

UNIVERSIDAD MICHOACANA
DE SAN NICOLÁS DE
HIDALGO



FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

ESTUDIO DE LAS PROPIEDADES DE EXPANSIÓN DE
UNA ARCILLA DE ALTA PLASTICIDAD

TESIS

PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL

PRESENTA

HELADIO CIFUENTES SÁNCHEZ

ASESOR

DR. CARLOS CHÁVEZ NEGRETE

Morelia, Mich., junio del 2018

DEDICATORIA

A mis hermanos Javier y Eduardo, por estar presentes en todo momento y tener siempre las palabras que necesité durante los malos y buenos momentos. Por enseñarme con su ejemplo, el camino correcto que debía tomar, y sobre todo por su infinito amor hacia mí.

A mis abuelos, por ser mi fuente de inspiración, por sus historias y apoyo a lo largo de toda mi vida. Sé que estarán llenos de orgullo de verme cumplir un sueño que les pertenece a ellos también.

Y finalmente, a mis padres, Javier y Claudia, las personas que Dios puso en mi camino para ser las encargadas de guiarme, de enseñarme los valores que hoy llevo allá a donde voy, son mis dos más grandes amores, mi razón de ser, mi orgullo más grande y a quienes nunca conseguiré pagar la infinita deuda de amor, comprensión, apoyo y fortaleza que me han dado. Esto es por ellos y para ellos. Gracias, gracias, millones de gracias. Los amo.

AGRADECIMIENTOS

A la familia Sánchez Ayala, por su cariño, apoyo y principalmente creer en nosotros como familia. Gracias por su disponibilidad y confianza.

A mi primo y amigo Leonel Cifuentes Ponce, por darme la posibilidad de compaginar el estudio y el trabajo, y por enseñarme que, con esfuerzo, dedicación y confianza en uno mismo, el éxito está garantizado. Gracias primo por tus enseñanzas y consejos.

A mi amiga Alejandra Rosales Tapia, que ha sido fundamental en mi crecimiento personal, estando a mi lado, llenando de alegría mis días y haciendo de mí una mejor persona.

A mi amigo Jesús Nolberto De Los Santos Bailón, gracias amigo por ser parte de mis alegrías y tristezas y ayudarme las veces que necesité de tu apoyo.

A mi amigo Sergio Israel Godínez Lucatero, que siempre ha tenido la palabra de ánimo correcta en los malos momentos

A todos los maestros que eh tenido, a todos muchas gracias, porque de todos eh aprendido muchas cosas que me han formado como la persona que ahora soy.

*LOS QUE ASEGURAN QUE
ES IMPOSIBLE, NO DEBERÍAN INTERRUMPIR
A LOS QUE LO ESTAMOS INTENTANDO*

THOMAS ALVA EDISON (1847-1931)

ÍNDICE

DEDICATORIA.....	ii
AGRADECIMIENTOS	iii
ÍNDICE	v
RESUMEN	vii
ABSTRACT	vii
PALABRAS CLAVE	viii
KEYWORDS	viii
LISTA DE FIGURAS	ix
LISTA DE TABLAS	x
GLOSARIO DE TÉRMINOS.....	xi
1 INTRODUCCIÓN	12
2 COMPORTAMIENTO DE SUELOS EXPANSIVOS.....	16
2.1 Suelos compactados.....	23
2.2 Procedimientos experimentales para determinar el potencial expansivo de un suelo.....	26
2.2.1 Identificación mineralógica	26
2.2.2 Métodos directos	27
2.2.3 Métodos indirectos	29
2.3 Ensayos para medir la expansión	30
3 CASO DE ESTUDIO.....	34
3.1 Muestreo en campo	34
3.2 Caracterización general de la arcilla en laboratorio	35
3.2.1 Determinación de los límites de consistencia.....	35
3.2.2 Densidad de sólidos	39
3.2.3 Pruebas de compactación.....	42

3.3	Ensayos de expansión	49
3.4	Análisis de resultados	59
4	CONCLUSIONES	62
5	BIBLIOGRAFÍA	63
6	ANEXOS	64

RESUMEN

El siguiente trabajo de investigación, analiza el fenómeno de expansión que se presenta en una arcilla de alta plasticidad, abordando el estudio detallado en el laboratorio de un suelo de la región, así como las posibles soluciones a dicho problema en campo.

Se describe, en un primer momento, las investigaciones de diferentes autores acerca de los conceptos teóricos básicos sobre el comportamiento de un suelo arcilloso con características expansivas. Lo cual será importante para el correcto análisis de los resultados que se obtengan en los ensayos de laboratorio.

Finalmente, se presentan detalladamente los ensayos de caracterización mecánica de la arcilla realizados en el laboratorio. En los resultados de dichos ensayos se observa su comportamiento, del cual se pueden deducir algunas alternativas de solución a esta problemática.

ABSTRACT

The following research analyses the phenomenon of expansion that occurs in a high plasticity clay. A detail laboratory study was carried out with a soil from the region, as well as the practical solutions to this problem *in situ*.

First, investigations by different authors about the theoretical basic behavior concepts from a clay soil with expansive features are described. Which will be important for the analysis of the results obtained in laboratory tests.

Finally, is presented a detail mechanical characterization of clay performed with tests conducted in the laboratory. From the test results, it can be possible of observe the behavior and deduce some solutions to this problem.

PALABRAS CLAVE

- Potencial expansivo
- Arcilla
- Compactación
- Plasticidad
- Suelos no saturados
- Cambios volumétricos

KEYWORDS

- Expansive potential
- Clay
- Compaction
- Plasticity
- Unsaturated soils
- Volumetric change

LISTA DE FIGURAS

Fig. 1 Fases de un suelo no saturado según Yoshimi y Osterberg (1963).....	17
Fig. 2 Efectos de la variación superficial sobre una estructura: a) Disminución de la humedad en el perímetro de la estructura; b) Aumento de la humedad en el perímetro de la estructura (Jiménez-Salas, 1980)	18
Fig. 3 Estructura del suelo (según Alonso y otros autores, 1987)	19
Fig. 4 Variación de γ_d con diferentes energías de compactación	24
Fig. 5 Relación entre el cambio de volumen y contenido coloidal, índice plástico y límite.....	27
Fig. 6 Método de la actividad	28
Fig. 7 Resultados de ensayo de presión de expansión.....	32
Fig. 8 Muestreo en campo	34
Fig. 9 Eliminación de materia vegetal	34
Fig. 10 Suelo en copa Casagrande.....	36
Fig. 11 Pesaje de suelo para límite líquido	36
Fig. 12 Ensayo de límite plástico.....	37
Fig. 13 Pesaje para obtener límite plástico	38
Fig. 14 Carta de plasticidad.....	39
Fig. 15 Muestra en el matraz.....	40
Fig. 16 Pesaje de matraz con muestra de suelo y agua destilada	40
Fig. 17 Muestra de suelo seco final.....	41
Fig. 18 Homogenización de la muestra variante estándar	43
Fig. 19 Pesaje de muestra y molde variante estándar	44
Fig. 20 Pesaje de muestra variante estándar.....	44
Fig. 21 Compactación energía Estándar.....	45
Fig. 22 Homogenización de muestra variante modificada.....	46
Fig. 23 Pesaje de muestra y molde variante modificada.....	47
Fig. 24 Pesaje de la muestra variante modificada.....	48
Fig. 25 Compactación energía modificada.....	49
Fig. 26 Preparación de remoldeada	50
Fig. 27 Remoldeada de muestra	51
Fig. 28 Labrado de muestra	51
Fig. 29 Colocación de muestra en anillo de consolidación.....	52
Fig. 30 Equipo de consolidación	52
Fig. 31 Aplicación de carga	53
Fig. 32 Saturación de la muestra	53
Fig. 33 Gráficas en el programa LabView	54
Fig. 34 Pesaje de muestra y anillo	54
Fig. 35 Peso seco de muestra y anillo	55
Fig. 36 Muestra con $w=18\%$ y $\gamma_d=1.2 \text{ gr/cm}^3$	56
Fig. 37 Muestra con $w=25\%$ y $\gamma_d =1.2 \text{ gr/cm}^3$	56
Fig. 38 Muestra con $w=35\%$ y $\gamma_d =1.2 \text{ gr/cm}^3$	57
Fig. 39 Muestra con $w=15\%$ y $\gamma_d =1.4 \text{ gr/cm}^3$	57

Fig. 40 Muestra con $w=25\%$ y $\gamma_d = 1.4 \text{ gr/cm}^3$	58
Fig. 41 Muestra con $w=35\%$ y $\gamma_d = 1.4 \text{ gr/cm}^3$	58
Fig. 42 Resumen de pesos específicos y porcentajes de expansión.....	60

LISTA DE TABLAS

Tabla 1 Grado de expansión en base a I_p y I_c	22
Tabla 2 Método USBR.....	28
Tabla 3 Valores de potencial de cambio volumétrico.....	29
Tabla 4 Valores típicos de CEC en tres minerales de arcilla.....	29
Tabla 5 Potencial de expansión.....	30
Tabla 6 Límite líquido.....	37
Tabla 7 Límite plástico.....	38
Tabla 8 Cálculos densidad de sólidos.....	42
Tabla 9 Cálculos de Proctor Estándar Variante "A".....	45
Tabla 10 Cálculos de Proctor modificada variante "A".....	48
Tabla 11 Resumen de resultados de expansión.....	59
Tabla 12 Cálculos de muestra 1.....	64
Tabla 13 Cálculos de muestra 2.....	64
Tabla 14 Cálculos de muestra 3.....	65
Tabla 15 Cálculos de muestra 4.....	65
Tabla 16 Cálculos de muestra 5.....	66
Tabla 17 Cálculos de muestra 6.....	66

GLOSARIO DE TÉRMINOS

Expansión	Es el proceso en el cual un suelo sufre cambios volumétricos debido a las variaciones en su contenido de humedad.
Arcilla	Es un tipo de suelo, que contiene ciertos minerales (principalmente silicatos), y que en presencia de agua se vuelven plásticas.
Compactación	Es el proceso realizado generalmente por medios mecánicos, por medio del cual se produce una densificación del suelo, disminuyendo su relación de vacíos, logrando un mejoramiento de las propiedades geotécnicas del suelo, de tal manera que presente un comportamiento mecánico adecuado.
Plasticidad	Propiedad que tiene un material de ser moldeado o trabajado para cambiarlo de forma.
Suelos no saturados	Es aquel suelo que presenta la fase sólida, la fase líquida y la fase de vacíos, y que por lo tanto su superficie se encuentra por encima del nivel freático.
Cambios volumétricos	Son los cambios de volumen producidos en un suelo no saturado al variar sus contenidos de humedad.

1 INTRODUCCIÓN

La relación entre la estructura y propiedades fisicoquímicas de los suelos expansivos y su comportamiento mecánico es un área apenas explorada. Ello es debido a que en el principal campo de aplicación de la Mecánica de Suelos (la construcción de estructuras e infraestructuras) se manejan factores de seguridad suficientemente altos como para no ser necesario conocer la mineralogía y estructura del terreno ni requerirse una excesiva exactitud en los ensayos mecánicos, dada la gran dispersión de resultados que pueden obtenerse en el análisis de un mismo material. Pero en muchos casos, y sobre todo trabajando con suelos con características de expansividad, este conocimiento es conveniente e incluso obligado, ya que el comportamiento final del suelo dependerá de la naturaleza de este.

Los suelos expansivos se engloban dentro de la categoría de suelos considerados como especiales o problemáticos; los problemas en este tipo de suelos se pueden poner de manifiesto por la propia naturaleza de estos, o bien a causa de la acción antrópica, que al implantar su actividad en estas zonas puede interferir el equilibrio natural obtenido a lo largo de millones de años, alterándolo.

La presencia de suelos expansivos ha generado una gran cantidad de problemas en obras de infraestructura, y por lo mismo se debe analizar a fondo su comportamiento.

La mayor parte de los asentamientos humanos se encuentra sobre suelos expansivos. En general, los suelos expansivos afectan principalmente a las cimentaciones, así como también a diferentes partes de la estructura provocando que la cimentación esté sometida a solicitaciones ajenas al diseño.

Los asentamientos que sufren las estructuras debido a las deformaciones que provocan los elementos de carga sobre el suelo que las soporta, fueron identificados, generalmente, como las causas de daños en las estructuras, sin embargo, las estructuras no solamente pueden presentar daños por asentamientos sino también por expansiones de los suelos.

Pero ¿Qué es un suelo expansivo?, Se considera expansivo un suelo que manifiesta, ante una modificación de su estado (de esfuerzos, de humedad, o ambos conjuntamente), un incremento de volumen (en caso de que el estado de esfuerzos así lo permita) como consecuencia de la generación de un esfuerzo vertical en su estructura interna, a este cambio volumétrico es a lo que se le llama expansión.

El agente causante que da lugar a este proceso es el agua. Los componentes del suelo que son susceptibles de manifestar procesos de expansividad son determinados tipos de minerales del grupo de las arcillas.

El proceso de expansión se produce cuando un suelo no saturado se humedece absorbiendo agua entre sus partículas y aumentando de volumen.

Este fenómeno puede ser provocado por una gran cantidad de variables, entre las más importantes, se encuentran la composición, grado de saturación y estructura del suelo. Dentro de los suelos susceptibles a experimentar cambios de volumen, son aquellos en cuya composición mineralógica se encuentran arcillas de carácter expansivo los que más problemas provocan a la hora de construir cualquier tipo de obra.

Las variables que intervienen en la composición del suelo son, por ejemplo, el tipo de material, así como el porcentaje de arcilla que pueda tener el suelo. Dentro de las variables estructurales se encuentran, el contenido de humedad, peso específico y grado de saturación, factores que en su mayoría sufren alteraciones de acuerdo con los cambios climáticos, que producen principalmente cambios en las zonas saturadas del suelo.

El estudio del comportamiento de los suelos expansivos ha sido punto principal de numerosos estudios de investigación en las últimas décadas. El fenómeno de expansión se manifiesta en condiciones ambientales que inducen cambios apreciables de humedad, además de necesitar la presencia de un suelo potencialmente expansivo. Estos suelos se caracterizan por un comportamiento singular en presencia del agua, lo que origina grandes variaciones en sus propiedades geotécnicas y movimientos superficiales de importancia.

Queda claro entonces, que, al hablar de un suelo expansivo, estamos hablando de suelos no saturados, y que por ende pueden sufrir variaciones en condiciones ambientales distintas.

Los fenómenos más característicos del comportamiento del suelo no saturado se relacionan con sus deformaciones volumétricas al modificar el grado de saturación. Estas deformaciones pueden ser tanto positivas, lo que produciría un colapso, como negativas, lo cual nos produce una expansión.

Dentro de los suelos susceptibles a experimentar cambios de volumen, son aquellos en cuya composición mineralógica se encuentran arcillas de carácter expansivo los que más problemas provocan a la hora de construir cualquier tipo de obra.

