



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SINALOA
ESCUELA DE INGENIERÍA MAZATLÁN
LICENCIATURA EN INGENIERÍA CIVIL



TESIS DE INVESTIGACIÓN

**ANÁLISIS EXPERIMENTAL DEL COMPORTAMIENTO DE LAS PROPIEDADES
FÍSICAS DE LAS ARCILLAS EXPANSIVAS CON LA INCORPORACIÓN DE
CAL EN LA ZONA NORTE EN MAZATLÁN SINALOA.**

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE LICENCIATURA EN INGENIERÍA
CIVIL PRESENTA

ARIANA JETZABEL PÉREZ OCHOA

SEBASTIÁN DE JESÚS RENDÓN VILLEGAS

DIRECTORES DE TESIS

DRA. ALMA DELIA FIGUEROA SUÁREZ

DR. JOSÉ DE JESÚS GARCÍA OSUNA

MAZATLÁN, SINALOA ABRIL DE 2023

AGRADECIMIENTOS

Expreso mis más sinceros agradecimientos a todas las personas que me apoyaron a lo largo de la carrera de ingeniería.

A mi madre Fabiola Ochoa Iribe por darme la motivación, apoyo, estímulo e inmenso cariño incondicionalmente.

A mi hermana Dania Melissa Pérez Ochoa por sus consejos y por ser una guía para mi vida y mi carrera profesional.

A mi padre Ulises Pérez por el apoyo brindado y su inmenso cariño.

Agradezco infinitamente a la Dra. Alma Delia Figueroa Suárez por todo su apoyo, confianza y por haberme abierto las puertas al mundo de la mecánica de suelos con mucho fervor y dedicación. Así como al Dr. José De Jesús García Osuna por su apoyo a lo largo de la parte experimental del proyecto.

A mi compañero Sebastián Rendón porque además de su valiosa colaboración y su apoyo constante ha sido un amigo durante toda la carrera.

Y por supuesto a la Escuela de Ingeniería Mazatlán que me brindó todas las herramientas para ser una buena estudiante y formarme como profesional.

Ariana Jetzabel Pérez Ochoa

Sin el apoyo, paciencia y sobre todo la confianza depositada de varias personas y de la Unidad Académica a la que pertenecemos, haber llevado a cabo esta tesis no sería posible, por lo cual les agradezco infinitamente todo.

Principalmente me toca agradecer a mi compañera de mil batallas a lo largo de nuestra estancia en la carrera, a la que depositó su total confianza en mí para llevar a cabo en conjunto esta Tesis, más que mi compañera mi amiga Ariana Jetzabel Pérez Ochoa.

De la misma manera a la Dra. Alma Delia Figueroa Suárez por la paciencia, apoyo, consejos y confianza que depositó en nosotros, fue la que nos dirigió y nos acompañó en todo el camino sin ella nada de lo que realizamos hubiese sido posible.

Así mismo queda agradecer a distintos compañeros y maestros que siempre confiaron en mí, que siempre han creído que puedo lograr cosas grandes y a los cuáles espero no defraudar, todos los que han estado en este camino que se volvió muy largo y mantuvieron esa motivación en mí para culminar de gran manera.

Y sin duda nada sería posible sin la gran Universidad Autónoma de Sinaloa y sobre todo la Escuela de Ingeniería Mazatlán, que desde el día uno nos brindaron las herramientas necesarias para que ahora que culminamos nuestra carrera profesional, nos convirtamos en grandes personas de bien y sobre todo profesionales.

Sebastián de Jesús Rendón Villegas

TABLA DE CONTENIDO

1	GENERALIDADES	10
1.1	ANTECEDENTES	10
1.2	PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	12
1.3	OBJETIVOS	13
1.3.1	OBJETIVO GENERAL	13
1.3.2	OBJETIVOS PARTICULARES	13
1.4	JUSTIFICACIÓN	14
1.5	ALCANCES	15
2	MARCO TEÓRICO	16
2.1	SUELOS	16
2.1.1	TAMAÑO DE PARTÍCULAS DE UN SUELO	20
2.1.2	CLASIFICACIÓN DE SUELOS	23
2.1.3	SISTEMA DE CLASIFICACIÓN AASHTO	23
2.1.4	SISTEMA UNIFICADO DE CLASIFICACIÓN DE SUELOS	30
2.2	ARCILLA	32
2.2.1	MINERALES ARCILLOSO	32
2.3	SUELOS EXPANSIVOS	37
2.3.1	IDENTIFICACIÓN DE LOS SUELOS EXPANSIVOS	38
2.3.2	CLASIFICACIÓN DE LOS SUELOS EXPANSIVOS	41

2.3.3	PROPIEDADES FÍSICAS DE LOS SUELOS EXPANSIVOS	48
2.3.4	POTENCIAL EXPANSIVO.....	52
2.3.5	EL AGUA EN SUELOS EXPANSIVOS.....	55
2.3.6	TIPOLOGÍA DE DAÑOS.....	56
2.3.7	MÉTODOS DE MEJORAMIENTO.....	62
2.3.8	LA CAL	71
2.3.9	ESTABILIZACIÓN DE SUELOS CON CAL (ENFOCADO A SUELOS EXPANSIVOS)	73
3	METODOLOGÍA.....	76
3.1	MUESTREO.....	76
3.2	LÍMITES DE ATTERBERG	77
3.2.1	LÍMITE LIQUIDO	78
3.2.2	LÍMITE PLÁSTICO	81
3.3	MUESTRA CON CAL.....	84
3.3.1	LÍMITE LIQUIDO MUESTRA CON CAL	84
3.3.2	LÍMITE PLÁSTICO MUESTRA CON CAL.....	86
3.4	ÍNDICE PLÁSTICO	87
4	RESULTADOS	89
5	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	105
6	REFERENCIAS	110

7	ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	113
8	ÍNDICE DE GRÁFICAS	117
	ÍNDICE DE TABLAS	118
9	ANEXOS.....	121

INTRODUCCIÓN

A través de los años un tema de gran interés para la geotecnia ha sido el comportamiento de las arcillas, debido a los grandes daños que pueden provocar en el ámbito de la construcción. Por consiguiente, se han dado numerosas investigaciones en las cuales se encontró que los minerales arcillosos como la illita y la montmorillonita son los causantes del grado de expansividad de los suelos.

Un suelo expansivo es aquel que presenta cambios apreciables de volumen ya sea una expansión o una contracción como consecuencia de un aumento o disminución de humedad.

La expansividad de los suelos causa numerosas pérdidas económicas año con año debido a que perjudica la funcionalidad y estática de las estructuras de las obras civiles. Por lo que se han buscado maneras de identificar los suelos expansivos y clasificarlos a través de su potencial expansivo, en busca de disminuir los daños que estos pueden causar y tener una mejor manera de trabajar con estos, aunque la forma de clasificarlos no se ha dado de una manera universal, ya que cada autor toma en cuenta propiedades diferentes, pero manteniendo el mismo significado de potencial expansivo.

Para tratar con la problemática que este tipo de suelos nos genera se han desarrollado algunas alternativas para el mejoramiento de suelos, siendo una de las más utilizadas la del tratamiento con cal, el cual depende del método de aplicación para determinar su efectividad.

La presente investigación está conformada por los siguientes capítulos:

El capítulo 1 aborda las generalidades sobre los suelos expansivos.

El capítulo 2 abarca el marco teórico de la investigación, que presenta los siguientes temas: suelos, su clasificación y tamaño de partículas; arcillas y minerales arcillosos; suelos expansivos que comprende su identificación, clasificación, propiedades físicas, potencial expansivo, el agua en ellos, su tipología de daños, métodos de mejoramiento, la cal y estabilización de suelos con cal.

El capítulo 3 se refiere a la metodología empleada para desarrollar esta investigación la cual incluye los ensayos llevados a cabo en laboratorio.

El capítulo 4 muestra los resultados de la investigación.

El capítulo 5 presenta las conclusiones y recomendaciones de esta investigación.

1 GENERALIDADES

1.1 ANTECEDENTES

Hasta finales de 1930 los ingenieros de suelos reconocieron el problema de los suelos expansivos. La expansividad se da en suelos arcillosos cuyo contenido de humedad provoca cambios de volumen originando deformaciones que terminan por alterar las estructuras de las construcciones yacidas sobre él. Anteriormente se le adjudicaban estas deformaciones a la mala calidad de las construcciones, pero no fue hasta un par de años antes de 1940 que se reconoció oficialmente el problema como expansividad en los suelos. Con el paso de los años ha aumentado el estudio de estos suelos, no solo para evitar la construcción sobre ellos sino también para encontrar una solución cuando los encontramos y así no sea un impedimento para los ingenieros civiles.

Hablar de la estabilización de la arcilla con cal no es nada nuevo. Ya se utilizó esta técnica en la construcción de las pirámides del Tíbet, y también era un método empleado con frecuencia en China y la India, aunque fue en 1950 cuando se popularizó el tratamiento de arcillas con cal y empezaron a construirse autopistas, carreteras, pistas de aterrizaje, etc. (Calcinor, 2020) No obstante, los estudios se basan en que la cal ayuda a transformar químicamente los suelos.

Inicialmente para reconocer estos suelos se debe identificar como suelo expansivo y posteriormente clasificarlo respecto a su potencial expansivo. Existen diversas formas para la identificación de suelos expansivos, se pueden identificar por medio de pruebas de laboratorio para determinar sus propiedades físicas, pruebas para

determinar la mineralogía y química del suelos y pruebas para medir la relación de cambios de volumen en muestras alteradas e inalteradas.

Los esquemas de clasificación también son muy diversos, estos estiman intervalos de valores probables de cambio de volumen, presión de expansión probable o rangos de expansión cualitativa, con los cuales definen el grado en que el suelo es expansivo, donde los grados más usados son: bajo, medio, alto o también crítico y no crítico.

1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En base a lo presentado anteriormente, podemos reconocer que los suelos expansivos pueden ocasionar muchos problemas cuando se construye sobre estos, debido a la expansión que ocurre cuando hay una fluctuación de humedad, por lo que es muy importante una identificación detallada y temprana, lo cual implica una serie de ensayos especializados, ya que no basta con el uso de parámetros índice existentes o una simple inspección para determinar con certeza el carácter expansivo de esto. Una vez detectada la potencialidad expansiva, podemos pasar a pensar en las distintas alternativas de mejoramiento de suelos, siendo una de las más utilizadas el tratamiento con hidróxido de calcio, en la que debemos tener cuidado con su método de aplicación. Lo anterior es de suma importancia ya que se han tenido problemas por los criterios de dosificación que comúnmente se hacían con un enfoque empírico, pero al tener un enfoque más racional de la dosificación se podrán obtener resultados más satisfactorios, utilizando la cantidad de cal adecuada y tomando en cuenta la existencia de las cargas transmitidas por la estructura, ya que estas y la cal actúan como conjunto con el fin de abatir la expansión.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 OBJETIVO GENERAL

Determinar los cambios en las propiedades físicas de distintas muestras de arcilla por medio de la adición de cal.

1.3.2 OBJETIVOS PARTICULARES

- Identificar la caracterización a la que corresponde el suelo mediante los ensayos correspondientes.
- Realizar ensayos con diferentes dosificaciones de cal con el fin de encontrar la óptima para la estabilización del suelo expansivo.

1.4 JUSTIFICACIÓN

La presente investigación pretende por medio del punto de vista teórico y experimental exponer la problemática del fenómeno de los suelos expansivos, ya que hasta hoy en día muchos constructores ignoran los efectos de los daños que puede ocasionar la acción de los suelos expansivos sobre una estructura, como consiguiente se quiere dejar en claro la importancia de tratarlos con anticipación debido a que los riegos de construir sobre ellos sin ser ni siquiera detectados conlleva a escenas catastróficas en las edificaciones, dañando desde su funcionalidad hasta la estética. Además, otro de sus puntos de riesgo incluye los costos ya que el construir sobre suelos expansivos a la larga se hace un gasto nuevo por reparaciones.

En este proyecto utilizamos una alternativa que mejore las condiciones de la expansividad en un suelo explicada de la manera más explícita para evitar todos los problemas que causan estas condiciones. Un punto importante de este tratamiento es que es de bajo costo y fácil aplicación.

1.5 ALCANCES

Nuestros alcances consisten en realizar una experimentación que demuestre fervientemente como un suelo expansivo puede ser mejorado con cal de la manera más eficiente. Realizando los límites de Atterberg para caracterizarlo y posteriormente hacer el mejoramiento del suelo con diferentes dosificaciones.

2 MARCO TEÓRICO

2.1 SUELOS

Las rocas de la corteza terrestre a través de un proceso de desintegración mecánica y descomposición química, forman los materiales sueltos. Según Crespo Villalaz (2004) suelo se define como una delgada capa sobre la corteza terrestre de material que proviene de la desintegración y/o alteración física y/o química de las rocas y de los residuos de las actividades de los seres vivos que sobre ella se asientan.

Suelo es un material natural particulado multifásico. Es un material particulado porque está constituido por un sistema de partículas que varía en tamaño, desde micras hasta decenas de centímetros. Es multifásico porque puede estar compuesto de una fase sólida, una líquida y una gaseosa. La fase sólida del suelo puede ser orgánica o inorgánica. Asociado al sistema de partículas existe otro, el sistema de vacíos, que son los espacios entre partículas sólidas. Comúnmente, la fase líquida es agua y la fase gaseosa, aire. Sin embargo, los vacíos pueden estar llenos de otro líquido diferente del agua con otro gas distinto al aire. (Díaz Rodríguez, 2014)

Las fases gaseosa y líquida rigen en el volumen de vacíos (V_v) y la fase sólida se comprende en el volumen de los sólidos (V_s).

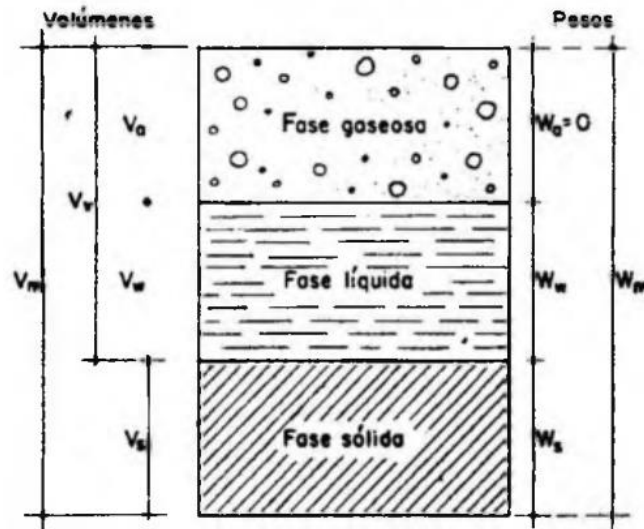
Se le llama suelo totalmente saturado al suelo cuyos vacíos se encuentran llenos de agua. En estos casos el suelo solo cuenta con dos fases, la líquida y sólida, estos son predominantes sobre todo bajo el nivel freático.

Por otro lado, hay suelos con materia orgánica existente en diferentes cantidades y formas, tales los podemos encontrar en las turbas por medio de residuos vegetales parcialmente descompuestos.

A pesar de su gran importancia, el contenido de materia orgánica y las capas absorbidas, no es necesario considerarlas para la medición de pesos y volúmenes relativos de las 3 fases a las que nos referimos originalmente.

Juárez Badillo & Rico Rodríguez (1973) afirman que en los laboratorios de mecánica de suelos se puede determinar fácilmente el peso de las muestras húmedas, el peso de las muestras secadas al horno y el peso específico relativo de los suelos. Además, que estas magnitudes no son las únicas cuyo cálculo es necesario ya que es preciso obtener relaciones sencillas y prácticas a fin de poder medir algunas otras magnitudes en términos de éstas. Resaltando la importancia de estas relaciones de tipo volumétrico y gravimétrico, ya que ayudan a la aplicación sencilla y rápida de la teoría y su dominio debe ser indispensable.

Ilustración 1. Esquema de una muestra de suelo, para indicación de los símbolos usados



Nota: Adaptado de *Mecánica de suelos tomo 1* (edición no.2, p. 26), por E. Juárez Badillo y A. Rico Rodríguez, 1973, Limusa.

Simbología:

V : Volumen total de la muestra de suelo (volumen de la masa).

V_s : Volumen de la fase sólida de la muestra de suelo (volumen de sólidos).

V_v : Volumen de los vacíos de la muestra de suelo (volumen de vacíos)

V_w : Volumen de la fase líquida contenida en la muestra (volumen de agua)

V_a : Volumen de la fase gaseosa (volumen de aire)

W_m : Peso total de la muestra del suelo (peso de la masa)

W_s : Peso de la fase sólida de la muestra de suelo (peso de los sólidos).

W_w : Peso de la fase líquida de la muestra (peso del agua)

W_a : Peso de la fase gaseosa de la muestra, convencionalmente considerado nulo en la mecánica de suelos.

Por ser el suelo un material tan complejo, para dar solución a cada problemática que nos trae, es necesario que se tomen en cuenta ciertas características físicas y químicas, del mismo modo que algunos ensayos que ayuden a representar dichas características y su comportamiento.

Las propiedades físicas del suelo se clasifican en tres desde el punto de vista de la mecánica de suelos: Propiedades índice, propiedades hidráulicas y propiedades mecánicas.

Las **propiedades índice** son las que se utilizan para identificar un suelo cualitativamente, tales como:

- Relación de vacíos (e).
- Masa volumétrica (γ_m).
- Contenido de agua (ω).
- Grado de saturación (S).
- Distribución granulométrica.
- Consistencia.
- Compacidad relativa.
- Otras.

Estas propiedades sirven para catalogar a los suelos dentro de agrupaciones en que las propiedades hidráulicas o mecánicas son burdamente similares.

Las **propiedades hidráulicas o mecánicas** son las utilizadas en el análisis y diseño en ingeniería: Permeabilidad, compresibilidad y resistencia al esfuerzo cortante.

Estas propiedades deben ser medidas cuidadosamente y con equipo especializado; para que dicha medición tenga uso práctico, debe hacerse en muestras inalteradas o en sitio.

2.1.1 TAMAÑO DE PARTÍCULAS DE UN SUELO

Sin importar el origen de las partículas del suelo, sus tamaños pueden variar en un amplio margen. El tamaño de partículas se utiliza como una manera de identificar un suelo, clasificándolos en grava, arena, limo o arcilla, dependiendo del tamaño predominante de sus partículas, para lo cual varias organizaciones han desarrollado límites de separación de tamaño de suelo.

En la tabla 1 el sistema del MIT se presenta sólo a modo de ejemplo, ya que juega un papel importante en la historia del desarrollo de los límites de separación de tamaño de suelo. Sin embargo, en la actualidad el Sistema Unificado es casi universalmente aceptado y ha sido adoptado por la Sociedad Americana para Pruebas y Materiales. (Braja M., 2015)

Tabla 1. Límites de separación de tamaño de suelo

		Tamaño de grano (mm)			
Nombre de la organización	Grava	Arena	Limo	Arcilla	
Instituto de Tecnología de Massachusetts (MIT)	>2	2 a 0.06	0.06 a 0.002	>0.002	
Departamento de Agricultura de E.U. (USDA)	>2	2 a 0.05	0.05 a 0.002	>0.002	
Asociación Americana de Carreteras Estatales y Oficiales del Transporte (AASHTO)	76.2 a 2	2 a 0.075	0.075 a 0.002	>0.002	
Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (Cuerpo de Ingenieros del Ejército de E.U., Oficina de Reclamación de E.U., Sociedad Americana para Pruebas y Materiales)	76.2 a 4.75	4.75 a 0.075	Finos (p.ej., arcillas) >0.075	linos y	

Nota: Adaptado de *Fundamentos de ingeniería geotécnica* (edición no. 4, p. 28), por D. Braja M., 2015, Cengage Learning.

La grava se compone de fragmentos de rocas, que tienen partículas ocasionales de cuarzo, feldespato y otros minerales.

Entre las partículas presentes en la arena, las predominantes son el cuarzo y el feldespato, aunque en algunas ocasiones también se pueden encontrar granos de otros minerales.

Los limos se pueden identificar como unas fracciones microscópicas del suelo compuestas de fragmentos de cuarzo muy finos, así como de algunos fragmentos de minerales micáceos en forma laminar.

Las arcillas se pueden identificar por estar formadas mayormente por partículas de mica, minerales de arcilla y otros minerales en forma de láminas microscópicas y submicroscópicas.

Como se muestra en la tabla 1, las arcillas se definen generalmente como partículas menores de 0.002 mm. En algunos casos las partículas de tamaño entre 0.002 y 0.005 mm también. Las partículas se clasifican como arcilla sobre la base de su tamaño, ya que no pueden contener necesariamente minerales de arcilla. Los suelos no arcillosos pueden contener partículas de cuarzo, feldespato, mica o son lo suficientemente pequeños como para estar dentro de la clasificación de tamaño de arcilla. Por lo tanto, esto es apropiado para partículas de suelo más pequeñas que 0.002 mm o de 0.005 mm, como se ha definido bajo diferentes sistemas, a las que se llamará partículas de tamaño de arcilla en lugar de arcilla. Las partículas de arcilla son en la mayoría de su intervalo de tamaño coloidal ($<0.001\text{mm}$), y 0.002mm parece ser el límite superior. (Braja M., 2015)

2.1.2 CLASIFICACIÓN DE SUELOS

Debido a que los suelos presentan gran variedad en la naturaleza, la mecánica de suelos desarrollo varios métodos de clasificación de estos. Cada método tiene, su campo de aplicación derivado de la necesidad y uso que los haya propiciado. De esta manera tenemos la clasificación de los suelos según el tamaño de sus partículas, la clasificación de la Asociación Americana de Oficiales de Carretera Estatales y Transportes (American Association of State Highway and Transportation Officials), la clasificación de la Administración de Aeronáutica Civil (C.A.A.), el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (S.U.C.S.), etc. Debido a los diferentes enfoques desde los que puede ser analizado el suelo como el que le da un geólogo o un agrónomo se crearon una variedad de sistemas de clasificación de suelos según la rama de la ingeniería que se esté aplicando. Es un hecho fundamental que cualquier clasificación que quiera abarcar las necesidades correspondientes debe apoyarse en las propiedades mecánicas de los suelos, debido a que son elementales en las distintas aplicaciones de la ingeniería.

2.1.3 SISTEMA DE CLASIFICACIÓN AASHTO

El sistema de clasificación AASHTO se encuentra dividido en siete grupos distintos. Donde designa que en los grupos A1, A2 Y A3 se encuentran aquellos suelos que el 35% o menos de material pasa por el tamiz no.200. Los grupos del A4 al A7 son en los que más del 35% de suelo pasa por el tamiz no. 200. En la tabla 2 podemos ver la representación de estos grupos.

Tabla 2. Clasificación de materiales de carreteras subrasantes

Clasificación general	Materiales granulares (35% o menos del total de la muestra pasada por el núm. 200)						
	A-1		A-3	A-2			
Grupo de clasificación	A-1-a	A-1-b		A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7
Análisis de tamiz (porcentaje de paso)							
Núm. 10	50 máx.						
Núm. 40	30 máx.	50 máx.	51 mín.				
Núm. 200	15 máx.	25 máx.	10 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.
Características de la fracción de paso núm. 40							
Límite líquido				40 máx.	41 mín.	40 máx.	41 mín.
Índice de plasticidad	6 máx.		NP	10 máx.	10 máx.	11 mín.	11 mín.
Tipos comunes de materiales significativos constituyentes	Fragmentos de roca, grava y arena		Arena fina	Limo o grava arcillosa y arena			
Clasificación general de la subrasante	Excelente a bueno						

Clasificación general	Materiales granulares (35% o menos del total de la muestra pasada por el núm. 200)				
	A-4		A-5	A-6	A-7
Grupo de clasificación					A-7-5* A-7-6†
Análisis de tamiz (porcentaje de paso)					
Núm. 10					
Núm. 40					
Núm. 200	36 mín.		36 mín.	36 mín.	36 mín.
Características de la fracción de paso núm. 40					
Límite líquido	40 máx.		41 mín.	40 máx.	41 mín.
Índice de plasticidad	10 máx.		10 máx.	11 mín.	11 mín.
Tipos comunes de materiales significativos constituyentes	Suelos limosos			Suelos arcillosos	
Clasificación general de la subrasante	Regular a malo				

*Para A-7-5, $PI \leq LL - 30$

†Para A-7-6, $PI > LL - 30$

Nota: Adaptado de *Fundamentos de ingeniería geotécnica* (edición no. 4, p. 79), por D. Braja M., 2015, Cengage Learning.

