



Universidad Autónoma de Querétaro
Facultad de Ingeniería
Maestría en Ciencias

EFFECTOS DEL TAMAÑO DE PARTÍCULAS EN EL COMPORTAMIENTO DE UN SUELO
EXPANSO-COLAPSABLE

TESIS

Que como parte de los requisitos para obtener el grado de
Maestro en Ciencias (GEOTECNIA)

Presenta:

ING. JESSICA CABRERA RAMÍREZ

Dirigido por:

Dra. Teresa López Lara

SINODALES

Dra. Teresa López Lara

Presidente

Dr. Juan Bosco Hernández Zaragoza

Secretario

Dr. Jaime Moisés Horta Rangel

Vocal

Dra. Dora Celia Carreón Freyre

Suplente

Dr. Alfredo Pérez García

Suplente

Dr. Aurelio Domínguez González
Director de la Facultad

Dra. Ma. Guadalupe Flavia Loarca Piña
Directora de Investigación y Posgrado

Centro Universitario
Querétaro, Qro.
Mayo 2015
México

RESUMEN

A través del tiempo en México y en el mundo, se ha lidiado con suelos que tienen problemas de estabilidad volumétrica y que afectan principalmente a nuestras cimentaciones haciendo que estas sufran diferentes tipos de daños, afectando e impactando económica y socialmente, llegando a situaciones de ruinas en las estructuras y hasta cobrar vidas humanas. Motivo, por el cual surge la necesidad de hacer una investigación para predecir el comportamiento de estos suelos de una forma simple y económica partiendo de su distribución granulométrica.

Uno de los fenómenos que se presenta en los suelos, es cuando un material expansivo con una relación de vacíos alta puede desarrollar un comportamiento primordialmente colapsable, pero si se reduce su relación de vacíos lo suficiente, entonces presenta un comportamiento expansivo. A estos materiales se les ha denominado suelos expanso-colapsables y su modelación, bajo el estado del conocimiento resulta aún muy complicada.

La mayoría de las investigaciones existentes son para suelos con fenómenos aislados (suelos expansivos o suelos colapsables). En la actualidad se carece de información acerca de los suelos expanso-colapsables, en este trabajo se busca encontrar un suelo que contenga ambos fenómenos del cual se pretenderá observar que el fenómeno predominante.

Es necesario conocer la caracterización físico-química de los suelos expanso-colapsable ya que esta técnica sirve para identificar texturas y formas mineralógicas del mismo, por lo que se llevara a cabo la prueba de Microscopia Electrónica de Barrido ya que esta técnica permite ver la relación existente entre el tamaño de partículas y su mineralogía de este suelo.

Palabras Clave Expansivo, Colapsable, Expanso-colapsable

SUMMARY

Through time, in Mexico and in the world, we have dealt with soils that have volumetric stability problems and that affect mainly our foundations, making these suffer different types of damage, having a social and financial impact, and leading to situations of structures turned to ruins and even taking human lives. For this reason, emerges the need of research to predict the behavior of these soils and in a simple and low-cost way, starting with their grain size distribution.

One of the phenomena that presents itself in soils, is when an expansive material with a high vacuum ratio can develop a primarily collapsible behavior, but if the vacuum ratio is reduced enough, it presents an expansive behavior. These materials have been denominated expansive-collapsible soils, and their modeling, under that state of knowledge, is still very complicated.

Most existing investigations are related to isolated phenomena (expansive soils or collapsible soils). Currently there is a lack of information about expansive-collapsible soils, in this research we will try to find a soil that contains both phenomena on which we will attempt to observe the predominant phenomenon.

It is necessary to know the physics-chemistry of expansive-collapsible soils because this technique serves to identify their mineralogical textures and forms, for which we will carry out the Scanning Electron Microscopy test because this technique allows us to see the existing relationship between the size of particles and mineralogy of this soil.

Keywords Expansive, Collapsible, Expansive-collapsible

DEDICATORIA

Todo lo puedo en Cristo que me fortalece

Filipenses 4:13

A Dios y mi virgen de Guadalupe por darme siempre las fuerzas necesarias al largo de mi vida.

A mis Padres por su apoyo incondicional, por ayudarme a ser la persona que ahora soy, por alentarme a seguir adelante y nunca dejarme sola.

A mi Esposo José por ser el mejor compañero de vida y amigo, ya que a lo largo de la maestría siempre me dio la fortaleza para no desistir, por ser la luz en mi vida que me cuida y guía, por aguantar mi stress, brindarme su amor, cariño y entendimiento cuando más lo necesito.

A mi pequeña Isabella por ser el motor de mi vida, por darme esa tranquilidad que necesito, que aunque todavía no te conozco físicamente, eres lo que más amo y el porqué de querer seguir superándome.

AGRADECIMIENTOS

Gracias A Diosito, mi virgencita y el espíritu santo, primero por darme la vida y porque siempre están en mi camino, dándome entendimiento, iluminando y guiándome con su sabiduría, que siempre me han ayudado en mis momentos difíciles y que nunca me he sentido abandonada, que me han brindado la serenidad y fuerza que necesito, por ser esa compañía que necesito, infinitas G R A C I A S.

A mis Padres Silvia y Jesús por ser los maestros de mi vida, por darme la dicha de haber crecido en una gran familia, enseñarme el buen camino, por siempre confiar en mí y gracias por inculcarme siempre valores, porque con sus consejos, regaños, amor, motivación, les puedo decir que soy una persona de bien y que lo que soy es gracias a ustedes, no terminaría de agradecerles todo y solo les puedo decir que me siento muy orgullosa de ser su hija y que con todas mis fuerzas L O S A M O.

A mi Esposo José por ser esa luz en mi camino y que cada que caía estaba ahí para decirme que me tenía que levantar, por ser un gran amigo y compañero de vida, quiero decirte que te amo muchísimo y que te agradezco toda tu ayuda, por darme tus días con tus noches, por desvelarte conmigo a pesar de que al siguiente día trabajarás, por esa frase que siempre citabas, de Albert Einstein, y que nunca olvidaré “Todos somos Genios pero, si juzgas a un pez por su habilidad para escalar un árbol, pasará toda su vida pensando que es un estúpido” y que me la decías para levantar mis ánimos cuando yo creía que ya no podía seguir adelante y que me volvías a inyectar esas fuerzas para volver a empezar, gracias Jos por ser el amor de mi vida, que aun cuando tenemos nuestros altibajos siempre me demuestras que estás conmigo, por soportar mi mal humor y estrés, por acompañarme a trabajar al laboratorio en Sábados y Domingos T E A M O mi vida, esta Tesis es tuya y de mi pequeña Isabella, porque ustedes 2 saben el trabajo que me costo.

A mi pequeñita Isabella por llegar en el momento perfecto a mi vida, por ayudarme a tranquilizar mis nervios y calmar mis temores, por acompañarme a clases y por portarse tan bien que aun cuando está en mi pancita ha tenido que soportar mis largas horas sentada frente a mi computadora, te amo inmensamente mi niñita hermosa y lo que logremos tu papi y yo todo será para ti, T E A M O.

A mi hermana Silvia, por ser mi gran amiga y confidente, que aunque no estemos juntas físicamente, estamos siempre en comunicación y de corazón, hermana eres la mejor y lo sabes eres mi orgullo, gracias a mi cuñado Rodo, gracias hermanita por esas pequeñitas

hermosas Silvita y Anna Bella, gracias por ser mi hermana, eres la favorita y lo sabes (bueno no solo es porque eres la única jeje).

A mi tía Blanca, Fati y Sophie, por siempre estar conmigo, por ser parte de mi familia y darme porras siempre, las quiero mucho.

A mi papá José por hacerme sentir siempre que soy su gran orgullo y por siempre levantar mis ánimos, a Mamá Loretito, Mamá Velo y Papá Melquiades por ser mis ángeles en el Cielo.

A mis Suegros Betty y José por brindarme su apoyo, cariño incondicional y ayudarme en lo que he necesitado, a mis cuñados Robert y Chava por su cariño, a mi conculia Silvia y Zarita por demostrarme que no nos debemos dejar caer y darme muchas lecciones de vida.

A mis Amig@s a lo largo de mi vida Lola, Lupita, Lili, May y a mis nuevos amigos que he hecho Karla gracias amiga por estar conmigo y ambas darnos fuerza para seguir, Nancy, Rafa, Christopher, gracias por su ayuda y por demostrarme que el compañerismo sigue, me gustaría mucho que todos culmináramos con nuestro título lo mucho que nos costó la maestría.

A mis Maestros Dra. Tere, Dra. Luz, Dr. Manilla, Dr. Bucio, Dr. Rojas, Dr. Alfredo, Dr. Horta, Dr. Jauregui, Dra. Oleschko, Dr. Toledano, gracias por sus enseñanzas y por compartir sus conocimientos, a mis Sinodales Dra. Tere, Dr. Alfredo, Dr. Bosco, Dra. Dora, Dr. Horta por su tiempo y colaboración a mi proyecto en especial a la Dra. Tere López por ser otra vez mi Directora y gracias por confiar otra vez en mí y hacer en mí una investigadora, Gracias a la Dra. Luz por siempre estar pendiente de nosotros por ser nuestra coordinadora, Gracias al Ing. Moya y a todo el equipo del Laboratorio de Mecánica de Suelos de la U.A.Q, Gracias a la Dra. Dora por abrirme las puertas en la U.N.A.M y a su equipo de trabajo (Dra. Marina, Maestra Sara, Lab. Ricardo) por su ayuda en las pruebas MEB y DRX.

Al CONACYT por la gran ayuda con la beca de manutención, que gracias a ella puedo seguir estudiando, sin tener la necesidad de trabajar para pagarnos los estudios, a mi casa de estudios la UAQ que ayuda con la beca para pagar de una manera más accesible las colegiaturas semestrales.

ÍNDICE GENERAL

Contenido	Página
RESUMEN.....	i
SUMMARY	ii
DEDICATORIA	iii
AGRADECIMIENTOS	iv
ÍNDICE GENERAL	vi
ÍNDICE DE TABLAS.....	ix
ÍNDICE FIGURAS	x
CAPITULO 1.INTRODUCCIÓN.....	12
1.1 Antecedentes.	12
1.2 Justificación.....	14
1.3 Hipótesis y Objetivos.....	16
CAPITULO 2 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.	17
2.1 Suelos: Origen y Formación.....	17
2.1.1 <i>Definición:</i>	17
2.1.2 <i>Tipos de Suelos</i>	17
2.1.2.1 <i>Por funcionalidad</i>	17
2.1.2.2 <i>Por características físicas</i>	19
2.1.3 <i>Tipos de Depósitos</i>	20
2.1.3.1 <i>Los Suelos Residuales</i>	20
2.1.3.2 <i>Los Suelos Transportados</i>	20
2.2 Determinación del porcentaje de Arena, Limo y Arcilla en los suelos.	27
2.2.1 <i>Método de Bouyoucos</i>	27
2.3 Suelos Expansivos.....	31
2.3.1 <i>Naturaleza de los Suelos Expansivos</i>	33
2.3.2 <i>Origen de los Suelos Expansivos</i>	36
2.3.3 <i>Métodos para obtener la Físico-Química de las Arcillas</i>	37
2.3.3.1 <i>Identificación Mineralógica</i>	37

2.3.3.1.1 <i>Difracción de Rayos X</i>	38
2.3.3.1.2 <i>Microscopía Electrónica de Barrido</i>	39
2.3.4 <i>Métodos Indirectos</i>	42
2.3.5 <i>Propiedades Físicas de los Suelos Expansivos</i>	44
2.3.5.1 <i>Contenido de agua</i>	44
2.3.5.2 <i>Peso específico seco</i>	45
2.3.5.3 <i>Propiedades Índice</i>	45
2.4 <i>Suelos Colapsables</i>	46
2.4.1 <i>Definición y Características de los suelos colapsables</i>	47
2.4.2 <i>Fenómeno del Colapso</i>	50
2.5 <i>Suelos Expanso-Colapsables</i>	51
CAPITULO 3 METODOLOGÍA EXPERIMENTAL.....	54
3.1 <i>Material Estudiado</i>	54
3.1.1 <i>Muestreo del Suelo</i>	54
3.2 <i>Caracterización Geotécnica</i>	57
3.2.1 <i>Límites de Atterberg (Consistencia)</i>	57
3.2.2 <i>Preparación del Material</i>	57
3.2.3 <i>Procedimiento de Prueba</i>	59
3.2.4 <i>Pruebas de Expansión y Colapso</i>	60
3.3 <i>Caracterización Físicoquímica de Suelos</i>	62
3.3.1 <i>Preparación de Muestras para Microscopía Electrónica de Barrido (MEB)</i>	62
3.3.2 <i>Preparación de Muestras para Difracción de Rayos X (DRX)</i>	63
CAPITULO 4 RESULTADOS.....	69
4.1 <i>Origen del suelo utilizado</i>	69
4.1 <i>Caracterización y clasificación del suelo utilizado</i>	71
4.2.1 <i>Prueba de Expansión en muestra Inalterada</i>	73
4.2.2 <i>Prueba de Colapso en muestra Inalterada</i>	74
4.3 <i>Pruebas de Expansión y Colapso en muestras Alteradas</i>	75
4.3.1 <i>Pruebas de Expansión en muestra Alterada</i>	76
4.3.1.1 <i>Pruebas de Expansión en mezcla de 100% Arenas y 0% Finos</i>	76
4.3.2 <i>Pruebas de Colapso en muestra Alterada</i>	80

4.4 Pruebas de Caracterización Fisicoquímica de Suelos.	87
4.4.1 Microscopía Electrónica de Barrido (MEB).....	88
4.4.2 Difracción de Rayos X (DRX).....	89
CAPITULO 5 CONCLUSIONES.	96
5.1 Conclusiones.....	96
5.2 Recomendaciones.....	97
REFERENCIAS	99

ÍNDICE DE TABLAS

	Página
Tabla 1 Definiciones por la Mecánica de Suelos y la Edafología de los diferentes tipos de suelos existentes.	18
Tabla 2 Clasificación del USDA, anteponiendo una partícula descriptiva a la terminación – sol.	19
Tabla 3 Clasificación Internacional.	30
Tabla 4 Clasificación M.I.T.	30
Tabla 5 Clasificación Kopecky.	31
Tabla 6 Propiedades de los minerales arcillosos expansivos (Lambe, 1959).	35
Tabla 7 Relación entre el Potencial de Expansión y el Índice de Plasticidad.	43
Tabla 8 Determinación del Potencial de Expansión.	43
Tabla 9 Correlaciones de comportamiento de Suelo.	46
Tabla 10 Diseño de mezclas.	59
Tabla 11 Propiedades índice del material expansivo-colapsable.	72
Tabla 12 Expansión (%) para diferentes dosificaciones de arenas (A) y finos (F).	79
Tabla 13 Potencial de colapso (CP) para diferentes dosificaciones de arena(A) y finos (F).	86
Tabla 14 Elementos del material expanso-colapsable en estado natural.	90

ÍNDICE FIGURAS

	Página
Figura 1 Ilustración del proceso de sedimentación en un hidrómetro (Arrieche et al., 2013).	29
Figura 2 Formación de meniscos entre partículas.....	50
Figura 3 Estructura abierta formada por partículas de diferentes tamaños	50
Figura 4 Esquema utilizado para desarrollar Metodología.	54
Figura 5 Mapa de la República Mexicana y la ubicación de Santiago de Querétaro, Qro.	55
Figura 6 Mapa de Santiago de Querétaro, Qro y Ubicación de Anillo Vial Fray Junipero Serra.....	56
Figura 7 Ubicación del lugar de muestreo.	56
Figura 8 Límites de Contracción.....	57
Figura 9 Preparación del material para Pruebas (Expansión y Colapso) en muestra Inalterada.	58
Figura 10 Separación del material para Pruebas (Expansión y Colapso) en muestra Alterada.	58
Figura 11 Compactación Estática para pruebas de (Expansión y Colapso) en muestra Alterada.	59
Figura12 Pruebas de Expansión y Colapso en Suelo Expanso-colapsable.	62
Figura 13 Preparación de la muestra para Técnica MEB.	63
Figura 14 Preparación de la muestra para Técnica DRX.	64
Figura 15 Muestra de Suelo para Pre-tratamiento.....	65
Figura 16 Muestra puesta a baño María.....	65
Figura 17 Muestra en el Agitador electrónico.	66
Figura 18 Vaso de precipitado con material libre de materia orgánica.	66
Figura 19 Proceso de Decantación.	67
Figura 20 Carta de Plasticidad.	73
Figura 21 Curva de Compresibilidad para muestra inalterada.....	74
Figura 22 Gráfica de Colapso para muestra inalterada.	75
Figura 23 Curva de Compresibilidad para mezcla de 100%Arenas-0%Finos.	76

Figura 24	Curva de Compresibilidad para mezcla de 80%Arenas-20%Finos.	77
Figura 25	Curva de Compresibilidad para mezcla de 50%Arenas-50%Finos.	78
Figura 26	Curva de Compresibilidad para mezcla de 20%Arenas-80%Finos.	78
Figura 27	Curva de Compresibilidad para mezcla de 0%Arenas-100%Finos.	79
Figura 28	Prueba de Colapso para mezcla de 100%Arenas-0%Finos.....	81
Figura 29	Prueba de Colapso para mezcla de 80%Arenas-20%Finos.....	82
Figura 30	Prueba de Colapso para mezcla de 50%Arenas-50%Finos.....	82
Figura 31	Prueba de Colapso para mezcla de 20%Arenas-80%Finos.....	83
Figura 32	Prueba de Colapso para mezcla de 0%Arenas-100%Finos.....	84
Figura 33	Prueba de Colapso para mezcla de 0%Arenas-100%Finos.....	85
Figura 34	Micrografías del suelo Expanso-colapsable a 30 y 20 um.....	91
Figura 35	Micrografías del suelo Expanso-colapsable a 20 um.	92
Figura 36	Micrografías del suelo Expanso-colapsable a 10 um.	93
Figura 37	Micrografías del suelo Expanso-colapsable a 30 y 200 um.....	94
Figura 38	Difractograma con ruido del suelo Expanso-colapsable.....	88
Figura 39	Difractograma limpio de ruido del suelo Expanso-colapsable.	89

CAPITULO 1.INTRODUCCIÓN.

1.1 Antecedentes.

En un alto porcentaje de la superficie del suelo, se encuentran los suelos no saturados, como son principalmente los depósitos de suelos residuales y los sedimentos aluviales y eólicos. Desde un punto de vista granulométrico, estos suelos están constituidos por arcillas, limos y arenas finas. Dentro de esta división se encuentran los suelos colapsables, expansivos y dispersivos. Muchas construcciones se están viendo seriamente afectadas cuando se construye en este tipo de suelos (Hagner, 2005).

Génesis

El mecanismo primario de creación de suelos es la erosión de rocas. Todos los tipos de rocas (ígneas, metamórficas y sedimentarias) pueden ser reducidas a partículas menores para crear suelo. Los mecanismos de erosión dependen del agente, pudiendo ser físico, químico y biológico. Las actividades humanas como las excavaciones, explosiones y deposición de residuos y material pueden crear también suelos. A lo largo del tiempo geológico los suelos pueden ser alterados por presión y temperatura hasta convertirse en rocas metamórficas o sedimentarias, o volver a ser fundidos y solidificados, volviendo a ser ígneos y cerrando el ciclo de las rocas.

La erosión física incluye los efectos de la temperatura, heladas, lluvia, viento, impacto y otros mecanismos. La erosión química incluye la disolución del compuesto de la roca y la precipitación en forma de otro mineral. La arcilla, por ejemplo, puede formarse a través de la erosión del feldespato, que es uno de los minerales más comunes de las rocas ígneas. El mineral más común de la arena es el cuarzo, que es también un componente importante de las rocas ígneas y se le llama Óxido de silicio. En resumen todos los suelos del mundo son partículas más pequeñas provenientes de las rocas. Las partículas más grandes son denominadas

gravas. Si las gravas se parten en partes más pequeñas pueden convertirse en arena, de esta al limo y de este a la arcilla, que es la división más pequeña.

De acuerdo con el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos, las partículas limosas tienen un rango de tamaños entre los 0,002 mm a los 0,075 mm y las partículas de arena tienen un tamaño entre 0,075 mm a 4,75 mm. Las partículas de gravas se consideran entre un rango que va de los 4,75 mm a los 100 mm y por encima de esto se denominan bloques.

En los últimos años ha surgido una creciente conciencia de la existencia de suelos con estructuras metaestables que afectan el cambio en el volumen de la masa cuando se varía su contenido de humedad. En los suelos expansivos aumentan de volumen, mientras que en los colapsables disminuye de volumen (Popescu, 1979).

Los fenómenos más característicos del suelo no saturado son los relacionados con sus deformaciones volumétricas al modificar el grado de saturación. Estas deformaciones pueden ser positivas (colapso) o negativas (expansión). El comportamiento de estos suelos está en función de la estructura del suelo, la cual varía dependiendo de diversos factores como el grado de saturación y la distribución granulométrica de las partículas, la caracterización de los suelos en campo y en laboratorio, provee la base para elaborar modelos numéricos o computacionales de los sitios de interés. Esta debe considerar factores tanto a nivel micro como macro, los factores correspondientes a la micro escala incluyen las propiedades químicas y mineralógicas de los suelos. Los factores de la macro escala integran las propiedades mecánicas de la masa de suelo las cuales son regidas por los factores de la micro escala (Heuze, 2003).

Algunos materiales arcillosos de baja y mediana plasticidad presentan un comportamiento combinado de hinchamiento y colapso cuando se satura. El cambio neto de volumen que experimenta un suelo arcilloso cuando se pone en contacto con el agua es la suma de dos términos, por un lado el hinchamiento que se produce al relajar las tensiones netas entre partículas y por otro el colapso que ocurre al fallar las uniones entre grandes partículas. La deformación que se atribuye al

hinchamiento puede ser elástica no así la que corresponde al colapso. Esta última implica un reordenamiento de la estructura y es irreversible. (Barrera et al., 2002).

Algunas arcillas expansivas son al mismo tiempo suelos colapsables, es decir; para un estado de carga aplicada con pequeños aumentos de humedad se incrementa su volumen, pero con humedades mayores colapsa. Esto suele ocurrir sobre todo en arcillas con estructuras floculadas y flojas en las que muchas veces, aún después de haberse expandido; continúan apareciendo huecos causados por el proceso de agrietamiento (Pousada, 1984).

La magnitud del movimiento depende entonces de las propiedades físicas y químicas del suelo, de las características de la subestructura y del régimen hídrico de la región (Vallejos, 2000).

1.2 Justificación.

Los suelos expansivos y colapsables son suelos problemáticos que afectan la funcionalidad y estética de las estructuras, muchas de las veces se construye sobre estos por falta de conocimiento. La expansión y el colapso crean en las cimentaciones inestabilidad volumétrica debido al comportamiento que desarrollan en el suelo al aplicarse una carga a lo largo del tiempo, cuando las condiciones del ambiente cambian (humedad), por ejemplo al modificar su contenido de agua y por ende, el grado de saturación.

Las investigaciones que existen son para suelos con fenómenos separados (suelos expansivos y suelos colapsables), sin embargo ambos fenómenos se pueden presentar en un mismo suelo, se pretende identificar la fenomenología que predomina partiendo del tamaño de partículas que constituyen este suelo.

Entre los suelos no saturados problemáticos, además de las arcillas expansivas, también se tienen los colapsables, ambos fenómenos comparte la característica de tener presión de agua de poro negativa, los cambios volumétricos más significativos en estos suelos, suelen ser causados por el cambio del contenido de agua, en muchos aspectos se pueden observar que los suelos colapsables se comportan de una manera opuesta a los suelos expansivos; en el caso de un suelo colapsable, el humedecimiento da como resultado un decremento del volumen, en la arcilla expansiva al ocurrir la hidratación aumenta el volumen del suelo (Zepeda-Garrido et al., 2004).

La diferencia en el comportamiento está relacionado con la estructura del suelo, al suelo expansivo se le considera “estructura estable” y al colapsable se le estima de “estructura metaestable” (Fredlund & Rahardjo, 1993).

El hinchamiento y el colapso son dos fenómenos de naturaleza diferente, en cierto modo independientes entre sí, pero coexistentes en muchos suelos, su participación en los cambios volumétricos varía gradualmente al disminuir la succión, el suelo inicia el hinchamiento para terminar colapsando cuando la succión llega a ser suficientemente pequeña (Jimenez, 1990).