Según Aitchison (1973) (Citado por Garnica Anguas), tanto el colapso como la expansión pueden ser considerados como procesos de inestabilidad estructural, debido a que inducen discontinuidades en el comportamiento deformacional del suelo al variar las condiciones ambientales (ejemplo cambios de humedad).

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.

Donalson (1969) (citado por Beltrán Martínez) clasificó en dos grupos los materiales que pueden dar origen a los suelos expansivos. El primer grupo lo componen las rocas ígneas básicas, tales como 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 montmorillonita y otros minerales secundarios. El segundo grupo comprende las rocas sedimentarias que contienen montmorillonita como constituyente, el cual se desintegra mecánicamente para formar suelos expansivos.

Esta tesis, presenta un estudio sobre los cambios volumétricos de un suelo arcilloso no saturado con diferentes contenidos de agua, y servirá para determinar los porcentajes de expansión o colapso (según sea el caso) del suelo estudiado.

El potencial de expansión se define como el porcentaje de aumento de volumen en una muestra confinada lateralmente, la cual se satura bajo una carga, después de ser compactada a su peso volumétrico máximo en la humedad óptima, de acuerdo con la prueba AASHTO estándar y modificada.

El potencial expansivo de un suelo (presión de hinchamiento y elevación) dependen, como mínimo, de las siguientes variables:

- Naturaleza y tipo de arcilla. La composición mineralógica de la arcilla (porcentajes de illita, caolinita y montmorillonita) que está compuesto la arcilla resultan fundamentales en cuanto al potencial expansivo del suelo. Los suelos expansivos por excelencia son aquellos que tienen altos porcentajes de montmorillonita.
- Humedad inicial. El elemento “catalizador” del fenómeno de la expansión, es precisamente, la variación en el contenido de humedad del suelo. Por más montmorillonita que esté compuesta una arcilla, si no hay variación en el contenido de humedad del suelo, no habrá cambios volumétricos. No es necesario que el suelo se sature completamente para que produzca expansión de este. Por el contrario, en determinados casos, es suficiente variaciones en el contenido de humedad del suelo de sólo 1 o 2 puntos porcentuales, para causar hinchamientos y producir daños estructurales. El contenido de humedad inicial del suelo controla la magnitud del asentamiento. Arcilla “secas”, con contenido de humedad por debajo del 15 % indican un riesgo de expansión alto, pues fácilmente pueden llegar absorber contenidos de humedad de 35 % con los consecuentes daños estructurales. Por el contrario, arcillas cuyo contenido de humedad está por encima del 30 % indica que la mayoría de la expansión ya ha tenido lugar y sólo es esperable algún leve hinchamiento remanente.
- Peso específico seco del suelo Muy relacionada con la humedad inicial, el peso específico seco del suelo es otra variable fundamental en el proceso expansivo del suelo. La densidad seca de una arcilla se ve reflejada en valores altos en los resultados en el ensayo de penetración estándar. Valores de "N" inferiores a 15 indican densidades secas bajas y riesgo expansivo

bajo, aumentando significativamente estos a medida que aumenta el valor de "N".

- Características plásticas del suelo. Como ya fue explicado anteriormente las propiedades plásticas del suelo juegan un importante papel en el fenómeno expansivo
- Potencia del estrato activo. A través de ensayos de laboratorio sobre muestras de un mismo suelo, compactadas al mismo grado densidad y humedad inicial, se ha estudiado el efecto del espesor del estrato en la magnitud total del hinchamiento. Los resultados mostraron que la magnitud del cambio volumétrico experimentado es proporcional al espesor del estrato, mientras que la presión de expansión se mantiene constante. Esto nos estaría indicando que si una estructura es capaz de transmitir una presión uniforme y constante a profundidades importantes debajo de la fundación se podría contrarrestar el fenómeno de cambio volumétrico. Pero como sabemos esto no es posible, ya que, a medida que aumentamos la profundidad, la presión transmitida por la zapata de fundación disminuye y por lo tanto no constituye un método efectivo para el control de la expansión.
- Fatiga de la expansión. En muestras sometidas en laboratorio a ciclos de saturación y disecado mostraron señales de fatiga después de varios ciclos. Este fenómeno no ha sido todavía suficientemente investigado. Se ha notado en pavimentos sometidos a variaciones estacionales en el contenido de humedad de este que tienden a un cierto punto de estabilización luego de un cierto número de años

2 COMPORTAMIENTO DE SUELOS EXPANSIVOS

El comportamiento de las arcillas expansivas, así como las importantes aplicaciones de este grupo de minerales radican en sus propiedades fisicoquímicas. Dichas propiedades derivan, principalmente, de:

- Su extremadamente pequeño tamaño de partícula (inferior a 2 μm)
- Su morfología laminar (filosilicatos)
- Las sustituciones isomórficas, que dan lugar a la aparición de carga en las láminas y a la presencia de cationes débilmente ligados en el espacio interlaminar.

Los dos primeros factores conjugados producen, por una parte, un valor elevado de la superficie específica de estos materiales, y a la vez, la presencia de una gran cantidad de superficie activa, con enlaces no saturados. Por ello pueden interactuar con muy diversas sustancias, en especial compuestos polares, entre los que el más importante es el agua.

La expansividad de un suelo podría resumirse como un fenómeno provocado por la incorporación de moléculas de agua en su red cristalina, entre las cadenas de silicatos que están unidas por enlaces débiles, disminuyendo o anulando los mismos, pasando la arcilla a ocupar un mayor volumen aparente sin variar sus propiedades químicas.

Si posteriormente cambiaran las condiciones de humedad, por ejemplo, debido a una desecación continuada o a un proceso de drenaje, las moléculas de agua adsorbidas serían expulsadas de la red, produciéndose una disminución de volumen o retracción.

Por tanto, al abordar el fenómeno del comportamiento de los suelos expansivos, debe tenerse en cuenta que estamos ante un proceso reversible y condicionado por factores intrínsecos y extrínsecos al propio material.

Los suelos, aunque normalmente se encuentran sometidos a cargas externas constantes, presentan grandes cambios volumétricos debido a la pérdida o ganancia de contenido de agua.

En algunos tipos de suelos estos cambios en los contenidos de humedad pueden provocar la expansión del suelo, que al desarrollarse genera presiones efectivas que producen movimientos diferenciales del terreno, y consecuentemente genera afectaciones en las estructuras que se encuentran sobre este suelo.

Los suelos que tienen una elevada capacidad para expandirse pueden o no hacerlo, su comportamiento dependerá de la condición física del material al momento de su construcción, y de los cambios de esfuerzos y humedades a los que esté sujeto.

Los suelos potencialmente expansivos, tienen su origen debido 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) (Citado por Barrera Bucio), 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.

Puede afirmarse entonces, que la expansividad de un suelo tiene un carácter potencial dependiente de la mineralogía y la estructura del suelo, pero dicha propiedad se manifestará en mayor o menor medida dependiendo de en las condiciones climáticas existentes en la zona, en función de los rangos de variación de humedad natural que presente el suelo.

El comportamiento de los suelos no saturados puede entenderse a través de la interacción de sus tres fases, que son: los sólidos, el agua, y los vacíos.

Yoshimi y Osterberg (1963) (Citado por Barrera Bucio) resume los componentes principales de un suelo como se ve en la Fig. 1.

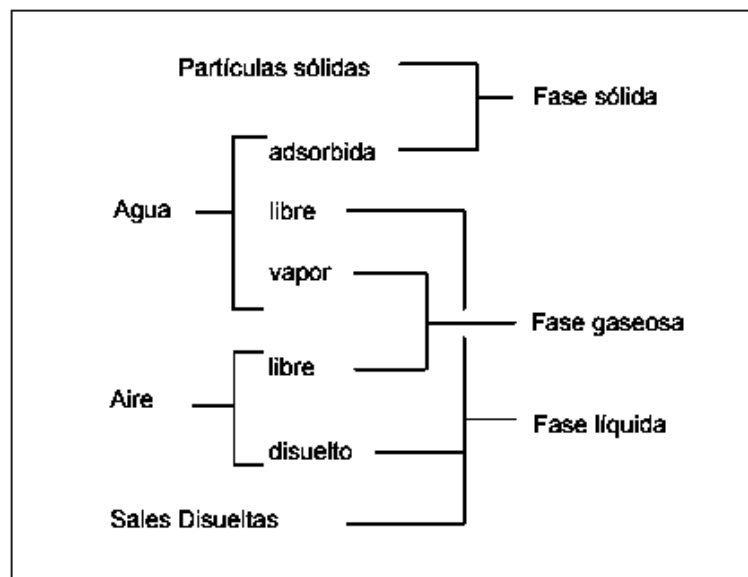


Fig. 1 Fases de un suelo no saturado según Yoshimi y Osterberg (1963)

La fase gaseosa o de vacíos se delimita por los poros del suelo que no están ocupados y que pueden ser llenados por algún líquido.

La fase líquida se compone del agua y de las sales disueltas en ella. En esta fase normalmente se incluye la capa viscosa del agua adsorbida que presenta propiedades intermedias entre la fase sólida y la líquida, debido a su susceptibilidad de desaparecer cuando el suelo se somete a un periodo de secado.

La fase sólida está constituida por granos o partículas minerales de grano fino (como limos y arcillas) y gruesas (como arenas y gravas), y es la fase que se mantendrá sin sufrir ningún tipo de variación en un suelo.

El comportamiento de un suelo no saturado implica una serie de particularidades que no pueden resolverse o justificarse con las teorías conocidas para los suelos totalmente saturados. Por ejemplo, la teoría de esfuerzos efectivos propuesta por Terzaghi no puede ser empleada para explicar el comportamiento de suelos no saturados, en específico, para explicar los cambios volumétricos en diferentes condiciones ambientales.

Un caso bastante extendido es el de la patología en edificaciones, especialmente las de pocas alturas, en las que el carácter expansivo del suelo se manifiesta de forma más evidente. Si este tipo de construcciones se cimienta bajo una capa superficial de arcillas expansivas, una diferencia de humedad entre la zona perimetral y la zona interior de la estructura puede provocar asientos diferenciales importantes, debidos a los cambios regionales de volumen del suelo.

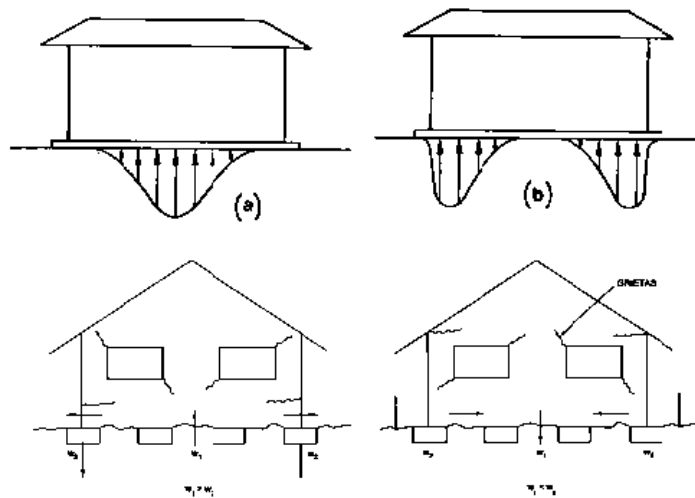


Fig. 2 Efectos de la variación superficial sobre una estructura: a) Disminución de la humedad en el perímetro de la estructura; b) Aumento de la humedad en el perímetro de la estructura (Jiménez-Salas, 1980)

Algunos suelos pueden presentar un comportamiento expansivo o colapsable, o hasta combinar ambos fenómenos en un mismo proceso de humedecimiento, esto ocurre siempre y cuando los esfuerzos y presiones externos sean lo suficientemente bajos o altos respectivamente.

La estructura interna que presentan los suelos es un aspecto de gran importancia en el comportamiento mecánico de éstos. Así, por ejemplo, bajo mismas condiciones de carga, para un suelo con una estructura abierta se produce un colapso durante el mojado del suelo, sin embargo, para el mismo suelo y

condiciones de carga, pero con una estructura más compacta se puede producir una expansión al mojarlo.

En la actualidad se considera la estructura interna del suelo, de forma simplificada, teniendo en cuenta tres tipos de elementos que son: partículas elementales, agregados de partículas, y poros (Alonso y otros autores 1987) (Citado por Buenfil Berzunza).

A partir de estos elementos se pueden establecer tres estructuras fundamentales, que simplifican el conjunto de todas las estructuras posibles. Cuando las partículas elementales están distribuidas de forma homogénea se considera una estructura de tipo matricial, con granos de arena rodeados de partículas arcillosas elementales creando una matriz.

A veces las partículas elementales están agrupadas como si fueran un grano de tamaño mayor. En este caso, se dice que hay una microestructura de agregados.

Finalmente puede considerarse una estructura de grano de arena con conectores de arcilla entre los granos, o contactos directos, sin partículas de arcilla.

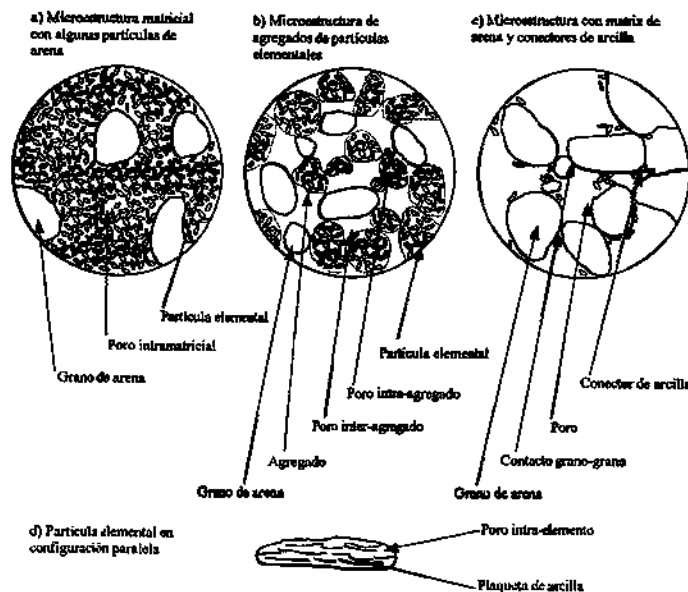


Fig. 3 Estructura del suelo (según Alonso y otros autores, 1987)

En los suelos de estructura matricial, cuando se mojan, se expanden debido al aumento de volumen de las partículas de arcilla que constituyen la matriz. Del mismo modo, cuando se le somete a un aumento de la succión, reducen su volumen. Este último fenómeno no se produce en un suelo con estructura de agregados, ya que, al aumentar la succión, también se incrementa la resistencia de los contactos entre agregados. Se reduce un poco el volumen de los agregados, pero la estructura no retrae, y la variación de volumen global es pequeña.

En los suelos expansivos, los procesos cíclicos de humedecimiento y secado provocan una expansión irrecuperable en el primer humedecimiento, y a partir de él, un comportamiento prácticamente elástico (Chu y Mou, 1973; Pousada Presa, 1982).