De acuerdo con la norma AASHTO M-145 se definen los siguientes términos:

- Grava: Es el material que pasa por el tamiz de 75 mm y retenido en el tamiz de 2 mm.
- Arena gruesa: Material que pasa por el tamiz de 2mm y se retiene en el tamiz de 0.425 mm.
- Arena fina: Material que pasa por el tamiz de 0.425mm y se retiene en el tamiz de 75mm.
- Limo-Arcilla: Material que pasa el tamiz de 75mm.
- Se dice de un suelo limoso cuando sus fracciones finas tienen un índice de plasticidad igual o menor a 10. Cuando el índice de plasticidad de las fracciones finas es igual o mayor a 11 se le llama arcilloso.
- En caso de encontrar cantos y guijarros (Material retenido en el tamiz de 75mm) se toma en cuenta el porcentaje de estos, pero se separan de la muestra que se usó para clasificación.

Descripción de los grupos y sub grupos con base a la norma AASHTO M-145:

Materiales granulares: contienen 35% o menos de material que pasa el tamiz de 75 mm.

Grupo A1:

El material típico de este grupo es una mezcla bien graduada de fragmentos de piedra o grava, arena gruesa, arena fina y un aglutinante de suelo no plástico o

débilmente plástico. Sin embargo, este grupo también incluye fragmentos de piedra, grava, arena gruesa, cenizas volcánicas, etc. sin material ligante.

Subgrupo A-1-a:

Incluye aquellos materiales que consisten predominantemente en fragmentos de piedra o grava, ya sea con o sin un aglutinante bien graduado de material fino.

Subgrupo A-1-b:

Incluye aquellos materiales que consisten predominantemente en arena gruesa con o sin un aglutinante de suelo bien graduado.

Grupo A-3:

El material típico de este grupo es arena fina de playa o arena fina de desierto sin finos limosos o arcillosos o con una cantidad muy pequeña de limo no plástico. El grupo incluye también las arenas de río fina mal graduada y cantidades limitadas de arena gruesa y grava.

Grupo A-2:

Este grupo incluye una amplia variedad de materiales "granulares" que se encuentran en el límite entre los materiales que caen en los grupos A-1 y A-3 y los materiales de limo-arcilla de los grupos A-4, A-5, A-6 y A-7 Incluye todos los materiales que contienen 35% o menos que pasan el tamiz de 75mm (No. 200) que no pueden clasificarse como A-1 o A-3, debido al contenido de finos o plasticidad o ambos, en exceso de las limitaciones para esos grupos.

Subgrupos A-2-4 y A-2-5:

Incluyen varios materiales granulares que contienen un 35% o menos que pasa el tamiz de 75 mm (No. 200) y con una porción de menos 0.425 mm (No. 40) que tiene las características del A- 4 y A -5 grupos. Estos grupos incluyen materiales tales como grava y arena gruesa con contenidos de limo o índices de plasticidad superiores a los límites del grupo A-1, y arena fina con contenido de limo no plástico superior a los límites del Grupo A-3.

Subgrupos A-2-6 y A-2-7:

Incluyen materiales similares a los descritos en los subgrupos A-2-4 y A-2-5 excepto que la porción fina contiene arcilla plástica que tiene las características del A-6 o grupo A-7.

Nota 2: La clasificación de materiales en los diversos grupos se aplica solo a la fracción que pasa el tamiz de 75 mm. Por lo tanto, cualquier especificación relacionada con el uso de materiales A-1, A-2 o A-3 en la construcción debe indicar si se permiten cantos rodados retenidos en el tamiz de 75 mm.

Limo-Arcilla materiales: contienen más del 35% que pasa el tamiz de 75mm.

Grupo A-4:

El material típico de este grupo es un suelo limoso no plástico o moderadamente plástico que generalmente tiene un 75% o más que pasa el tamiz de 75 mm (No. 200). El grupo incluye también mezclas de suelo limoso fino y hasta 64% de arena y grava retenidas en el tamiz de 75 mm (No. 200)

Grupo A-5: El material típico de este grupo es similar al descrito en el grupo A-4, excepto que generalmente es de carácter diatomáceo o micáceo y puede ser altamente elástico como lo indica el alto límite líquido.

Grupo A-6:

El material típico de este grupo es un suelo de arcilla plástica que por lo general tiene un 75 por ciento o más que pasa el tamiz de 75 mm (No. 200). El grupo incluye también mezclas de tierra fina arcillosa y hasta un 64 por ciento de arena y grava retenida en el tamiz 75mm (No. 200). Los materiales de este grupo suelen tener un gran cambio de volumen entre los estados húmedo y seco.

Grupo A-7:

El material típico de este grupo es similar al descrito en el grupo A-6, excepto que tiene los altos límites líquidos característicos del grupo A-5 y puede ser elástico y estar sujeto a cambios de gran volumen.

Subgrupo A-7-5:

Incluye aquellos materiales con índices de plasticidad moderados en relación al límite líquido y que pueden ser altamente elásticos, así como sujetos a cambios de volumen considerables.

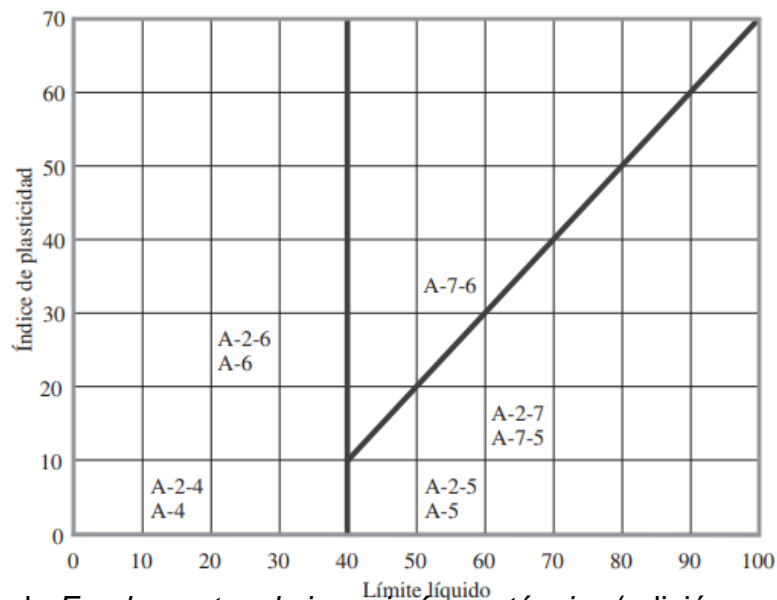
Subgrupo A-7-6:

Incluye aquellos materiales con altos índices de plasticidad en relación con el límite líquido y que están sujetos a un cambio de volumen extremadamente alto.

Nota 3: Los suelos altamente orgánicos (turba o estiércol) pueden clasificarse en un grupo A-8. La clasificación de este material se basa en la inspección visual y no depende del porcentaje que pasa el tamiz de 75 mm (n.º 200), el límite líquido o el índice de plasticidad. El material está compuesto principalmente de materia orgánica parcialmente descompuesta, generalmente tiene una textura fibrosa, color marrón oscuro o negro y olor a descomposición.

Para la evaluación de la calidad de un suelo como un material de subrasante carretera, también se incorpora un número llamado índice de grupo (IG) a los grupos y subgrupos del suelo. Este número se escribe entre paréntesis después de la designación del grupo o subgrupo. (Braja M., 2015)

Ilustración 2. Rango del límite líquido y del índice de plasticidad para suelos en los grupos A-2, A-4, A-5, A6 y A7



Nota: Adaptado de *Fundamentos de ingeniería geotécnica* (edición no. 4, p. 80), por D. Braja M., 2015, Cengage Learning.

La norma AASHTO M-145 nos indica la fórmula que determina el valor del índice de grupo:

$$IG = (F - 35)[0.2 + 0.005(LL - 40)] + 0.01(F - 15)(PI - 10)$$

Donde:

F = porcentaje pasado por el tamiz núm. 200

LL = límite líquido

PI = índice de plasticidad

2.1.4 SISTEMA UNIFICADO DE CLASIFICACIÓN DE SUELOS

En la ilustración 3 se puede observar cómo se divide el sistema en dos, suelo de partículas gruesas y suelo de partículas finas.

El suelo de partículas gruesas son las gravas y arenas. Y se dan cuando más del 50% de material es retenido en el tamiz núm.200.

El suelo de partículas finas se refiere a limos y arcillas. Dados cuando más del 50% del material pasa por el tamiz núm.200.

Simbología:

W: Bien clasificado

P: Mal clasificado

L: Baja plasticidad (límite líquido menor de 50)

H: Alta plasticidad (límite líquido mayor de 50)

Ilustración 3 . Sistema unificado de clasificación de suelos

SISTEMA UNIFICADO DE CLASIFICACIÓN DE SUELOS (S.U.C.S.)
INCLUYENDO IDENTIFICACIÓN Y DESCRIPCIÓN

DIVISIÓN MAYOR		SÍMBOLO	NOMBRES TÍPICOS	CRITERIO DE CLASIFICACIÓN EN EL LABORATORIO		
SUELOS DE PARTÍCULAS GRUESAS Más de la mitad del material es retenido en la malla número 200 ⊕	ARENAS Más de la mitad de la fracción gruesa pasa por la malla No. 4 PARA CLASIFICACIÓN VISUAL PUEDE USARSE 1/2 cm. COMO EQUIVALENTE A LA ABERTURA DE LA MALLA No. 4	GRAVAS LIMPIAS Poco o nada de partículas finas	GW	Gravas bien graduadas, mezclas de grava y arena con poco o nada de finos	COEFICIENTE DE UNIFORMIDAD Cu: mayor de 4. COEFICIENTE DE CURVATURA Cc: entre 1 y 3. Cu = D ₆₀ / D ₁₀ Cc = (D ₃₀) ² / (D ₁₀)(D ₆₀)	
			GP	Gravas mal graduadas, mezclas de grava y arena con poco o nada de finos		
		GRAVA CON FINOS Cantidad apreciable de partículas finas	* GM d u	GM	Gravas limosas, mezclas de grava, arena y limo	LÍMITES DE ATTERBERG ABAJO DE LA "LÍNEA A" O I.P. MENOR QUE 4. LÍMITES DE ATTERBERG ARRIBA DE LA "LÍNEA A" CON I.P. MAYOR QUE 7.
				GC	Gravas arcillosas, mezclas de gravas, arena y arcilla	
		ARENAS LIMPIAS Poco o nada de partículas finas	SW	SW	Arenas bien graduadas, arena con gravas, con poca o nada de finos.	Cu = D ₆₀ / D ₁₀ mayor de 6 ; Cc = (D ₃₀) ² / (D ₁₀)(D ₆₀) entre 1 y 3.
				SP	Arenas mal graduadas, arena con gravas, con poca o nada de finos.	
	ARENAS CON FINOS Cantidad apreciable de partículas finas	* SM d u	SM	Arenas limosas, mezclas de arena y limo.	LÍMITES DE ATTERBERG ABAJO DE LA "LÍNEA A" O I.P. MENOR QUE 4. LÍMITES DE ATTERBERG ARRIBA DE LA "LÍNEA A" CON I.P. MAYOR QUE 7.	
			SC	Arenas arcillosas, mezclas de arena y arcilla.		
	SUELOS DE PARTÍCULAS FINAS Más de la mitad del material pasa por la malla número 200 ⊕	LIMOS Y ARCILLAS Límite Líquido menor de 50	ML	Limos inorgánicos, polvo de roca, limos arenosos o arcillosos ligeramente plásticos.	G – Grava, S – Arena, O – Suelo Orgánico, P – Turba, M – Limo C – Arcilla, W – Bien Graduada, P – Mal Graduada, L – Baja Compresibilidad, H – Alta Compresibilidad	
			CL	Arcillas inorgánicas de baja o media plasticidad, arcillas con grava, arcillas arenosas, arcillas limosas, arcillas pobres.		
			OL	Limos orgánicos y arcillas limosas orgánicas de baja plasticidad.		
		LIMOS Y ARCILLAS Límite Líquido Mayor de 50	MH	Limos inorgánicos, limos micáceos o diatomáceos, más elásticos.		
CH			Arcillas inorgánicas de alta plasticidad, arcillas francas.			
OH			Arcillas orgánicas de media o alta plasticidad, limos orgánicos de media plasticidad.			
SUELOS ALTAMENTE ORGÁNICOS		P	Turbas y otros suelos altamente orgánicos.			
CARTA DE PLASTICIDAD (S.U.C.S.)						

** CLASIFICACIÓN DE FRONTERA- LOS SUELOS QUE POSEAN LAS CARACTERÍSTICAS DE DOS GRUPOS SE DESIGNAN CON LA COMBINACIÓN DE LOS DOS SÍMBOLOS; POR EJEMPLO GW-GC, MEZCLA DE ARENA Y GRAVA BIEN GRADUADAS CON CEMENTANTE ARCILLOSO.

⊕ TODOS LOS TAMAÑOS DE LAS MALLAS EN ESTA CARTA SON LOS U.S. STANDARD.

* LA DIVISIÓN DE LOS GRUPOS GM Y SM EN SUBDIVISIONES d Y u SON PARA CAMINOS Y AEROPUERTOS UNICAMENTE, LA SUB-DIVISIÓN ESTA BASADA EN LOS LÍMITES DE ATTERBERG EL SUFIIJO d SE USA CUANDO EL L.L. ES DE 28 O MENOS Y EL I.P. ES DE 6 O MENOS. EL SUFIIJO u ES USADO CUANDO EL L.L. ES MAYOR QUE 28.

2.2 ARCILLA

Las arcillas se diferencian de las arenas, gravas y limos que están compuestos de partículas voluminosas, inertes y gruesas, cuyas propiedades mecánicas dependen del tamaño, forma, textura y graduación de estas partículas.

Las arcillas son cualquier sedimento o depósito mineral que este formado por partículas de tamaño inferior a 0.002 mm y su principal componente son silicatos de aluminio hidratados. Las características que nos permiten identificarlas principalmente son que se vuelven plásticas al humedecerse y al ser calentadas por encima de los 800°C, tienen una dureza y sonoridad característica de estas.

Las arcillas resultan de la alteración físico-química por acción del agua y de minerales que forman parte de otras rocas como feldespatos, piroxenos y micas, lo que genera minerales de la arcilla, dependiendo de qué roca y en qué grado se altera. Por lo que al hablar de la arcilla no se trata de un único material de composición simple, ya que es un material que tiene diversos orígenes y composiciones.

2.2.1 MINERALES ARCILLOSO

Los minerales son sustancias inorgánicas y naturales, se caracterizan por tener una estructura interna que está determinada por un cierto arreglo específico de sus iones y átomos. Tanto su composición química como sus propiedades físicas pueden ser fijas o variar dentro de unos límites definidos. Las propiedades físicas de estas que se utilizan comúnmente para su identificación son: el color, el lustre, la tonalidad de sus raspaduras, la forma de cristalización y de su fractura, la disposición de sus

planos crucero, su dureza, la capacidad para permitir el paso de ondas, radiaciones o luz, y por último la densidad relativa.

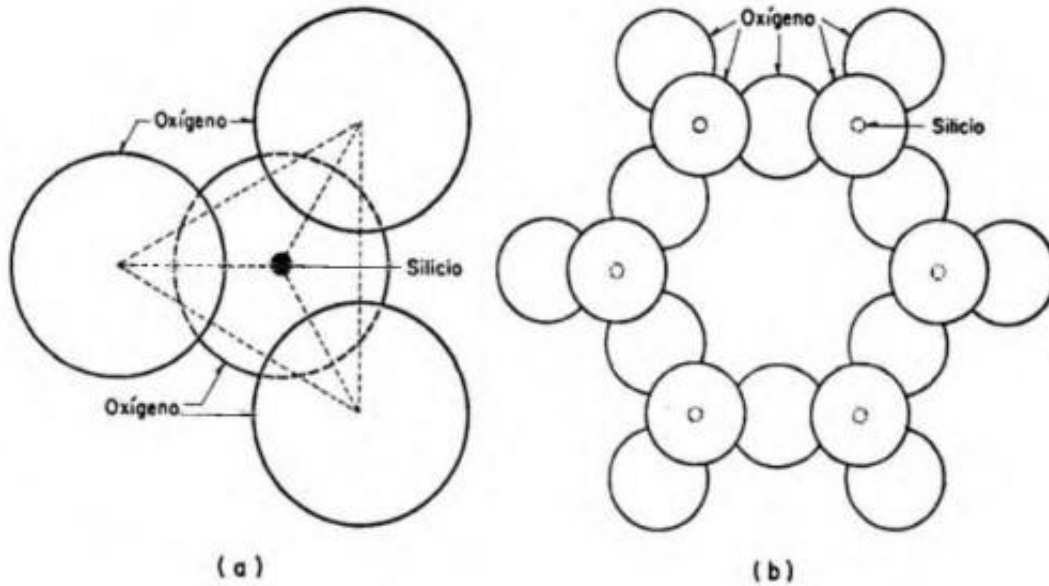
Los minerales que predominan en los suelos formados por partículas gruesas son: silicatos, donde destacan los feldespatos de potasio, sodio o calcio, micas, olivino, serpentina, entre otros; óxidos, principalmente cuarzo, limonita, magnetita y el corindón; carbonatos, representados por la calcita y la dolomita; finalmente sulfatas, donde se encuentran la anhidrita y el yeso.

El producto final al que llegan los agentes de descomposición química al partir de los minerales, principalmente silicatos encontrados en las rocas ígneas y metamórficas es la arcilla.

Las arcillas están principalmente constituidas por silicatos de aluminio hidratados, pero también se pueden encontrar silicatos de magnesio, hierro u otros metales, igualmente hidratados. Estos minerales se caracterizan por tener casi siempre una estructura cristalina definida en la cual sus átomos se disponen en láminas, teniendo dos tipos de láminas: la silícica y la alumínica.

Las láminas silícicas están formadas por un átomo de silicio, el cual está rodeado de cuatro átomos de oxígeno, de tal manera que el conjunto tenga una forma de tetraedro, los cuales a su vez se agrupan en unidades hexagonales, en las cuales se utiliza un átomo de oxígeno como nexos entre cada dos tetraedros. Estas unidades hexagonales al repetirse indefinidamente forman una red lamina

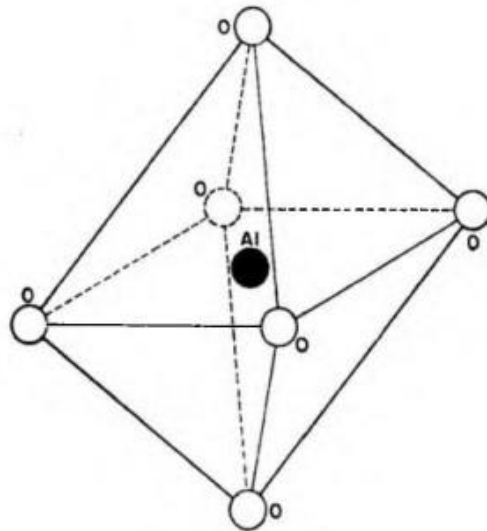
Ilustración 4 . Esquema de la estructura de lámina silícica



Nota: Adaptado de *Mecánica de suelos Tomo 1* (edición no. 2, p. 11), por E. Juárez Badillo y A. Rico Rodríguez, 1973, Limusa.

Las láminas alumínicas están formadas por retículas de octaedros, los cuales se encuentran dispuestos de manera que un átomo de aluminio este en el centro y seis átomos de oxígeno se encuentren alrededor de este. Al igual que en el las láminas silícicas, un átomo de oxígeno funciona como el nexo entre cada dos octaedros para formar la retícula.

Ilustración 5. Esquema de la estructura de la lámina aluminica



Nota: Adaptado de *Mecánica de suelos Tomo 1* (edición no. 2, p. 12), por E. Juárez Badillo y A. Rico Rodríguez, 1973, Limusa.

Los tres grupos más importantes de los minerales arcillosos son la montmorillonita, la illita y la caolinita, que son aluminosilicatos hidratados cristalinos. La montmorillonita es el mineral arcilloso que presenta la mayor parte de los problemas de los suelos expansivos. El nombre "montmorillonita" se usa actualmente tanto como un nombre de grupo para todos los minerales arcillosos con una red expansiva, excepto la vermiculita, como también como un nombre mineral específico. La absorción de agua por las arcillas conduce a la expansión. Desde el punto de vista mineralógico, la magnitud de la expansión depende del tipo y la cantidad de minerales arcillosos presentes, sus iones intercambiables, el contenido de electrolitos de la fase acuosa y la estructura interna. (Chen, 1975)

Las illitas consisten de una lámina de gibbsita unida a dos láminas de sílice, una en la parte de arriba de la lámina de gibbsita y la otra en la parte inferior. Los iones de potasio son los encargados de unir las capas de illita entre sí. Es necesaria una carga negativa para equilibrar los iones de potasio la cual se obtiene de la sustitución de un ion de aluminio por alguno de silicio presente en las láminas tetraédricas. La expansividad de las arcillas illíticas es menor que la de las montmorillonitas debido a que su constitución interna tiene una tendencia a formar grumos de materia, los cuales reducen el área expuesta al agua por unidad de volumen. Lo que provoca que generalmente las arcillas illíticas se comporten mecánicamente de una forma más favorable para el ingeniero.

Las montmorillonitas tienen una estructura similar a la de la illita, están formadas por una lámina alumínica entre dos silícicas, superponiéndose indefinidamente. En este caso la unión entre las retículas del mineral es débil, por lo que las moléculas de agua pueden introducirse en la estructura con relativa facilidad, a causa de las fuerzas eléctricas generadas por su naturaleza dipolar. Lo anterior produce un incremento en el volumen de los cristales, lo que se traduce, macro físicamente, en una expansión. Las arcillas montmorillonitas, especialmente en presencia de agua, presentarán fuerte tendencia a la inestabilidad. Las bentonitas son arcillas del grupo de las montmorillonitas, originadas por la descomposición química de las cenizas volcánicas y presentan la expansividad típica del grupo en forma particularmente aguda, lo que las hace sumamente críticas en su comportamiento mecánico. Estas arcillas aparecen, desdichadamente, con frecuencia en los trabajos de campo; por

otra parte, en ocasiones, ayudan al ingeniero en la resolución de ciertos problemas prácticos. (Juárez Badillo & Rico Rodríguez, 1973)

2.3 SUELOS EXPANSIVOS

Un suelo expansivo es aquel que presenta cambios apreciables de volumen ya sea una expansión o una contracción como consecuencia de un aumento o disminución de humedad. La causa de estos cambios de volumen está relacionada a las características físico-químicas del suelo, siendo la principal el contenido de finos compuestos por diversos materiales, donde la más destacable es la montmorillonita.

La expansión se debe a un incremento y disminución de la tensión capilar, la cual se genera en las zonas límites entre el agua de los vacíos y el aire. Por lo que cuando un suelo expansivo tiene pérdidas de agua, como consecuencia se produce un incremento en la tensión capilar al tratar de absorber el agua que se necesita para el equilibrio, lo que genera un encogimiento; Así mismo cuando un suelo se encuentra comprimido y en condición de absorber agua, se produce un relajamiento de la tensión capilar al obtener el agua que se necesita para llegar al punto de equilibrio, lo cual tiene como consecuencia que se produzca un hinchamiento. Otra posible causa de los cambios de volumen por expansión es el ajuste que se da entre el agua de poros y la estructura de la montmorillonita debido a un cambio en sus energías estructurales.

