

**EVALUACIÓN DE ADITIVOS EN EL TRATAMIENTO DE ARCILLAS  
EXPANSIVAS EN LABORATORIO**

**LUIS CARLOS BUITRAGO NUÑEZ  
GERSON CABALLERO LIZARAZO**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO MECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL  
BUCARAMANGA**

**2015**

**EVALUACIÓN DE ADITIVOS EN EL TRATAMIENTO DE ARCILLAS  
EXPANSIVAS EN LABORATORIO**

**LUIS CARLOS BUITRAGO NUÑEZ  
GERSON CABALLERO LIZARAZO**

**Trabajo de grado para optar al título de  
Ingeniero Civil**

**Director:  
WILFREDO DEL TORO RODRÍGUEZ  
Ingeniero Civil, M. Sc.**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO MECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL  
BUCARAMANGA**

**2015**

*Dedico este libro principalmente a Dios por darme las capacidades y la oportunidad de llevarlo al cabo, a mis padres por guiarme en los caminos correctos del ser y el saber, igualmente a ellos que con su esfuerzo, dedicación y amor, lograron darme la educación necesaria para poder realizarlo, y a todas aquellas personas que con sus consejos y motivación incentivaron en mí, la realización de este proyecto.*

*Luis Carlos Buitrago Núñez.*

*A Dios*

*Por permitirme llegar a esta instancia, por brindarme salud, amor y sabiduría para alcanzar mis objetivos, estoy eternamente agradecido por todo lo recibido.*

*A mi madre Rubiela*

*Por haberme apoyado en todo momento, por sus consejos, enseñanzas y valores que inculcó en mí desde que era un niño, especialmente por su infinito amor.*

*A mi padre Hernando*

*Por haberme demostrado su apoyo incondicional, por la confianza, fe y esperanza depositada en mí.*

*A mis familiares*

*A mi hermana July por ser el ejemplo de una hermana mayor, por sus consejos y paciencia.*

*A mi primo Hipólito, que más que un primo es mi hermano, por su sinceridad, honestidad, confianza, por demostrar que las adversidades no son excusas para salir adelante.*

*A mi abuela Graciela que con su voz de aliento aumentaba la fe ante los momentos de debilidad.*

*A mis amigos*

*Que nos apoyamos infinitamente en nuestra formación como profesional, es un placer que formen parte de este triunfo tan anhelado.*

*Gerson Caballero Lizarazo.*

## **AGRADECIMIENTOS**

A Dios por darnos la vida y nuestro guía en todo momento.

A nuestras familias por su confianza y apoyo incondicional.

Al ingeniero Wilfredo del toro, director de este proyecto por su tiempo, dedicación y conocimiento.

A Germán Hernández auxiliar del laboratorio de suelos y pavimentos por compartir sus conocimientos y experiencia.

A Jairo Hernández, auxiliar de laboratorio de hormigón por su disponibilidad de tiempo ante cualquier inquietud.

A nuestros amigos y compañeros de estudio por su apoyo en la realización de este proyecto.

## CONTENIDO

INTRODUCCIÓN .....	17
1. MARCO TEORICO .....	19
1.1 ESTABILIZACIÓN CON CAL .....	21
1.1.1. Cal hidratada en polvo:.....	23
1.1.2. Cal viva en seco: .....	23
1.1.3. Lechada de cal: .....	24
1.2 ESTABILIZACIÓN CON ACEITE SULFONADO .....	24
2. PROCESO CONSTRUTIVO .....	26
2.1. PROCESO CONSTRUCTIVO ACEITE SULFONADO .....	26
2.2 PROCESO CONSTRUCTIVO CAL .....	27
2.2.1 Preparación de los suelos y almacenamiento de la cal .....	27
2.2.2 Extendido de la cal .....	28
2.2.3. Mezclado .....	28
2.2.4 Compactación y terminación .....	29

3. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL.....	30
3.1. PREPARACIÓN DE LAS MUESTRAS DE SUELO.....	30
3.2 ENSAYOS DE CARACTERIZACIÓN FÍSICA DE LAS MEZCLAS.....	30
3.2.1 Determinación de los tamaños de las partículas de suelo.....	31
3.2.2 Límite líquido (LL):.....	31
3.2.3 Límite plástico e índice de plasticidad.....	32
3.2.4 Límite de contracción: .....	32
3.2.5 California bearing ratio (CBR) .....	33
3.3 ENSAYOS DE EXPANSIVIDAD.....	33
3.3.1 Determinación del potencial de cambio volumétrico de un suelo empleando el aparato de lambe .....	34
3.3.2 Hinchamiento libre de un suelo en edómetro .....	34
4. ANÁLISIS DE RESULTADOS .....	35
4.1 LÍMITE LÍQUIDO (LL).....	35
4.2 LIMITE PLÁSTICO E ÍNDICE DE PLASTICIDAD .....	37

4.3 LIMITE DE CONTRACCIÓN (LC) .....	39
4.4 CALIFORNIA BEARING RATIO (CBR) .....	39
4.5 DETERMINACIÓN DEL POTENCIAL DE CAMBIO VOLUMÉTRICO DE UN SUELO EMPLEANDO EL APARATO DE LAMBE .....	42
4.6. HINCHAMIENTO LIBRE DE UN SUELO EN EDÓMETRO.....	45
5. ANÁLISIS DE COSTOS.....	48
5.1 COSTOS CORRESPONDIENTES AL ACEITE SULFONADO GEO-STAB .....	48
5.2 COSTOS CORRESPONDIENTES A LA CAL .....	49
6. CONCLUSIONES .....	50
CITAS BIBLIOGRÁFICAS .....	52
BIBLIOGRAFÍA .....	54

## LISTA DE GRAFICAS

Grafica 1. LL correspondiente al suelo natural.....	35
Grafica 2. Variación del LL para cada dosificación.....	36
Grafica 3. Variación del IP para cada dosificación.....	38
Grafica 4. Evaluación de CBR a dos meses de curado.....	40
Grafica 5. Presión de expansión en muestras de Suelo tratadas con aceite sulfonado y cal.....	45
Grafica 6. Hinchamiento libre en muestras de suelo tratadas con aceite sulfonado y cal.....	47

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Valores de CBR para muestras curadas en laboratorio.....	41
Figura 2. Valores de CBR curadas en campo.....	41
Figura 3. Curva para determinar el CVP de expansión.....	43
Figura 4. Disminución del índice de hinchamiento por la acción del aceite sulfonado y la cal.....	44

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Potencial expansivo de los suelos.....	20
Tabla 2. Clasificación de rango de plasticidad del suelo de acuerdo con el valor de IP.....	20
Tabla 3. Alternativas de compactación de la probeta.....	34
Tabla 4. Variación del LP para cada dosificación.....	38

## RESUMEN

### **TÍTULO:**

EVALUACIÓN DE ADITIVOS EN EL TRATAMIENTO DE ARCILLAS EXPANSIVAS EN LABORATORIO.\*

### **AUTORES:**

LUIS CARLOS BUITRAGO NUÑEZ

GERSON CABALLERO LIZARAZO\*\*

### **PALABRAS CLAVES:**

Arcillas expansivas, estabilización química, aceite sulfonado.

