D., Pillar, *et al.* (2007). Atomic force microscopy (AFM) characterization of the porous silica nanostructure of two centric diatoms. *Journal of Porous Matter*.

Marsal, R.J. and Masari, Y.M. (1959). The subsoil of Mexico City. First Pan-American Conference of Soil Mechanics and Foundation Engineering, Mexico City.

Mesri, G., Rokhsar, A. and Bohor B.F. (1975). Composition and compressibility of typical samples of Mexico City clay. *Géotechnique*, Vol. 25, No. 3, pp. 527-554.

Molina, Eustoquio (2004). *Micropaleontología*. Ed. Prensas Universitarias de Zaragoza. 2ª ed. Textos Docentes.

Nava Tristán O. (2007). Influencia de las Diatomeas en la Resistencia al Corte de Caolín. México, D.F., Tesis de maestría. UNAM.

Peck, R. B., Hanson, W. E. y Thornburn, T. H. (1982), "Ingeniería de Cimentaciones", Limusa, 1a edición, México.

Purcell, E. M. (1977). Life at low Reynolds number. *Am. J. Physics*. 45: 3-11.

Round, F. E., Crawford, R. M. 2000. *The diatoms: biology & morphology of the genera*.

Santamarina, J.C., Klein, K.A. and Fam, M.A. (2001). *Soils and Waves*. Wiley, New York.

Shiwakoti (2002). Influences of diatom Microfossils on engineering properties of soils. Soils and Foundations Vol. 42. Japanese Geotechnical Society.

Smol, J. P., Stoermer E. F., 2010. The diatoms: applications for the environmental and earth sciences. 2a Ed. Cambridge.

Sociedad Española de arcillas (2018). Caolinita

Secretaría de economía (2016)

SRH (1970) Manual de Mecánica de Suelos. Secretaría de recursos hidráulicos. Dirección de proyectos, Departamento de ingeniería ambiental.

Sunesen, I., Hernandez, D. U. 2008. Diatomeas marinas de aguas costeras de Buenos Aires (Argentina) V. Especies del género *Chaetoceros*

Tanaka. H. & Local, J. (1999). A microstructural investigation of Osaka Bay clay: the impact or microfossils on its mechanical behavior. Canadian Geotechnical Journal. 36: 493-508.

Tanaka, 1-1. et al. (2001). Characterization or Singapore. Bangkok, and Ariake clays. Canadian Geotechnical Journal 38 (2): 378-400.

Terzaghi, K., Peck, R.B. and Mesri, G. (1996). Soil Mechanics in Engineering Practice. Third Edition. John Wiley and Sons, New York.

Vogel, S. (1983). Life in moving fluids. Princeton University Press. Princeton, N. J.

Zeevaert, L. (1949). An investigation of the engineering characteristics of the volcanic lacustrine clay deposits beneath Mexico City. PhD. thesis, University of Illinois.

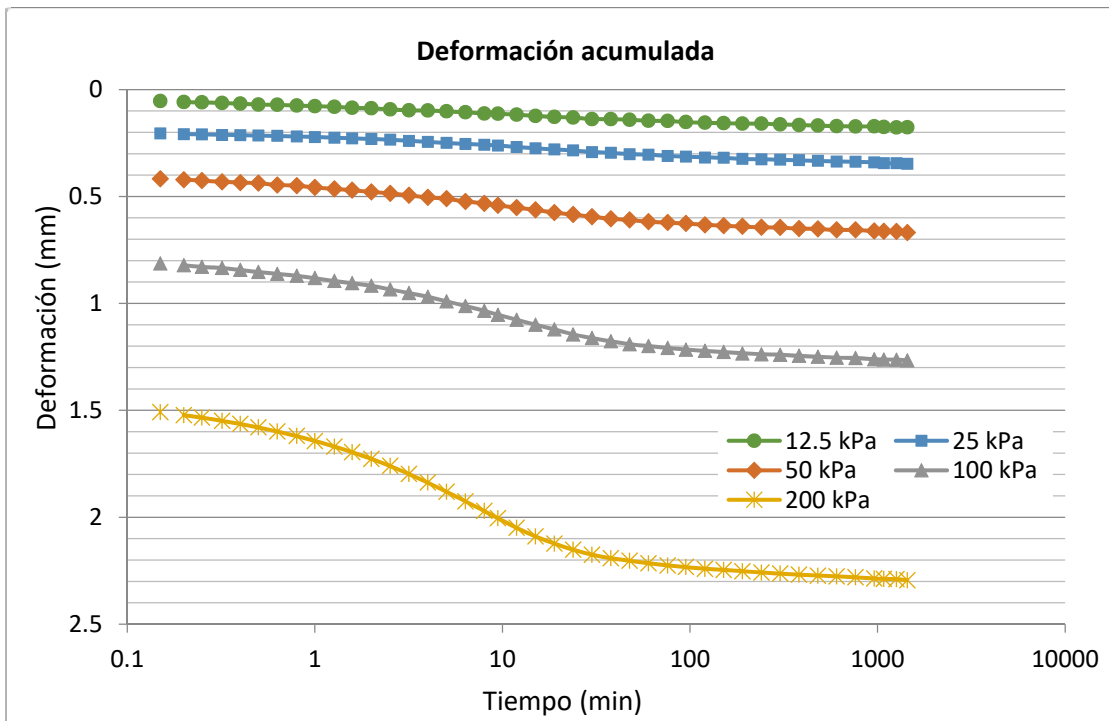
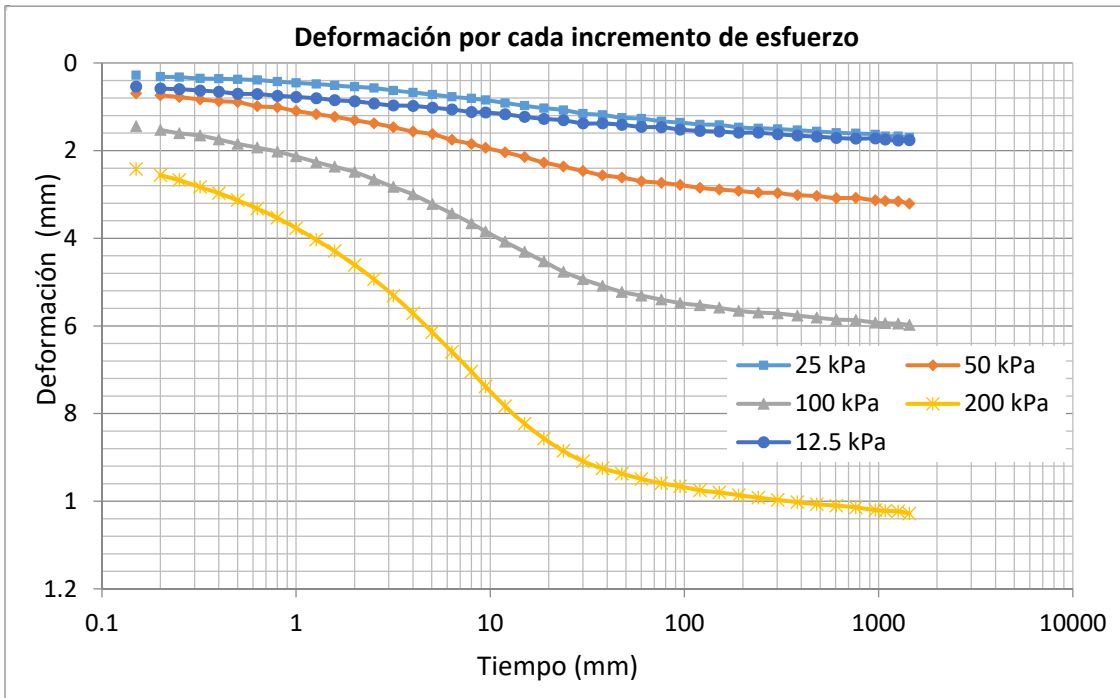
Zeevaert, L. (1982). Foundation engineering for difficult subsoil conditions. 2nd Ed., Van Nostrand-Reinhold Co., New York, N.Y.