G. W. Donaldson clasificó los materiales parentales que se pueden asociar con suelos expansivos en dos grupos. El primer grupo comprende las rocas ígneas básicas. En estos suelos, los minerales de feldespato y piroxeno de las rocas madre

se han descompuesto para formar montmorillonita y otros minerales secundarios. El segundo grupo comprende las rocas sedimentarias que contienen montmorillonita como componente que se descompone físicamente para formar suelos expansivos. (Chen, 1975)

2.3.1 IDENTIFICACIÓN DE LOS SUELOS EXPANSIVOS

La identificación de suelos expansivos se ha basado principalmente en pruebas de laboratorio para determinar propiedades físicas que se relacionan directamente con el tipo y contenido de minerales de arcilla. Otras pruebas determinan directamente la mineralogía y química del suelo y algunas miden relaciones de cambio de volumen en muestras alteradas e inalteradas expresadas en porcentaje. (Meza Ochoa, 2005)

Tabla 3. Pruebas de laboratorio para identificación de suelos expansivos

Prueba	Referencia 1	Referencia 2	Propiedad investigada	Parámetro determinado
a) Límites de Atterberg	NMX-C-493-ONNCCE-2018	ASTM D4318	Plasticidad, consistencia	Índice plástico (IP) = LL - LP
Límite líquido (LL)	NMX-C-493-ONNCCE-2018	ASTM D4318		

Prueba	Referencia 1	Referencia 2	Propiedad investigada	Parámetro determinado
Límite plástico (LP)	NMX-C-493-ONNCCE-2018	ASTM D4318		
Límite de contracción (LC)	NMX-C-493-ONNCCE-2018	ASTM D4318		Relación de contracción (RC)
b) Contenido de partículas tamaño arcilla	NMX-C-077-ONNCCE-2019		Distribución de tamaños de partículas fino-granulares	Porcentaje de finos menor a 2 µm
c) Pruebas Mineralógicas	Whiting (1964)		Mineralogía de las partículas de arcilla	
Difracción de rayos X (XRD)		ASTM STP 479 (1970)	Dimensión de cristales	Espaciamiento basal
Análisis Termodiferencial	Barshad (1964), Mackenzie (1970)		Reacción a tratamientos de calor.	Área y amplitud de los picos en la curva térmica
Microscopio electrónico	McCrone & Delly (1973)		Tamaño y forma de partículas de arcilla	Imagen visual de las partículas
Espectroscopia infrarroja	Farmer (1974)		Absorción de la radiación infrarroja	Bandas de absorción en el espectro infrarrojo

Prueba	Referencia 1	Referencia 2	Propiedad investigada	Parámetro determinado
d) Capacidad de intercambio catiónico	Chapman (1965)		Deficiencia de carga y actividad superficial de partículas de arcilla	CEC (meq/100g)
e) Expansión libre	Holtz & Gibbs		Expansión de una muestra de suelo seco al aire no confinada, no consolidada, en condición saturada	Expansión libre(%)
f) Potencial de cambio de volumen	Lambe (1960)		Expansión unidimensional bajo condiciones de deformación controlada de una muestra reconstituida	Índice Lambe (kPa) Índice PVC
g) Índice de expansión	Uniform Building Code		Expansión unidimensional bajo sobrecarga de 7 kPa (1 psi) de una muestra compactada con la humedad correspondiente al 50% de saturación	Índice de expansión (EI)

Prueba	Referencia 1	Referencia 2	Propiedad investigada	Parámetro determinado
h) Coeficiente de expansión lineal (COLE	Brasher et al., (1966)		Deformación lineal de un suelo natural secado desde 33 kPa (5 psi) hasta 1000 Mpa	COLE Y LE (%)

Nota: Modificado de *Influencia de la succión matricial en el comportamiento deformacional de dos suelos expansivos* (p. 7), por V. C. Meza Ochoa, 2005.

2.3.2 CLASIFICACIÓN DE LOS SUELOS EXPANSIVOS

Los esquemas de clasificación del potencial expansivo del suelo combinan diversos parámetros determinados en las pruebas de identificación. Estos esquemas no tienen una definición estándar de potencial de expansión además varían en las condiciones de ejecución de las pruebas, ya que estas son desarrolladas sobre muestras de diferentes tipos de suelo, las muestras se pueden encontrar en distintas condiciones iniciales como lo son las muestras alteradas o inalteradas, y pueden tener diferentes contenidos de humedad (seca al aire, compactada con la densidad máxima a la humedad optima o humedad natural. Pese a esto en todos los

esquemas se tiene definido de la misma manera al termino Potencial de Expansión como la capacidad relativa de cambio de volumen del suelo.

La mayoría de los esquemas de clasificación de suelos expansivos estiman intervalos de valores probables de cambio de volumen, presión de expansión probable o rangos de expansión cualitativa, con los cuales definen el grado en que el suelo es expansivo, siendo los grados más usados: bajo, medio, alto o también crítico y no crítico.

Holtz & Gibbs (1956) presentaron un criterio basado en observaciones directas de cambio de volumen, asociado con el índice plástico, el límite de contracción y el contenido de coloides, de muestras inalteradas bajo una sobrecarga de 7 kPa.

Tabla 4. Clasificación de suelos expansivos basado en contenido de coloides, índice plástico y límite de contracción. Holtz & Gibbs (1956).

Datos de pruebas índice			Expansión probable (% total de cambio de volumen)	Grado de expansión
Contenido de coloides (% menor a 1 μ m)	Índice plástico	Límite de contracción		
> 28	> 35	< 11	> 30	Muy alto
20 - 31	25 - 41	7 - 12	20 - 30	Alto
13 - 23	15 - 28	10 - 16	10 - 20	Medio
< 15	< 18	> 15	< 10	Bajo

Seed, Woodward & Lundgren (1962) hicieron pruebas sobre una mezcla artificial de arena y minerales de arcilla compactadas con el contenido de humedad óptimo de una prueba de compactación normal, bajo una sobrecarga de 7 kPa, encontrando

una relación entre el potencial de expansión, la Actividad “A” y el contenido de partículas tamaño arcilla (tamaños menores a 2 μm) “C” de acuerdo a la siguiente expresión matemática:

$$E(\%) = 3.6 \times 10^{-5} A^{2.44} C^{3.44} \quad \text{EC.1}$$

Donde E es el porcentaje de expansión que puede presentar una muestra compactada con la humedad óptima y la máxima densidad seca del Proctor normal. En este criterio, Seed et al., (1962) modifican la definición original de Actividad de Skempton, 1953 (Ecuación 2), por la expresión dada en la Ecuación 3.

$$\text{Actividad (Skempton, 1953)} = \frac{IP}{\%<2\mu m} \quad \text{EC.2}$$

$$\text{Actividad (Seed et al, 1962)} = \frac{IP}{\%<2\mu m - 10} \quad \text{EC.3}$$

El criterio de Seed et al., (1962). Para intervalos de valores de E, se clasifica cualitativamente el potencial de expansión en: bajo ($E < 1.5$), medio ($1.5 < E < 5$), alto ($5 < E < 25$) y muy alto ($E > 25$).

Chen (1965) desarrolló una correlación entre las propiedades índice y el número de golpes en la prueba de penetración normal (Tabla 5). Posteriormente (Chen, 1988) presentó un esquema de clasificación utilizando únicamente el índice plástico (Tabla 6). La comisión de vías de Kansas en 1974 también implementó un esquema con base en el índice plástico (Tabla 7).

Ilustración 6. Carta de clasificación del potencial de expansión. Modificado de Seed et al., (1962)

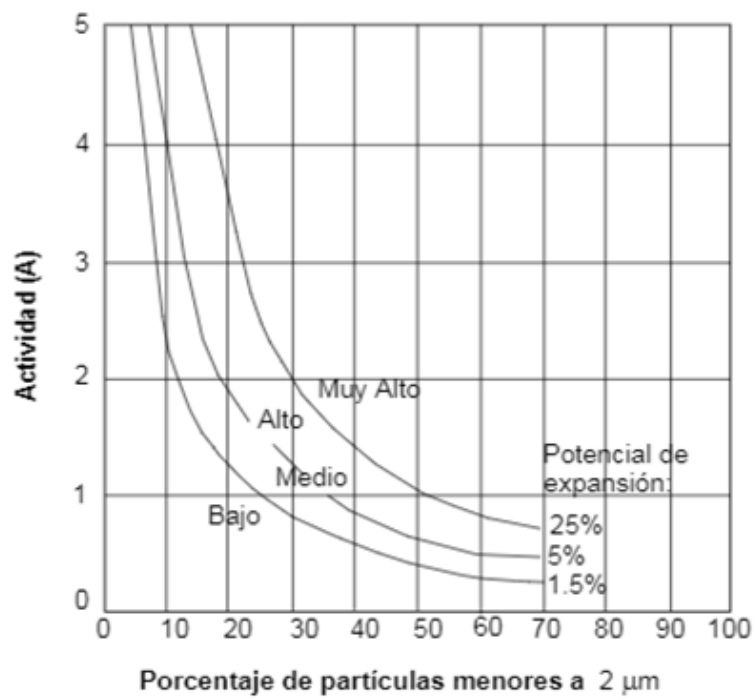


Tabla 5. Clasificación de suelos expansivos basado en el Porcentaje Pasa tamiz No 200, límite líquido y la resistencia a la penetración normal de suelos de las Montañas Rocosas. Chen (1965).

Datos de campo y laboratorio			Expansión probable (% total de cambio de volumen)	Grado de expansión
Porcentaje pasa Tamiz No 200	Límite Líquido	Resistencia a la penetración normal (golpes/pie)		
> 95	> 60	> 30	> 10	Muy alto
60 - 95	40 - 60	20 - 30	3 - 10	Alto
30 - 60	30 - 40	10 - 20	1 - 5	Medio
< 30	< 30	< 10	< 1	Bajo

Tabla 6. Clasificación de suelos expansivos basado en el Índice Plástico. Chen (1988)

IP	Clasificación del potencial de expansión
0 - 15	Bajo
10 - 35	Medio
20 - 55	Alto
> 35	Muy alto

Tabla 7. Clasificación de suelos expansivos basado en el Índice Plástico. Kansas Highway Commission (1974).

IP	Clasificación del potencial de expansión
< 15	Bajo a nulo
15 - 35	Medio
> 35	Alto

Ranganatham & Satyanarayana (1965) clasificaron el potencial de expansión con base en el índice de contracción, definiendo este como la diferencia entre el límite líquido y el límite de contracción.

Tabla 8. Clasificación del potencial de expansión del suelo. Ranganatham & Satyanarayana (1965).

Índice de contracción (%) IC = LL-LC	Clasificación del potencial de expansión
< 20	Bajo
20 - 30	Medio
30 - 60	Alto
> 60	Muy alto

Raman (1967) presentó el grado de expansión en función del índice plástico y el índice de contracción

Tabla 9. Clasificación de suelos expansivos basado en el índice de plasticidad e índice de contracción. Raman (1967)

Índice Plástico (%)	Índice de Contracción (%) IC = LL-LC	Grado de expansión
< 12	< 15	Bajo
12- 23	15 - 30	Medio
23 - 32	30 - 40	Alto
> 32	> 40	Muy alto

Anderson & Thomson (1969) utilizaron el índice plástico, pero además de describir cualitativamente el grado de expansión, proporcionan un intervalo de potencial de expansión.

Tabla 10. Clasificación del grado de expansión del suelo. Anderson & Thomson (1969)

Índice Plástico (%)	Potencial de expansión (%)	Grado de expansión
< 20	< 1.5	Bajo
20 - 31	1.5 - 4.0	Medio
31 - 39	4.0 - 6.0	Alto
> 39	> 6.0	Muy alto

Saito & Miki (1975) definieron la relación de plasticidad como $PR = \text{Índice Plástico} / \text{Límite Plástico}$ y la correlacionaron con medidas de expansión.

Tabla 11. Clasificación del grado de expansión del suelo según Saito & Miki (1975)

Relación de Plasticidad (%)	Potencial de cambio de volumen (%)	Clasificación del potencial de expansión
IP/LP < 0.6	< 3	Bajo
0.6 - 1.0	3 - 10	Medio
1.0 - 2.0	10 - 50	Alto
> 3.0	> 50	Muy alto

2.3.3 PROPIEDADES FÍSICAS DE LOS SUELOS EXPANSIVOS

Es muy conocido por los ingenieros en suelos que las arcillas de montmorillonita sufren una expansión cuando su contenido de humedad aumenta, por otro lado, en la illita y caolinita la expansión se encuentra ausente ante la humedad.

Contenido de humedad

Independientemente del alto potencial de expansión de un suelo, al no tener un cambio por contenido de humedad la arcilla no cambiara su volumen y consecuentemente una estructura que se encuentre cimentada sobre arcillas que contengan humedad periódica no sufrirán movimientos por levantamientos. Cuando el contenido de humedad de las arcillas cambia, ocasiona una expansión de volumen en dirección vertical y horizontal. Tan solo en 1% a 2% de contenido de humedad es necesario para ocasionar una expansión grave, esto quiere decir que no se necesita una saturación completa para que se logre la expansión. Las

muestras de arcilla en laboratorio se expanden con un ligero aumento de la humedad en el consolidómetro. Es bien sabido que las losas de piso cimentadas sobre suelos expansivos se agrietan más gravemente cuando el contenido de humedad aumenta ligeramente debido a la humedad local. Cuando la losa del piso se inunda, como en el caso de un nivel freático ascendente, la extensión de las grietas no será severas pero el piso se levantará.

La cantidad de expansión de un suelo expansivo es controlada por el contenido de humedad inicial de estos. Las arcillas secas que tienen un contenido de humedad natural menor al 15% advierten peligro. Dichas arcillas absorben un 35% de la humedad fácilmente, provocando daños a las estructuras, como resultado de la expansión. Las arcillas con contenido de humedad superior al 30% por otro lado indican que la mayoría de la expansión ya ocurrió y que la próxima expansión será pequeña. Aun así, las arcillas húmedas que sufren una disminución del nivel freático u otros cambios en las condiciones físicas pueden desecarse y, al humedecerse posteriormente, volverán a mostrar un potencial de expansión.

Peso específico seco

Directamente vinculado con el contenido de humedad inicial, otro índice de expansión es el peso específico seco de la arcilla. Los suelos con pesos específicos secos superiores de $17,6 \text{ kN/m}^3$ ($1,76 \text{ ton/m}^3$) por lo general muestran un alto potencial de expansión.

En los resultados de las pruebas estándar de resistencia a la penetración también se refleja el peso específico seco de las arcillas. Las arcillas suelen poseer cierto potencial de expansión cuando tienen una resistencia a la penetración mayor a 15.

Propiedades índice

Las propiedades índice son un primer acercamiento hacia los suelos y deben servir como una guía para profundizar su estudio por medio de ensayos más detallados; en otras palabras, su empleo debe restringirse a una aproximación de diseño y la fase preliminar.

En relación al comportamiento del suelo con las propiedades índice han sido encontrados nuevos vínculos tras los últimos años, en especial en el ámbito de los suelos no saturados, enfatizando los asociados con los suelos expansivos y colapsables.

Tabla 12. *Correlación empírica entre las propiedades índice-propiedades mecánicas*

Propiedades índice primarias.	Correlación empírica con propiedad mecánica
Grado de saturación	Potencial de expansión, conductividad eléctrica
Peso específico seco	
Partículas menores a 0.002mm	Potencial de expansión y presión de expansión
Contracción lineal	
Contenido volumétrico de agua	Actividad-potencial expansivo
Límite líquido	Presión de expansión

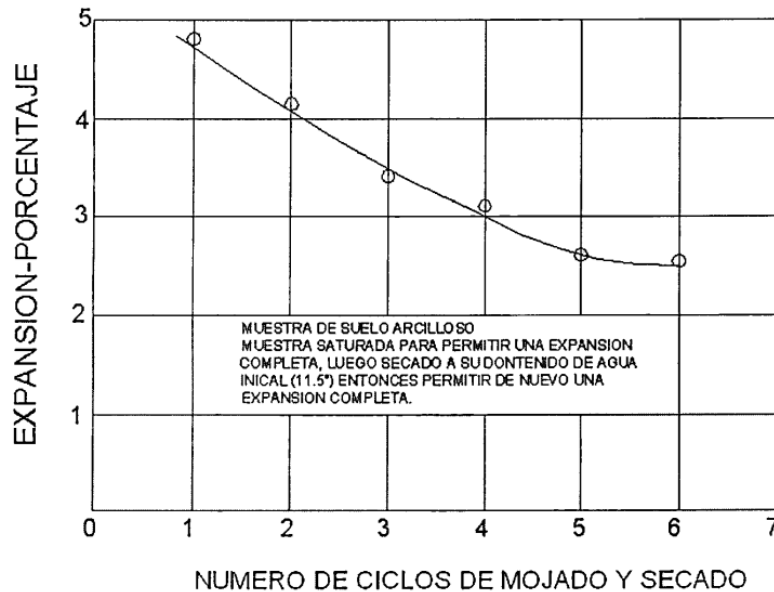
Peso específico relativo de los sólidos	Conductividad hidráulica
Compacidad	Potencial de expansión y presión de expansión
Humedad	Potencial de expansión
Resistencia a la penetración estándar	Potencial de expansión y compresibilidad
D₆₀, I_p y % que pasa malla No. 200	Succión
	Potencial de expansión
	Curva característica suelo-agua

Nota: Adaptado de *Diseño geotécnico y estructural de una cimentación en arcilla expansiva* (p. 16), por R. Beltrán Martínez, 2005.

Fatiga de expansión

Chen (1975) explica que una muestra de arcilla se somete a una expansión completa en el consolidómetro, se deja secar hasta su contenido de humedad inicial y luego se satura nuevamente, repitiéndose por varios ciclos. Se observó que después de cada ciclo de secado y humectación el suelo presenta signos de fatiga. Se ha detectado que los pavimentos basados en arcillas expansivas que han sufrido movimientos estacionales por humectación y secado tienen tendencia a alcanzar un punto de estabilización después de varios años. La fatiga de expansión probablemente pueda proporcionar la respuesta. La ilustración 7 muestra una curva típica de fatiga de laboratorio de hinchazón.

Ilustración 7. Fatiga de expansión



Nota: Adaptado de *Foundations on expansive soils* (p. 29), por F. H. Chen, 1988, Elsevier.

2.3.4 POTENCIAL EXPANSIVO

El potencial expansivo se utiliza para medir el grado de expansión que puede ocurrir en un suelo cuando reciba la carga de una edificación colocada sobre este. Esta propiedad se identifica a través de dos parámetros, los cuales son el porcentaje de expansión y la presión de expansión.

Porcentaje de expansión

En la prueba de consolidación se tiene definido al porcentaje de expansión según la ecuación 1

$$S\% = \frac{\delta}{h} \tag{Ecuación (1)}$$

En donde:

S%= Porcentaje de expansión

δ = Expansión generada en el espécimen cuando se satura

H = Altura

Presión de expansión.

Podemos definir a la presión de expansión como el esfuerzo que se necesita para que el espécimen, mediante incrementos de carga sucesivos regrese a su condición de volumen inicial. Al depender el mecanismo con que se realiza la prueba de la visión que posea el investigador sobre el fenómeno expansivo, se generan diferencias entre los resultados obtenidos por cada investigador debido principalmente a tres aspectos, que son: alteración de la muestra, tiempo de ejecución y la carga inicial sobre el espécimen.

Muchos autores exigen que la muestra debe llegar inalterada al anillo de consolidación tomando en cuenta que esta debe conservar su humedad natural, debido a que la estructura del suelo arcilloso define su comportamiento mecánico. También señalan que los experimentos deben ser realizados con un peso específico constante ya que esta es la única condición que afecta al potencial expansivo. La duración de la prueba depende en gran medida de la forma de saturar la muestra, la prueba será rápida si se inundan las vasijas del consolidómetro; y lenta si se realiza permitiendo que el agua penetre por acción capilar en todos los poros de la pastilla, siendo la duración en este caso de un mínimo de 72 horas.

La rapidez con la que se satura la muestra y el efecto que esta tiene sobre el potencial de expansión, comúnmente es despreciado por los analistas, pero esto es algo importante ya que en el caso de que se una entrada rápida del agua en el espécimen, la prueba nos dará como resultado un potencial de expansión menor al que daría si el agua penetrara lentamente.

Las cargas iniciales propuestas para la prueba por distintos autores varían de 0.01 a 0.10 kg/cm², Siendo el valor mas pequeño el utilizado en el procedimiento seguido por Jenningsy, fundamentándose en el hecho de que al aplicar una carga inicial mayor se cerrarían las fisuras naturales de la muestra, lo cual impediría la completa penetración del agua y alargaría el tiempo de ejecución de la prueba, lo cual provoca que los resultados sean expansiones mayores a las reales, ya que la pequeña carga inicial descomprime la muestra.

Según otros autores, basta con impedir que la muestra se desmorone por efecto del humedecimiento, o realizar dos o tres incrementos sucesivos para llegar a una carga inicial equivalente a la que tendría la muestra "in situ".

El autor Zepeda (1986) hizo otra recomendación para la realización de la prueba, en la que contempla dos etapas: la primera es la obtención del porcentaje y presión de expansión; la segunda es la verificación del valor de la presión calculada en la etapa.

El porcentaje de expansión obtenido se usará para calcular la expansión máxima que sufrirá un estrato de suelo, mientras que, la presión de expansión se utiliza para determinar si un suelo sufrirá expansiones o contracciones dependiendo de que la

presión ejercida por la edificación que se apoya en el suelo es menor o mayor que la presión de expansión obtenida.

Los resultados obtenidos de las curvas de compresibilidad deben tomarse como información cualitativa más que cuantitativa debido a la incertidumbre que se genera porque las muestras obtenidas tengan las condiciones de humedad iniciales de la obra.

2.3.5 EL AGUA EN SUELOS EXPANSIVOS

La mecánica de suelos expansivos tiene que considerar el problema de los suelos parcialmente saturados con sus tres fases constituyentes: la sólida, la líquida y la gaseosa. La fase sólida está formada por los minerales, la líquida por el agua libre y la gaseosa por el aire libre principalmente.

El agua en el suelo puede presentarse en tres formas principales con diferentes propiedades mecánicas definidas y de mucha importancia en el comportamiento del suelo. Estas formas son las siguientes:

Agua gravitacional o agua libre

Agua capilar

Agua adherida.

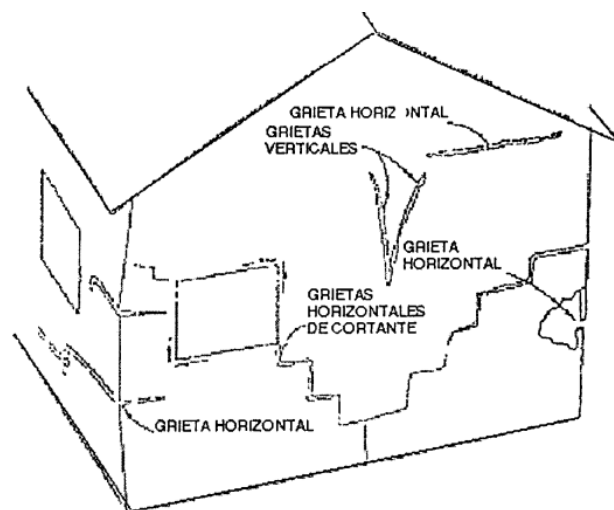
El agua gravitacional es el agua sujeta únicamente a la fuerza de la gravedad y puede fluir libremente, el agua capilar absorbida por efecto de la tensión superficial, permanece atrapada en los poros de la estructura del suelo. El agua capilar puede fluir con un gradiente hidráulico originado por una diferencia de cargas mayor que

la carga capilar en el suelo. El agua en la superficie de contacto agua-aire se encuentra en un estado de tensión. El agua adherida es el agua que queda atraída fuertemente hacia la periferia del grano por efecto de la atracción molecular, en granos menores de 2 micras, correspondientes a los minerales de arcillas, el agua hace que las moléculas de agua cerca de él, se orienten haciendo que el agua adquiera propiedades de un material cristalizado en la cercanía de la periferia del grano (Zeevaert, 1968).

2.3.6 TIPOLOGÍA DE DAÑOS

Los suelos expansivos provocados por las arcillas llegan a causar daños que afectan en diferentes magnitudes las estructuras, alcanzando en algunos casos a perjudicar su funcionalidad y estética. Que el daño sea mayor o menor está relacionado sobre todo al clima.

Ilustración 8. Daños que se presentan en una casa-habitación



Nota: Adaptado de *Estudio de fatiga de expansión en suelos arcillosos* (p. 42), por J. J. Torres García, 2005.

En un clima seco, el suelo presenta gran desecación y la evaporación sobrepasa la precipitación, cuando se realiza la construcción la edificación cubre el suelo y obstaculiza la evaporación, esto provoca que haya humedad en él y como se presenta en mayor parte en el centro que en sus bordes, el daño se hace notable con los años.

