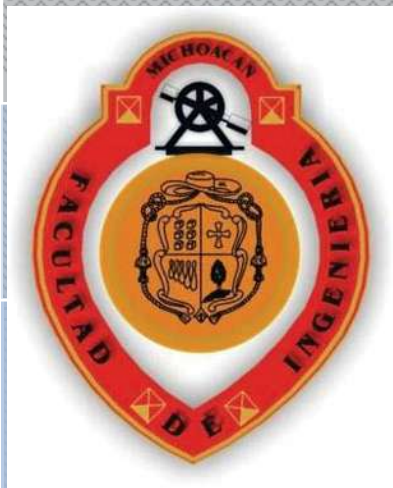




UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

TESIS: "PRUEBA DE ESTABILIZANTES PARA LA BENTONITA (FASE 1)"

Que para obtener el título de: Licenciatura

PRESENTA:
P.I.C. LUIS GIOVANNI ROMERO MEDINA

DIRECTOR DE TESIS:
DR. CARLOS CHÁVEZ NEGRETE

MORELIA, MICHOACÁN. ABRIL DEL 2010



FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

Índice

INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO I	5
ESTABILIZACIÓN DE LAS ARCILLAS	5
1.1 Definición de Suelo.....	5
1.2 Estabilización de Suelos.....	7
1.3 Tipos de estabilización.	7
1.3.1 Estabilización Física	7
1.3.2 Estabilización Química.....	8
1.3.3 Estabilización Térmica	9
1.4 Parámetros para la estabilización de suelos	10
1.4.1 Estabilidad volumétrica.....	10
1.4.2 Resistencia mecánica	10
1.4.3 Permeabilidad	10
1.4.4 Durabilidad	11
1.4.5 Compresibilidad	11
1.5 Generalidades de las Arcillas.....	11
1.6 Principales propiedades de las arcillas.....	12
1.6.1 Superficie específica.....	12
1.6.2 Plasticidad	12
1.6.3 Tixotropía	13
1.6.4 Capacidad de intercambio catiónica	13
1.6.5 Capacidad de absorción	13
1.6.6 Hidratación e hinchamiento.....	14
1.7 Descripción de la arcilla de acuerdo a su estructura reticular	14
1.7.1 Las caolinitas ($\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 2\text{SiO}_2\cdot 2\text{H}_2\text{O}$).	14
1.7.2 Las Illitas $[(\text{OH})_4\text{-Ky}(\text{Si}_{8-y}\text{-Al}^y)(\text{Al}_4\text{-Fe}_4\text{-Mg}_6)\text{O}_{20}]$	14
1.7.3 Las montmorillonitas $[(\text{OH})_4\text{Si}_8\text{Al}_4\text{O}_{20}\cdot n\text{H}_2\text{O}]$	14
1.7.3.1 ¿Qué es la Bentonita	15
1.8 Tratamientos destinados a mejorar la calidad de las bentonitas	17

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

CAPITULO II	19
DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE INTERACCIÓN	19
2.1 Descripción del agua	19
2.2 Descripción de las arcillas.	20
2.2.1 Estructura cristalina de las arcillas formando láminas.....	22
2.2.2 Intercambio catiónico en las arcillas.	24
2.3 Interacción de la matriz agua-arcilla.	26
2.4 Descripción del aditivo químico.	28
CAPÍTULO III	30
ENSAYES Y ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	30
3.1 Obtención de Agua.....	30
3.2 Obtención del material.	31
3.3 Ensayes.....	31
3.3.1 <i>Diseño de Mezclas de Estabilización.</i>	31
3.3.2 <i>Compresión Simple.</i>	33
3.3.3 <i>Presión de Expansión.</i>	34
3.4 Análisis de ensayos y resultados	36
3.4.1 <i>Ensayes de Compresión Simple.</i>	36
3.4.2 <i>Ensayes de Presión de Expansión.</i>	42
3.5 RESUMEN	52
CONCLUSIONES	55
Conclusiones	55
1.1 Conclusiones del Estabilizante No.1.....	55
1.2 Conclusiones del Estabilizante No. 3.....	55
1.3 Conclusiones del Estabilizante Líquido.	55
1.4 Conclusiones del Estabilizante EMET MI 09.	56
1.5 Conclusiones del Estabilizante EMET.	56
Conclusiones Generales	56
BIBLIOGRAFÍA.....	57

INTRODUCCIÓN

Introducción

Los técnicos de la construcción desde los inicios de la civilización, nos hemos enfrentado a diversos problemas planteados por el terreno, sobre el cual cimentamos nuestros caminos, puentes y edificaciones, en donde la utilización del terreno como material de construcción y este material de construcción es conocido hoy en día, como suelo. El suelo, como material para la construcción, ha sido el de mayor uso y proporcionado por el hombre en las obras de infraestructura, esto se observa desde los caminos antiguos con los Romanos, en los mayas lograron construcciones impresionantes, etc. Todo esto sugiere, que desde hace ya bastante tiempo se comprendió que el terreno cercano a las obras no siempre cumple los requisitos necesarios para utilizarse en dichas obras. Por lo tanto, fue necesario utilizar diversas técnicas de mejoramiento o estabilización de un suelo, para modificar las características del mismo y adecuarlo a sus necesidades.



Figura 1.- Caminos antiguos de Roma (vía Domitia).

Los métodos empleados en la antigüedad para mejorar los suelos eran empíricos, y como en las demás actividades, tendían a ser de carácter artesanal, por lo tanto se transmitían de generación en generación. Estos conocimientos son muy limitados en la actualidad, por que las obras se necesitan con mucho más rapidez y calidad; es por esto que se busca optimizar estas técnicas, realizando principalmente estudios con fundamentación científica y mediante la corroboración experimental.

Para entender lo que se busca con la estabilización de un suelo es necesario definir varios conceptos; por ejemplo, cuando un suelo presenta resistencia suficiente para no sufrir deformaciones, ni desgastes inadmisibles por la acción del uso o de los agentes atmosféricos y conserva además esta condición bajo los efectos climatológicos normales en la localidad, se dice que el suelo es estable.

Entonces podemos decir que un suelo estabilizado se puede definir como una mezcla homogénea y uniforme de ese mismo suelo con uno o varios agentes estabilizadores. Los cuales harán posible la conformación de una capa de suelos estable la cual convenientemente compactada, tiene por ejemplo disminuir la susceptibilidad al agua del suelo y aumentar ciertas características mecánicas.

Los métodos de estabilización de suelos pueden clasificarse según las diversas formas, de acuerdo con la naturaleza del proceso aplicado, según el material añadido, dependiendo del resultado deseado, etc. Por ejemplo, según el proceso, existe la estabilización mecánica, química, térmica y eléctrica.

Uno de los principales tratamientos empleados en el mejoramiento o estabilización de suelos en las vías terrestres, es el conseguido mediante la unión de los granos del suelo con un material cementante (cemento, cal, asfalto). Este tratamiento se puede considerar como químico aunque en otras clasificaciones solo a la incorporación de un agente estabilizador (sales y enzimas) se le conoce como estabilización química. A la estabilización que consiste en incorporación de elementos prefabricados, por compactación y a la lograda con la mezcla de dos o más suelos se le conoce como estabilización física o mecánica.

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

En general aplicando las técnicas químicas o físicas, puede decirse que todos los suelos pueden ser estabilizados. Pero deberá de tomarse en cuenta el objetivo de la obra, el procedimiento constructivo y el costo, ya que puede resultar demasiado alto si el suelo que se trata de corregir, no posee determinadas condiciones iniciales.



Figura 2.- Proceso constructivo de una estabilización química en un camino

Hoy en día las limitantes más importantes en el diseño de estructuras para caminos y carreteras, han sido el aspecto económico, la durabilidad y el cuidado del medio ambiente. Las soluciones entonces, tienden cada vez más al uso de tecnologías y métodos de eficiencia probada. Sin menospreciar los demás tipos de estabilización consideramos que el uso del material del lugar, modificando sus propiedades conforme al proyecto, puede lograrse por diversos métodos, pero solo uno proporcionara una solución de largo plazo, el cambio en las propiedades químicas de sus elementos. Así pues, las características alcanzadas por medios químicos permanecerán (en algunos casos) inalterables e incluso mejoraran con el tiempo.

Ahora bien, el mejoramiento o estabilización de una arcilla tiene como finalidad, implementar un mejoramiento a sus condiciones físicas, como lo son; el optimizar el comportamiento esfuerzo-deformación de los suelos, de modo que al mejorar estas arcillas se obtenga una mayor resistencia mecánica; el mejorar la estabilidad volumétrica, la permeabilidad, la compresibilidad y la durabilidad ante la presencia del agua, son otros de los parámetros que engloban una adecuada estabilización.

En terrenos arcillosos, ya sea que el clima sea frío y/o húmedo se tienen problemas de expansión. Cuando se produce un cambio entre estos dos climas; por ejemplo, con una temperatura elevada se produce una pérdida de agua, dando como resultado una contracción de las arcillas, generando grietas.

CAPÍTULO I

ESTABILIZACIÓN DE LAS ARCILLAS

1.1 Definición de Suelo.

Suelo o Terase (del griego) o solum (del latín) se le denomina al conjunto de partículas minerales, producto de la desintegración mecánica o de la descomposición química de las rocas preexistentes. El conjunto de partículas presenta dos propiedades esenciales que no pueden ser olvidadas por quienes pretendan comprender su comportamiento ingenieril:

- El conjunto posee una organización definida y propiedades que varían "vectorialmente". En general, en los valores de las propiedades, verticalmente ocurren cambios mucho más rápidos que horizontalmente.
- El agua tiene continuidad dentro de la organización de las partículas de suelo de tal forma que se obtiene una distribución de presiones por este hecho (ver figura 1.1). Lo anterior corresponde a que el agua no ocupa huecos aislados, sin intercomunicación; sino que se llenan todos los poros que dejan entre sí, las partículas minerales y que se intercomunican, de manera que el agua forma una masa continua que contiene al mineral en su seno.

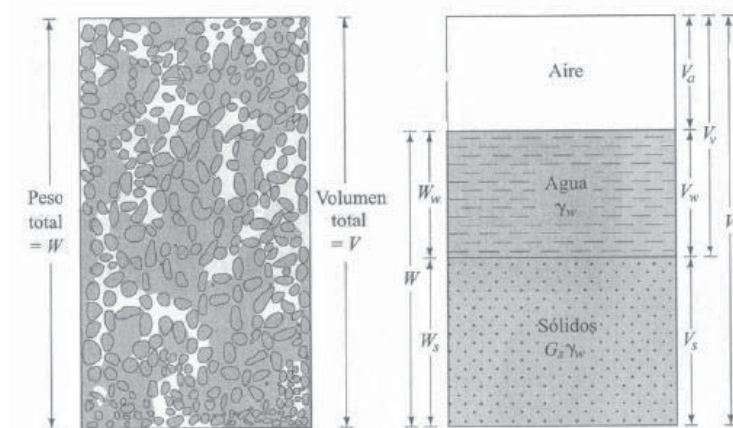


Figura 1.1.- Distribución de la estructura del suelo en estado natural (izquierda) y la representación de las tres fases del suelo (derecha).

Los suelos pueden ser residuales o transportados según se les encuentra en el mismo lugar en que se han generado o en lugar diferente. El transporte por agua y aire y la sedimentación en esos dos medios constituye el mecanismo usual que da lugar a un suelo transportado.

Sabemos que la costa del Pacífico en el Continente Americano fue la última en emerger por lo cual en esta zona tenemos arcillas jóvenes del grupo de las esméctitas, especialmente Montmorillonitas Aluminio-Silicatos, que presentan grandes cambios volumétricos (ver figura 1.2)

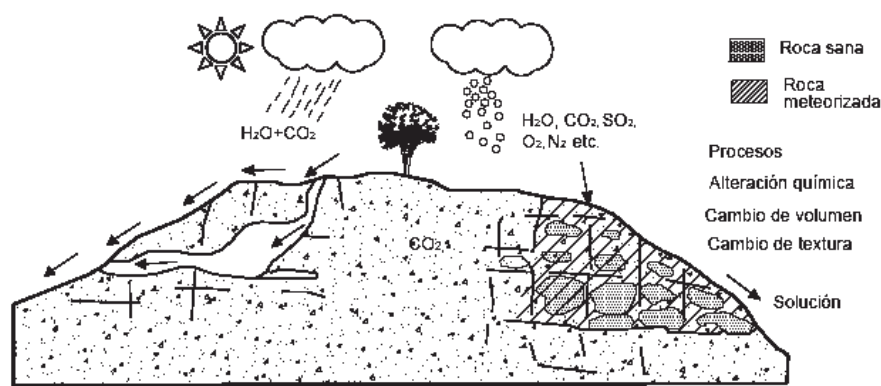


Figure 1.2.- Suelos transportados)

En México, existen muchos tipos de suelos que en su estado natural no son adecuados para la construcción por no reunir los requisitos especificados. En estos casos el ingeniero deberá de tomar una de las tres decisiones siguientes.

- Aceptar el material tal y como está y efectuar el diseño de acuerdo con las restricciones impuestas por la calidad del material.
- Remover y desechar el suelo del lugar y sustituirlo por un suelo de las características adecuadas.
- Alterar o cambiar las propiedades del material existente de tal manera que se obtenga un material que reúna de mejor forma los requisitos impuestos, o cuando menos que la calidad obtenida sea adecuada. Obviamente para fines de esta investigación nos enfocaremos a la última opción.**

1.2 Estabilización de Suelos

Ya se comentó anteriormente que la estabilización o mejoramiento de suelos es un conjunto de técnicas que buscan incrementar el desempeño mecánico y la durabilidad de materiales, y que son usadas en múltiples actividades en la ingeniería. Entre las aplicaciones que se destacan encontramos: la construcción de plataformas de cimentación, el mejoramiento del terreno natural, de sub-rasantes, de sub-base, de bases y de pavimentos.

Actualmente existe una gran variedad de productos y sus respectivos procesos ofrecen un tratamiento químico y/o físico a los materiales. El uso de ellos en el caso de estructuras de pavimentos, depende de factores propios a los materiales a estabilizar, del aditivo ofrecido, del proceso constructivo a implementar, de la función de la capa estabilizada en la estructura del pavimento y del uso que se pretende de acuerdo al tránsito vehicular.

Cuando las capas estabilizadas en una vía terrestre tienen un buen desempeño se pueden obtener beneficios tanto técnicos como económicos. Por reducción de tiempos en los procesos constructivos, disminución del impacto ambiental, disminución de costos de mantenimiento y formulación de nuevas alternativas de construcción y rehabilitación estructural de los pavimentos.