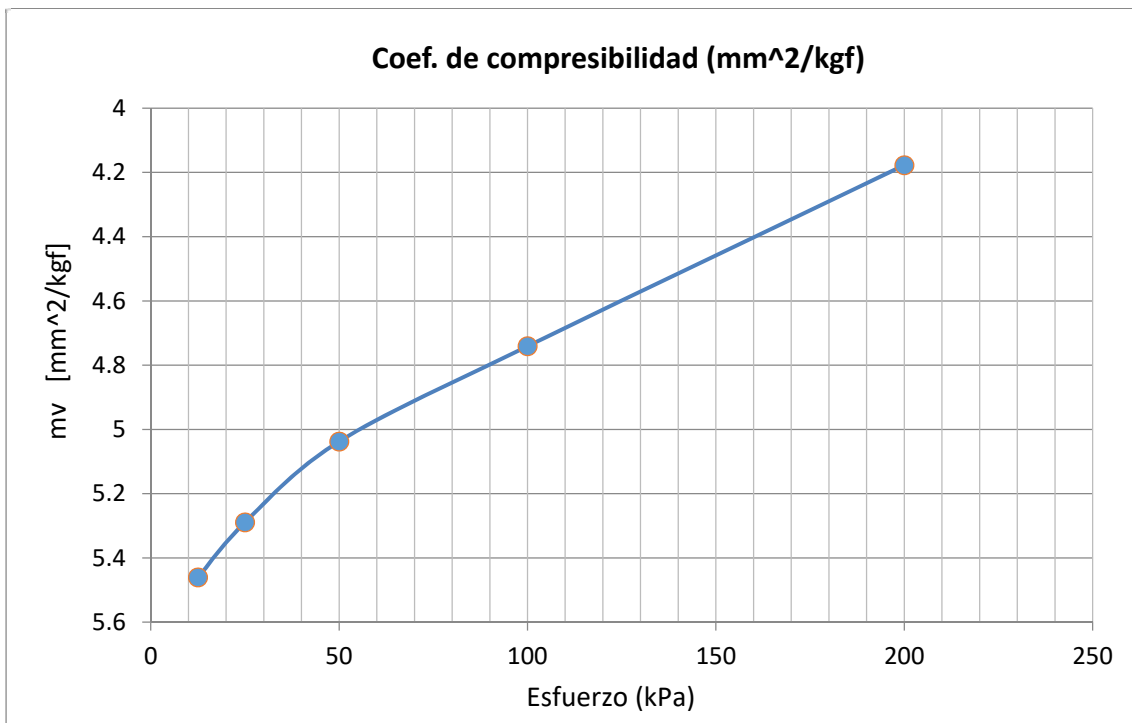
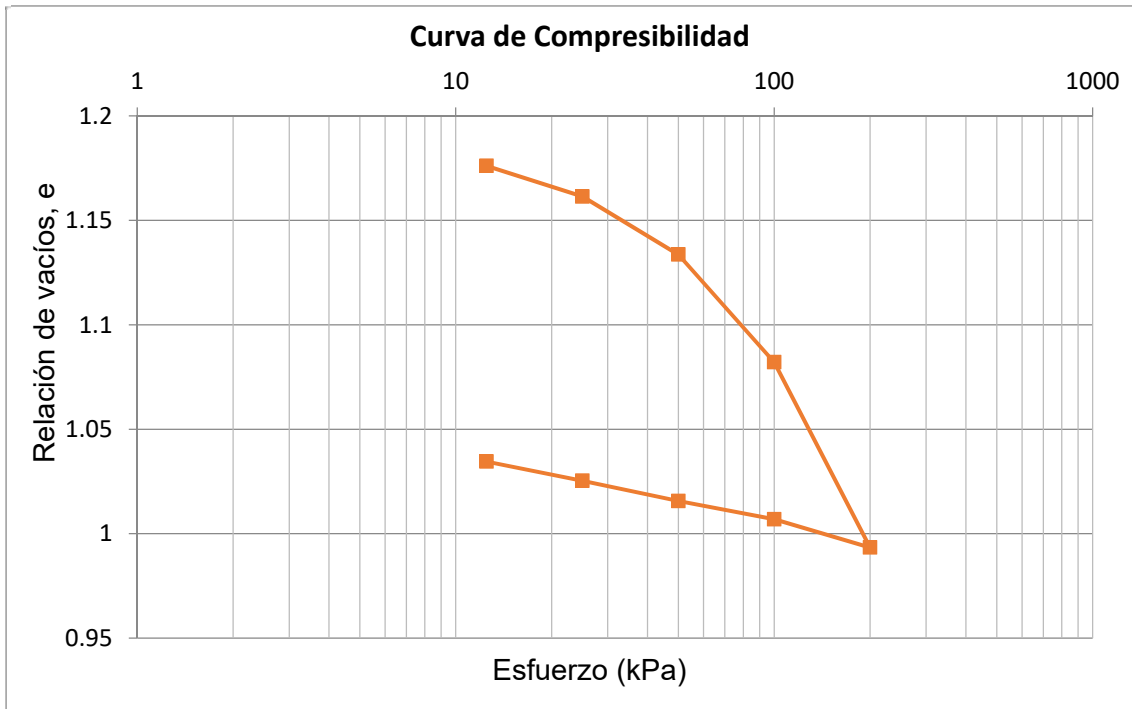
Zeevaert, L. (1988). Seismo-geodynamics of the ground surface. Editora e Impresora International, Mexico City, Mexico.

ANEXO A

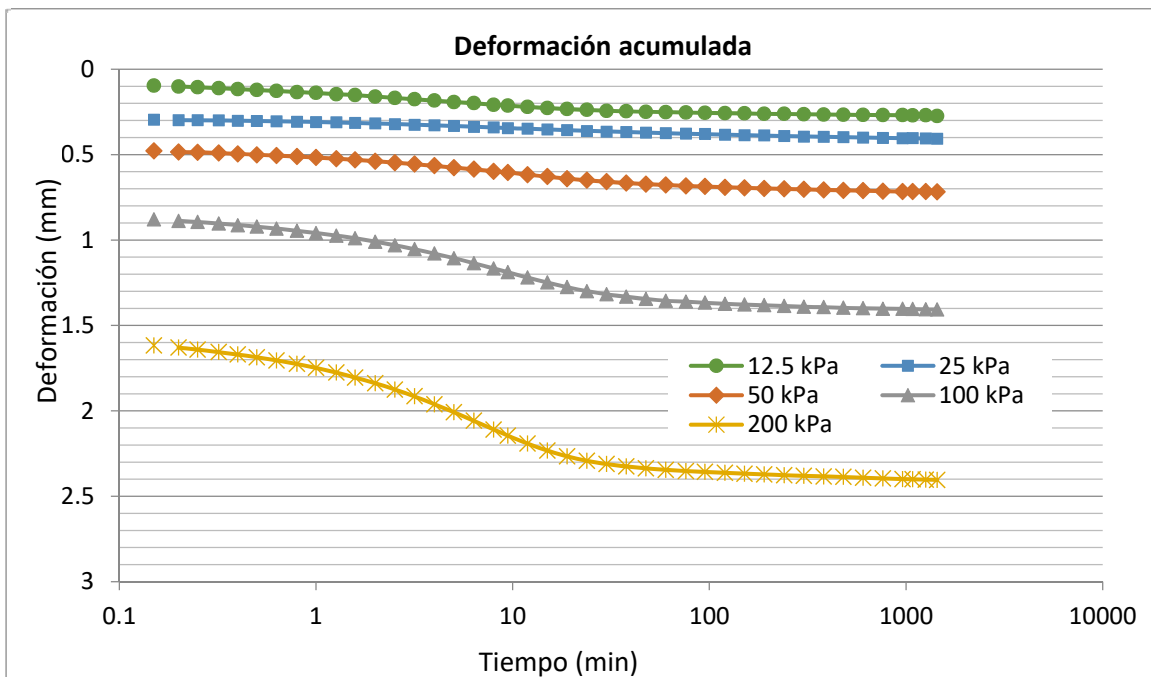
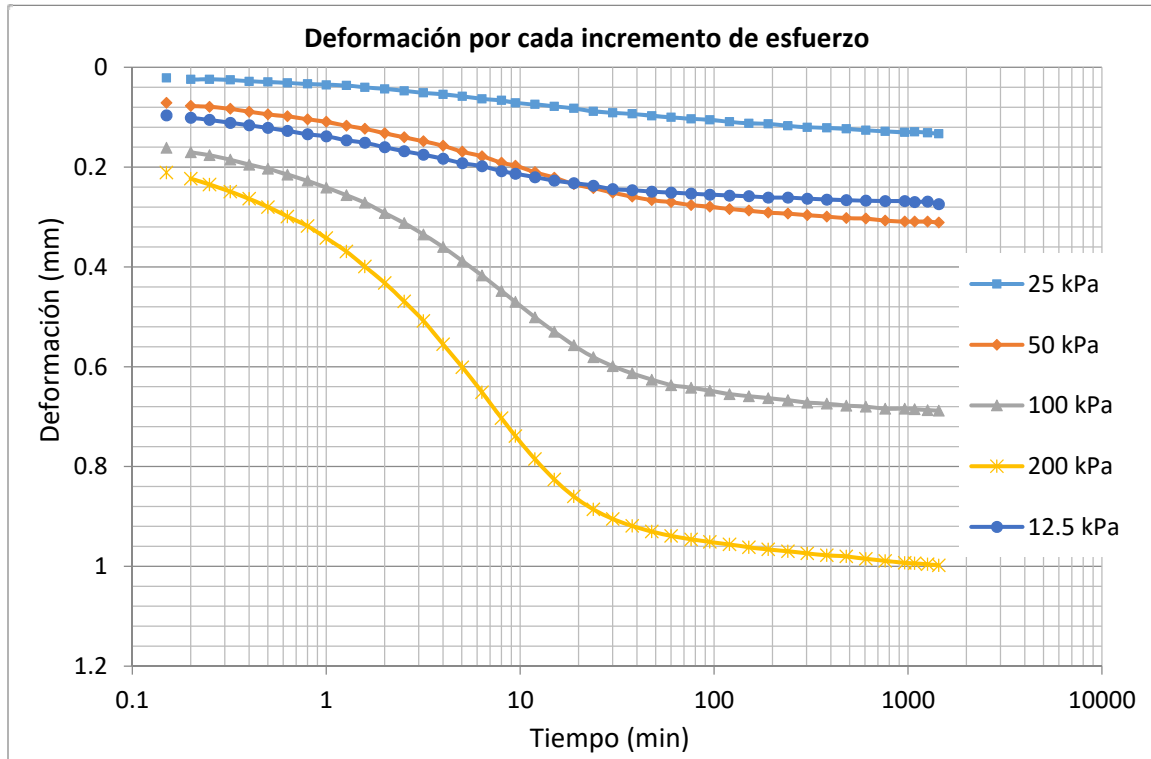
CURVAS DE CONSOLIDACIÓN Y COMPRESIBILIDAD