Alonso y otros autores (1987) (Citado por Beltrán Martínez) analizaron el comportamiento deformacional del suelo expansivo con relación a los cambios de succión. Según los autores, un aumento de la succión contribuye a un incremento de la rigidez y del grado de sobreconsolidación del suelo.

Estos aspectos han sido observados por Dudley (1970) en caso de suelos colapsables y Aitchison y Woodburn (1969) en caso de arcillas expansivas. Por otro lado, un aumento de la succión puede producir deformaciones permanentes (irrecuperables) en suelos arcillosos, según Yong y otros autores (1971) (Citado por Garniaca Anguas)

Es bien sabido por los ingenieros de suelos que las arcillas montmorillonitas 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 moléculas de agua entre ellas (adsorción). Las illitas suelen presentar una expansión menor que las montmorillonitas.

Independientemente 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 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.

No es necesaria la saturación por completo para que se presente la expansión, cambios leves de humedad de 1.5 ó 2%, pueden ser suficientes para provocar expansiones inconvenientes.

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

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

En un proceso de compactación la expansión del suelo estará directamente relacionada con el método utilizado, energía de compactación o la humedad inicial. Compactaciones por el lado seco, en general tendentes a mantener estructuras floculadas y con menores humedades, podrán producir mayor expansión y viceversa.

En un caso real de expansión del suelo el hinchamiento producido vendrá condicionado por diversos factores:

- a) Estado del terreno (tipo de suelo, condiciones iniciales, espesores de los estratos, estado de esfuerzos, sobrecarga, nivel freático).
- b) Accesibilidad del agua y condiciones climáticas (régimen de lluvias, alteraciones de la infiltración a causa de la existencia de construcciones o de la desaparición de arbolado y vegetación, rotura de tuberías).
- c) Tiempo.

Dependiendo de estos factores, la humedad del terreno podrá sufrir variaciones cíclicas con sucesivas expansiones y retracciones o, tras alguna modificación tender hacia un estado estacionario. Otro factor que considerar es la posible existencia de fisuras producidas en procesos de retracción, que modifican las condiciones de acceso del agua favoreciendo su penetración. Las modificaciones estacionales, sin embargo, afectan en general a un estrato limitado de terreno que, aunque dependiendo del clima y de las propias condiciones del terreno, llega a ser del orden de 1 a 3 m, llamado capa activa.

Con respecto a la identificación de los suelos expansivos y a la cuantificación del potencial de expansión puede encontrarse un tratamiento amplio del tema en Snethen (1984), Dhowian y otros autores (1987) o Josa (1988).

En los últimos años se han encontrado nuevas correlaciones del comportamiento del suelo con las propiedades índice (las propiedades índices son un primer acercamiento hacia los suelos y deben servir como una orientación para profundizar el estudio a través de ensayos más elaborados) sobre todo en el área de suelos no saturados poniendo un especial énfasis en aquellas relacionadas con la problemática de los suelos expansivos.

A partir de un estudio de 273 muestras de suelo inalterado Vijayvergiya y Ghazzaly (1973) (Citado por Beltrán Martínez) presentaron las siguientes correlaciones para predecir el porcentaje y la presión de expansión basados en el límite líquido, peso específico seco y el contenido de agua:

- Porcentaje de expansión

$$\text{Log } S = \frac{1}{12} (0.4LL - w + 5.5)$$

$$\text{Log } S = \frac{1}{19.5} (\gamma_d 0.65LL - 130.5)$$

Donde:

S =porcentaje de expansión

LL= límite líquido en porcentaje

ω = Contenido de agua en porcentaje

γ_d = Peso específico seco

Raman (1967) (Citado por Beltrán Martínez) basado en el índice de plasticidad y el índice de contracción obtuvo la Tabla 1 que nos presenta una estimación rápida del grado de expansión que tendrá el material.

Tabla 1 Grado de expansión en base a I_p y I_c

Índice de plasticidad, I_p %	Índice de contracción, I_c %	Grado de expansión %
>32	>40	Muy alto
23-32	30-40	Alto
12-23	15-30	Medio
<12	<15	Bajo

Ahora que se entendió el comportamiento de un suelo expansivo, es de vital importancia conocer algunas alternativas para combatir los fenómenos expansivos antes mencionados. Ante la presencia de un suelo potencialmente expansivo, las dos grandes líneas de acción serían:

- Actuar en el sentido de reducir o eliminar la expansión del suelo, para esto, las diferentes formas de acción sobre el suelo se pueden agrupar en:
 - Inundar el suelo en el sitio de manera que se produzca una expansión antes de la construcción
 - Reducir la densidad del suelo mediante un adecuado control de la compactación.
 - Reemplazar el suelo expansivo por uno que no lo sea.
 - Modificar las propiedades expansivas del suelo mediante diversos procedimientos: estabilización mediante cal, cemento, inyecciones, etc.
 - Aislar el suelo de manera que no sufra modificaciones en su contenido de humedad.
- Actuar sobre la estructura y a través de la selección de un diseño de cimentación apropiado.
En líneas generales se actúa en el sentido de rigidizar o flexibilizar de tal forma la estructura que sea capaz de absorber o adaptarse a las deformaciones resultantes. En el diseño del cimiento se tiende a una

concentración de cargas de manera que la presión transmitida al suelo sea capaz de controlar la deformación. Este punto es ampliado más adelante.

2.1 Suelos compactados

La compactación de suelos es un procedimiento por el cual se mejoran algunas propiedades mecánicas de los suelos. Mediante la aplicación de energía mecánica se reducen los vacíos que se encuentran con aire en la masa de suelo para aumentar su peso unitario. De esta forma se logra un aumento en la resistencia, en la rigidez, una mejora en la estabilidad volumétrica y una disminución de la permeabilidad del suelo. El mejoramiento mediante compactación es utilizado en rellenos artificiales para la construcción de caminos, presas, terraplenes, entre otros. También puede ser requerido en caso de cimentaciones sobre terreno natural, por ejemplo, en arenas sueltas.

El objetivo básico de la compactación de un suelo es la obtención de un nuevo material (suelo compactado) que tenga un comportamiento adecuado para su aplicación específica. La compactación genera en el suelo deformaciones permanentes que modifican sus propiedades originales causando, entre otros, los efectos siguientes:

- Densificación del suelo (aumento de la densidad seca)
- Aumento de la resistencia mecánica
- Aumento de la rigidez
- Reducción de la permeabilidad
- Reducción de la erosionabilidad

Estos son algunos de los efectos más importantes, pero también altera la estructura del suelo y modifica la anisotropía mecánica (Rico y del Castillo, 1976) (Citado por Barrera Bucio).

Las bases conceptuales del proceso de compactación de suelos son bien conocidas y derivan de la publicación pionera de Proctor (1933). Una vez definido un procedimiento y una energía de compactación, se puede verificar que la densidad alcanzada por el suelo varía con la humedad, de manera que se permite encontrar, en general, una densidad máxima u óptima para una humedad inferior a la de saturación.

El estado de compactación queda así definido por dos variables de estado: la densidad seca, γ_d , y la humedad, w .

Esta afirmación, ha permanecido a través de los años desde que Proctor lo estableciera, y es en la cual se apoyan todas las normativas y reglamentos de compactación de suelos.

Es importante, por lo tanto, conocer con más profundidad los aspectos básicos de la compactación a fin de completar la información empírica tradicional.

Tras el trabajo seminal de Proctor (1933), las interpretaciones microestructurales proporcionadas por Lambe (1958) y Seed y Chan (1959) (Citado por Eduardo Alonso) contribuyeron a crear un modelo básico de referencia para interpretar el comportamiento de los suelos compactados.

Lambe (1958) (Citado por Eduardo Alonso) postuló que en el lado húmedo de la compactación (humedades superiores al óptimo) se alcanzaban estructuras "dispersas" o "cerradas", caracterizadas por disposiciones subparalelas de las partículas de arcilla.

En el lado seco (humedades inferiores al óptimo) predominaban las estructuras "floculadas" o "abiertas" en las que las partículas de arcillas se disponían en configuraciones cara-borde, en principio más inestables frente a cambios de humedad.

De los ensayos de Proctor, se puede ver que al variar la energía de compactación se obtienen curva de similares características. Para una mayor energía, la curva se desplaza hacia arriba y hacia la izquierda, obteniéndose un mayor peso unitario y una menor humedad óptima. En la Fig. 4 se muestra el resultado de un ensayo de compactación con dos energías diferentes

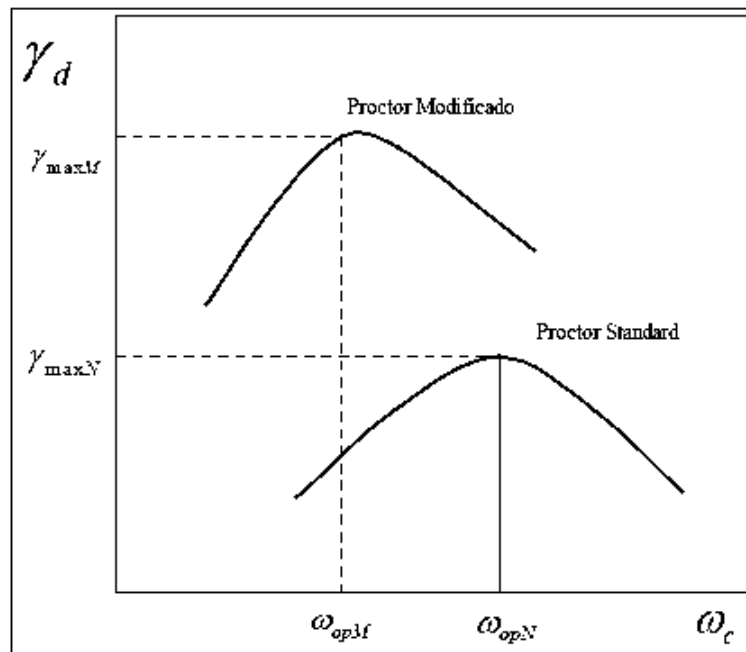


Fig. 4 Variación de γ_d con diferentes energías de compactación

La curva depende también del tipo de suelo. En el caso de suelos no cohesivos, se obtienen mayores densidades y menores humedades óptimas que en el caso de suelos cohesivos, para los cuales las curvas resultan a su vez más abiertas con mayores rangos de humedad.

Los suelos no cohesivos poseen curvas más cerradas, por lo que son más propensos a que una diferencia en la humedad de compactación resulte en una diferencia significativa en el peso unitario obtenido.

Los suelos arcillosos son propensos a sufrir cambios volumétricos. Al compactarlos con humedades inferiores a la óptima exhiben una mayor tendencia al hinchamiento dado por la mayor succión y tendencia a absorber agua. Lo contrario ocurre al compactar con humedades superiores a la óptima, el suelo tiende a sufrir contracción cuando se lo expone a pérdida de humedad.

La expansión también está relacionada con el método de compactación. Los suelos compactados con métodos estáticos tienen en general mayores expansiones que cuando son compactados con rodillos. A su vez la expansión crece casi linealmente con el aumento de la energía de compactación (Rico Castillo 2000) (Citado por Patricia Sagüés).

Basados en una evidencia indirecta (ensayos esfuerzo-deformación) Seed y Chan (1959) (Citado por Patricia Sagüés) destacaron que la estructura del suelo está muy controlada por las deformaciones de corte producidas durante el proceso de compactación. Así, propusieron que la compactación estática, que induce poca deformación de corte, conduciría a una estructura abierta, incluso en el lado húmedo, a diferencia de la compactación por golpeo o amasado.

Las contribuciones de Barden y Sides (1970), Brackley (1975) y McGown y Collins (1975) (Citado por Eduardo Alonso), entre otros, ayudaron a definir la estructura del suelo para diferentes condiciones de compactación.

En el comportamiento de los suelos compactados, existen diferentes variables involucradas, como son los cambios de humedad a través del tiempo, y los esfuerzos generados sobre el suelo.

En el caso de los cambios de humedad, sabemos que lo ideal sería que este parámetro permaneciera constante a través del tiempo, pero no es así, la humedad cambia temporal y espacialmente como respuesta a factores ambientales, y en principio se pueden distinguir dos etapas en este cambio: una etapa transitoria de equilibrio, en el que el terreno gana o pierde humedad de una forma irreversible desde su valor inicial hasta un valor final de equilibrio y una fase cíclica.

Estos cambios de humedad producen cambios volumétricos en la estructura del suelo, los suelos arcillosos son propensos a sufrir cambios volumétricos. Al compactarlos con humedades inferiores a la óptima exhiben una mayor tendencia al hinchamiento dado por la mayor succión y tendencia a absorber agua. Lo contrario ocurre al compactar con humedades superiores a la óptima, el suelo tiende a sufrir contracción cuando se lo expone a pérdida de humedad.

Los suelos compactados son suelos remodelados que han perdido su estructura original y su cementación, al menos a escala macro.

La compactación, como proceso mecánico, reduce los vacíos de ese suelo remoldeado, pero no restituye la estructura ni la cementación perdida. Para suelos remoldeados, una menor relación de vacíos está siempre asociada a un mayor ángulo de fricción interna, una mayor dilatancia y, por lo tanto, una mayor resistencia al corte, tanto drenada como no drenada.

En términos de esfuerzos totales, el grado de saturación de una muestra compactada ensayada con la humedad de compactación influye en su resistencia. La diferencia en la resistencia es causada por el ordenamiento de la estructura al compactar con humedades mayores que la óptima que genera mayores presiones neutras.

La rigidez de un suelo compactado con una humedad menor que la óptima es mayor que la que muestra el mismo suelo a la misma densidad, compactado con una humedad mayor que la óptima. Para bajas humedades, la concentración de carga en las caras de las partículas generan repulsión y tendencia al hinchamiento. A su vez la succión es alta, lo que favorece el desarrollo de una estructura desorientada.

2.2 Procedimientos experimentales para determinar el potencial expansivo de un suelo

Los suelos que contienen arcillas expansivas generalmente llegan a ser muy pegajosos cuando están húmedos y se caracterizan por grietas presentar en la superficie cuando están secos. Por lo tanto, la presencia de grietas en la superficie es usualmente un síntoma de que se tiene un suelo expansivo.

Son tres los métodos para identificar y clasificar el potencial de expansión de un suelo.

- Identificación mineralógica (método cualitativo)
- Métodos indirectos (método semicuantitativo)
- Mediciones directas (método cuantitativo)

2.2.1 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 as silícicas y las alumínicas, 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 puede estimar el potencial de expansión. Las técnicas que pueden utilizarse son:

- Difracción rayos X
- Análisis térmico diferencial
- Absorción de calor
- Análisis químico
- Microscopio electrónico.