El cambio climático y el uso del agua del subsuelo son dos grandes problemas que atañen a este tipo de suelos, los suelos expanso-colapsables son susceptibles de sufrir cambios en su estructura interna, debilitándola o destruyéndola, ya que se ven afectados considerablemente por el periodo de lluvias esto parte de que la mayoría de los suelos están sufriendo un proceso continuo de humedecimiento y desecación reflejándolo en asentamientos bruscos e inmediatos, dañando considerablemente las cimentaciones que yacen sobre ellos, formando un problema desde el punto de vista social. El desconocer su comportamiento de estos suelos lleva a seguir utilizando métodos tradicionales, de estabilización, y/o

sustitución para suelos expansivos, y para suelos colapsables diferentes tratamientos químicos, que la mayoría de las veces estas alternativas suelen ser muy costosas y difíciles de manejar.

Una de las técnicas empleadas para el estudio de la identificación mineralógica de los suelos estabilizados es la microscopia electrónica de barrido.

1.3 Hipótesis y Objetivos.

Hipótesis

La fenomenología de un suelo expanso-colapsable se relaciona con su distribución granulométrica donde el colapso predominará sobre la expansión aun cuando la composición de finos sea mayor.

Objetivo General

Se pretenderá predecir la existencia de expansión y/o colapso en el suelo en base a su tamaño de partículas mediante el análisis de suelos identificando el fenómeno que predomina.

Objetivo Particular.

Estudiar la composición de un suelo expanso-colapsable, utilizando la técnica de Microscopia electrónica de barrido y Difracción de Rayos X, para complementar el estudio del comportamiento mecánico.

CAPITULO 2 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.

2.1 Suelos: Origen y Formación.

2.1.1 Definición:

Se denomina suelo a la parte no consolidada y superficial de la corteza terrestre, biológicamente activa, que tiende a desarrollarse en la superficie de las rocas emergidas por la influencia de la intemperie y de los seres vivos (meteorización).

Los suelos son sistemas complejos donde ocurren una vasta gama de procesos químicos, físicos y biológicos que se ven reflejados en la gran variedad de suelos existentes en la tierra.

A grandes rasgos los suelos están compuestos de minerales y material orgánico como materia sólida, agua y aire en distintas proporciones en los poros. De una manera más esquemática se puede decir que la pedosfera, el conjunto de todos los suelos, abarca partes de la litosfera, biosfera, atmósfera e hidrosfera.

2.1.2 Tipos de Suelos

Existen dos clasificaciones para los tipos de suelo, una según su funcionalidad y otra de acuerdo a sus características físicas.

2.1.2.1 Por funcionalidad.

En la Tabla 1 se hace un comparativo de definiciones de Mecánica de Suelos y Edafología, de diferentes tipos de suelos:

Tabla 1 Definiciones por la Mecánica de Suelos y la Edafología de los diferentes tipos de suelos existentes.

Suelo	Mecánica de Suelos	Edafología
Suelo Arenoso	Es ligero y filtra el agua rápidamente. Tiene baja materia orgánica por lo que no es muy fértil. No tiene cohesión.	No retienen el agua, tienen muy poca materia orgánica y no son aptos para la agricultura, ya que por eso son tan coherentes.
Suelo Limoso	Es estéril, pedregoso y filtra el agua con rapidez. La materia orgánica que contiene se descompone muy rápido.	Granos minerales pequeños del suelo cuya variación en diámetro es de 0.05 a 0.002 mm (ó de 0.2 a 0.002 mm en el Sistema Internacional).
Suelos Granulares	Son los suelos que no poseen ninguna cohesión, y consisten en rocas, gravas, arenas y limos.	Piedra machacada utilizada para allanar caminos.
Suelos Salinas	Son aquellos que tienen una conductividad eléctrica del extracto de saturación del suelo de más de 4 dS / ma 25 °C	Es que no contienen suficientes sales solubles neutro para afectar negativamente el crecimiento de las plantas más cultivos.
Suelo Calizo		Tienen abundancia de sales calcáreas, son de color blanco, secos y áridos, y no son buenos para la agricultura.
Suelo Humíferos	Son suelos que tienen un porcentaje elevado de materia orgánica y su reacción generalmente va de leve a fuertemente ácida.	Tienen abundante materia orgánica en descomposición, de color oscuro, retienen bien el agua y son excelentes para el cultivo.
Suelos Arcillosos	Es un terreno pesado que no filtra casi el agua. Es pegajoso, plástico en estado húmedo y posee muchos nutrientes y materia orgánica.	Están formados por granos finos de color amarillento y retienen el agua formando charcos. Si se mezclan con humus pueden ser buenos para cultivar.

Suelo Pedregoso		Formados por rocas de todos los tamaños, no retienen el agua y no son buenos para el cultivo.
Suelos Mixtos	Tiene características intermedias entre los suelos arenosos y los suelos arcillosos.	

2.1.2.2 Por características físicas.

La clasificación del USDA (United States Department of Agriculture), reconoce varios órdenes de suelos, cuyos nombres se forman anteponiendo una partícula descriptiva a la terminación –sol. (Véase Tabla 2)

Tabla 2 Clasificación del USDA, anteponiendo una partícula descriptiva a la terminación –sol.

ORDEN	Características
ENTISOL	Casi nula diferenciación de horizontes; distinciones no climáticas: aluviones, suelos helados, desierto de arena...
VERTISOL	Suelos ricos en arcilla (>30%); generalmente en zonas subhúmedas a áridas, con hidratación y expansión en húmedo y agrietados cuando secos.
INCEPTISOL	Suelos con débil desarrollo de horizontes; suelos de tundra, suelos volcánicos recientes, zonas recientemente deglaciadas...
ARIDISOL	Suelos secos (climas áridos); sales, yeso o acumulaciones de carbonatos frecuentes.
MOLLISOL	Suelos de zonas de pradera en climas templados; horizonte superficial blando; rico en materia orgánica, espeso y oscuro.
ALFISOL	Suelos con horizonte B arcilloso enriquecido por iluviación; suelos jóvenes, comúnmente bajo bosques de hoja caediza.
SPODOSOL	Suelos forestales húmedos; frecuentemente bajo coníferas. con un horizonte B enriquecido en hierro y/o en materia orgánica y comúnmente un horizonte A gris-ceniza, lixiviado.

ULTISOL	Suelos de zonas húmedas templadas a tropicales sobre antiguas superficies intensamente meteorizadas; suelos enriquecidos en arcilla.
OXISOL	Suelos tropicales y subtropicales, intensamente meteorizados formándose recientemente horizontes lateríticos y suelos bauxíticos.
HISTOSOL	Suelos orgánicos. depósitos orgánicos: turba, lignito.... sin

2.1.3 Tipos de Depósitos.

Existen diferentes tipos de depósitos de suelos, como son los siguientes:

2.1.3.1 Los Suelos Residuales.

Son productos del ataque de los agentes de intemperismo pueden quedar en el lugar, directamente sobre la roca de la cual se derivan. Estos tienen las siguientes características:

- ✚ Suelo heterogéneo.
- ✚ Tienen asentamiento.
- ✚ No sufren transporte (suelto no compacto).
- ✚ No aptos para fundaciones.
- ✚ Son difíciles de reconocer en el campo.
- ✚ Son de granulometría heterogénea.
- ✚ Las formas de los granos son angulosas.
- ✚ Son permeables
- ✚ Porosos
- ✚ Difíciles de reconocer en campo por la vegetación que crece en ellos.

2.1.3.2 Los Suelos Transportados.

Son aquellos que son removidos del lugar de formación, por los mismos agentes geológicos y re depositados en otra zona, así es como nacen otros estratos

sin relación directa con ellos. Dentro de ellos tenemos los siguientes tipos de depósitos.

Suelos aluviales.- Son suelos transportados por el agua. El tamaño de sus granos es de fino a muy grueso, su forma es sub-redondeada. La combinación del escurrimiento de aguas en las laderas de las colinas y montes y de las fuerzas del campo gravitatorio forman los depósitos de talud, en las faldas de las elevaciones, estos depósitos suelen ser heterogéneos, sueltos y predominantemente formados por materiales gruesos.

a) Torrenciales.- Presenta granos desde muy grueso hasta muy fino. Grano grueso y pendiente fuerte.

Terrazas.- Los depósitos aluviales de terrazas se caracterizan por tener granulometría heterogénea. Cuando en una terraza observamos una erosión de 90° tenemos una terraza formada de grava gruesa muy compacta. Grano mediano a fino

Lacustres.- Los depósitos lacustres son generalmente de grano fino a causa de la pequeña velocidad con que las aguas fluyen en los lagos.

Los depósitos marinos.- (formados por el mar) suelen ser estratificados reflejando muchas veces las características de las costas que los mares bañan. Granulometría fina y muy fina.

Suelos eólicos.- Son suelos transportados por el viento. El viento transporta sus materiales de tres maneras, por suspensión, saltación, y rodamiento, según sea el tamaño de material y la velocidad del viento.

El viento da lugar a la formación de dos tipos de depósitos cuyas características están en función del tamaño de los materiales que los componen. Las acumulaciones de arcillas, limos y arenas muy finas reciben el nombre de Loes, mientras que los de arenas medianas a gruesas se llaman Médanos o Dunas.

a) **De dunas.**- Poseen las siguientes características:

Suelo suelto. Son de granulometría fina (redondeada). Forma de deposición en forma longitudinal o media luna. Nivel freático bajo. Permeabilidad media o baja. Angulo de fricción nulo. Color gris claro. No es plástica.

-*Transversal.* Se desarrollan en dirección perpendicular a la del viento dominante.

-*Dunas costeras.* Son acumulaciones de arena que se presentan en las costas o próximas a ellas.

b) **De loes.**- Poseen las siguientes características:

Compactados ligeramente. Son de granulometría muy fina. Forma de deposición en mantos. No tiene nivel freático. Permeabilidad baja o nula (impermeable). Angulo de fricción interna nula. Color gris oscuro. Es plástica.

Suelos glaciares.- Son suelos transportados por el hielo y el agua. Son los mejores acuíferos por su permeabilidad y porosidad. El escombros arrastrado por un glaciar se deposita generalmente porque la masa de hielo que lo transportaba se funde. Los depósitos glaciares están formados por suelos heterogéneos que van desde grandes bloques, hasta materiales muy finamente granulados a causa de las grandes presiones desarrolladas y de la abrasión producida por el movimiento de las masas de hielo. Tamaño de los granos de grueso a fino. Forma de los granos de sub-redondeados a redondeados. Alta permeabilidad. Alta porosidad.

Durante muchos años los estudios de mecánica de suelos pusieron especial énfasis en los suelos saturados, quedando los suelos no saturados relegados a un

segundo plano, a pesar de que una gran parte del planeta se encuentra cubierta de estos suelos. La información y los conocimientos que se tienen en el caso de los suelos no saturados son muy escasos, lo cual se debe al hecho de que su estudio ha resultado ser bastante complicado que el de los saturados (Karube y kawai, 2001). Posteriormente Fredlund en 2006, encontró la manera de controlar la presión debida al agua y debida al aire, con lo cual generó que el estudio de estos suelos tomara auge entre los investigadores.

Por otro lado, el suelo en condiciones no saturadas se encuentra constituido por tres estados o fases de agregación de la materia: la fase sólida, constituida por las partículas sólidas del suelo y el agua higroscópica contenida en la capa absorbida y en la doble capa difusa. La fase líquida, compuesta por el agua libre (agua que se mueve por la acción de la fuerza gravitacional), el aire disuelto y las sales disueltas, ocupa el espacio de los poros del suelo no ocupados por la fase gaseosa. Los cambios de volumen y el agrietamiento por desecación de los materiales están asociados directamente con las variaciones de humedad a las cuales está sometido el suelo. (Ning y Likos, 2006).

Debido a la interacción entre las fases sólidas líquidas y gaseosas se presentan fuerzas adicionales en sistemas de poros no saturados. Un suelo no saturado tiene la tendencia a recibir agua y aumentar su grado de saturación, La parte capilar depende de la distribución y tamaño de poro, la parte adsorbente está en función de la composición mineralógica de la parte sólida así como también de la composición química del líquido. (Bönsch C, 2007).

Los procesos de formación del suelo son complejos y dependen en gran medida del material de roca madre, las condiciones climáticas y el sitio específico. Las transformaciones minerales primarias en suelos bien drenados han sido ampliamente estudiados, el producto final de los procesos físico-químicos es generalmente caolinita con una cantidad variable de gibsita e hidróxido de hierro (Wong, 1969).

Muchos de los factores que influyen en el mecanismo de expansión también afectan, o son afectados por, las propiedades físicas tales como plasticidad o densidad.

Los factores que influyen en el potencial de expansión-contracción de un suelo, se pueden considerar en tres grandes grupos (Miller y Nelson, 1992):

Las características del suelo, que influyen en la naturaleza de las fuerzas internas. Los factores ambientales, que intervienen en los cambios que ocurren en el sistema de fuerzas internas, y el estado de esfuerzos.

El colapso o la expansión de un suelo requiere de las siguientes tres condiciones: (1) La estructura del suelo no saturado y potencialmente inestable (colapso o expansión), (2) un aumento crítico de la humedad del suelo, y (3) un valor de la tensión aplicada que debe ser lo suficientemente alta para suelos colapsables y baja suficientemente para arcillas expansivas (Popescu, 1986).

Antes de tomar alguna determinación y emitir cualquier recomendación sobre el tipo de cimentación, es necesario, la plena identificación del tipo de material con el que se está tratando. La identificación de los suelos expansivos comprende dos etapas importantes. La primera es el reconocimiento y la segunda es el muestreo y medición de las propiedades del suelo.

En el caso de los suelos expansivos, en un terreno que recientemente haya perdido humedad y no se manifieste tránsito sobre éste, se apreciará una serie de grietas como consecuencia de la contracción del suelo. Si se toma un poco de material y se agrega cierta cantidad de agua tendrá una consistencia pegajosa y plástica. Para la medición de las propiedades de los materiales se pueden emplear varias técnicas que conducen a tal objetivo. Se sabe que las viviendas apoyadas sobre suelos expansivos se agrietan cuando la humedad se incrementa debido a la humedad local. Si el suelo se satura (puede ser por el agua freática), la vivienda no está exenta de agrietarse. La humedad inicial de los suelos expansivos controla la cantidad de expansión. Esta afirmación se cumple en suelos no alterados y en estado remoldado. Las arcillas secas cuyo contenido natural de agua sea del 15%,

pueden indicar mayor susceptibilidad a la expansión. Estas arcillas absorben fácilmente la humedad hasta en un 35% con resultados de expansión dañinos a las estructuras. Inversamente, las arcillas cuyo contenido de agua sea del 30% indican que puede darse una menor expansión Sin embargo; muchas arcillas se secan debido al bajo nivel freático o a otros cambios de condiciones físicas y subsecuentemente serán propensas a humedecerse, causando nuevamente el potencial de expansión(López-Lara, 2002).

El producto del intemperismo, erosión, transporte y deposito ulterior da como resultado la sedimentación, como puede ser en laderas, esto ocasiona que se presenten gruesos paquetes de suelo colapsable. Una peculiaridad de estos suelos, es que cuando a un terrón se le añade agua con cloro similar a la potable o unas gotitas de ácido de batería rebajado con agua, efervesce. Los procesos de alteración, transporte y deposito están controlados químicamente y por las cargas eléctricas, el producto (suelo potencialmente colapsable) tiene una estructura abierta. Los suelos colapsables tienen un gran contenido de arena de ahí su estructura abierta e inestable, características de un suelo para que sufra un fenómeno de colapso (Álvarez et al., 2002).

En las últimas décadas ha surgido una creciente conciencia de la existencia de suelos que estructuralmente no se consideran estables ya que cambian en su volumen cuando el agua entra a ellos. Los suelos expansivos aumentan de volumen, mientras que los suelos colapsables disminuyen de volumen cuando aumenta su contenido de humedad cuando se le aplica esfuerzo constante.

La evidencia documentada de la existencia de problemas difíciles de ingeniería y relacionados con arcillas expansivas y de suelos colapsables es mundial.

La estructura de loess es normalmente abierto y contiene muchos espacios vacíos.

Los granos son casi todos más pequeños que el límite superior de limo.

Los fenómenos más característicos del suelo no saturado se relacionan con sus deformaciones volumétricas al modificar su grado de saturación. El fenómeno de colapso es definido

Las deformaciones volumétricas de tipo irreversible, se presentan cuando tanto la succión como el esfuerzo medio neto son relativamente bajos; ya que estas están relacionadas de forma directa con la succión inicial y en forma inversa con el esfuerzo medio neto aplicado y la relación de vacíos (Rojas et al., 2004).

Los fenómenos más característicos del suelo no saturado se relacionan con sus deformaciones volumétricas al modificar su grado de saturación (S_r). El fenómeno de colapso es definido como la reducción del volumen irrecuperable producido por el aumento del grado de saturación del suelo manteniendo constante el suelo de esfuerzo exterior (Alonso et al, 1987). Dada su importancia ingenieril tanto en suelo naturales como compactados, las deformaciones de colapso han sido objeto de interés desde hace largo años (Booth, 1977). Ya en la década de los 60 se puso de manifiesto que las deformaciones de los suelos no saturados podían referirse a cambios de succión y de esfuerzo neto (Bishop & Blight, 1963; Matyas & Radhakrishna, 1968). Hasta finales de los años 80 no se dispuso de modelos constitutivos que fueran capaces de explicar de forma coherente el comportamiento deformacional del suelo no saturado sometido a cambios generales de succión y de esfuerzos (Alonso et al, 1987 y 1990).

Desde entonces se han desarrollado diversos modelos elastoplásticos y se han puesto a punto equipos específicamente diseñados para la realización de ensayos bajo succión controlada. Sin embargo, solo muy recientemente se ha empezado a estudiar el acoplamiento existente entre la deformación volumétrica y cambio en su contenido de agua durante los procesos de carga y cambio de succión en estos suelos (Romero, 1999, Rampino, et al, 2000; Wheeler & Sivakumar, 2000).

Debido a la interacción entre las fases sólidas líquidas y gaseosas se presentan fuerzas adicionales en sistemas de poros no saturados. Un suelo no saturado tiene la tendencia a recibir agua y aumentar su grado de saturación, La parte capilar depende de la distribución y tamaño de poro, la parte adsorbente está

en función de la composición mineralógica de la parte sólida así como también de la composición química del líquido. (Bönsch C, 2007).

Los procesos de formación del suelo son complejos y dependen en gran medida del material de roca madre, las condiciones climáticas y el sitio específico. Las transformaciones minerales primarias en suelos bien drenados han sido ampliamente estudiados, el producto final de los procesos físico-químicos es generalmente caolinita con una cantidad variable de gibsita e hidróxido de hierro (Wong, 1969).

2.2 Determinación del porcentaje de Arena, Limo y Arcilla en los suelos.

En los comienzos de la investigación de las propiedades de los suelos se creyó que las propiedades mecánicas dependían directamente de la distribución de las partículas constituyentes según sus tamaños; por ello era preocupación especial de los ingenieros la búsqueda de métodos adecuados para obtener tal distribución (Juárez y Rico, 1976).

2.2.1 Método de Bouyoucos.

Consiste en la determinación de los porcentajes de arena, limo y arcilla presentes en la fracción mineral del suelo. Estos porcentajes se obtienen mediante la separación de las partículas en grados clasificados de acuerdo a su diámetro. El ensayo analítico para obtener la clasificación textural de los suelos, se realiza por el método del hidrómetro de suelo o de Bouyoucos, aplicado en la mayoría de los laboratorios de suelo del país como rutinario con fines de fertilidad (Gilabert et al., 2004). El método se basa en el hecho de que la velocidad de caída de las partículas contenidas en una solución es mayor cuanto mayor sean su densidad y su tamaño; por lo que en una solución de suelo que contenga arena (a), limo (L) y arcilla (A), las partículas de arena serán las primeras en sedimentarse, a continuación las de limo, y por último las de arcilla (Figura 1). Por tanto los valores medidos con el hidrómetro a intervalos de tiempo establecido, para determinar la

proporción relativa en peso de las partículas presentes en el suelo agrupadas de acuerdo a su tamaño, lleva implícito una serie de correcciones asociados con la densidad de la solución del suelo, la temperatura y la densidad de la solución que se emplee en la disgregación de las partículas de suelos, los cuales deben ser tomados en cuenta para que las lecturas del instrumento sean correctas. En este sentido la norma ASTM D422-63 (1998), señala que se debe disponer de un hidrómetro ASTM ó de Bouyoucos, graduado para indicar la concentración en g/L de una suspensión de suelo, asumiendo una densidad de partículas de suelo de 2,65 g/ml, agua pura como medio de suspensión a la temperatura de 20 °C y una solución dispersante de hexametáfosfato de sodio al 5% (Calgón). Con estas condiciones la norma asume un factor de corrección de 0,36 y la determinación de cada fracción de partículas en el suelo viene dado por: Lectura corregida = Lectura experimental \pm 0,36 * [(Temperatura de calibración (20 °C) – Temperatura experimental)]. El uso de este factor no considera la densidad real que tiene la suspensión del suelo en la medida que ocurre la sedimentación en el tiempo (García et al., 2008).

El hexametáfosfato de sodio y el carbonato de sodio, es un agente dispersante, donde el sodio actúa siendo absorbido por las partículas arcillosas, con lo cual las partículas tienden a repelerse entre sí en medio de la suspensión del agua disgregándose los cúmulos denominados flóculos, la presencia del ión sodio incrementa el potencial “Z”, es decir las fuerzas electrostáticas de atracción disminuyen.

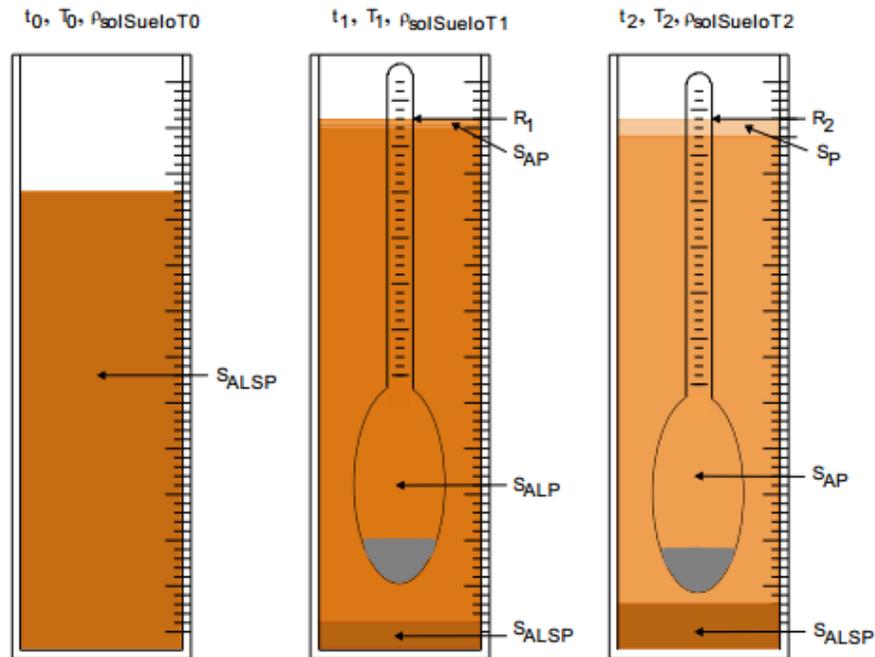


Figura 1 Ilustración del proceso de sedimentación en un hidrómetro (Arrieche et al., 2013).

SALSP: porción de solución con A, L, a, partículas más pequeñas, agua y dispersante.

SALP: porción de solución con A, L, partículas más pequeñas, agua y dispersante.

SAP: porción de solución con A, partículas más pequeñas, agua y dispersante.

SP: porción de solución con partículas más pequeñas que las A, agua y dispersante.

2.2.2 Criterios de Granulometría.

Los límites de tamaño de partículas que constituyen un suelo ofrecen un criterio obvio para una clasificación descriptiva del mismo. Tal criterio fue usado en la mecánica de suelos desde un principio e incluso antes de la etapa moderna de esta ciencia. Originalmente, el suelo se dividía únicamente en tres o cuatro fracciones debido a lo engorroso de los procedimientos disponibles de separación

por tamaños. Algunas clasificaciones granulométricas de los suelos según sus tamaños, son los siguientes:

a) Clasificación Internacional.

Basada en otra desarrollada en Suecia.

Tabla 3 Clasificación Internacional.

Tamaño en mm				
2.0	0.2	0.02	0.002	0.0002
Arena gruesa	Arena fina	Limo	Arcilla	Ultra-Arcilla

b) Clasificación M.I.T

Fue propuesta por G. Gilboy y adoptada por el Massachusetts Institute of Technology.