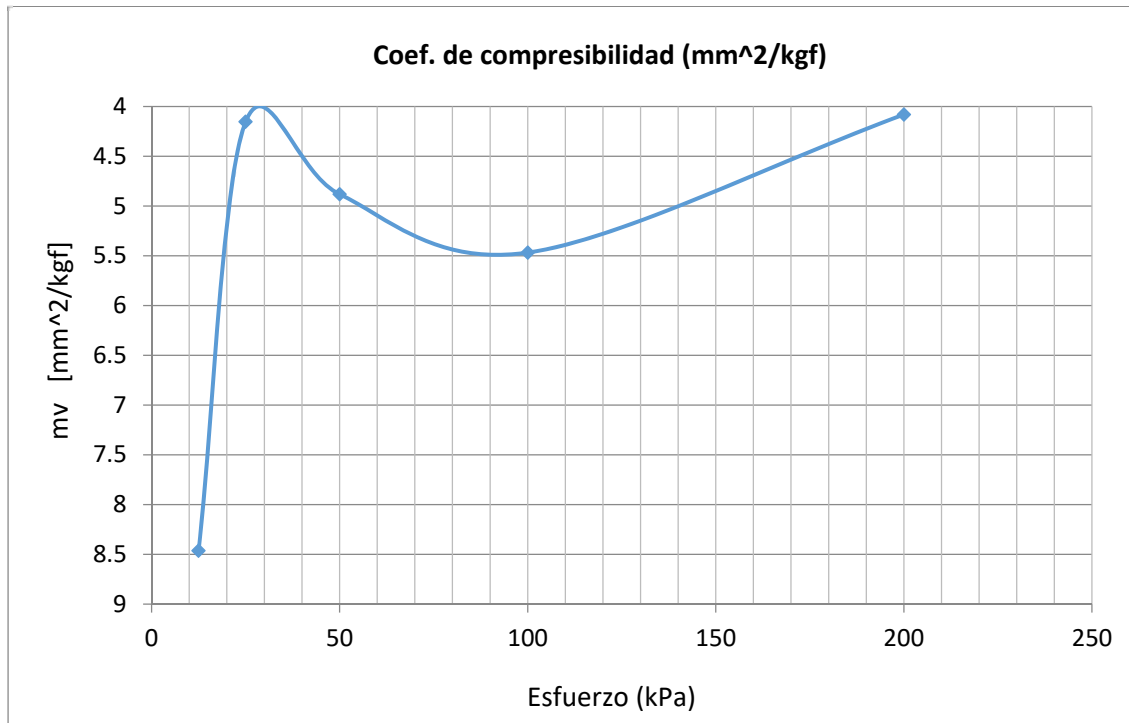
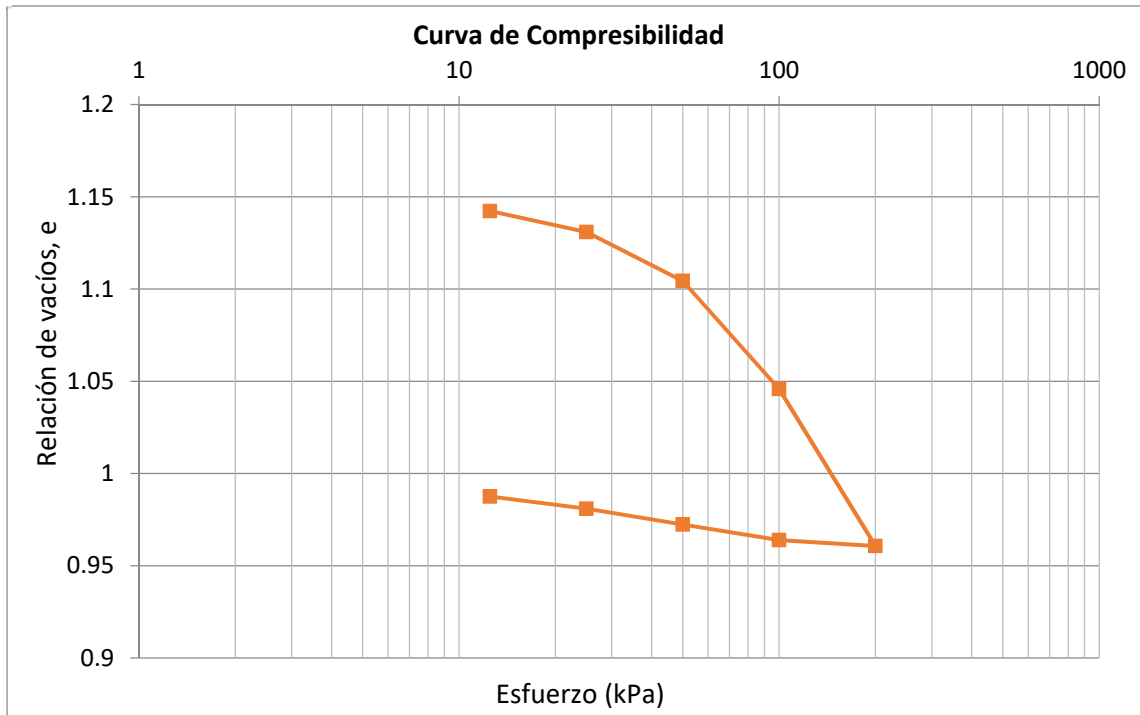
Caolinita 100%



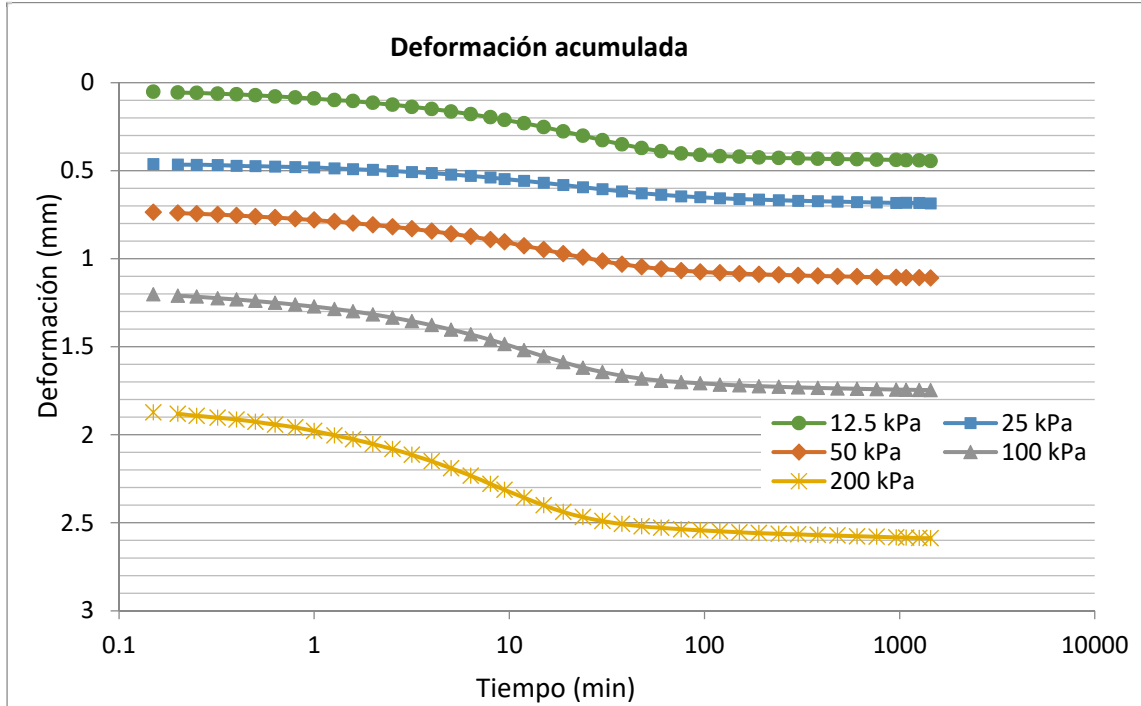
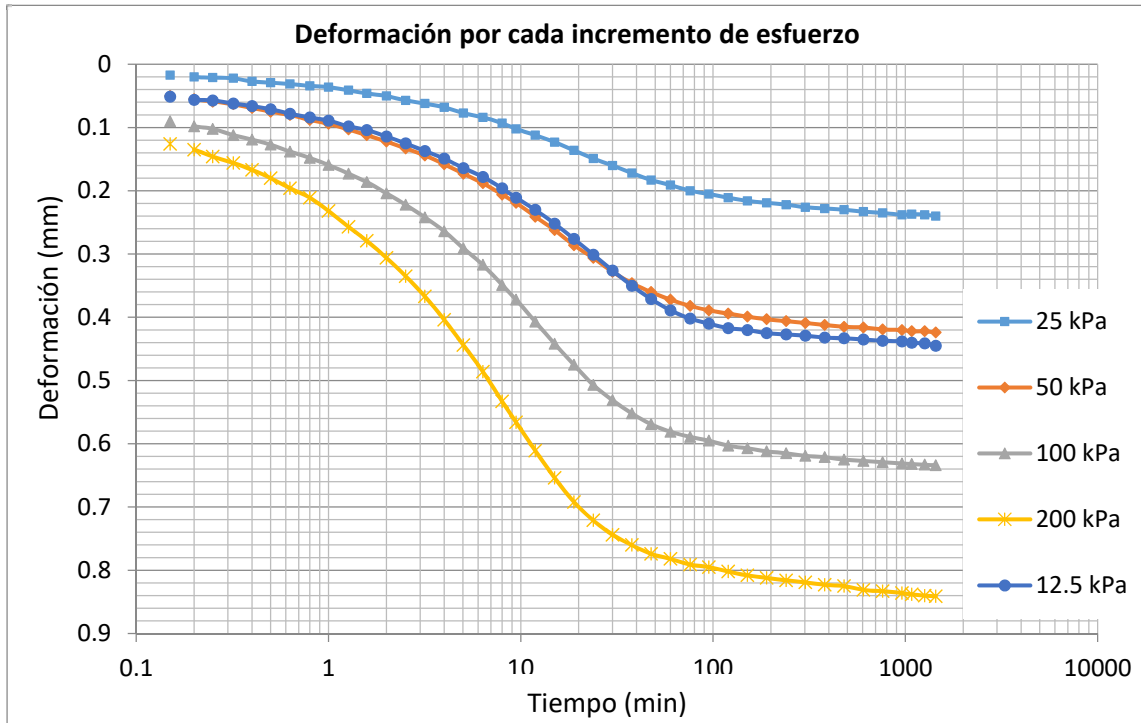