La identificación de los minerales de la arcilla es importante, pero no es necesario 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 a definiciones concretas; el microscopio electrónico, especialmente el de barrido, no deja duda alguna en general, respecto a las partículas que contemplamos, pero el campo es tan pequeño que no permite un juicio seguro sobre el conjunto, ya que los suelos tienen casi siempre mezcla de diversas especies (Holtz y Gibbs, 1954; Juárez y Rico, 1976) (Citado por Beltrán Martínez). Por estas razones los métodos arriba mencionados deberían ser usados en combinación para evaluar cualitativamente los tipos minerales que contiene la arcilla.

2.2.2 Métodos directos

Los métodos directos que se utilizan para determinar el potencial expansivo son:

- Método USBR: desarrollado por Holtz y Gibbs (1956) (Citado por Beltrán Martínez), propusieron un cierto criterio de identificación de suelos expansivos, el cual se muestra en la Fig. 5.

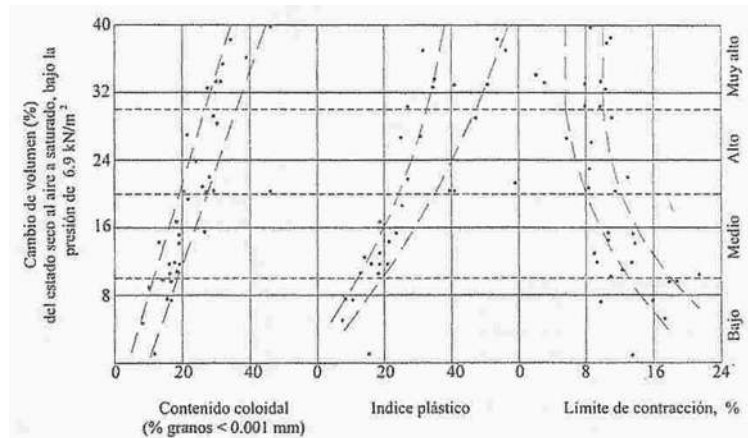


Fig. 5 Relación entre el cambio de volumen y contenido coloidal, índice plástico y límite

En base a esta imagen, Holtz y Gibbs propusieron la siguiente tabla:

Tabla 2 Método USBR

Datos de pruebas Índice			Expansión probable, % total de cambio de volumen	Grado de expansión
Contenido de coloide porcentaje menor de 0,001 mm	Índice de plasticidad	Límite de contracción		
>28	>35	<11	>30	Muy alto
20-13	25-41	7-12	20-30	Alto
13-23	15-28	10-16	10-30	Medio
>15	<18	>15	<10	Bajo

En especial debería tomarse en cuenta la diferencia que existe en el comportamiento de un suelo inalterado y un remoldeado.

- Método de la actividad: El método de la actividad fue propuesto por Seed, Woodward y Lungren y se basó en material remoldeado. La actividad se define como la relación entre el índice de plasticidad y el por ciento de granos menores de 2 micras. Seed y otros autores (1962) (Citado por Beltrán Martínez) modificaron la definición a través de la siguiente relación:

$$Actividad = \frac{\text{Índice de plasticidad}}{(\% < 0.002 \text{ mm}) - 10}$$

En la siguiente gráfica se expresa esta relación:

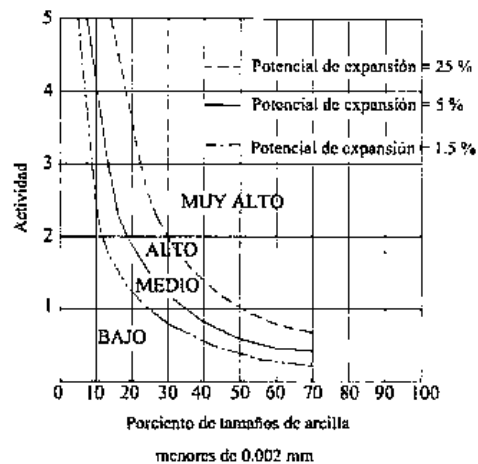


Fig. 6 Método de la actividad

2.2.3 Métodos indirectos

Por otro lado, los métodos indirectos que se utilizan para determinar el potencial expansivo son:

- Método de potencial de cambio volumétrico (PVC): La determinación del Potencial de cambio volumétrico (PVC) del suelo fue desarrollada por Lambe (1960) (Citado por Beltrán Martínez). Las muestras son primeramente compactadas en el consolidómetro de anillo fijo. Después se aplica una presión inicial y se agrega agua la muestra, la cual está parcialmente restringida de la expansión vertical por un anillo de carga. La lectura del anillo de carga se toma después de dos horas y se convierte a presión, siendo designada índice de expansión. Lambe (1960) (Citado por Beltrán Martínez) estableció las siguientes categorías:

Tabla 3 Valores de potencial de cambio volumétrico

Rango de PVC	Peligro de expansión
Menos de 2	No crítico
2-4	Marginal
4-6	Crítico
Mayor de 6	Muy crítico

El método PVC no mide en sí mismo el potencial de expansión. El verdadero potencial medido para una arcilla puede ser mucho mayor. El método del PVC puede utilizarse únicamente en forma comparativa entre varios suelos expansivos.

- Capacidad de intercambio catiónico (CEC): El CEC es la cantidad de cationes intercambiables requeridos para balancear la carga negativa sobre las partículas de arcilla. El CEC es expresado en miliequivalentes por 100 gr de arcilla seca. Altos valores de CEC indican un alto valor de Expansión. En general, el potencial de expansión se incrementa al incrementarse el CEC. Típicos valores de CEC para tres minerales básicos son los siguientes (Mitchell, 1973) (Citado por Beltrán Martínez), se muestran en la Tabla 4

Tabla 4 Valores típicos de CEC en tres minerales de arcilla

Mineral de arcilla	CEC (meq/100gr)
Caolinita	3-15
Illita	10-40
Montmorillonita	80-150

Meq= Unidad de peso equivalente o equivalente de gramos.

- Índice de Expansión libre: La prueba de Índice de expansión (ASTM D4829), Anderson y Lade, (1981) (Citado por Beltrán Martínez). En esta prueba una muestra de suelo es moldeada dentro de un anillo con un diámetro estándar de 4" (102 mm) y 1" (25 mm) de alto con un grado de saturación cerca de 50%. Una sobrecarga de 1lb/in² (6,9 kPa) es aplicada, y entonces la muestra es saturada y no se permite moverla hasta alcanzar un cierto valor o después de 24 horas. La cantidad de expansión es expresada en términos del índice de expansión, o EI, el cual es definido como:

$$EI = 1000 h F$$

Donde:

EI = índice de expansión

h = expansión del suelo

F = porcentaje de muestra por peso que pasa a través de la malla No. 4. El potencial de expansión de un suelo es clasificado de acuerdo con el índice de expansión como sigue:

Tabla 5 Potencial de expansión

Índice de expansión, EI	Potencial de expansión
0-20	Muy bajo
21-50	Bajo
51-90	Medio
91-130	Alto
>130	Muy alto

2.3 Ensayos para medir la expansión

Actualmente, la detección y caracterización geotécnica de suelos expansivos se fundamenta en la determinación in situ de sus propiedades que, en lo que a potencialidad expansiva se refiere, se materializan en la realización de ensayos de presión de expansión en laboratorio.

Dado que la expansividad se produce exclusivamente en suelos arcillosos, y que es precisamente en este tipo de suelos en los que es factible la toma de muestras inalteradas de buena calidad, los procedimientos de estudio del fenómeno se basan en la realización de ensayos de laboratorio que reproducen el comportamiento del material ante las variaciones de la humedad.

Los ensayos de valoración de la expansión más usuales consisten en la colocación de la muestra en una célula edométrica convencional y determinar bien el cambio de volumen, o bien la presión de expansión que manifiesta la muestra como resultado de la humectación de esta, provocada por la inundación de la célula.

Estos métodos consisten en medir la expansión del suelo al saturarlo bajo diferentes condiciones de carga, graficándose las variaciones de expansión para diferentes presiones aplicadas.

En este grupo se pueden incluir principalmente tres ensayos: expansión libre, presión de expansión y ensayo edométrico. Son, indudablemente, los más precisos y completos ensayos de laboratorio, pero tienen el inconveniente de no estar normalizados, por lo que la interpretación de los resultados, si no se especifican con detalle todos los pormenores del ensayo, es propensa a confusiones.

Lambe (1958) describe que los dos parámetros que definen el potencial de expansión son:

- Presión de expansión (PS). Definida como la presión aplicada en laboratorio sobre una muestra de suelo expansivo para que, una vez en contacto con agua, la probeta mantenga constante su volumen inicial, es decir que la variación de volumen sea nula.

Mide la máxima presión que registra una muestra de suelo inalterada introducida en un molde edométrico.

El ensayo de “determinación de la presión máxima de expansión” impide precisamente esta expansión vertical, al aplicar el esfuerzo vertical necesario para compensar dicha expansión. De este modo, se obtiene la presión máxima que el suelo transmite a la cimentación en condiciones de confinamiento lateral y vertical.

El procedimiento de esta prueba implica la saturación de la muestra dentro del consolidómetro mientras se previene la expansión de esta. La presión de expansión es registrada como el esfuerzo máximo aplicado para mantener el volumen constante. Una vez que la presión de expansión se detiene, después de haber humedecido el suelo, la muestra se puede recuperar eliminando las cargas por completo o paulatinamente. Alternativamente la muestra puede ser cargada más allá de la presión de expansión y descargada siguiendo la prueba de consolidación convencional.

La idealización de los resultados esperados con esta prueba se muestra en la Fig. 7

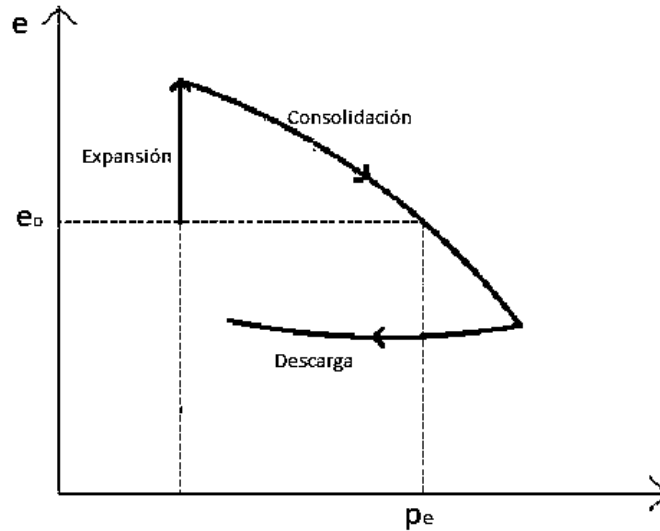


Fig. 7 Resultados de ensayo de presión de expansión

En la Fig. 7 el valor de p_e representa la presión de expansión determinada.

- Expansión libre (H_c). Definido como el porcentaje (%) de la elevación máxima para presión nula en relación con la longitud inicial de la probeta. El ensayo de “expansión libre” se trata de una variante del ensayo anterior, consiste en la humectación del suelo permitiendo la expansión vertical de la probeta en la célula edométrica, determinando así su incremento porcentual de volumen.

Ambos ensayos se realizan sobre muestras inalteradas del terreno, partiendo de la humedad que se estime más adecuada, bien sea la humedad original del suelo (que frecuentemente se encontrará en la zona saturada, es decir, con una humedad superior al límite de retracción), o bien a una humedad inferior a la original, caso en el cual se evaluarán unas condiciones más desfavorables a las presentes en el terreno, si las mismas se consideran probables.

Las medidas de estos parámetros se realizan fundamentalmente mediante pruebas edométricas o en técnicas basadas en la succión, tendiendo a simular los factores relevantes que sigue el fenómeno cuando se desarrolla in situ. Para lograr este objetivo se han propuestos innumerables metodologías experimentales que siguen operativas diferentes.

Las principales divergencias radican en:

- Forma de simular las condiciones de campo en el edómetro
- Tamaño y forma de la muestra
- Valor de la humedad inicial del ensayo
- Magnitud de la precarga y secuencias de cargas
- Momento de saturación
- Mecanismos para medir la expansión.
- Número de muestras que intervienen en el ensayo

3 CASO DE ESTUDIO

3.1 Muestreo en campo

El muestreo del suelo se realizó en la zona del residencial Tres Marías ubicado en la ciudad de Morelia, Michoacán. En la Fig. 8 se presenta la zona del muestreo del suelo que fue utilizado en los ensayos de esta tesis.



Fig. 8 Muestreo en campo

En la Fig. 9 se muestra el proceso de secado y de homogenización del suelo recién muestreado. Este procedimiento se realizó con la finalidad de eliminar el máximo posible de la materia vegetal que pudiera contener.



Fig. 9 Eliminación de materia vegetal

De esta forma se culmina con la etapa de muestreo y se procede a realizar las pruebas de caracterización del suelo.

3.2 Caracterización general de la arcilla en laboratorio

Una vez seleccionado el material que se utilizó en esta tesis, se le realizaron diferentes pruebas para obtener información acerca de sus propiedades físicas. Con estas pruebas de caracterización, se logró identificar plenamente el tipo de suelo que se tiene, lo cual es importante para determinar el tipo de prueba y energía que se utilizó para medir su expansión.

Las pruebas que se realizaron fueron:

- Límites de consistencia
- Densidad de sólidos
- Compactación Proctor estándar
- Compactación Proctor modificada

A continuación, se presenta una breve descripción del ensayo realizado, así como los resultados obtenidos en laboratorio.

3.2.1 Determinación de los límites de consistencia

Los límites de consistencia, también conocidos como límites de Atterberg, consisten en determinar el límite líquido (LL), el límite plástico (LP), y el índice de plasticidad (IP).

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 ensayo se realizó de acuerdo con el manual M-MMP-1-07/07, el cual nos indica el procedimiento y las especificaciones que se tienen que seguir para determinar dichos límites.

Una vez realizado el ensayo de los límites, se utilizó la carta de plasticidad, para de esta forma clasificar el tipo de suelo que se estudió en los ensayos de expansión posteriores.

3.2.1.1 Límite líquido

Se entiende por límite líquido, la humedad que tiene un suelo amasado con agua y colocado en una copa Casagrande, cuando el surco realizado con un acanalador que divide esta masa en dos mitades se junta a lo largo de su fondo en una distancia de 13 mm.

En la Fig. 10 se muestra el suelo en la copa Casagrande durante la realización del ensayo.