### **DESCRIPCIÓN:**

Ante la problemática que generan los suelos expansivos a las obras civiles que se encuentran asentadas en los mismos y por las grandes pérdidas económicas que generan, se realizó un estudio a un suelo plástico, más exactamente a una arcilla inorgánica de alta plasticidad CH (LL>50%) para mitigar y/o reducir el potencial de expansión de dichos suelos.

Existen varios métodos de estabilización para controlar los problemas generados por los cambios de volumen debido a las variaciones de la humedad, la estabilización electroquímica es uno de ellos entre los cuales se destacan aditivos como las cenizas volantes, la cal, cemento hidráulico, sales, fosfatos y aceites sulfonados, este método tiene como finalidad corregir la deficiencia de las propiedades físico-químicas que presenta el suelo (arcilla), ya sea dándole una mayor resistencia o bien, disminuyendo su plasticidad.

En el presente trabajo se utilizaron dos aditivos (Aceite sulfonado y cal) con el propósito de determinar las ventajas técnicas bajo las mismas condiciones y ensayo. Se mezcló el suelo con diferentes concentraciones de aceite sulfonado Geo-Stab (40cc, 50cc, 70cc) y cal (2%, 3%, 4%), se sometieron a ensayos de caracterización física y mecánica con el fin de analizar el comportamiento de cada uno de ellos. Los resultados obtenidos fueron los más favorables ya que se logró elevar la capacidad portante en mayor proporción cuando se utilizó el aditivo de la cal e igualmente se pudo controlar la expansión del suelo con las diferentes dosificaciones de aditivo (aceite sulfonado y cal).

---

\* Proyecto de grado

\*\* Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Director: Wilfredo Del Toro Rodríguez, Ingeniero Civil M.Sc.

## ABSTRACT

### TITLE:

ASSESSMENT OF ADDITIVES IN THE TREATMENT OF EXPANSIVE CLAY IN LABORATORY.\*

### AUTHORS:

LUIS CARLOS BUITRAGO NUÑEZ

GERSON CABALLERO LIZARAZO\*\*

### KEYWORDS:

Expansive clays, chemical stabilization, sulfonated oil.

### DESCRIPTION:

Given the problem caused by the expansive soils to the civil builds that is located on them and also the economic losses its generates, a research study was accomplished to a plastic a soil, more exactly at a high plasticity inorganic clay CH (LL>50%), in order to mitigate and/or decrease the expansion potential of these soils.

There are several stabilization methods to control the problems caused by changes of volume due to variations in humidity. The electrochemical stabilization is one of those, that includes, additives such as fly ash, lime, hydraulic concrete, salts, phosphates and sulfonated oils, the goal of this method is to correct the deficiency of the physic-chemical properties on the soil (clay), in order to giving greater strength or decreasing its plasticity

In this paper two additives (sulfonated oil and lime) in order to determine the technical advantages under the same conditions and testing were used. Soil are mixed with different concentrations of sulfonated oil Geo-Stab (40cc, 50cc, 70cc) and lime (2%, 3%, 4%), were subjected to tests of mechanical and physical characterization in order to analyze the behavior of each one of them. The results were as favorable as it was possible to increase the bearing capacity greater extent when the additive lime was used and also is able to control the expansion of the floor with different dosages of additive (sulfonated oil and lime).

---

\* Proyecto de grado

\*\* Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Director: Wilfredo Del Toro Rodríguez, Ingeniero Civil M.Sc

## INTRODUCCIÓN

“Los suelos parcialmente saturados (presiones negativas del agua intersticial) que han recibido mayor atención por los investigadores debido a los daños y pérdidas económicas que ocasionan a las obras de ingeniería son las arcillas expansivas” (Fredlund, & Rahardjo, 1993). Estos suelos tienen la capacidad de modificar su volumen cuando absorbe o deja de absorber agua, produciendo hinchamientos, deformaciones del suelo que generan problemas en las estructuras que están asentadas en éste, los problemas más frecuentes son la manifestación de grietas en muros y el levantamiento de pisos y pavimentos. [1]

Los suelos expansivos han sido objeto de múltiples investigaciones para determinar el comportamiento de sus propiedades cuando son expuestas a periodos de humedad y posteriormente a periodos de secado. Algunos resultados muestran que para los primeros periodos de humectación y secado se produce una ligera expansión vertical del suelo, pero para periodos siguientes la expansión va aumentando. [2]

“Los factores que influyen en la expansión pueden dividirse en dos grupos. El primero incluye las condiciones estratigráficas y las propiedades intrínsecas del suelo: tipo de mineral arcilloso, tamaño y superficie específica de partículas, contenido de arcilla y contenido de agua. El segundo grupo abarca las condiciones ambientales: precipitación, evaporación y temperatura” Ordoñez, Auvinet & Juárez (2014).

En Estados Unidos, Briggs y Holtz (1973) consideraban que los problemas generados por suelos expansivos, económicamente eran mayores que los provocados por otros desastres naturales. Nuffer (1994) calculaba las pérdidas económicas entre 6.000 y 11.000 millones de dólares, mientras que Ragozín (1994)

calculaba unas pérdidas económicas de 3.000 a 5.000 millones de dólares anuales en Rusia. [3]

La estabilización del suelo expansivo mediante aditivos como el aceite sulfonado y la cal es uno de los métodos electroquímicos más frecuentes aunque se apliquen desde hace más de cuatro décadas atrás, los estudios realizados a los suelos expansivos y en los cuales se aplicó el aceite sulfonado demostró que el efecto estabilizador depende de las condiciones ambientales y de periodos prolongados de tiempo cuando dichas condiciones no son muy favorables, es por esto que el objetivo principal de nuestra investigación se basa en analizar mediante ensayos de caracterización física y mecánica el comportamiento de la arcilla expansiva cuando es mezclada con las diferentes concentraciones de aditivo (aceite sulfonado y cal). [2]

Para llevar a cabo el objetivo general de esta investigación se plantearon los siguientes cuatro objetivos específicos que serán desarrollados en el presente artículo.

- Recopilar los conceptos fundamentales y nociones generales que conciernen a la estabilización de suelos con aceite sulfonado (Geo-Stab) y cal.
- Determinar las ventajas técnicas de cada alternativa de estabilización bajo las mismas condiciones y ensayo.
- Evaluar con cuál de los dos aditivos (aceite sulfonado – cal) se encontraron resultados más efectivos en la estabilización de arcilla expansiva.
- Comparar cuál de los dos agentes estabilizantes es más económico al momento de estabilizar un suelo arcilloso.

## 1. MARCO TEORICO

En el estudio de estabilización de suelos existe un tema de importancia que es la estabilización de los suelos expansivos, principalmente estos suelos son de tipo arcilloso.