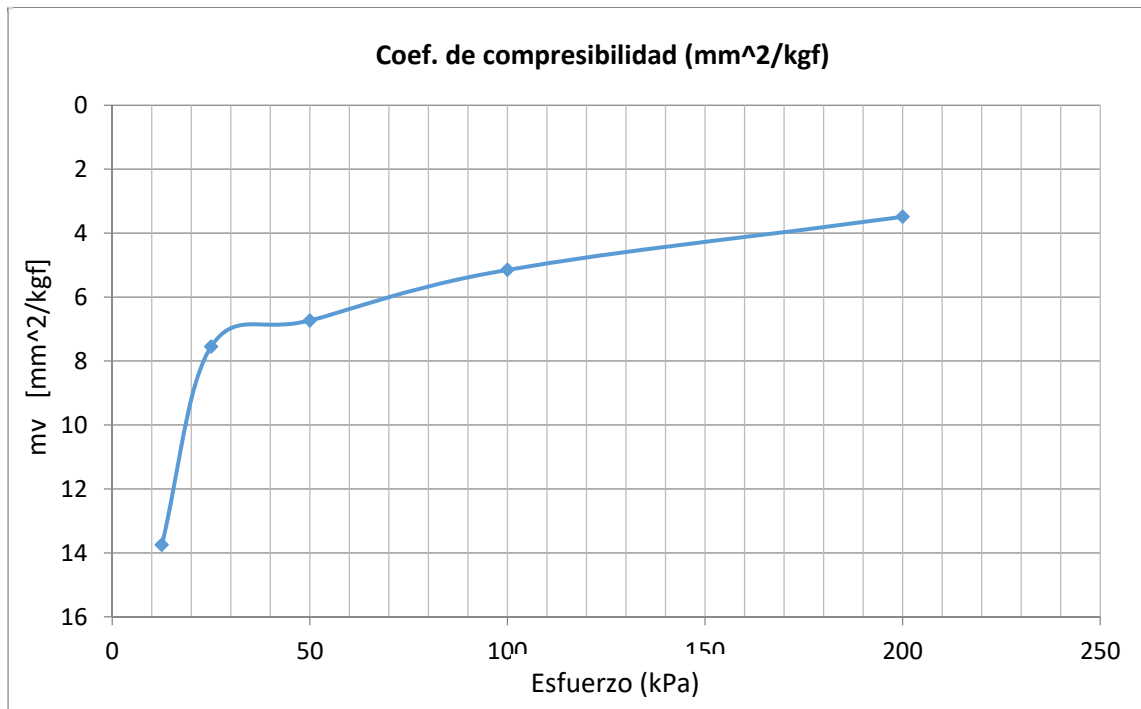
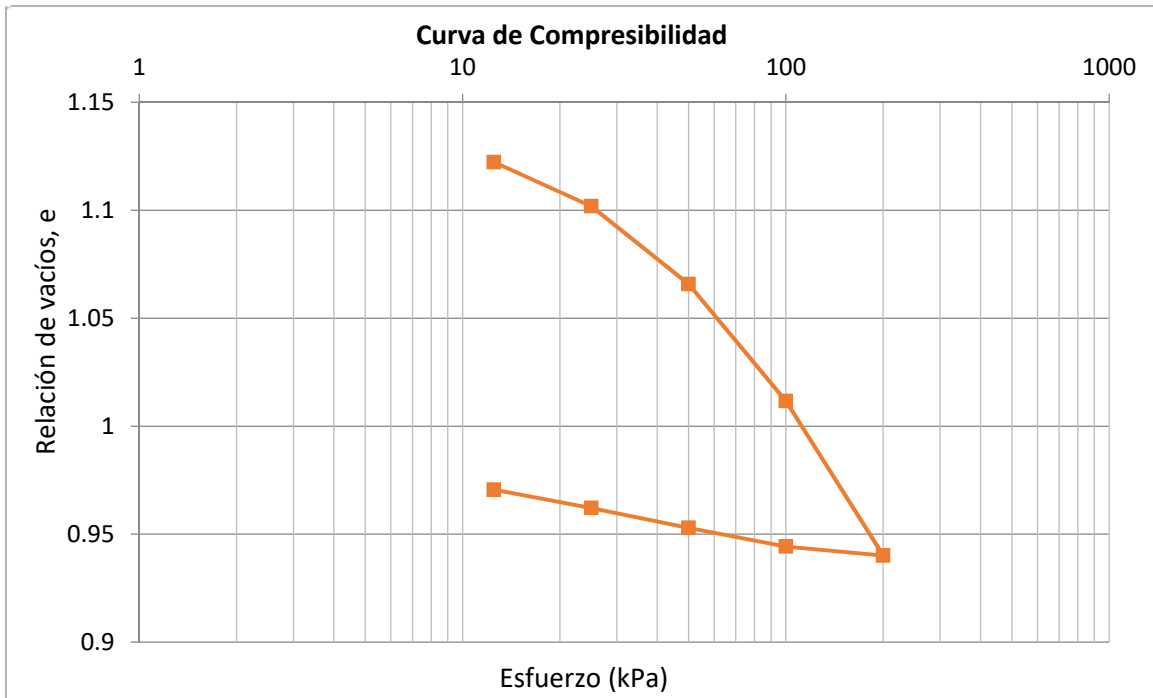
Mezcla: 95K – 5D



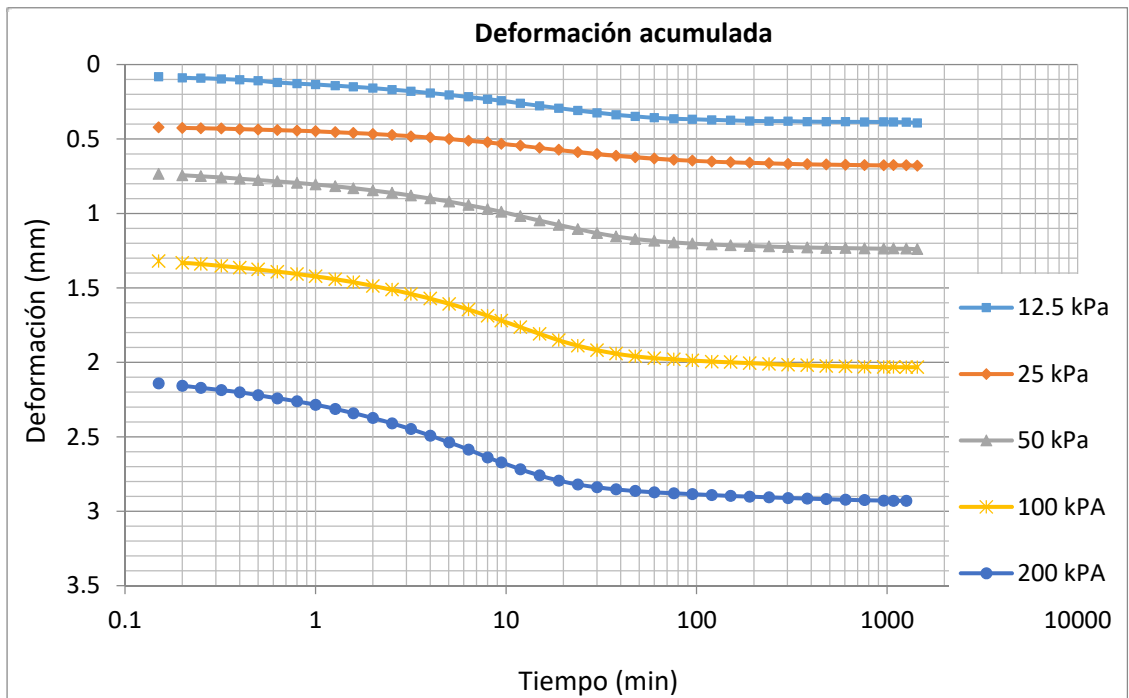
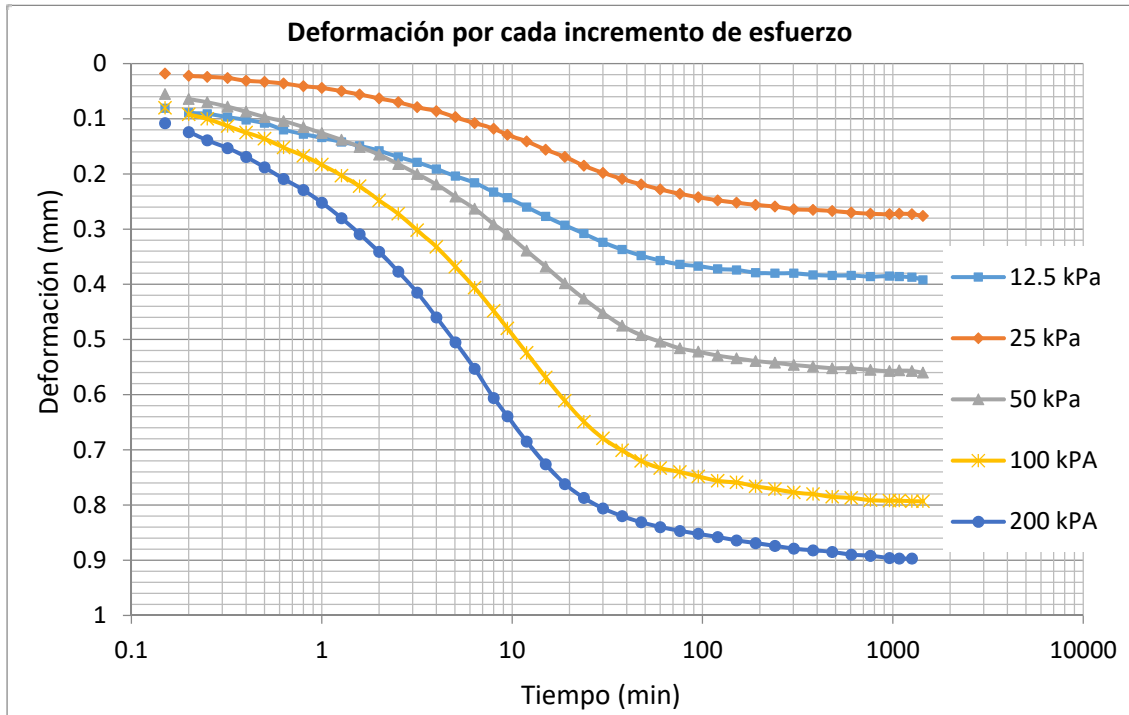