Fig. 10 Suelo en copa Casagrande

Una vez que se culminó el ensayo en la copa Casagrande, se debe de pesar una pequeña porción de suelo, preferentemente de la parte donde se realizó la ranura, como se muestra en la Fig. 11



Fig. 11 Pesaje de suelo para límite líquido

Una vez realizado el ensayo con el procedimiento que se mostró en las Fig. 10 y Fig. 11, se obtuvieron los resultados que se muestran en la Tabla 6

Tabla 6 Límite líquido

LÍMITE LÍQUIDO										
Prueba No	Cápsula No.	Número de golpes	Peso cápsula + suelo húmedo (gr)	Peso cápsula + suelo seco (gr)	Peso del agua (gr)	Peso de la cápsula (gr)	Peso del suelo seco (gr)	Contenido de agua (W) (%)	LL	LL promedio
1	4	13	28.8	19.9	8.9	10	9.9	89.9	83.1	82.8
2	42.A	18	29.2	19.4	9.8	8.2	11.2	87.5	84.1	
3	28	23	31.2	22.4	8.8	11.8	10.6	83.0	82.2	
4	11	28	28.8	20.4	8.4	10	10.4	80.8	81.9	

3.2.1.2 Límite plástico

El límite líquido, determina el contenido de agua para el cual un rollito de suelo se rompe al alcanzar un diámetro de 3 mm.

En la Fig. 12 se muestra la realización del ensayo para obtener el límite plástico del suelo, se aprecia cómo se elaboran los rollitos de 3 mm que se exigen en el manual antes mencionad



Fig. 12 Ensayo de límite plástico

Al igual que en la obtención del límite líquido, se deben de pesar los rollitos que se elaboraron, como se muestra en la Fig. 13. Sin embargo, es importante señalar que este peso debe de ser tomado justo en el momento que cada rollito se puede romper en dos partes con facilidad, esto nos indica que el suelo a perdido su humedad y está en su límite de plasticidad.



Fig. 13 Pesaje para obtener límite plástico

Una vez realizadas las pruebas, con el procedimiento mostrado en las Fig. 12 y Fig. 13 se procede a obtener los resultados, para poder realizar la clasificación del suelo, como se muestra en la Tabla 7.

Tabla 7 Límite plástico

LÍMITE PLÁSTICO								
Prueba No	Cápsula No.	Peso cápsula + suelo húmedo (gr)	Peso cápsula + suelo seco (gr)	Peso del agua (gr)	Peso de la cápsula (gr)	Peso del suelo seco (gr)	Contenido de agua (W) (%)	LP promedio
1	36	17	14.6	2.4	8	6.6	36.4	35.9
2	39	22	18.4	3.6	8.4	10	36.0	
3	44	20.8	18.4	2.4	11.6	6.8	35.3	

Finalmente, una vez que se tiene el límite líquido y el límite plástico, se procede a utilizar la carta de plasticidad mostrada en la Fig. 14 para determinar el tipo de suelo que se tiene.

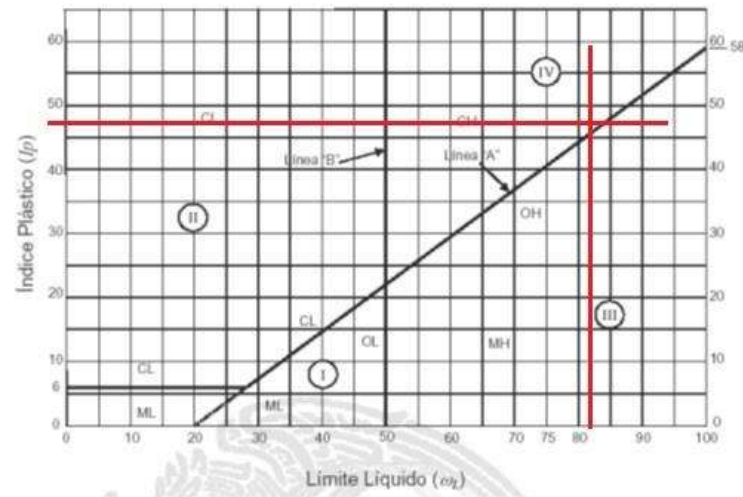


Fig. 14 Carta de plasticidad

De la Fig. 14 se puede observar, que estas pruebas permitieron determinar el tipo de suelo al cual se le hicieron pruebas para obtener los porcentajes de expansión. De acuerdo con el SUCS, este suelo será clasificado como un CH, que indica que se tiene una arcilla de alta plasticidad, con un potencial expansivo alto.

3.2.2 Densidad de sólidos

La densidad de sólidos, también llamada peso específico relativo de sólidos, se define como la relación que existe entre el peso de los sólidos, y el peso del volumen del agua desalojado por los mismos.

El Peso específico relativo de los sólidos es una propiedad índice que debe determinarse a todos los suelos. Debido a que este valor interviene en la mayor parte de los cálculos relacionados con la mecánica de suelos, y en específico se utilizó para cálculos posteriores en las pruebas de expansión de esta tesis. Una de las aplicaciones más comunes de la densidad de sólidos (S_s), es en la obtención del volumen de sólidos, cuando se calculan las relaciones gravimétricas y volumétricas de un suelo.

Para realizar este ensayo, se utiliza un matraz en el que se colocan 50 gramos de suelo, se debe de calentar a baño maría, como se muestra en la Fig. 15



Fig. 15 Muestra en el matraz

Una vez que se tiene la muestra a una temperatura adecuada, se debe de pesar el matraz, y tomar la temperatura de la muestra, este proceso se muestra en la Fig. 16



Fig. 16 Pesaje de matraz con muestra de suelo y agua destilada

Finalmente, se debe de poner la muestra en una cazuela de cristal y meterse al horno de secado, como se muestra en la Fig. 17, este peso obtenido, es importante para la elaboración de los cálculos y la posterior obtención de resultados del ensayo.



Fig. 17 Muestra de suelo seco final

El procedimiento mostrado en las imágenes anteriores nos permite obtener los datos necesarios para determinar los resultados del ensayo. Estos resultados y la forma de obtenerlos se muestran en seguida.

Se realizaron dos pruebas diferentes, esto con la finalidad de poder comparar los resultados.

Para realizar los cálculos, se obtuvo la ecuación de calibración de los matraces utilizados.

Para el matraz numero 7 la ecuación es: $y = -0.0017x^2 - 0.0195x + 685.62$

Para el matraz numero 15 la ecuación es: $y = -0.0027x^2 + 0.0223x + 687.82$

Con las ecuaciones anteriores se obtuvieron los cálculos mostrados en la Tabla 8

Tabla 8 Cálculos densidad de sólidos

Prueba No.	1	2
Matraz No.	7	15
W _{fsw}	712.4	714.8
Temperatura	21	24
W _{fs}	684.46	686.8
Capsula de evaporación	3-A	8
Peso cápsula muestra seca (g)	806.8	702.2
Peso cápsula (gr)	761.8	657.2
W _s (gr)	45	45
S _s	2.64	2.65

Como se ve en la Tabla 8 el resultado obtenido es de 2.65.

Este valor de S_s determinado, se utilizó en los cálculos de las pruebas de expansión posteriores de esta tesis.

3.2.3 Pruebas de compactación

El ensayo de compactación de suelos Proctor es utilizado para obtener índices para evaluar la capacidad de soporte de los suelos. Esto se logra mediante su compactación por medios mecánicos, disminuyendo la cantidad de vacíos, y manteniendo el contenido de humedad relativamente constante.

El ensayo Proctor puede ser de dos tipos, dependiendo de la energía aplicada para la compactación del suelo, puede ser Proctor Estándar o Modificado.

Como parte de la caracterización del suelo, se realizaron pruebas de compactación, mediante el ensayo Proctor en sus dos variantes, estándar y modificada.

El ensayo se realizó de acuerdo con el manual M-MMP-1-09/06, el cual nos indica el procedimiento que se debe de seguir para la realización del ensayo. Así como también nos establece las diferentes especificaciones para cada una de las variantes que existen de dicho ensayo.

3.2.3.1 Ensayo Proctor estándar

La prueba Proctor estándar se realizó utilizando la variante A que se establece en el manual M-MMP-1-09/06. Esta variante de la prueba nos otorga una energía de compactación menor que la que se tiene en la prueba modificada.

Las pruebas se realizaron cambiando el contenido de agua, y manteniendo un volumen de suelo constante.

En la Fig. 18 se realiza la homogenización del suelo y el agua agregada previamente determinada, este proceso se realizó varias veces, todas con un contenido de agua diferente, como se mencionó en el párrafo anterior.



Fig. 18 Homogenización de la muestra variante estándar

Una vez realizado el proceso de compactación, se debe de enrasar la muestra y registrar el peso del suelo y el molde, como se muestra en la Fig. 19



Fig. 19 Pesaje de muestra y molde variante estándar

Enseguida se debe de sacar una muestra pequeña del corazón de la muestra, se registra el peso de esta porción de suelo, y se lleva al horno de secado, este proceso se muestra en la Fig. 20

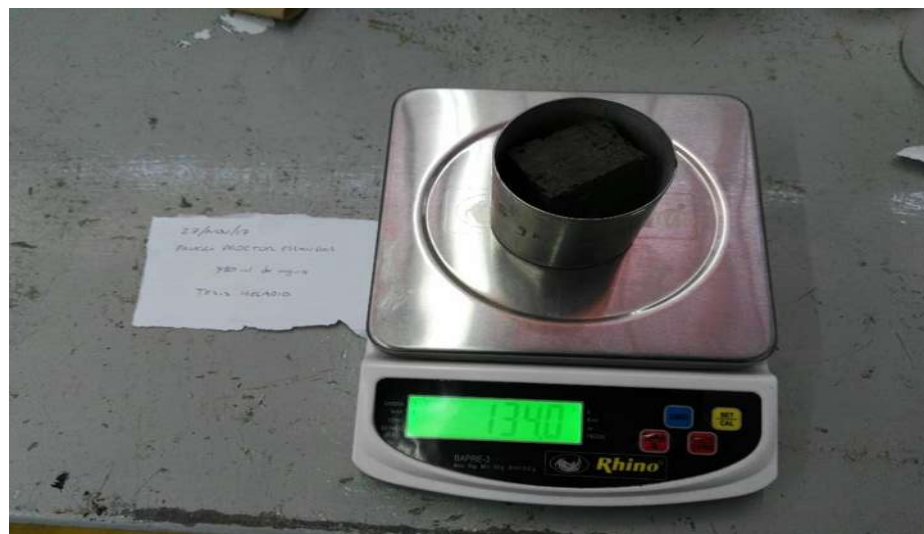


Fig. 20 Pesaje de muestra variante estándar

De las pruebas de compactación estándar realizadas, se obtuvieron resultados mostrados en la Tabla 9. Los cuales fueron utilizados para elaborar la gráfica de compactación, y de esta manera obtener las condiciones de humedad que se representaron durante los ensayos de expansión.

Tabla 9 Cálculos de Proctor Estándar Variante "A"

PRUEBA No.	1	2	3	4	5
	120 ml	180 ml	240 ml	300 ml	360 ml
Peso molde + suelo húmedo (gr)	3295	3395	3478	3519	3548
Peso molde (gr)	1968	1968	1968	1968	1968
Peso suelo húmedo (gr)	1327	1427	1510	1551	1580
Peso específico húmedo (gr/cm ³)	1.43	1.54	1.63	1.67	1.70
Cápsula No.	3	3	68	20	3
Peso cápsula + suelo húmedo (gr)	122.6	139.2	172.8	201.1	240.5
Peso cápsula + suelo seco (gr)	109.6	117.7	143.6	155.3	180.7
Peso del agua (gr)	13	21.5	29.2	45.8	59.8
Peso de cápsula (gr)	22	22	32.2	23.8	22
Peso suelo seco (gr)	87.6	95.7	111.4	131.5	158.7
Contenido de agua (%)	14.840	22.466	26.212	34.829	37.681
Peso específico seco (gr/cm ³)	1.122	1.255	1.288	1.239	1.114

Finalmente, como se mencionó anteriormente, los resultados mostrados en la Tabla 9, nos permiten elaborar una gráfica de compactación, como la mostrada en Fig. 21

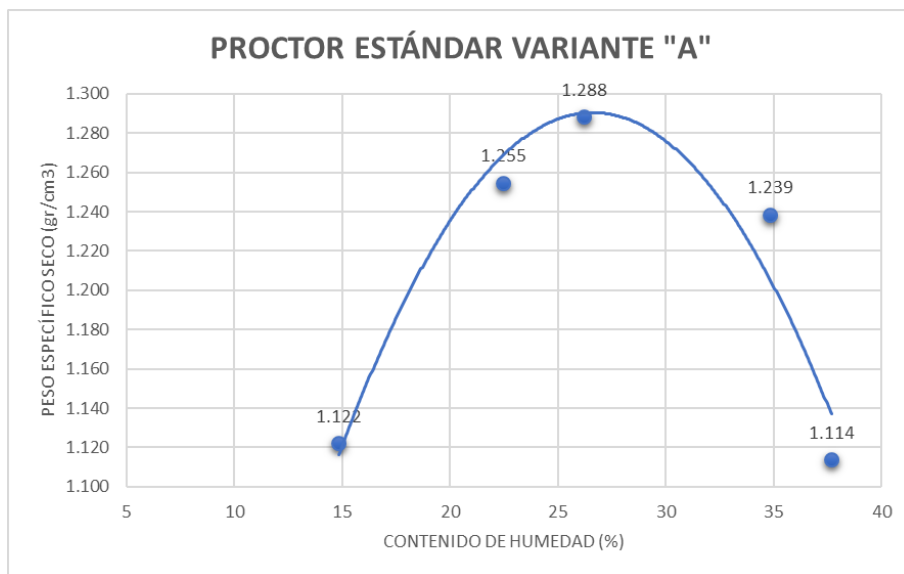


Fig. 21 Compactación energía Estándar

3.2.3.2 *Ensayo Proctor modificada*

La prueba Proctor modificada, se realizó utilizando la variante A que se establece el manual M-MMP-1-09/06. Esta variante nos proporciona una mayor energía de compactación que la prueba estándar.

Las pruebas se realizaron cambiando el contenido de humedad, y manteniendo un volumen de suelo constante.

El proceso del ensayo modificado es muy similar al de la variante estándar, se debe de ir variando los contenidos de humedad con cada ensayo realizado. En la Fig. 22 se muestra el proceso de homogenizado de la muestra, para integrar por completo el suelo con el contenido de agua.



Fig. 22 Homogenización de muestra variante modificada

Una vez que se ha homogenizado la muestra de suelo, se realiza el proceso de compactación manual con ayuda de un pisón y un molde de dimensiones conocidas, después se debe de enrasar y registrar el peso de la muestra y el molde, este proceso se muestra visualmente en la Fig. 23



Fig. 23 Pesaje de muestra y molde variante modificada

Enseguida, al igual que en la variante estándar, se obtiene una parte representativa de la muestra en el molde (lo más al centro posible) para registrar su peso húmedo, esta porción se deja en el horno de secado durante 24 horas y se registra el peso seco. Estos datos se utilizaron en la elaboración de los cálculos para la obtención de los resultados del ensayo.

En la Fig. 24 se muestra el momento en el que se realizó el procedimiento descrito en el párrafo anterior.