Se pueden presentar tres diferentes tipos de arcillas que se caracterizan por su estructura mineral, bien sean montmorillonitas, caolinita e ilitas, todas compuestas por silicatos de aluminio [1] cuya capacidad de soporte e índices plásticos son variables dependiendo de cuál se trate, y que al entrar en contacto con el agua por sus propiedades químicas principalmente por sus minerales, se producen cambios químicos en su estructura molecular y con esto alteraciones en sus propiedades físicas (hinchamiento y deshinchamiento), es decir la tendencia a aumentar su volumen cuando aumenta su contenido de agua, sino también la disminución de volumen o contracción si el agua se pierde, lo cual afecta a estructuras, estructuras viales, terrenos y todo tipo de construcciones civiles cuya base sea este tipo de suelo.

Dentro de las características que catalogan a un suelo como altamente expansivo se encuentran que sus propiedades son las presentadas en la tabla 1 y 2.

Tabla 1 Potencial expansivo de los suelos

Grado de Expansión	LL	IP
Elevado	>60	>35
Marginal	50 - 60	25 - 35
Bajo	<50	<25

Fuente: INV E-132-13

Tabla 2. Clasificación de rango de plasticidad del suelo de acuerdo con el valor de IP.

Plasticidad	Descripción del Suelo	Rango IP
Nula	<b>Limo</b>	0-3
Baja	Limo con Trazas de arcilla	4-15
Media	Limo arcilloso Arcilla Limosa Arcillas y Limos Orgánicos	16-30
Alta	Arcilla Limosa	>31

Fuente: (Yong & Warketin, 1996)

La estabilización de suelos es el proceso en el cual se mejoran las propiedades de este, y es necesario hacerlo mediante agentes estabilizantes, los cuales pueden ser químicos o naturales, etc.

Dentro de los agentes químicos que se utilizan para la estabilización de suelos se pueden encontrar [2]:

- Aditivos que retengan la humedad: sales comunes y cloruro de calcio.

- Aditivos resistentes a la humedad: agentes impermeabilizantes resinosos e hidrófugos, materiales bituminosos y asfaltos rebajados.
- Mezcla de suelo-cemento, en la mayoría de los casos se hace con cemento portland.
- Cal y cemento: reacciona con el suelo químicamente permitiendo reacciones puzolánicas.
- Agentes dispersantes: entre los cuales se encuentran el silicato de sodio y poli fosfato de sodio que reducen el límite líquido, el índice plástico y la permeabilidad.

### **1.1 ESTABILIZACIÓN CON CAL**

Ante la problemática de la estabilización de suelos que contienen arcillas expansivas existen soluciones, entre las cuales se encuentra la cal, anteriormente esta tenía aplicabilidad solamente en la estabilización de las capas de infraestructura (terraplenes coronación y fondos de desmonte), pero a razón de la experiencia que se ha obtenido durante los años con este tipo de estabilizante, se han ampliado sus aplicaciones, a continuación se presentan alguna de ellas. [4]

- Estabilización y reparación de caminos y vías de servicio.
- Estabilización de explanaciones aeroportuarias (pistas de vuelo).
- Estabilización de plataformas ferroviarias, especialmente de alta velocidad.

- Estabilización de terrenos para las explanaciones en grandes obras de urbanización.
- Estabilización de zonas de vertederos para construir sobre ellas instalaciones deportivas y de ocio.
- Secado de lodos procedentes de tuneladoras en terrenos blandos para un mejor manejo y posterior reutilización.

Existen diferentes metodologías para la aplicación de la cal en el sitio que se desea estabilizar que dependen del volumen de material de suelo a estabilizar, entre estas se encuentran:

- La cal hidratada en polvo
- La cal viva en seco
- Lechada de cal

Cada una debe garantizar una mezcla homogénea para tener confianza que la estabilización va a ser efectiva, las técnicas de estabilización se deben elegir de acuerdo al tipo de estabilización que se desea hacer, teniendo en cuenta factores que influyen como lo son vías rurales o urbanas , y también teniendo en cuenta la experiencia del contratista que desea realizarla.[5]

**1.1.1. Cal hidratada en polvo:** Se aplica con mayor rapidez en el sitio a estabilizar, este proceso es más rápido que el de la aplicación de la lechada. Esta se utiliza también para secar arcillas, pero no tiene la misma efectividad de la cal viva.

En el momento de aplicación de la cal debido a la finura de sus partículas y a su manera de aplicación, se pueden formar nubes o polución formada por las mismas, esto teniendo consecuencia directamente en zonas donde exista población. [5]

**1.1.2. Cal viva en seco:** Esta es mucho más efectiva que la cal hidratada, pues su porcentaje una respecto a la otra, su aplicación es mucho más fácil y manejable, además que al interactuar con las partículas de suelo de una manera completa, reduce las emisiones de partículas al medio ambiente y es excelente en el momento del secado de suelos mojados. [5]

Requiere de una gran cantidad de agua por porcentaje de cal pues al momento de producirse la reacción entre ambos puede haber pérdida adicional por la evaporación significativa debido al calor de hidratación. Al momento de la aplicabilidad de la cal viva se debe tener presente la cantidad de agua que esta requiere para su correcta funcionalidad, por tanto es importante tener fuentes cercanas de agua en el sitio donde se quiere hacer su aplicabilidad, por eso se pueden presentar inconvenientes en partes remotas o donde existan pocos afluentes de agua. La cal viva puede requerir más mezcla que la cal hidratada seca o que las lechadas de cal, porque las partículas de cal viva, que son más grandes, primero deben reaccionar con el agua para formar la cal hidratada y luego debe ser mezclada con el suelo. [5]

**1.1.3. Lechada de cal:** Como se trata de una mezcla liquido-granulosa, es más fácil su aplicabilidad, también es nula la emisión de partículas de polvo, al igual que menor cantidad de agua para la mezcla final.

Requiere de maquinaria para su aplicación, lo cual podría generar costos extras, de igual manera su aplicación es efectiva pero toma mayor tiempo que las demás además de no ser muy recomendable cuando se trata con suelos muy mojados. [5]

## **1.2 ESTABILIZACIÓN CON ACEITE SULFONADO**

Esta clase de agentes son de origen orgánico, derivados de combinación de sulfuros y ácidos, de los derivados de estas combinaciones se obtienen los aceites sulfonados y lignosulfonados.

El efecto que causan estos agentes sobre las partículas de los materiales expansivos o suelos expansivos es que debido a su composición mineralógica (arcillas y limos), tienen exceso de iones negativos (aniones), por lo cual atraen iones positivos (cationes) del agua, lo cual produce que estas se adhieran las unas a las otras.[2]

Por composición química de estos aceites, tienen un enorme potencial de cambio iónico, a pequeñas cantidades de agua activan estos iones, produciéndose así un gran intercambio energético de sus cargas eléctricas con las partículas de suelo haciendo que el agua adherida a las partículas rompa sus enlaces electroquímicos y se desprenda convirtiéndose en agua libre, que drena bien sea por la gravedad, evaporación y compactación.