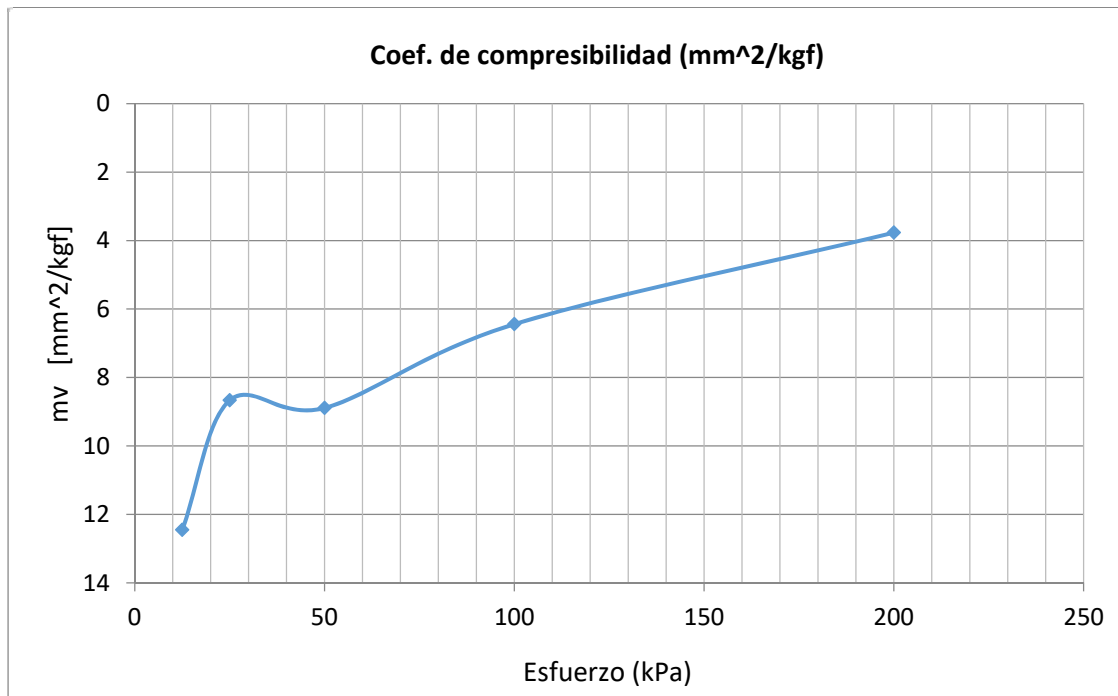
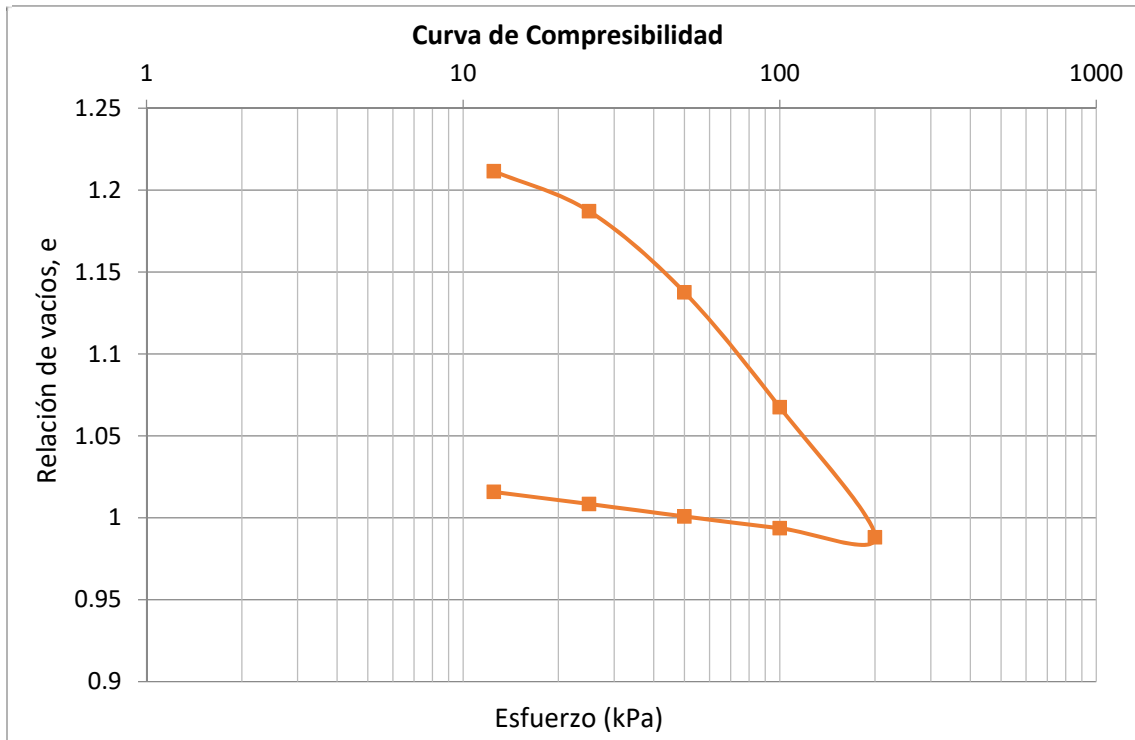
MEZCLA: 90K – 10D



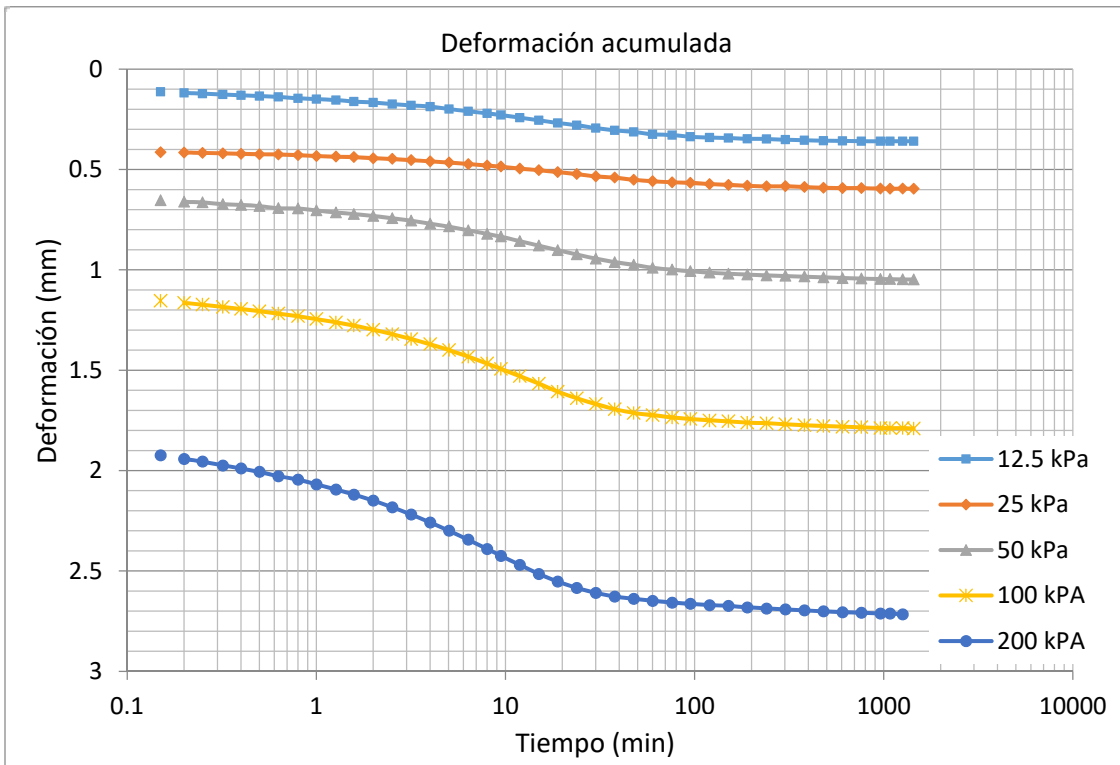
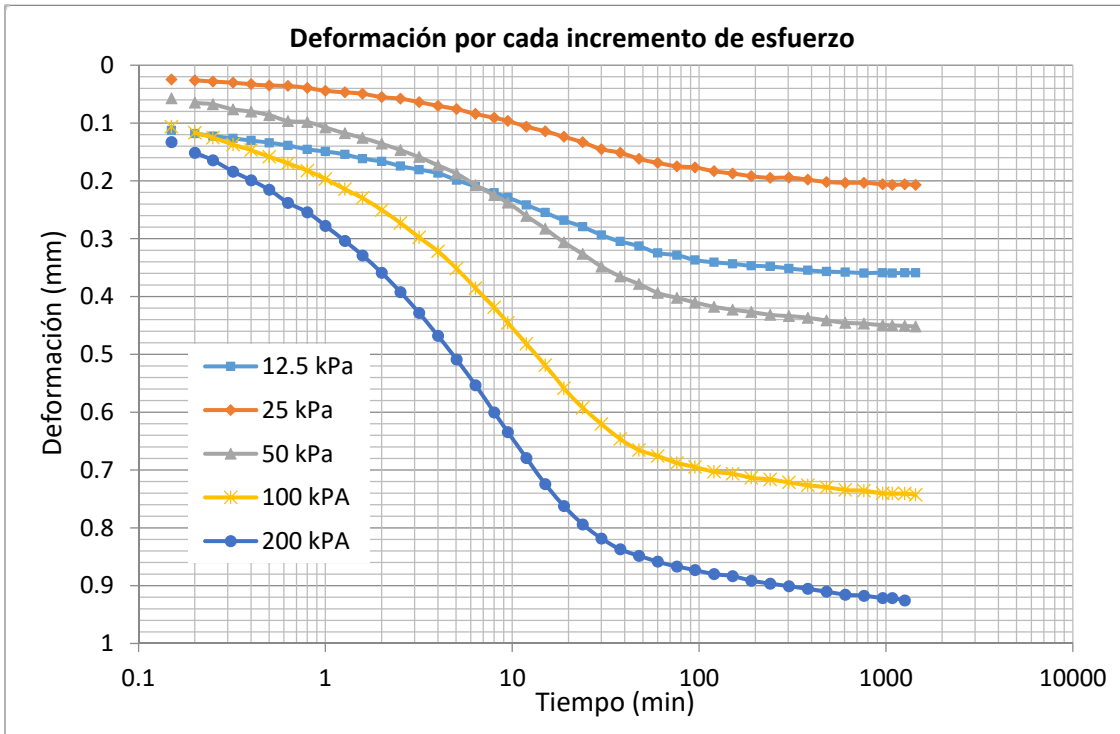