En el caso del clima subtropical la edificación recibe el daño ya que se produce un movimiento estacional. El problema está en los bordes de la construcción, estos suben y bajan de acuerdo a las estaciones lluviosas o secas, mientras el centro del edificio hace el trabajo de equilibrio.

Los daños que generan mayores consecuencias por la expansión se generan en lugares áridos y semiáridos porque la humedad por lo general es baja debido a la evaporación. Estos casos son más susceptibles cuando no se ha contemplado el fenómeno ni estructural ni geotécnicamente.

El tiempo que tardan en aparecer los daños depende de la expansividad del suelo y de la rigidez de la estructura. En suelos muy expansivos el agrietamiento puede aparecer en días, mientras que en estructuras más pesadas (edificios de 2 a 3 niveles), las fisuras pueden apreciarse en el término de 6 a 12 meses, dependiendo de la época en que se inició la construcción (lluviosa o seca). Los movimientos aumentan linealmente durante los siguientes 5 a 8 años, aunque variaciones

particulares del entorno (rotura de tuberías) pueden producir una reactivación e inicio de los daños. (Torres Garcia, 2005)

Los daños que provoca en edificaciones tienen consecuencias graves y su magnitud depende de la forma, extensión y rigidez del edificio, las circunstancias del entorno, distribución de cargas, entre otras. Algunas de las causas que provocan estos daños se presentan a continuación:

- Expansión del subsuelo bajo el edificio por aumento de humedad, al impedirse la evaporación.
- Retracción perimetral del suelo en edificios al final de la época húmeda.
- Profundidad de cimentación muy superficial, desplantada ésta dentro de la zona activa.
- Diseño estructural defectuoso, para absorber movimientos y distorsiones.
- Combinación de zonas flexibles, poco cargadas, con otras masivas y rígidas.
- Excesiva tabiquería y multiplicación de confluencia.
- Contracción del suelo por desecación debido a la absorción de agua por las raíces de los árboles.
- Rotura de tubería de agua y drenaje.
- Defectos de drenaje perimetral.

Por lo general las construcciones presentan fisuras verticales, horizontales e inclinadas, con aberturas de entre 0.5 y 5mm, los muros cuentan con humedad, la impermeabilidad de las azoteas es pobre y con agrietamientos de hasta 6.0 mm, en el interior de las viviendas se pueden encontrar fisuras que en temporada de lluvias

producen goteras por la infiltración. Mientras la saturación natural del terreno aumente seguirá provocando expansiones transmitiendo presión ascendente en el área de contacto de la cimentación, la cual tendrá un comportamiento flexible en tableros grandes y rígido en tableros cortos cuando el peralte de esta sea escaso y se utilice concreto de baja resistencia con armado de malla electrosoldada, de forma que la cimentación no puede absorber los movimientos diferenciales causados por las variaciones de humedad. Entre casas de interés social los límites están resueltos por un muro común para ambas, esto las expone más al agrietamiento por los movimientos diferenciales de las cimentaciones provocados por los cambios volumétricos del subsuelo que son causados por la alteración del contenido de humedad.

Tabla 13. Tipología de daños por cambio de volumen de subsuelo

Localización del Daño	Tipo de Daño
Global	Movimiento diferencial entre fachadas. Inclinaciones. Separaciones de zonas o bloques.
Losas	Bufamientos.

		Grietas en contacto con columnas y muros. Despegue y distorsión de aceras.
Superestructura	Muros de Carga	Grietas diagonales. Grietas verticales. Grietas horizontales.
	Estructura	Fisuración de cortante en nodos. Trabajo en ménsula con grietas. Horizontales o inclinadas
	Albañilería	Grietas diagonales. Apertura de esquinas y uniones techo-muro. Descuadre de marco de puertas y ventanas.
Localización del Daño		Tipo de Daño
Cimentaciones	Superficial	Despegue de zapatas corridas de muros o terreno. Grietas horizontales por empuje. Grietas diagonales por asentamientos diferenciales.
	Losa	Grietas de flexión. Distorsiones.
Muros de sótano		Grietas de empuje.

Nota: Adaptado de *Estudio de fatiga de expansión en suelos arcillosos* (p. 44), por J. J. Torres García, 2005.

Los movimientos estructurales no son error solamente de los suelos expansivos. Existen muchas losas que han sido construidas sobre suelos expansivos y debido a un cálculo incorrecto es que se fisuran y levantan. Es bien sabido que realizar un mal curado del concreto, junto con la carencia de cohesión en las juntas frías, pueden ser las causas de los agrietamientos. También aparecen fisuras en muros que son causadas por la presión del suelo ejercida sobre su superficie en combinación con la presión por percolación y no por el empuje de las cimentaciones.

Los descuidos de la construcción en ocasiones causan las fisuras en los muros. Las grietas verticales y horizontales son causada por la deficiente mano de obra o los movimientos del suelo ocasionados por los equipos. Un refuerzo deficiente generalmente provoca el desplome de los muros y no los suelos expansivos como se suele creer. El muro causara daños por expansión lateral cuando sea sometido a una gran presión horizontal por expansión.

En ocasiones, erróneamente se cree que los defectos estructurales son daños ocasionados por los suelos expansivos, por ejemplo, las casas que se construyen con contratraves colocadas a niveles diferentes, en las cuales podrán aparecer grietas y tener pequeños movimientos, si no se reforzaron correctamente. Pese a que comúnmente se tome como responsable a la expansión del suelo al notar la aparición de muchas grietas y movimientos en las estructuras, se deben tener en cuenta los aspectos del movimiento de la cimentación y su correcta construcción.

2.3.7 MÉTODOS DE MEJORAMIENTO

Las técnicas de mejoramiento de terreno, tienen como propósito estabilizar el suelo con un enfoque constructivo. Son utilizadas para modificar las propiedades de un terreno con el objetivo de solucionar una problemática.

Las siguientes problemáticas en los suelos son por las cuales se llega a aplicar las técnicas de mejoramiento:

- Incrementar la capacidad de carga.
- Reducir el asentamiento del suelo.
- Reducir la licuefacción durante un sismo.
- Reducir ampliamente la presión de agua de poro.
- Evitar la contracción y expansión.
- Evitar la licuefacción del suelo

Existen dos técnicas de mejoramiento de terreno: mecánico y químico.

Para la reducción de los efectos perjudiciales sobre construcciones a causa de los suelos arcillosos se aplican principalmente mecanismos de tratamiento que se pueden agrupar en actuaciones mediante los siguientes procesos físicos o químicos, que son los más frecuentes.

Procesos físicos:

- Sustitución por materiales menos sensibles
- Mezcla con otros materiales

- Re compactación de los suelos.
- Control de las condiciones de humedad.

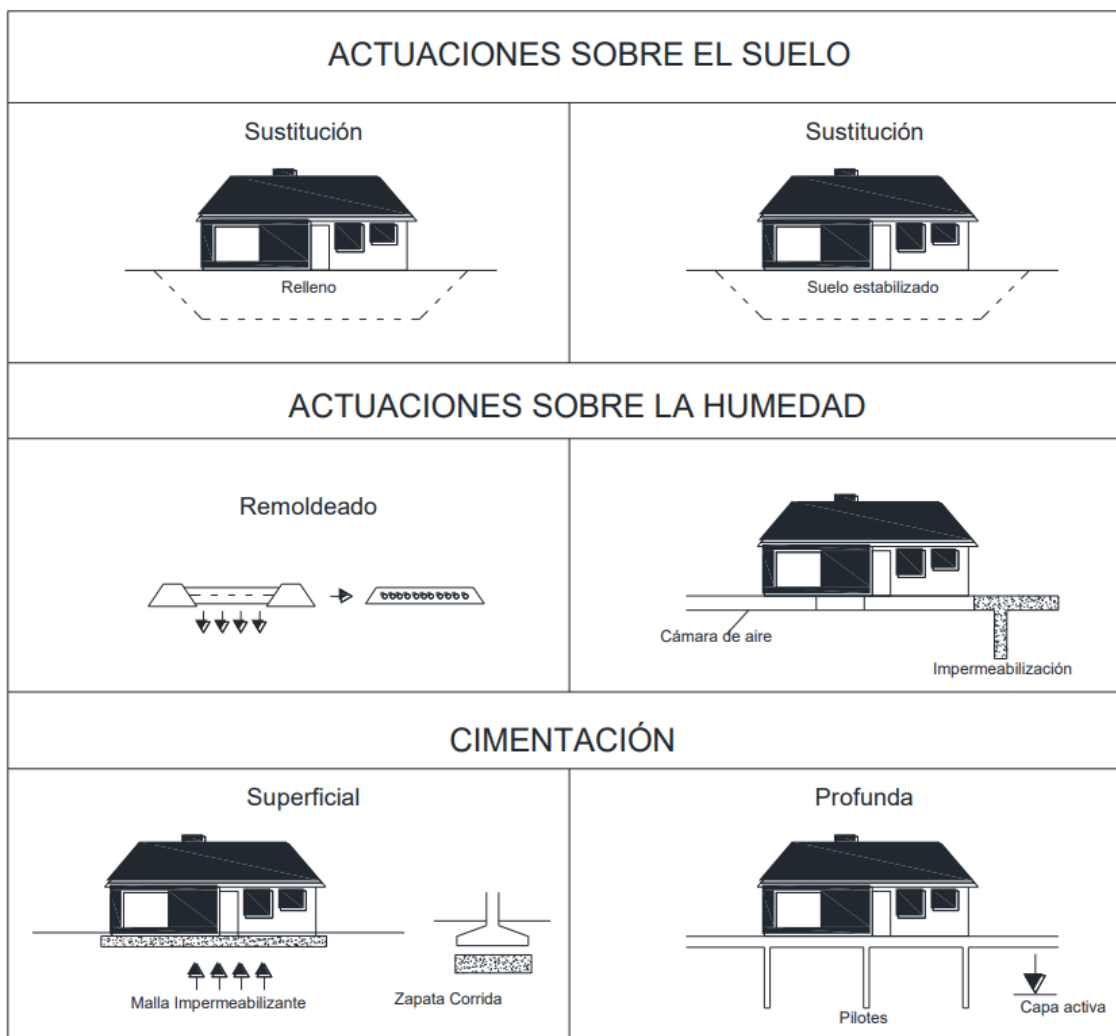
Procesos químicos:

- Mezcla con conglomerantes.
- Mezcla con otros productos estabilizadores

La principal idea del mejoramiento mecánico de suelos arcillosos expansivos es la generación de un suelo que no cambie su volumen y tenga la resistencia suficiente para sostener con seguridad las cargas que se le aplican.

La siguiente figura representa diferentes opciones de mejoramiento de suelos expansivos y sus actuaciones sobre el suelo, humedad y la cimentación.

Ilustración 9. Métodos de estabilización del suelo expansivo, mismas que actúan sobre el suelo, la humedad y la cimentación

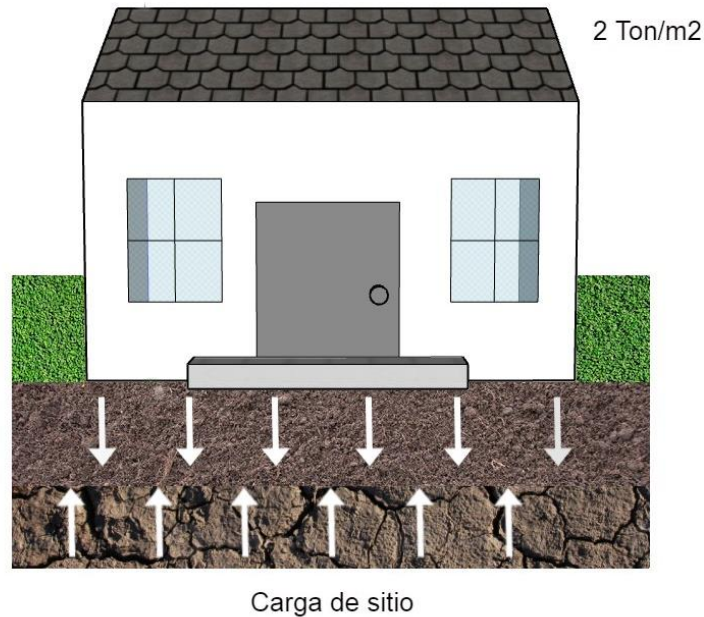


Nota: Adaptado de *Abatimiento de la expansión mediante la modificación de suelos y aplicación de cargas* (p. 38), por J. C. Rodríguez Uribe, 2018.

En suelos que muestran comportamiento expansivo bajo a mediano, puede controlar la presión de hinchamiento por una sobre-carga o relleno. Dicha carga se puede relacionar con la descarga de una estructura ligera al medio que fluctúa en el valor de las 2 ton/m².

La ilustración 10 muestra una construcción en donde el peso propio de la misma al medio favorece el abatimiento de la expansión del suelo.

Ilustración 10. Descarga de una estructura ligera al material expansivo

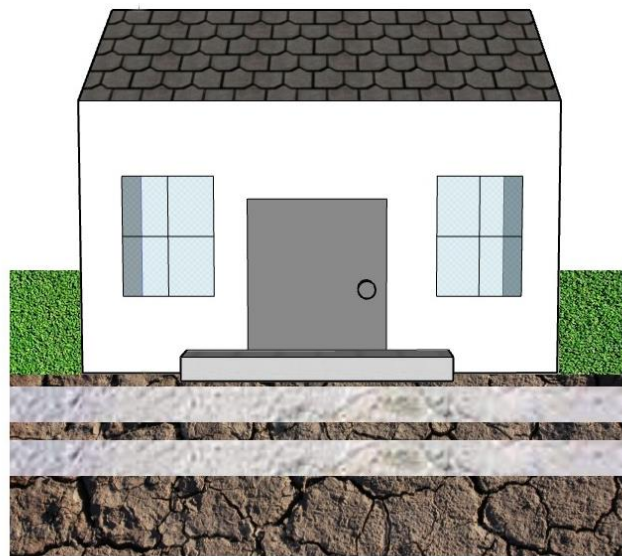


El método de aditivos ya sea mezclados o inyectados reducen la capacidad de expansión en los suelos, tales aditivos pueden ser la cal, cemento, sal, ceniza fina y resinas (compuestos orgánicos), y su dosificación más apta depende del tipo de arcilla a estabilizar y ciertas pruebas de laboratorio.

Un suelo potencialmente expansivo al mezclarse de forma superficial o inyectarse a presión con cal resulta favorecedor para el suelo, según esté agrietado o no y dependiendo de su aplicación. Es importante contar con el equipo apropiado ya sea para la pulverización del suelo, o para las inyecciones a presión.

La estabilización química tiene como objetivo el mejoramiento de la estabilidad de un suelo expansivo. Dicho fenómeno se logra al incrementar el tamaño de la partícula del suelo con el índice de plasticidad, disminución expansión-contracción y cementación. De manera que para lograr lo anterior planteado se debe añadir una cantidad específica del compuesto químico al suelo expansivo a trata

Ilustración 11. Estabilización con agentes químicos como la cal para estabilizar el medio y con ello abatir la expansión



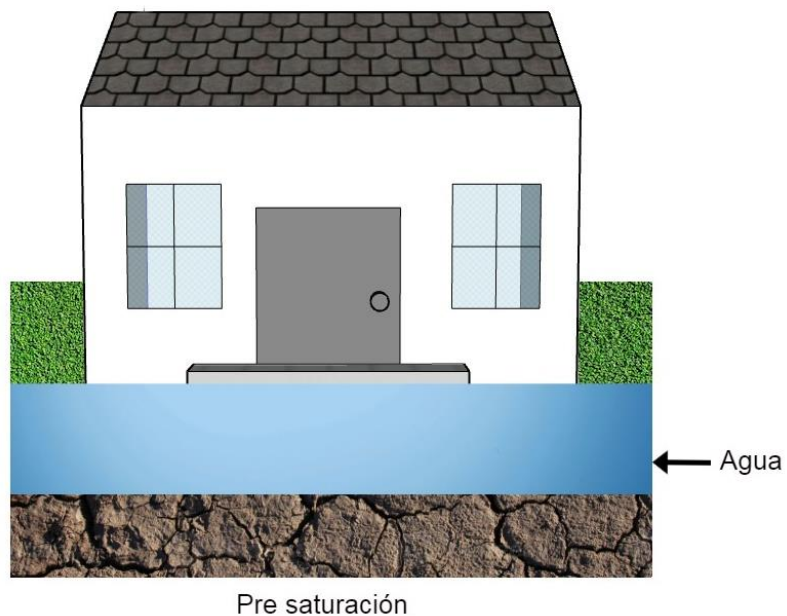
Estabilización

El método por el que se prehumedece el suelo para su estabilización tiene sus bases en la teoría que explica que si al suelo se le permite que se expanda antes de la construcción y si después la humedad del suelo es mantenida, no se darán cambios volumétricos y por lo tanto tampoco debería haber daños sobre la estructura. Los suelos arcillosos, que son potencialmente expansivos, son muy difíciles de pre humedecer siendo lo más factible que el agua penetre a través de

fisuras, etc., no lográndose una humectación pareja del suelo. La razón es que el pre humedecer el suelo conlleva reducir en una forma muy significativa los parámetros resistentes del suelo, lo que lo hace inadecuado para el apoyo de cimientos aislados. (Rodríguez Uribe, 2018)

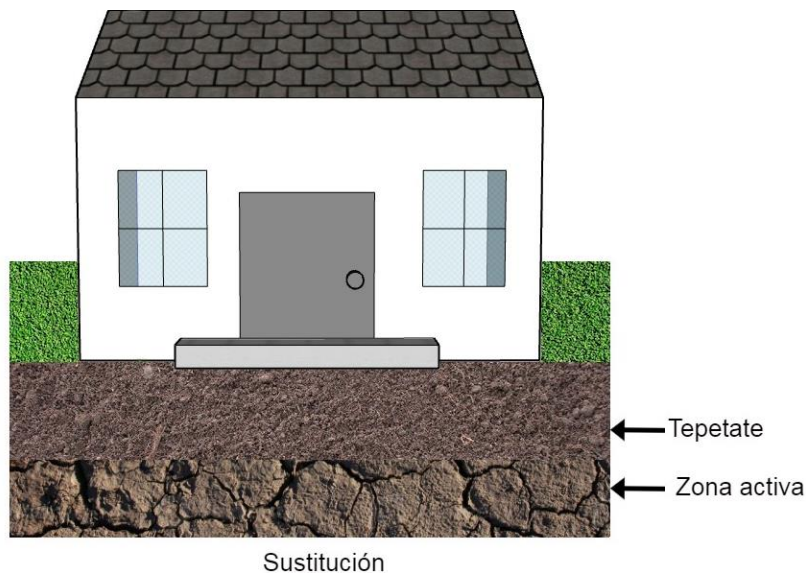
El pre humedecimiento conjetura bajo una placa o un recubrimiento impermeable la expansión previa a la colocación de la estructura y al mantenimiento de esa humedad. Es necesario tener en cuenta todo el tiempo que necesita el agua para que penetre precisamente en la zona activa.

Ilustración 12. Estrategia para estabilizar el medio por medio de la pre saturación (pre humedecimiento) con el fin de establecer un equilibrio en el medio y con ello minimizar la expansión



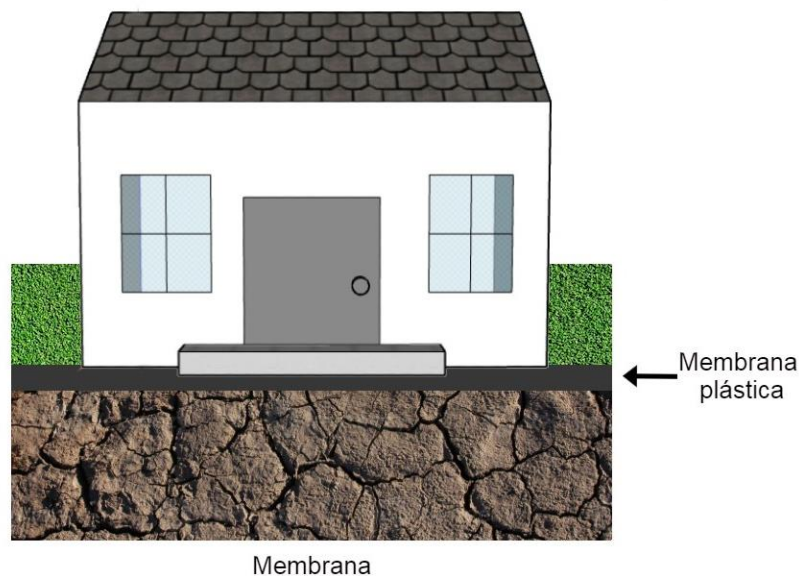
El mejoramiento del suelo más utilizado se conoce como sustitución del suelo. La sustitución es básicamente la excavación y el reemplazo del material expansivo, cuando su espesor y profundidad no lo hacen prohibitivamente costoso, por un material inerte. La profundidad a reemplazar del suelo depende de las características del suelo y de las recomendaciones de reglamentos de construcción

Ilustración 13. Método de sustitución el cual consiste el cambiar el material expansivo por un material inerte



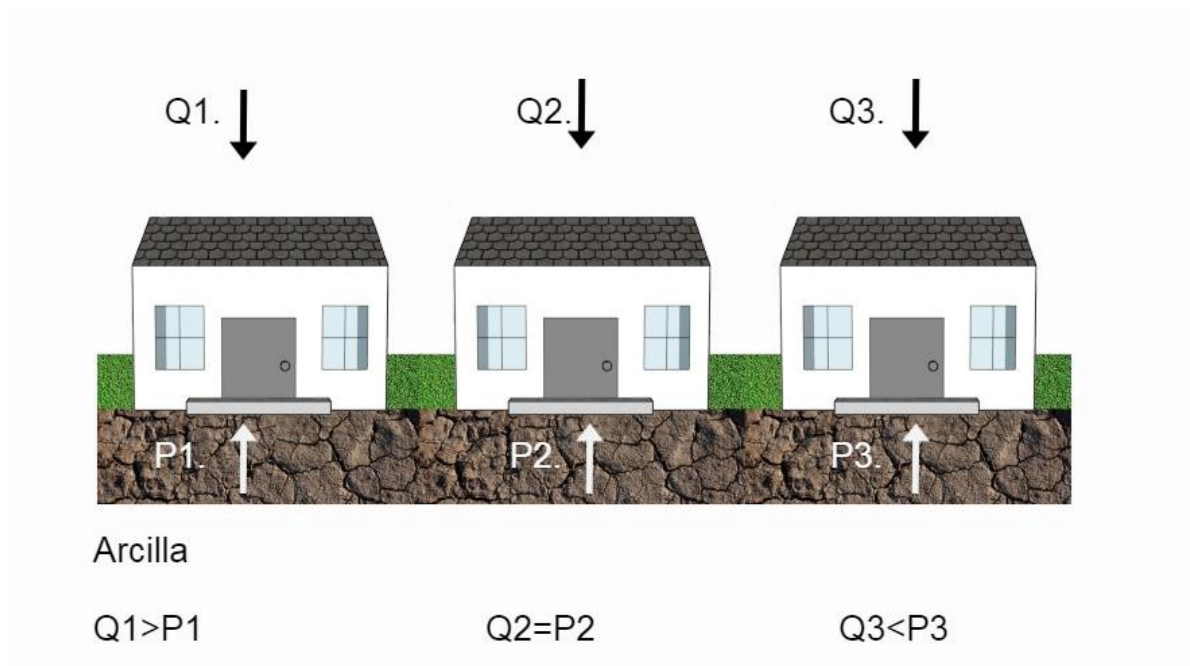
Promover un contenido de humedad uniforme en el suelo debajo del cimiento por medio de la minimización de la pérdida o ganancia de humedad es el propósito que tiene las barreras para el control humedad, con esto termina reduciendo los cambios volumétricos del suelo. Otra forma de mejoramiento, pero esta vez a los cimientos que se encuentran en los suelos expansivos es mediante un buen drenaje perimetral a la construcción.