Haciendo referencia a los aceites sulfonados, en esta ocasión se utilizó el aceite sulfonado Geo-Stab, distribuido en Colombia por la empresa HYDRAM Ltda. Este

es un compuesto derivado de la fracción naftalénica de la hulla, este funciona por medio de agentes tenso activos que hacen que se rompan los enlaces electroquímicos y hace que el agua fluya con libertad, disminuyendo sus características expansivas, haciendo que el suelo menos permeable pero haciendo que este adquiera una mayor capacidad de soporte.[6]

La aplicabilidad de los aceites sulfonados es variable y de este dependen las cantidades que se deben aplicar, en este caso se utilizaron las cantidades recomendadas por la empresa y por los diferentes gremios que utilizan aceite sulfonado Geo-Stab, la cual consiste en aplicar 1 litro de aceite en 200 litros de agua, también se debe tener en cuenta que el efecto que este aceite causa en el material expansivo no es inmediato, cada uno de estos agentes tiene un tiempo determinado o recomendado para alcanzar su máximo efecto, para el caso del Geo-Stab es recomendable dejar que este actúe una vez aplicado a las muestra un tiempo de 30 días o más para que este alcance mejores efectos, en el caso de esta investigación las muestras fueron tratadas después de un tiempo de un mes, esto para garantizar resultados apreciables.[6]

## **2. PROCESO CONSTRUCTIVO**

### **2.1. PROCESO CONSTRUCTIVO ACEITE SULFONADO**

Existen dos sistemas para aplicar el geostab al suelo, elegir uno de los dos depende del tipo de trabajo que se va a realizar y del criterio de los ingenieros (geotecnistas, diseñadores e interventores), de la maquinaria disponible y de las condiciones que presenta el suelo.

Estos métodos son:

- Método de Inoculación
- Método de Incorporación

Este último consiste en realizar una especie de caja en el terreno con la profundidad indicada que en el estudio de suelos aislando el material extraído fuera de la zona de trabajo, se procede a escarificar el fondo de dicha caja y posteriormente se realiza una irrigación con la mezcla de agua y aceite sulfonado Geo-Stab, luego se procede a realizar la compactación respectiva, después se coloca una capa del material extraído aproximadamente de 15 a 20 cm y se procede a realizar una nueva irrigación y así se continua la secuencia hasta donde sea necesario .[15]

En casos donde la estabilización sea superficial no es necesario hacer la excavación de la caja.

Se debe evitar aplicar el aceite sulfonado Geo-Stab en épocas de invierno ya que disminuye sus efectos estabilizantes.

“Los equipos que se emplean en el método de incorporación son los mismos que utilizan en la construcción y mantenimiento de vías. La mejor compactación de los susceptibles de la acción del Geo-Stab se obtiene con rodillos pata de cabra” (Ampatec, 2007).

## **2.2 PROCESO CONSTRUCTIVO CAL**

La estabilización con cal puede hacerse principalmente de dos formas:

- Mezcla in situ (vía seca/húmeda).
- Mezcla en plantas centrales o planta móvil

El sistema más frecuente y con el cual se han logrado excelentes resultados es con la mezcla in situ, a continuación describimos el proceso constructivo por vía seca.

**2.2.1 Preparación de los suelos y almacenamiento de la cal:** Se realiza una escarificación y/o esponjamiento del suelo para mejorar el mezclado del suelo, se realiza con motoniveladora o tractor de orugas o mediante escarificadores de discos o gradas, este proceso es importante para lograr la profundidad y homogenización del suelo requerida, después el material escarificado se deja en reposo para que pierda humedad con la temperatura del ambiente y se procede a eliminar los terrones que se generaron.

La cal en obra debe ser almacenada en contenedores para evitar que la humedad y el aire entre en contacto con la cal y así impedir una reacción no esperada.

Es importante al momento de estabilizar con cal si la humedad natural del suelo es mayor a la humedad optima del proctor modificado se debe adicionar más cal para reducirla. [16]

**2.2.2 Extendido de la cal:** Cuando el terreno a estabilizar es de superficie reducida lo más común es que la cal que se adquiera en sacos o bultos, el extendido se realiza de forma manual y se puede dividir en dos etapas:

Etapa 1: La colocación de bolsas de cal en el terreno se debe hacer de forma homogénea, comúnmente en filas y columnas para lograr una mejor mezcla homogénea con el suelo, sin embargo, la forma y la distancia de cómo se deben situar dichas bolsas se deja a criterio del ingeniero encargado del proceso constructivo.

Etapa 2: La apertura de bolsas de cal se realizará con palas y la distribución de la misma con ayuda de motoniveladoras teniendo en cuenta el equipo de seguridad del personal para evitar al inhalación del polvo en esta parte del proceso. [16]

**2.2.3. Mezclado:** Para realizar el mezclado es necesario contar con una motoniveladora, en vías de baja intensidad vehicular usar motoniveladora es suficiente para lograr un buen mezclado del suelo y la cal, este procedimiento consiste en voltear con la hoja de la motoniveladora el material escarificado, se logra la homegeidad cuando la mezcla de suelo cal se torne de un solo color en todo el tramo que se desea estabilizar o cuando no sean visibles los grumos de cal en el suelo. [16]

**2.2.4 Compactación y terminación:** La compactación de la mezcla suelo-cal se realiza con motoniveladora y se considera terminado cuando se logre una densidad igual o mayor al 95% proveniente de la capa estabilizada y se someterá a un tiempo de curado de 3 a 7 días para permitir una mayor resistencia antes de poner sobre ella la capa de sub-base o base. [16]

### **3. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL**

Se realizaron ensayos de caracterización física y mecánica a cada una de las diferentes dosificaciones de mezcla de suelo-Aceite sulfonado y suelo-cal.

El aceite sulfonado geostab se disolvió en agua en concentraciones de 40, 50 y 70 cc/m<sup>3</sup> de material mezclado, La cantidad de cal en porcentajes de peso de los sólidos fueron de 2,3 y 4 %.

#### **3.1. PREPARACIÓN DE LAS MUESTRAS DE SUELO**

Se mezclaron las muestras con las diferentes concentraciones de aditivos con el suelo (Aceite sulfonado y cal) bajo las condiciones de compactación según el ensayo de proctor modificado (I.N.V.E – 142-13) de donde se obtuvo un peso específico seco de 2.01 g/cm<sup>3</sup> y una humedad óptima de 13.2%.

La dosificación suelo-aceite sulfonado por recomendación del fabricante HYDRAM Ltda se sometió a un secado a temperatura ambiente durante 60 días para obtener resultados más favorables con dicho aditivo.

#### **3.2 ENSAYOS DE CARACTERIZACIÓN FÍSICA DE LAS MEZCLAS**

Se realizaron ensayos con el suelo natural e igualmente con las diferentes mezclas suelo-aditivos para así poder analizar los cambios que sufría el suelo en sus propiedades físicas por el efecto del agente estabilizante adicionado (Aceite sulfonado-Cal).

En este trabajo se presentan los resultados correspondientes a los ensayos de determinación de los tamaños de las partículas de suelo (I.N.V E-123), límite líquido LL (I.N.V E-125), límite plástico LP e índice de plasticidad IP (I.N.V E-126), límite de contracción (I.N.V E-127) y soporte CBR (I.N.V E-148).