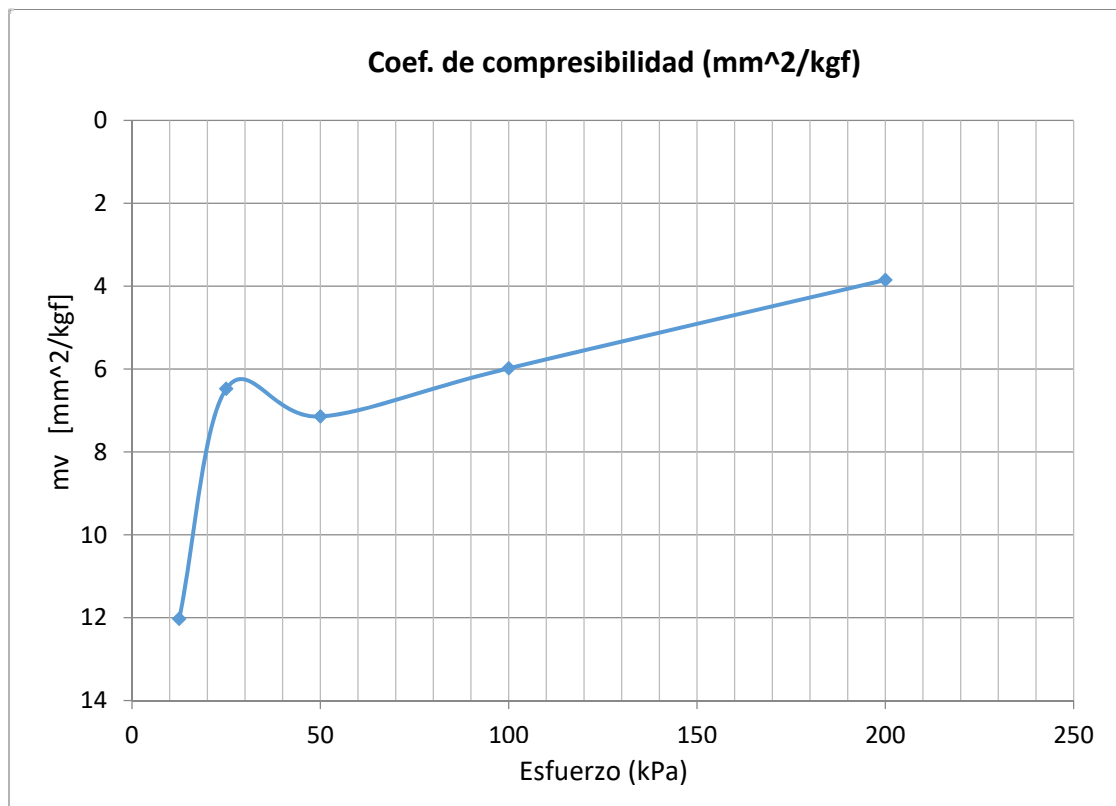
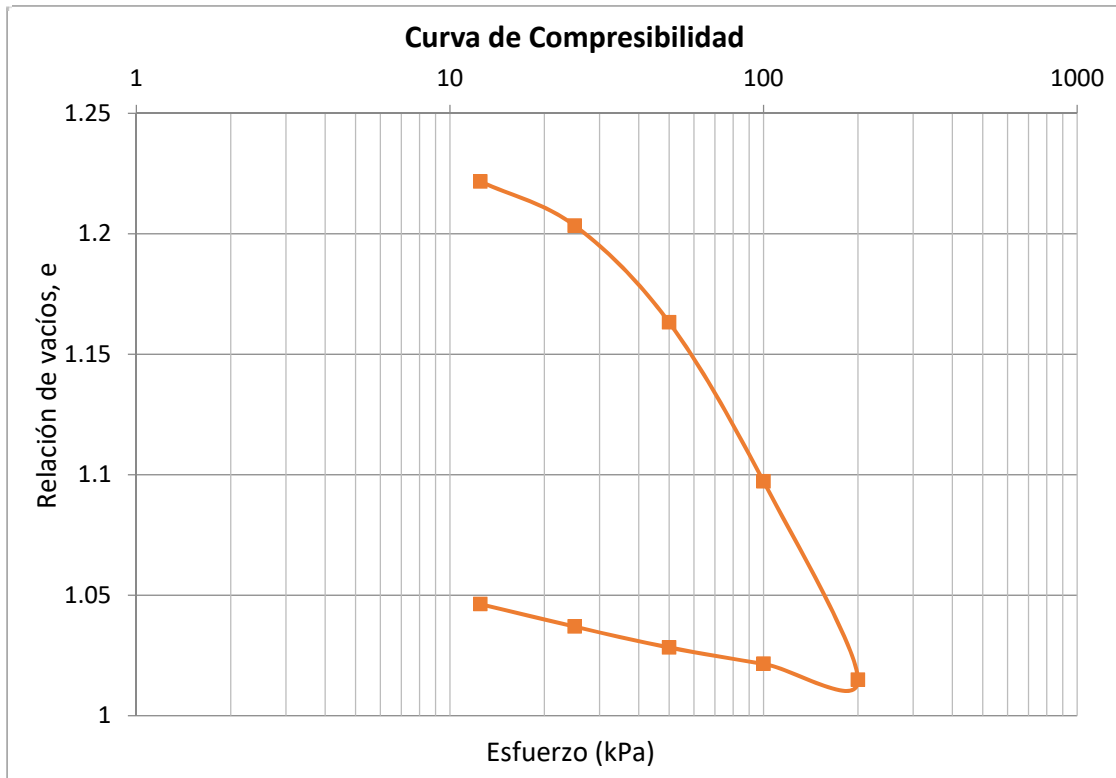
MEZCLA: 85K – 15D