Ilustración 14. Como alternativa para mitigar los efectos adversos del movimiento del medio se aísla la estructura haciendo uso de membranas impermeables



En la ilustración 15 se muestran tres situaciones del comportamiento entre las construcciones y el material expansivo. La descarga de la edificación hacia el medio queda representada por Q_1 , y la expansión del material queda especificada por P_1 . En el primer caso cuando $Q_1 > P_1$ se refiere a una situación en la cual el peso de la estructura ayudara a abatir la expansión del suelo, en el segundo caso cuando $Q_2 > P_2$ el peso de la descarga es igual al valor de la expansión del suelo logrando un modelo en equilibrio y en el tercer caso $Q_3 > P_3$ el peso de la estructura es menor comparado con el valor de expansión del medio lo que causa una situación adversa en la construcción que se interpreta como movimientos diferenciales, provocando problemas en los elementos estructurales.

Ilustración 15. Modelos gráficos que ejemplifican el comportamiento de la estructura vs el material expansivo



Los fenómenos asociados con la expansión de suelos arcillosos que afectan su estabilidad incluyen: (a) el tipo específico de mineralogía presente, (b) la historia de esfuerzos de la masa de suelo, (c) La historia de desecación de la rasante, (d) el clima donde se ubica este tipo de suelo, (e) los cambios de propiedades que se presentan en estos suelos con el tiempo, (f) los ambientes físico - químicos existentes en la masa de suelo y alrededor de las partículas de suelo. Debido a algunos de estos fenómenos la estabilización del suelo puede ser llevada a cabo con el objetivo de mejorar las propiedades del suelo. (M. Petry & Armstrong, 1989)

2.3.8 LA CAL

De acuerdo a la N-CMT-4-03-001/2 podemos definir a la cal como el producto de la calcinación de rocas calizas, constituido principalmente por óxido de calcio (CaO) y otros componentes. La adicción de cal dependiendo de su reacción en mayor o menor grado en los materiales arcillosos para terracerías, revestimientos, sub-base y bases, genera que aumente su límite líquido y un mayor incremento en su límite plástico para así producir una reducción en su índice plástico; haciendo que se eleve la estabilidad volumétrica de los materiales cohesivos y la resistencia a la compresión simple y el CBR.

Para la estabilización de los suelos con cal se pueden utilizar la cal viva (óxido de calcio – CaO), cal hidratada (hidróxido de calcio – $\text{Ca}(\text{OH})_2$) o una lechada de cal (que puede elaborarse a partir de cal hidratada o de cal viva).

La cal viva es el producto que se da por la calcinación de la piedra caliza (CaCO_3), constituido en mayor parte por óxido de calcio (CaO), siendo capaz de reaccionar exotérmicamente con el agua y producir la cal hidratada. La cal hidratada y la cal viva son las más usadas para la estabilización de suelos y sus ventajas más destacadas son la reactivada que presentan con los materiales por estabilizar como las arcillas y también producen una menor cantidad de polvo durante su uso.

La cal hidratada es un polvo seco derivado del tratamiento de la cal viva cuando reacciona químicamente al agua y de esta forma la hidrata. Es esencialmente hidróxido de calcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) y su principal ventaja es que es más fácil de transportar, manejar y utilizar.

La lechada de cal se trata de la suspensión de la cal hidratada en agua. Sus ventajas al utilizarla en la estabilización de suelos es el no tratar con el polvo producido durante el extendido de cal y que es muy buena para un mejor control de humedad en suelos secos.

La cal alta en calcio, es decir de un máximo de óxido o hidróxido de magnesio del 5%, es la que más se utiliza para el mejoramiento de suelos. Pero cabe mencionar el uso de la cal dolomítica en algunas ocasiones. Este tipo de cal tiene un contenido de óxido o hidróxido de magnesio del 35% a 46% y puede lograr la estabilización de suelos, pero el magnesio reacciona más lentamente que la fracción de calcio.

En ocasiones al mencionar la cal hacen referencia a la cal agrícola, que es piedra caliza molida finamente, esta puede ser empleada muy útilmente en el ámbito agrícola, pero carece de reactividad química para ser utilizada en la estabilización de suelos.

También puede ser que al referirse a la cal sea con alusión a los subproductos del proceso de fabricación de cal que, si bien contienen cal reactiva, pero su contenido de óxido es insuficiente o solo contiene el hidróxido del producto fabricado. Por esto no es óptimo utilizar otro tipo de cal que no sean las ya mencionadas al inicio de este capítulo, es decir cal viva, hidratada o lechada de cal.

La cal genera buenas y económicas soluciones, debido a que:

- Seca los suelos excesivamente húmedos
- Ya sea con cal viva, hidratada o lechada de cal, mejora y estabiliza las características de los suelos arcillosos a corto y largo plazo.

2.3.9 ESTABILIZACIÓN DE SUELOS CON CAL (ENFOCADO A SUELOS EXPANSIVOS)

La solución a la que nos enfocamos, utilizada debido a la problemática que generan los suelos expansivos, es la estabilización del suelo utilizando cal. La mayoría de la información expresada por diferentes autores sobre la estabilización de los suelos está dirigida a caminos y carreteras. Pero la problemática que genera la expansividad en edificaciones ha provocado cada vez más interés por parte de los ingenieros debido a que los resultados que produce este fenómeno son daños muy significativos. Como tal se ha reconocido la efectividad del método de estabilización con cal. Los pasos que se llevan a cabo generalmente son posteriormente de determinar la dosificación de la cal, efectuar en estratos de 15 cm o de menor espesor las siguientes etapas: Escarificación y pulverización, esparcimiento de cal, mezcla preliminar y humidificación, curado inicial, mezcla final y pulverización, compactación y curado final.

Para el tratamiento de las arcillas expansivas son de uso común la cal, polímeros, cemento, cenizas, entre otros aditivos. A favor de la cal podemos mencionar que mejora las propiedades mecánicas de los suelos expansivos y es económica.

Algunos estudios son emprendidos y reportados en la literatura para explicar el mejoramiento en las propiedades mecánicas e hidráulicas del suelo expansivo, debido a la adición de limo y otros estabilizantes, principalmente desde un punto de vista macroscópico. El enfoque de la mayoría de estas investigaciones fueron los cambios asociados con los valores de límite de Atterberg (límite líquido y límite plástico) y las propiedades del suelo, tales como el cambio volumétrico (presión de expansión, potencial de expansión), resistencia al corte y el coeficiente de permeabilidad de los suelos expansivos estabilizados. (Rodríguez Uribe, 2018)

Las propiedades de los suelos arcillosos muestran una reacción positiva al tratamiento con cal, generan una reducción del potencial de expansión y en el contenido de agua, un mejoramiento en la trabajabilidad y la compactación in situ y un incremento en la resistencia mecánica.

Cuando se presenta un suelo expansivo se puede reaccionar a través de una reducción o eliminación de la expansividad o dirigirse a la estructura y seleccionar un diseño de cimentación apropiado.

La estabilización se considera una técnica efectiva y confiable para modificar propiedades importantes del suelo.

La estabilización del suelo se puede definir como la alteración o preservación de una o más propiedades del suelo para mejorar las características de ingeniería y el rendimiento de un suelo. (Afrin, 2017)

Algunos métodos para estabilizar suelos expansivos son: Estabilización con aditivos mecánicos, pre humedecimiento, reemplazamiento del suelo, control de

compactación, control de humedad, sobrecarga y métodos térmicos. Estas técnicas tienen una amplia aplicación en la construcción de carreteras, estabilización de taludes, terraplenes, etc. El principal objetivo de la estabilización es la creación de un material de suelo para que perdure en el periodo de vida del proyecto ingenieril. Son diversos los métodos que son empleados para estabilizar el suelo y el método debe ser verificado en laboratorio con el material antes de ser aplicado en campo.

Necesidades y ventajas que produce la estabilización de suelo:

- Mejora la resistencia del suelo y de esta forma incrementa la capacidad de carga.
- Resulta económico en términos de costo y energía.
- Provee más estabilidad al suelo en taludes.
- Puede ser utilizada para prevenir la erosión del suelo.
- Ayuda en reducir el cambio volumétrico debido al cambio de temperatura y/o cambio de humedad.
- La estabilización mejora la trabajabilidad y la durabilidad del suelo.

3 METODOLOGIA

Para el presente proyecto se realizó un estudio de tipo cuantitativo, con el cual se pretende demostrar que las propiedades físicas de las arcillas expansivas presentan un cambio favorable en sus propiedades físicas con la incorporación de cal.

Para comprobar nuestra hipótesis realizamos 4 muestras diferentes de arcillas expansivas del lado norte de Mazatlán Sinaloa.

Determinamos las Propiedades Índice del suelo por medio de los Límites de Atterberg (Límite Líquido, Límite Plástico e Índice Plástico) respaldados por la norma NMX-C-493-ONNCCE-2018.

Con respecto al estudio de mejoramiento del suelo, se utilizó una cal hidratada en dosificaciones de 3, 6 y 7%.

3.1 MUESTREO

Los suelos utilizados para este proyecto de investigación son suelos extraídos de diferentes puntos de la ciudad de Mazatlán Sinaloa.

Se extrajeron 4 muestras de manera inalterada de puntos diversos de la ciudad para su experimentación. A continuación, damos a conocer dichos puntos:

Muestra 1: Zona dorada

Muestra 2: Fraccionamiento el cielo

Muestra 3: Av. Prados del sol N° 7911, Fracc. Prados del sol, C.P. 82124, Mazatlán, Sinaloa

Muestra 4: Av. Prados del sol N° 7911, Fracc. Prados del sol, C.P. 82124, Mazatlán,
Sinaloa

3.2 LÍMITES DE ATTERBERG

Preparación de la muestra

Primeramente, realizamos el pertinente secado, disgregado y cuarteo de la muestra. Se colocó una porción del suelo en un recipiente apto para llevarlo al horno durante 24 horas para su secado. Pasado el tiempo indicado se sacó la muestra del horno para triturlarla lo máximo posible de manera manual.



Ilustración 16. Suelo seco



Ilustración 17. Triturado del suelo seco

Proseguimos pasando el material por la malla no. 40. Se sacó un aproximado de 800gr del suelo cribado y se desechó el suelo retenido.



Ilustración 18. Suelo pasado por la malla 40

3.2.1 LÍMITE LIQUIDO

Equipo y material

El equipo a utilizar para las pruebas de límites de Atterberg para el límite líquido determinados por la NMX-C-493-ONNCCE-2018 es la copa de Casagrande, balanza, homo, desecador, vaso o recipiente, cápsulas de porcelana, espátula, cuentagotas, vidrios de reloj y paño.

Procedimiento

Primeramente, se procedió saturando el material con agua destilada en un recipiente de porcelana.

Se colocó una fracción de dicha mezcla en la copa de Casagrande previamente calibrada, extendiéndola con la espátula y eliminando el sobrante. Después se pasó el ranurador por el medio de la copa para realizar la abertura.



Ilustración 19. Material extendido en copa

Como es señalado por la norma NMX-C-493-ONNCCE-2018 se accionó la manivela del aparato para hacer caer la copa a razón de dos golpes por segundo, registrando el número de golpes necesarios para lograr que los bordes inferiores de la ranura se pongan en contacto en una longitud de 13 mm. Después se tomó con la espátula aproximadamente 10g de material de la porción cerrada de la ranura y, para determinar su contenido de agua w_n , se colocó en un recipiente apto del que previamente se determinó su peso.



Ilustración 20. *Accionado de manivela de la copa*

Una vez tomada la porción requerida para la determinación del contenido de agua, el material restante se reintegró al recipiente de porcelana de mezclado, para lavar y secar la copa y el ranurador.

Posteriormente con el cuentagotas, se agregó agua al material en la cápsula y se homogeneizó con la espátula. Este procedimiento se repitió hasta completar tres

determinaciones, que se registraron en formatos. La cantidad de agua que se adiciono al material fue cumpliendo con el que fueran comprendidas entre 10 y 35 golpes en la copa de Casagrande, siendo necesario obtener valores por arriba y por abajo de los 25 golpes, ya que para consistencias menores de 10 golpeses difícil identificar el momento de cierre de la ranura en la longitud especificada y para más de 35 golpes se dificulta la ejecución de la prueba, según indica la norma NMX-C-493-ONNCCE-2018.

En algunos casos no fue necesario realizar las 3 determinaciones ya que la ranura cerró en exactamente los 25 golpes.

Las muestras fueron secadas en el horno durante 24hrs para determinar la masa del suelo seco y con ello la masa del agua.

Graficamos los puntos correspondientes a cada determinación, representando como lo marca la norma NMX-C-493-ONNCCE-2018 en el eje de las abscisas en escala logarítmica, el número de golpes n y en el de las ordenadas en escala aritmética, los respectivos contenidos de agua w_n , trazando una línea recta que une aproximadamente los puntos graficados; a esta recta se le llama curva de fluidez.

3.2.2 LÍMITE PLÁSTICO

Equipo y material

El equipo a utilizar para las pruebas de límites de Atterberg para el límite plástico determinados por la NMX-C-493-ONNCCE-2018 es una balanza, horno, desecador, cápsulas de porcelana, espátula, vidrios de reloj, placa de vidrio y

alambre de acero.

Procedimiento

Del material sobrante de la prueba del límite líquido tal como lo indica la norma tomamos una porción de tamaño tal que se pueda formar una pequeña esfera de aproximadamente 12 mm de diámetro, moldeándola con los dedos para que pierda agua y manipulándola sobre la palma de la mano para formar un cilindro.

Dicho cilindro se giró con los dedos de las manos sobre la placa de vidrio para reducir su diámetro hasta aproximadamente 3 mm en toda su longitud. La velocidad de girado determinada es de 60 a 80 ciclos por minuto, entendiéndose por "ciclo" un movimiento de la mano hacia adelante y hacia atrás, hasta volver a la posición de partida.



***Ilustración 21.** Moldeado de la muestra en forma de esfera*

Como la norma NMX-C-493-ONNCCE-2018 nos dice, si se alcanza un diámetro de 3 mm y el cilindro no se rompe en tres secciones simultáneamente, significa que su contenido de agua es superior al del límite plástico (w_n). En tal caso se junta nuevamente todo el material para formar la pequeña esfera, manipulándola con los dedos para facilitar su pérdida de agua y lograr una distribución uniforme de la misma hasta que el cilindro se rompa tres segmentos precisamente en el momento de alcanzar dicho diámetro, el cual se verifica comparándolo contra el alambre de referencia.



Ilustración 22. Cilindros realizados sobre placa de vidrio

Siguiendo dicho proceso se realizaron los cilindros y se colocaron en el vidrio de reloj previamente pesado, el cual, para determinar el contenido de agua del material, w_i se puso a secar en el horno y se pesó nuevamente.

3.3 MUESTRA CON CAL

3.3.1 LÍMITE LIQUIDO MUESTRA CON CAL

Equipo y material

Para la prueba del límite líquido con cal utilizamos el equipo respectivo que nos marca la NMX-C-493-ONNCCE-2018; la copa de Casagrande, balanza, homo, desecador, vaso o recipiente, cápsulas de porcelana, espátula, cuentagotas, vidrios de reloj y paño. Además, la cal hidratada y el equipo necesario para tratar con ella; guantes de látex, mascarilla para polvo y lentes de protección.

Procedimiento

Para realizar las muestras de mejoramiento se agregó en recipientes con 200gr del suelo natural los porcentajes de 3, 6 y 7% de cal respectivamente. Se revolvió con la espátula hasta conseguir una mezcla homogénea y se dejó reposar por 2 horas.



Ilustración 23. Reposo de las muestras con su dosificación de cal

Después del tiempo transcurrido se saturó con agua destilada el material con cada dosificación.



Ilustración 24. Saturado del suelo con cal

Posteriormente realizamos el procedimiento señalado en el inciso pasado con las mezclas de 3, 6 y 7% para la determinación del límite líquido.



Ilustración 25. Accionado de la manivela de la copa con el suelo con cal

3.3.2 LÍMITE PLÁSTICO MUESTRA CON CAL

Inmediatamente después de terminada la prueba de límite líquido por cada muestra realizamos la prueba de límite plástico consecutivamente con 3, 6 y 7%.

Equipo y material

Para el límite plástico utilizamos el material determinado por la NMX-C-493-ONNCCE-2018 ya mencionado. Adicionalmente usamos guantes de látex por tratarse de las muestras con cal.

Procedimiento

Para el manejo de esta prueba nos colocamos guantes ya que fue necesario manejar las muestras con cal con las manos. Del material sobrante de las pruebas con dosificaciones de cal tomamos una porción de tamaño de una pequeña esfera de aproximadamente 12 mm de diámetro para iniciar la prueba. Después seguimos el proceso marcado en la experimentación de la muestra con el suelo natural.



Ilustración 26. Moldeado de la muestra en forma de esfera



Ilustración 27. Cilindros de muestra con cal realizados sobre placa de vidrio

3.4 ÍNDICE PLÁSTICO

La norma NMX-C-493-ONNCCE-2018 nos marca que una vez calculados el límite líquido y el límite plástico podemos determinar el índice plástico mediante la siguiente expresión:

$$I_p = \omega_L - \omega_P$$

Donde:

I_p = Índice plástico del material, (%), con aproximación a la unidad

ω_L = Límite líquido del material obtenido

ω_P = Límite plástico del material obtenido, (%)

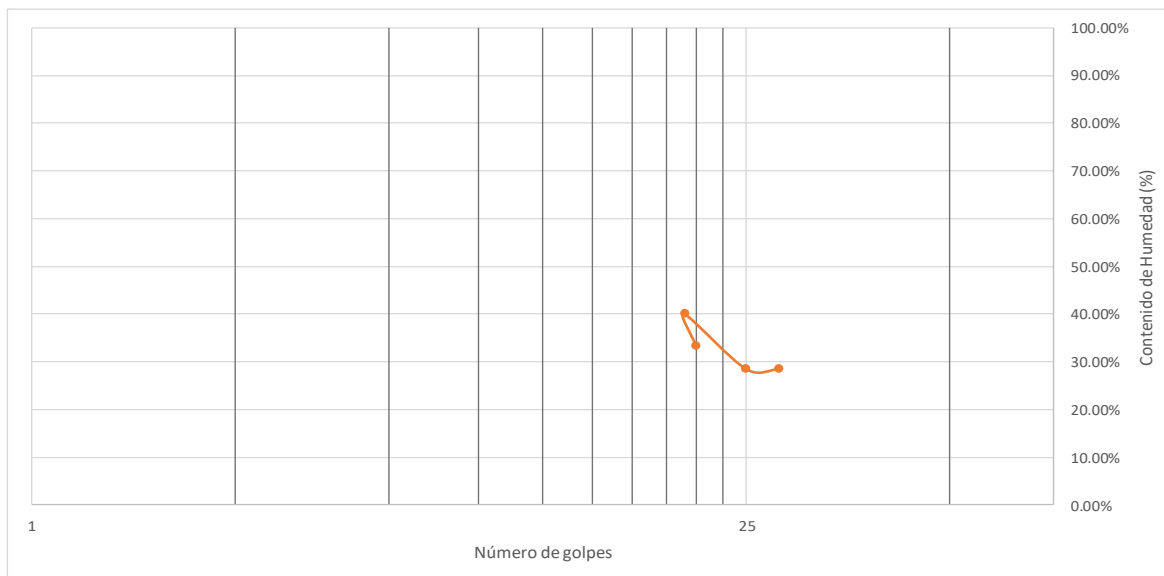
Dicho procedimiento lo realizamos para todas y cada una de las muestras realizadas.

4 RESULTADOS

Tabla 14. Determinación de límites de Atterberg de la muestra 1 natural

LÍMITES DE ATTERBERG								
SONDEO		1				PROF.	1 mts	
UBICACIÓN		ZONA DORADA				MUESTRA	1	
DETERMINACIÓN DEL LÍMITE LÍQUIDO								
PRUEBA	CÁPSULA	NÚMERO DE GOLPES	PESO DE CÁPSULA + SUELO HÚMEDO (gr)	PESO CÁPSULA + SUELO SECO (gr)	PESO DEL AGUA (gr)	PESO DE CÁPSULA (gr)	CONTENIDO DE HUMEDAD (%)	
1	29	20	55	50	5	35	33.33%	
2	27	19	41	39	2	34	40.00%	
3	22	25	42	40	2	33	28.57%	
4	26	29	42	40	2	33	28.57%	
DETERMINACIÓN DEL LÍMITE PLÁSTICO								
PRUEBA	CÁPSULA	PESO DE CÁPSULA + SUELO HÚMEDO (gr)		PESO CÁPSULA + SUELO SECO (gr)	PESO DEL AGUA (gr)	PESO DE CÁPSULA (gr)	CONTENIDO DE HUMEDAD (%)	
1	X	24.55		24.43	0.12	23.39	11.54%	
2	Y	24.45		24.37	0.08	23.43	8.51%	
3	Z	21.15		21.06	0.09	20.18	10.23%	

Gráfica 1. Determinación de límite líquido de la muestra 1 natural



LL= 33%

LP= 10.09%

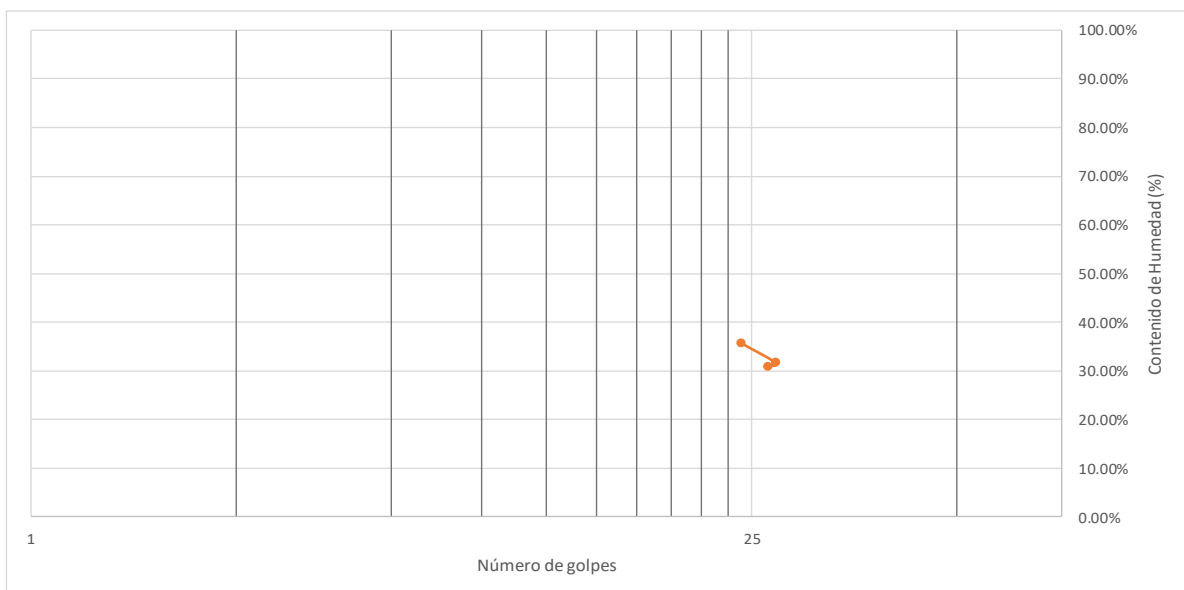
IP= 22.53%

NÚMERO DE GOLPES	CONTENIDO DE HUMEDAD (%)
20	33.33%
19	40.00%
25	28.57%
29	28.57%

Tabla 15. Determinación de límites de Atterberg de la muestra 1 con 3% de cal

LÍMITES DE ATTERBERG								
SONDEO		1				PROF.	1 mts	
UBICACIÓN		ZONA DORADA				MUESTRA	1	
DETERMINACIÓN DEL LÍMITE LÍQUIDO								
PRUEBA	CÁPSULA	NÚMERO DE GOLPES	PESO DE CÁPSULA + SUELO HÚMEDO (gr)	PESO CÁPSULA + SUELO SECO (gr)	PESO DEL AGUA (gr)	PESO DE CÁPSULA (gr)	CONTENIDO DE HUMEDAD (%)	
1	7	27	59	52.96	6.04	33.43	30.93%	
2	8	28	51.63	47.29	4.34	33.59	31.68%	
3	20	24	55.5	49.66	5.84	33.26	35.61%	
DETERMINACIÓN DEL LÍMITE PLÁSTICO								
PRUEBA	CÁPSULA	PESO DE CÁPSULA + SUELO HÚMEDO (gr)		PESO CÁPSULA + SUELO SECO (gr)	PESO DEL AGUA (gr)	PESO DE CÁPSULA (gr)	CONTENIDO DE HUMEDAD (%)	
1	Y	24.39		24.23	0.16	23.43	20.00%	