1.3 Tipos de estabilización.

1.3.1 Estabilización Física

Este método se utiliza para mejorar el suelo produciendo cambios físicos en el mismo, sin que se produzcan reacciones químicas de importancia. Hay varios métodos como lo son:

- a) Estabilización por compactación. Consiste en comprimir los granos entre sí aumentando así su fricción su peso específico (compacidad), lo que incrementa su poder soportante. Aunque mejora la calidad de los suelos, ella por sí sola no proporciona la resistencia y durabilidad que necesitan las capas del suelo, ya que estas se ven afectadas por cambios de humedad y por el desgaste del tránsito. Esta técnica se divide en 3 modalidades:

- a. Compactación.
- b. Precarga.
- c. Drenaje.

b) Estabilización empleando la mezcla de suelos. Es de amplio uso pero por si sola no logra reducir los efectos deseados, necesiéndose siempre de por lo menos la compactación como complemento. Un suelo granular tiene una alta fricción interna por lo que puede soportar grandes esfuerzos pero al no tener cohesión sus partículas se mueven libremente y no se puede utilizar en una superficie de rodamiento. Las arcillas, por el contrario, tienen una gran cohesión y muy poca fricción lo que provoca que pierdan estabilidad cuando hay mucha humedad. La mezcla adecuada de estos dos tipos de suelo puede dar como resultado un material estable en el que se puede aprovechar la gran fricción interna de uno y la cohesión del otro para que las partículas se mantengan unidas.

Elementos prefabricados. Consiste en la incorporación de elementos prefabricados como geomallas y/o tierra armada, los cuales actúan incrementando la cohesión y el ángulo de fricción del material, aumentando su capacidad portante. Este método es muy rápido pero costoso.

1.3.2 Estabilización Química

Se refiere principalmente a la utilización de ciertas sustancias químicas patentizadas y cuyo uso involucra la sustitución de iones metálicos y cambios en la constitución de los suelos involucrados en el proceso. Hay varios métodos como lo son:

- a) Cal. Utilizada generalmente para disminuir la plasticidad y consecuentemente también los cambios volumétricos de un material arcilloso, la forma de más uso es cal hidratada, óxidos o hidróxidos. Es técnicamente muy sencilla y bastante económica.
- b) Cemento Pórtland. Utilizado generalmente para suelos arenosos o gravas finas. La mayor ventaja es el incremento de la resistencia, también se puede usar para suelos arcillosos pero implica mayor porcentaje de este.

- c) Polímeros y Resinas. Son cadenas muy largas de moléculas formadas por unión de componentes orgánicos, a los que se denomina monómeros. Los polímeros naturales tienen la forma de resinas.

Los estabilizantes químicos pueden ser todavía de naturaleza orgánica o inorgánica. Los primeros suelen estar afectados por menos problemas de patentes y otras restricciones comerciales, y todavía pueden subdividirse en estabilizantes de tipo ácido, de tipo neutral y de tipo alcalino. El primero y el tercero de estos grupos actúan atacando químicamente los 18 componentes del suelo, especialmente los minerales de arcilla, produciéndose en la reacción nuevos compuestos de naturaleza cementante. Los estabilizantes neutros principalmente alteran las propiedades físicas del suelo, como peso volumétrico.

Todos estos productos o aditivos (excepto la cal y el cemento Portland), podemos decir que son pocamente utilizados debido a la falta de experimentación con los mismos, esto es sin duda es el mayor pretexto para la elaboración de esta investigación.

La experiencia, muy orientada por factores económicos, ha demostrado que los tratamientos químicos son útiles. Sobre todo para arcillas ubicadas cerca de la superficie del terreno, en tanto que los tratamientos térmicos se han aplicado más bien a arcillas profundas.

Dentro de todo esto resulta un tanto evidente que los procedimientos que sirvan para mantener a un suelo sin que se produzcan cambios volumétricos importantes, son también adecuados para mantener la resistencia en el suelo; como es la adición de agentes (químicos) que transforman a un suelo fino en una masa rígida o granular.

1.3.3 Estabilización Térmica

Se refiere principalmente a la utilización de procesos donde se ve involucrado el calor, el cual transforma cualquier arcilla en un ladrillo resistente.

1.4 Parámetros para la estabilización de suelos

Se presentan las principales propiedades a mejorar de un suelo enfocándose principalmente en la presente investigación.

1.4.1 *Estabilidad volumétrica.*

En este caso consistiría en modificar a la arcilla expansiva transformándola en una masa rígida o granular cuyas partículas estén lo suficientemente ligadas para resistir la presión expansiva interna de la arcilla lo cual puede lograrse por medios químicos o físicos. Un problema que presenta este parámetro es el siguiente:

- a) Al tratar de aumentar la impermeabilidad y poder reducir la velocidad de los cambios volumétricos de una arcilla compactándola a pesos volumétricos altos existe la contingencia de que cuando dicha arcilla se sature alcanzara presiones de expansión más altas a medida que se haya compactado con menor humedad.

1.4.2 *Resistencia mecánica*

La resistencia de los suelos arcillosos generalmente es mayor en estado seco que en estado húmedo. Aunque en algunos casos dicha resistencia también se ha disminuido en función de la disminución de humedad ya que el material se comporta como un suelo friccionante provocando deslizamientos de laderas o taludes. Un problema que presenta este parámetro es el siguiente:

- a) El incremento del peso volumétrico, de un suelo orgánico mediante la compactación, se ha considerado, en general, como un incremento en la resistencia, pero esta disminuye por ejemplo, cuando se crean presiones de poro en exceso de la hidrostática.

1.4.3 *Permeabilidad*

Dos problemas básicos; la disipación de las presiones y el relacionado con el flujo del agua a través del suelo. El tener presiones de poro excesivas puede originar deslizamientos en terracerías y el flujo de agua puede originar tubificaciones y arrastres. Los problemas que presenta este parámetro son los siguientes:

- a) Si se compacta un suelo arcilloso con humedades bajas la permeabilidad será alta. Debido a la falta de desintegración de los grumos que al no disgregarlos se producen grandes vacíos intersticiales; por lo tanto mientras más altas sean las humedades más se reducirá la permeabilidad.
- b) Los métodos de estabilización para modificar la permeabilidad del suelo no necesariamente mejoran su estabilidad volumétrica o su resistencia mecánica y en algunos casos resulta contraproducente.

1.4.4 Durabilidad

Sin lugar a dudas es algo muy buscado en todos los materiales de construcción y muy deseable en los suelos estabilizados. Los problemas que presenta este parámetro son los siguientes:

- a) Una baja durabilidad se debe a un deficiente diseño, o a la cantidad insuficiente del mismo estabilizante.
- b) Las pruebas de intemperismo resultan a veces muy poco reproducibles en el sentido que no se realizan de forma cómo pasan en campo.

1.4.5 Compresibilidad

Los cambios en volumen o compresibilidad, tienen una importante influencia en las propiedades ingenieriles de los suelos, pues modifica la permeabilidad, se alteran las fuerzas existentes entre las partículas tanto en magnitud como en sentido, lo que tiene una importancia decisiva en la modificación de la resistencia del suelo al esfuerzo cortante y además, se provocan desplazamientos. La compactación es una forma rutinaria de estabilización que modifica fuertemente la compresibilidad de los suelos.

1.5 Generalidades de las Arcillas

Las arcillas desde el punto de vista mineralógico, abarcan un grupo de minerales (minerales de la arcilla), filosilicatos en su mayor parte, cuyas propiedades físico-químicas dependen de su estructura y de su tamaño de

grano, en su mayoría de tamaño coloidal $< 1\mu\text{m}$ con $2\mu\text{m}$ como límite superior.

Desde el punto de vista petrológico la arcilla es una roca sedimentaria, en la mayor parte de los casos de origen detrítico, con características bien definidas.

Para un Ingeniero Civil, la arcilla es un término granulométrico que abarca los sedimentos con un tamaño de grano inferior a 0.075 mm (clasificación SUCS). Como se observa, la clasificación SUCS considera como arcilla todas las fracciones con un tamaño de grano inferior o igual a 0.075 mm o que pasen la malla No. 200, por lo que todos los filosilicatos pueden considerarse como verdaderas arcillas si se encuentran dentro de dicho rango de tamaños, e incluso minerales no pertenecientes al grupo de los filosilicatos (cuarzo, feldespatos, etc.) pueden ser considerados como partículas arcillosas.

Las arcillas por su granulometría, son consideradas como suelos finos (clasificación SUCS), pero a diferencia del comportamiento de los suelos gruesos, el comportamiento mecánico e hidráulico de las arcillas se ve decisivamente influido por su estructura en general y constitución mineralógica en particular.

1.6 Principales propiedades de las arcillas

1.6.1 Superficie específica

La superficie específica o área superficial de una arcilla se define como el área de la superficie externa más el área de la superficie interna (en el caso de que esta exista) de las partículas constituyentes, por unidad de masa, expresada en m^2/g .

Las arcillas poseen una elevada superficie específica, muy importante para ciertos usos industriales en los que la interacción sólido-fluido depende directamente de esta propiedad.

1.6.2 Plasticidad

Las arcillas son eminentemente plásticas. Esta propiedad se debe a que el agua forma una “envoltura” sobre las partículas laminares, produciendo un

efecto lubricante que facilita el deslizamiento de unas partículas sobre otras cuando se ejerce un esfuerzo sobre ellas.

La elevada plasticidad de las arcillas es consecuencia de su morfología laminar, tamaño de partícula extremadamente pequeño (elevada área superficial) y alta capacidad de hinchamiento.

Generalmente, esta plasticidad puede ser cuantificada mediante la determinación de los índices de Atterberg (Límite Líquido, Límite Plástico y Límite de Retracción). Estos límites marcan una separación arbitraria entre los cuatro estados o modos de comportamiento de un suelo sólido, semisólido, plástico y semilíquido o viscoso.

La relación existente entre el límite líquido y el índice de plasticidad ofrece una gran información sobre la composición granulométrica, comportamiento, naturaleza y calidad de la arcilla.

1.6.3 Tixotropía

La tixotropía se define como el fenómeno consistente en la pérdida de resistencia de un coloide, al amasarlo, y su posterior recuperación con el tiempo. Las arcillas tixotrópicas, cuando son amasadas, se convierten en un verdadero líquido. Si, a continuación, se las deja en reposo, recuperan la cohesión y el comportamiento sólido.

Para que una arcilla tixotrópica muestre este comportamiento deberá poseer un contenido en agua próximo a su límite líquido. Por el contrario, en torno a su límite plástico no existe posibilidad de comportamiento tixotrópico.

1.6.4 Capacidad de intercambio catiónica

La capacidad de intercambio catiónico (CIC) se puede definir como la suma de todos los cationes de cambio que un mineral puede adsorber a un determinado pH. Es equivalente a la medida del total de cargas negativas del mineral.

1.6.5 Capacidad de absorción

La capacidad de absorción está directamente relacionada con las características texturales (superficie específica y porosidad) y existen dos

tipos de procesos que difícilmente se dan de forma aislada: absorción (cuando se trata fundamentalmente de procesos físicos como la retención por capilaridad) y adsorción (cuando existe una interacción de tipo químico entre el adsorbente, en este caso la arcilla, y el líquido o gas adsorbido, denominado adsorbato).

1.6.6 Hidratación e hinchamiento

La hidratación y deshidratación del espacio interlaminar son propiedades características de las esmectitas, y su importancia es crucial en los diferentes usos industriales. Aunque hidratación y deshidratación ocurren con independencia del tipo de catión de cambio presente, el grado de hidratación sí está ligado a la naturaleza del catión interlaminar y a la carga de la lámina.

1.7 Descripción de la arcilla de acuerdo a su estructura reticular

De acuerdo con su estructura reticular, los minerales de arcilla se encuentran clasificados en tres grupos: caolinitas, ilitas, y montmorillonitas.

1.7.1 Las caolinitas ($Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O$).

Su nombre caolín proviene de la voz china Kau-Ling, nombre del cerro de una región que se encuentra al norte de China de donde se extraía esta arcilla desde el siglo VIII d.C., para la fabricación de la porcelana.

1.7.2 Las ilitas $[(OH)_4Ky(Si_{8-y}Al_y)(Al_4Fe_4Mg_6)O_{20}]$

Su nombre proviene del estado Illinois, el cual está ubicado en los Estados Unidos de América, están estructuradas análogamente que las montmorillonitas, pero su constitución interna manifiesta tendencia a formar grumos de materia, que reduce el área expuesta al agua por unidad de volumen; por ello su expansión es menor que el de las montmorillonitas y, en general, las arcillas ílticas se comportan mecánicamente mejor en la ingeniería.

1.7.3 Las montmorillonitas $[(OH)_4Si_8Al_4O_{20} \cdot nH_2O]$

Su nombre fue dado en el año de 1874 a un mineral arcilloso encontrado en Montmorillon, Francia (10). Esta pertenece al grupo de las esméctitas, por lo que pertenece al grupo (2:1). Están formados por una lámina alumínica entre dos sílicas, superponiéndose indefinidamente.

El enlace interlaminar de las arcillas está constituido principalmente por las fuerzas de Van der Waals y es en consecuencia muy débil si se compara con los enlaces de hidrógeno u otros iones (Bowles, 1982), por lo que las moléculas de agua pueden introducirse en la estructura con relativa facilidad, a causa de las fuerzas eléctricas generadas por la naturaleza dipolar. Lo anterior produce un incremento en el volumen de los cristales, lo que se traduce macrofísicamente en una alta o muy alta expansión. Las arcillas montmorilloníticas, especialmente en presencia de agua, presentan fuertes tendencias a la inestabilidad.

Un ejemplo de este tipo es la Bentonita de la cual nos enfocaremos un poco más, ya que es el tema principal de esta investigación.

1.7.3.1 ¿Qué es la Bentonita?

La bentonita es una arcilla plástica compuesta principalmente por la arcilla mineral esmectita (anteriormente denominada montmorillonita), resultante de la alteración "in situ" de cenizas volcánicas.

El nombre "bentonita" proviene de Fort Benton, situado en el estado de Wyoming, EEUU, lugar en que fue descubierta por primera vez en 1888, una arcilla que presentaba las propiedades de hinchamiento y de tixotropía semejantes a las utilizadas en la actualidad.

La mayoría de los depósitos comerciales de Bentonitas contienen Ca y Mg como cationes de cambio principales.

Sin embargo las esmectitas comienzan a ser inestables con el tiempo, con la profundidad. Por consiguiente las esmectitas puras se encuentran esencialmente en rocas de edad post-mesozoica

La primera planta integrada de aprovechamiento de bentonita de la cual se tiene noticia, se remonta a 1921. Desde esa fecha hasta ahora, se han ido multiplicando las empresas mineras de dicho material.