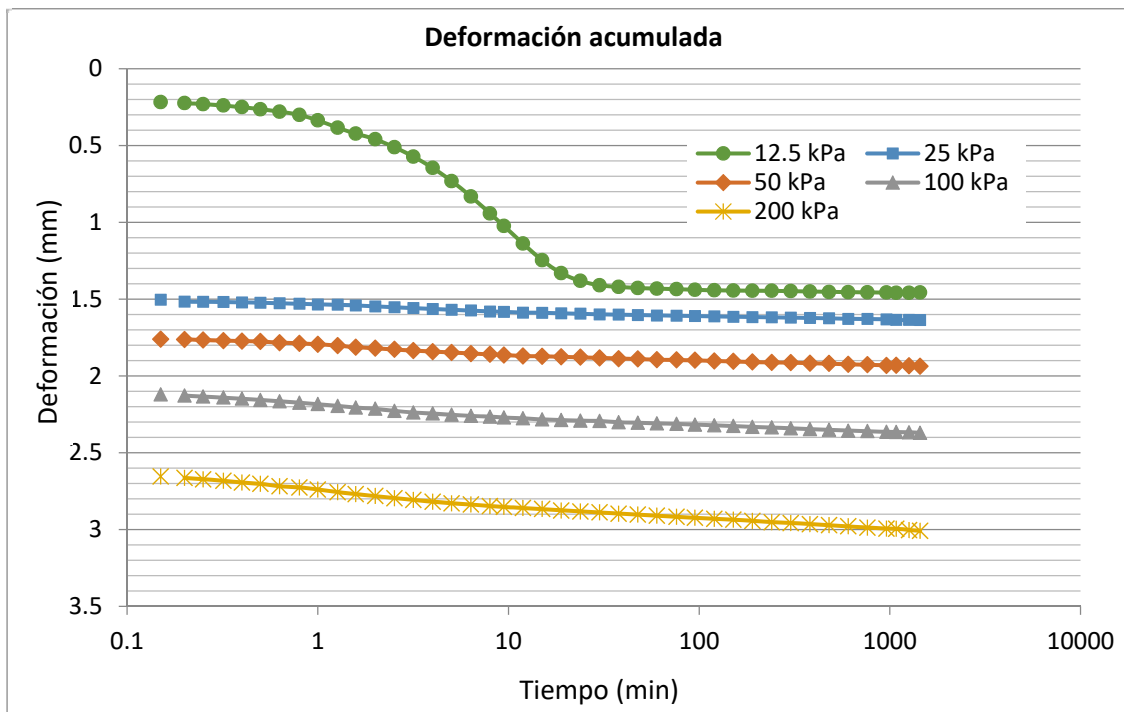
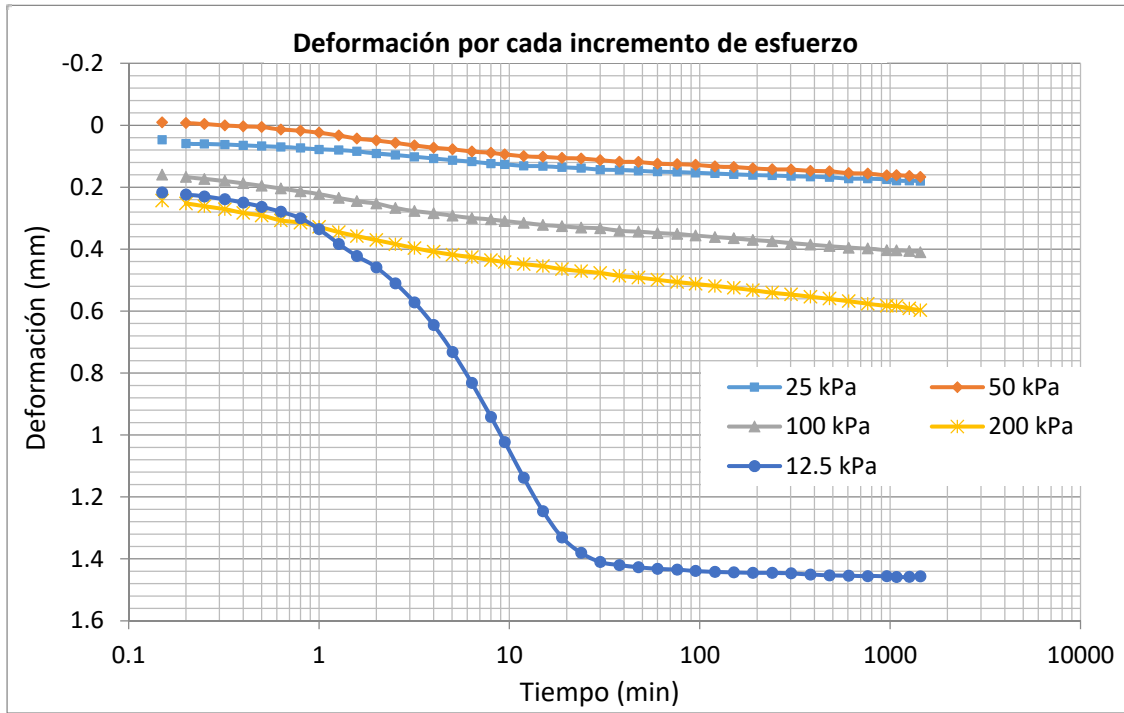


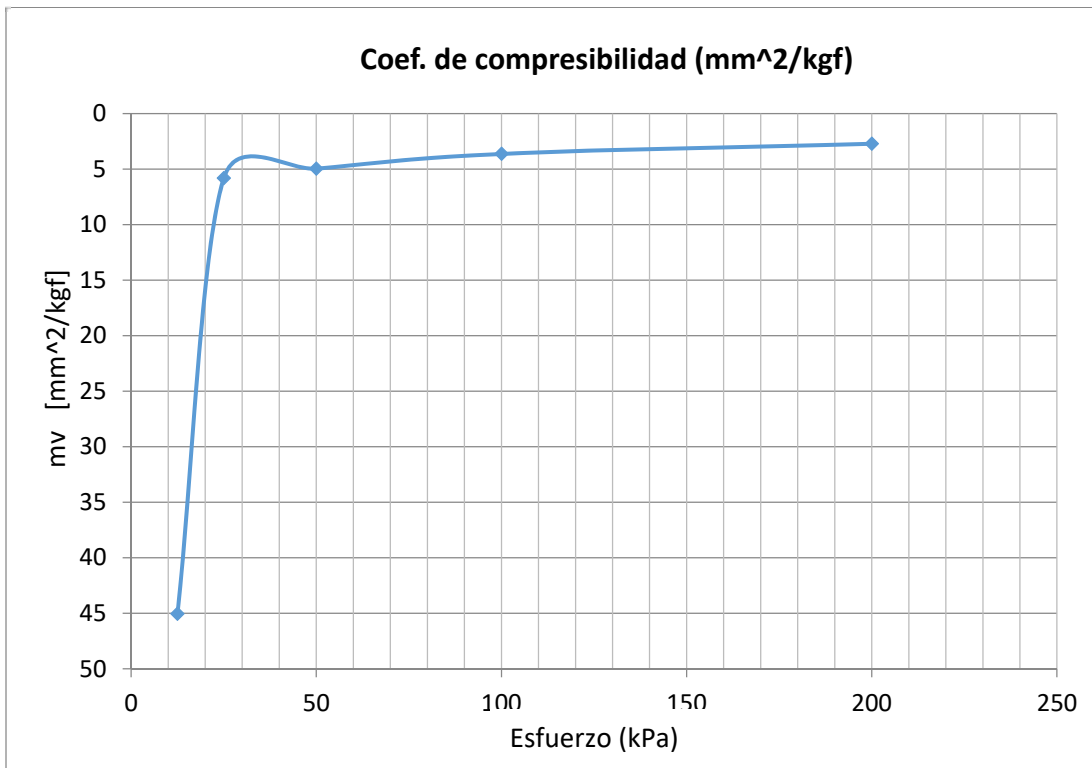
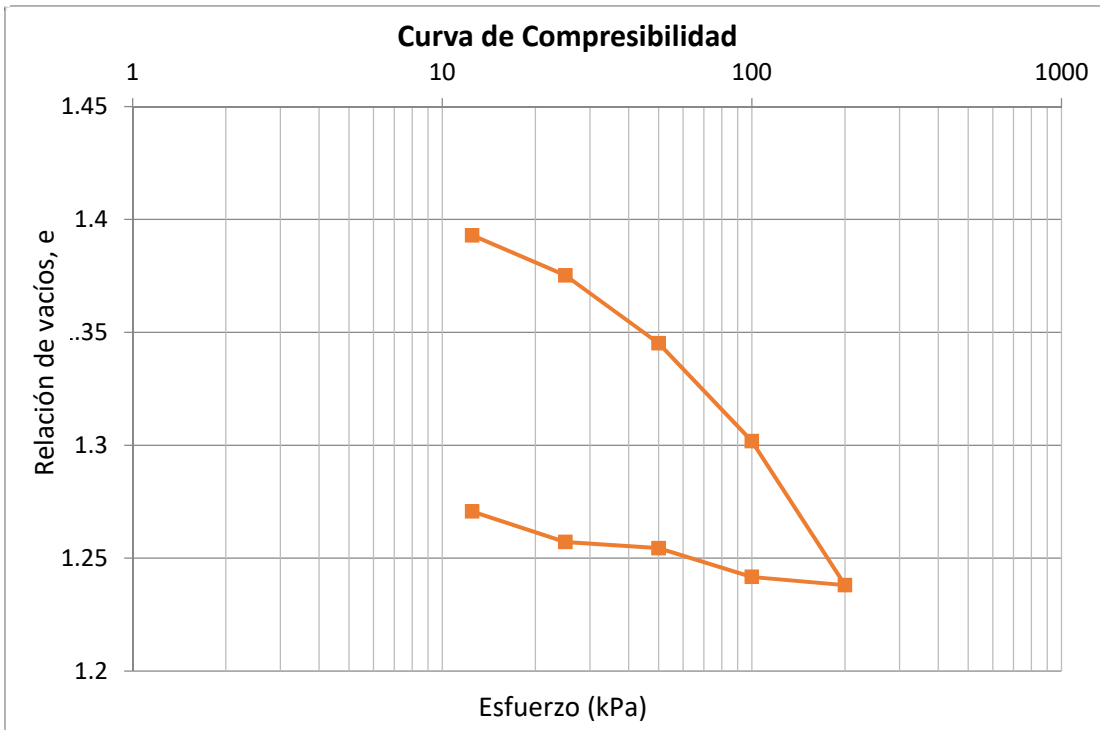
MEZCLA: 80K – 20D