Tabla 4 Clasificación M.I.T.

2.0	0.6	0.2	0.06	0.02	0.006	0.002	0.0006	0.0002
Gruesa	Media	Fina	Grueso	Medio	Fino	Gruesa	Media	Fina
ARENA			LIMO			ARCILLA		

c) La siguiente clasificación, utilizada a partir de 1936 en Alemania, está basada en una proposición original de Kopecky, se puede apreciar en la Tabla 5.

Tabla 5 Clasificación Kopecky.

MATERIAL	CARACTERISTICA	TAMAÑO mm
Piedra	-----	Mayor de 70 mm
Grava	Gruesa	30 a 70
	Media	5 a 30
	Fina	2 a 5
Arena	Gruesa	1 a 2
	Media	0.2 a 1
	Fina	0.1 a 0.2
Polvo	Grueso	0.05 a 0.1
	Fino	0.02 a 0.05
Limo	Grueso	0.006 a 0.02
	Fino	0.002 a 0.006
Arcilla	Gruesa	0.0006 a 0.002
	Fina	0.0002 a 0.0006
Ultra-Arcilla	-----	0.00002 a 0.0002

Debajo de 0.00002 mm las partículas constituyen disoluciones verdaderas y ya no se depositan.

Con frecuencia se han usado otros tipos de clasificación, destacando el método gráfico del Public Roads Administration de los Estados Unidos, pero su interés es hoy menor cada vez, por lo cual se considera que las clasificaciones señaladas son suficientes para dar idea del mecanismo utilizado en su elaboración (Juárez y Rico, 1976).

2.3 Suelos Expansivos.

Los suelos expansivos corresponden generalmente a arcillas y limos de alta compresibilidad (CH y MH) y se encuentran con contenidos de humedad bajo, muy inferior a su humedad de saturación.

Los suelos arcillosos están sujetos continuamente a cambios de humedad lo cual al variar esta, varía también su volumen manifestándose en expansión o contracción según sea el caso de su incremento o disminución de humedad.

Estos cambios de volumen de la masa de suelo son la principal causa de los problemas en las estructuras ligeras desplantadas en los suelos expansivos y que generalmente no son diseñadas para contrarrestar estos cambios de volumen. Así mismo, no se previene o protege la obra de los cambios de humedad a que puede estar expuesta la masa de suelo de cimentación. En muchas ocasiones el constructor no tiene conciencia, o mejor dicho, no se imagina los problemas que se pueden presentar en su obra al no analizar o prevenir el problema de los cambios de volumen de la masa de suelo. Cuando esto sucede, se manifiesta en los movimientos diferenciales de las estructuras y en el agrietamiento de los muros.

Los suelos arcillosos clasificados como expansivos presentan entre otras propiedades una plasticidad muy alta y su contenido de agua es muy bajo, lo cual dificulta la obtención de muestras inalteradas y más aún su labrado para colocarlo en el anillo de consolidación. Este tipo de suelo característico son los llamados vertisoles.

La presión de expansión de estos suelos depende en primer lugar del contenido de agua del suelo, es decir, a los suelos expansivos se les reduce considerablemente su potencial de expansión al incrementarse su contenido de agua y viceversa.

Respecto a los suelos identificados con estructura potencialmente colapsable, éstos tienen origen bastante variable. Aunque los más extendidos son los de origen eólico (loes y arena eólica) se han observado colapsos en suelos aluviales, coluviales, residuales o en rellenos compactados (Dudley,1970). La sensibilidad al colapso es graduada según el tipo de depósito, de tal forma que los suelos de origen eólico son, en general más propensos al colapso que los aluviales. Sin embargo, Aitchison (1973) indica que dependiendo del lugar pueden existir importantes variaciones. De forma general se observa que el origen de un suelo es de poca ayuda para conocer su potencialidad en colapsar, lo inadecuado en definir

un suelo como colapsable, sin que antes se haya definido una estructura que a su vez depende de la porosimetría, del grado de saturación y del estado de esfuerzos al que esté sometido.

En cuanto a los suelos potencialmente expansivos, hay que relacionar su origen a la presencia de partículas arcillosas que puedan provocar esta expansión. Habitualmente se consideran tres minerales arcillosos: montmorillonita, illita y caolinita; que por su abundancia respecto a otros se les considera como básicos para efecto de estudiar este fenómeno. Según Schreiner (1987), la fuente de estos minerales es una amplia gama de rocas ígneas básicas incluyendo rocas volcánicas y lavas en las que las más frecuentes son los basaltos, si bien, en algún caso ha sido el granito. La montmorillonita necesita un medio alcalino como factor imprescindible y se genera habitualmente en zonas áridas con poco drenaje y en consecuencia con alta concentración de cationes y minerales. La caolinita se produce con pH más bajo y en las zonas más drenadas y con menores concentraciones de cationes. Por esta razón la montmorillonita abunda en valles y zonas deprimidas y la caolinita en lugares con mayores pendientes. La illita, por su parte, precisa para su formación un pH ligeramente alcalino (Barrera y Garnica., 2002).

2.3.1 Naturaleza de los Suelos Expansivos.

Se entiende por suelo expansivo como aquel que es susceptible de sufrir cambios volumétricos por cambios de humedad. Puede decirse que los suelos expansivos son un fenómeno que se origina por la presencia de un suelo arcilloso con mineral montmorillonita y un clima semiárido, donde la evotranspiración potencial media anual es mayor que la precipitación media anual.

Los asentamientos que sufren las estructuras debido a las deformaciones que provocan los aumentos de carga sobre el suelo que las soporta, fueron identificados, generalmente, como las causas de los daños en las estructuras, sin embargo, el U. S. bureau of Reclamation fue el primero en reconocer, en 1938, el

problema de la expansión de los suelos, cuando intervino en el proyecto Owyhee en Oregón en la cimentación para in sifón de acero.

Las estructuras no solamente pueden presentar daños por asentamientos, sino también por expansión del suelo.

Existen muchos países en el mundo que tienen problema de los suelos expansivos, por ejemplo, México, Canadá, Estados Unidos, Venezuela, Colombia, Costa Rica, Ecuador, Perú, Argentina, Brasil, Cuba, Angola, Mozambique, Kenia, Argelia, Marruecos, Ghana, Israel, Turquía, Irán, Irak, India, Australia, entre otros. En Europa parece ser que el único país con problemas graves es España (Chen 1975).

La expansión, en cualquier tipo de suelos, se puede presentar por un alivio de esfuerzos, como el que provoca una excavación. En las arena, al expansión por descarga suele ser más pequeña y por ejemplo, en las arcillas de la Ciudad de México, se presentan expansiones que deben de tomarse en consideración, para desarrollar un procedimiento constructivo que se encargue de evitar, en lo posible, las expansiones.

El fenómeno capilar que se presenta en los suelos es una causa de aumento de los esfuerzos efectivos (intergranulares). Cuando en un suelo, como las arcillas, se pierde el agua por un proceso de evaporación, se genera la tensión capilar que provoca la contracción del suelo. Una vez que el suelo ha disminuido su volumen por secado, también podrá aumentar dicho volumen si se restituye el agua a dicho suelo, la cual reducirá el efecto de la tensión capilar.

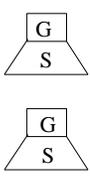
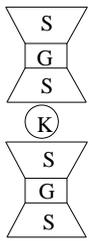
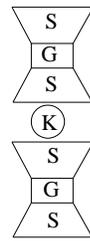
En cuanto a su estructura reticular, los minerales de las arcillas se clasifican en caolinitas, montmorilonitas e ilitas

Las montmorilonitas son las dominantes en el problema de los suelos expansivos.

Las montmorilonitas están formadas por una lámina alumínica entre dos sílicas cuyos enlaces son débiles, pudiendo así presentarse la penetración de las moléculas del agua en su estructura reticular, debida sobre todo a la naturaleza

dipolar de dichas moléculas. En estas condiciones los cristales de arcilla se hinchan (Juárez y Rico, 1976).

Tabla 6 Propiedades de los minerales arcillosos expansivos (Lambe, 1959).

PROPIEDADES	MINERAL		
	CAOLINITA	ILITA	MONTMORILONITA
Esquemas de la estructura G= lámina de Gibosita S= lámina de Silicato K= ión de potasio			
Tamaño de las partículas	d = 0.3 a 3 μ m e = 1/3 a 1/10 d	d = 0.1 a 2 μ m e = 1/10 d	d = 0.1 a 1 μ m e = 1/10 d
Superficie específica	5-30	65-100	600-800
Capacidad de intercambio catiónico por 100g de arcilla	3-15	10-40	80-150
Forma de la partícula	Aplanada	Aplanada	Aplanada
Expansión máxima para una presión de 0.1 t/p ²	Despreciable	350	1500
Expansión máxima para una presión de 0.2 t/p ²	Despreciable	150	350

En realidad, los suelos arcillosos experimentan variaciones de volumen según el contenido de humedad, correlativas con las variaciones de la presión de poro y con los esfuerzos efectivos. Estas variaciones serán tanto más importantes cuanto mayor sea la proporción de partículas inferiores a 2 μ , y también en la medida en que sea más activa la especie mineralógica componente de esta fracción (montmorillonita, atapulgita, etc.).

Resulta significativo tomar en consideración que los suelos arcillosos que contienen montmorillonita y que están sujetos a cambios de humedad, presentan a causa de dichas variaciones del contenido de agua, expansiones y contracciones, según se trate de aumento o disminución de la humedad, respectivamente. Así, las

variaciones de volumen del suelo no dependen únicamente de cambios en los esfuerzos externos aplicados.

Los suelos expansivos generalmente no tienen problemas de capacidad de carga, sin embargo; son muy frecuentes los levantamientos de las estructuras en consecuencia de la falta de equilibrio de los esfuerzos internos que desarrolla el suelo con aquellos a los que es sometido, es decir; a la carga transmitida por la estructura (López-Lara, 2002).

Las arcillas expansivas son más bien un fenómeno que se origina en la conjugación de un terreno arcilloso con ciertas condiciones ambientales que provoquen cambios apreciables de humedad. Los suelos expansivos pueden encontrarse en zonas del globo como las monzónicas, en las que las estaciones son muy marcadas, con periodos secos prolongados. Con estas características, aparece también en las zonas semidesérticas o sahelianas, situadas entre las monzónicas y las tropicales, para presentarse también estas de manera menos generalizada, a favor de la gran actividad de algunas arcillas (Jiménez, 1980).

2.3.2 Origen de los Suelos Expansivos.

Donalson (1969) clasifico en dos grupos los materiales que pueden dar origen a los suelos expansivos. El primer grupo comprende las rocas ígneas básicas, como los basaltos y los gabros. En los suelos expansivos los minerales como el feldespato y el piroxeno de las rocas madre, se descomponen para formar la montmorilonita y otros minerales secundarios.

El segundo grupo comprende las rocas sedimentarias que contienen montmorilonita como constituyente, el cual se desintegra mecánicamente para formar suelos expansivos. En Norteamérica existen ejemplos de roca basal lutita, como la formación Laramie y Denver. En Israel, están las margas y las calizas en Sudáfrica (Chen, 1975).

La Ciudad de México tiene fama mundial por sus problemas de asentamientos lo cual ha motivado investigación abundante por parte de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). Relacionada con los suelos blandos que el caracterizan, depósitos lacustres en los que se encuentra la capital mexicana. Por otro lado las arcillas expansivas en México han sido estudiadas principalmente por investigadores de la Universidad Autónoma de Querétaro, desde hace dos décadas. Existen muchas ciudades en el territorio mexicano que tiene suelos expansivos, que han causado daños no cuantificados pero seguramente considerables y que potencialmente, con el crecimiento de las ciudades, serán más serios.

Para que el problema de expansión se manifieste en mayor o menor grado, es necesario el conjunto que se describe a continuación:

- Un subsuelo compuesto de arcillas con propiedades expansivas.
- Cargas estructurales de reducida a mediana intensidad.
- Alteraciones en el contenido natural de humedad del terreno.

La magnitud del movimiento depende entonces de las propiedades físicas y químicas del suelo, de las características de la subestructura y del régimen hídrico de la región (Vallejos, 2000).

2.3.3 Métodos para obtener la Físico-Química de las Arcillas.

A continuación se mencionan algunas de las aplicaciones más comunes que se encuentran en el estudio de los materiales especialmente:

2.3.3.1 Identificación Mineralógica.

La composición mineral de los suelos expansivos tiene influencia importante sobre el potencial de expansión, debido a la estructura reticular, que está compuesta por las láminas silícicas y las alumínica, según el tipo de arcilla.

Las cargas eléctricas negativas sobre la superficie de los minerales de arcilla, la firmeza entre las capas ligadas y la capacidad de intercambio catiónico, influyen en el potencial de expansión de la arcilla. De esta forma, se supone que identificando los constituyentes mineralógicos de la arcilla, se pueden estimar el potencial de expansión. Las técnicas que pueden utilizarse son:

- ✚ Difracción de Rayos X
- ✚ Análisis Térmico diferencial
- ✚ Análisis Químico
- ✚ Microscopio Electrónico

La identificación de los minerales de la arcilla es importante, pero no es necesario hacerla más que en dos o tres muestras en cada emplazamiento. El procedimiento más conveniente hoy, es la difracción de Rayos X. El análisis Térmico Diferencial no parece llegar nunca a definiciones concretas; el Microscopio electrónico, especialmente el de barrido no deja, duda alguna en general, respecto a las partículas que contemplamos, pero el conjunto, ya que los suelos tienen casi siempre mezcla de diversas especies (Holtz and Gibbs, 1952; Juárez y Rico, 1976).

2.3.3.1.1 Difracción de Rayos X.

A continuación se mencionan algunas de las aplicaciones más comunes que se encuentran en el estudio de los materiales especialmente:

Determinación de la estructura de los materiales, esto se hace gracias a la recopilación de información que ha permitido tener una gran cantidad de patrones de difracción. Además del establecimiento de los planos cristalinos que producen difracción y la combinación del difractómetro con las cámaras de difracción de rayos X, para el estudio de estructuras complejas.

Determinación de las composiciones y de los elementos presentes en una estructura que se somete a estudio, esto se logra realizando análisis cuantitativo y cualitativos de las estructuras que se someten a estudio.

Determinación de los cambios de fases en las estructuras, este tipo de análisis se realiza por medio de difractómetros o cámaras en los cuales se puede someter el material a cambios de temperatura, lo cual permite realizar análisis a diferentes temperaturas.

Determinación de esfuerzos residuales. Se realiza estudiando patrones de difracción del material es estudio y comparándolos con aquellos en los que se presentan esfuerzos residuales con el fin de detectar cambios en la morfología de los planos que producen difracción.

Difractómetro: el dispositivo denominado difractómetro, está compuesto por cuatro rejillas (dos a la salida de la fuente de rayos X y dos a la entrada del contador), presenta además dos colimadores que se encargan de disminuir la divergencia de los rayos que llegan tanto a la muestra como al sistema detector o contador de rayos reflejados. Las rejillas iniciales disminuyen la dispersión en forma vertical, mientras que el colimador inicial disminuye la dispersión en forma lateral, con lo que se logra que los rayos que llegan a la muestra se enfoquen sobre la superficie sobre la cual ésta se encuentra colocada y no sobre otra parte; las dos rejillas finales se encuentran antes del sistema de conteo y tienen como función enfocar los rayos que salen de la muestra hacia ese sistema. Hay que hacer notar que el plato sobre el cual se colocan las muestras tiene una longitud de 2cm, que debe ser cubierta por los rayos que llegan al mismo. También se debe destacar el hecho de que el ancho de la rejilla inicial, está determinada por el ancho del rayo (ancho del filamento en el tubo generador de rayos X), esto debido a que las dimensiones de estos dos dispositivos deben ser iguales, con el fin de disminuir la dispersión de los rayos que llegan a la muestra y al sistema de conteo (Reyes, 1997).

2.3.3.1.2 Microscopía Electrónica de Barrido.

Un microscopio es un sistema óptico que magnifica objetos pequeños para examinarlos con luz natural o luz emitida de una fuente artificial, en el microscopio electrónico, en lugar de luz se utiliza un haz electrónico para formar la imagen.

Un MEB tiene un rango de aumentos de 10 a 180,000 X y junto con detectores de rayos X, hace posible identificar minerales muy pequeños y examinar la forma y distribución de éstos (Reyes, 1997).

Funcionamiento

El MEB consiste de una columna óptica y una consola electrónica. La primera cuenta con una cámara que está a alto vacío (aproximadamente 2×10^{-6} torr) donde se coloca la muestra que se va a analizar. La imagen del microscopio es formada por un haz de electrones dirigido hacia la muestra, dicho haz es generado a partir de un cañón electrónico, el cual tiene como cátodo un filamento de tungsteno que se calienta mediante un sistema de emisión termoiónica a una temperatura que excede los 2,700 °K, este filamento emite electrones en abundancia que producen un alto potencial negativo con respecto al ánodo, que son rápidamente acelerados hacia el mismo a través de la columna electrónica. El haz de electrones pasa por dos o tres lentes condensadores electromagnéticos cuya función es disminuir el diámetro del haz.

Cualquier radiación desde la muestra puede ser usada para proporcionar una señal y cada una de éstas es el resultado de alguna interacción entre los electrones incidentes y la muestra, proporcionando diferente información (Reyes, 1997).

MEB y microanálisis

El objetivo del microanálisis es obtener análisis químicos de una pequeña cantidad de material del orden de un micrómetro cúbico. Cuando la materia es bombardeada por electrones de alta energía, los átomos de cada elemento emiten un espectro característico de rayos X. Con los detectores adecuados se pueden obtener análisis cualitativos y cuantitativos, éstos últimos, comparando las intensidades de cada elemento de la muestra desconocida con intensidades de elementos de referencia (estándares).

Existen dos técnicas de rayos X usadas en el microanálisis: Espectrofotometría de energía dispersiva (EED) y Espectrofotometría de longitud

de onda dispersiva (ELOD). La diferencia fundamental entre éstas técnicas está en los detectores usados para medir la intensidad de rayos-X. (Reyes, 1997).

Preparación de la muestra

Debido a que existe una gran variedad de campos de aplicación del MEB, hay muchos tipos de muestras que pueden ser observadas. Por lo tanto, se han desarrollado diversas técnicas de preparación que dependen del objetivo de la investigación. En general, las muestras a analizar por MEB son relativamente fáciles de preparar, uno de los requerimientos es el tamaño, que puede ser desde muy pequeño hasta 7 cm o tres veces más en los equipos más modernos. Sin embargo, para cada caso se deben tomar en consideración tres aspectos importantes:

- ✚ La muestra debe estar limpia y seca.
- ✚ Se debe mantener la morfología original.
- ✚ No debe tener cargas electrostáticas.

Todas las técnicas de secado causan cambios dimensionales pudiendo alterar la construcción original de la muestra. El agua puede ser removida por secado al aire, o a pasos graduales. El daño puede ser reducido si el agua es reemplazada por un fluido volátil que tenga una superficie de tensión menor a la del agua.

Los métodos más importantes de remoción de humedad hasta el momento son el congelado-secado y secado a punto crítico, y se utilizan principalmente en materiales biológicos, arcillas y zeolitas, con la finalidad de conservar la microestructura.

Para que la muestra adquiera características conductivas y se obtenga una imagen clara en el MEB, debe ser adherida a una cinta de carbón y fijada a un soporte con pasta de plata, posteriormente se debe recubrir con un metal, como oro, aluminio, plata o carbón mediante una ionizadora o evaporadora, esto evitará que se carguen con energía estática y se polarizan (Reyes, 1997).

2.3.4 Métodos Indirectos.

La evaluación del potencial de expansión puede realizarse por medio de pruebas sencillas. Estas pruebas pueden incluirse en la rutina, para la investigación del lugar donde se realizará la obra de que se trate. Las pruebas índice pueden ser:

- ✚ Límites de Atterberg
- ✚ Límite de Contracción y Contracción Lineal
- ✚ Expansión Libre
- ✚ Contenido de Coloides

Límites de Atterberg

Holtz y Gibbs (1956) demostraron que el índice de plasticidad y el límite líquido son índices de utilidad para determinar las características de expansión de la mayoría de las arcillas.

El potencial de expansión se define como el porcentaje de aumento de volumen en una muestra confinada lateralmente, la cual se satura bajo una sobrecarga de 6.9 KN/m² (0.07 Kg/cm²) después de ser compactada a su peso específico máximo en la humedad óptima, de acuerdo a la prueba AASHTO estándar. De los anterior, Seed, Woodward y Lundgren (1962) establecen la siguiente relación simplificada:

$$S = 60 K (I_p)^{2.44}$$

En la cual:

S = Potencial de Expansión

K = 3.6 X 10⁻⁵ y es una constante

La ecuación de arriba se aplica solamente a suelos con porcentajes de arcilla comprendidos entre el 8 y el 65% y el acercamiento de esta forma de cálculo es de

aproximadamente un 33% de diferencia respecto a la determinación en laboratorio del potencial de expansión.

Puesto que el límite líquido y la expansión de las arcillas tratan de absorber, no es sorpresa que estén relacionados.

La relación entre el potencial de expansión de las arcillas y el índice de plasticidad puede establecerse como a continuación se indica en la Tabla 7

Tabla 7 Relación entre el Potencial de Expansión y el Índice de Plasticidad.

Índice de Plasticidad	Índice de Plasticidad
Bajo	0 – 15 %
Medio	10 – 35 %
Alto	20 – 55 %
Muy alto	35 o más

Contracción Lineal

Se supone que el potencial de expansión está relacionado con la propiedad opuesta de medición de la contracción lineal. Teóricamente parece ser que las características de contracción de la arcilla deben ser índices consistentes y confiables del potencial de expansión.

Altmeyer sugirió en 1955 a manera de guía para la determinación del potencial de expansión, varios valores de límite de contracción lineal, como se muestra a continuación, en la Tabla 8:

Tabla 8 Determinación del Potencial de Expansión.

Límite de Contracción %	Contracción Lineal %	Grado de Expansión
<10	>8	Critico
10 – 12	5 – 8	Marginal
>12	0 – 5	No critico

La investigación ha sido modificada insuficientemente y falta evidencia concluyente con respecto a la correlación entre el potencial de expansión y el Límite de Contracción.

2.3.5 Propiedades Físicas de los Suelos Expansivos.

Es bien sabido por los ingenieros de suelos que las arcillas montmorilonitas se expanden cuando su contenido de agua aumenta, mientras que las caolinitas suelen ser relativamente estables en presencia de agua, debido a que la unión entre todas las retículas es lo suficientemente firme para no permitir la penetración de las moléculas de agua entre ellas (adsorción). Las illitas suelen presentar una expansividad menor que las montmorilonitas.

2.3.5.1 Contenido de agua.

Independientemente de que el potencial de expansión de un suelo sea alto, si la humedad de la arcilla permanece constante. No habrá cambio de volumen y por lo tanto, una estructura cimentada sobre una arcilla con humedad constante no estará sujeta a movimientos causados por la expansión. Cuando el contenido de agua aumenta en la arcilla, entonces pueden ocurrir expansiones tanto en la dirección vertical como en la horizontal. No es necesaria la saturación por completo para que se presente la expansión, cambios de leves de humedad, del 1 o 2%, pueden ser suficientes para provocar expansiones inconvenientes. Es sabido que las losas de piso cimentadas sobre suelos expansivos se agrietan más severamente cuando el contenido aumenta ligeramente en forma local. Si por ejemplo se presenta un ascenso del nivel de aguas freáticas, la losa de piso no sufrirá daños considerables por la expansión del suelo.

La humedad inicial del suelo expansivo controla la cantidad de expansión, lo cual es válido para suelos remoldeados o inalterados. Los suelos muy secos, con contenidos de agua naturales menores del 15% generalmente provocan daños.

Estas arcillas pueden absorber fácilmente humedades del orden del 35%, con los consiguientes daños a las estructuras, como resultado de la expansión.

2.3.5.2 Peso específico seco.

El peso específico seco de la arcilla es otro índice de expansión. Los suelos con pesos específicos secos mayores de 17.6 kN/m³ (1.76 ton/m³) generalmente exhiben alto potencial de expansión.

El peso específico de las arcillas también se refleja en los resultados de la prueba de penetración estándar. Las arcillas con N (resistencia a la penetración estándar) mayor de 15, generalmente poseen potencial de expansión. En las arcillas de alta expansividad, como en las de Denver, Colorado, se tiene valores de N en ocasiones hasta de 30.