Fig. 24 Pesaje de la muestra variante modificada

De las pruebas de compactación estándar realizadas, se obtuvieron resultados mostrados en la Tabla 10

Tabla 10 Cálculos de Proctor modificada variante "A"

PRUEBA No.	1	2	3	4	5	6	7
	240	300	360	1020	1320	1620	1920
Peso molde + suelo húmedo (gr)	9676	9981	10392	11062	10905	10666	10485
Peso molde (gr)	5047	5047	5047	5047	5047	5047	5047
Peso suelo húmedo (gr)	4629	4934	5345	6015	5858	5619	5438
Peso específico húmedo (gr/cm ³)	1.415	1.509	1.634	1.839	1.791	1.718	1.663
Cápsula No.	-	-	-	-	-	-	-
Peso cápsula + suelo húmedo (gr)	298.3	315	363	438.2	491.8	441	551.4
Peso cápsula + suelo seco (gr)	280	296	329.4	373	406.8	357.4	428.6
Peso del agua (gr)	18.3	19	33.6	65.2	85	83.6	122.8
Peso de cápsula (gr)	141	170.2	141	141	170.2	141	170.2
Peso suelo seco (gr)	139	125.8	188.4	232	236.6	216.4	258.4
Contenido de agua (%)	13.165	15.103	17.834	28.103	35.926	38.632	47.523
Peso específico seco (gr/cm ³)	1.251	1.311	1.387	1.436	1.318	1.239	1.127

Finalmente, los resultados mostrados en la Tabla 10, nos permiten elaborar una gráfica de compactación, como la mostrada en Fig. 25

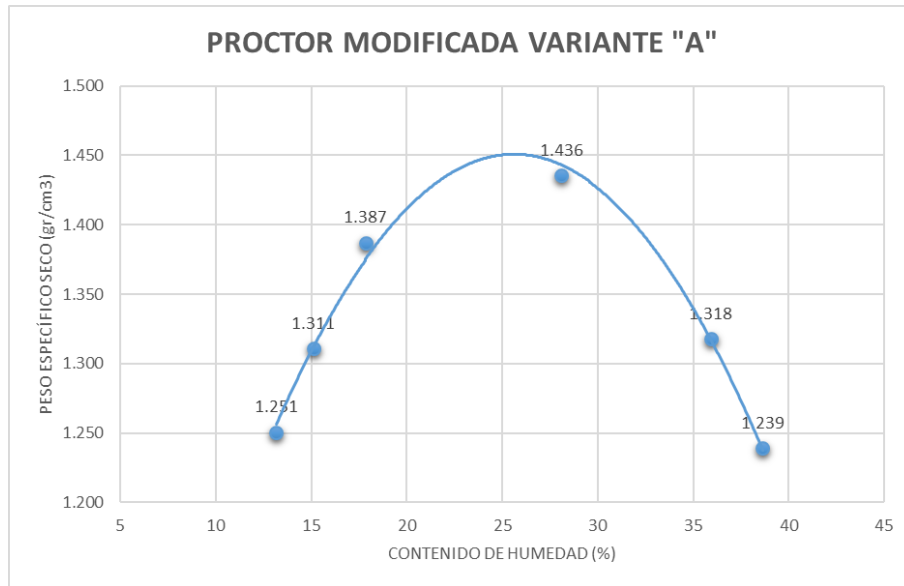


Fig. 25 Compactación energía modificada

3.3 Ensayos de expansión

Una vez realizados los ensayos de caracterización del material vistos en el capítulo 3.2 de esta tesis, se tiene la información necesaria para hacer las pruebas de expansión en el suelo.

De las pruebas de compactación vistas en el capítulo 3.2.3, se determinó realizar 6 ensayos diferentes, en los cuales se representaron diferentes condiciones de contenido de humedad, así como de diferentes energías de compactación.

Estos ensayos, se realizaron atendiendo la norma D3877-02 y D4546-03 del manual ASTM.

Estas dos normas, nos determinan los procedimientos necesarios para la correcta elaboración de los ensayos. El procedimiento es el siguiente:

Se prepara una muestra de suelo con ciertas condiciones de humedad y compactación previamente determinadas. Se moldea la muestra y se deja un día en un cuarto húmedo para permitir la estabilidad de la muestra. Después, se labra de tal forma que se pueda colocar en el anillo en el cual se montará la muestra. El ensayo comienza aplicando una carga de 1 kg (la cual nos entrega un esfuerzo de 0.5093 kg/cm^2) y se deja consolidar por 24 horas. Enseguida viene la etapa de expansión, esta consiste en saturar la muestra con la misma carga de 1 kg y dejar que se estabilice. Finalmente, una vez que alcanzó el máximo de su expansión, se comienza a incrementar la carga para permitir la consolidación del suelo.

Las condiciones elegidas para cada ensayo son las siguientes:

- Muestra 1: $\gamma_d=1.2 \text{ gr/cm}^3$ con $w=18\%$
- Muestra 2: $\gamma_d=1.2 \text{ gr/cm}^3$ con $w=25\%$
- Muestra 3: $\gamma_d=1.2 \text{ gr/cm}^3$ con $w=35\%$
- Muestra 4: $\gamma_d=1.4 \text{ gr/cm}^3$ con $w=15\%$
- Muestra 5: $\gamma_d=1.4 \text{ gr/cm}^3$ con $w=25\%$
- Muestra 6: $\gamma_d=1.4 \text{ gr/cm}^3$ con $w=35\%$

A continuación, se presentan algunas imágenes de la elaboración de los ensayos en el laboratorio.

En la Fig. 26 se muestra la elaboración de una muestra remoldeada, la cual será labrada de tal manera, que sea útil para realizar un ensayo de expansión.



Fig. 26 Preparación de remoldeada

En la Fig. 27 se muestra una muestra remoldeada elaborada, se ve envuelta en plástico, esto se hace con la finalidad de la muestra pierda la menor cantidad de humedad posible y mantenga las condiciones en el momento de la realización del ensayo. En los ensayos de expansión efectuados, se decidió dejar la muestra un día en el cuarto húmedo para que se estabilizara la muestra remoldeada.



Fig. 27 Remoldeada de muestra

En la Fig. 28 se puede apreciar el labrado de la muestra, esta parte del ensayo es fundamental, debido a que se debe de hacer cuidadosamente para no dañar la remoldeada. Es importante señalar que, durante el labrado de la muestra, esta debe de ocupar completamente el anillo que servirá para el ensayo de expansión, ya que de esta forma se garantiza un volumen inicial que sirve de base para el análisis del porcentaje de expansión del suelo.



Fig. 28 Labrado de muestra

En la Fig. 29 se muestra el equipo que se utiliza para realizar el ensayo de expansión. Este consolidómetro difiere de los consolidómetros tradicionales, debido a que este permite la expansión vertical de la muestra, lo cual es básico para el desarrollo del ensayo.



Fig. 29 Colocación de muestra en anillo de consolidación

En la Fig. 30 se muestra el equipo que se utilizará para realizar el ensayo, el equipo principal es el equipo controls (lado izquierdo de la imagen).

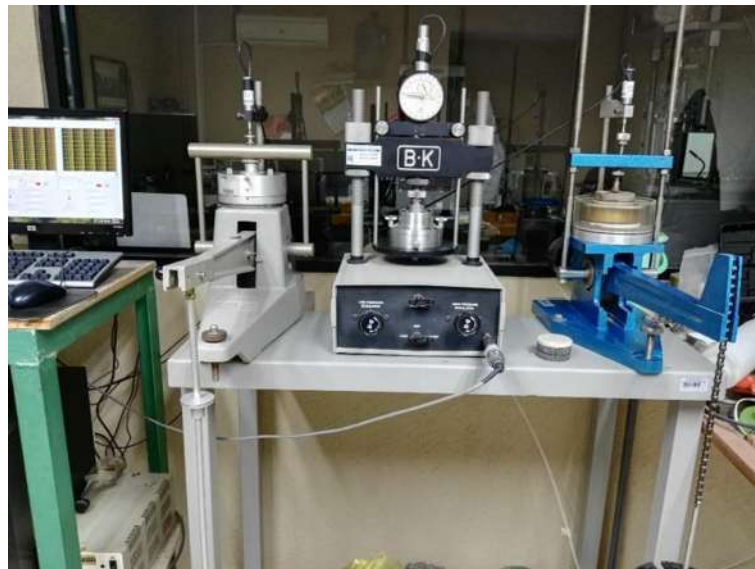


Fig. 30 Equipo de consolidación

En la Fig. 31 se muestra la aplicación de la primera carga de la prueba, esta carga ira aumento a medida que avanza la prueba, como ya se explicó anteriormente durante la descripción del procedimiento que se sigue para este ensayo.



Fig. 31 Aplicación de carga

En la Fig. 32 se puede ver el momento en el que se realiza la saturación de la muestra de suelo, es durante esta etapa del ensayo, en la que se presenta la expansión de la muestra. Es importante señalar que la muestra de suelo se debe de mantener completamente saturada durante el desarrollo de toda la prueba, de lo contrario, el ensayo no será correcto.



Fig. 32 Saturación de la muestra

En la Fig. 33 se presenta una captura de pantalla de la gráfica que se forma durante la etapa de expansión de la prueba descrita en la Fig. 32. Se puede ver que la deformación unitaria nos da lecturas en el sentido contrario, esto es debido a que la ecuación que define la curva programada en el archivo está en sentido inverso.



Fig. 33 Gráficas en el programa LabView

La Fig. 34 muestra la etapa del ensayo posterior a la aplicación de cargas, que es el pesaje de la muestra. Se debe de secar superficialmente la muestra y registrar el peso húmedo del anillo y el suelo, este dato nos servirá para la realización y obtención de los resultados del ensayo.



Fig. 34 Pesaje de muestra y anillo

Finalmente, se deja la muestra dentro del horno de secado durante 24 horas, y se registra el peso seco de la muestra. Esta etapa del ensayo se muestra en la Fig. 35.



Fig. 35 Peso seco de muestra y anillo

Una vez que se realizaron los ensayos, se deben registrar algunos pesos del material, tanto seco como húmedo, para poder realizar los cálculos necesarios. En la Tabla 12, Tabla 13, Tabla 14, Tabla 15, Tabla 16, Tabla 17, se presentan los cálculos realizados.

Estas tablas se pueden ver en la sección de ANEXOS al final de esta tesis.

Finalmente, con los cálculos realizados, se realizan las gráficas que a continuación se presentan. Estas graficas constituyen el objetivo principal de esta tesis, y resumen los resultados obtenidos con los ensayos realizados.