**3.2.1 Determinación de los tamaños de las partículas de suelo:** Cuando el material es limo arcilloso y en estado seco los terrones no se desmoronen con facilidad se procesaran por la vía húmeda, consiste en dejar la muestra de suelo en un recipiente adecuado que contiene agua y se deja en reposo hasta que todos los terrones se ablanden, luego se procede a hacer un lavado de la muestra sobre tamiz de 75  $\mu\text{m}$  (No.200) evitando el frote contra la malla e igualmente que se pierdan partículas ya retenidas, se recoge en un recipiente el material retenido en el tamiz No.200 y se seca al horno a una temperatura de  $110 \pm 5^\circ \text{C}$ , se pesa y se procede a un análisis por tamizado en seco. [7]

**3.2.2 Límite líquido (LL):** Este ensayo consiste en obtener el contenido de humedad del suelo, expresado en porcentaje cuando se halla en el límite entre los estados líquido y plástico, se toma una muestra de aproximadamente 200 gramos que pasa el tamiz de 425 $\mu\text{m}$  (No.40), se le adiciona cantidades pequeñas de agua y se procede a lograr una mezcla homogénea, luego se esparce una pequeña muestra sobre la cazuela de Casagrande y se divide con un ranurador en dos partes las cuales fluyen producto de un número de golpes recibidos por la caída repetida de la cazuela sobre una base normalizada, cuando se unan las dos partes en una longitud de 1.3 cm se toma el número de golpes con los cuales se logró la unión e igualmente se toma una muestra del suelo y se lleva al horno a una temperatura de  $110 \pm 5^\circ \text{C}$  para su secado.[8]

**3.2.3 Límite plástico e índice de plasticidad:** Este ensayo consiste en obtener el contenido de humedad, expresado en porcentaje cuando se halla en el límite entre los estados plásticos y semisólidos, se toma una muestra de suelo que pasa el tamiz de 425µm (No.40), y se procede a formar pequeños rollos de suelo humedecido con un grosor de 3.2 mm hasta que el contenido de agua se reduzca y aparezcan grietas en dicho rollo, se pesa un numero de rollos considerables y se llevan al horno a una temperatura de  $110 \pm 5^\circ \text{ C}$  para su secado.[9]

El índice de plasticidad se define como el rango de contenidos de agua entre el límite líquido (LL) y el límite plástico (LP).

$$\text{IP (\%)} = \text{LL} - \text{LP} \quad (1)$$

**3.2.4 Límite de contracción:** Este ensayo consiste en obtener el contenido de humedad por debajo del cual no se producen reducciones adicionales de volumen en el suelo, se utiliza una muestra de suelo que pasa el tamiz de 425µm (No.40) y se lleva a una humedad ligeramente superior al límite líquido (LL), se llena una capsula con la mezcla de suelo en tres capas y en cada capa se compacta dando pequeños golpes para eliminar las burbujas de aire, se procede a secar en horno a una temperatura de  $110 \pm 5^\circ \text{ C}$ , luego del secado se procede a medir el volumen de la pastilla de suelo con el mercurio. [10]

El límite de contracción se calcula mediante la siguiente expresión:

$$\text{LC} = W - \left[ \frac{(V - V^o)\rho_w}{M^o} \right] \times 100 \quad (2)$$

**3.2.5 California bearing ratio (CBR):** Este ensayo tiene como finalidad medir la resistencia al corte de los suelos de subrasante, sub-base y base bajo condiciones de humedad y densidad controladas.

Se toma la muestra de suelo que pasa el tamiz de 4.75mm (No.4), aproximadamente 15000 gramos y se utilizan tres moldes metálicos de aproximadamente 152 mm de diámetro y 127mm de altura (5000 gramos de muestra por cada molde), la muestra de suelo se compacta según la humedad óptima derivada del ensayo de proctor modificado, se utilizan cinco capas de suelo para cada molde, el primer molde se compacta con doce golpes por cada capa de suelo, el segundo molde con 26 golpes y el tercer molde con 55 golpes, luego se sumergen los moldes en agua durante tres días, después de dicho tiempo se sacan los moldes metálicos que contienen la muestra y se someten una presión que ejerce un pistón circular que penetra la muestra de suelo a una velocidad constante.

El CBR se expresa como la relación porcentual entre el esfuerzo requerido para que el pistón penetre 2.54 o 5.08 mm (0.1 o 0.2”). [11]

### **3.3 ENSAYOS DE EXPANSIVIDAD**

Se realizaron dos ensayos diferentes para evaluar las características expansivas del suelo en condición natural y con aditivos: Determinación del Potencial de Cambio Volumétrico de un Suelo Empleando el Aparato de Lambe (I.NV.E-120) e Hinchamiento Libre de un Suelo en Edómetro (UNE 103 601).

**3.3.1 Determinación del potencial de cambio volumétrico de un suelo empleando el aparato de lambe:** La forma de compactación de la probeta de suelo para la elaboración de este ensayo depende de las condiciones de humedad presentes en la tabla 3.

Tabla 3. Alternativas de compactación de la probeta

Humedad	Número de Capas	Número de golpes por capas
Límite Plástico	1	5
Humedad (100% de humedad relativa)	3	4
Seco (50% de humedad relativa)	3	7 para las dos primeras capas y 8 para la última

Fuente: INV E-120-13

El material idóneo para este ensayo es aquel que logra pasar el tamiz de 2mm de abertura (No. 10) y la compactación de la probeta para nuestra investigación se realizó bajo una condición de 50% de humedad relativa.

El propósito de este ensayo es determinar la presión de expansión o bien, la peligrosidad de una arcilla en cuanto a su potencial expansivo, consiste en sumergir la probeta de suelo contenida en una célula o cámara en agua, el tiempo de ejecución del ensayo es de 120 minutos, tiempo considerado suficiente para determinar dicha presión. [12]

**3.3.2 Hinchamiento libre de un suelo en edómetro:** Este ensayo tiene como finalidad calcular en porcentaje el cambio o incremento de altura de la probeta de suelo sometida contenida en una célula o cámara que se sumerge en agua y se le aplica una presión de 0.07 kg/cm<sup>2</sup> a 0.1 kg/cm<sup>2</sup>, el tiempo de ejecución del ensayo es de 24 horas. [13]