La bentonita tiene un vasto campo de aplicación en las siguientes industrias: farmacéutica, de cemento, de cerámica, petrolífera, papelera, etc.



Figura 1.3.- Muestra de Bentonita Natural.

La estructura cristalográfica laminar típica de estos minerales ha sido estudiada con Difracción de Rayos X, y al calcularse la distancia interlaminar entre las hojuelas de arcilla, se comprueba que dichos minerales tienen espacio geométrico para las moléculas de agua, pero al alojarse las moléculas de agua (ver figura 1.4) en las arcillas provocan que haya expansiones volumétricas que no pueden ser contenidas por las estructuras de las que forman parte.



Figura 1.4.- En esta prueba de Presión de Expansión en Bentonita se muestra como se desborda la muestra debido a la expansión volumétrica.

Pero al mismo tiempo cuando esta estructura, por cambios ambientales ya no contiene moléculas de agua en su estructura, se colapsará, (ver figura 1.5) es decir se contraerá volumétricamente, resultando en agrietamientos en la superficie, que deberán ser restaurados cotidianamente.



Figura 1.5.- Viceversa a la figura anterior se muestra como es espécimen se contrae debido a la ausencia de agua.

1.8 Tratamientos destinados a mejorar la calidad de las bentonitas

En ocasiones se procede a someter a las bentonitas a procesos físicos y químicos que tienen por objeto potenciar algunas de sus propiedades para determinadas aplicaciones industriales. Desde el punto de vista industrial tienen gran importancia los procesos destinados bien a modificar las propiedades de superficie del mineral mediante tratamientos de distinta naturaleza (tratamiento ácido, térmico, o de pilarización) o bien a modificar el quimismo del espacio interlaminar. El tratamiento ácido produce la destrucción del mineral por disolución de la capa octaédrica, generando sílice amorfa procedente de la capa tetraédrica lo cual conlleva un considerable incremento de la superficie específica. Así mismo, aumentan la capacidad de intercambio iónico y la actividad catalítica. Las variaciones en el tipo de arcilla (granulometría y mineralogía) y en el tipo y grado de acidulación (tipo de ácido, temperatura, tiempo de contacto, proporción de arcilla, etc.) darán lugar a diferentes productos con diversas propiedades.

Norteamérica, Europa y Japón son los principales productores de bentonitas activadas.

Si los cationes de cambio inorgánicos de una esmectita son sustituidos por cationes orgánicos de cadena larga tipo compuestos tetraamonio o alquilamina, a esta arcilla se la denomina arcilla organofílica. Las arcillas naturales son organofóbicas; sin embargo, cuando son modificadas orgánicamente presentan afinidad por las moléculas orgánicas; por ello tienen importantes aplicaciones como adsorbentes de residuos orgánicos. Además son hidrofóbicas, adecuadas para su empleo en la fabricación de pinturas, como gelificantes de líquidos orgánicos, en lubricantes, etc.

El uso de la hectorita como base para las arcillas organofílicas está muy extendido, ya que esta esmectita da un producto de alto poder gelificante en sistemas altamente polarizados.

CAPITULO II

DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE INTERACCIÓN

2.1 Descripción del agua

El agua es una sustancia química formada por dos átomos de hidrógeno y uno de oxígeno (ver figura 2.1), su fórmula molecular es H_2O .

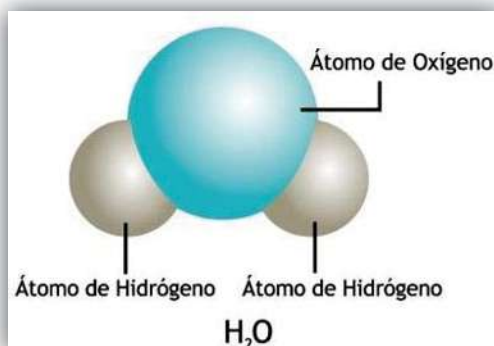


Figura 2.1.- Molécula de agua.

El agua es una molécula que presenta polaridad eléctrica, con un exceso de carga negativa junto al oxígeno compensado por otra positiva repartida entre los dos átomos de hidrógeno; los dos enlaces entre hidrógeno y oxígeno no ocupan una posición simétrica, sino que forman un ángulo aproximado de 105° .

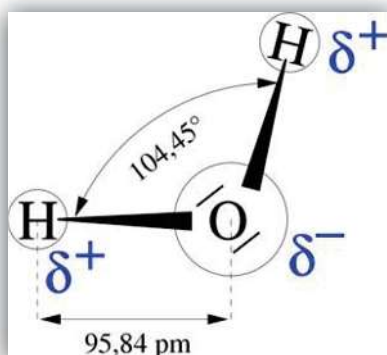


Figura 2.2.- Polaridad en las partículas o moléculas de agua.

Es precisamente esta polaridad que presenta el agua líquida, la que le permite disolver muchos compuestos, es decir, formará una mezcla homogénea entre la sustancia que se disuelve llamada soluto (en nuestros casos los aditivos a probar), y el agua que la disuelve llamada disolvente.

Desde el punto de vista energético, para que la disolución sea posible se requiere que la energía de atracción entre los componentes soluto-disolvente sea mayor que la energía que existe entre soluto-soluto y disolvente-disolvente. Por ejemplo, cuando se disuelve un sólido iónico en agua, como lo es el cloruro de sodio, se produce la disociación de los cationes sodio (ion positivo) y aniones (ion negativo), los cuales atraen a las moléculas de agua. La parte positiva o polo positivo del agua es atraído por los aniones y el polo negativo por los cationes.

Consecuencia de esta atracción se genera un rodamiento de moléculas de agua entorno a cationes y aniones; a este proceso se le denomina hidratación (ver figura 2.3). La hidratación permite que los aniones y cationes permanezcan separados o dicho de otro modo, estos quedan disueltos.

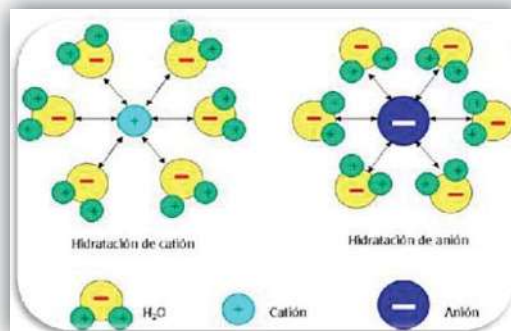


Figura 2.3.- Hidratación de la molécula de agua.

2.2 Descripción de las arcillas.

No fue sino hasta el año de 1912 cuando, gracias a los físicos W. L. Bragg y M. Laue, que descubrieron algunas propiedades de los Rayos X, fue posible desentrañar la estructura interna de los minerales. Estos son compuestos cristalinos, es decir, que a escala molecular están formados por planos y caras muy bien definidos, los cuales tienen la propiedad de dispersar los Rayos X y producir así patrones de interferencia, los cuales proporcionan

información muy valiosa sobre los arreglos cristalinos de las sustancias minerales. Después, con el microscopio electrónico, desarrollado por primera vez por E. Ruska en 1931, fue posible observar directamente los cristales minerales y la geometría de los mismos.

Partiendo de los numerosos minerales que se encuentran en las rocas ígneas y metamórficas, los agentes de descomposición química llegan a generar un producto final: Arcillas, también denominadas como minerales accesorios o secundarios. Estas se forman por intemperismo o alteración hidrotermal de las rocas, ricas principalmente en silicatos de aluminio hidratados (en algunas ocasiones también silicatos de magnesio, hierro u otros metales) que, formados a mayores presiones y temperaturas, en el medio exógeno se hidrolizan.

Mediante las técnicas descritas anteriormente, se sabe que los filosilicatos están formados por cristales regulares y, si vamos a una escala más pequeña, veríamos que estos cristales tienen a su vez una unidad básica: el tetraedro (en, griego “cuatro caras”), tal y como se ilustra en la figura 2.4. Esta es la parte principal, que da lugar a la formación de las estructuras moleculares llamados filosilicatos.

El tetraedro sílico de la figura 2.4 está compuesto por un átomo central de silicio (Si) y cuatro átomos de oxígeno (O_2) en sus vértices.

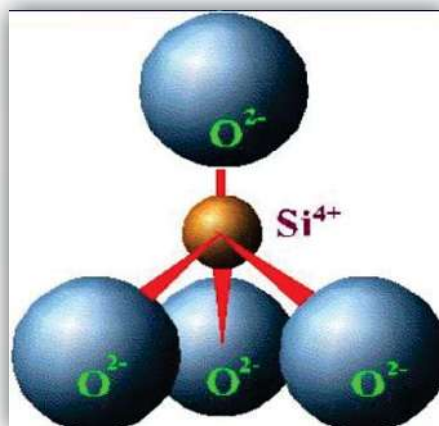


Figura 2.4.- Tetraedro básico de todos los silicatos.

Como cada átomo de Silicio tiene cuatro cargas eléctricas positivas (Si^{+4}), y cada átomo de oxígeno tiene dos cargas negativas (O^{-2}), entonces cada uno de los átomos de Oxígeno usa una de sus cargas par saturar al átomo de Silicio, y con las cargas sobrantes de los Oxígenos se pueden formar cadenas de tetraedros, mediante enlaces del tipo:.. -O-Si-O-Si-O-....

Se pueden hacer otros tipos de arreglos de las estructuras tetraédricas pero siempre y cuando se sigan las leyes descritas por el químico y físico estadounidense Linus Carl Pauling (1901-1994), que nos dicen lo siguiente:

- a) La suma de las cargas negativas debe ser igual a la suma de las cargas positivas, de manera que la estructura sea eléctricamente neutra.
- b) Todos los elementos con carga positiva (cationes) pueden enlazarse o rodearse de elementos cargados negativamente, coordinándose con ellos de modo que los arreglos coordinados dependan únicamente de los tamaños entre el catión (+) y el anión (-) respectivo.

2.2.1 Estructura cristalina de las arcillas formando láminas

Los tetraedros mencionados anteriormente se agrupan en unidades hexagonales, sirviendo un átomo de oxígeno de nexo entre cada uno de los tetraedros, estos grupos de unidades hexagonales repitiéndose indefinidamente constituyen una retícula laminar tipo (T) como se muestra en la figura.

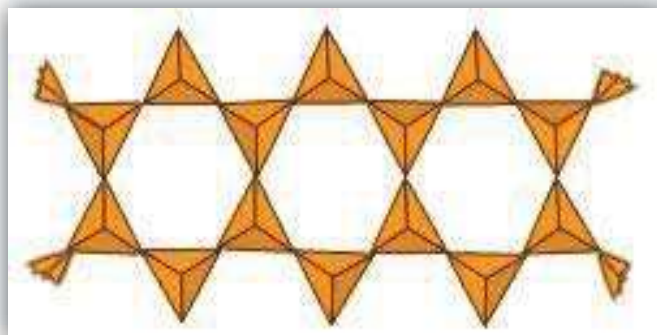


Figura 2. 5.-Tetraedros agrupados en forma hexagonal.

Existen otro tipo de retículas llamadas octaedros, dispuestos con un átomo de aluminio y seis de oxígeno alrededor (ver figura 2.6), también conocidas como de (tipo O). Estos cuerpos poligonales también los podemos unir para formar láminas aluminicas.

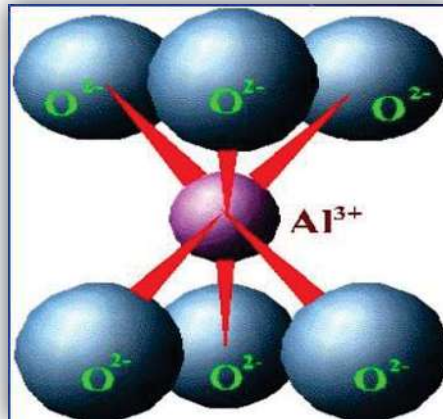


Figura 2.6.-Octaedro de Aluminio.

Ahora bien, la unión entre una lamina tipo (T), con una lámina del tipo (O), generan una lámina (T-O), o también conocida como lámina del tipo 1:1, tal y como lo podemos ver en la figura 2.7.

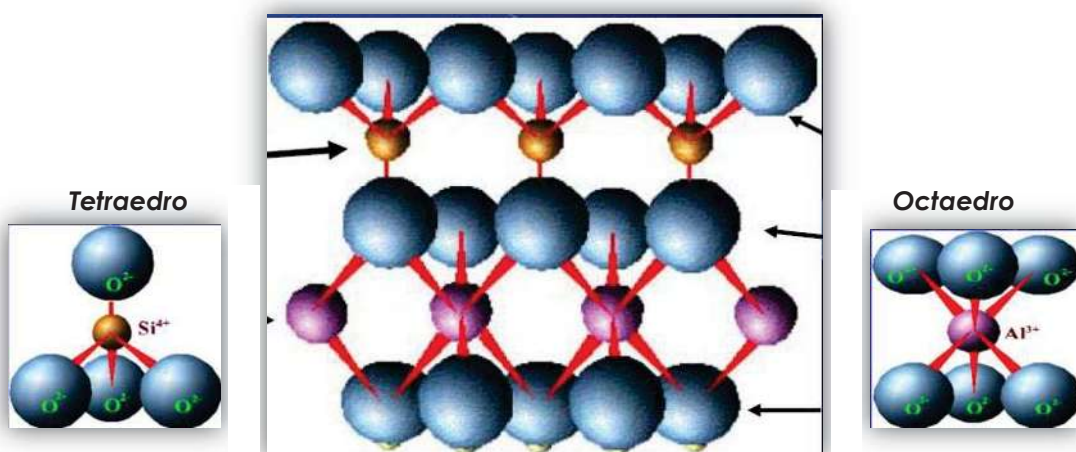


Figura 2.7.- Lámina tipo (T-O).

La conformación de otro tipo de arreglo podría ser, si a la lámina de tipo (T-O) le agregamos otra lámina de tipo (T), dando como resultado una lámina del tipo (T-O-T) (ver figura 2.8). Llamada también como la estructura del sándwich, debido a que las dos hojas de tipo (T) se asemejan a los panes del sándwich, mientras que el jamón corresponde a la hoja tipo (O), o bien, lámina de tipo 2:1.