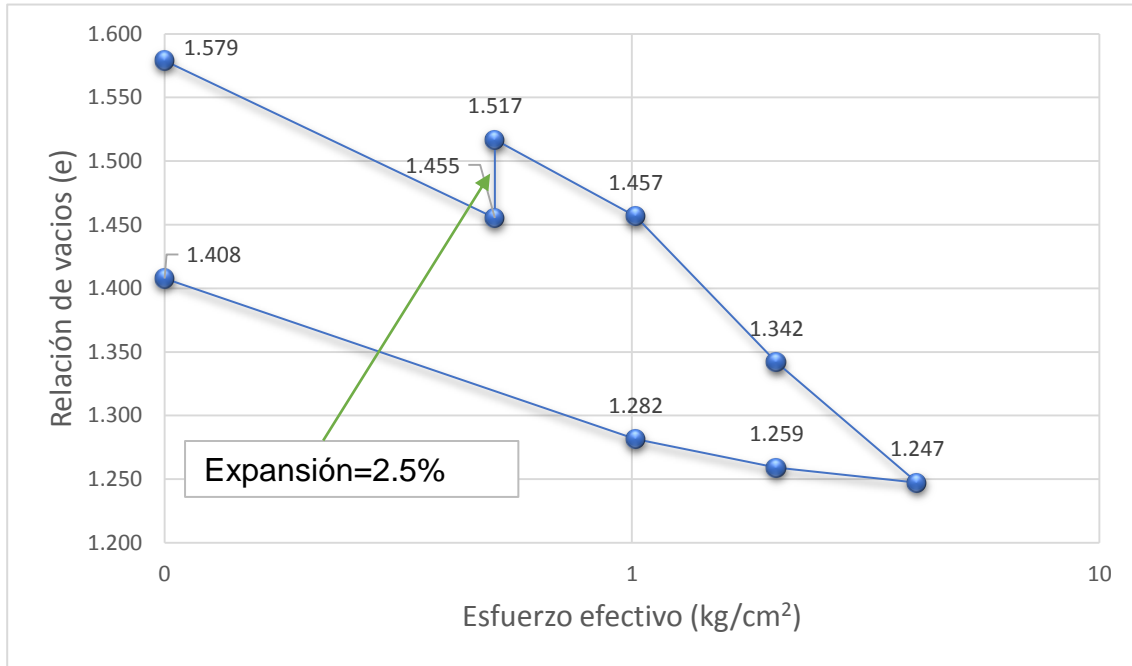


Fig. 36 Muestra con $w=18\%$ y $\gamma_d=1.2 \text{ gr/cm}^3$

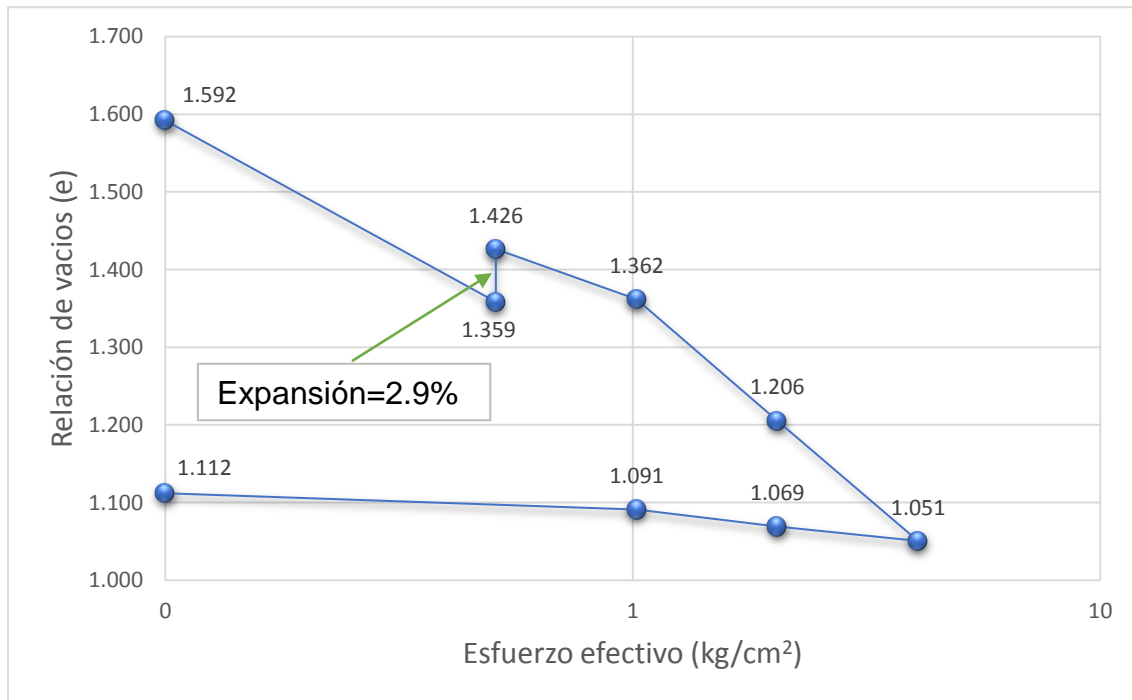


Fig. 37 Muestra con $w=25\%$ y $\gamma_d=1.2 \text{ gr/cm}^3$

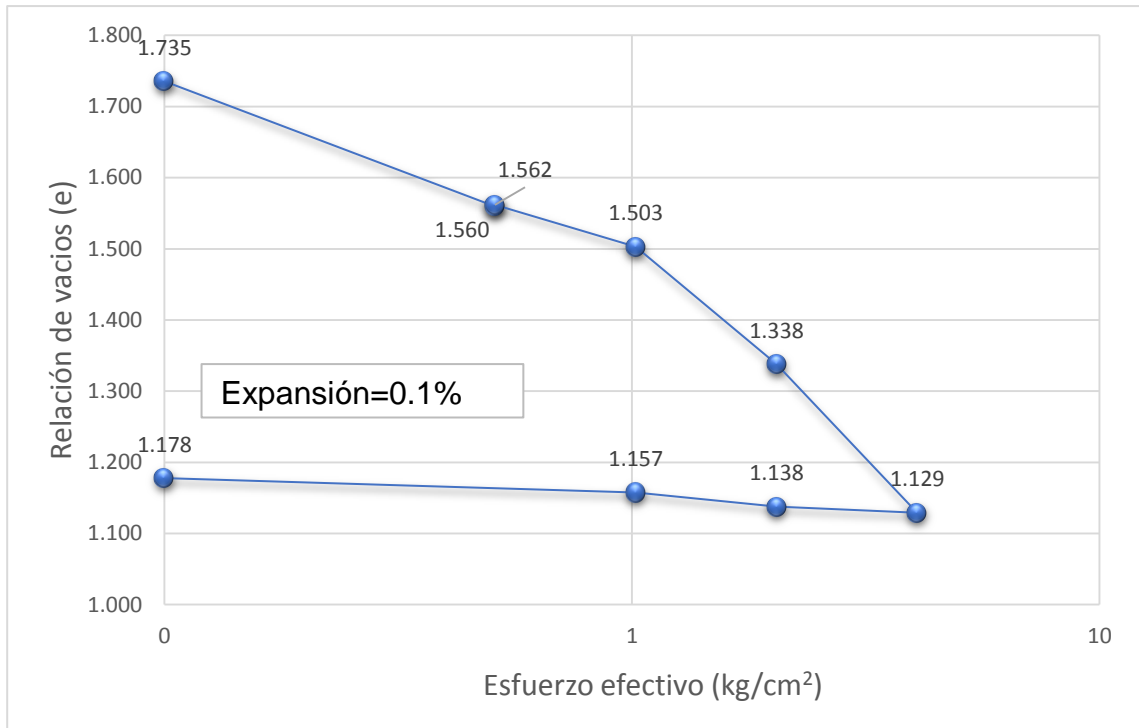


Fig. 38 Muestra con $w=35\%$ y $\gamma_d=1.2 \text{ gr/cm}^3$

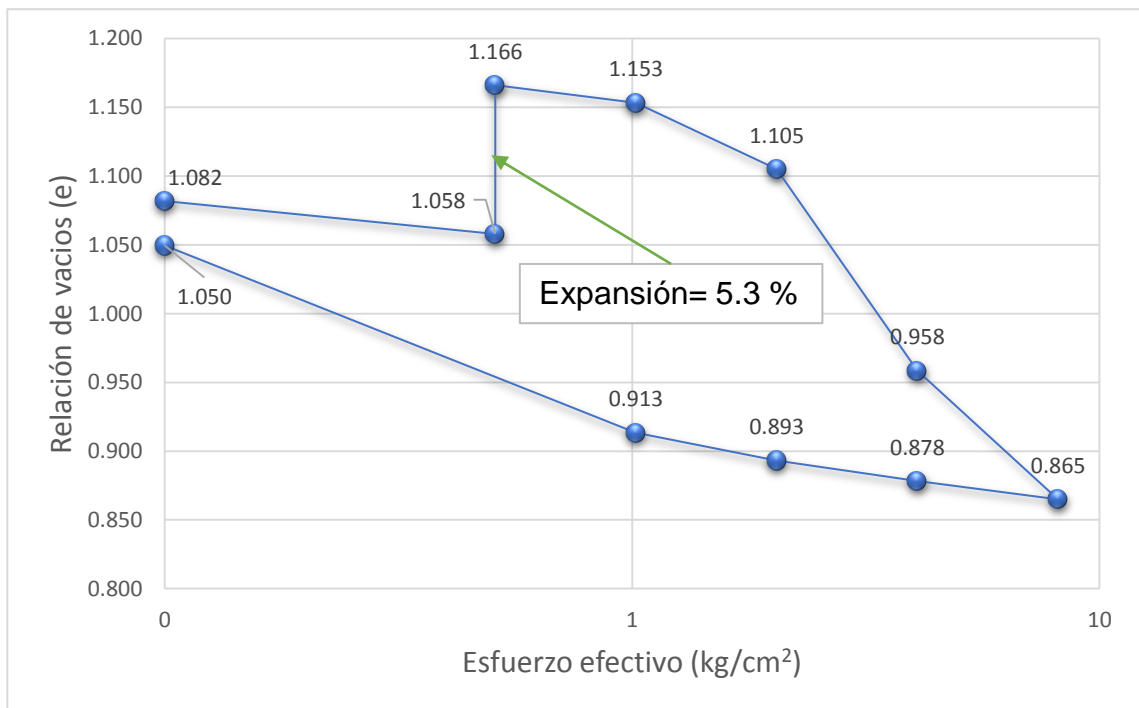


Fig. 39 Muestra con $w=15\%$ y $\gamma_d=1.4 \text{ gr/cm}^3$

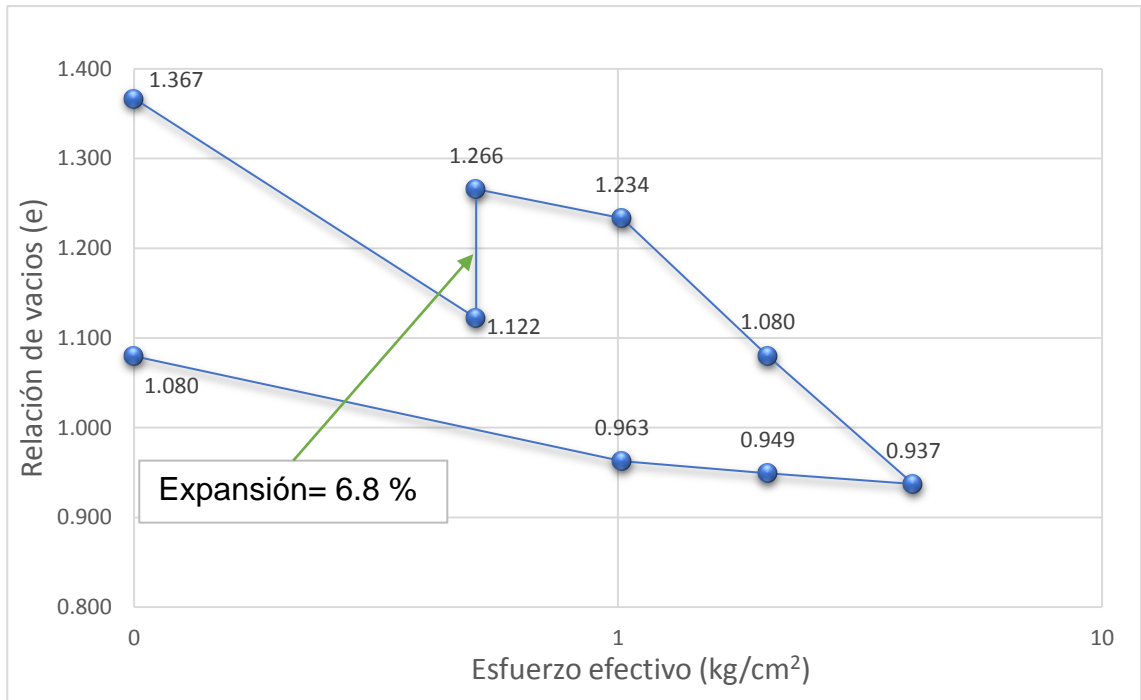


Fig. 40 Muestra con $w=25\%$ y $\gamma_d = 1.4 \text{ gr/cm}^3$

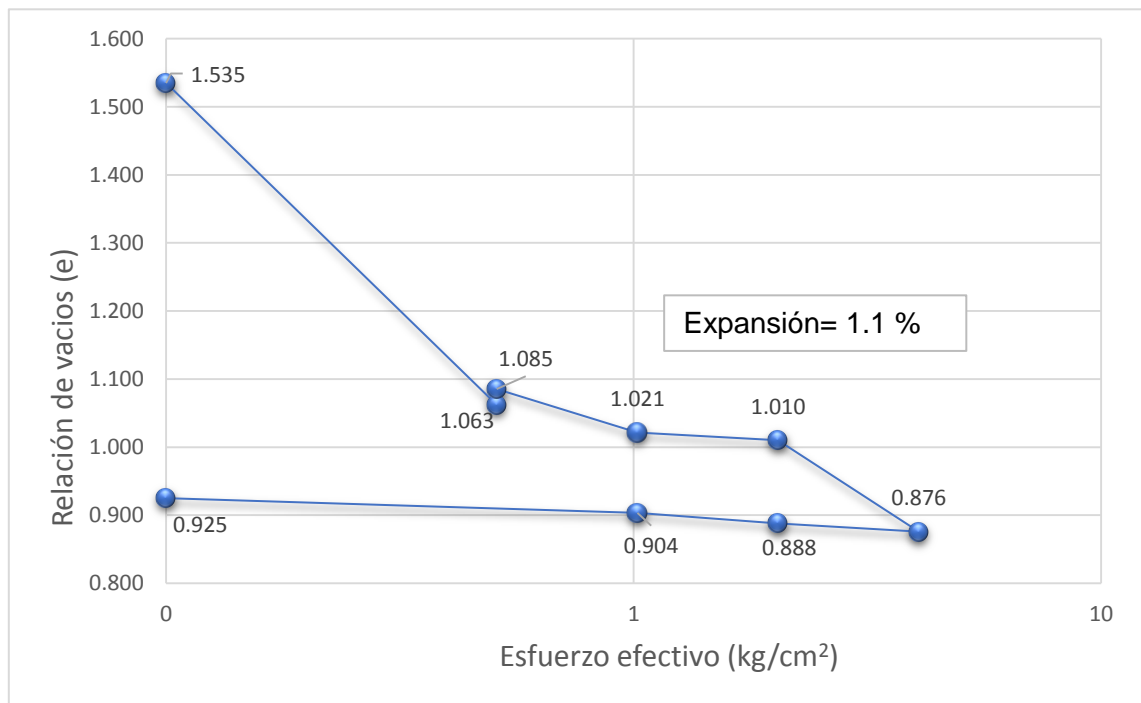


Fig. 41 Muestra con $w=35\%$ y $\gamma_d = 1.4 \text{ gr/cm}^3$

En la Tabla 11 se detalla un resumen de los resultados mostrados en las gráficas anteriores, especificando la condición representada y el porcentaje de expansión obtenido

Tabla 11 Resumen de resultados de expansión

Condición	% Porcentaje de expansión
$\gamma_d=1.2 \text{ gr/cm}^3$ w=18%	2.5
$\gamma_d=1.2 \text{ gr/cm}^3$ w=25%	2.9
$\gamma_d=1.2 \text{ gr/cm}^3$ w=35%	0.1
$\gamma_d=1.4 \text{ gr/cm}^3$ w=15%	5.3
$\gamma_d=1.4 \text{ gr/cm}^3$ w=25%	6.8
$\gamma_d=1.4 \text{ gr/cm}^3$ w=35%	1.1

Como se puede ver en las gráficas anteriores, los porcentajes de expansión van aumentando a medida que incrementa el contenido de humedad, esto sucede hasta que la muestra de suelo llega a sus condiciones de humedad óptimas y alcanza el porcentaje de expansión máximo. Después de alcanzar este nivel de humedad, los porcentajes de expansión comienzan a ser menores. Esta última afirmación, es sin duda de gran importancia en los resultados de esta tesis, por lo que dicha idea será retomada en el apartado del análisis de los resultados.

3.4 Análisis de resultados

Después de haber realizado las pruebas que se describieron en el capítulo 3 de esta tesis, se procede a realizar el análisis de los resultados obtenidos. En la Fig. 42 se presenta una gráfica en la que se incluye un resumen de los resultados que se obtuvieron mediante la realización de los ensayos.

Se engloban los ensayos de expansión y los ensayos de compactación en sus dos variantes.

Atendiendo lo que se puede ver en la Fig. 42 en relación con el método de compactación, podemos afirmar, que con una energía de compactación mayor garantizamos pesos específicos mayores, esto a pesar de tener el mismo contenido de humedad.

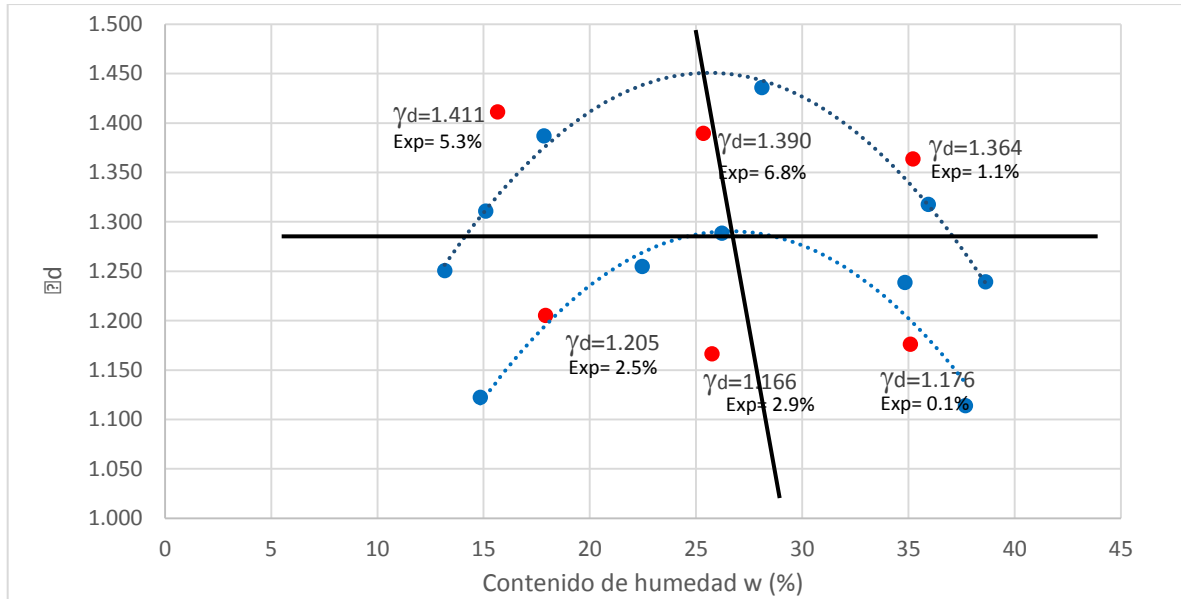


Fig. 42 Resumen de pesos específicos y porcentajes de expansión

Por otro lado, la parte más importante de esta gráfica es sin duda el comportamiento volumétrico que ha tenido el suelo con distintas condiciones. Para entender mejor dicho comportamiento, es necesario dividir esta grafica en cuatro partes, es el motivo de las líneas que se ven en la Fig. 42 y que nos permiten diferenciar las diferentes energías de compactación, y los contenidos de humedad representados.