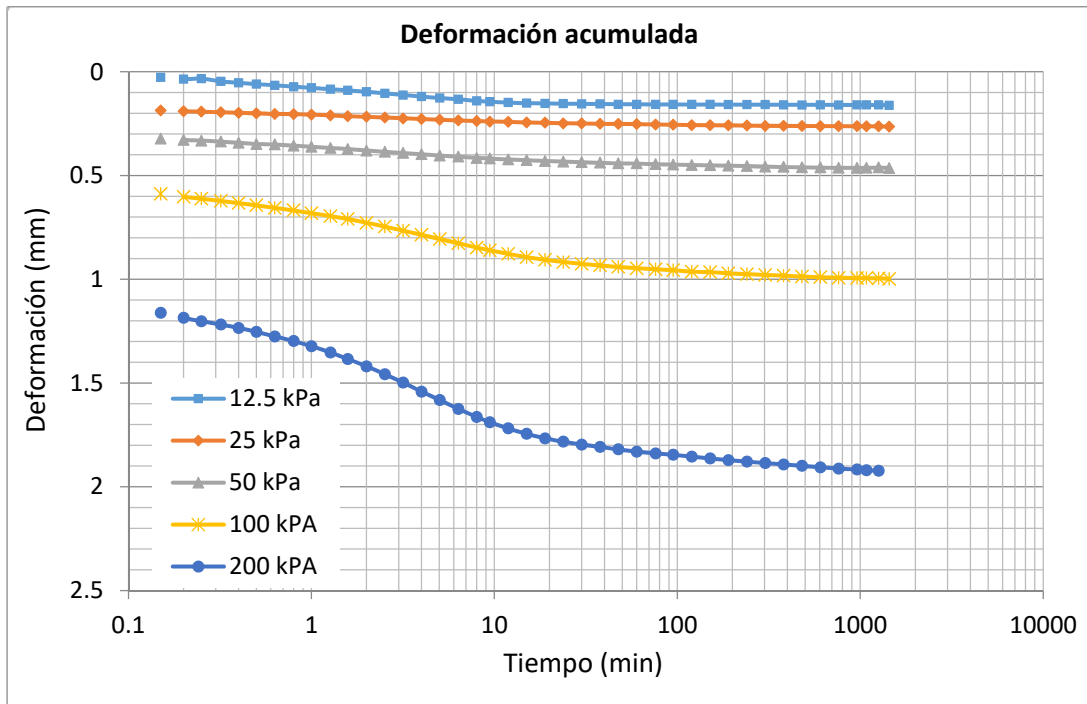
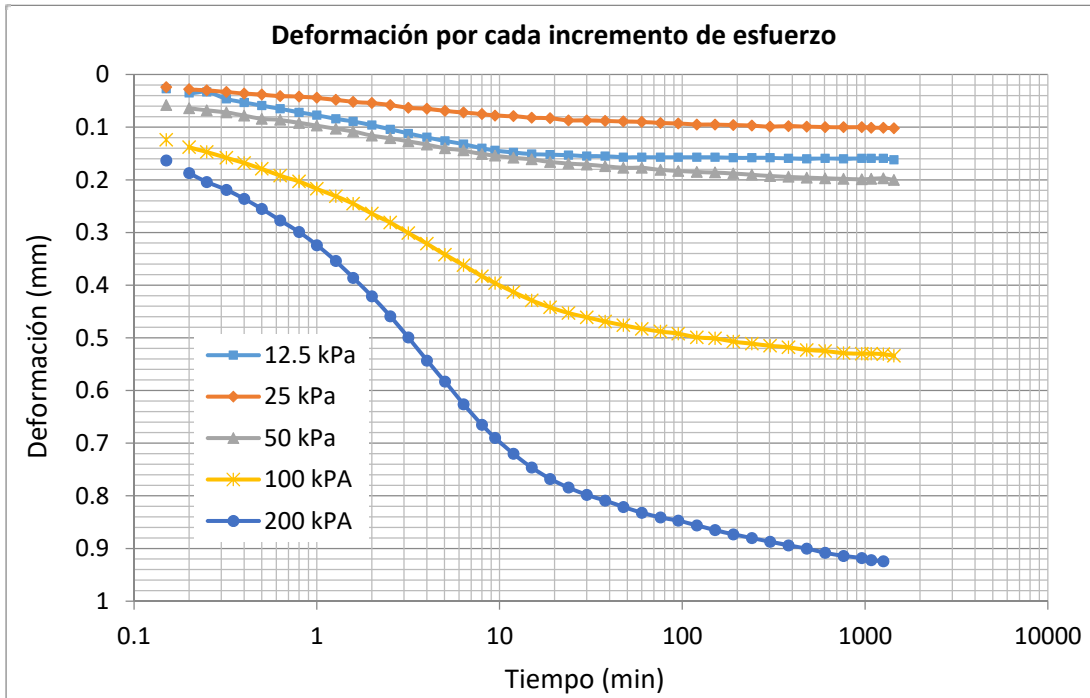


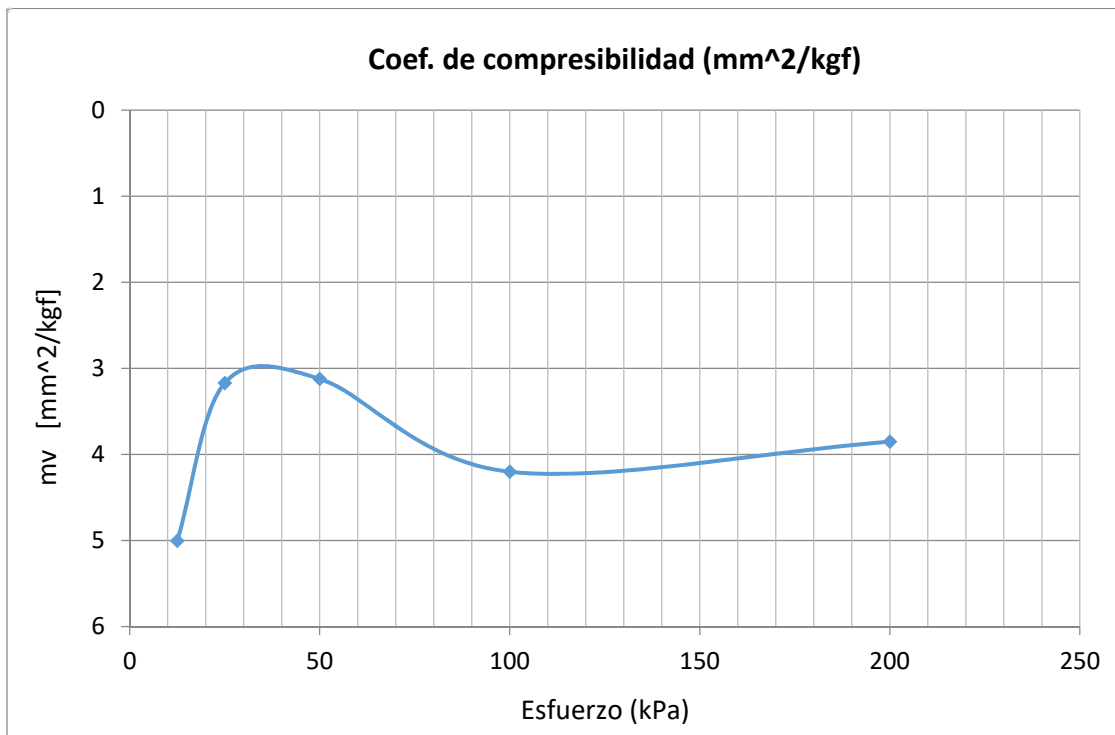
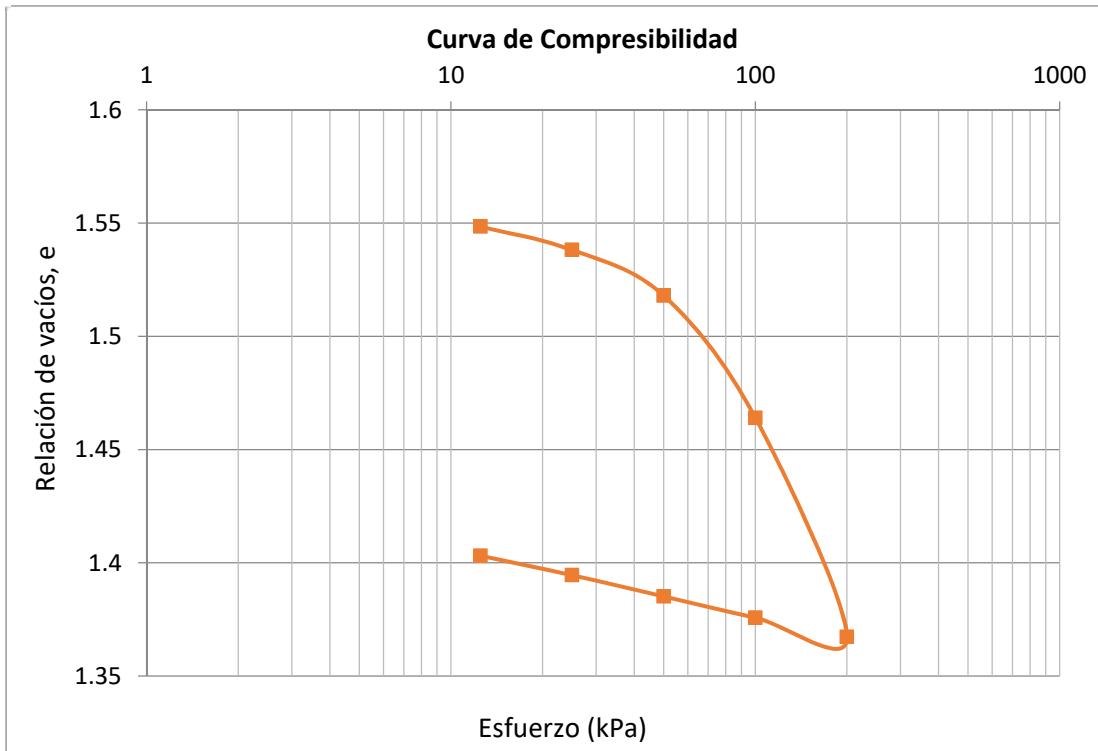
MEZCLA: 60K – 40D





MEZCLA: 40K – 60D





MEZCLA: 100% Diatomita