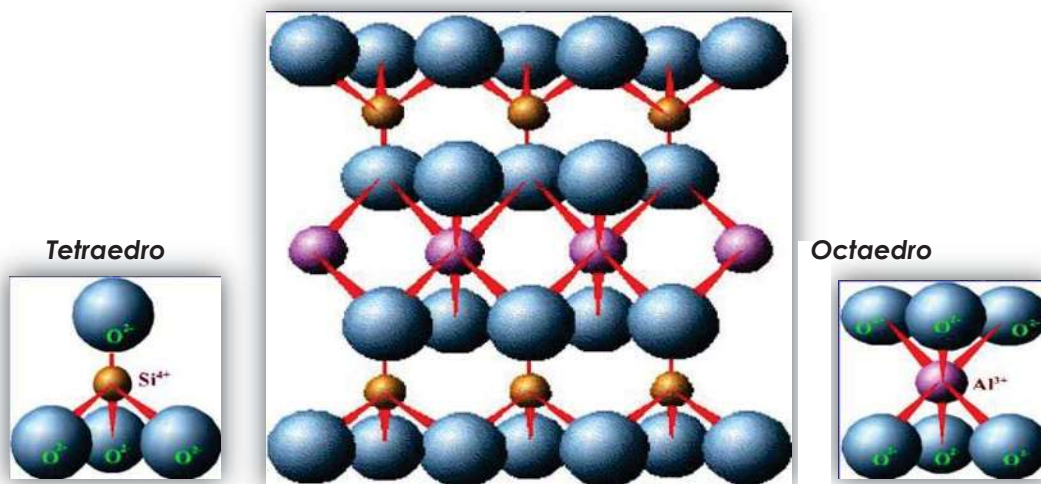


Figura 2.8.- Lámina tipo (T-O-T).

La lámina tipo (T-O-T) es la más completa, ya que no acepta una nueva adición debido a que sus enlaces están saturados. La estructura conocida como de sándwich es la parte esencial de las arcillas.

Entre todas las ramas de las esmectitas, la rama o grupo de las arcillas dioctaedras (que es al grupo que pertenece la Bentonita), presentan propiedades muy interesantes, derivadas por su puesto de su estructura laminar, de su espacio interlaminar y de la carga de sus átomos actuante.

2.2.2 Intercambio catiónico en las arcillas.

En los suelos gruesos (clasificación SUCS) el comportamiento hidráulico y mecánico esta principalmente definido por la compacidad de los granos y su orientación; sin embargo en los suelos finos predominan las fuerzas eléctricas. Estos suelos están compuestos principalmente por minerales

cristalinos, cuya actividad superficial es tal que genera por ejemplo cohesión y plasticidad.

Una de las teorías más comunes hasta ahora desarrolladas para explicar la estructura interna de las arcillas es la que se presenta a continuación.

La superficie de cada partícula de suelo posee carga eléctrica negativa, por lo menos es sus partes planas, sin embargo cabe recalcar que existe evidencia de concentraciones de carga positiva en las aristas. La intensidad de la carga depende de la estructuración y composición de la arcilla. La partícula de arcilla atrae a los iones positivos del agua (H^+) y a cationes de diferentes elementos químicos, tales como Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Al^{3+} , Fe^{3+} , etc.

Cuando se agrega agua a la arcilla, los cationes libres y algunos aniones flotan alrededor de las partículas de arcilla. A esto se le llama doble capa difusa (ver figura 2.9) y toda el agua mantenida unida a las partículas de arcilla por atracción se conoce como agua de doble capa. Así, la partícula de arcilla atrae a los iones positivos del agua que la rodea (H^+) y a cationes libres del suelo seco.

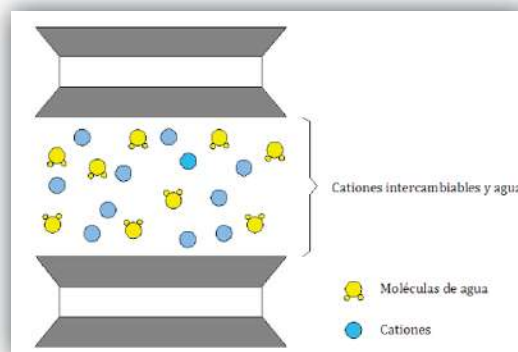


Figura 2.9.- Doble capa de la Montmorillonita.

Lo anterior conduce, en primer lugar, al hecho de que cada partícula individual de arcilla se ve rodeada de una capa de partículas de agua orientadas de forma definida y ligadas a su estructura muy fuertemente, conocida como agua absorbida y que corresponde a la capa interior del agua de doble capa; cuando la partícula atrae cationes de otros

elementos químicos, estos atraen a su vez otras moléculas de agua orientadas, por lo que el espesor de la película de agua absorbida por el cristal de arcilla es función no solo de la naturaleza del mismo, sino también del tipo de los cationes atraídos.

Dada la superficie específica a veces enorme de los cristales de arcilla, las fuerzas eléctricas de superficie juegan un papel mucho más importante que la acción gravitacional. Además, entre los cristales propiamente dichos del suelo fino, las capas de absorción proporcionan un contacto “sui generis” que ayuda a entender y explicar propiedades macrofísicas familiares al ingeniero, tales como la plasticidad, la resistencia al esfuerzo cortante y la permeabilidad.

En este sentido se sabe que las arcillas caoliniticas son menos susceptibles de intercambiar sus cationes que las montmorillonitas y las illitas poseen la propiedad en grado intermedio.

La capacidad de intercambio crece con el grado de acidez de los cristales, es decir con un pH menor a 7. La capacidad de intercambio también crece con la velocidad y concentración de una solución que circule por la masa de suelo.

De lo anterior podemos afirmar que las propiedades mecánicas de una arcilla podrán cambiar, si se hacen variar los cationes contenidos en sus complejos de absorción (doble capa difusa), de manera que variando estos puedan tenerse propiedades mecánicas diferentes en la arcilla original. Esto justifica la finalidad de esta obra y abre posibilidades enormes para continuar investigando al respecto.

2.3 Interacción de la matriz agua-arcilla.

Como comentamos anteriormente, las moléculas de agua son polarizadas, es decir en ellas no coinciden los centros de gravedad de sus cargas negativas y positivas, sino que funcionan como pequeños dipolos permanentes. Ahora, si bien podemos afirmar que las arcillas son partículas finas, alargadas y planas con una carga eléctrica la cual hace que se unan entre sí, y sabiendo que existen diferentes tipos de arcilla, la interacción de estas con el agua será distinta para cada una de ellas.

Todos los materiales arcillosos están compuestos de capas de sílice y alúmina, estos tienen espacios entre las capas que pueden absorber agua, ocasionando que se expandan. Es por esto que una cierta clase de estas son conocidas como arcillas expansivas, cuya característica principal es la de producir movimientos como consecuencia de la expansión y contracción del subsuelo sobre el cual se apoyan la estructuras.

Cuando una partícula cristalina de arcilla queda rodeada de agua, los átomos de oxígeno del cristal quedan en la superficie de estos (esto es lo que origina la carga negativa en la superficie de la partícula de arcilla), como consecuencia de su constitución interna. Si el cristal se considerase como un ente ideal sería eléctricamente neutro, con todas sus cargas eléctricas positivas y negativas balanceadas. Aunque en la realidad es otra y en los vértices y aristas de los cristales se rompe de hecho la continuidad de la estructura, por lo que en realidad se tiene, por lo menos en estas zonas, cargas no balanceadas. Las cargas negativas de los átomos de oxígeno en consecuencia, crean la polaridad de la superficie del cristal, que es un campo eléctrico hacia el exterior, con lo cual las moléculas del agua vecina se ionizan, de manera que los iones de hidrógeno positivos resultan captados por el cristal. Así como también lo hacen los cationes que pudiera haber en disolución en el agua.

La magnitud de las presiones existentes en la película de agua que rodea a un cristal de arcilla, fue reportada por Winterkorn y Bayer, quienes dan un valor de 20000 kg/cm². Brigman estudió la variación del punto de congelación del agua, cuando está sujeta a grandes presiones, encontrando que dicho punto corresponde a temperaturas cada vez mayores respecto al valor normal de 0°C, a medida que la presión se incrementa a partir de 6000 kg/cm²; en particular, señaló que a 10000 kg/cm² la congelación del agua ocurre a menos de 30°C.

De lo anterior puede deducirse que a las temperaturas a las que se encuentra normalmente en las masas de suelo, la película de agua adsorbida por los cristales de arcilla, tendrá las propiedades similares a las del hielo sólido. Más alejadas del cristal, otras moléculas se encuentran sometidas a presiones gradualmente menores; esta agua tiene propiedades intermedias entre el hielo y el agua en estado líquido normal,

pudiendo decirse que su comportamiento es de un fluido de alta viscosidad (capa viscosa). Las moléculas de agua que no sujetan al cristal por fuerzas de superficie, mantienen sus características usuales (agua libre o gravitacional) (9). Terzaghi y Peck estiman que la capa sólida y viscosa puede tener un espesor de 0.005 micras.

2.4 Descripción del aditivo químico.

Para poder describir lo que es el aditivo daremos una pequeña descripción de lo que es la Nanotecnología, ya que ésta nos será de gran ayuda para saber con más precisión el comportamiento de los aditivos en la Bentonita.

Cuando se manipula la materia a la escala tan minúscula de átomos y moléculas, demuestra fenómenos y propiedades totalmente nuevas. Por lo tanto, científicos utilizan la nanotecnología para crear nanomateriales, aparatos y sistemas novedosos, como es en nuestro caso.

Los aditivos o agentes estabilizadores proporcionados por el Dr. José Carlos Rubio Ávalos, no son más que una muestra de Nanomateriales producto de la Nanotecnología.

La estabilización de suelos mediante los procesos químicos y de acuerdo a lo descrito anteriormente podemos decir que es una tecnología que se basa en la aplicación de un aditivo, genéricamente denominado “agente estabilizador”. El cual se debe mezclar íntima y homogéneamente con el suelo a tratar de acuerdo a especificaciones técnicas propias del producto y de los procedimientos de estabilización a seguir.

Una explicación simple del mecanismo de acción del aditivo es el siguiente; Anteriormente en el subtema 2.2.2 (intercambio catiónico en las arcillas) se explicó el tipo de carga de la superficie de arcilla (negativo), donde dicha superficie atrae cationes libres positivos de su entorno, entonces es aquí donde el estabilizante trabaja y se adhiere muy firmemente a las partículas de arcilla.

Entonces la función principal del aditivo es prevenir la absorción de agua (ver figura 2.11); si algunas moléculas positivas son suplidas, la capacidad de atracción de cargas negativas de los materiales de arcilla puede ser

satisfecha y balanceada. Al mismo tiempo, cualquier catión débil puede ser desasociado y reemplazado, y se ocupan los lugares de iones vacantes en la superficie de la arcilla. Una molécula grande, como la del agua, no puede rellenar fácilmente estos espacios y es disociada o reemplazada por cationes pequeños, que ocupan estos espacios vacíos.

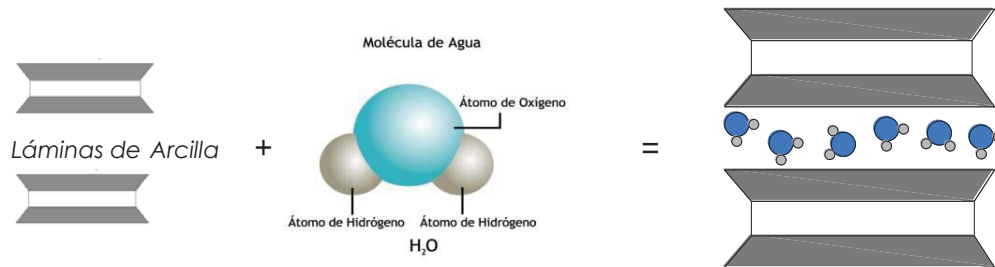


Figura 2.10.- Mecanismo de interacción arcilla-agua

Por lo tanto, la carga negativa de la arcilla está en balance y los iones positivos no pueden ser removidos, dejando la arcilla inerte al agua. Esto probablemente variara dependiendo de la dosificación del aditivo en el suelo.

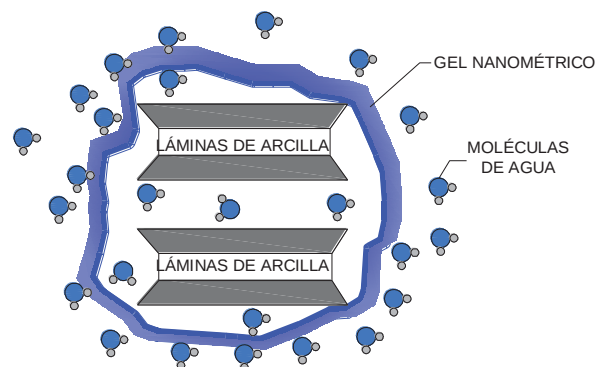


Figura 2.11.- Muestra del Gel Nanométrico que previene la absorción de agua en las partículas de arcilla.

CAPÍTULO III

ENSAYES Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

3.1 Obtención de Agua.

El término calidad del agua es relativo, referido a la composición del agua en la medida en que esta es afectada por la concentración de sustancias producidas por procesos naturales y/o actividades humanas. Como tal, es un término neutral que no puede ser clasificado como bueno o malo sin hacer referencia al uso para el cual el agua es destinada. De acuerdo con lo anterior, tanto los criterios como los estándares y objetivos de calidad de agua variarán dependiendo de si se trata de agua para consumo humano, para uso agrícola o para la construcción (tabiques, concreto ó pavimentos).

Las características principales del agua utilizada para la construcción en lo que respecta a la elaboración del concreto están bien establecidas, pero en lo que respecta a la construcción de vías terrestres (y más aun en la utilización junto con productos químicos) está muy poco definida en México.

Para nuestro caso utilizamos agua destilada o neutra, dicho proceso se llevó a cabo en el Laboratorio de Materiales (ver figura 3.1), con el fin de obtener buenos resultados en las pruebas, aunque el fabricante de los aditivos a usar no especifica que usemos agua destilada, nosotros optamos por usarla.



Figura 3.1.- Proceso de Destilación del agua.

3.2 Obtención del material.

Como ya lo hemos mencionado en los capítulos anteriores, el tema principal de ésta investigación es la Bentonita, el material fue proporcionado por el Dr. Carlos Chávez Negrete, asesor de ésta investigación.

La presentación en la cual se obtuvo el material (ver figura 3.2) facilitó de alguna manera la realización de los ensayos. Ahorrando tiempo en cuanto al secado y disgregado del materia como normalmente se hace, granulometrías, etc.



Figura 3.2.- Bulto de Bentonita Sódica.

3.3 Ensayes.

3.3.1. Diseño de Mezclas de Estabilización.

La obtención del PH en un suelo es importante para determinar la proporción de aditivo que se necesita para su estabilización. Y aunque este procedimiento no dispone de información fiable es necesario realizarlo como referencia para partir de algo.