Con esta división realizada en la Fig. 42 se explica entonces claramente, que, las pruebas incluidas en la fase donde el suelo está más seco, nos entregan resultados con una expansión de un porcentaje elevado, como se ve en las Fig. 36 y Fig. 39 del capítulo 3.4.

En los ensayos realizados, para el caso de la energía estándar se obtuvo una expansión del 2.5% y para la energía modificada fue del 5.3%.

Estos datos son de gran relevancia, porque nos permiten identificar que con una energía de compactación más grande el porcentaje de expansión de la arcilla es también mucho más elevado.

Además de que nos indica que un suelo seco, al entrar en contacto con el agua, tendrá un potencial expansivo de consideración, y por lo cual se debe de tomar en cuenta al momento de realizar los diseños de cimentaciones.

En la fase intermedia, que se podría definir como las condiciones de humedad óptimas de la arcilla, se obtuvieron, para la energía estándar una expansión del 2.9% y para la energía modificada fue de 6.8%, esto nos indica que, cuando el suelo analizado alcanza su máxima expansión en la etapa en la que encuentra las condiciones óptimas de humedad. Esto es de gran relevancia porque nos permite

determinar cuál será la máxima expansión que el suelo podrá tener, y de esta forma realizar las técnicas de mejora del suelo, o el diseño de cimentaciones de tal forma que nos permita contrarrestar estos efectos expansivos y las consecuencias de dicho fenómeno.

Finalmente, tenemos una tercera fase de esos ensayos, la denominamos etapa húmeda del suelo, en la cual se realizaron los mismos ensayos expansivos, y se obtuvo que para la energía estándar tenemos una expansión del 0.1%, y para la energía modificada es del 1.1%.

Estos valores obtenidos, nos confirman lo que ya describió en la teoría de esta tesis, y es que cuando el suelo alcanza un grado elevado de humedad tiende a estabilizarse en relación con los cambios volumétricos que puede sufrir.

Por tal motivo, es importante considerar que un suelo, que ya de por sí tenga un elevado contenido de humedad, al entrar en contacto con el agua no sufrirá grandes cambios volumétricos, lo cual es saludable para las estructuras que estén asentadas sobre el mismo.

Sin embargo, tener un suelo saturado, aunque nos puede ayudar a contrarrestar los efectos de expansión, también nos puede ocasionar problemas de colapso, o de consolidación secundaria.

Este último caso se puede explicar muy fácilmente, y es que el agua tiende a buscar la manera de salir de las partículas del suelo. Sin embargo, este proceso es sumamente lento, y es por eso que estos hundimientos se producirían lentamente y en mucho tiempo, como ocurre en el caso del suelo de la Ciudad de México.

4 CONCLUSIONES

Este trabajo de investigación se realizó con la finalidad de identificar las propiedades expansivas de un determinado suelo, y observar así las dificultades que pueden crear.

Se ensayaron varias muestras con diferentes condiciones, lo cual nos permitió realizar comparaciones y analizar los diferentes comportamientos que puede tener el mismo suelo en distintas condiciones.

De estas comparaciones, podemos concluir que un suelo arcilloso seco tendrá un potencial expansivo mucho más alto que un suelo arcilloso que haya alcanzado un grado de saturación elevado.

Es por eso entonces, que se puede decir, que el comportamiento de un suelo arcilloso saturado es generalmente estable en cuanto a sus cambios volumétricos se refiere, lo cual nos permite tener un control sobre las posibles afectaciones que causa la expansión en las estructuras. Por el contrario, cuando tenemos un suelo bastante seco, es decir con un bajo contenido de humedad, este suelo será fácilmente afectado por sus propiedades expansivas, lo cual es un problema que considerar en los diseños de cimentaciones para estructuras.

Finalmente, es importante señalar que existe una gran cantidad de suelo con este tipo de características, por lo tanto, es necesario realizar acciones que nos permitan contrarrestar esta problemática.

Estas acciones en algunos casos pueden encarecer las obras, sin embargo, al final tendrá un beneficio mucho mayor en la salud de las estructuras con el pasar del tiempo. Las principales medidas que se pueden tomar para evitar esta problemática son:

- Flexibilizar el diseño de la estructura de tal forma que pueda soportar las deformaciones máximas que el suelo tendrá.
- Permitir la expansión del suelo previo a la elaboración de una estructura.
- Aislar el suelo a través de una membrana que impida que entre en contacto con el agua e impida así los cambios volumétricos.
- Reducir la densidad del suelo a través de un control adecuado de la energía de compactación que se utiliza.
- Reemplazar el suelo expansivo por uno que no lo sea.

Estas son algunas de las soluciones que se tiene ante la problemática que significa cimentar sobre un suelo con elevado potencial expansivo.

5 BIBLIOGRAFÍA

- Donaldson, G.W. (1969). "The occurrence of problems of Heave and factors Affecting its Nature". Second International _Research and Engineering Conference on Expansive Clays Solis. Texas A&M Press.
- Yoshimi, V. and Osterberg, J.O. (1963). Compression of partially saturated cohesive soils. J. of Soil Mech. And Found. Div. A.S.C.E., vol. 89, SM4: 1-24.
- Aitchison, G.D. (1973). Proc. 8th IMFE, Moscú, General Report session 4, vol. 3: 161-190
- Schreiner, H.D. (1987). State of the art review on expansive soils. Imperial College, London.
- Alonso, E.E., Gens, A., and Hight, D.W. (1987) Special problem soils. General report. In proceedings of the 9th European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Dublin, Vol. 3: 1087-1146.
- Dudley, A. (1970). Review of collapsing soils. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division. Proc. Of the American Society of Civil Engineer.
- Aitchison, G.D. & Woodburn, J.A. (1969). Soil suction foundation design. Proc. 7th I.C.S.M.F.E., México, Vol. 2: 1-8.
- Yong, R. N., Japp, R.D. and How, G. (1971). Shear strength of partially saturated clays. Proc. 4th Asian Reg. Conf. Soil Mech. Fdn. Engng. Bangkok, 2, 12:183-187.
- Vijayvergiya, V.N. and Ghazzaly, O.T. (1973). Prediction of swelling potential for natural clays. Proc. 3rd ICES, Haifa: 227-233.
- Holtz, W.G. and Gibbs, H.J. (1956), Engineering properties of expansive clays. Trns ASCE, Vol. 121.
- Seed, H.B, Woodward, R.J., Jr and Lundgren, R. et al. (1962). "Prediction of Swelling Potential for compacted Clays". Journal ASCE, Soils Mechanics and foundation Div. ASCE, Vol. 88:53-87.
- Lambe , T.W. (1960). "The Character and identification of expansive soils, soil PVC meter". Federal Housing Administartion, Technicak studies Program, FHA 701.
- Mitchell, J. K. (1973). Recent advances on the understanding of the influences of mineralogy and pore solution chemistry on the swelling and stability of clay. Proc. 3rd ICES, Haifa: 11-25
- Proctor, R.R. (1933): Fundamental principles of soil compaction. Engineering News Record 111, 245-248, 286-289, 348-351.
- Rico Rodríguez, A. del Castillo, A. (1974). La ingeniería de suelos en las vias terrestres. Ed. Limusa, 666 p.

6 ANEXOS

Tabla 12 Cálculos de muestra 1

$\gamma_d = 1.2 \text{ gr/cm}^3 \quad w=18\%$						
		$W_s \text{ (gr)}= 40.2$ $A \text{ (cm}^2\text{)}= 19.635$ $G_s= 2.64$		$H \text{ (mm)}= 20$ $H_s \text{ (mm)}= 7.76$		
Deformación lineal	Presión Efectiva	Deformación acumulada	Deformación unitaria	ΔH	Hv	e
0	0			20.000	12.245	1.579
0.960	0.509	0.960	4.798	19.040	11.285	1.455
-0.478	0.509	0.481	2.407	19.519	11.763	1.517
0.467	1.019	0.949	4.744	19.051	11.296	1.457
0.889	2.037	1.838	9.190	18.162	10.407	1.342
0.734	4.074	2.572	12.860	17.428	9.673	1.247
-0.092	2.037	2.480	12.402	17.520	9.764	1.259
-0.175	1.019	2.306	11.529	17.694	9.939	1.282
-0.978	0	1.328	6.639	18.672	10.917	1.408

Tabla 13 Cálculos de muestra 2

$\gamma_d = 1.2 \text{ gr/cm}^3 \quad w=25\%$						
		$W_s \text{ (gr)}= 40$ $A \text{ (cm}^2\text{)}= 19.635$ $G_s= 2.64$		$H \text{ (mm)}= 20$ $H_s \text{ (mm)}= 7.72$		
Deformación lineal	Esfuerzo Efectiva	Deformación acumulada	Deformación unitaria	ΔH	Hv	e
0	0			20.000	12.283	1.592
1.800	0.509	1.800	8.999	18.200	10.484	1.359
-0.523	0.509	1.277	6.384	18.723	11.007	1.426
0.498	1.019	1.775	8.875	18.225	10.509	1.362
1.205	2.037	2.980	14.902	17.020	9.303	1.206
1.196	4.074	4.176	20.880	15.824	8.107	1.051
-0.142	2.037	4.034	20.170	15.966	8.250	1.069
-0.171	1.019	3.863	19.317	16.137	8.420	1.091
-0.161	0	3.702	18.512	16.298	8.581	1.112

Tabla 14 Cálculos de muestra 3

$\gamma_d = 1.2 \text{ gr/cm}^3 \quad w=35\%$						
		$W_s \text{ (gr)} = 37.9$		$H \text{ (mm)} = 20$		
		$A \text{ (cm}^2\text{)} = 19.635$		$H_s \text{ (mm)} = 7.31$		
		$S_s = 2.64$				
Deformación lineal	Esfuerzo Efectivo	Deformación acumulada	Deformación unitaria	ΔH	Hv	e
0	0			20.000	12.689	1.735
1.285	0.509	1.285	6.424	18.715	11.404	1.560
-0.017	0.509	1.268	6.338	18.732	11.421	1.562
0.433	1.019	1.700	8.501	18.300	10.988	1.503
1.208	2.037	2.908	14.539	17.092	9.781	1.338
1.525	4.074	4.433	22.166	15.567	8.255	1.129
-0.064	2.037	4.369	21.846	15.631	8.319	1.138
-0.143	1.019	4.226	21.132	15.774	8.462	1.157
-0.148	0	4.078	20.391	15.922	8.610	1.178

Tabla 15 Cálculos de muestra 4

$\gamma_d = 1.4 \text{ gr/cm}^3 \quad w=15\%$						
		$W_s \text{ (gr)} = 49.8$		$H \text{ (mm)} = 20$		
		$A \text{ (cm}^2\text{)} = 19.635$		$H_s \text{ (mm)} = 9.61$		
		$S_s = 2.64$				
Deformación lineal	Esfuerzo Efectivo	Deformación acumulada	Deformación unitaria	ΔH	Hv	e
0	0	0	0	20.000	10.393	1.082
0.229	0.509	0.229	1.145	19.771	10.164	1.058
-1.039	0.509	-0.810	-4.050	20.810	11.203	1.166
0.123	1.019	-0.687	-3.437	20.687	11.080	1.153
0.463	2.037	-0.224	-1.120	20.224	10.617	1.105
1.409	4.074	1.185	5.926	18.815	9.208	0.958
0.898	8.149	2.083	10.416	17.917	8.310	0.865
-0.128	4.074	1.955	9.776	18.045	8.438	0.878
-0.144	2.037	1.812	9.058	18.188	8.581	0.893
-0.193	1.019	1.618	8.091	18.382	8.775	0.913
-1.308	0	0.310	1.551	19.690	10.083	1.050

Tabla 16 Cálculos de muestra 5

$\gamma_d = 1.4 \text{ gr/cm}^3 \quad w=25\%$						
		$W_s \text{ (gr)}= 43.8$		$H \text{ (mm)}= 20$		
		$A \text{ (cm}^2\text{)}= 19.635$		$H_s \text{ (mm)}= 8.45$		
		$G_s= 2.64$				
Deformación lineal	Esfuerzo Efectivo	Deformación acumulada	Deformación unitaria	ΔH	Hv	e
0	0			20.000	11.550	1.367
2.070	0.509	2.070	10.349	17.930	9.480	1.122
-1.215	0.509	0.855	4.274	19.145	10.696	1.266
0.272	1.019	1.127	5.636	18.873	10.423	1.234
1.297	2.037	2.424	12.121	17.576	9.126	1.080
1.207	4.074	3.632	18.158	16.368	7.919	0.937
-0.102	2.037	3.530	17.648	16.470	8.021	0.949
-0.113	1.019	3.417	17.085	16.583	8.133	0.963
-0.990	0	2.427	12.133	17.573	9.124	1.080

Tabla 17 Cálculos de muestra 6

$\gamma_d = 1.4 \text{ gr/cm}^3 \quad w=35\%$						
		$W_s \text{ (gr)}= 40.9$		$H \text{ (mm)}= 20$		
		$A \text{ (cm}^2\text{)}= 19.635$		$H_s \text{ (mm)}= 7.89$		
		$G_s= 2.64$				
Deformación lineal	Esfuerzo Efectivo	Deformación acumulada	Deformación unitaria	ΔH	Hv	e
0	0			20.000	12.110	1.535
3.726	0.509	3.726	18.632	16.274	8.383	1.063
-0.180	0.509	3.546	17.729	16.454	8.564	1.085
0.505	1.019	4.051	20.256	15.949	8.059	1.021
0.087	2.037	4.138	20.692	15.862	7.971	1.010
1.061	4.074	5.199	25.995	14.801	6.911	0.876
-0.094	2.037	5.105	25.525	14.895	7.005	0.888
-0.125	1.019	4.980	24.900	15.020	7.130	0.904
-0.170	0	4.810	24.049	15.190	7.300	0.925