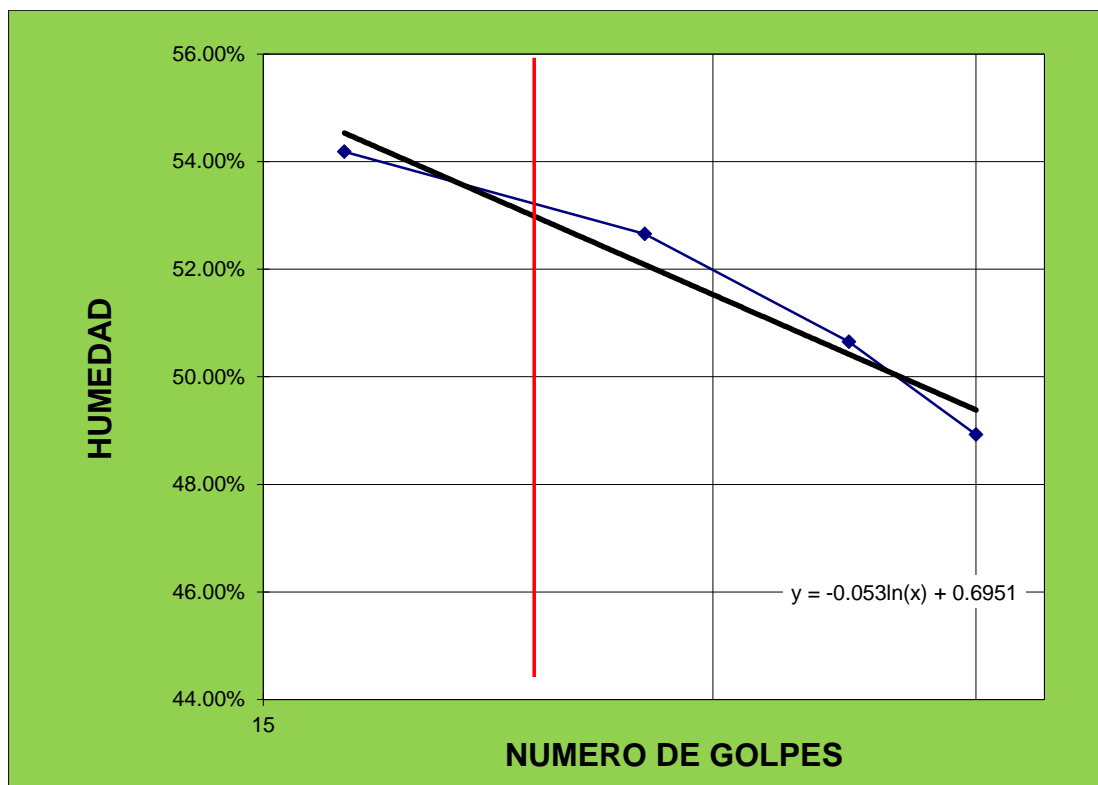
## 4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Se presentan los resultados obtenidos en esta investigación pertenecientes al suelo natural y suelo tratado con aditivos (aceite sulfonado y cal).

### 4.1 LÍMITE LÍQUIDO (LL)

El suelo natural presenta un LL o humedad promedio de 52.4% como se muestra en la gráfica 1.

Gráfica 1. LL correspondiente al suelo natural

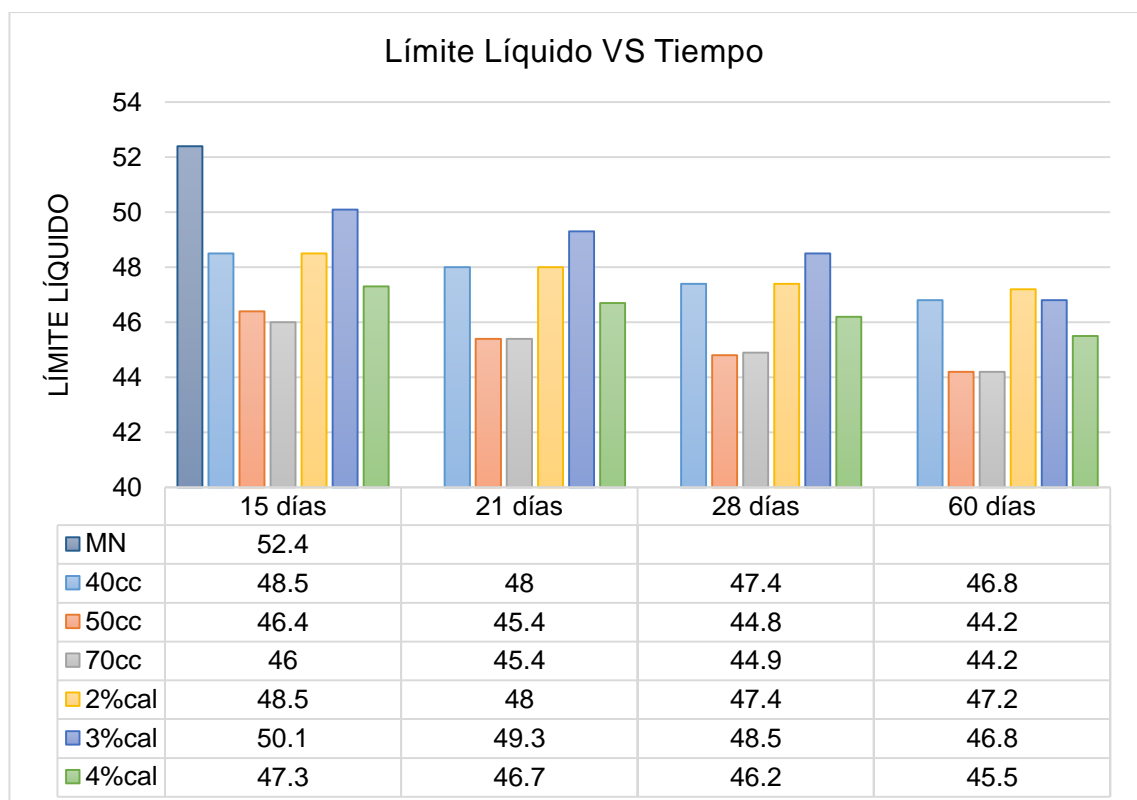


Se demostró que los dos aditivos utilizados reducen el LL del suelo, la gráfica 2 muestra dicha reducción a partir de 15 días de haber tratado el suelo con el aceite sulfonado y la cal en sus diferentes concentraciones.

Se observa que a los 60 días se logró una disminución máxima en el LL del 15.6% correspondiente a 50 y 70cc de aceite sulfonado.

Las diferentes concentraciones de aceite sulfonado disminuyeron el LL, aunque no difieren mucho entre sí, pero permitieron confirmar que existe una reacción favorable a medida que pasa el tiempo e igualmente el LL tuvo una disminución máxima del 13.4% correspondiente al 4% de cal.

Gráfica 2. Variación del LL para cada dosificación



## 4.2 LIMITE PLÁSTICO E ÍNDICE DE PLASTICIDAD

El suelo natural presenta un límite plástico (LP) promedio del 17.87%, la tabla 4 presenta los valores de LP del suelo tratado con el aceite sulfonado y la cal, con ambos aditivos se notó un aumento en LP, en promedio el aumento que presenta el LP cuando es tratado con 40 y 50 cc es del 52.2% y del 66.2% con 70cc.

La cal fue el aditivo que tuvo un mejor comportamiento en este ensayo, ya que aumento el LP en un mayor porcentaje a comparación con el aceite sulfonado que si tuvo una reacción favorable pero su tendencia es a mantenerse estable; con el 2% de cal el LP aumento en promedio un 47.2% y aproximadamente más del 100% con 3% y 4% de cal.