2.3.5.3 Propiedades Índice.

El termino como propiedad índice y su definición se presentó por primera vez en por G.F. Sowers en su artículo “Aplicación de los resultados de perforaciones de exploración y propiedades índice a los problemas de ingeniería en suelos” en el Simposio Internacional de Mecánica de Suelos en el año de 1979 en Oaxaca, México. En este artículo, Sowers presento una reflexión sobre las propiedades índice, cinco casos históricos del mal uso de ellas y tablas con correlaciones entre las propiedades del suelo, que hoy en nuestros días requiere de una actualización, sobre todo con la adición de aquellas propiedades relacionadas con los suelos parcialmente saturados.

Una propiedad índice es cualitativa fácil de medir en suelos y rocas tanto en campo como en laboratorio mediante la cual se puede inferir un comportamiento más complejo de un suelo (G. F. Sowers. 1979).

Las propiedades índice son el primer acercamiento hacia los suelos y deben servir como una orientación para profundizar el estudio a través de ensayos mas elaborados; es decir, su uso debe limitarse a la etapa preliminar y a un estimado del diseño. Aunque existen muchas propiedades índice de suelos y rocas, pocas han sido acotadas con ese término.

En los últimos años se han encontrado nuevas correlaciones del comportamiento del suelo con las propiedades índice, sobre todo en el área de los suelos no saturados poniendo especial énfasis en aquellas relacionadas con la problemática de los suelos expansivos, véase Tabla 9.

Tabla 9 Correlaciones de comportamiento de Suelo.

Propiedades Índice Primarias	Correlación empírica con propiedad mecánica
Grado de saturación	Potencial de expansión, conductividad hidráulica
Peso específico seco	Potencial de expansión y presión de expansión
Partículas menores a 2 micras	Actividad-potencial expansivo
Contracción lineal	Potencial de expansión
Contenido volumétrico de agua	Conductividad hidráulica
Limite liquido	Potencial de expansión y presión de expansión
Peso específico relativo de solidos	Potencial de expansión
Compacidad (definición según Orozco S.)	Potencial de expansión y Compresibilidad
Humedad	Succión
Resistencia a la penetración estándar	Potencial de expansión
D ₆₀ Ip y % de partículas <200	Relacionadas con la curva característica.

2.4 Suelos Colapsables.

La predicción en la práctica de la ingeniera el comportamiento de una estructura de suelo colapsable requiere modelar el comportamiento de un suelo desde un punto de vista macroscópico. Este enfoque permite el uso de la teoría de la mecánica de suelos no saturados para la predicción del comportamiento del fenómeno de colapso (Barrera et al., 2004).

Alonso (1993), establece que la microestructura está ampliamente reconocida como una información importante para explicar el comportamiento de colapsos de suelos a pesar del hecho de que falta una descripción cuantitativa. Actualmente revisando el comportamiento de suelos colapsables compactados, la Ingeniería geotécnica reconoce que:

Cualquier tipo de suelo compactado en condiciones óptimas de compactación y con densidades bajas, es susceptible de generar una estructura colapsable o metaestable (Barden et al, 1969 y 1973).

La estructura de un suelo compactado, esta soportada por microfuerzas que dependen grandemente de la acción capilar, aumentando la resistencia al cortante. Dicha resistencia decrece cuando el contenido de agua aumenta hasta llegar a un grado de saturación crítico donde la estructura del suelo se colapsa (Jennings & Knight, 1957; Barden et al, 1969 y 1973).

Existe un incremento gradual en la compresibilidad, así como una disminución gradual en la resistencia al corte de un suelo colapsable durante el proceso de saturación (Jennings & Knight, 1957; Barden et al, 1969 y 1973).

2.4.1 Definición y Características de los suelos colapsables.

Se denomina suelos colapsables aquellos que tienen la propiedad de que al aumentar su porcentaje de humedad, sufren una pérdida importante de la resistencia al corte, en forma más o menos súbita, acompañada de deformaciones cuya magnitud dependerá de las cargas que este soportando el suelo, y de sus propias características, como son relación de vacíos, distribución granulométrica, composición mineralógica, historia de esfuerzos, etc.

El origen de este tipo de suelos es muy variado desde el punto de vista geológico. Se encuentran suelos colapsables en depósitos eólicos, de loess, en depósitos aluviales, coluviales, corrientes de lodos, en depósitos de suelos residuales e inclusive en rellenos artificiales.

En la mayoría de los casos las partículas que los constituyen son redondeadas y del tamaño del limo, pero pueden presentarse casos en los cuales existen arcillas y hasta boleos.

Para que un suelo sea colapsable se requiere, entre otras, dos condiciones que son necesarias: una estructura abierta de tipo panaloide y un contenido de agua menor que el de saturación. Que tan abierta debe ser la estructura y que tan parcialmente saturado ha de estar el suelo, son factores que varían de un depósito a otro según su origen y de acuerdo a los procesos geológicos a que haya estado sometido.

Todos estos suelos presentan estructuras de panal formadas por las partículas más gruesas, con altos valores de la relación de vacíos en estado natural y granos unidos mediante fuerzas proporcionadas por tensión capilar, adherencia de la arcilla o sales, depositadas al evaporarse el agua capilar o cohesión remanente por intemperismo en el caso de suelos residuales. (Correa, 1976).

La presencia de la arcilla en los suelos colapsables puede tener dos orígenes: por autogénesis o por depositación. Por autogénesis, cuando por ejemplo en suelos residuales, la alteración de feldspatos en presencia de agua produce partículas de arcilla que establecen contactos iónicos agrupándose estas paralelamente y llegando a establecer fuertes ligas cuando se secan los depósitos. Estos mismos depósitos pueden sufrir efectos de lavado al infiltrarse el agua y propiciar arreglos de las partículas arcillosas en forma de castillos de naipes (entre los granos de mayor tamaño), lo que junto con los efectos capilares establece las ligas. La estructura abierta es posible a causa de que, entre las partículas de suelo existen fuerzas capaces de mantenerlas en equilibrio formando estructuras del tipo de panal. Estas fuerzas ante la presencia de agua desaparecen o disminuyen provocando el colapso de la estructura. (Springall, 1974).

La deformación de colapso del suelo se incrementa conforme se incrementa su grado de saturación. Existe, sin embargo, un grado crítico de saturación para un suelo dado por encima del cual el colapso ocurre sin importar la magnitud de las

cargas externas a la que se ve sometido el suelo (Jennings & Knight, 1957; Barden et al, 1969 y 1973).

El colapso del suelo está asociado con las fallas de corte localizadas más bien con una falla general de corte en la masa del suelo (Maswoswe, 1985).

Mackechnie en 1989 y según sus experiencias propuso definir los suelos potencialmente colapsables como aquellos agregados de materiales granulares con estructura abierta, parcialmente saturados, alta relación de vacíos, baja densidad, alta porosidad y sensibilidad, baja liga interpartícula y desde el punto de vista geológico, del periodo Cuaternario.

Durante el colapso debido a un humedecimiento bajo carga vertical constante y bajo condiciones edométricas se generaran esfuerzos principales. Sin embargo, las componentes individuales de la deformación volumétrica (i.e. axial y radial) dependen de la relación de esfuerzos principales. Para un esfuerzo medio neto dado, la magnitud del colapso radial disminuye con un incremento en la relación de esfuerzos (Lawton et al, 1991).

La última observación proporciona información importante para la modelación del comportamiento de un suelo colapsable, relacionando el total de la deformación de colapso inducido por un humedecimiento con el esfuerzo medio neto total. Esto ilustra que un suelo colapsable puede también generar deformaciones de expansión en la dirección del esfuerzo menor total durante la saturación dependiendo de la relación de esfuerzo aplicada. El colapso de un suelo isótropo inducido por humedecimiento puede ocurrir bajo un estado de esfuerzos totales isótropos, en el caso de un estado de esfuerzo triaxial anisótropo, se generara deformaciones de colapso anisótropo (Barrera et al, 2000).

Las fuerzas de liga entre partículas pueden deberse a varios factores. Uno de ellos es la tensión capilar que provocan los meniscos formados al evaporarse el agua, después de llegar el suelo a su límite de contracción, los cuales se desarrollan en los huecos dejados por partículas, ya sea de arena o limo, figura 2 y figura 3. (Springall, 1974).

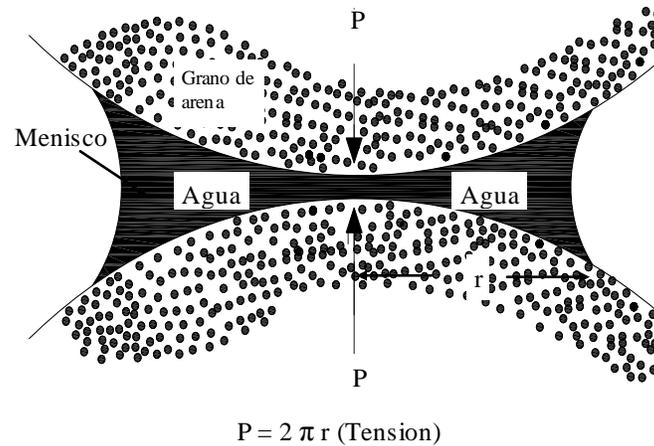


Figura 2 Formación de meniscos entre partículas

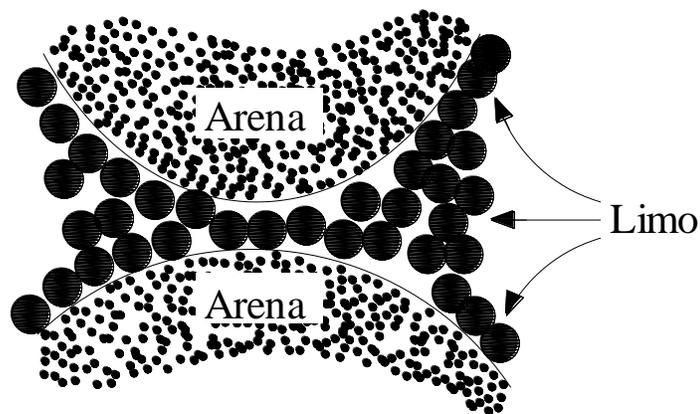


Figura 3 Estructura abierta formada por partículas de diferentes tamaños

2.4.2 Fenómeno del Colapso.

Como se ha mencionado en párrafos anteriores, el colapso es uno de los fenómenos más característicos de los suelos parcialmente saturados y ha sido estudiado por numerosos autores, entre los que se pueden citar Dudley (1970), Jiménez Salas et al., (1973), Maswoswe (1985), entre otros, que exponen las características que debe tener un suelo para que en él ocurra un colapso:

Estructura abierta, no saturada, tipo panal de abeja, capaz de reducir significativamente su volumen a expensas de una disminución del volumen de poros.

Un estado exterior de carga suficientemente grande como para generar una condición metaestable para la succión aplicada. El concepto de “metaestable” consiste en considerar a un suelo estable con respecto a pequeños disturbios, pero capaz de reaccionar violentamente si la molestia es considerable

La existencia de enlaces entre partículas, que se debiliten en presencia del agua.

Una estructura muy abierta soportando una carga exterior grande sin deformación y en estado no saturado indica la alta probabilidad de que su estabilidad sea debida a enlaces, que pueden ser temporales, del tipo señalado en el apartado anterior. Un aumento del grado de saturación puede conllevar la pérdida de estos enlaces y de la rigidez por ellos provocadas, produciéndose el colapso.

El comportamiento Colapsable se ha observado en diferentes partes del mundo, especialmente en las regiones tropicales, donde están presentes una gran variedad de suelos, en cuanto a composición química textura y génesis; pero se caracteriza principalmente por la presencia de estructura inestable porosa, y contenido de humedad inferior a la necesaria para su saturación completa (Houston et al., 2001).

2.5 Suelos Expanso-Colapsables.

Según Jiménez Salas y Justo (1975) algunos materiales arcillosos de baja y mediana plasticidad presentan un comportamiento combinado de hinchamiento y colapso cuando se los satura. El cambio neto de volumen que experimenta un suelo arcilloso cuando se pone en contacto con el agua es la suma de dos términos, por un lado el hinchamiento que se produce al relajar las tensiones netas entre

partículas y por otro el colapso que ocurre al fallar las uniones entre grandes partículas. La deformación que se atribuye al hinchamiento puede ser elástica no así la que corresponde al colapso. Esta última implica un reordenamiento de la estructura y es irreversible. (Barrera, 2002).

Sin embargo el colapso puede producirse por una combinación diferente de dichos factores. Por ejemplo estructuras no muy abiertas y cargas muy grandes o estructuras muy abiertas y cargas débiles, pueden provocarlo en determinados casos dependiendo de las características del suelo (porosidad en estado saturado, etc.) (Northey (1969), citado por Josa, 1988).

Los suelos colapsables suelen presentar gran variedad de formas y tamaños de partículas, con arenas, cantidades importantes de limo y, frecuentemente, un cierto monto de arcilla.

Cuando los granos de partículas más gruesas están rodeados por partículas de arcilla, el origen y la historia de esfuerzos de la fracción arcillosa son importantes. La arcilla puede ser residual o transportada. La residual deriva frecuentemente de reacciones entre feldespatos y agua. Cuando estas arcillas residuales están desecadas, el suelo en conjunto puede tener una resistencia muy alta, que puede abatirse rápida y considerablemente cuando el nexo arcilloso absorbe agua y los cristales de arcilla se hidratan y separan.

Entre los suelos no saturados problemáticos, además de las arcillas expansivas, también se tienen los colapsables, ambos fenómenos comparte la característica de tener presión de agua de poro negativa, los cambios volumétricos más significativos en estos suelos, suelen ser causados por el cambio del contenido de agua, en muchos aspectos se pueden observar que los suelos colapsables se comportan de una manera opuesta a los suelos expansivos; en el caso de un suelo colapsable, el humedecimiento da como resultado un decremento del volumen, en la arcilla expansiva al ocurrir la hidratación aumenta el volumen del suelo (Zepeda-Garrido et al., 2002).

Algunas arcillas expansivas son al mismo tiempo suelos colapsables, es decir; para un estado de carga aplicada con pequeños aumentos de humedad se incrementa su volumen, pero con humedades mayores colapsa. Esto suele ocurrir sobre todo en arcillas con estructuras floculadas y flojas en las que muchas veces, aún después de haberse expandido; continúan apareciendo huecos causados por el proceso de agrietamiento (Vallejos, 2000).

CAPITULO 3 METODOLOGÍA EXPERIMENTAL.

La figura 4 muestra en esquema la metodología que se utilizó para llevar a cabo la investigación.

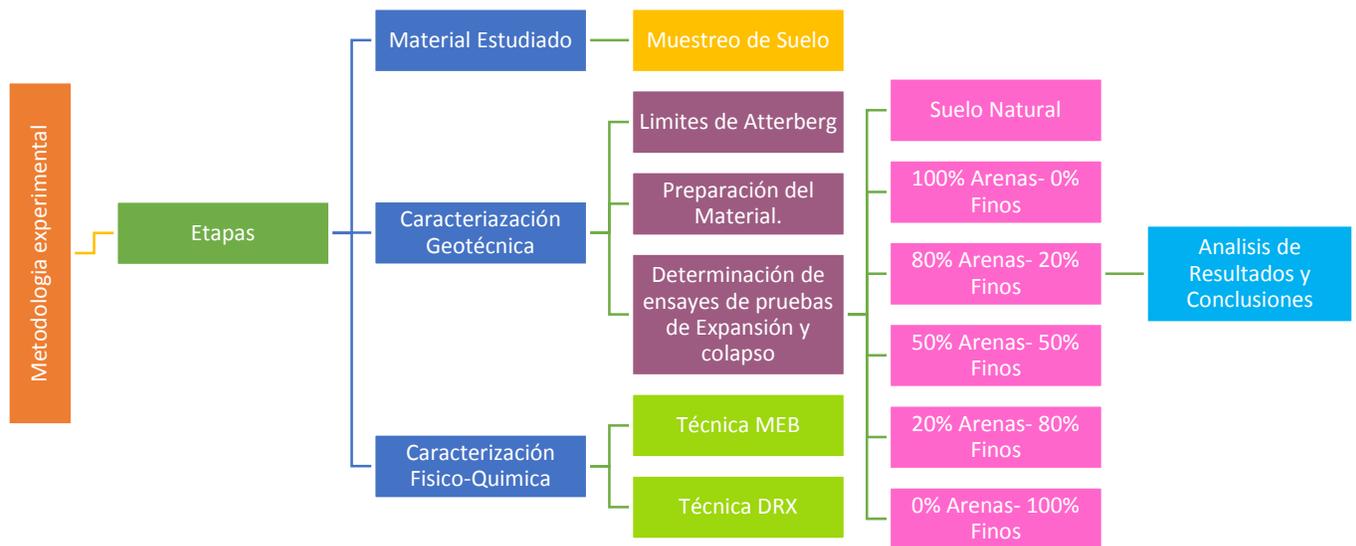


Figura 4 Esquema utilizado para desarrollar Metodología.

3.1 Material Estudiado.

3.1.1 Muestreo del Suelo.

Se llevaron a cabo diferentes muestreos de Suelos ya que se necesitaba un suelo en particular, que tuviera ambos fenómenos (Expansión y Colapso), los muestreos se realizaron con la ayuda de un pozo a cielo abierto en cada sitio en los

cuales se obtuvieron muestras del tipo Alterado e Inalterado, estos fueron en diferentes lugares, se llevaron las muestras al laboratorio donde se les hicieron diversas pruebas que más adelante se describirán; El suelo que cumplió con el objetivo fue ubicado en el Anillo vial Fray Junípero Serra en la ciudad de Querétaro, México. Donde se extrajo el material expansivo-colapsable, se despalmo y se excavó hasta que la presencia de la capa vegetal en el suelo fuera menos importante, aproximadamente 1.40 m. Así mismo el material extraído fue llevado al laboratorio para determinar sus propiedades índice, composición granulométrica y deformaciones en los ensayos de saturación bajo esfuerzo. En la Figura 5 se muestra un mapa de México y se puede observar donde está situada la ciudad de Querétaro

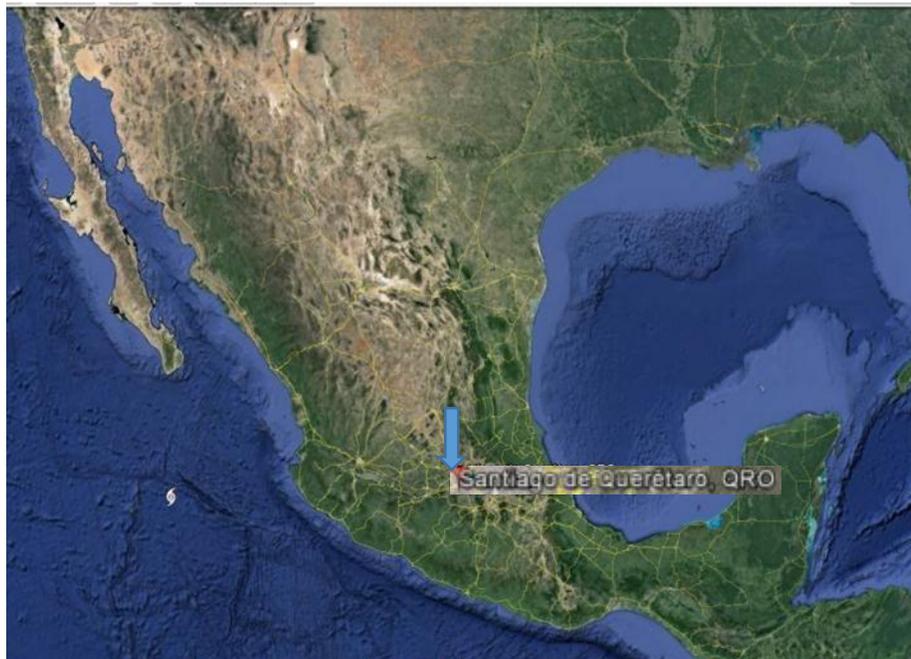


Figura 5 Mapa de la República Mexicana y la ubicación de Santiago de Querétaro, Qro.

En la figura 6 se muestra el Mapa de Santiago de Querétaro, Qro y Ubicación de Anillo Vial Fray Junipero Serra, en la figura 7 se observa la ubicación del lugar de muestreo.

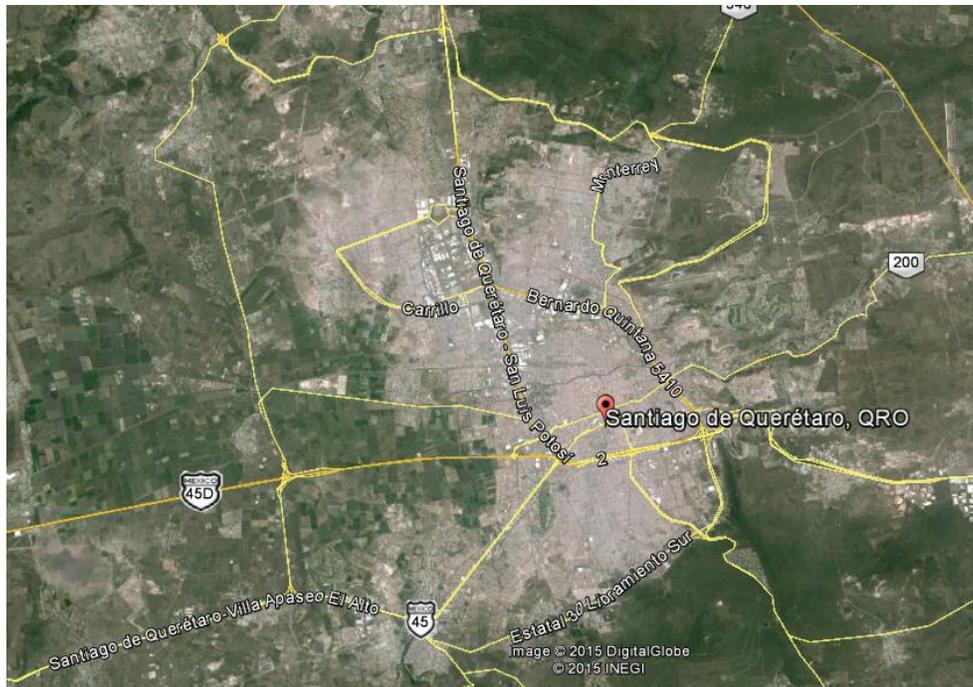


Figura 6 Mapa de Santiago de Querétaro, Qro y Ubicación de Anillo Vial Fray Junipero Serra.



Figura 7 Ubicación del lugar de muestreo.

3.2 Caracterización Geotécnica.

La Caracterización Geotécnica determina la composición y propiedades (químicas, físicas, mecánicas) de un suelo en particular.

3.2.1 Límites de Atterberg (Consistencia).

La plasticidad se puede medir y expresar mediante la determinación de los Límites de Atterberg. Para ello se utilizó los procedimientos de laboratorio de Mecánica de Suelos: ASTM D427 para Límite de Contracción, para el Límite Plástico, para el Límite Líquido se utilizó la norma ASTM D4318-10 y para la densidad de sólidos de acuerdo a la norma ASTM D854-03, en la figura 8 se puede apreciar. Se realizó la clasificación de suelos de acuerdo al sistema unificado de clasificación de suelos.



Figura 8 Límites de Contracción.

3.2.2 Preparación del Material.

Del muestreo de Suelos, se obtuvo un material natural expansivo-colapsable, al cual en la muestra inalterada se labraron 2 pastillas de suelo para hacerle pruebas de Expansión y de Colapso, en la figura 9 se muestra la preparación del material.



Figura 9 Preparación del material para Pruebas (Expansión y Colapso) en muestra Inalterada.

Posteriormente ya en el suelo alterado se diseñaron las mezclas de acuerdo a su granulometría original, éstas consistieron en separar el suelo natural retenido por los tamices No. 10, 20, 40, 60, 100 y 200 estos retenidos forman parte de la Arena del suelo, el material que paso por el tamiz No. 200 se le conoce como el material fino.

Una vez hecho lo anterior, se elaboraron 5 mezclas para pruebas de Expansión y 5 mezclas para pruebas de Colapso, tal y como se puede ver en la figura 10, variando el porcentaje en peso de material arenoso colapsable y material fino expansivo.



Figura 10 Separación del material para Pruebas (Expansión y Colapso) en muestra Alterada.

En la tabla 10 se puede ver el diseño de mezclas.

Tabla 10 Diseño de mezclas.

% Arena	% Fino
100	0
80	20
50	50
20	80
0	100

El material diseñado fue etiquetado y almacenado en bolsas de plástico en la cámara de temperatura constante, para que no hubiese cambios de humedad.