Gráfica 2. Determinación de límite líquido de la muestra 1 con 3% de cal



LL= 33%

LP= 20.00%

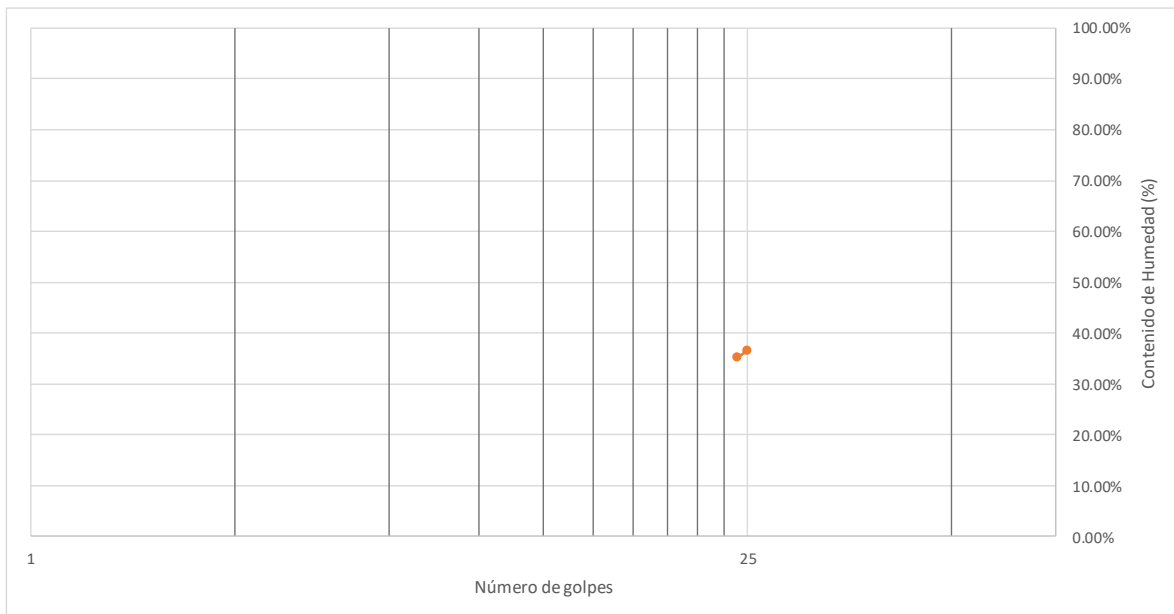
IP= 12.74%

NÚMERO DE GOLPES	CONTENIDO DE HUMEDAD (%)
27	30.93%
28	31.68%
24	35.61%

Tabla 16. Determinación de límites de Atterberg de la muestra 1 con 6% de cal

LÍMITES DE ATTERBERG								
SONDEO		1				PROF.	1 mts	
UBICACIÓN		ZONA DORADA				MUESTRA	1	
DETERMINACIÓN DEL LÍMITE LÍQUIDO								
PRUEBA	CÁPSULA	NÚMERO DE GOLPES	PESO DE CÁPSULA + SUELO HÚMEDO (gr)	PESO CÁPSULA + SUELO SECO (gr)	PESO DEL AGUA (gr)	PESO DE CÁPSULA (gr)	CONTENIDO DE HUMEDAD (%)	
1	6	24	50.99	46.87	4.12	35.17	35.21%	
2	25	25	46.27	43.06	3.21	34.27	36.52%	
DETERMINACIÓN DEL LÍMITE PLÁSTICO								
PRUEBA	CÁPSULA	PESO DE CÁPSULA + SUELO HÚMEDO (gr)	PESO CÁPSULA + SUELO SECO (gr)	PESO DEL AGUA (gr)	PESO DE CÁPSULA (gr)	CONTENIDO DE HUMEDAD (%)		
1	Z	21.09	20.92	0.17	20.18	22.97%		

Gráfica 3. Determinación de límite líquido de la muestra 1 con 6% de cal



LL= 36%

LP= 22.97%

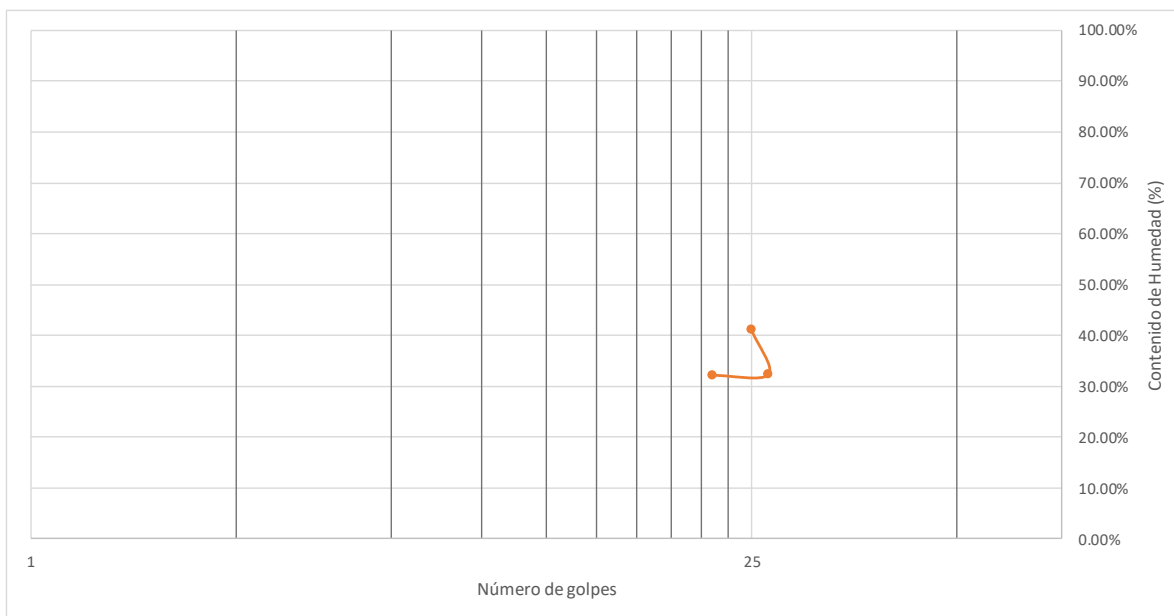
IP= 12.89%

NÚMERO DE GOLPES	CONTENIDO DE HUMEDAD (%)
24	35.21%
25	36.52%

Tabla 17. Determinación de límites de Atterberg de la muestra 1 con 7% de cal

LÍMITES DE ATTERBERG								
SONDEO		1				PROF.	1 mts	
UBICACIÓN		ZONA DORADA				MUESTRA	1	
DETERMINACIÓN DEL LÍMITE LÍQUIDO								
PRUEBA	CÁPSULA	NÚMERO DE GOLPES	PESO DE CÁPSULA + SUELO HÚMEDO (gr)	PESO CÁPSULA + SUELO SECO (gr)	PESO DEL AGUA (gr)	PESO DE CÁPSULA (gr)	CONTENIDO DE HUMEDAD (%)	
1	21	21	48.21	44.66	3.55	33.61	32.13%	
2	9	27	54.57	49.87	4.7	35.32	32.30%	
3	X	25	35.15	30.47	4.68	19.08	41.09%	
DETERMINACIÓN DEL LÍMITE PLÁSTICO								
PRUEBA	CÁPSULA	PESO DE CÁPSULA + SUELO HÚMEDO (gr)		PESO CÁPSULA + SUELO SECO (gr)	PESO DEL AGUA (gr)	PESO DE CÁPSULA (gr)	CONTENIDO DE HUMEDAD (%)	
1	X	24.48		24.27	0.21	23.39	23.86%	

Gráfica 4. Determinación de límite líquido de la muestra 1 con 7% de cal



LL= 35%

LP= 23.86%

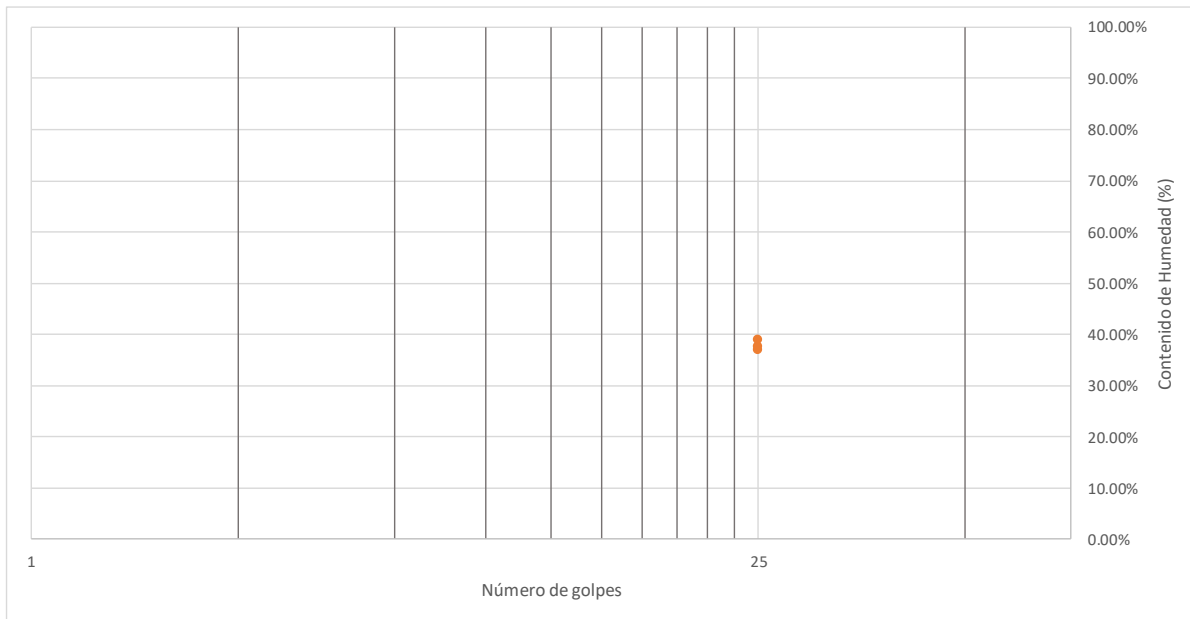
IP= 11.31%

NÚMERO DE GOLPES	CONTENIDO DE HUMEDAD (%)
21	32.13%
27	32.30%
25	41.09%

Tabla 18. Determinación de límites de Atterberg de la muestra 2 natural

LÍMITES DE ATTERBERG								
SONDEO		1				PROF.	0.7 mts	
UBICACIÓN		FRACCIONAMIENTO EL CIELO				MUESTRA	2	
DETERMINACIÓN DEL LÍMITE LÍQUIDO								
PRUEBA	CÁPSULA	NÚMERO DE GOLPES	PESO DE CÁPSULA + SUELO HÚMEDO (gr)	PESO CÁPSULA + SUELO SECO (gr)	PESO DEL AGUA (gr)	PESO DE CÁPSULA (gr)	CONTENIDO DE HUMEDAD (%)	
1	23	25	44.25	41.25	3	33.53	38.86%	
2	21	25	41.06	39.05	2.01	33.63	37.08%	
3	25	25	42.9	40.54	2.36	34.27	37.64%	
DETERMINACIÓN DEL LÍMITE PLÁSTICO								
PRUEBA	CÁPSULA	PESO DE CÁPSULA + SUELO HÚMEDO (gr)	PESO CÁPSULA + SUELO SECO (gr)	PESO DEL AGUA (gr)	PESO DE CÁPSULA (gr)	CONTENIDO DE HUMEDAD (%)		
1	Y	24.43	24.35	0.08	23.43	8.70%		
2	Z	21.11	21.03	0.08	20.18	9.41%		

Gráfica 5. Determinación de límite líquido de la muestra 2 natural



LL= 38%

LP= 9.05%

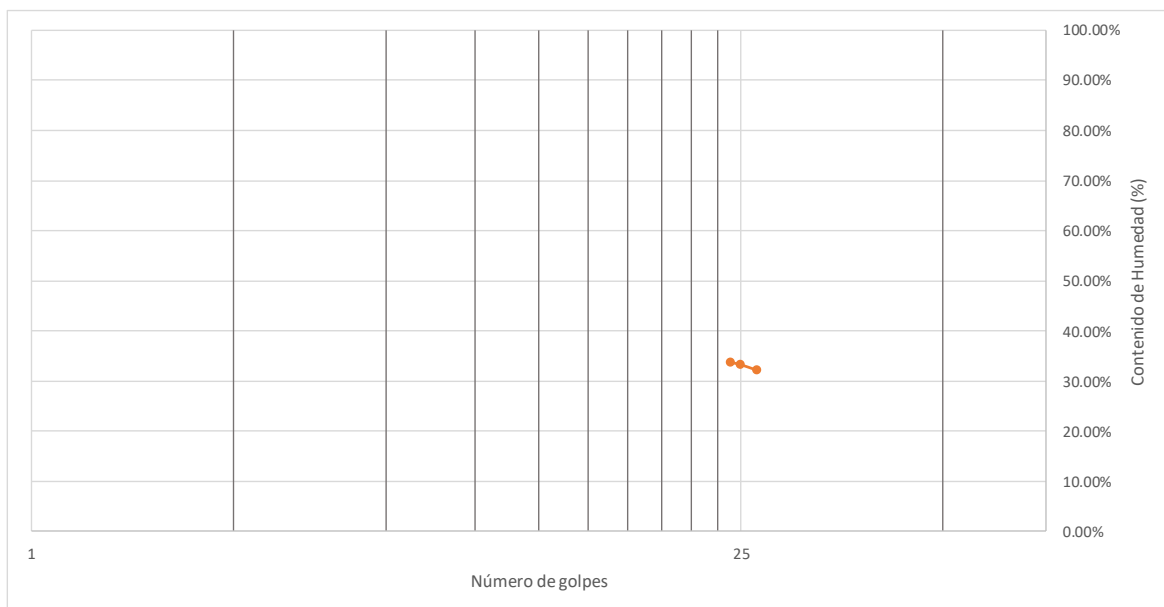
IP= 28.81%

NÚMERO DE GOLPES	CONTENIDO DE HUMEDAD (%)
25	38.86%
25	37.08%
25	37.64%

Tabla 19. Determinación de límites de Atterberg de la muestra 2 con 3% de cal

LÍMITES DE ATTERBERG								
SONDEO		1				PROF.	0.7 mts	
UBICACIÓN		FRACCIONAMIENTO EL CIELO				MUESTRA	2	
DETERMINACIÓN DEL LÍMITE LÍQUIDO								
PRUEBA	CÁPSULA	NÚMERO DE GOLPES	PESO DE CÁPSULA + SUELO HÚMEDO (gr)	PESO CÁPSULA + SUELO SECO (gr)	PESO DEL AGUA (gr)	PESO DE CÁPSULA (gr)	CONTENIDO DE HUMEDAD (%)	
1	6	24	54.07	49.32	4.75	35.2	33.64%	
2	4	25	47.43	44.2	3.23	34.5	33.30%	
3	5	27	36.48	35.73	0.75	33.4	32.19%	
DETERMINACIÓN DEL LÍMITE PLÁSTICO								
PRUEBA	CÁPSULA	PESO DE CÁPSULA + SUELO HÚMEDO (gr)	PESO CÁPSULA + SUELO SECO (gr)	PESO DEL AGUA (gr)	PESO DE CÁPSULA (gr)	CONTENIDO DE HUMEDAD (%)		
1	x	24.03	23.93	0.10	23.36	17.54%		

Gráfica 6. Determinación de límite líquido de la muestra 2 con 3% de cal



LL= 33%

LP= 17.54%

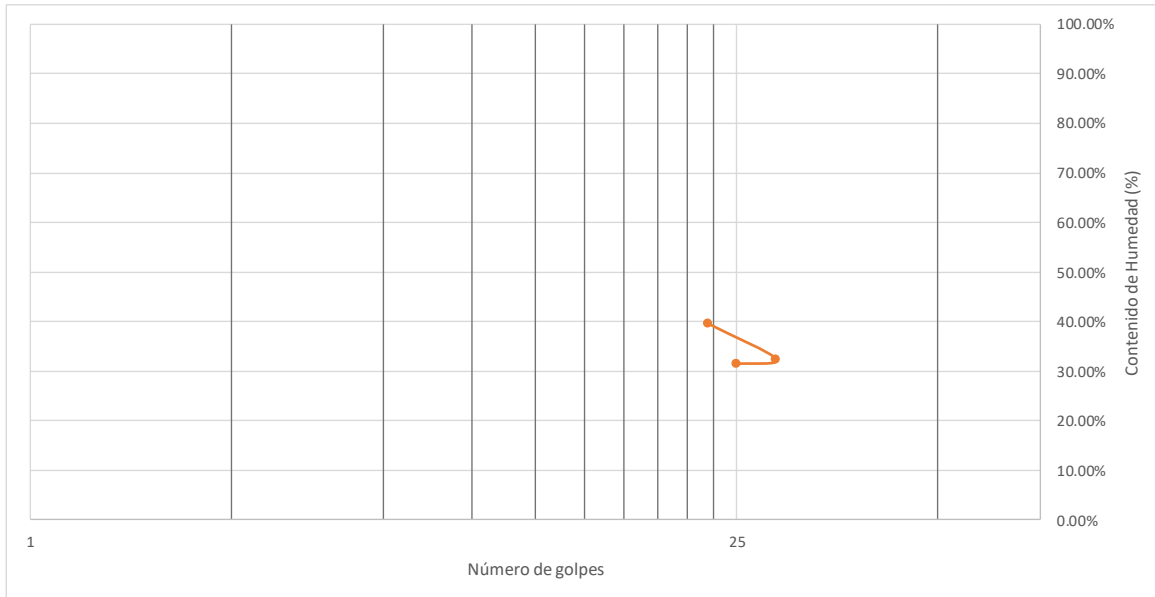
IP= 15.50%

NÚMERO DE GOLPES	CONTENIDO DE HUMEDAD (%)
24	33.64%
25	33.30%
27	32.19%

Tabla 20. Determinación de límites de Atterberg de la muestra 2 con 6% de cal

LÍMITES DE ATTERBERG								
SONDEO		1				PROF.	0.7 mts	
UBICACIÓN		FRACCIONAMIENTO EL CIELO				MUESTRA	2	
DETERMINACIÓN DEL LÍMITE LÍQUIDO								
PRUEBA	CÁPSULA	NÚMERO DE GOLPES	PESO DE CÁPSULA + SUELO HÚMEDO (gr)	PESO CÁPSULA + SUELO SECO (gr)	PESO DEL AGUA (gr)	PESO DE CÁPSULA (gr)	CONTENIDO DE HUMEDAD (%)	
1	20	25	43.16	40.79	2.37	33.27	31.52%	
2	27	30	50.63	46.64	3.99	34.35	32.47%	
3	7	22	51.62	46.46	5.16	33.44	39.63%	
DETERMINACIÓN DEL LÍMITE PLÁSTICO								
PRUEBA	CÁPSULA	PESO DE CÁPSULA + SUELO HÚMEDO (gr)	PESO CÁPSULA + SUELO SECO (gr)	PESO DEL AGUA (gr)	PESO DE CÁPSULA (gr)	CONTENIDO DE HUMEDAD (%)		
1	1	24.02	23.91	0.11	23.34	19.30%		

Gráfica 7. Determinación de límite líquido de la muestra 2 con 6% de cal



LL= 35%

LP= 19.30%

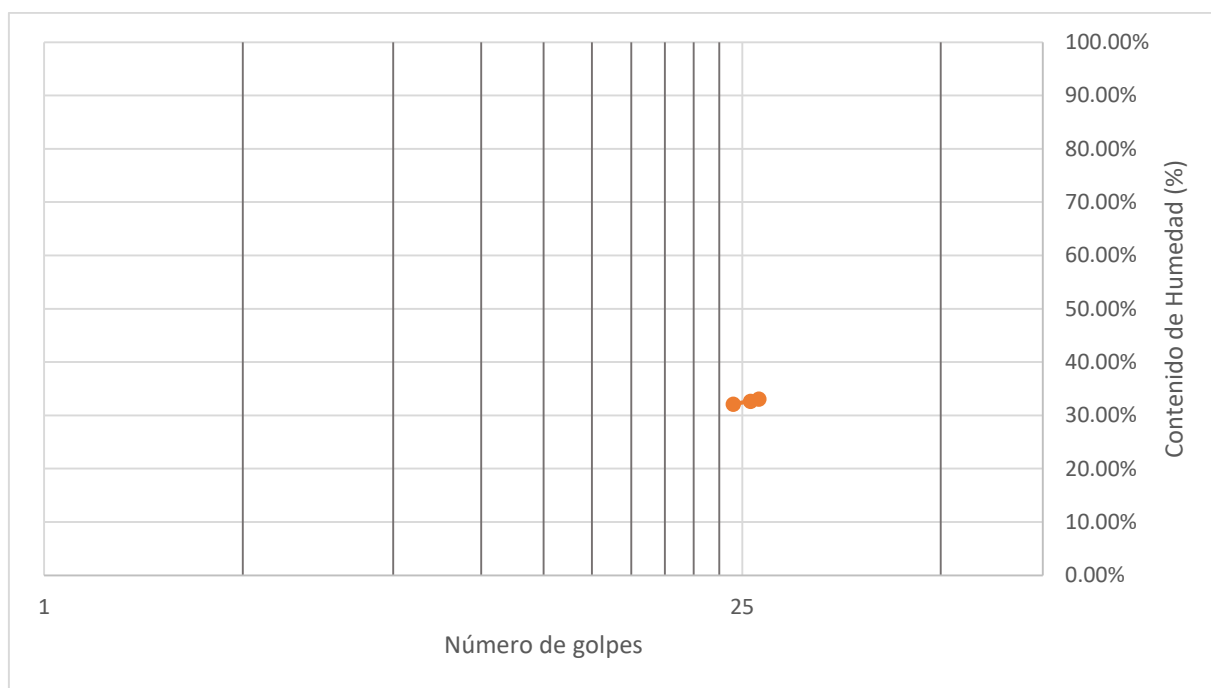
IP= 15.24%

NÚMERO DE GOLPES	CONTENIDO DE HUMEDAD (%)
25	31.52%
30	32.47%
22	39.63%

Tabla 21. Determinación de límites de Atterberg de la muestra 2 con 7% de cal

LÍMITES DE ATTERBERG								
SONDEO		1				PROF.	0.7 mts	
UBICACIÓN		FRACCIONAMIENTO EL CIELO				MUESTRA	2	
DETERMINACIÓN DEL LÍMITE LÍQUIDO								
PRUEBA	CÁPSULA	NÚMERO DE GOLPES	PESO DE CÁPSULA + SUELO HÚMEDO (gr)	PESO CÁPSULA + SUELO SECO (gr)	PESO DEL AGUA (gr)	PESO DE CÁPSULA (gr)	CONTENIDO DE HUMEDAD (%)	
1	8	24	46	42.99	3.01	33.61	32.09%	
2	1	27	69.7	60.99	8.71	34.65	33.07%	
3	5	26	45.01	42.61	2.4	35.26	32.65%	
DETERMINACIÓN DEL LÍMITE PLÁSTICO								
PRUEBA	CÁPSULA	PESO DE CÁPSULA + SUELO HÚMEDO (gr)		PESO CÁPSULA + SUELO SECO (gr)	PESO DEL AGUA (gr)	PESO DE CÁPSULA (gr)	CONTENIDO DE HUMEDAD (%)	
1	5	21.19		21.03	0.16	20.16	18.39%	