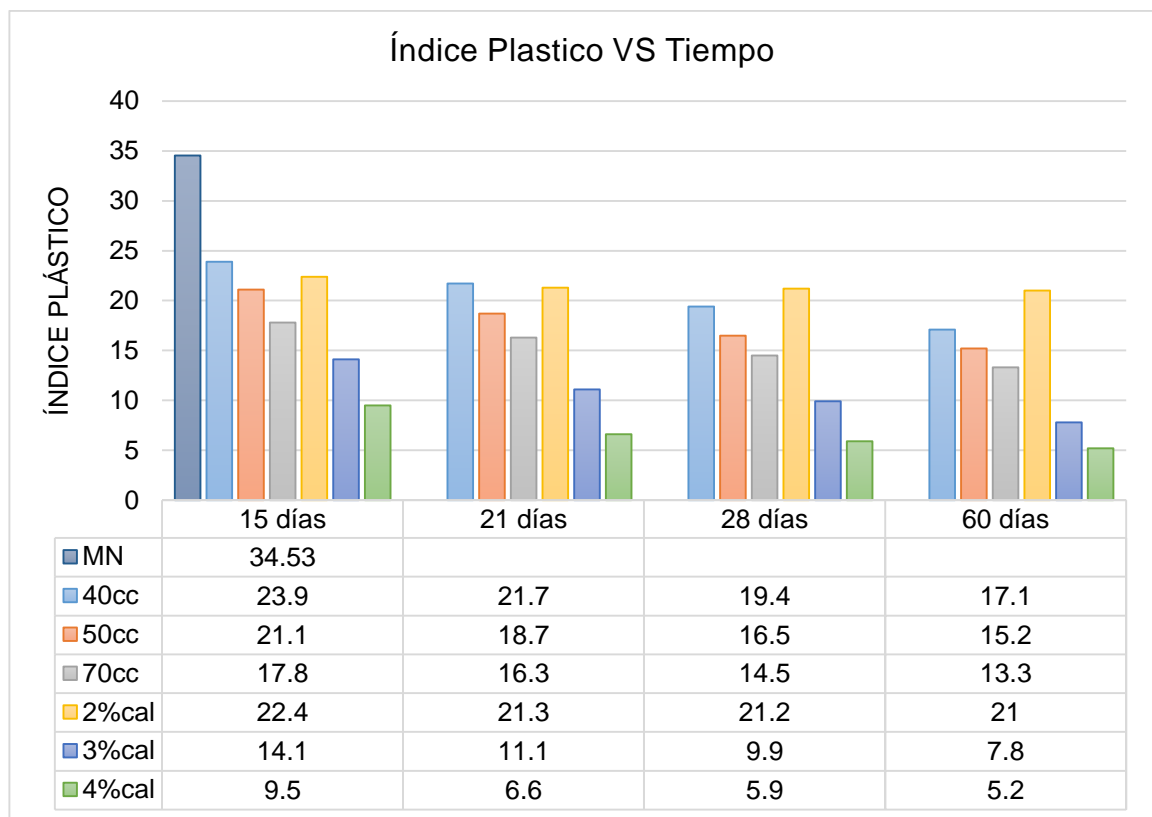
A medida que se aumenta la cantidad de aditivo, el índice de plasticidad (IP) disminuye, la gráfica 3 ilustra los valores del IP para cada una de las concentraciones de aditivo, el IP del suelo natural corresponde a 34.5%.

El suelo se clasifica como una arcilla de alta plasticidad CH y mezclado con el aceite sulfonado y la cal pierde plasticidad, también expansión volviéndose un limo de baja plasticidad ML según el SUCS (Sistema Unificado de Clasificación de Suelos). [1]

Tabla 4. Variación del LP para cada dosificación.

Aditivo	Límite Plástico			
<b>Cm3 Geo-Stab</b>	<b>15d</b>	<b>21d</b>	<b>28d</b>	<b>60d</b>
<b>40</b>	<b>24.6</b>	<b>26.3</b>	<b>28</b>	<b>29.7</b>
<b>50</b>	<b>25.3</b>	<b>26.7</b>	<b>28.3</b>	<b>29</b>
<b>70</b>	<b>28.2</b>	<b>29.1</b>	<b>30.4</b>	<b>30.9</b>
<b>% Cal</b>				
<b>2</b>	<b>26.1</b>	<b>26.7</b>	<b>26.2</b>	<b>26.2</b>
<b>3</b>	<b>36</b>	<b>38.2</b>	<b>38.6</b>	<b>39</b>
<b>4</b>	<b>37.8</b>	<b>40.1</b>	<b>40.3</b>	<b>40.3</b>

Grafica 3. Variación del IP para cada dosificación.



### **4.3 LIMITE DE CONTRACCIÓN (LC)**

El límite de contracción del suelo natural en promedio es de 23.6% y va aumento a medida en que se le adiciona las diferentes concentraciones de aditivos.

Se volvió a realizar el ensayo a los 60 días de haber aplicado los aditivos al suelo y encontramos que con el aceite sulfonado con 40 y 50cc el LC sufre un pequeño cambio ascendente en promedio de tan sólo 10%, el efecto estabilizante se puede notar un poco más en la concentración de 70cc, ya que en un 46.8% respecto al LC del suelo natural.

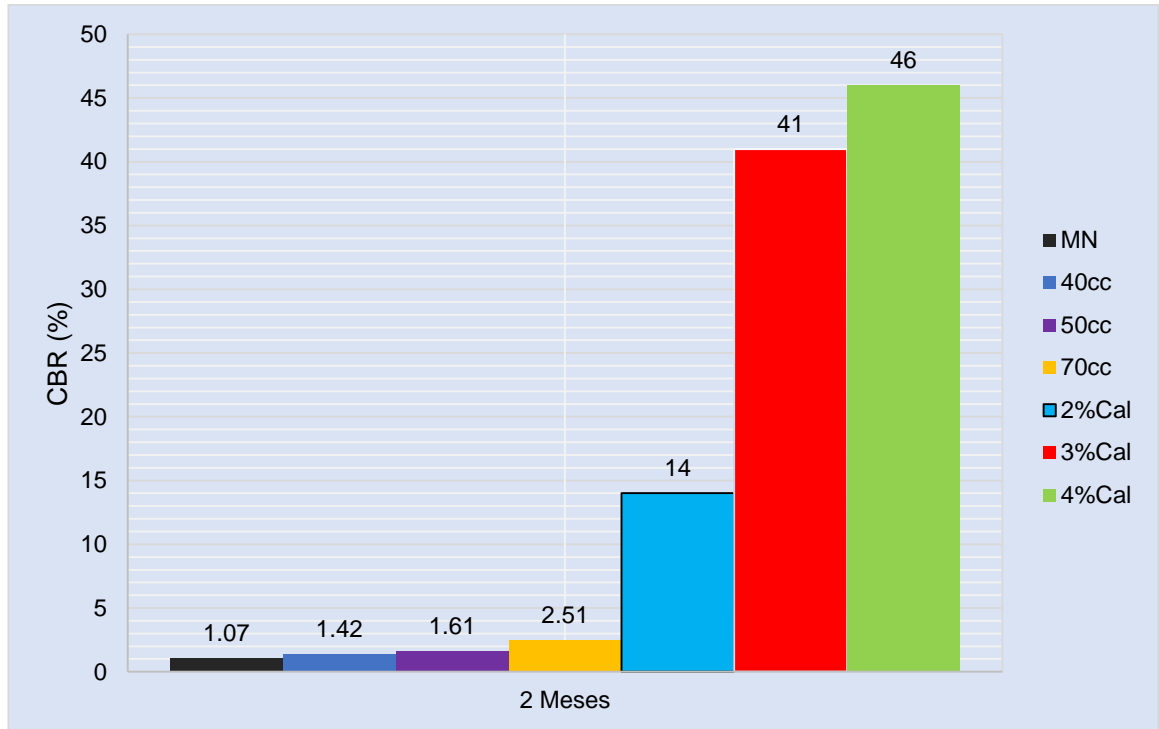
La cal también reacciona favorablemente, aumenta el LC en un 32.2% aproximadamente con el 2% de cal, en un 56.4% con el 3% de cal y finalmente un incremento considerable del 72 % conseguido con el 4% de cal.