- a) Secar el material en el horno a una temperatura $< 60^{\circ}\text{C}$.
- b) Calibrar el PH-metro de acuerdo a las instrucciones de fabricante.

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

- c) Preparar 5 muestras representativas de material de 200g cada una en recipientes de plástico que se puedan cerrar herméticamente.
- d) Preparar cinco muestras de aditivo de 1, 2, 3, 4, y 5% del equivalente de 200g del material.
- e) Agregar a cada una de las muestras de material uno de los porcentajes de aditivo ya preparados.
- f) Homogenizar por agitación cada una de las muestras, cuidando que estén muy bien cerradas.
- g) Agregar 100 ml de agua destilada a cada una de las muestras.
- h) Volver a agitar cada una de las muestras por un mínimo de 30 s, seguir agitando las muestras durante 30 segundos cada 10 minutos y durante 1 hora.
- i) Es necesario mantener la muestra a una temperatura de 25 ± 1 °C.
- j) Dentro de los 15 minutos finales de la hora del periodo de agitación, determinar el PH de cada una de las muestras.



Figura 3.3.- Recipientes con el material preparado con el aditivo en las diferentes proporciones.

3.3.2. *Compresión Simple.*

Esta prueba se utiliza para determinar los parámetros de la resistencia cortante de una masa de suelo, es decir la resistencia interna por área unitaria que la masa de suelo ofrece para resistir la falla y el deslizamiento a lo largo de cualquier plano dentro de él. Esta prueba se considera confiable por las siguientes razones:

- a) Proporciona información sobre el comportamiento esfuerzo-deformación unitaria del suelo.
- b) Proporciona condiciones más uniformes de esfuerzo (respecto a la prueba de corte directo) con sus concentraciones de esfuerzos a lo largo del plano de falla.
- c) Las características de esfuerzo - deformación se registran bajo una presión de confinamiento nula.

Procedimiento.- El material a utilizar deberá ser el que pasa la malla No. 10 (esto debido a que con una disgregación y homogeneidad incorrecta se generaría la existencia de grumos), enseguida se conformara un espécimen en un molde Porter al grado de compactación elegido (en este caso al 90%), lo anterior es debido a la dificultad para labrar los especímenes al 100% de su peso volumétrico seco máximo. Posteriormente se labraron especímenes de aproximadamente 3.6 cm de diámetro y 9.0 centímetros de altura, manteniendo una relación altura-ancho de 2.5:1.



Figura 3.4.- Labrado de especímenes.

Posteriormente para generar la falla cortante en el espécimen, se aplicara un esfuerzo axial a través de un émbolo vertical de carga o también conocido como esfuerzo desviador. La carga axial aplicada por el émbolo de carga es correspondiente a una deformación axial, ambas son medidas mediante una celda de carga unida al émbolo. La velocidad de la carga será de 0.4 mm/min hasta que la falla sea apreciable.



Figura 3.5.- Deformación axial, por efecto de la aplicación del esfuerzo desviador.

3.3.3. Presión de Expansión.

Se denomina presión de expansión o de hinchamiento, a la presión vertical necesaria para mantener sin cambio de volumen, una probeta confinada lateralmente cuando se inunda de agua. La presión medible será la máxima presión representada a lo largo de un tiempo específico.

Procedimiento.- El material a utilizar es el que pasa la malla No. 10, enseguida se conformara un espécimen en un molde Porter al grado de compactación elegido (90%) en función de su peso volumétrico seco máximo. Posteriormente se labraran especímenes en forma de pastilla, según las dimensiones del equipo que se vaya a utilizar en el ensaye. Enseguida se colocara dentro de la cazuela del equipo utilizado, para posteriormente ubicarla entre el plato fijo y el móvil del marco de compresión simple.



Figura 3.6.- Marco de Compresión Simple para el ensayo de Presión de Expansión.

Finalmente, el espécimen deberá ser inundado completamente en agua como se muestra en la figura 3.7. La prueba terminará cuando el espécimen deje de expandir y se estabilice.



Figura 3.7.- Ensayo del Especimen.

3.4 Análisis de ensayos y resultados

Llegamos a una de las partes más importantes de esta investigación, donde todo lo descrito anteriormente en otros capítulos e incluso en este mismo se analizará de acuerdo a las pruebas realizadas al material mezclado con los diferentes aditivos.

3.4.1 *Ensayos de Compresión Simple.*

En la Compresión Simple se presentaran gráficas comparativas de esfuerzo-deformación y tablas comparativas de cómo se fue dando el esfuerzo de compresión simple del material al natural y mezclado con los diferentes aditivos.

Como primer lugar tenemos los resultados de las pruebas de Compresión Simple realizadas a la Bentonita mezclada con el estabilizante No.1 en la cual se incluye la gráfica de la Bentonita al natural como referencia.

GRÁFICAS DEL ESTABILIZANTE No. 1

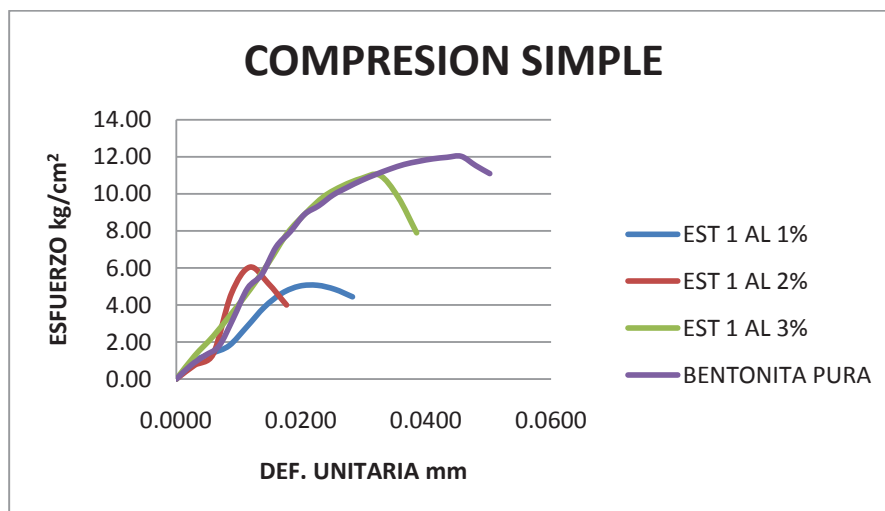


Figura 3.8.- Comparativa gráfica, de Compresión Simple (Estabilizante No. 1).

De acuerdo a los resultados que se muestran en la gráfica vemos claramente que el estabilizante disminuyó la resistencia a la compresión simple al igual que el aumento de la deformación unitaria en comparación con la gráfica de la Bentonita pura, esto quiere decir que no cumplió con gran parte de las expectativas.

ESTABILIZANTE	ESFUERZO DE COMPRESIÓN SIMPLE (kg/cm ²)
BENTONITA PURA	12.05
EST 1 AL 1%	5.06
EST 1 AL 2%	6.04
EST 1 AL 3%	11.00

Tabla 3.1.- Tabla comparativa del Esfuerzo Desviador (estabilizante No. 1).

En la tabla se muestra una comparación de los esfuerzos de compresión simple de los diferentes ensayos.

GRÁFICAS DEL ESTABILIZANTE No. 3

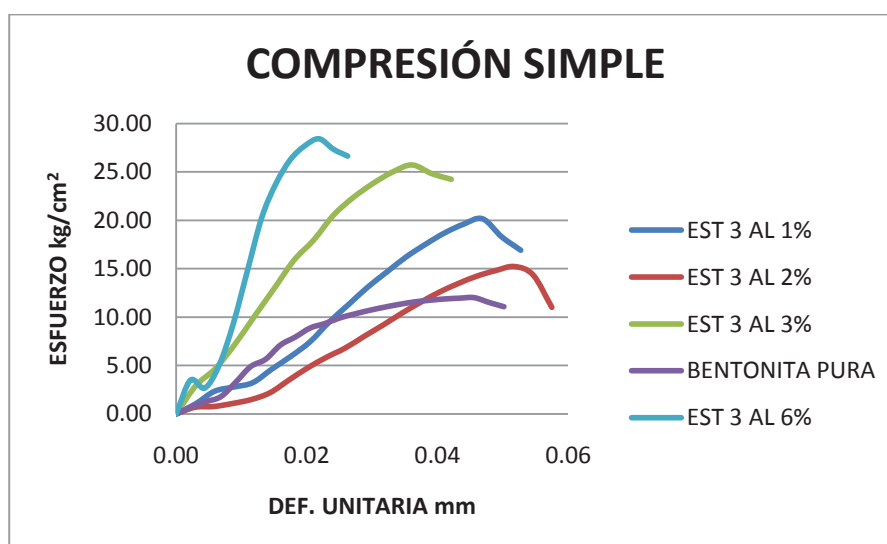


Figura 3.9.- Comparativa gráfica, de Compresión Simple (Estabilizante No. 3).

Esta gráfica muestra como se fue incrementando el esfuerzo de compresión simple y disminuyendo la deformación unitaria a medida que se fue incrementando el porcentaje de aditivo.

En la tabla que se muestra enseguida se comprueba lo descrito de anteriormente sobre el esfuerzo desviador.

ESTABILIZANTE	ESFUERZO DE COMPRESIÓN SIMPLE (kg/cm ²)
BENTONITA PURA	12.02
EST 3 AL 1%	20.18
EST 3 AL 2%	15.21
EST 3 AL 3%	25.72
EST 3 AL 6%	28.41

Tabla 3.2. Tabla comparativa del Esfuerzo Desviador (estabilizante No. 3).

Estabilizante líquido, en éste ensaye decidimos hacer nada mas dos pruebas, por el hecho de que es un estabilizante líquido y aumentaba la humedad del espécimen por lo que se rebasaba la humedad constante.

GRÁFICAS DEL ESTABILIZANTE LÍQUIDO

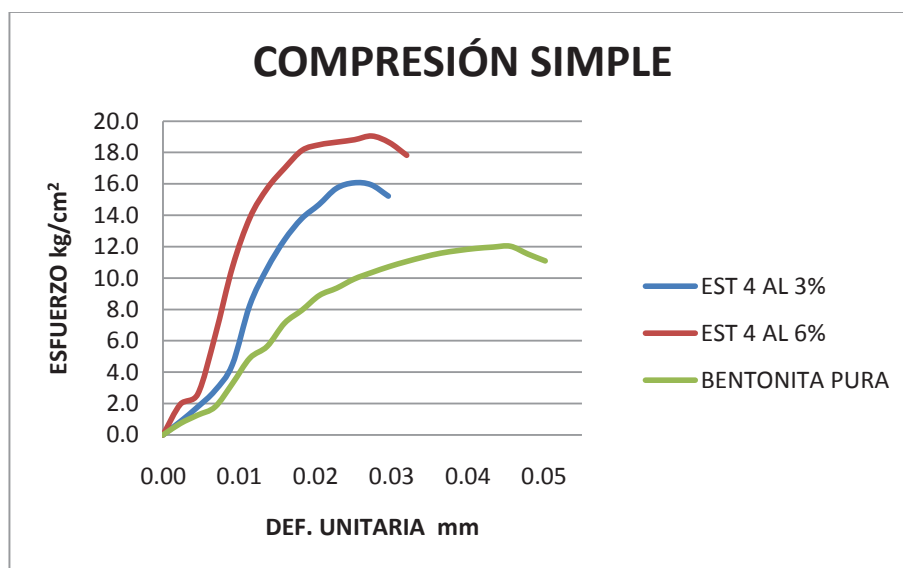


Figura 3.10.- Comparativa gráfica, de Compresión Simple (Estabilizante líquido).

El incremento de la humedad provocó que aumentara el esfuerzo de compresión simple, pero ahora vemos que la deformación unitaria disminuía a medida que se incrementaba el aditivo.

ESTABILIZANTE	ESFUERZO DE COMPRESIÓN SIMPLE (kg/cm ²)
BENTONITA PURA	12.02
EST LÍQUIDO AL 3%	16.05
EST LÍQUIDO AL 6%	19.04

Tabla 3.3.- Tabla comparativa del Esfuerzo Desviador (estabilizante líquido).

El estabilizante EMET MI 09 a comparación con los de anteriores fue más fácil de homogenizar, presentaba una consistencia manejable, sin grumos que complicara el labrado de los especímenes y por otra parte al aplicar la carga en los mismos se comportaron de la siguiente manera:

GRÁFICAS DEL EMET MI 09

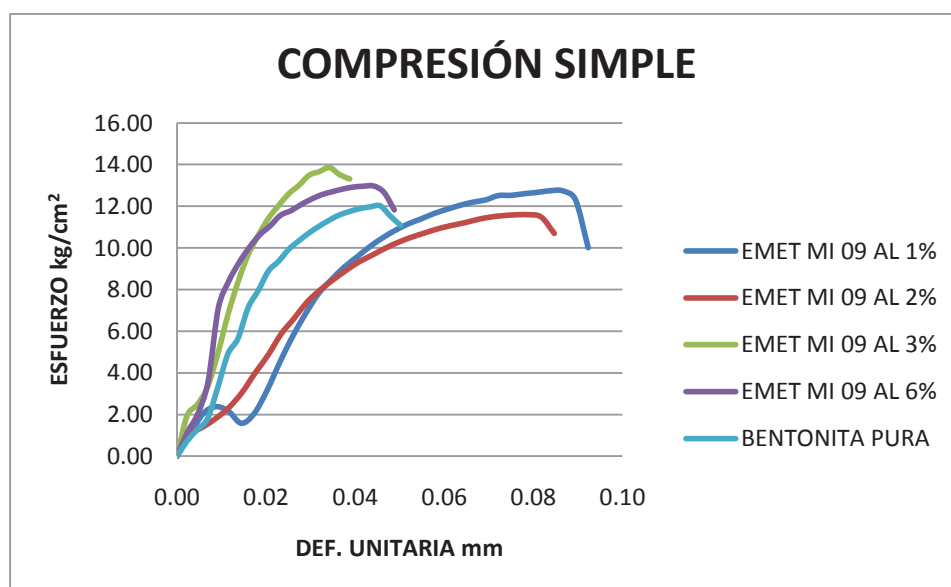


Figura 3.11.- Comparativa gráfica, de Compresión Simple (Estabilizante EMET MI 09).

El esfuerzo de compresión simple vemos que se mantuvo en $\pm$ uno aproximadamente, a diferencia de la Deformación unitaria, vemos que al 1 y 2% respectiva mente aumenta y al 3 y 6% disminuye, la diferencia entre estos pares de deformaciones es considerable.