3.2.3 Procedimiento de Prueba.

La elaboración de las pastillas se hizo compactando de forma estática el suelo en el anillo por medio de una placa de acero, tratando de que las caras superior e inferior de la pastilla queden uniformes. Por lo que una vez se fueron ensayando después de su elaboración, en la siguiente figura se muestra la forma de Compactación Estática para las pruebas de Expansión y Colapso en las muestras alteradas.



Figura 11 Compactación Estática para pruebas de (Expansión y Colapso) en muestra Alterada.

3.2.4 Pruebas de Expansión y Colapso.

Existen varios métodos para determinar el porcentaje de expansión y la presión de expansión de un suelo. Según el ISSMFE en 1993 propone que esta práctica corresponde a la evaluación de presión de expansión y el correspondiente hinchamiento de un suelo expansivo en laboratorio mediante la construcción de un gráfico constituido por el esfuerzo total aplicado al suelo y el porcentaje de expansión.

El porcentaje de expansión se define como el incremento de altura que experimenta una pastilla de suelo expresado en porcentaje cuando se sujeta a saturación bajo una carga inicial (Zeevaert, 1983).

El término de presión de expansión se define como el esfuerzo total que se aplica a un suelo sin que este sufra cambios volumétricos cuando es sometido a un proceso de saturación (ASTM D 4546-96, 1996).

Ya que el espécimen este labrado y se ha pesado el anillo más la muestra, se deberán cortar dos papeles filtro del diámetro de la muestra labrada y contenida en el anillo. Se colocan nuevamente las extensiones y se colocan dos papeles filtro, uno en la cara superior y otro en la cara inferior. Posteriormente se deberán colocar dos piedras porosas, una en la cara superior de la muestra labrada y otra en la cara inferior y deberá envolverse todo en su conjunto con una película plástica autoadherible para evitar pérdidas de humedad.

Montar el dispositivo en el consolidómetro nivelando el brazo y colocando en ceros el micrómetro de deformación.

Se deberá colocar la carga o presión de sitio de la muestra que se piensa ensayar. Para conocer dicho dato se deberá realizar el producto del peso específico de la masa (γ_m) por la profundidad a la que se obtuvo la muestra, posteriormente se obtiene el producto de la presión de sitio por el área del anillo y finalmente este último resultado se divide entre el brazo de palanca del consolidómetro. Este dato final es la carga que se deberá aplicar.

Se deja actuar la carga de sitio por un periodo de 24 horas. Después de terminado este tiempo se debe manejar una lectura mayor a cero en el micrómetro de deformación, esto debido a que consideramos que puede haber movimientos de expansión o contracción en la muestra de suelo.

Una vez transcurrido el proceso de precarga se inunda la muestra registrando las lecturas de la expansión libre a determinados valores de tiempo previamente establecidos. Después se aplica una presión vertical a diferentes cargas manteniendo constante cada incremento de presión hasta que la deformación de la muestra cese se usó el procedimiento de la Norma ASTM D 4546-03.

En la prueba para determinar el potencial de colapso se usó el siguiente procedimiento, ya que se tiene el espécimen labrado se le aplica un esfuerzo de reacomodo de 0.05 kg/cm² (5 kPa) y se deja actuar por 5 minutos. Después de transcurrido este tiempo se deberá ajustar el micrómetro a una lectura mayor a cero, para posteriormente aplicar incrementos de carga cada hora bajo humedad natural para obtener un esfuerzo acumulado de 0.12, 0.25, 0.50, 1.00 y 2.00 kg/cm² (12, 25, 50, 100 y 200kPa). Se deberá registrar al final de cada carga (cada hora) la deformación en el micrómetro. Para el último incremento se debe dejar actuar la sobrecarga por 1 hora. Finalmente se satura la pastilla de suelo y se registra deformación contra tiempo. Los tiempos en que se debe registrar la deformación bajo saturación serán a 0.10, 0.25, 0.50, 1, 2, 4, 8, 15, 30 minutos, 1, 2, 4, 8 y 24 horas se usó el procedimiento de la Norma ASTM D 5333-03.

Estas pruebas se llevaron a cabo en las muestras de suelo inalteradas y también se usaron los mismos procedimientos pero ahora en muestras remoldeadas en las distintas mezclas de suelos que ya se mencionaron con anterioridad (100% Arenas-0% Finos, 80% Arenas-20% Finos, 50% Arenas-50% Finos, 20% Arenas-80% Finos y 0% Arenas-100% Finos), en el capítulo siguiente se mostraran los resultados de estas pruebas, en la figura 12 se muestra las pruebas de suelo montadas en el consolidometro.



Figura12 Pruebas de Expansión y Colapso en Suelo Expanso-colapsable.

3.3 Caracterización Físicoquímica de Suelos.

3.3.1 Preparación de Muestras para Microscopia Electrónica de Barrido (MEB).

Se cortó una plantilla adhesiva de carbón en donde la muestra fue colocada, se montó la muestra tamizada previamente por la malla No. 200 (0.075 mm), en la cinta de carbón y esta a su vez en el porta muestra esparciéndola, teniendo el cuidado necesario, así mismo el porta muestra es colocado en una base dentro del microscopio para su análisis, el microscopio electrónico de barrido en el que se observó fue el Microscopio de la marca HITACHI TM1000 operado a 15 KV. Las micrografías se obtuvieron con un detector de electrones retrodispersados, en la figura 13 se puede ver la preparación de la muestra para la Técnica MEB. La composición elemental se obtuvo con un microanalizador de EDS Oxford acoplado al microscopio, el tiempo de conteo fue de 60 s por espectro.

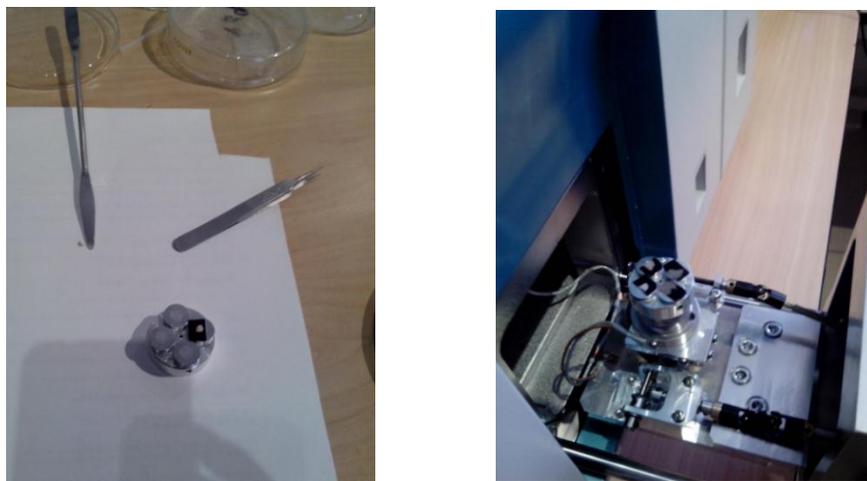


Figura 13 Preparación de la muestra para Técnica MEB.

3.3.2 Preparación de Muestras para Difracción de Rayos X (DRX).

La aplicación fundamental de la difracción de Rayos X es la identificación cualitativa de la composición de las fases cristalinas de una muestra. La difracción está basada en las interferencias ópticas que se producen cuando una radiación monocromática atraviesa una rendija de anchura comparable a la longitud de onda de la radiación.

Resulta de utilidad en análisis de fases en cementos, suelos, aceros, y en general en compuestos orgánicos e inorgánicos.

La muestra que se utilizó fue secada al horno durante 24 horas y posteriormente tamizada por la malla No. 200 (0.075 mm) para su análisis en el Difractómetro de Rayos X, ya en forma de polvo se analizó en el equipo Miniflex de Rigaku con radiación de cobre $K\alpha$ 1.5406 Å en un intervalo de 2 a 80 grados 2θ a un paso de 0.02 grados con un tiempo de conteo de 0.12 s por punto, en la figura 14 se muestra.



Figura 14 Preparación de la muestra para Técnica DRX.

De aquí se obtiene un difractograma que será el que nos determinará el contenido de cada elemento mineralógico que se encuentre dentro del Suelo.

Un difractograma es el resultado de un análisis por medio de un difractómetro y el cual grafica en el eje de las abscisas el ángulo 2θ de incidencia entre la salida del haz del rayo Röntgen y el receptor de dicho rayo y en las ordenadas el valor de la intensidad (Ramírez, 1996).

En el primer Difractograma realizado no se alcanzó a ver con claridad la Arcilla, entonces se procedió a darle pre-tratamiento para eliminar la materia orgánica.

En un vaso se pesan 60 gr de muestra de suelo (se humedece el suelo, sin llegar a la saturación, para que al momento de poner el peróxido no ocurra una reacción que altere al suelo), a continuación se le agrega 10 ml de Peróxido de Hidrogeno con una concentración del 30 %, como siguió efervesciendo se le agrego después de 20 minutos otros 10 ml de peróxido, ver figura 15.



Figura 15 Muestra de Suelo para Pre-tratamiento.

Después de esto se pone a baño María a una temperatura entre 60 y 70 °C, tal y como se muestra en la siguiente figura, se sigue agregando agua para lavar, se le deja de agregar agua hasta que deja de efervescer; ya que efervesce cuando hay presencia de materia orgánica.



Figura 16 Muestra puesta a baño María.

Cuando tenemos ya el material seco y limpio de materia orgánica, en un vaso de aluminio se ponen 50 gr de muestra y se le agregan 20 ml de Calgón y Agua destilada, se dejan agitando por 15 minutos en el Agitador electrónico, ver figura 17.



Figura 17 Muestra en el Agitador electrónico.

Después en un vaso de precipitado de 1000ml ya aforado se agrega el material y este se agita por 1 minuto, inmediatamente se vuelve a aforar, tal y como se puede apreciar en la siguiente figura.



Figura 18 Vaso de precipitado con material libre de materia orgánica.

Se decanta con una manguera delgada y se retiran 10 cm aproximadamente de líquido de la probeta, por 4 días se lleva este proceso, ya que se sedimentan las partículas más finas como son las arcillas finas y los limos, se lavan con agua destilada y se centrifuga a 3500 RpM durante 10 minutos, esa misma muestra se volvió a lavar y a centrifugar (se siguió el mismo procedimiento) con el Cloruro de Magnesio (para homogeneizar) en vez de Agua destilada, se llevó a cabo este proceso para retirar el Calgón y que el suelo esté libre de impurezas, ver figura siguiente.



Figura 19 Proceso de Decantación.

Una vez que se homogeneizo 2 o 3 veces se vuelve a lavar con alcohol al 50% con el fin de retirar el exceso de ion Magnesio, se deja en la solución del alcohol, a una temperatura ambiente constante, esa solución se va depositando en el porta muestras (ya que la muestra se seca) se lleva al difractorómetro y se hace el análisis, es decir, se corre la muestra.

Cabe mencionar que se homogeniza para que se pueda ver mejor la estructura del suelo, el ion penetra las capas de las Arcillas y se pueden identificar mejor, esto con el objetivo de obtener un difractograma más claro, hay que cuidar que se trabaje en un ambiente limpio (libre de polvo) y que la temperatura sea constante, ya que de lo contrario puede perjudicar la muestra.

La técnica que se acaba de describir corresponde al Método de Bouyoucos en la cual Consiste en la determinación de los porcentajes de arena, limo y arcilla presentes en la fracción mineral del suelo. El ensayo analítico para obtener la clasificación textural de los suelos, se realiza por el método del hidrómetro de suelo o de Bouyoucos, aplicado en la mayoría de los laboratorios de suelo del país como rutinario (Gilabert et al., 2004).

Se analizó la muestra ya libre de materia orgánica en el equipo Miniflex de Rigaku con radiación de cobre $K\alpha$ 1.5406 Å en un intervalo de 2 a 80 grados 2θ a un paso de 0.02 grados con un tiempo de conteo de 0.12 s por punto, y obtuvimos nuestro nuevo difractograma.

CAPITULO 4 RESULTADOS.

Este Capítulo contiene los resultados experimentales de las técnicas usadas y ya descritas en el capítulo anterior.

4.1 Origen del suelo utilizado.

La caracterización de unidades geológicas en superficie y en el subsuelo se basa en una recopilación de información cartográfica, litológica y estudios previos con el fin de obtener una columna estratigráfica compuesta, coherente con la historia geológica del área. Esta información procede de tres fuentes principales: (1) mapas y estudios geológicos y geofísicos regionales, (2) estudios geotécnicos, y (3) registros litológicos de pozos de aprovechamiento de agua (Carreón et al., 2005).

La historia Geológica del área según cartas del Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI) indica que se trata de una roca Ígnea Extrusiva del tipo Toba Acida de la era Geológica Cenozoica y Edafológicamente se trata de un Suelo Vertisol de Textura Fina, Suelo Secundario Phaeozem, Suelo Terciario Luvisol.

Geología

Con base en la cartografía de INEGI, en el sistema ambiental delimitado se presentan siete tipos de formaciones geológicas dentro de la cual la mayor parte de esta delimitación se encuentra cubierta por rocas ígneas extrusivas ácidas y básicas que datan del periodo terciario y cuaternario. Las rocas ígneas se caracterizan por ser rocas de origen magmático las cuales se dividen en intrusivas y extrusivas, de estas últimas su origen se produce cuando el enfriamiento del magma es rápido sobre la superficie de la cual fue expulsado. Dentro de este grupo existe una clasificación de acuerdo a su composición química rocas ígneas extrusivas ácidas,

básicas e intermedias.

Para el sistema ambiental delimitado se encuentran los tres tipos de rocas ígneas extrusivas, las **Rocas ácidas**: contienen más de 66% óxido de silicio (SiO_2), presencia de cuarzo y minerales estables en presencia de cuarzo. **Rocas intermedias**; 66 – 52 porcentaje óxido de silicio baja presencia de cuarzo pero si minerales compatibles con su presencia. **Rocas básicas**: entre 52 – 45% de óxido de silicio. Igual dentro de la superficie del sistema ambiental se encuentran rocas de tipo areniscas originadas en el periodo terciario superior, estas rocas detríticas que se originan por la cementación de arenas. Las arenas son fragmentos de minerales o rocas con diámetros comprendidos entre 2 y 1/16 milímetros.

Edafología

Para el sistema ambiental se localizan 16 tipos de suelo diferentes en cuanto a las asociaciones; sin embargo son 6 suelos los principales acrisol, leptosol, luvisol, phaeozem, planosol y vertisol.

Descripción de las unidades edáficas involucradas dentro del sistema ambiental:

Luvisol. Suelo con acumulación de arcilla, son frecuentemente rojos o amarillentos, aunque también presentan tonos pardos, que no llegan a ser oscuros. Principalmente tierras llanas o suavemente inclinadas en regiones templadas frescas y cálidas con estación seca y húmeda marcadas. Estos suelos presentan alta susceptibilidad a la erosión.

Phaeozem. Estos suelos pueden presentarse en cualquier tipo de relieve y clima, excepto en regiones tropicales lluviosas o zonas muy desérticas. Es el cuarto tipo de suelo más abundante en el país y se caracteriza por tener una capa superficial oscura, suave, rica en materia orgánica y en nutrientes, semejante a las capas superficiales de los chernozems y los castañozems, pero sin presentar las capas ricas en cal con las que cuentan estos dos tipos de suelos, los phaeozem son de profundidad variable, cuando son profundos se encuentran generalmente en

terrenos planos y los phaeozem menos profundos, están situados en laderas o pendientes, la susceptibilidad de este suelo a la erosión depende de la pendiente del terreno.

Vertisol. Son suelos muy arcillosos (>30%), que se mezclan con alta porción de arcillas expandibles. Suelos de climas templados y cálidos, especialmente de zonas con marcada estación seca y otra lluviosa. La vegetación natural va de selvas bajas a pastizales y matorrales. Se caracteriza por su estructura masiva y su alto contenido de arcilla, la cual es expandible en húmedo formando superficies de deslizamiento llamadas facetas, y que por ser colapsables en seco pueden formar grietas en la superficie. Tiene baja susceptibilidad a la erosión (Estrella Ugalde., 2010).

4.1 Caracterización y clasificación del suelo utilizado.

La textura de un suelo es determinada por la cantidad de arenas, limos y arcillas; uno de los métodos más utilizados para determinar la textura del suelo es el de Bouyoucos. Los tamaños de partícula más finos se dividen en arena (0,05 a 2,0 mm), limo (0,002 a 0,05 mm) y arcilla (menos de 0.002 mm). La textura del suelo se determina por las cantidades relativas de estos materiales, y sólo estos materiales, la grava (más grande que 2,0 mm) no está incluida, ya que los fragmentos de roca son trozos de más de 2 mm de diámetro y estos son descritos por su forma, tamaño y el material del que se formaron (Comisión de Texas sobre Calidad Ambiental., 2005).

El método del hidrómetro de Bouyoucos es una de las formas más rápidas para analizar el tamaño de las partículas del suelo. La muestra de suelo disperso es mezclada en una probeta con agua y una vez que se asienta, la densidad de la suspensión se puede medir (Conú-Jimenez., 2014). El método se basa en el hecho de que la velocidad de caída de las partículas contenida en una solución mayor cuanto mayor sea su densidad, las arenas serán las primeras en sedimentar,

siguiendo los Limos y al final las Arcillas, los porcentajes obtenidos en nuestro análisis fueron de 49% de arenas, 38.74% de limo y 12.26% de arcilla.

A continuación se muestran las propiedades índice del material empleado, límites de Atterberg (límite líquido LL, límite plástico LP), límite de Contracción LC, Contracción lineal CL, Índice Plástico IP, densidad de sólidos (Ss), composición granulométrica (arenas A, finos F), así como su clasificación de acuerdo al sistema unificado de clasificación de suelos (SUCS). La Tabla 11 muestra dichas propiedades para el material en estado natural.

Tabla 11 *Propiedades índice del material expansivo-colapsable*

Propiedad	Valor
Límite Líquido (LL)	46.35 %
Límite Plástico (LP)	37.84 %
Índice Plástico (IP)	9.00 %
Límite de Contracción (LC)	19.80 %
Contracción Lineal (CL)	4.36%
Peso Volumétrico húmedo (γ_m)	1.39 gr/cm ³
Densidad de Sólidos (Ss)	2.71
Humedad in situ	18.00 %
Arenas	35.00 %
Finos	42.00 %
Gravas	23.00 %
Grado de Saturación (Gw)	47.33 %

Las propiedades Índice (LL, LP, IP y LC) reportadas en la tabla 11 permiten tener una idea clara del tipo de suelo con el que se trabaja.

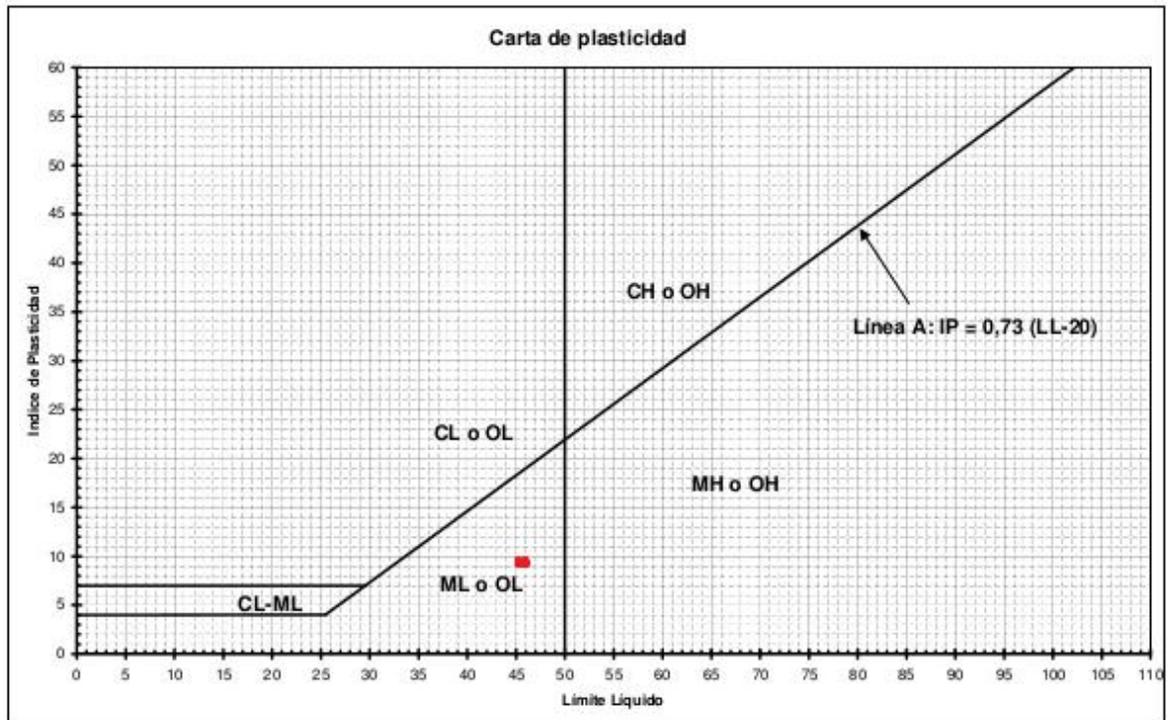


Figura 20 Carta de Plasticidad.

La figura 20 muestra de acuerdo con el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos, el suelo estudiado que se trata es de un limo de baja compresibilidad (ML), debido a que su LL es menor que 50% y tiene un IP del 9%.

4.2 Pruebas de Expansión y Colapso para suelo natural en muestras Inalteradas.

Al haber obtenido un material natural expansivo-colapsable del muestreo de Suelos; en una muestra inalterada se labraron 2 pastillas de suelo para hacerle pruebas de Expansión (ASTM D 4546-03) y de Colapso (ASTM D 5333-03), esto con la finalidad de corroborar que el suelo contenía los 2 fenómenos

4.2.1 Prueba de Expansión en muestra Inalterada.

Existen varios métodos para determinar el porcentaje de expansión y la presión de expansión de un suelo. El que se expone en esta práctica corresponde a la evaluación de presión de expansión y el correspondiente hinchamiento de un suelo expansivo en laboratorio mediante la construcción de un gráfico constituido por el esfuerzo total aplicado al suelo y el porcentaje de expansión (ISSMFE, 1993).

Mediante la deformación que experimenta un suelo sujeto a una carga dada y humedad natural se pueden obtener parámetros que permitan calcular los asentamientos que sufren los suelos no saturados (Zeevaert, 1983).

Como ya se mencionó, un alto porcentaje de la superficie del suelo está constituida por suelos finos no saturados en cuyos casos el tirante de agua superficial está a una profundidad que no permite que estos suelos se saturen por capilaridad (Zeevaert, 1983).

En la figura 21 se puede observar la expansión en curva de compresibilidad, donde se obtuvo una expansión de 3.89% y una presión de expansión de 0.93 kg/cm², lo que indica que es un suelo de expansividad baja.

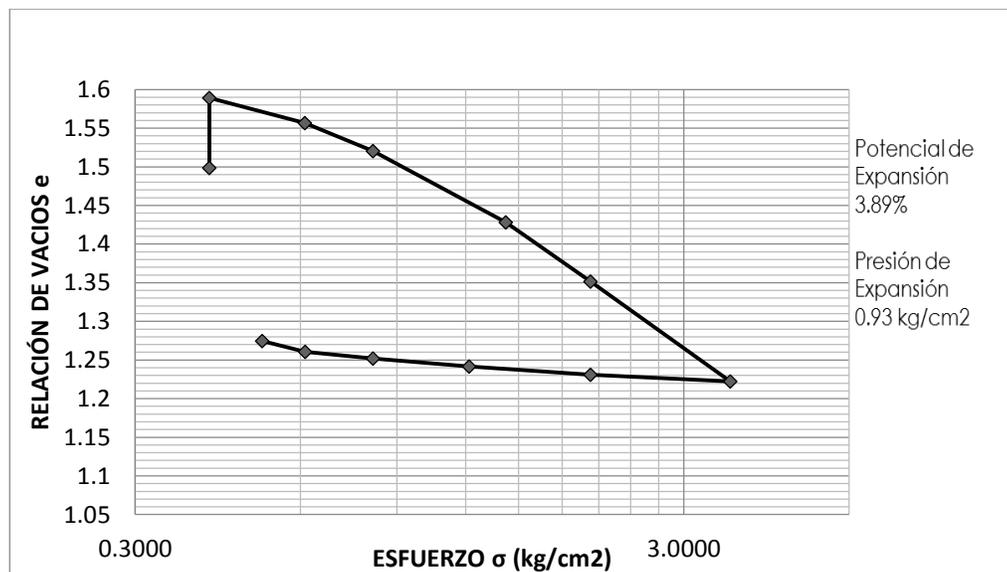


Figura 21 Curva de Compresibilidad para muestra inalterada.