Gráfica 8. Determinación de límite líquido de la muestra 2 con 7% de cal



LL= 33%

LP= 18.39%

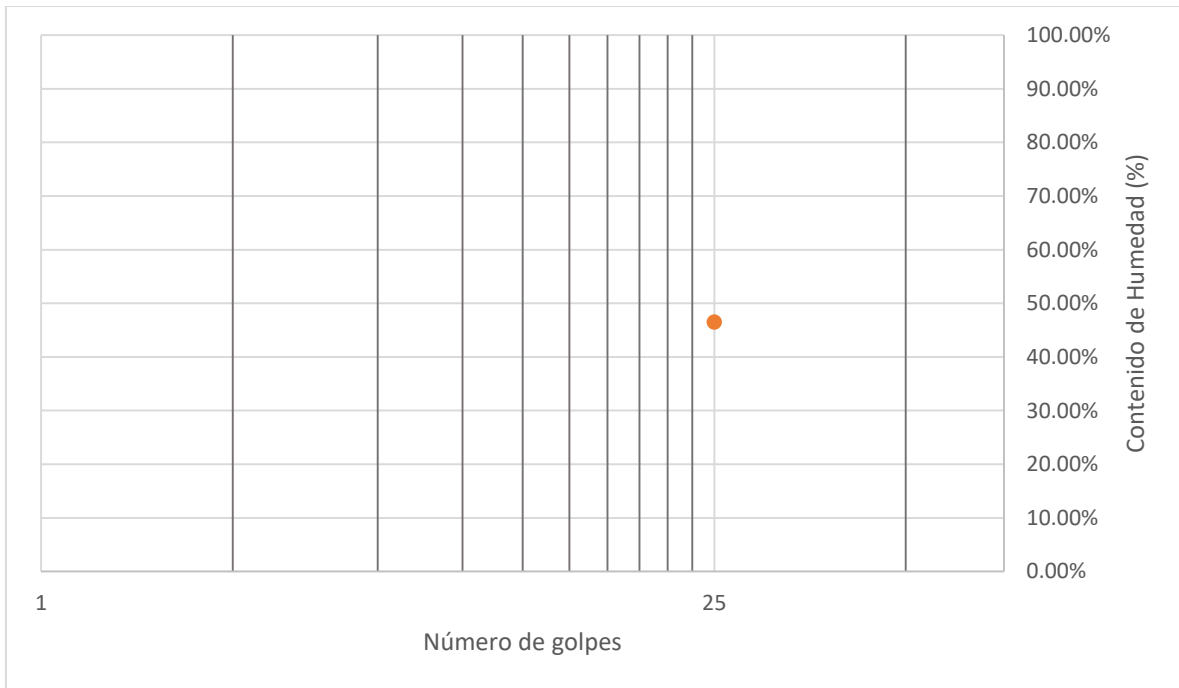
IP= 14.21%

NÚMERO DE GOLPES	CONTENIDO DE HUMEDAD (%)
24	32.09%
27	33.07%
26	32.65%

Tabla 22. Determinación de límites de Atterberg de la muestra 3 natural

LÍMITES DE ATTERBERG								
SONDEO		1				PROF.	0.80 mts	
UBICACIÓN		AV. PRADOS DEL SOL N° 7911, FRACC. PRADOS DEL SOL, C.P. 82124, MAZATLÁN,				MUESTRA	3	
DETERMINACIÓN DEL LÍMITE LÍQUIDO								
PRUEBA	CÁPSULA	NÚMERO DE GOLPES	PESO DE CÁPSULA + SUELO HÚMEDO (gr)	PESO CÁPSULA + SUELO SECO (gr)	PESO DEL AGUA (gr)	PESO DE CÁPSULA (gr)	CONTENIDO DE HUMEDAD (%)	
1	4	25	42.61	40.04	2.57	34.51	46.47%	
DETERMINACIÓN DEL LÍMITE PLÁSTICO								
PRUEBA	CÁPSULA	PESO DE CÁPSULA + SUELO HÚMEDO (gr)	PESO CÁPSULA + SUELO SECO (gr)	PESO DEL AGUA (gr)	PESO DE CÁPSULA (gr)	CONTENIDO DE HUMEDAD (%)		
1	A	16.76	16.68	0.08	16.13	14.55%		

Gráfica 9. Determinación de límite líquido de la muestra 3 natural



LL= 46%

LP= 14.55%

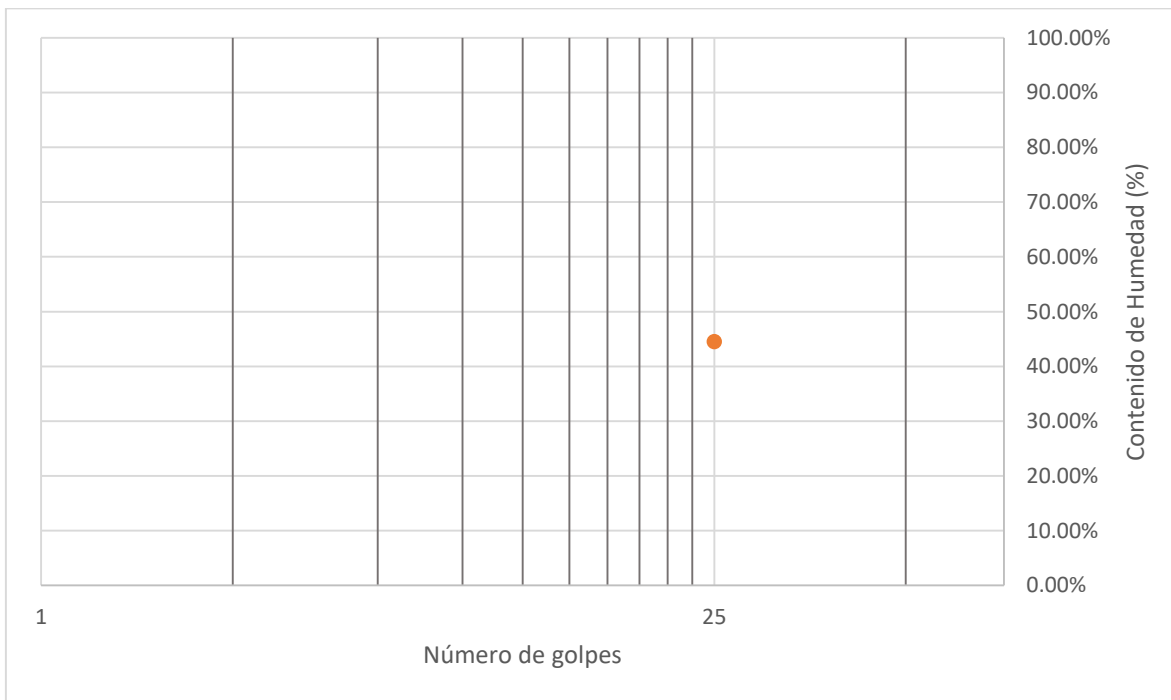
IP= 31.93%

NÚMERO DE GOLPES	CONTENIDO DE HUMEDAD (%)
25	46.47%

Tabla 23. Determinación de límites de Atterberg de la muestra 3 con 3% de cal

LÍMITES DE ATTERBERG								
SONDEO		1				PROF.	0.80 mts	
UBICACIÓN		AV. PRADOS DEL SOL N° 7911, FRACC. PRADOS DEL SOL., C.P. 82124, MAZATLÁN,				MUESTRA	3	
DETERMINACIÓN DEL LÍMITE LÍQUIDO								
PRUEBA	CÁPSULA	NÚMERO DE GOLPES	PESO DE CÁPSULA + SUELO HÚMEDO (gr)	PESO CÁPSULA + SUELO SECO (gr)	PESO DEL AGUA (gr)	PESO DE CÁPSULA (gr)	CONTENIDO DE HUMEDAD (%)	
1	7	25	44.2	40.88	3.32	33.43	44.56%	
DETERMINACIÓN DEL LÍMITE PLÁSTICO								
PRUEBA	CÁPSULA	PESO DE CÁPSULA + SUELO HÚMEDO (gr)	PESO CÁPSULA + SUELO SECO (gr)	PESO DEL AGUA (gr)	PESO DE CÁPSULA (gr)	CONTENIDO DE HUMEDAD (%)		
1	3	20.85	20.69	0.16	20.17	30.77%		

Gráfica 10. Determinación de límite líquido de la muestra 3 con 3% de cal



LL= 45%

LP= 30.77%

IP= 13.79%

NÚMERO DE GOLPES	CONTENIDO DE HUMEDAD (%)
25	44.56%

Tabla 24. Determinación de límites de Atterberg de la muestra 3 con 6% de cal

LÍMITES DE ATTERBERG							
SONDEO	1			PROF.	0.80 mts		
UBICACIÓN	AV. PRADOS DEL SOL N° 7911, FRACC. PRADOS DEL SOL, C.P. 82124, MAZATLÁN,			MUESTRA	3		
DETERMINACIÓN DEL LÍMITE LÍQUIDO							
PRUEBA	CÁPSULA	NÚMERO DE GOLPES	PESO DE CÁPSULA + SUELO HÚMEDO (gr)	PESO CÁPSULA + SUELO SECO (gr)	PESO DEL AGUA (gr)	PESO DE CÁPSULA (gr)	CONTENIDO DE HUMEDAD (%)
1	23	25	42.3	39.71	2.59	33.54	41.98%
DETERMINACIÓN DEL LÍMITE PLÁSTICO							
PRUEBA	CÁPSULA	PESO DE CÁPSULA + SUELO HÚMEDO (gr)	PESO CÁPSULA + SUELO SECO (gr)	PESO DEL AGUA (gr)	PESO DE CÁPSULA (gr)	CONTENIDO DE HUMEDAD (%)	
1	2	24.02	23.87	0.15	23.36	29.41%	

Gráfica 11. Determinación de límite líquido de la muestra 3 con 6% de cal



LL= 42%

LP= 29.41%

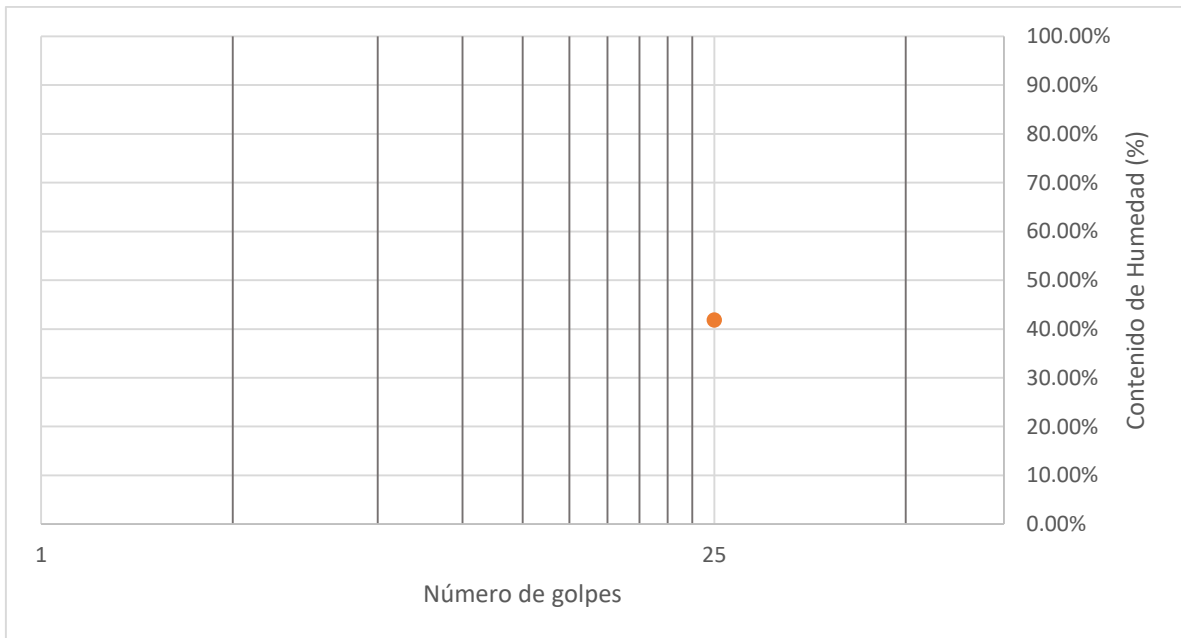
IP= 12.57%

NÚMERO DE GOLPES	CONTENIDO DE HUMEDAD (%)
25	41.98%

Tabla 25. Determinación de límites de Atterberg de la muestra 3 con 7% de cal

LÍMITES DE ATTERBERG							
SONDEO	1					PROF.	0.80 mts
UBICACIÓN	AV. PRADOS DEL SOL N° 7911, FRACC. PRADOS DEL SOL, C.P. 82124, MAZATLÁN,				MUESTRA	3	
DETERMINACIÓN DEL LÍMITE LÍQUIDO							
PRUEBA	CÁPSULA	NÚMERO DE GOLPES	PESO DE CÁPSULA + SUELO HÚMEDO (gr)	PESO CÁPSULA + SUELO SECO (gr)	PESO DEL AGUA (gr)	PESO DE CÁPSULA (gr)	CONTENIDO DE HUMEDAD (%)
1	24	25	50.55	45.89	4.66	34.77	41.91%
DETERMINACIÓN DEL LÍMITE PLÁSTICO							
PRUEBA	CÁPSULA	PESO DE CÁPSULA + SUELO HÚMEDO (gr)		PESO CÁPSULA + SUELO SECO (gr)	PESO DEL AGUA (gr)	PESO DE CÁPSULA (gr)	CONTENIDO DE HUMEDAD (%)
1	C	24.11		23.97	0.14	23.51	30.43%

Gráfica 12. Determinación de límite líquido de la muestra 3 con 7% de cal



LL= 41.91%

LP= 30.43%

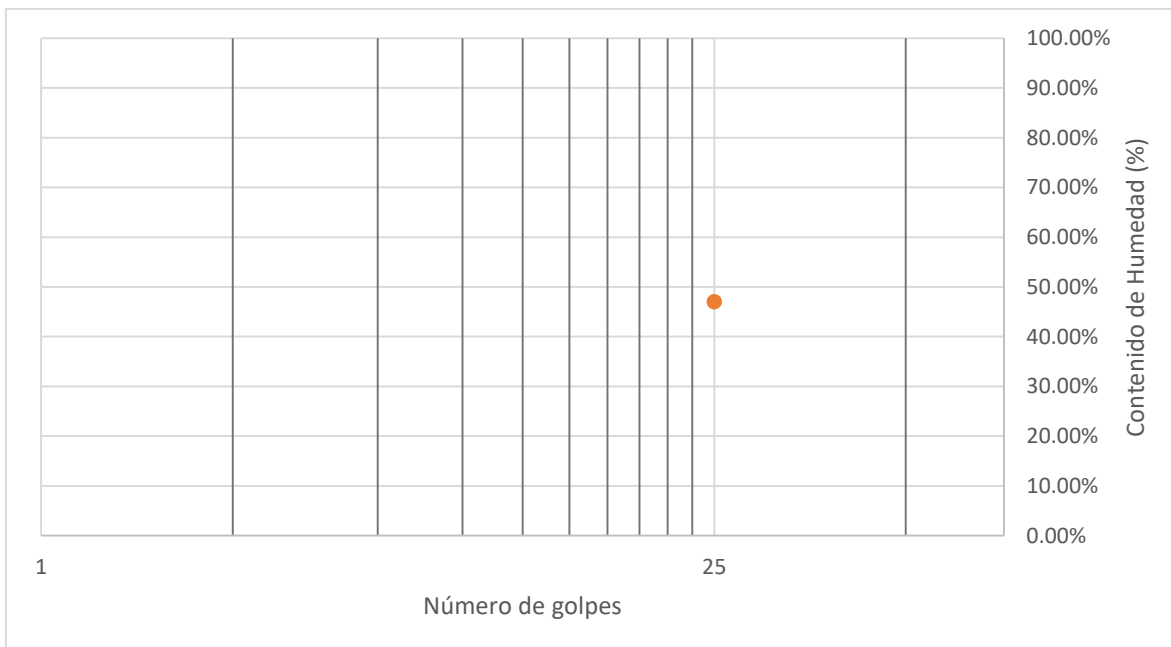
IP= 11.47%

NÚMERO DE GOLPES	CONTENIDO DE HUMEDAD (%)
25	41.91%

Tabla 26. Determinación de límites de Atterberg de la muestra 4 natural

LÍMITES DE ATTERBERG								
SONDEO		1				PROF.	0.80 mts	
UBICACIÓN		AV. PRADOS DEL SOL N° 7911, FRACC. PRADOS DEL SOL, C.P. 82124, MAZATLÁN,				MUESTRA	4	
DETERMINACIÓN DEL LÍMITE LÍQUIDO								
PRUEBA	CÁPSULA	NÚMERO DE GOLPES	PESO DE CÁPSULA + SUELO HÚMEDO (gr)	PESO CÁPSULA + SUELO SECO (gr)	PESO DEL AGUA (gr)	PESO DE CÁPSULA (gr)	CONTENIDO DE HUMEDAD (%)	
1	12	25	42.64	40.04	2.6	34.51	47.02%	
DETERMINACIÓN DEL LÍMITE PLÁSTICO								
PRUEBA	CÁPSULA	PESO DE CÁPSULA + SUELO HÚMEDO (gr)	PESO CÁPSULA + SUELO SECO (gr)	PESO DEL AGUA (gr)	PESO DE CÁPSULA (gr)	CONTENIDO DE HUMEDAD (%)		
1	5	16.78	16.68	0.10	16.13	17.80%		

Gráfica 13. Determinación de límite líquido de la muestra 4 natural



LL= 47%

LP= 17.80%

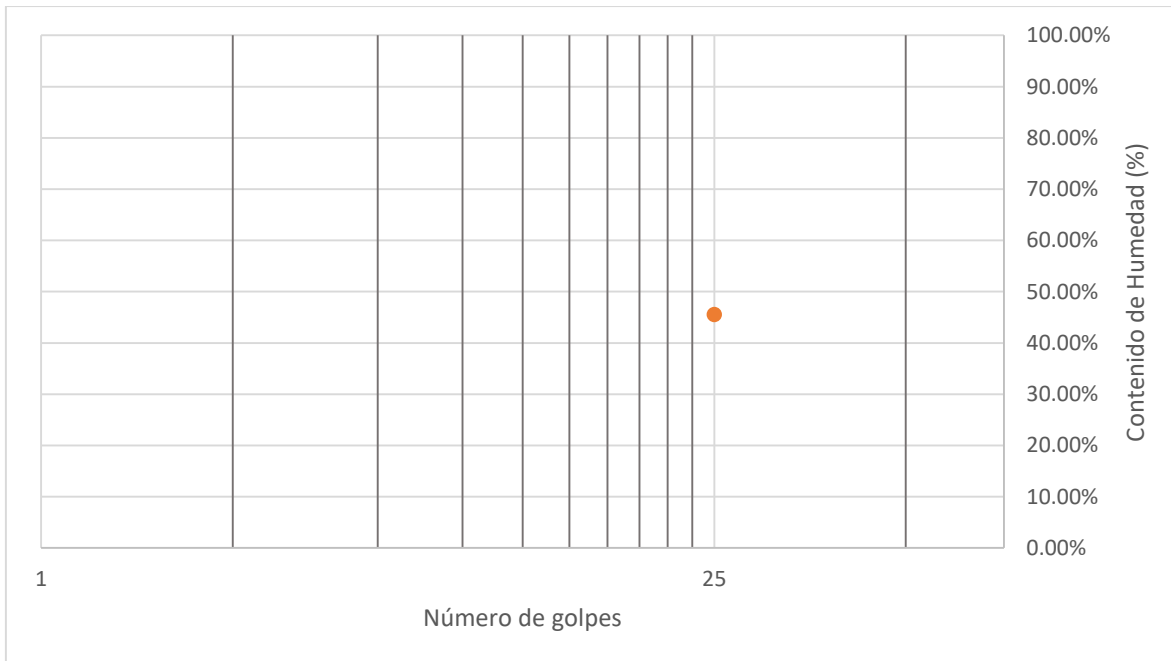
IP= 29.22%

NÚMERO DE GOLPES	CONTENIDO DE HUMEDAD (%)
25	47.02%

Tabla 27. Determinación de límites de Atterberg de la muestra 4 con 3% de cal

LÍMITES DE ATTERBERG								
SONDEO	1						PROF.	0.80 mts
UBICACIÓN	AV. PRADOS DEL SOL N° 7911, FRACC. PRADOS DEL SOL, C.P. 82124, MAZATLÁN,						MUESTRA	4
DETERMINACIÓN DEL LÍMITE LÍQUIDO								
PRUEBA	CÁPSULA	NÚMERO DE GOLPES	PESO DE CÁPSULA + SUELO HÚMEDO (gr)	PESO CÁPSULA + SUELO SECO (gr)	PESO DEL AGUA (gr)	PESO DE CÁPSULA (gr)	CONTENIDO DE HUMEDAD (%)	
1	2	25	48.54	44.13	4.41	34.44	45.51%	
DETERMINACIÓN DEL LÍMITE PLÁSTICO								
PRUEBA	CÁPSULA	PESO DE CÁPSULA + SUELO HÚMEDO (gr)		PESO CÁPSULA + SUELO SECO (gr)	PESO DEL AGUA (gr)	PESO DE CÁPSULA (gr)	CONTENIDO DE HUMEDAD (%)	
1	1	24.01		23.87	0.14	23.34	26.42%	

Gráfica 14. Determinación de límite líquido de la muestra 4 con 3% de cal



LL= 45.51%

LP= 26.42%

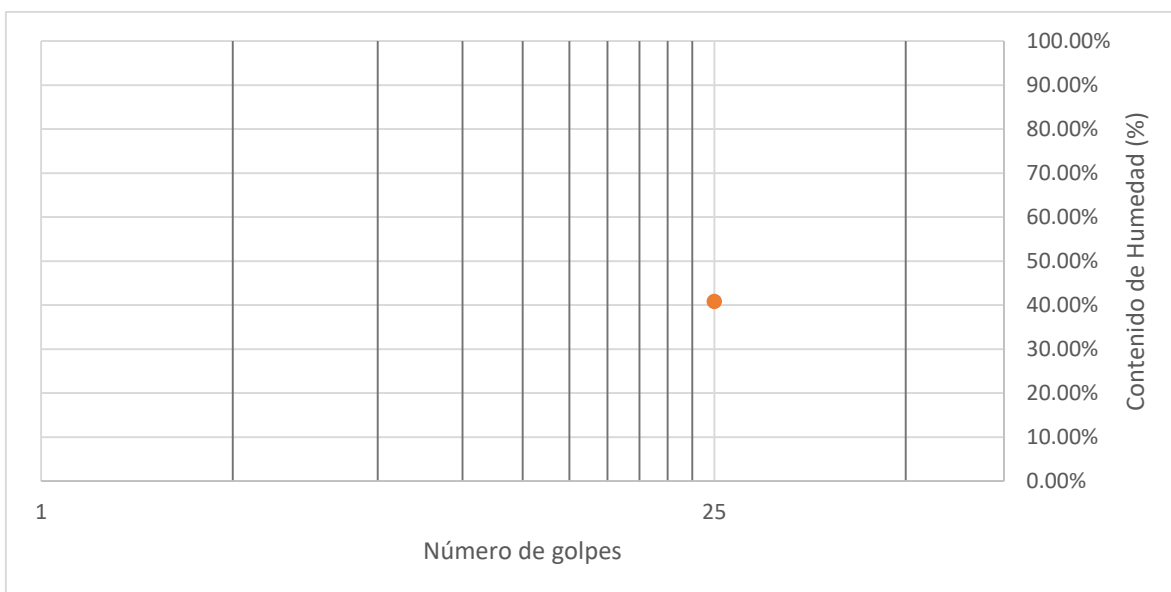
IP= 19.10%

NÚMERO DE GOLPES	CONTENIDO DE HUMEDAD (%)
25	45.51%

Tabla 28. Determinación de límites de Atterberg de la muestra 4 con 6% de cal

LÍMITES DE ATTERBERG								
SONDEO		1				PROF.	0.80 mts	
UBICACIÓN		AV. PRADOS DEL SOL N° 7911, FRACC. PRADOS DEL SOL, C.P. 82124, MAZATLÁN,				MUESTRA	4	
DETERMINACIÓN DEL LÍMITE LÍQUIDO								
PRUEBA	CÁPSULA	NÚMERO DE GOLPES	PESO DE CÁPSULA + SUELO HÚMEDO (gr)	PESO CÁPSULA + SUELO SECO (gr)	PESO DEL AGUA (gr)	PESO DE CÁPSULA (gr)	CONTENIDO DE HUMEDAD (%)	
1	5	25	53.49	48.21	5.28	35.28	40.84%	
DETERMINACIÓN DEL LÍMITE PLÁSTICO								
PRUEBA	CÁPSULA	PESO DE CÁPSULA + SUELO HÚMEDO (gr)	PESO CÁPSULA + SUELO SECO (gr)	PESO DEL AGUA (gr)	PESO DE CÁPSULA (gr)	CONTENIDO DE HUMEDAD (%)		
1	Y	24.28	24.08	0.20	23.42	30.30%		