ESTABILIZANTE	ESFUERZO DE COMPRESIÓN SIMPLE (kg/cm ²)
BENTONITA PURA	12.02
EST EMET MI 09 AL 1%	12.74
EST EMET MI 09 AL 2%	11.59
EST EMET MI 09 AL 3%	13.87
EST EMET MI 09 AL 6%	12.96

Tabla 3.4.- Tabla comparativa del Esfuerzo Desviador (estabilizante EMET MI 09).

En la tabla comparativa se muestran los esfuerzos de compresión simple de los que ya hacíamos mención anteriormente, se mantienen en un rango que considero que el estabilizante no tuvo ninguna reacción hacia el material.

El EMET tuvo una reacción extraña al agregar el agua a la mezcla tenía una apariencia seca, pareciera que no se le hubiese agregado agua, por lo cual sería muy difícil compactarlo y labrar los especímenes, por éste hecho agregamos agua hasta lograr una consistencia considerable para labrar los especímenes y ahora veremos los resultados.

GRÁFICAS DEL EMET

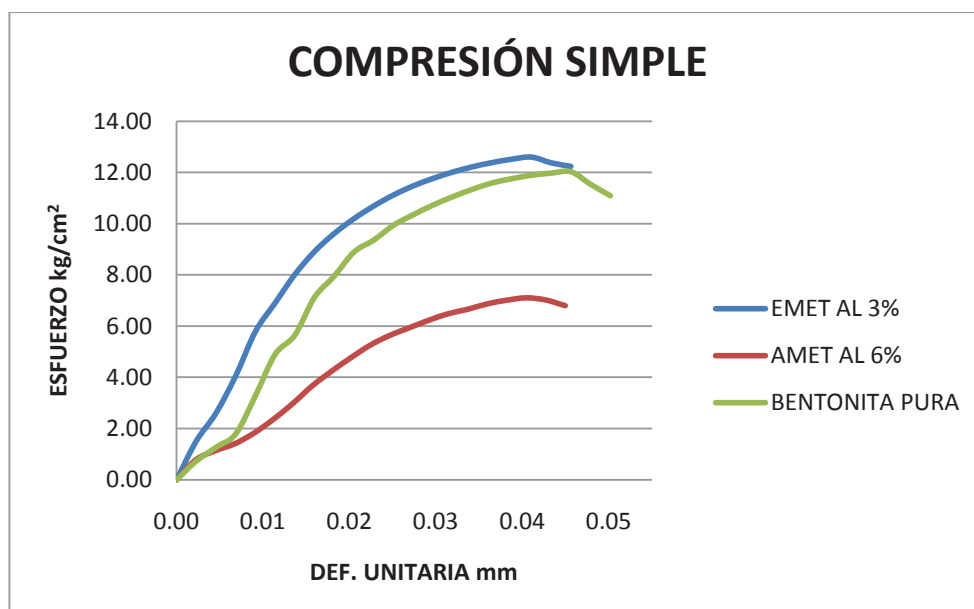


Figura 3.12.- Comparativa gráfica, de Compresión Simple (Estabilizante EMET).

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

El esfuerzo de compresión simple y la deformación unitaria al 3% son semejantes a los de la bentonita natural, pero al 6% el esfuerzo disminuyó considerablemente por lo que comentábamos anteriormente de que se le tuvo que agregar agua.

ESTABILIZANTE	ESFUERZO DE COMPRESIÓN SIMPLE (kg/cm ²)
BENTONITA PURA	12.02
EST EMET AL 3%	12.59
EST EMET AL 6%	7.10

Tabla 3.5.- *Tabla comparativa del Esfuerzo Desviador (estabilizante EMET).*

3.4.2 Ensayes de Presión de Expansión.

El objetivo de los aditivos en los ensayos de presión de expansión es reducir la misma o en su defecto estabilizarla en el menor tiempo posible, para esto analizaremos los siguientes ensayos.

GRÁFICAS DEL ESTABILIZANTE No. 1

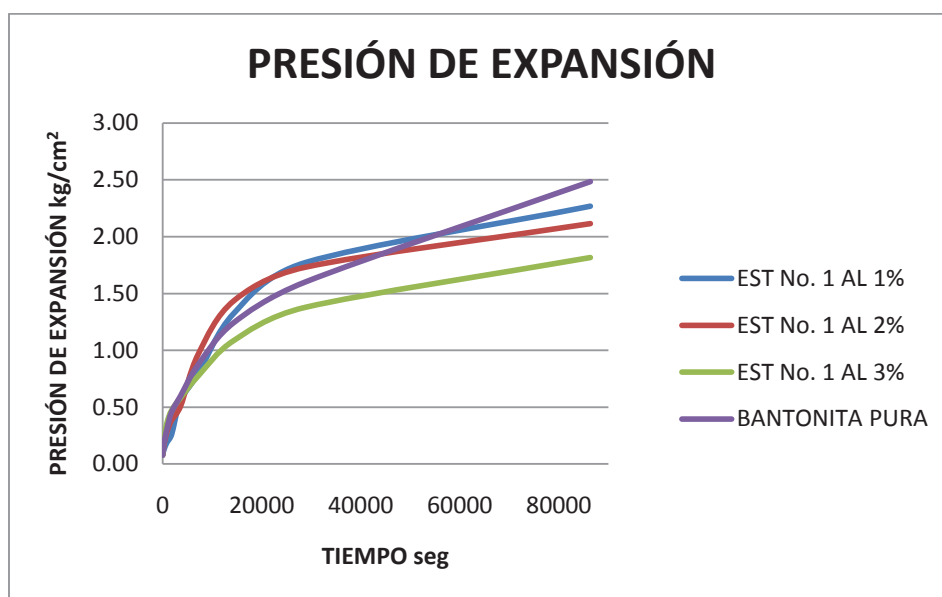


Figura 3.13.- Comparativa gráfica, de Presión de Expansión (Estabilizante No. 1).

La comparativa gráfica muestra como fue disminuyendo la presión de expansión a medida que se aumentaba el porcentaje de estabilizante, pero la pendiente todavía está en ascenso, esto quiere decir que los especímenes siguen expandiéndose.

ESTABILIZANTE	PRESIÓN DE EXPANSIÓN (kg/cm ²)
BENTONITA PURA	2.48
EST 1 AL 1%	2.27
EST 1 AL 2%	2.11
EST 1 AL 3%	1.8

Tabla 3.6.- Tabla comparativa de Presión de Expansión (estabilizante No. 1).

La tabla comparativa muestra como disminuyó la Presión de Expansión a medida que fue aumentando el porcentaje de estabilizante, pero esto no impidió que siguiera la expansión.

Ahora veremos una gráfica comparativa de la velocidad con que se siguen expandiendo los especímenes y ver cual tiende a estabilizarse.

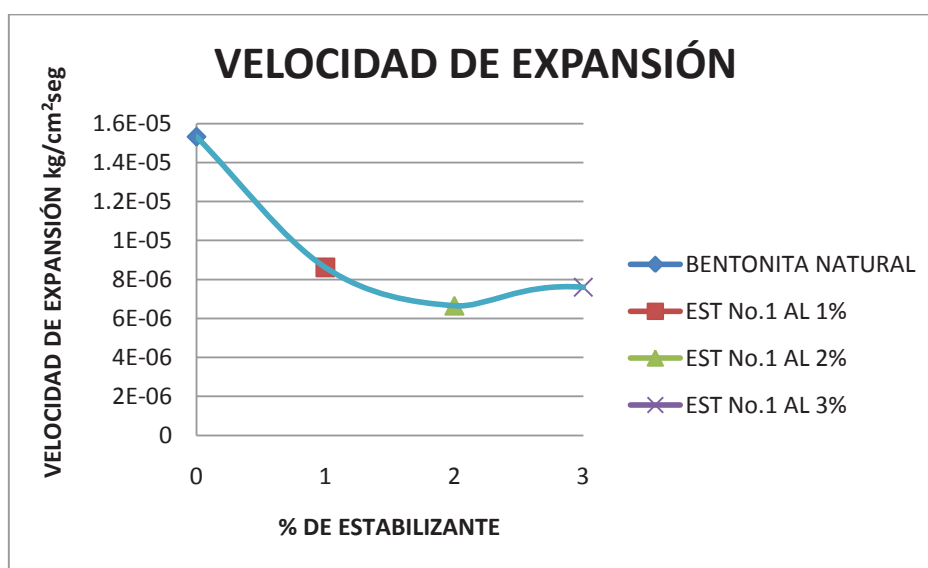


Figura 3.14.- Comparativa gráfica, de Velocidad de Expansión (Estabilizante No. 1).

Sabemos que a menor velocidad la expansión va reduciendo, entonces lo visto en la gráfica del estabilizante 1 al 2% es el de menor velocidad y el probable a estabilizarse, lo que no se sabe es en cuanto tiempo más.

ESTABILIZANTE	VELOCIDAD DE EXPANSIÓN (kg/cm²seg)
BENTONITA PURA	1.53269E-05
EST 1 AL 1%	8.61398E-06
EST 1 AL 2%	6.65356E-06
EST 1 AL 3%	7.60407E-06

Tabla 3.7.- Tabla comparativa de la última Velocidad de Expansión (estabilizante No. 1).

El estabilizante No. 3 se ha venido comportando favorablemente a nuestro objetivo, veamos la reacción a la presión de expansión.

GRÁFICAS DEL ESTABILIZANTE No. 3

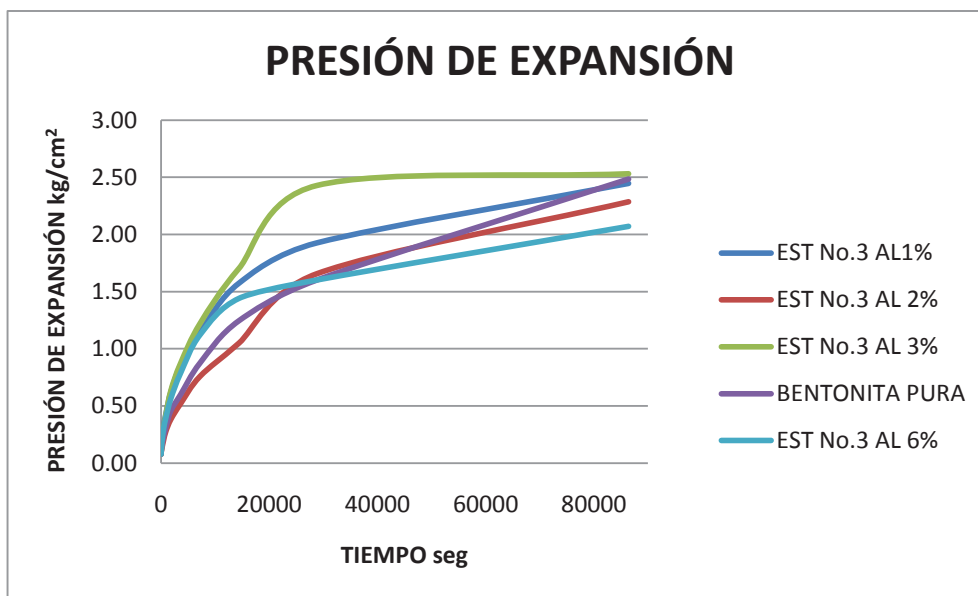


Figura 3.15.- Comparativa gráfica, de Presión de Expansión (Estabilizante No. 3).

ESTABILIZANTE	PRESIÓN DE EXPANSIÓN (kg/cm^2)
BENTONITA PURA	2.48
EST 3 AL 1%	2.44
EST 3 AL 2%	2.28
EST 3 AL 3%	2.53
EST 3 AL 6%	2.06

Tabla 3.8.- Tabla comparativa de Presión de Expansión (estabilizante No. 3).

Los especímenes del 1, 2 y 6% se siguen expandiendo al igual que la Bentonita natural, esto lo vemos claramente en la pendiente de las gráficas, pero el espécimen al 3% logra una estabilización muy favorable como se muestra en la gráfica, analizaremos su velocidad de expansión para corroborar lo dicho.

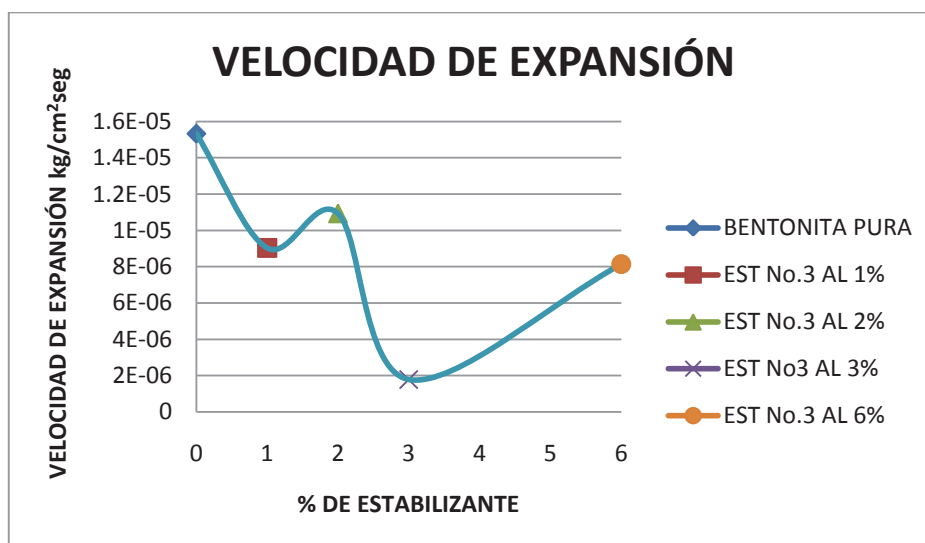


Figura 3.16.- Comparativa gráfica, de Velocidad de Expansión (Estabilizante No. 3).

La velocidad sigue disminuyendo en la mayoría de los especímenes, para nosotros esto es favorable por que cada vez que disminuya la velocidad nos acercamos más al objetivo de ésta investigación.

ESTABILIZANTE	VELOCIDAD DE EXPANSIÓN(kg/cm²seg)
BENTONITA PURA	1.53269E-05
EST 3 AL 1%	9.02983E-06
EST 3 AL 2%	1.09308E-05
EST 3 AL 3%	1.7822E-06
EST 3 AL 6%	8.13873E-06

Tabla 3.9.- Tabla comparativa de Velocidad de Expansión (estabilizante No. 3).

En la gráfica al igual que en la tabla de velocidad de expansión vemos que el estabilizante tres al 3% es el que mejores resultados ha tenido hasta el momento, en la fig. 3.15 vimos que la gráfica perteneciente al 3% es la que tiene la pendiente menos prolongada, esto comprueba que la velocidad es muy baja y que tiende a la estabilización.