4.2.2 Prueba de Colapso en muestra Inalterada.

Para determinar el potencial de colapso se usó el procedimiento ya descrito en la sección (3.2.4), que teniendo el espécimen labrado se le aplica un esfuerzo de reacomodo y se deja actuar por 5 minutos. Después de transcurrido este tiempo se ajusta el micrómetro a una lectura mayor a cero, para posteriormente aplicar incrementos de carga cada hora bajo humedad natural para obtener un esfuerzo acumulado. Se deberá registrar al final de cada carga (cada hora) la deformación en el micrómetro. Para el último incremento se debe dejar actuar la sobrecarga por 1 hora y finalmente se satura la pastilla de suelo, se registra deformación contra tiempo.

En la prueba de colapso de la muestra inalterada se observó que tiene un potencial de colapso de 14.17%, por lo que se pudo concluir que este suelo en estado natural cumple con las 2 fenomenologías (expansión y colapso), donde el valor del colapso predomina sobre el de expansión. En la figura 22 se puede observar el colapso para la muestra inalterada en el suelo natural.

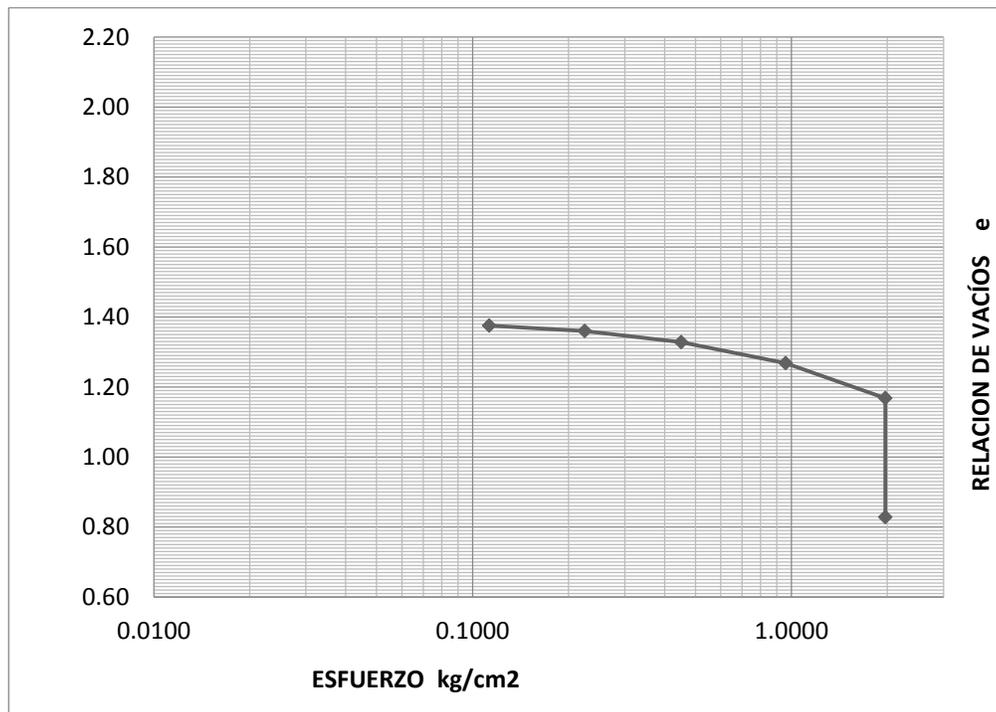


Figura 22 Gráfica de Colapso para muestra inalterada.

4.3 Pruebas de Expansión y Colapso en muestras Alteradas.

Para llevar a cabo estas pruebas se hicieron unas pastillas del suelo natural pero en forma Alterada, la elaboración de las pastillas se hizo compactando de forma estática el suelo en el anillo por medio de una placa de acero, las mezclas de suelos que se utilizaron fue (100% Arenas-0% Finos, 80% Arenas-20% Finos, 50% Arenas-50% Finos, 20% Arenas-80% Finos y 0% Arenas-100% Finos).

4.3.1 Pruebas de Expansión en muestra Alterada.

En los siguientes subcapítulos se muestran las Pruebas de Expansión en las distintas mezclas, se usó diferente escala en las gráficas ya que, usando una predeterminada se distorsionan las curvas de compresibilidad y no se aprecian con claridad.

4.3.1.1 Pruebas de Expansión en mezcla de 100% Arenas y 0% Finos.

Se realizó la prueba de Expansión en la mezcla de 100% Arenas - 0% Finos y tuvo una Expansión de 0.21%, esto se aprecia al inicio de la curva de la figura 23.

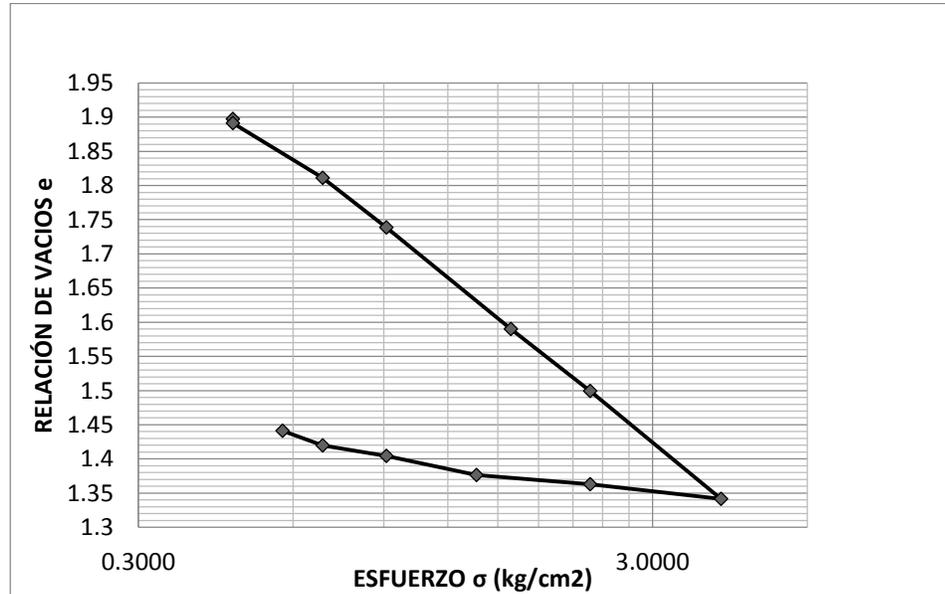


Figura 23 Curva de Compresibilidad para mezcla de 100%Arenas-0%Finos.

4.3.1.2 Pruebas de Expansión en mezcla de 80% Arenas y 20% Finos.

En la prueba de Expansión de la mezcla de 80% Arenas - 20% Finos, tuvo una Expansión de 0.24%; este fenómeno se aprecia poco, por el valor y la escala, al inicio de la curva de la figura 24.

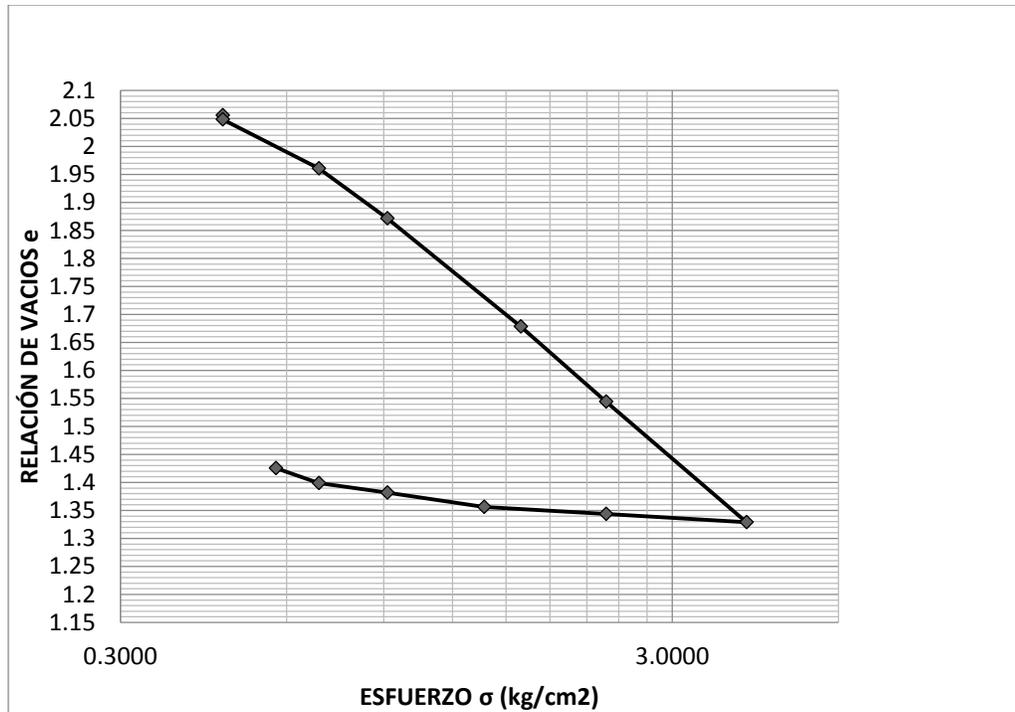


Figura 24 Curva de Compresibilidad para mezcla de 80%Arenas-20%Finos.

4.3.1.3 Pruebas de Expansión en mezcla de 50% Arenas y 50% Finos.

Se realizó la prueba de Expansión en la mezcla de 50% Arenas - 50% Finos y tuvo una Expansión de 1.1%, este fenómeno se aprecia al inicio de la curva de la figura 25.

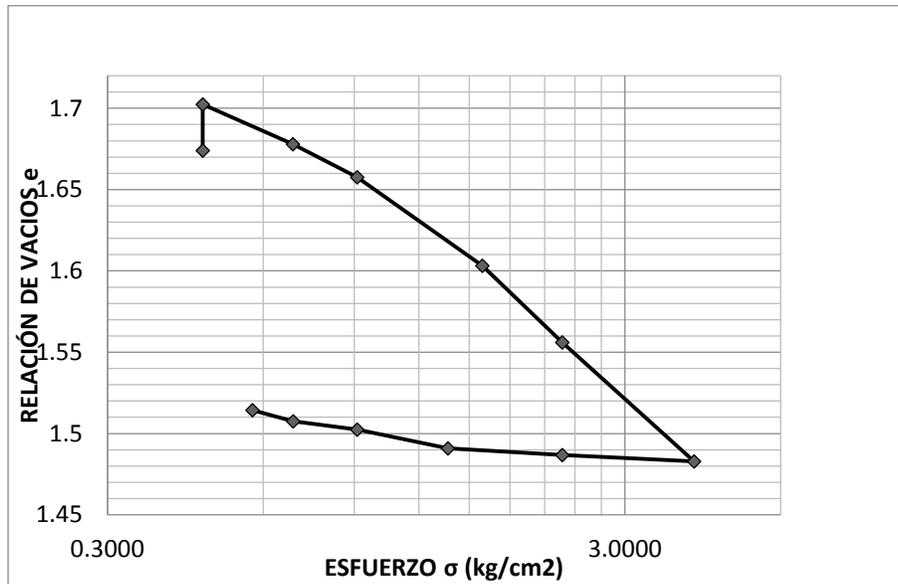


Figura 25 Curva de Compresibilidad para mezcla de 50%Arenas-50%Finos.

4.3.1.4 Pruebas de Expansión en mezcla de 20% Arenas y 80% Finos.

Se realizó la prueba de Expansión en la mezcla de 20% Arenas - 80% Finos y tuvo una Expansión de 0.85%, este fenómeno se aprecia al inicio de la curva de la figura 26.

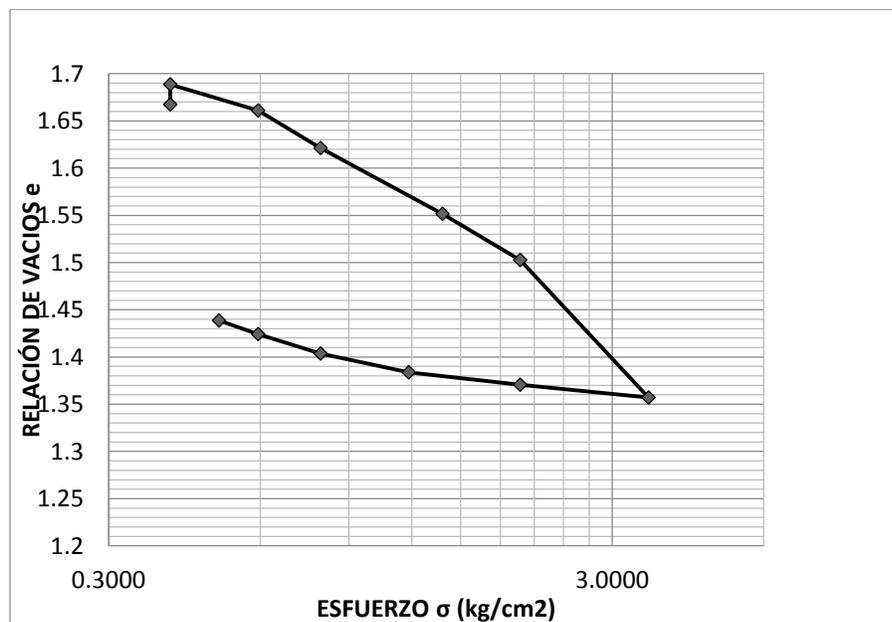


Figura 26 Curva de Compresibilidad para mezcla de 20%Arenas-80%Finos.

4.3.1.5 Pruebas de Expansión en mezcla de 0% Arenas y 100% Finos.

Se realizó la prueba de Expansión en la mezcla de 0% Arenas - 100% Finos y tuvo una Expansión de 0.73%, este fenómeno al inicio de la curva de la figura 27.

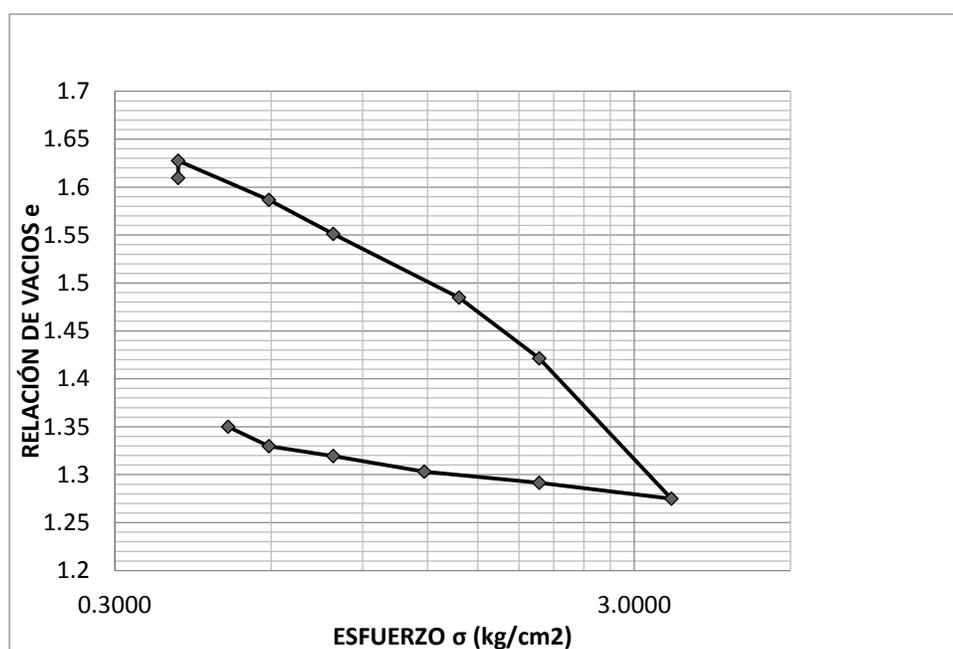


Figura 27 Curva de Compresibilidad para mezcla de 0%Arenas-100%Finos.

A continuación se muestra la Tabla 12 donde se puede apreciar el valor de Expansión (% Exp) del suelo para todas las combinaciones granulométricas realizadas.

Tabla 12 Expansión (%) para diferentes dosificaciones de arenas (A) y finos (F).

Dosificación	γ_m (ton/m ³)	% Gw	% Exp
100A-0F	1.11	32.97	0.210
80A-20F	1.15	34.65	0.240
50A-50F	1.28	41.00	1.085
20A-80F	1.31	42.73	0.850
0A-100F	1.36	45.49	0.730
Suelo Natural	1.39	47.33	3.890

Considerando que la granulometría del suelo natural fue de 35% de arenas, 42% de finos y 23% de gravas, se puede pensar que el valor de expansión presentado (3.9%) se debe probablemente a dos explicaciones: a) que el material fino que constituye al suelo sea casi en su totalidad limo y arenas y muy poca arcilla por lo que el comportamiento general de expansión sea la poca expansión reportada por la baja cantidad de arcilla presente y el reacomodo resultante del material de grano grueso al ser comprimido, lo que se traduce en estructuras de suelo con más huecos (En la arena compacta, los granos que originalmente estaban bien acomodados, han de moverse sobre sus vecinos y relativamente a ellos para que haya deformación; esto produce estructuras más sueltas que la original y el volumen de la arena crece), (Juárez Badillo y Rico Rodríguez.,1969) y b) que el material fino que constituye al suelo tenga mayormente arcilla, la que muy probablemente tenga baja expansividad debido a que el valor final de expansión debe ser la suma de la expansión por reacomodo de la arena más la expansión de la arcilla al contacto con el agua.

Luego, de la Tabla 12 se observa que el valor de expansión del suelo natural es mayor que los de las dosificaciones, esto se debe muy probablemente a que la parte fina del suelo natural este constituido principalmente por limo y a la estructura inalterada de este suelo que lo hace de estructura más abierta respecto a la remoldeada (más cerrada) que tienen todas las dosificaciones y que por ende, hace menores expansiones a la compresión.

4.3.2 Pruebas de Colapso en muestra Alterada.

En los siguientes subcapítulos se muestran las Pruebas de Colapso en las distintas mezclas, se usó misma escala en las diferentes gráficas ya que se puede apreciar con claridad.

4.3.2.1 Pruebas de Colapso en mezcla de 100% Arenas y 0% Finos.

Se realizó la prueba de Colapso en la mezcla de 100% Arenas - 0% Finos y tuvo un potencial de Colapso de 5.50%, en la figura 28 se muestra.

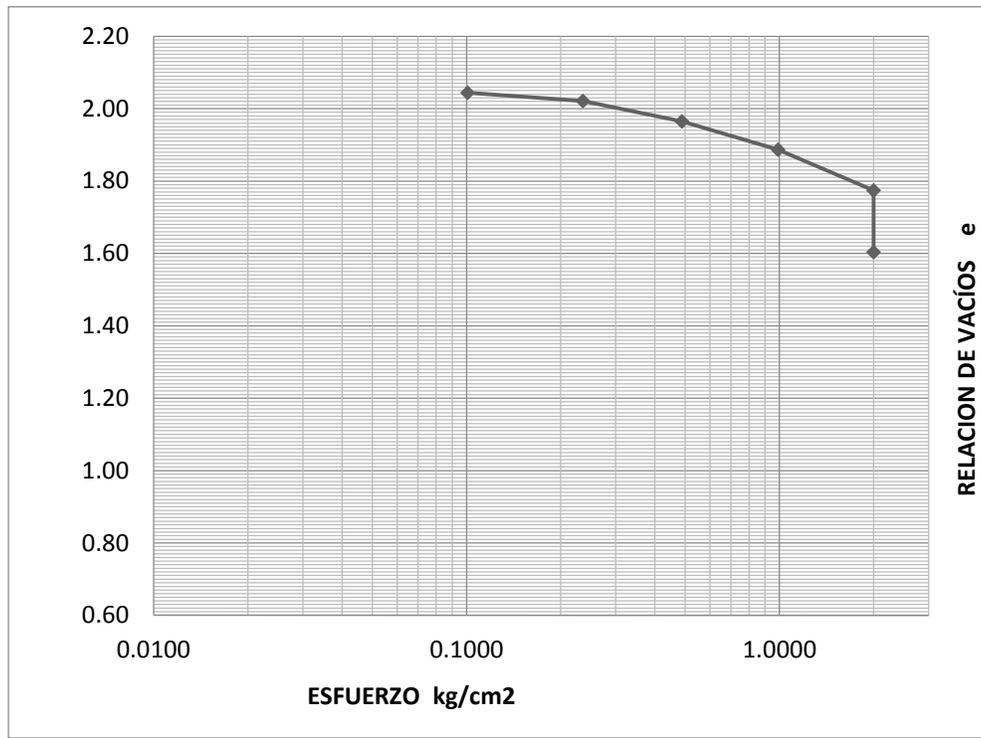


Figura 28 Prueba de Colapso para mezcla de 100%Arenas-0%Finos.

4.3.2.2 Pruebas de Colapso en mezcla de 80% Arenas y 20% Finos

Se realizó la prueba de Colapso en la mezcla de 80% Arenas - 20% Finos y tuvo un potencial de Colapso de 6.54%, en la figura 29 se muestra.

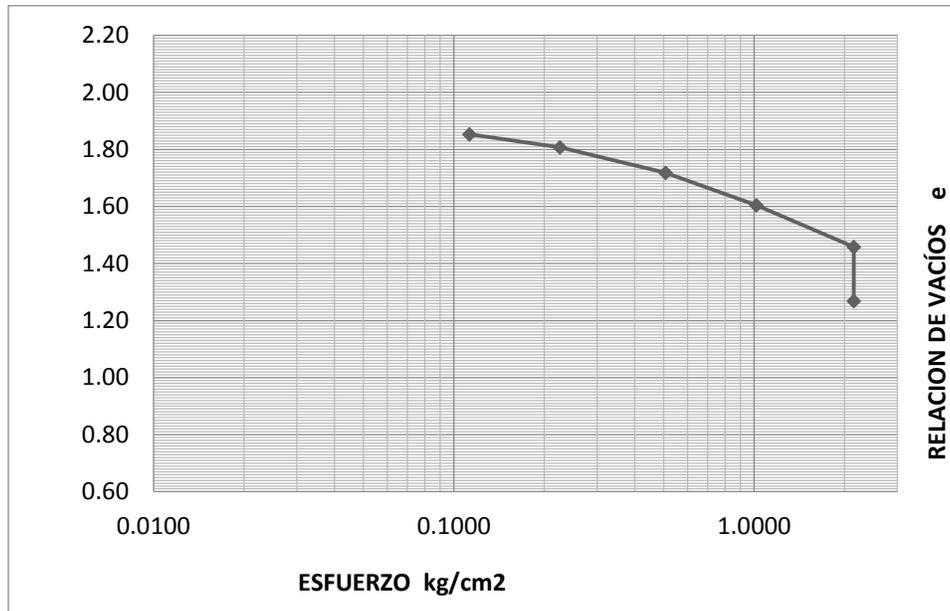


Figura 29 Prueba de Colapso para mezcla de 80%Arenas-20%Finos.

4.3.2.3 Pruebas de Colapso en mezcla de 50% Arenas y 50% Finos.

Se realizó la prueba de Colapso en la mezcla de 50% Arenas - 50% Finos y tuvo un potencial de Colapso de 8.35%, en la figura 30 se muestra.

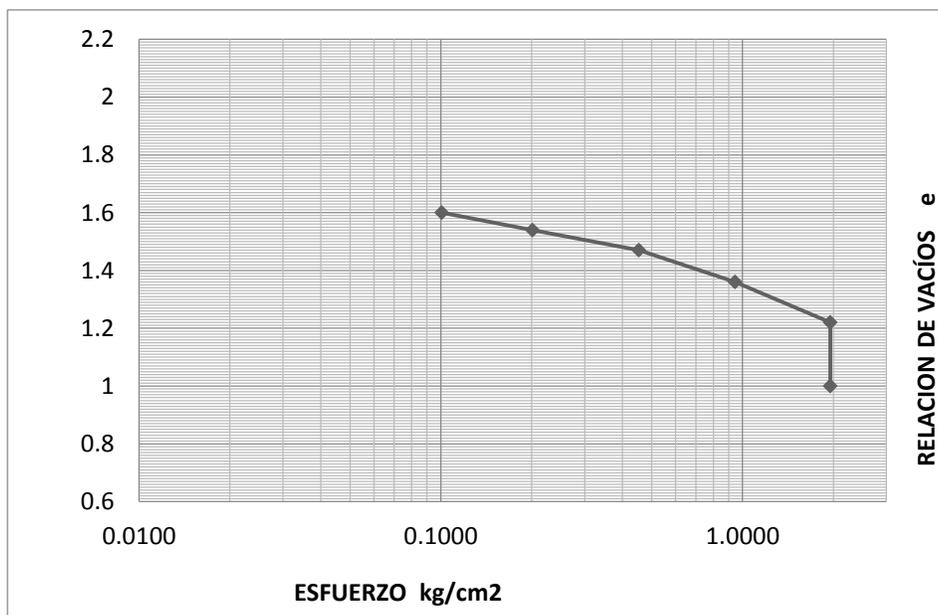


Figura 30 Prueba de Colapso para mezcla de 50%Arenas-50%Finos.