Gráfica 15. Determinación de límite líquido de la muestra 4 con 6% de cal



LL= 40.84%

LP= 30.30%

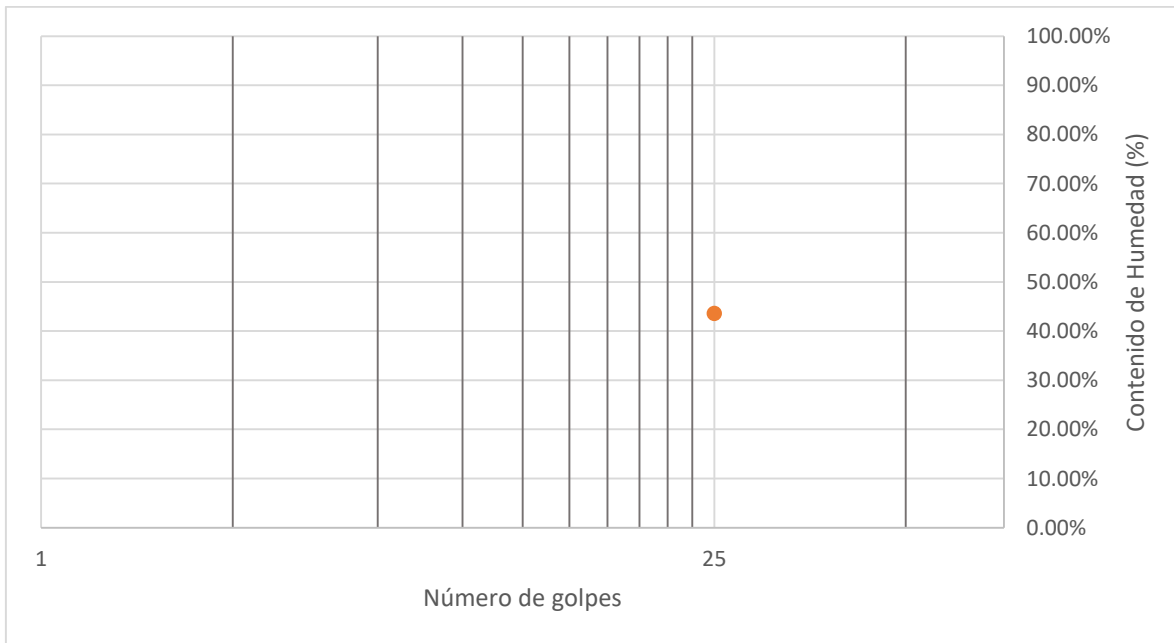
IP= 10.53%

NÚMERO DE GOLPES	CONTENIDO DE HUMEDAD (%)
25	40.84%

Tabla 29. Determinación de límites de Atterberg de la muestra 4 con 7% de cal

LÍMITES DE ATTERBERG								
SONDEO		1				PROF.	0.80 mts	
UBICACIÓN		AV. PRADOS DEL SOL N° 7911, FRACC. PRADOS DEL SOL, C.P. 82124, MAZATLÁN,				MUESTRA	4	
DETERMINACIÓN DEL LÍMITE LÍQUIDO								
PRUEBA	CÁPSULA	NÚMERO DE GOLPES	PESO DE CÁPSULA + SUELO HÚMEDO (gr)	PESO CÁPSULA + SUELO SECO (gr)	PESO DEL AGUA (gr)	PESO DE CÁPSULA (gr)	CONTENIDO DE HUMEDAD (%)	
1	8	25	39.96	38.03	1.93	33.6	43.57%	
DETERMINACIÓN DEL LÍMITE PLÁSTICO								
PRUEBA	CÁPSULA	PESO DE CÁPSULA + SUELO HÚMEDO (gr)	PESO CÁPSULA + SUELO SECO (gr)	PESO DEL AGUA (gr)	PESO DE CÁPSULA (gr)	CONTENIDO DE HUMEDAD (%)		
1	X	24.04	23.89	0.15	23.37	28.85%		

Gráfica 16. Determinación de límite líquido de la muestra 4 con 7% de cal



LL= 43.57%

LP= 28.85%

IP= 14.72%

NÚMERO DE GOLPES	CONTENIDO DE HUMEDAD (%)
25	43.57%

5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Observando las tablas de clasificación de suelos expansivos, mediante los valores de límite líquido que se obtuvo por medio de las pruebas de laboratorio, arrojaron que la primera muestra de arcilla tiene un potencial expansivo medio y revisando con el valor del índice plástico, corroboramos que esta muestra de arcilla en efecto tenía un potencial expansivo medio. Al colocarle 3% de cal hidratada a una muestra de 100 gramos, observamos que su límite líquido seguía siendo el mismo, sin embargo su límite plástico aumentaba casi un 10%, lo que ocasionaba que su índice plástico disminuyera un 10%, lo que dejaba el suelo con un potencial expansivo bajo o nulo, sin embargo al colocarle 6% de la misma cal a otra muestra de 100 gramos, pudimos ver que su límite líquido aumento al igual que su límite plástico, lo que nos dejó un índice plástico similar al de la muestra con 3% de cal hidratada, lo que nos arrojaba un suelo con potencial expansivo nulo y la misma operación se realizó pero con un 7% de cal y en esta muestra su límite líquido y plástico aumentaron con respecto a la muestra natural, al igual que la muestra del 6%, sin embargo su índice plástico disminuyó hasta en un 11.22%. Lo anterior nos deja como resultado que para esta muestra el 7% de cal es más efectivo para disminuir su potencial expansivo.

Con el procedimiento anterior trabajamos las siguientes 3 muestras, lo cual nos permitió observar que en la segunda muestra teníamos un suelo con un potencial expansivo medio, al hacer la prueba con el 3% de cal observamos que su límite líquido disminuía, sin embargo su límite plástico aumentaba, lo que provocaba que su índice disminuyera hasta en un 13.31% lo que arrojó un suelo con un potencial

expansivo prácticamente nulo, con la muestra del 6% de cal su límite líquido también disminuyó aunque en menor medida que con la muestra del 3%, sin embargo su límite plástico aumento más que con la del 3%, lo que dejó un índice plástico similar a la muestra con 3% de cal, lo cual arrojó un potencial expansivo prácticamente nulo y con la muestra del 7% su límite líquido resultó igual al de la muestra del 3%, su límite plástico aumento, aunque un poco menos que la muestra del 6%, sin embargo nos dio como resultado un índice plástico aún menor que el de las dosificaciones anteriores, lo cual nos da como conclusión que para esta muestra la dosificación del 7% también era la más adecuada.

Para la tercera muestra, al realizarle las pruebas de los límites de Atterberg observamos que teníamos un suelo con un potencial expansivo alto, lo cual al realizar las pruebas con las dosificaciones de cal obtuvimos que con la del 3% su límite líquido no disminuía en gran medida, sin embargo, su límite plástico aumentaba un 16.22%, lo que provocaba que su índice plástico disminuyera en un 18.14%, lo cual provocó que el potencial expansivo del suelo fuese bajo o nulo, con la dosificación del 6% los resultados arrojaban un índice plástico aún más bajo que con el 3% de cal, dejando su potencial expansivo también bajo o nulo y con la del 7% los resultados eran aún más favorables, ya que nos daba un índice plástico del 11.47% lo cual era 1.1% menor que con la dosificación del 6%, lo cual nos dejaba que igual que las 2 muestras anteriores, la dosificación del 7% de cal hidratada para una muestra de 100 gramos de suelo era la más adecuada para dejar su potencial expansivo muy bajo o prácticamente nulo.

Con la última muestra que realizamos, obtuvimos mediante los límites de Atterberg que de la misma manera que la muestra anterior el suelo presentaba un potencial expansivo alto y mediante las dosificaciones de cal recabamos que con la del 3% su índice plástico disminuía en un 10.12%, lo que nos arrojaba un suelo con potencial expansivo medio, sin embargo, con la dosificación del 6% el índice plástico disminuía considerablemente con respecto al suelo natural, ya que disminuía en un 18.69%, lo cual dejó el suelo con un potencial expansivo bajo o nulo y con la del 7% su índice plástico disminuía en un 14.5% lo cual arrojó un suelo con un potencial expansivo bajo o nulo. En esta ocasión observamos que la dosificación de cal que más ayudo al suelo a disminuir su potencial expansivo era la del 6%.

Tabla 30. Resultados obtenidos de la muestra 1

MUESTRA 1				
CONDICIONES DE LA MUESTRA	LL	LP	IP	POTENCIAL EXPANSIVO
NATURAL	33%	10.09%	22.53%	MEDIO
3% ADICIÓN CAL	33%	20.00%	12.74%	BAJO O NULO
6% ADICIÓN CAL	36%	22.97%	12.89%	BAJO O NULO
7% ADICIÓN CAL	35%	23.86%	11.31%	BAJO O NULO

Tabla 31. Resultados obtenidos de la muestra 2

MUESTRA 2				
CONDICIONES DE LA MUESTRA	LL	LP	IP	POTENCIAL EXPANSIVO
NATURAL	38%	9.05%	28.81%	MEDIO
3% ADICIÓN CAL	33%	17.54%	15.50%	MEDIO/BAJO
6% ADICIÓN CAL	35%	19.30%	15.24%	MEDIO/BAJO
7% ADICIÓN CAL	33%	18.39%	14.21%	BAJO O NULO

Tabla 32. Resultados obtenidos de la muestra 3

MUESTRA 3				
CONDICIONES DE LA MUESTRA	LL	LP	IP	POTENCIAL EXPANSIVO
NATURAL	46%	14.55%	31.93%	ALTO
3% ADICIÓN CAL	45%	30.77%	13.79%	BAJO O NULO
6% ADICIÓN CAL	42%	29.41%	12.57%	BAJO O NULO
7% ADICIÓN CAL	42%	30.43%	11.47%	BAJO O NULO

Tabla 33. Resultados obtenidos de la muestra 4

MUESTRA 4				
CONDICIONES DE LA MUESTRA	LL	LP	IP	POTENCIAL EXPANSIVO
NATURAL	47%	17.80%	29.22%	ALTO
3% ADICIÓN CAL	46%	26.42%	19.10%	MEDIO
6% ADICIÓN CAL	41%	30.30%	10.53%	BAJO O NULO
7% ADICIÓN CAL	44%	28.85%	14.72%	BAJO O NULO

Con todos los resultados que recabamos, podemos comprobar que la cal hidratada funciona perfectamente para controlar el potencial expansivo de los suelos, dejando su expansividad prácticamente nula. Sin embargo, la dosificación que más funcionaba fue la dosificación de 7% de cal ya que fue la que más disminuía el índice plástico del suelo, lo que dejó el potencial expansivo más bajo que con las otras 2 dosificaciones a excepción de la última muestra, que la dosificación que más disminuyó el potencial expansivo del suelo fue la dosificación del 6%.

La principal recomendación es realizar una prueba de dosificación de cal siempre que se cuente con el tiempo para ello para un mejor resultado, sin embargo, de no realizarse podemos recomendar usar las dosificaciones de cal del entre 6% y 7% ya que si analizamos sus resultados son bastante similares y son las que mejor funcionaron, arrojando un potencial expansivo del suelo bajo o nulo en cada una de las pruebas que se realizaron.

6 REFERENCIAS

- Afrin, H. (2017). A Review on Different Types Soil Stabilization Techniques. *International Journal of Transportation Engineering and Technology*, 19-24.
- Beltrán Martínez, R. (2009). Diseño geotecnico y estructural de una cimentacion en arcilla expansiva. (*tesis para maestría*). Universidad nacional autonoma de México, México.
- Braja M., D. (2015). *Fundamentos de ingeniería geotécnica*. México: Cengage Learning.
- Calcinor. (2020). *La Cal, un producto-tres efectos, en la estabilización de suelos*. Obtenido de Calcinor: <https://www.calcinor.com/es/actualidad/reviews-producto/cal-estabilizacion-de-suelos>
- Chen, F. H. (1975). *Foundations on expansive soils*. Denver: Elsevier.
- Colombiana, G. v. (2019). Suelos expansivos. *Suelos expansivos*. Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá.
- Crespo Villalaz, C. (2004). *Mecánica de suelos y cimentaciones*. México: Limusa.
- Díaz Rodríguez, J. A. (2014). *Mecánica de suelos: naturaleza y propiedades*. México: Trillas.
- Harris, C. M. (2005). *Dictionary of Architecture and Construction*. United States: McGraw-Hill Education.
- Juárez Badillo, E., & Rico Rodríguez, A. (1973). *Mecánica de suelos Tomo 1*. México: Limusa.

- M. Petry, T., & Armstrong, J. C. (1989). Stabilization of expansive clay soils. *Transportation Research Record 1219*.
- Meza Ochoa, V. E. (2005). Influencia de la succión matricial en el comportamiento deformacional de los suelos expansivos. (*Tesis para maestría*). Universidad Nacional de Colombia, Medellín.
- Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S. (2018). *NMX-C-493-ONNCCE-2018 Industria de la Construcción-Geotecnia-Límites de Consistencia de Suelos-Método de Ensayo*.
- Quintero Lemus, L. J., & Gallardo Amaya, R. J. (2015). Caracterización mineralógica de arcillas expansivas con fines de estabilización. *Caracterización mineralógica de arcillas expansivas con fines de estabilización*. Universidad Francisco de Paula Santander Ocaña, Ocaña.
- Rodríguez Uribe, J. C. (2018). Abatimiento de la expansion mediante la modificación de suelos y aplicación de carga. (*Tesis de maestría*). Universidad autónoma de Querétaro, Querétaro.
- Torres Garcia, J. d. (2005). Estudio de fatiga de expansión en suelos arcillosos. (*Tesis de maestría*). Universidad Autónoma de Querétaro, Querétaro.
- Trejo Moedano, A. (1989). Los suelos expansivos y su problemática. *Alternativas tecnológicas 29 mesas redondas sobre los suelos expansivos y su problemática*. Academia Mexicana de ingeniería, México.

Zapata, R. (2018). Geología y Geotecnia. *Tipos de suelos: caracterización de suelos arcillosos y limosos*. Universidad Nacional de Rosario, Rosario, Santa fe, Argentina.

7 ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Esquema de una muestra de suelo, para indicación de los símbolos usados.....	18
Ilustración 2. Rango del límite líquido y del índice de plasticidad para suelos en los grupos A-2, A-4, A-5, A6 y A7.....	29
Ilustración 3 . Sistema unificado de clasificación de suelos.....	31
Ilustración 4 . Esquema de la estructura de lámina silícica	34
Ilustración 5. Esquema de la estructura de la lámina alumínica	35
Ilustración 6. Carta de clasificación del potencial de expansión. Modificado de Seed et al., (1962).....	44
Ilustración 7. Fatiga de expansión	52
Ilustración 8. Daños que se presentan en una casa-habitación	56
Ilustración 9. Métodos de estabilización del suelo expansivo, mismas que actúan sobre el suelo, la humedad y la cimentación	64
Ilustración 10. Descarga de una estructura ligera al material expansivo	65
Ilustración 11. Estabilización con agentes químicos como la cal para estabilizar el medio y con ello abatir la expansión	66

Ilustración 12. Estrategia para estabilizar el medio por medio de la pre saturación (pre humedecimiento) con el fin de establecer un equilibrio en el medio y con ello minimizar la expansión	67
Ilustración 13. Método de sustitución el cual consiste el cambiar el material expansivo por un material inerte	68
Ilustración 14. Como alternativa para mitigar los efectos adversos del movimiento del medio se aísla la estructura haciendo uso de membranas impermeables	69
Ilustración 15. Modelos gráficos que ejemplifican el comportamiento de la estructura vs el material expansivo	70
Ilustración 16. Suelo seco.....	77
Ilustración 17. Triturado del suelo seco	78
Ilustración 18. Suelo pasado por la malla 40	78
Ilustración 19. Material extendido en copa	79
Ilustración 20. Accionado de manivela de la copa.....	80
Ilustración 21. Moldeado de la muestra en forma de esfera	82
Ilustración 22. Cilindros realizados sobre placa de vidrio	83
Ilustración 23. Reposo de las muestras con su dosificación de cal	84
Ilustración 24. Saturado del suelo con cal	85

Ilustración 25. Accionado de la manivela de la copa con el suelo con cal.....	85
Ilustración 26. Moldeado de la muestra en forma de esfera	86
Ilustración 27. Cilindros de muestra con cal realizados sobre placa de vidrio	87
Ilustración 28. Suelo en estado natura	121
Ilustración 29. Secado de muestra en horno	121
Ilustración 30. Sacado de la muestra del horno después de 24hrs	122
Ilustración 31. <i>Cuarteo de la muestra</i>	122
Ilustración 32. Cribado del material	123
Ilustración 33. Material que pasó por la malla no. 40	123
Ilustración 34. Equipo y material para realizar los límites de Atterberg	124
Ilustración 35. Equipo y material para realizar los límites de Atterberg con cal .	124
Ilustración 36. Cal hidratada.....	125
Ilustración 37. Mezclado de cal con el suelo	125
Ilustración 38. Mezcla homogénea del suelo con la cal.....	126
Ilustración 39. Saturación del suelo con agua destilada.....	126
Ilustración 40. Material extendido en copa de Casagrande.....	127
Ilustración 41. Accionado de manivela de la copa.....	127

Ilustración 42. Muestra puesta a secar en horno	128
Ilustración 43. Moldeado de muestra sobre las manos	128
Ilustración 44. Moldeado de muestra sobre placa de vidrio	129
Ilustración 45. Cilindros realizados para limite plástico	129
Ilustración 46. Cilindros puestos a secar en horno	130
Ilustración 47. Pesado de cilindros secos en báscula	130

8 ÍNDICE DE GRÁFICAS

Gráfica 1. Determinación de límite líquido de la muestra 1 natural.....	89
Gráfica 2. Determinación de límite líquido de la muestra 1 con 3% de cal	90
Gráfica 3. Determinación de límite líquido de la muestra 1 con 6% de cal	91
Gráfica 4. Determinación de límite líquido de la muestra 1 con 7% de cal	92
Gráfica 5. Determinación de límite líquido de la muestra 2 natural.....	93
Gráfica 6. Determinación de límite líquido de la muestra 2 con 3% de cal	94
Gráfica 7. Determinación de límite líquido de la muestra 2 con 6% de cal	95
Gráfica 8. Determinación de límite líquido de la muestra 2 con 7% de cal	96
Gráfica 9. Determinación de límite líquido de la muestra 3 natural.....	97
Gráfica 10. Determinación de límite líquido de la muestra 3 con 3% de cal.....	98
Gráfica 11. Determinación de límite líquido de la muestra 3 con 6% de cal.....	99
Gráfica 12. Determinación de límite líquido de la muestra 3 con 7% de cal.....	100
Gráfica 13. Determinación de límite líquido de la muestra 4 natural.....	101
Gráfica 14. Determinación de límite líquido de la muestra 4 con 3% de cal.....	102
Gráfica 15. Determinación de límite líquido de la muestra 4 con 6% de cal.....	103
Gráfica 16. Determinación de límite líquido de la muestra 4 con 7% de cal.....	104

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Límites de separación de tamaño de suelo.....	21
Tabla 2. Clasificación de materiales de carreteras subrasantes	24
Tabla 3. Pruebas de laboratorio para identificación de suelos expansivos	38
Tabla 4. Clasificación de suelos expansivos basado en contenido de coloides, índice plástico y límite de contracción. Holtz & Gibbs (1956).	42
Tabla 5. Clasificación de suelos expansivos basado en el Porcentaje Pasa tamiz No 200, límite líquido y la resistencia a la penetración normal de suelos de las Montañas Rocosas. Chen (1965).	45
Tabla 6. Clasificación de suelos expansivos basado en el Índice Plástico. Chen (1988).....	45
Tabla 7. Clasificación de suelos expansivos basado en el Índice Plástico. Kansas Highway Commission (1974).....	46
Tabla 8. Clasificación del potencial de expansión del suelo. Ranganatham & Satyanarayana (1965).....	46
Tabla 9. Clasificación de suelos expansivos basado en el índice de plasticidad e índice de contracción. Raman (1967)	47
Tabla 10. Clasificación de suelos expansivos basado en el índice de plasticidad e índice de contracción. Raman (1967).....	47

Tabla 11. Clasificación del grado de expansión del suelo según Saito & Miki (1975)	48
Tabla 12. Correlación empírica entre las propiedades índice-propiedades mecánicas	50
Tabla 13. Tipología de daños por cambio de volumen de subsuelo	59
Tabla 14. Determinación de límites de Atterberg de la muestra 1 natural	89
Tabla 15. Determinación de límites de Atterberg de la muestra 1 con 3% de cal.	90
Tabla 16. Determinación de límites de Atterberg de la muestra 1 con 6% de cal.	91
Tabla 17. Determinación de límites de Atterberg de la muestra 1 con 7% de cal.	92
Tabla 18. Determinación de límites de Atterberg de la muestra 2 natural	93
Tabla 19. Determinación de límites de Atterberg de la muestra 2 con 3% de cal.	94
Tabla 20. Determinación de límites de Atterberg de la muestra 2 con 6% de cal.	95
Tabla 21. Determinación de límites de Atterberg de la muestra 2 con 7% de cal.	96
Tabla 22. Determinación de límites de Atterberg de la muestra 3 natural	97
Tabla 23. Determinación de límites de Atterberg de la muestra 3 con 3% de cal.	98
Tabla 24. Determinación de límites de Atterberg de la muestra 3 con 6% de cal.	99
Tabla 25. Determinación de límites de Atterberg de la muestra 3 con 7% de cal	100

Tabla 26. Determinación de límites de Atterberg de la muestra 4 natural	101
Tabla 27. Determinación de límites de Atterberg de la muestra 4 con 3% de cal	102
Tabla 28. Determinación de límites de Atterberg de la muestra 4 con 6% de cal	103
Tabla 29. Determinación de límites de Atterberg de la muestra 4 con 7% de cal	104
Tabla 30. Resultados obtenidos de la muestra 1	107
Tabla 31. Resultados obtenidos de la muestra 2	108
Tabla 32. Resultados obtenidos de la muestra 3	108
Tabla 33. Resultados obtenidos de la muestra 4	109

9 ANEXOS



Ilustración 28. Suelo en estado natura



Ilustración 29. Secado de muestra en horno



Ilustración 30. Sacado de la muestra del horno después de 24hrs



Ilustración 31. Cuarteo de la muestra



Ilustración 32. Cribado del material



Ilustración 33. Material que pasó por la malla no. 40



Ilustración 34. Equipo y material para realizar los límites de Atterberg



Ilustración 35. Equipo y material para realizar los límites de Atterberg con cal

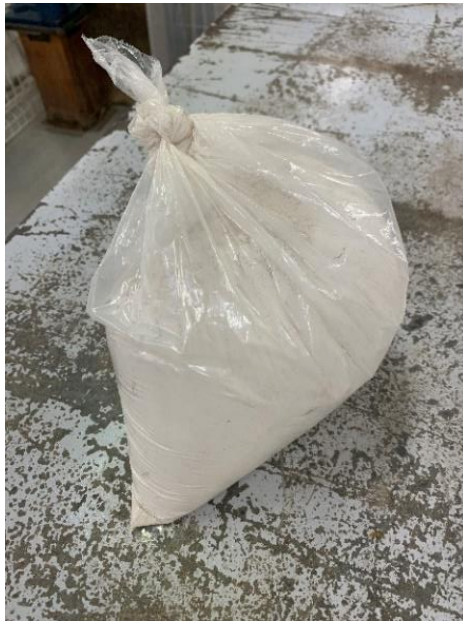


Ilustración 36. Cal hidratada



Ilustración 37. Mezclado de cal con el suelo



Ilustración 38. Mezcla homogénea del suelo con la cal



Ilustración 39. Saturación del suelo con agua destilada



Ilustración 40. Material extendido en copa de Casagrande



Ilustración 41. Accionado de manivela de la copa



Ilustración 42. Muestra puesta a secar en horno



Ilustración 43. Moldeado de muestra sobre las manos



Ilustración 44. Moldeado de muestra sobre placa de vidrio



Ilustración 45. Cilindros realizados para limite plástico



Ilustración 46. Cilindros puestos a secar en horno



Ilustración 47. Pesado de cilindros secos en báscula