En ésta parte era obvio que la presión de expansión se reduciría por el hecho de que los especímenes contenían una humedad mayor, dicho en otras palabras las partículas de arcilla tenían un grado de saturación elevado, lo cual al probar los especímenes y agregarles agua ya no tendrían la misma capacidad de expandirse.

GRÁFICAS DEL ESTABILIZANTE LÍQUIDO

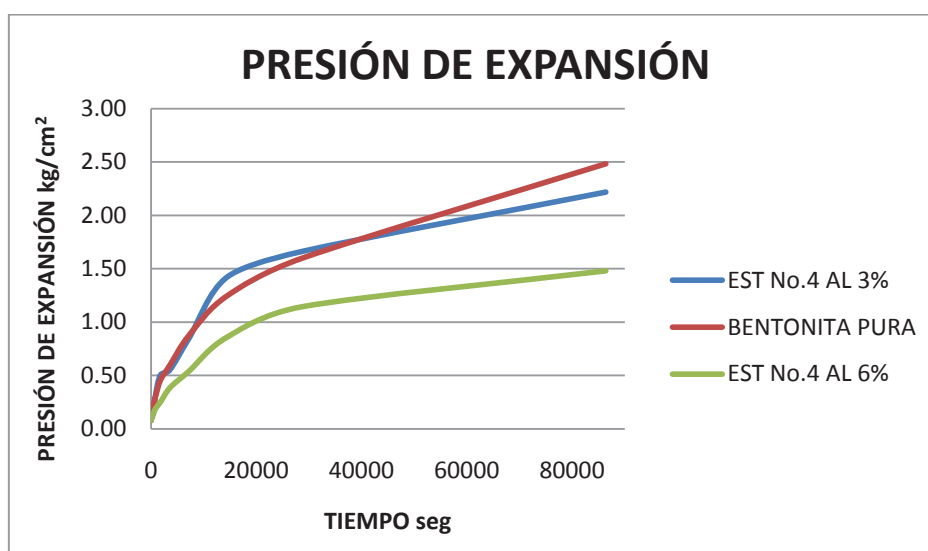


Figura 3.17.- Comparativa gráfica, de Presión de Expansión (Estabilizante Líquido).

La disminución de la presión de expansión es obvia en la gráfica en comparación con la Bentonita pura, la razón de esto es lo que comentábamos en el párrafo anterior, checaremos la velocidad para analizar su tendencia.

ESTABILIZANTE	PRESIÓN DE EXPANSIÓN (kg/cm²)
BENTONITA PURA	2.48
EST LÍQUIDO AL 3%	2.22
EST LÍQUIDO AL 6%	1.48

Tabla 3.10.- Tabla comparativa de Presión de Expansión (estabilizante Líquido).

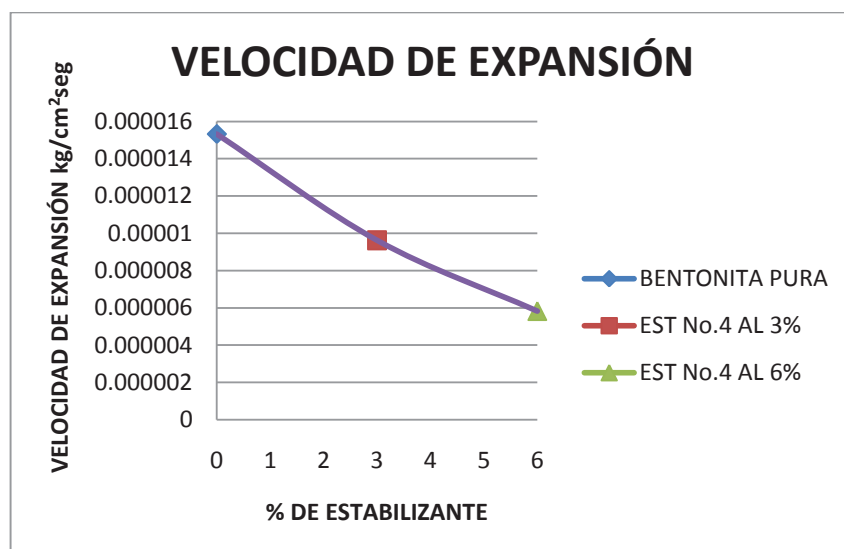


Figura 3.18.- Comparativa gráfica, de Velocidad de Expansión (Estabilizante Líquido).

A medida que se incrementa el porcentaje de estabilizante aumenta la humedad, disminuye la presión de expansión y por lo tanto disminuye la velocidad de expansión.

ESTABILIZANTE	VELOCIDAD DE EXPANSIÓN (kg/cm²seg)
BENTONITA PURA	1.53269E-05
EST LÍQUIDO AL 3%	9.6239E-06
EST LÍQUIDO AL 6%	5.82186E-06

Tabla 3.11.- Tabla comparativa de Velocidad de Expansión (estabilizante Líquido).

La tabla muestra las velocidades de expansión, las cuales vemos que si hay una gran diferencia entre una y otra, esto quiere decir que el material si está tendiendo a la estabilización, aunque el problema aquí es el tiempo en el cual ocurra dicho fenómeno, todos los especímenes tienen un tiempo de curación o de reacción de los aditivos de 7 días y un tiempo de prueba de 24 horas, que son parámetros que se decidieron tomar para la comparación de resultados.

La gráfica que se muestra a continuación muestra la comparación gráfica de las presiones de expansión del estabilizante EMET MI 09, de acuerdo a mi poca experiencia con éste tipo de material considero que ésta mezcla fue la más fácil de trabajar y homogenizar para el labrado de los especímenes. En muy poco tiempo se lograba una consistencia adecuada para el remoldeo, aunque al parecer el aditivo no beneficio en mucho a la investigación.

GRÁFICAS DEL EMET MI 09

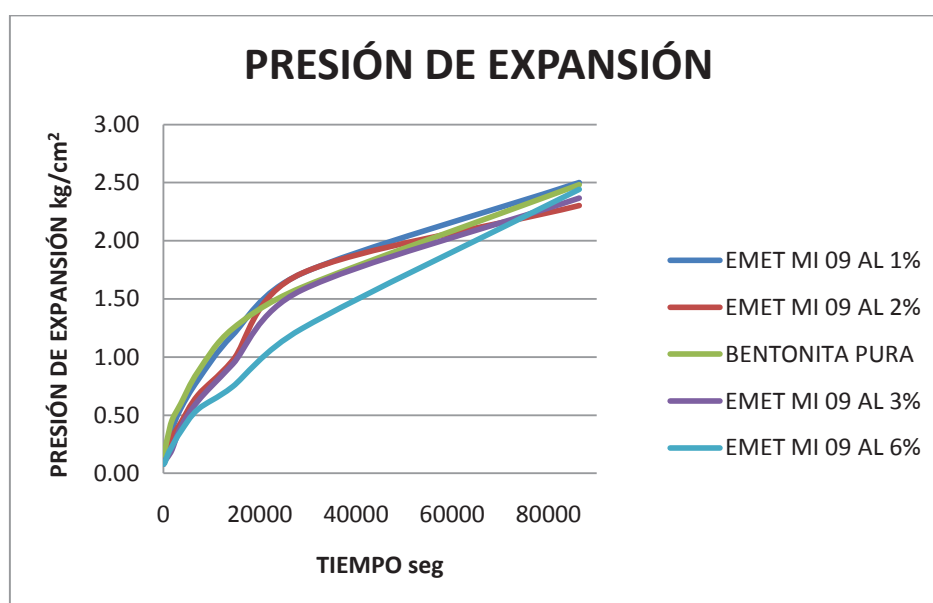


Figura 3.19.- Comparativa gráfica, de Presión de Expansión (Estabilizante EMET MI 09).

Todas las gráficas se muestran semejantes a la de referencia, esto quiere decir que no hubo mucho cambio en el comportamiento del material, las pendientes se muestran casi idénticas, tienen pequeñas diferencias en las presiones (ver tabla 3.12.) pero no son considerables.

ESTABILIZANTE	PRESIÓN DE EXPANSIÓN (kg/cm ²)
BENTONITA PURA	2.48
EST EMET MI 09 AL 1%	2.50
EST EMET MI 09 AL 2%	2.30
EST EMET MI 09 AL 3%	2.36
EST EMET MI 09 AL 6%	2.44

Tabla 3.12.- Tabla comparativa de Presión de Expansión (estabilizante EMET MI 09).

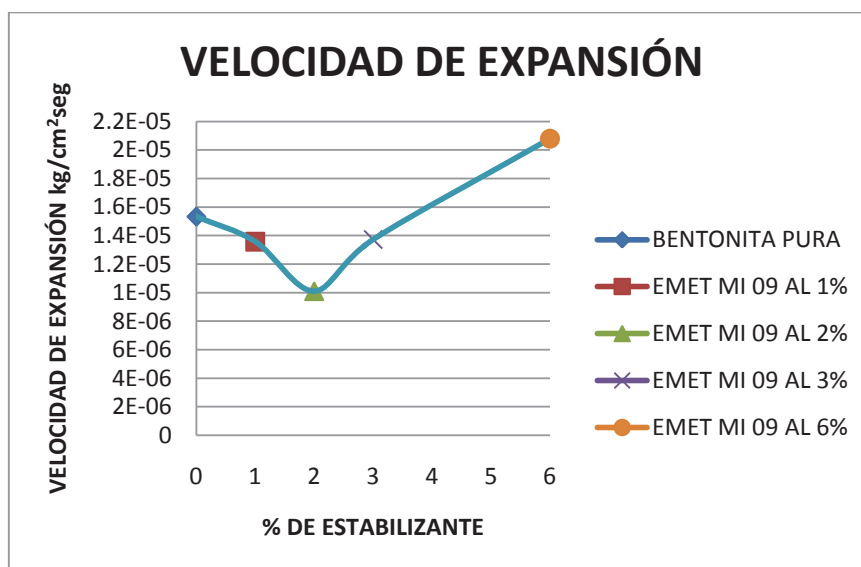


Figura 3.20.- Comparativa gráfica, de Velocidad de Expansión (Estabilizante EMET MI 09).

La gráfica muestra como la velocidad no tiene ninguna mejora e incluso aumenta en la mezcla del 6%, por lo cual vemos que ninguna de estas mezclas tiende a la estabilización en un corto tiempo.

ESTABILIZANTE	VELOCIDAD DE EXPANSIÓN(kg/cm²seg)
BENTONITA PURA	1.53269E-05
EST EMET MI 09 AL 1%	1.35744E-05
EST EMET MI 09 AL 2%	1.00992E-05
EST EMET MI 09 AL 3%	1.3723E-05
EST EMET MI 09 AL 6%	2.07924E-05

Tabla 3.13.- Tabla comparativa de Velocidad de Expansión (estabilizante EMET MI 09).

La velocidad de expansión iba en descenso en los dos primeros porcentajes, pero tuvo un cambio brusco y aumentó muy notablemente como se muestra en la tabla 3.13.

La presión de expansión se disminuye si la humedad aumenta y eso lo hemos visto en el transcurso de la investigación, en éste caso la presión disminuyó muy poco la cual no se considera importante.

GRÁFICAS DEL EMET

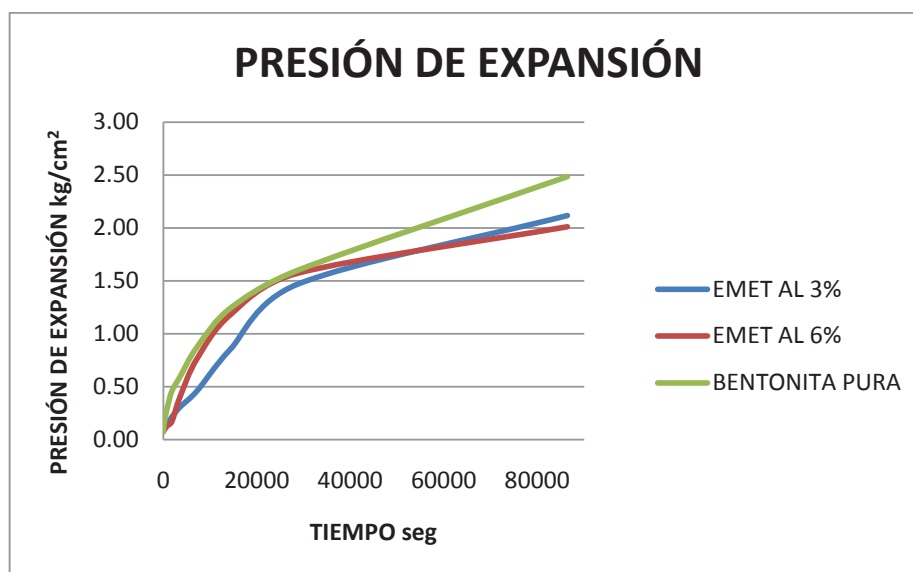


Figura 3.21.- Comparativa gráfica, de Presión de Expansión (Estabilizante EMET).

La gráfica muestra como disminuyó la presión de expansión en ambos porcentajes, muestra que el aditivo tubo muy parecida la reacción en las dos mezclas, las gráficas van en direcciones iguales pareciera que son de igual composición.

ESTABILIZANTE	PRESIÓN DE EXPANSIÓN (kg/cm²)
BENTONITA PURA	2.48
EST EMET AL 3%	2.11
EST EMET AL 6%	2.01

Tabla 3.14.- Tabla comparativa de Presión de Expansión (estabilizante EMET).

La tabla muestra la poca diferencia que hubo en ambos especímenes.

En la gráfica mostraremos la velocidad de expansión del último estabilizante (EMET).

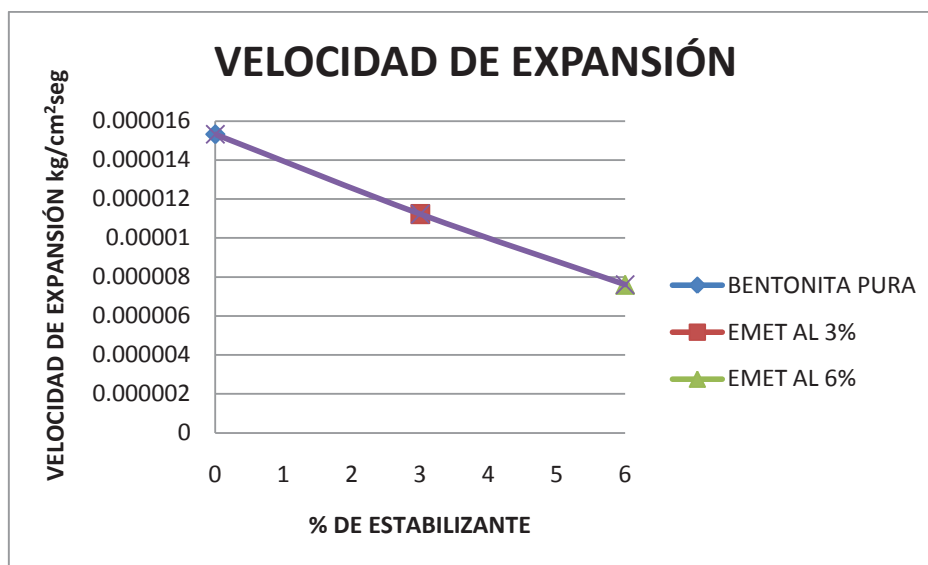


Figura 3.22.- Comparativa gráfica, de Velocidad de Expansión (Estabilizante EMET).