4.3.2.4 Pruebas de Colapso en mezcla de 20% Arenas y 80% Finos.

Se realizó la prueba de Colapso en la mezcla de 20% Arenas - 80% Finos y tuvo un potencial de Colapso de 9.146%, en la figura 31 se muestra.

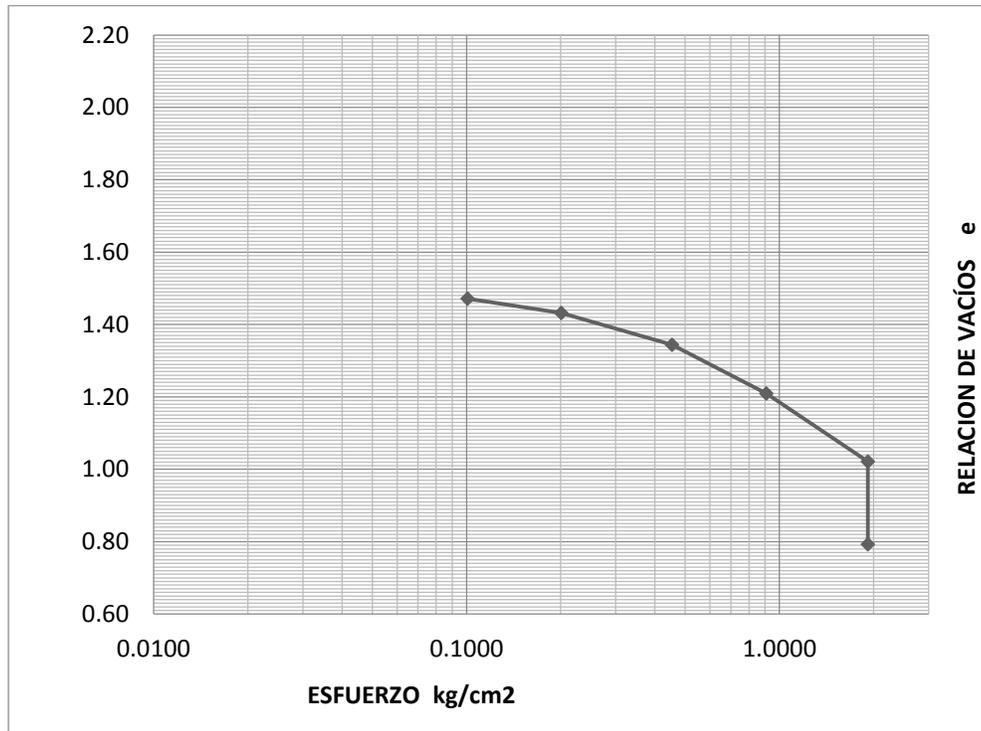


Figura 31 Prueba de Colapso para mezcla de 20%Arenas-80%Finos.

4.3.2.5 Pruebas de Colapso en mezcla de 0% Arenas y 100% Finos.

Se realizó la prueba de Colapso en la mezcla de 0% Arenas - 100% Finos y tuvo un potencial de Colapso de 11.35%, en la figura 32.

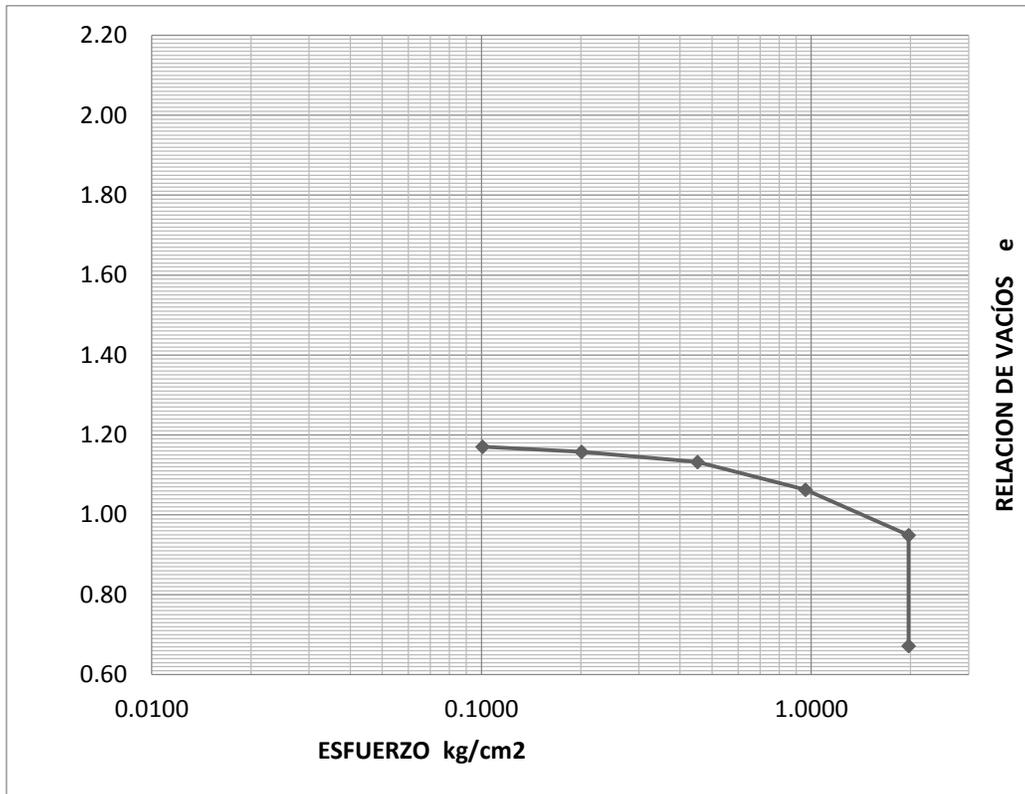


Figura 32 Prueba de Colapso para mezcla de 0%Arenas-100%Finos.

4.3.2.6 Gráfica Resumen de Colapso para diferentes dosificaciones de %Arenas y % Finos.

A continuación se muestra en la Figura 33 la Gráfica Resumen para Colapso.

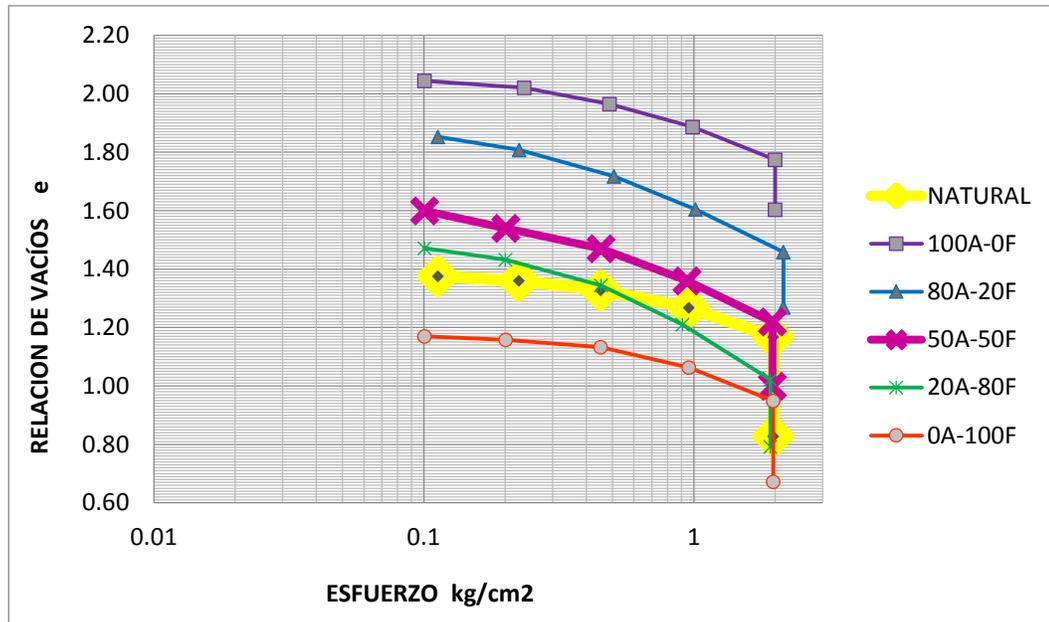


Figura 33 Gráfica Resumen de Colapso para distintas mezclas.

A continuación en la figura 34 se muestra la tendencia que sigue el colapso.

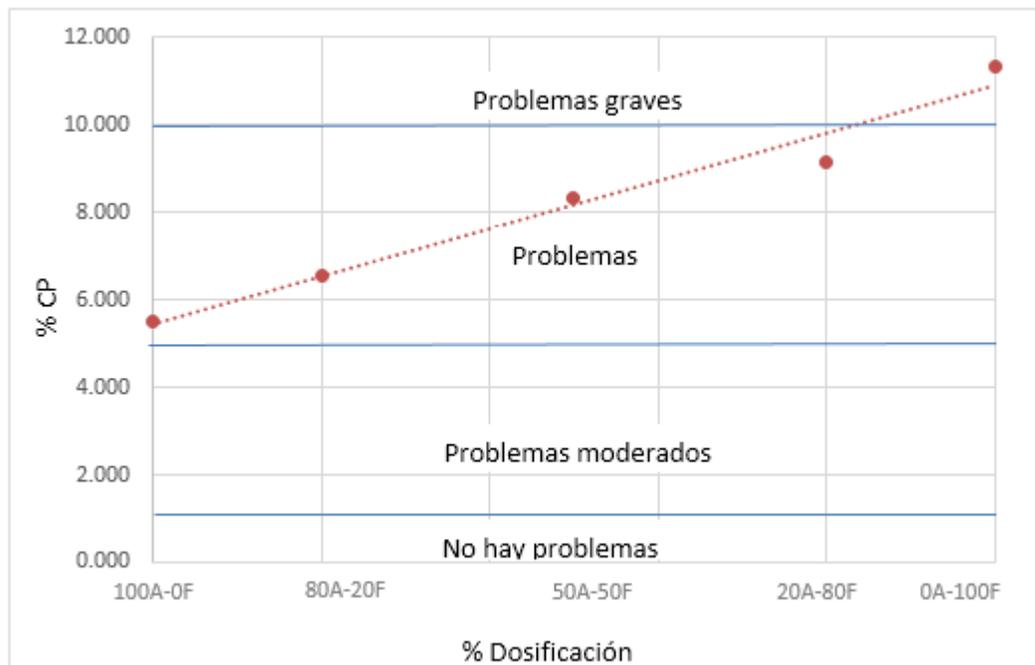


Figura 34 Tendencia que sigue el Colapso.

A continuación se muestra la Tabla 13 donde se puede apreciar el potencial de Colapso (CP) en porcentaje.

Tabla 13 Potencial de colapso (CP) para diferentes dosificaciones de arena(A) y finos (F).

Dosificación	γ_m (ton/m ³)	% Gw	CP (%)
Suelo Natural	1.37	41	14.174
100A-0F	1.06	27	5.50
80A-20F	1.13	30	6.54
50A-50F	1.26	36	8.350
20A-80F	1.30	38	9.14
0A-100F	1.34	40	11.350

En la Figura 33 se puede apreciar que conforme se tengan más arenas se tendrá una relación de vacíos más alta que va reduciendo por las presiones que se aplican en la prueba de colapso y que por lo mismo el colapso es menor que los finos por el mismo reacomodo que ya tuvieron y por conservar la integridad de sus partículas. En cambio, la relación de vacíos disminuye cuando aumenta la cantidad de Finos pero el colapso es el doble aproximadamente del de una arena debido muy probablemente a la fragilidad de la estructura de las partículas que tiendan a romperse o a sales presentes. Por lo tanto, el fenómeno de colapso proviene en mayor cantidad de la parte fina del suelo que de la gruesa y se debe principalmente a su estructura o la probable presencia de sales que puedan estar disolviéndose con el agua.

También podemos observar que en la tabla 13 se aprecia primero que el valor del colapso del suelo natural es mayor que el de las dosificaciones debido muy probablemente a su estructura inalterada (más abierta) respecto a la estructura remodelada que tienen todas las dosificaciones; incluso revisando la dosificación más parecida al suelo (50A-50F) se nota que la pérdida de la estructura natural

inalterada repercute en una disminución del colapso de aproximadamente un 40%, valor que seguramente variará porque depende de la estructura inicial del suelo.

Luego, de la misma tabla llama la atención que existe un comportamiento ascendente del valor de colapso, el cuál parte del 100% de arenas con el menor valor y termina con el 100% de finos con el mayor valor, mostrando que el colapso es mayor en las partículas finas que en las gruesas, lo que significa que muy probablemente los finos de esta dosificación estén constituidos predominantemente por limos, los que deben de tener estructuras muy frágiles que deben estar comprimiéndose bajo las presiones y generando mayor colapso que las mismas arenas.

Revisando la tendencia del comportamiento de colapso en las diferentes dosificaciones (figura 34) se nota que es lineal dependiendo del contenido de agregado. Todos estos valores son menores al natural simplemente por la pérdida de la estructura inicial intacta del suelo; por lo anterior se debe considerar una cantidad adicional aproximada de colapso que considere dicha pérdida.

4.4 Pruebas de Caracterización Físicoquímica de Suelos.

Las técnicas de caracterización se han utilizado por varios investigadores para la determinación de Materiales que conducen a distintos fines. Entre ellos, el conocer la composición mineralógica es muy importante ya que tiene una influencia fundamental sobre el potencial expansivo de los suelos.

Las fracciones de los suelos, de tamaño de arcilla (<2 micras), se analizan mediante microscopía electrónica de transmisión y difracción de rayos X después de eliminar la materia orgánica (Hooshar et. al, 2011).

En la actualidad se dispone de varias técnicas para identificar materiales arcillosos tales como a) Microscopía Electrónica de Barrido, b) Difracción de Rayos X, c) Análisis térmico diferencial y d) Análisis químico, para este trabajo se utilizaron las 2 primeras técnicas en la caracterización físicoquímica de los suelos.

4.4.1 Difracción de Rayos X (DRX).

Es uno de los procedimientos más utilizados para determinar la estructura detallada de un material, es decir, poder conocer propiedades tanto físicas como químicas, consiste en determinar las proporciones de diferentes minerales arcillosos comparando las intensidades de líneas de difracción con aquellas definidas en sustancias estándares.

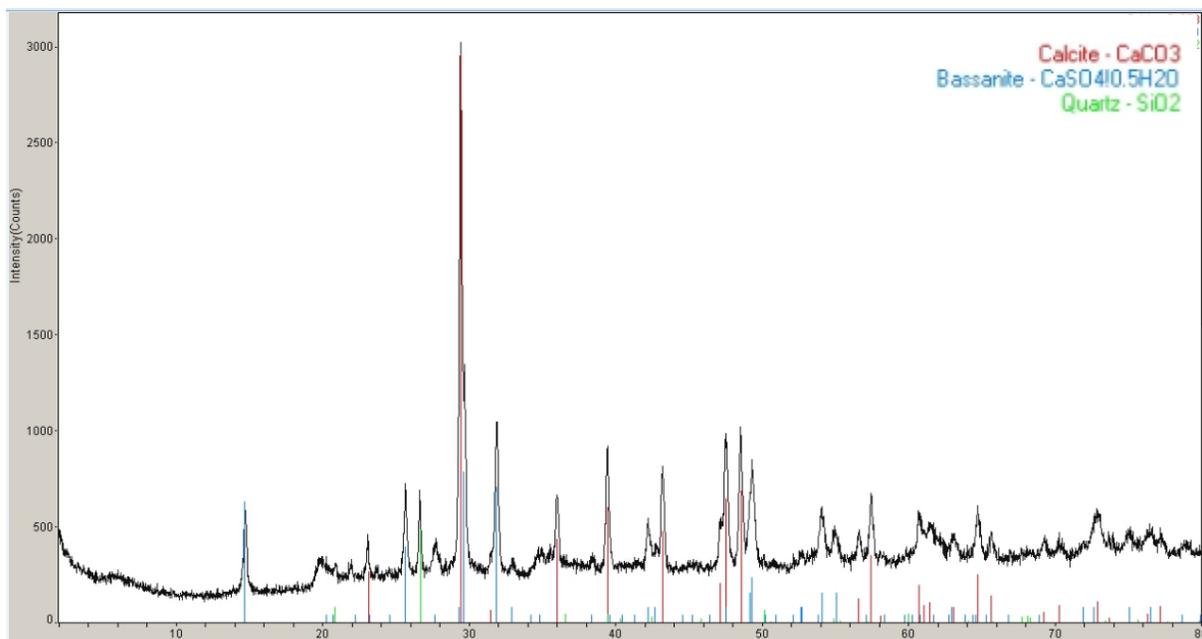


Figura 35 Difractograma del suelo Expanso-colapsable.

De acuerdo al difractograma obtenido en la muestra de suelo, se puede deducir que la mineralogía de la muestra está constituida principalmente por Calcita (CaCO_3), ya que las intensidades indican la mayor presencia de este mineral con respecto a otras, seguido de la Basanita y el Cuarzo; dichos minerales constituyen generalmente a los suelos gruesos como arenas. Es importante mencionar que no se detectaron minerales de arcilla presente por lo que se puede inferir que el contenido de limos es mucho mayor que arcillas.

La muestra fue tratada para separar la fase arcillosa y su patrón de difracción de rayos X, ver Figura 36, revela la presencia de una arcilla que corresponde con una Montmorillonita, mineral responsable de la expansión registrada en el suelo.

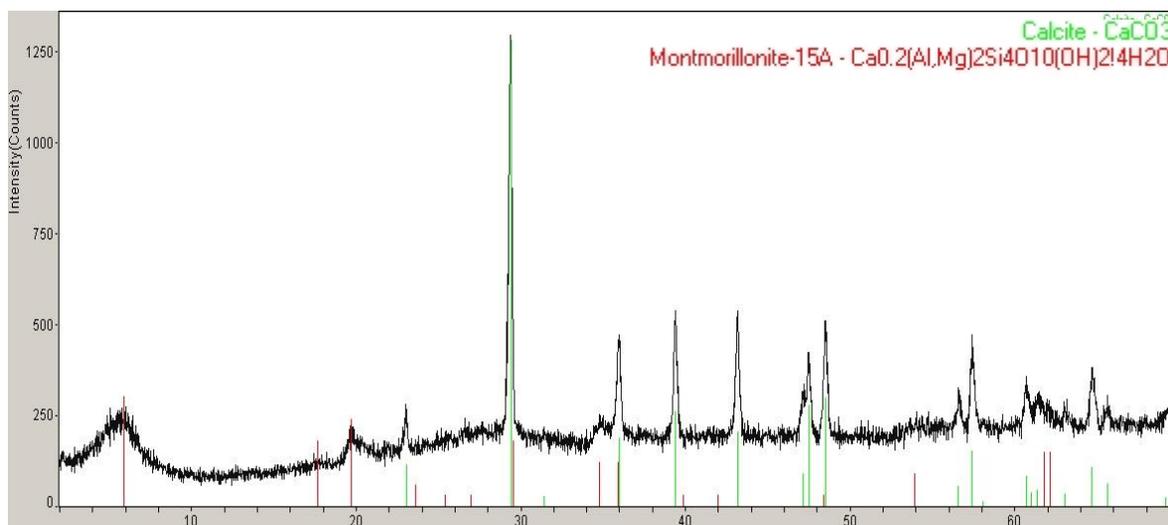


Figura 36 Difractograma de muestra tratada del suelo Expanso-colapsable.

4.4.2 Microscopía Electrónica de Barrido (MEB).

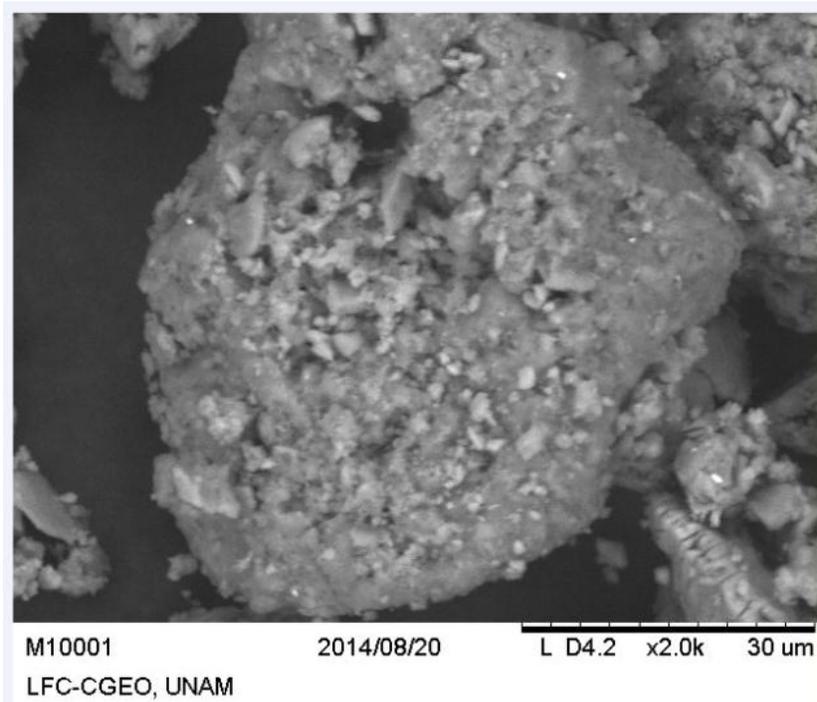
Microscopía electrónica de barrido (MEB), que ha sido ampliamente utilizada en geología, geoquímica, ciencias de los materiales y los campos de la biología, puede proporcionar una caracterización directa de la microestructura para ayudar a explicar la respuesta mecánica de suelos arcillosos a una escala macro (Romero y Simms, 2008). Si se tiene acoplada la técnica de espectroscopía de energía dispersiva (EDS) es posible determinar de manera semicuantitativa la composición elemental de la muestra. Con este método se tiene una manera directa para observar el suelo, es útil para definir la composición mineralógica, la textura y la estructura interna.

De acuerdo al estudio de EDS que se le hizo al suelo, en la tabla 14 se muestran los elementos de los que consta el suelo en estado natural que son Aluminio, Silicio, Azufre, Calcio y Hierro, elementos que generalmente constituyen

a una arena y que corresponden a las fases mineralógicas determinadas por difracción de rayos X.

Tabla 14 Elementos del material expanso-colapsable en estado natural, de porcentaje en peso.

Nombre	Al	Si	S	Ca	Fe
Spectrum1	11	14.7	7.6	40.5	26.2



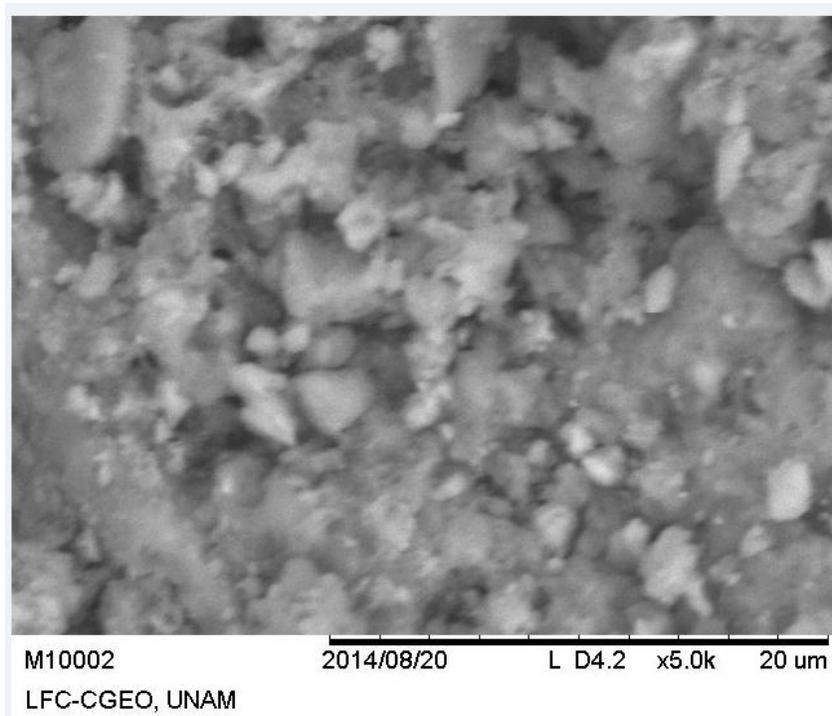


Figura 37 Micrografías del suelo Expanso-colapsable a 30 y 20 μm .