Se ve que la velocidad de expansión si va en descenso, pero no sabemos cuánto tiempo seguirá así ya que las gráficas que se muestran de presión de expansión aun muestran una pendiente prolongada, lo que quiere decir que el material se sigue expandiendo.

ESTABILIZANTE	VELOCIDAD DE EXPANSIÓN ($\text{kg/cm}^2\text{seg}$)
BENTONITA PURA	1.53269E-05
EST EMET AL 3%	1.12279E-05
EST EMET AL 6%	7.60407E-06

Tabla 3.15.- Tabla comparativa de Velocidad de Expansión (estabilizante EMET).

3.5 RESUMEN

Las gráficas que se mostraran en este capítulo, son un resumen de los especímenes que tuvieron buenos resultados para nuestra investigación, por ejemplo los de mayor resistencia a la compresión simple, la menor presión de expansión y la menor velocidad de expansión.

En la compresión simple ganamos mucha resistencia en comparación a la Bentonita natural, en la gráfica siguiente se muestra el resumen genera de las mayores compresiones simples de cada uno de los estabilizantes.

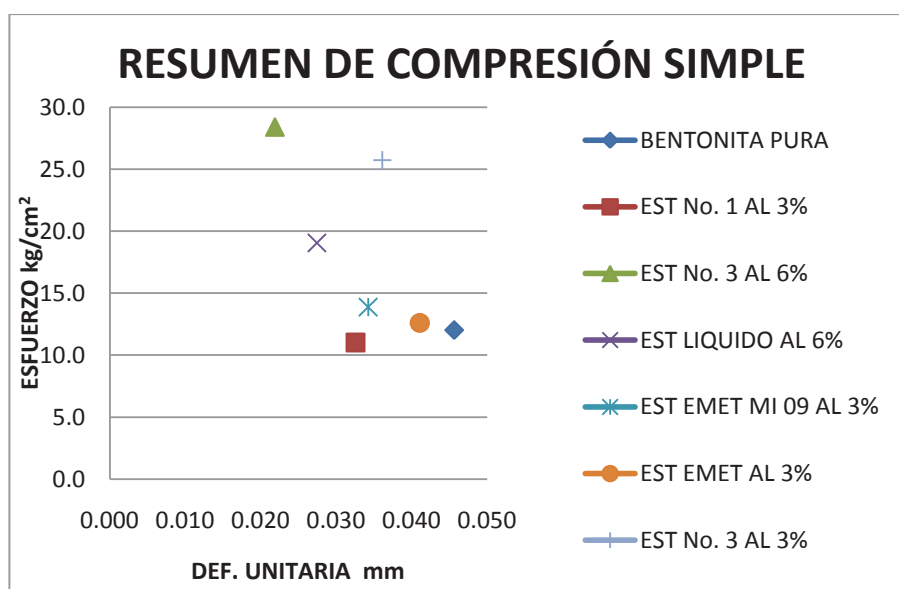


Figura 3.23.- Comparativa gráfica, del Resumen de Compresión Simple de todos los estabilizantes.

La gráfica muestra las mejores resistencias a la compresión simple de cada uno de los estabilizantes y de igual manera vemos que el estabilizante No.3 es el que sigue arrojando resultados favorables, en cuanto a compresión simple el estabilizante No. 3 al 6% (triángulo verde) es el que obtuvo la mejor resistencia que los de mas, pero me di a la tarea de graficar el estabilizante No.3 al 3% (cruz azul) ya que fue el que mejor resultados tuvo en la presión de expansión.

Si lo comparamos en resistencia (3%- 25.72 kg/cm²) con el del 6% (28.41 kg/cm²) vemos que no es mucha la diferencia en cuanto a resistencia, por eso sigo considerando que el estabilizante No.3 al 3% es el que cumple con las expectativas de éste proyecto.

Continuamos con las graficas de presión de expansión, éstas son las que presentaron la pendiente menos prolongada de cada uno de los estabilizantes.

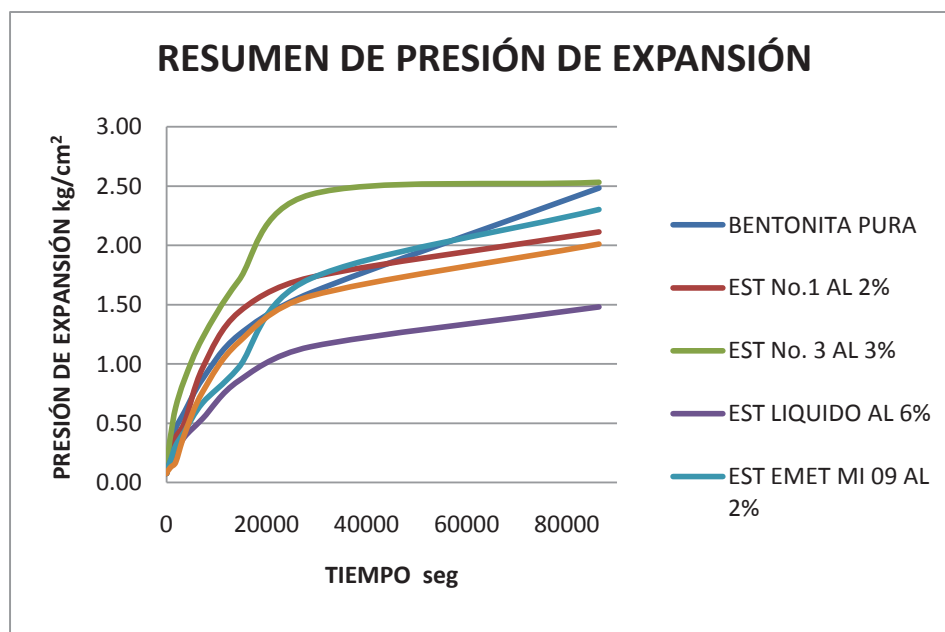


Figura 3.24.- Comparativa gráfica, del Resumen de Presión de Expansión de todos los estabilizantes.

Como vemos en ésta gráfica se presenta el resumen general de las presiones de expansión, donde la gráfica del estabilizante 3 al 3% (gráfica verde) muestra una presión de expansión muy rápida en un corto tiempo lo cual no es favorable para una construcción y mas por las presiones tan altas que alcanza en tan poco tiempo, pero de igual forma llega a la estabilización de una manera muy rápida donde la velocidad de expansión ya es casi nula.

Para reiterar lo que he venido concluyendo en cuanto a la resistencia a la compresión simple y a la presión de expansión mostrare una gráfica de resumen de las velocidades de expansión que mas tendían a la estabilización.

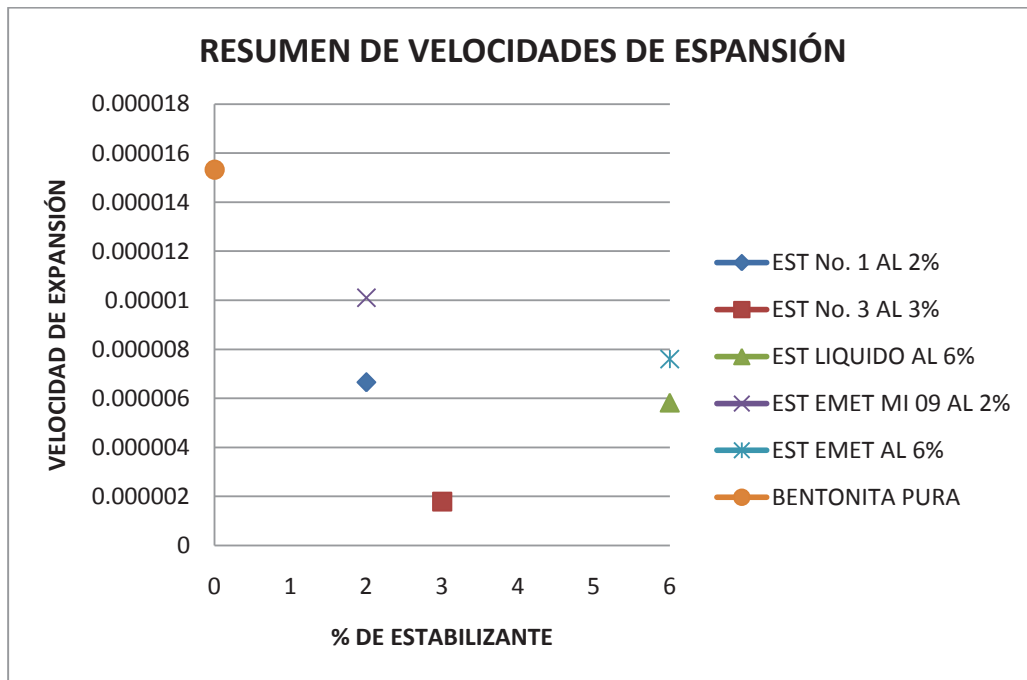


Figura 3.25.- Comparativa gráfica, del Resumen de Velocidad de Expansión de todos los estabilizantes.

Bueno es sin duda que para ésta investigación el estabilizante No.3 al 3% es el que estabilizó a la Bentonita, no al cien % como era el objetivo, y espero que todas estas pruebas y resultados sean de gran ayuda para que esta investigación crezca y en un futuro todos estos materiales expansivos no sean un problema para el Ingeniero o para el hombre en general.

CONCLUSIONES

Conclusiones

1.1 Conclusiones del Estabilizante No.1.

Este estabilizante no afectó en gran parte al material, no se ganó resistencia a la compresión simple, lo único bueno que se obtuvo con éste aditivo es que se redujo la presión de expansión, ya que es el objetivo principal del trabajo, pero dicha reducción no es muy considerable por que las pendientes de las gráficas todavía estaban muy prolongadas, esto quiere decir que el material se seguía expandiendo y tal vez por mucho tiempo.

1.2 Conclusiones del Estabilizante No. 3.

Sería interesante analizar este estabilizante o al menos esta mezcla mas a profundidad, éste estabilizante es el que obtuvo los mejores resultados, se ganó una resistencia a la compresión simple muy considerable, en cuanto a la presión de expansión si se mantuvo elevada pero se logró estabilizar en un tiempo apropiado, por lo cual se considera que el estabilizante funcionó a ese porcentaje.

1.3 Conclusiones del Estabilizante Líquido.

Al adicionar este aditivo al material se incrementó la humedad, esto provocó que la presión de expansión disminuyera al agregarle el agua por el grado de saturación con el que ya contaba y no es considerable, un valor que resultó favorable fue la resistencia a la compresión simple que aumentó y resultó una de las más altas.

Este aditivo aunque tuvo resultados favorables en algunas cosas, se descarta por que necesitaríamos hacer nuevos cálculos para ver que tanto afecta la humedad que se incrementa al adicionarlo y espero que esto se tome en cuenta en investigaciones posteriores.

1.4 Conclusiones del Estabilizante EMET MI 09.

Los distintos porcentajes a los que se trabajo éste estabilizante, no produjeron cambios considerables en su comportamiento en relación con el material al natural, la resistencia a la compresión simple se mantuvo más o menos constante, en la gráfica de presión de expansión se ve claramente que el estabilizante no produjo ninguna alteración, todas las líneas se despliegan similares, con respecto a los de mas estabilizantes éste es el que menos ha funcionado por lo que no es recomendable usarlo.

1.5 Conclusiones del Estabilizante EMET.

Este estabilizante tuvo cambios muy drásticos en las diferentes pruebas que se realizaron, por ejemplo en la resistencia a la compresión simple a una proporción tuvo un incremento muy bueno, pero a la más alta disminuyo bastante. En cuanto a la presión de expansión se disminuyó un poco en comparación con el material al natural, y se disminuyó en igual proporción o sea que al 3 y al 6% se mantuvo muy similar, de hecho las gráficas lo muestran claramente.

Conclusiones Generales

El aditivo favorece una mejor estructuración del material ya que logra aumentar el grado de compactación del mismo conforme aumenta la dosificación, esto no necesariamente indica que desaloja el agua intersticial del material sino que logra una mejor distribución de esta.

En el caso del material, la dosificación recomendada es el estabilizante 3 al 3%, porque disminuye los parámetros como la deformación unitaria e incrementa la resistencia del material sin confinamiento. En cuanto a la Presión de Expansión, en cierta forma obtuvimos resultados interesantes y favorables para nuestra investigación, así como para algunas otras investigaciones futuras, estoy de acuerdo que se obtuvieron presiones mucho muy altas a las esperadas en un corto tiempo, pero lo interesante de esto es la estabilización que presento el material en dicho tiempo, partiendo de esto, espero que en investigaciones futuras la bentonita ya no sea un problema.

Bibliografía

Crespo Villalaz, Carlos. Vías de comunicación: Caminos, ferrocarriles. Aeropuertos, puentes y puertos. Ed. Limusa, tercera edición. México D.F., 1996.

Das Braja M. Fundamentos de ingeniería geotécnica. Ed. Thomson Learning. México D.F., 1999.

Fernández Loaiza, Carlos. Mejoramiento y Estabilización de suelos. Ed. Limusa. México D.F., 1982.

Juárez Badillo, Eulalio y Rico Rodríguez, Alfonso; Mecánica de suelos: Fundamentos de la mecánica de suelos (tomo 1). Ed. Limusa, Tercera edición. México D.F., 2006.

Manual de prácticas de mecánica de suelos. U.M.S.N.H. Morelia, 2009-2010.

Rico Rodríguez, Alfonso y Castillo Mejía, Hermilo. La Ingeniería de los Suelos en las vías terrestres: carreteras, ferrocarriles y aeropistas, tomo 1 y 2. Ed. Limusa. México D.F., 2005.

Ing. Carlos Aurelio Valdez Guzmán; Tesis Profesional “Estudio Comparativo de Estabilización de un Suelo Arcilloso Altamente Expansivo, utilizando un Co-Polímero Multienzimático”. Facultad de Ingeniería Civil, U.M.S.N.H. Morelia, 2008.

Enciclopedia Encarta 2010. Microsoft Corporation.

Internet explorer