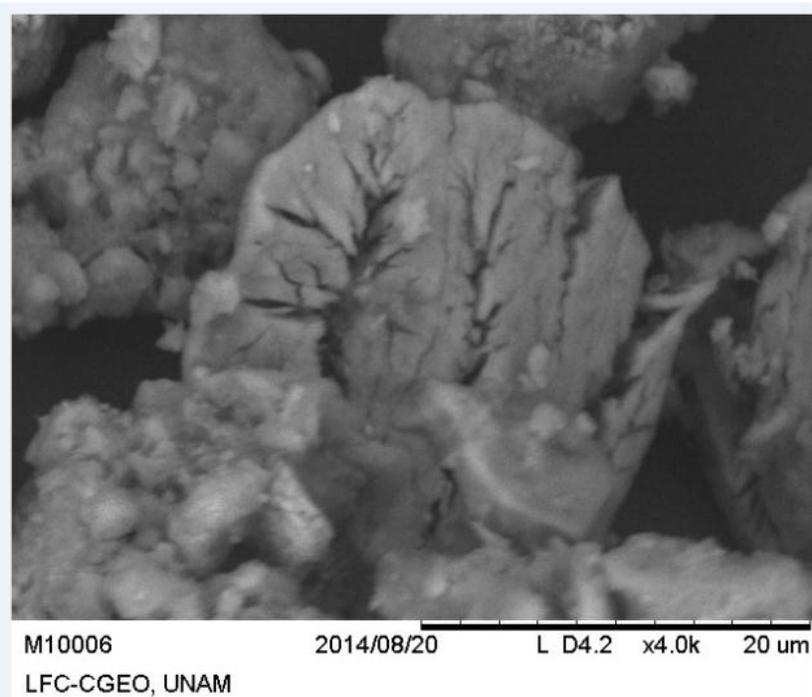
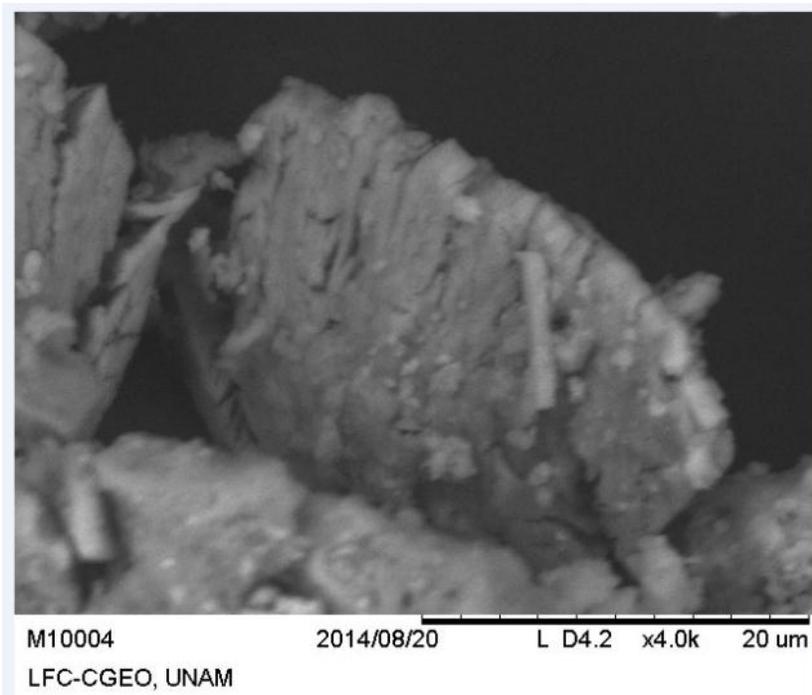


Figura 38 Micrografías del suelo Expanso-colapsable a 20 μm .

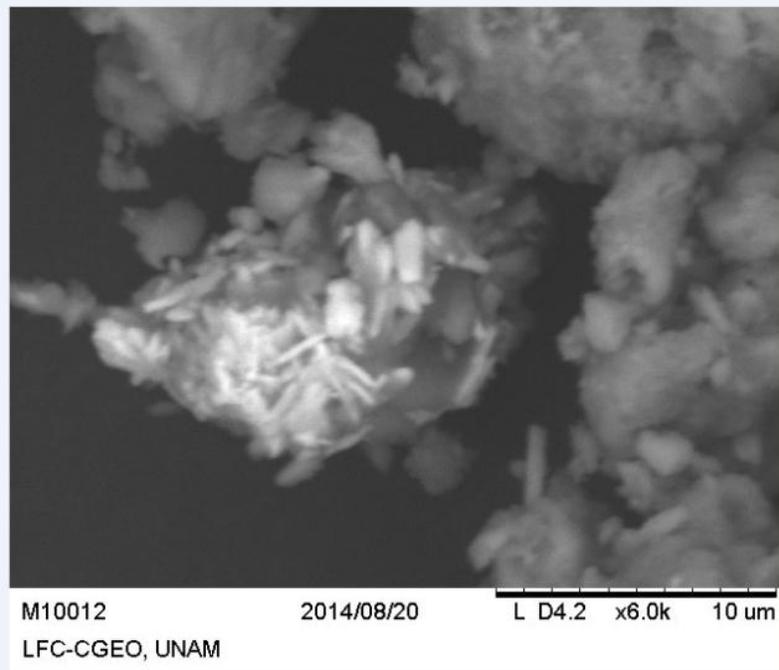
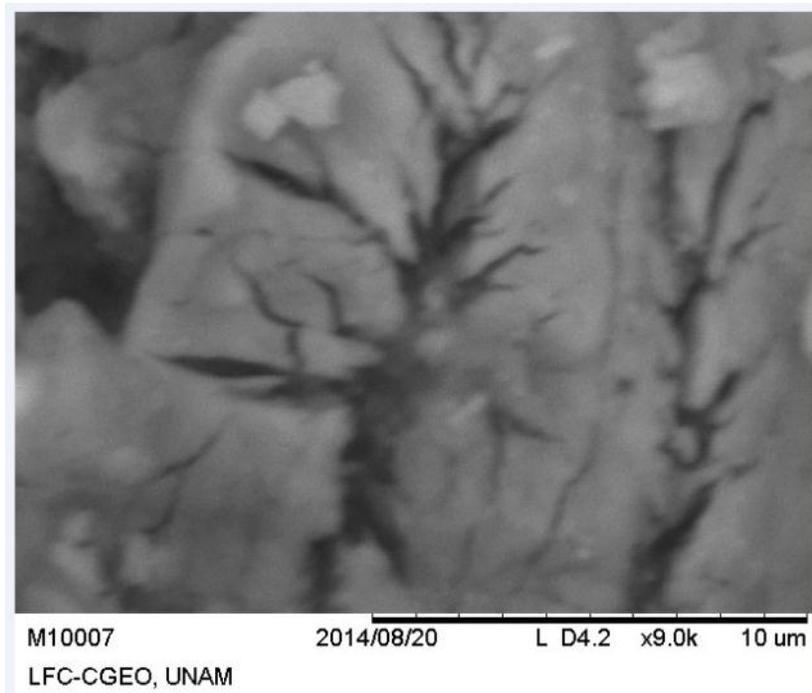


Figura 39 Micrografías del suelo Expanso-colapsable a 10 um.

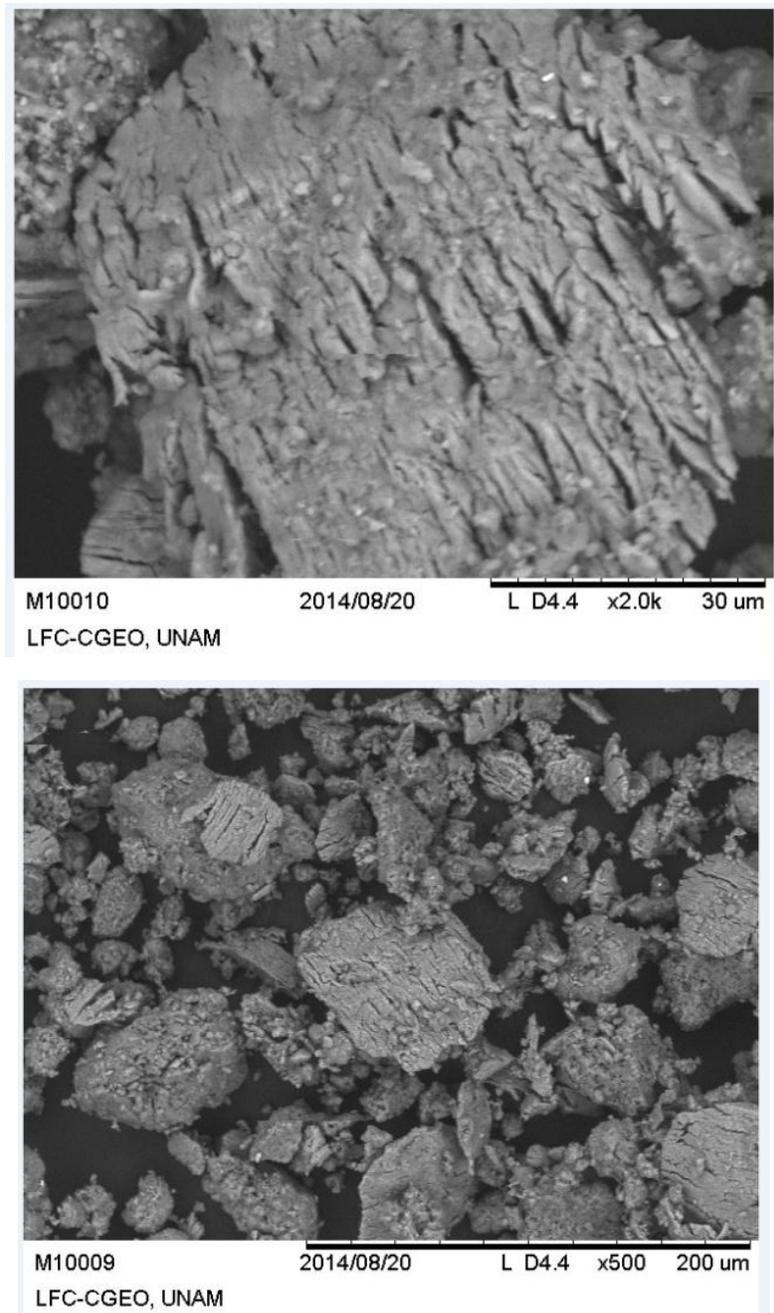


Figura 40 Micrografías del suelo Expanso-colapsable a 30 y 200 μm .

Por medio del microscopio electrónico de barrido se puede apreciar el ordenamiento o disposición espacial de las partículas de los suelos estudiados en el cual presenta morfologías irregulares, se puede observar en las Micrografías que las partículas son angulosas y no redondeadas.

De la figura 37 se observa que las partículas que constituyen al suelo son grumos formados a su vez por partículas adheridas entre sí de forma redondeadas y alargadas, lo que las hace verse como estructuras “hinchadas” y frágiles lo que explica el valor alto de colapso de éstos.

La figura 38 muestra partículas del suelo que tienen formas ovaladas aplastadas como de 20x30 micras con espesores pequeños de aproximadamente 2 micras; se no también que estas partículas están fisuradas en casi toda su estructura mostrando muchos huecos que las hace verse como formadas por secciones o tiras alargadas pegadas entre sí. Estas estructuras con grandes huecos pueden corresponder a láminas de mineral de arcilla y también pueden ser responsables del alto valor de colapso presentado en los finos.

La figura 39 muestra a detalle las partículas ovaladas aplastadas fisuradas desde su centro hacia afuera donde se observan oquedades de 1 a 2 micras a lo largo de toda la partícula. Así mismo se muestra la disgregación de un grumo en partículas de forma circular y alargadas con espesores de 0.5 a 1 micra y de largos 1 a 2 micras; de hecho se observa una gran fragilidad en la estructura.

La figura 40 muestra los tamaños predominantes del agregado fino que son de 70, 30 y 20 micras y de los más pequeños de 2 a 4 micras, aproximadamente; también es muy importante mencionar que se observa que las partículas más grandes muestran estructuras fisuradas (de 2 a 3 micras de espesor aproximadamente) en casi toda su longitud y las más pequeñas son alargadas producto de dicha fisuración; lo que muestra que los finos tienen estructuras abiertas y frágiles que bajo presiones pueden tener gran compresión; esto puede explicar el alto valor del colapso presentado en los finos. Así mismo se aprecian estructuras laminares que pueden corresponder a la fase arcillosa determinada por difracción de rayos X.

CAPITULO 5 CONCLUSIONES.

5.1 Conclusiones.

En Geotecnia, partiendo de las propiedades de granulometría Arenas 35%, Finos 42% y Gravas 23%, expansión 3.89% y colapso 14.17% determinadas en el suelo natural se puede decir que es un suelo expanso-colapsable.

Este estudio muestra que el bajo valor de expansión (igual o menor de 1% en los materiales compuestos y de 3.9% para el suelo natural) se debe sorprendentemente a la existencia de arcilla de mineral montmorillonita en muy poca cantidad (solo 5% del 42% de finos determinadas por mallas); se menciona lo anterior debido a que se pensaba que por el bajo valor de expansión presentado era otro tipo de mineral de arcilla el que contenía o bien se debía al reacomodo ya conocido del material grueso bajo compresión, después ambas suposiciones fueron descartadas con los estudios de Difracción de Rayos X realizados a la fracción fina del suelo junto con el análisis de granulometría del ensaye de Bouyocos que determinaron exactamente el tipo de mineral presente y la cantidad de arcilla.

Este estudio muestra que el colapso del suelo estudiado proviene, además de la parte gruesa del suelo (arenas), de su parte fina; de hecho el valor del colapso fue del doble para la parte fina que para la parte gruesa del suelo. Por otro lado, la tendencia del colapso es lineal según la composición de arena y de finos que contenga, de tal forma que cada parte contribuye al colapso según corresponda la cantidad. También se observa que la estructura natural del suelo en estudio aumenta el valor de colapso debido muy probablemente a la pérdida de la estructura inalterada y a la existencia de gravas. Por consiguiente, la naturaleza mineralógica de los agregados (gruesos y finos) así como la estructura de las partículas finas (fisuramiento, formas, etc) determinarán al final la cantidad de colapso presente.

En general el comportamiento del suelo fue más de colapso que de expansión, lo que conducía a la existencia de material grueso de forma

predominante aun cuando la cantidad de finos era significativa (gravas (23%), arenas (35%) y finos (42%)). De hecho, el comportamiento anterior se explica con los estudios de Difracción de Rayos X que se llevaron a cabo de primera instancia al material fino del suelo y que solo mostraron minerales de suelos gruesos, se puede deducir que la mineralogía de la muestra está constituida principalmente por Calcita (CaCO_3), ya que las intensidades indican la mayor presencia de este mineral con respecto a otras, seguido de la Basanita y el Cuarzo; dichos minerales constituyen generalmente a los suelos gruesos como arenas, sin detectar en absoluto minerales de arcilla (esto podría deberse a la poca cantidad de arcilla); fue entonces que se requirió hacer un estudio adicional al suelo que consistió en un tratamiento al suelo para poder dejar solo la arcilla y así realizar nuevamente Difracción de Rayos X y poder determinar el mineral que ya se mencionó. Por otro lado, los estudios de Microscopía Electrónica de Barrido realizados a los finos del suelo también demostraron que los elementos que lo constituían al suelo en estado natural son Aluminio, Silicio, Azufre, Calcio y Fierro, elementos que generalmente constituyen a una arena y que son parte de suelos gruesos.

Se concluye que para este estudio en particular, un suelo expanso-colapsable puede ser el resultado de la combinación de suelos gruesos y finos no plásticos que presentan expansión no por la cantidad general de finos presentes sino por la cantidad específica de finos con mineral arcilloso expansivo y que presentan colapso por la cantidad y mineralogía de gruesos presentes y principalmente por la mineralogía y la conformación de la estructura (microestructura) de los finos; teniendo a esta última como un factor que influye decisivamente y en mayor cantidad en el comportamiento de colapso.

5.2 Recomendaciones.

Ya que a través del tiempo se ha tenido que lidiar con suelos que son problemáticos y que causan daños considerables llegando a afectar las cimentaciones y estructuras, la mayoría de veces solo se da tratamiento al suelo para un fenómeno, ignorando que puede tener las 2 fenomenologías juntas, con

esta investigación se pretende dar a conocer un poco más esta fenomenología, para que en investigaciones posteriores se puedan centrar a tratar de mitigar el problema, mediante Métodos de Estabilización de Suelos Expanso-Colapsables.

REFERENCIAS

Alonso, E. E., Gens, A., and Hight, D. W. (1987), "Special problem soils general report", 9th European conference on soil mechanics and foundations engineering, Dublín, Vol. 3.

Álvarez Manilla A. A., García Becerra J., López Lara T., & Martínez Peña GGEI., (2002). "Origen y características de los suelos colapsables en la Zona Metropolitana de Querétaro". XXI Reunión Nacional de Mecánica de Suelos. Vol. 2. Querétaro, Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, AC. México.

American Society for Testing and Materials (ASTM) D4546-03 (2003), "Standard Test Methods for One-Dimensional Swell or Settlement Potential of Cohesive Soils", Annual Book of ASTM Standards, Construction, Volume 04.08, Solid and Rock Building Stones, USA.

American Society for Testing and Materials (ASTM) D5333-03 (2003), "Standard Test Method for Measurement of Collapse Potential of Soils", Annual Book of ASTM Standards, Construction, Volume 04.08, Solid and Rock Building Stones, USA.

American Society for Testing and Materials (ASTM) D422-63 (1998). Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils. ASTM, 100 Barr Harbor Drive, West Conshohocken, PA 19428-2959, USA.

Arrieché L., León R., Mendez (2013) "El factor de corrección en la determinación del % arena, limo y arcilla en los suelos por el método bouyoucos" XX Congreso Venezolano De La Ciencia Del Suelo.

Badillo, Juárez y Rodríguez, Rico (1976) Mecánica de Suelos. Tomo 1. Fundamentos de Mecánica de Suelos. Editorial Limusa. México, D.F. 1998.

Barrera Bucio Mauricio, (2002). "Estudio experimental del comportamiento hidromecánico de suelos colapsables". Tesis Doctoral. UPC, Barcelona, España.

Barrera-Bucio M. y Garnica-Anguas P., (2002). "Introducción a la mecánica de suelos no saturados en vías terrestres". Publicación técnica No. 198. IMT. Sanfandila, Querétaro, México.

Bönsch C. & Lempp C., (2007). Shear Strength Affected by Tension in Unsaturated Fine Grained Soils. *Experimental Unsaturated Soils Mechanics*, Berlín, Springer Volume 112, Part III. 145-152.

Carreón F. Cerca M. Luna G. & Gamez G, (2005). "Influencia de la estratigrafía y estructura geológica en el flujo de agua subterránea del Valle de Queretaro". *Revista Mexicana de Ciencias Geologicas*, vol. 22, num. 1, 2005, p. 1-18.

Chen Fu, Hua (1975). "Foundation on expansive soil". Elsevier Scientific Company, New York.

Comisión de Texas sobre Calidad Ambiental (2005). alcantarillado en sitio. 30 TAC Capítulo 285. 06 de Enero 2005

Correa, Penalista Juan, (1976). "Suelos Colapsables", VIII Reunión de Mecánica de Suelos, Tomo III, Guanajuato, Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, AC. México.

Estrella, Ugalde Felipe, (2010).- Documento Técnico Unificado (DTU) del trámite de cambio de uso de suelo forestal, modalidad A para el "Banco de roca "Felipe Estrella".

Fityus S., Buzzi O., 2009. The place of expansive class in the framework of unsaturated soil mechanics. *Applied Clay Science* 43:150-155.

Fredlund D.G., 2006. Unsaturated soil mechanics in engineering practice, *Journal of Geotechnical and Geological Engineering* Vol. 132, No. 3, pp 286-321.

Fredlund D.G. & Rahardjo H., 1993. "Soil Mechanics for Unsaturated Soils". John Wiley & Sons, Inc. New York, USA.

García J., H. Medina, D. Nuñez 2008. "El método del hidrómetro: Influencia de los tiempos de lecturas en el cálculo de la distribución del tamaño de partículas en suelos de La Habana". *Cultivos Tropicales*, vol. 29, núm. 2, pp. 21-26.

Gilbert G., I. Arrieche, E. Bisbal, N. Alfonzo, M. Navas, N. Gómez, P. Yanes. 200. *Manual de métodos y procedimientos de referencia (Análisis de suelo para diagnóstico de fertilidad) 2da. Versión*. INIA. Venezuela. pp. 88-111.

Hagner T., 2005. *Shrinkage characteristics and tensile strength of cohesive soils*, Master's Thesis, Bauhaus-University Weimar, Germany. Herrera C.S. (2002). *Manual de Construcción Geotécnica*, Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, A.C., Capítulo 17, Tomo II.

Holtz, W. G. and Gibbs, H.J., 1956. "Engineering Properties of Expansive Clays". *Transactions, ASCE*. Paper No. 2814. Vol. 121, pp 641-677.

Hooshar, A., Uhlik, P., Ivey, D., Liu, Q., Etsell, T. H; 2012, "Clay minerals in nonaqueous extraction of bitumen from Alberta oil sands: Part 2. Characterization of clay minerals", *Fuel Processing Technology*, 96:183-194.

Houston, S.L., Houston, W.N., Zapata, C.E., Lawrence, C., 2001. *Geotechnical engineering practice for collapsible soils*. *Geotechnical and Geological Engineering* 19, 333–355.

Jiménez S. J. A., 1990. "Hacia una Mecánica de los Suelos no saturados". *Décima Conferencia Nabor Carrillo-Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos*. San Luis Potosí, México.

Karube D. & Kawai K., 2001. "The role of pore water in the mechanical behavior of unsaturated soils". *Journal of Geotechnical and Geological Engineering*, Vol. 19, No. 3-4, pp 211-241.

López-Lara, Teresa (2002). “Estudio fisicoquímico de la modificación de suelos expansivos”. Doctorado en ingeniería. Universidad Autónoma de Querétaro, Santiago de Querétaro, Qro. México.

López-Lara, T. y Zepeda-Garrido, J.A., 2004. Capítulo “Mejoramiento de suelos” Mecánica de Suelos no saturados, Universidad Autónoma de Querétaro, Santiago de Querétaro, Qro. México.

Marcial, D., Delage, P., Cui, Y.J., 2002. On the high stress compression of bentonites. Canadian Geotechnical Journal 39, 812–820.

Miller, D.J. and Nelson J. D., 1992.”Expansive Soils Problems and Practice in Foundations and Pavement Engineering”, Department of civil Engineering, Editor John Wiley and sons, inc, Colorado State University.

Ning L. y Likos, J.W., 2006. Suction Stress Characteristic curve for unsaturated soil. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. Vol. 132, No.2, pp 131-142.ASCE.

Popescu M.E., 1979. Engineering problems associated with expansive clays from Romania. Engineering Geology., 14:43-53.

Popescu M.E., 1986. A comparison between the behaviour of swelling and of collapsing soils. Engineering Geology., 23:145-163.

Pousada P., 1984. “Deformabilidad de las arcillas bajo succión controlada”. Tesis Doctoral. Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas, Madrid, España.

Rojas, E., Romo, M. P., y Garnica P., 2004. Flujo de Agua en Suelos Expansivos en torno a una pantalla vertical impermeable: un método de análisis. Instituto de Ingeniería de la UNAM, México.

Sowers, G.F., 1979. Application of Results of Exploratory Borings and Index Properties to Soil Engineering problems. Simposio Internacional de Mecánica de suelos. pp 3-15 Oaxaca, Mex.

Technical Committee on Expansive Soils 1993 (TC6) of ISSMFE Standard Evaluation of Swelling Pressure and Corresponding Heave of Expansive Soil in Laboratory by Constructing Swell Percentage Applied Total Stress Diagram. New Delhi.

Vallejos Horacio R. (2000). "Suelos expansivos y su relación con las obras viales". XIII Congreso de Vialidad y Tránsito. Argentina.

Zeevaert, Leonardo Foundation Engineering for Difficult Subsoil Conditions Van- Nostrand-Reinhold Co. 1983

Zepeda G., J. A. y Flores F., M. (2002). "Expansión y compresibilidad de arcillas parcialmente saturadas". II Congreso Panamericano de Enseñanza de la Mecánica de Suelos. Guayaquil, Ecuador.