En este ensayo indudablemente el agente estabilizador que mejor se comporta mejorando el LC es la cal.

### **4.4 CALIFORNIA BEARING RATIO (CBR)**

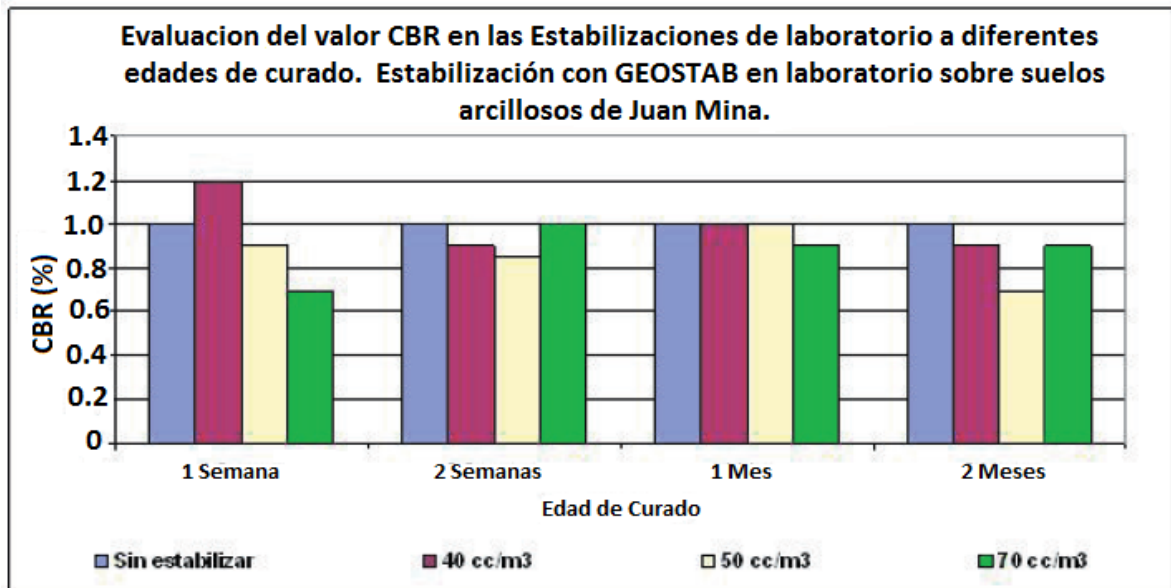
A continuación se presentan los resultados de la capacidad portante CBR, las muestras de suelo tratadas con el aceite sulfonado no sufrieron un cambio notable en la capacidad portante a comparación con las muestras de suelo tratadas con cal que presentaron una mejoría considerable que llegaron a alcanzar el 14, 41 y 46% de CBR correspondientes al 2, 3 y 4% de cal. La gráfica 4 muestra los valores del CBR de las diferentes dosificaciones suelo-aditivo.

Gráfica 4. Evaluación de CBR a dos meses de curado.



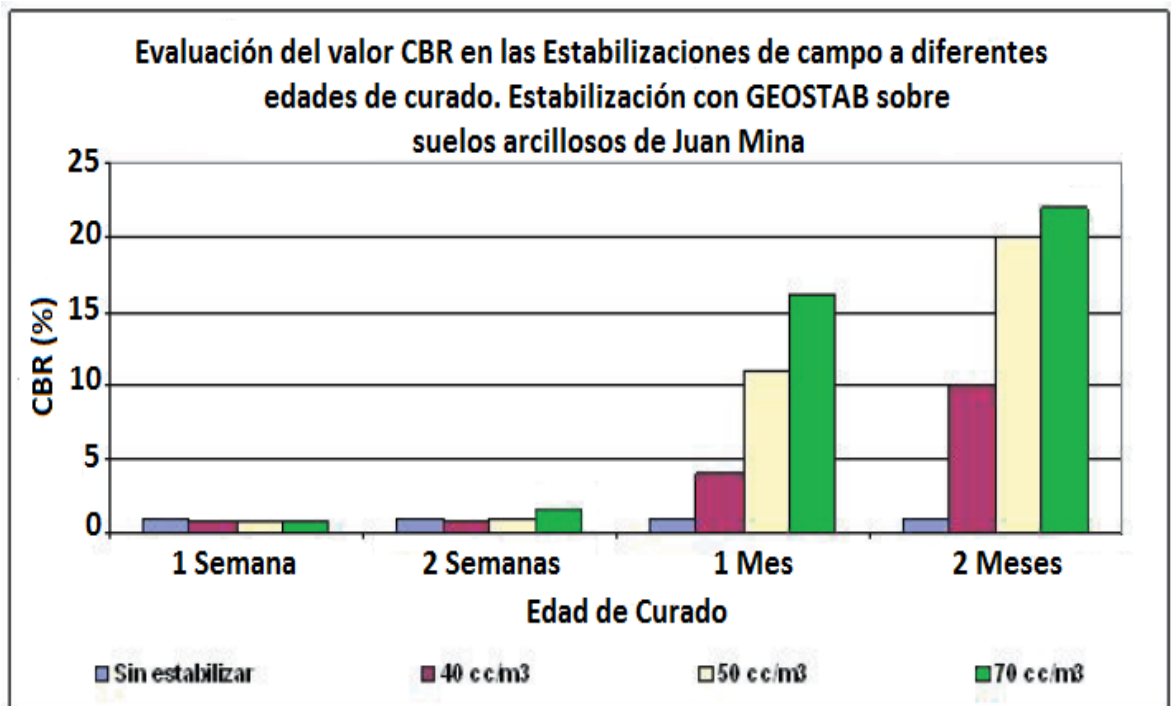
La pobre capacidad portante que se consiguió con el aceite sulfonado se puede explicar con en el trabajo que realizó Arellana (2004), consistió en aplicar diferentes cantidades de aceites sulfonado a las muestras de suelo y posteriormente fueron curadas en laboratorio arrojando los resultados mostrados en la figura 1, también trató con aceite sulfonado un tramo de prueba, después de un tiempo se extrajeron muestras y se realizaron los ensayos correspondientes, en la figura 2 se observan los resultados de las muestras curadas en condiciones ambientales y muestran que la capacidad portante mejoró notablemente.[2]

Figura 1. Valores de CBR Para Muestras Curadas en Laboratorio.



Fuente: Arellana (2004).

Figura 2. Valores de CBR curadas en campo.



Fuente: Arellana (2004).

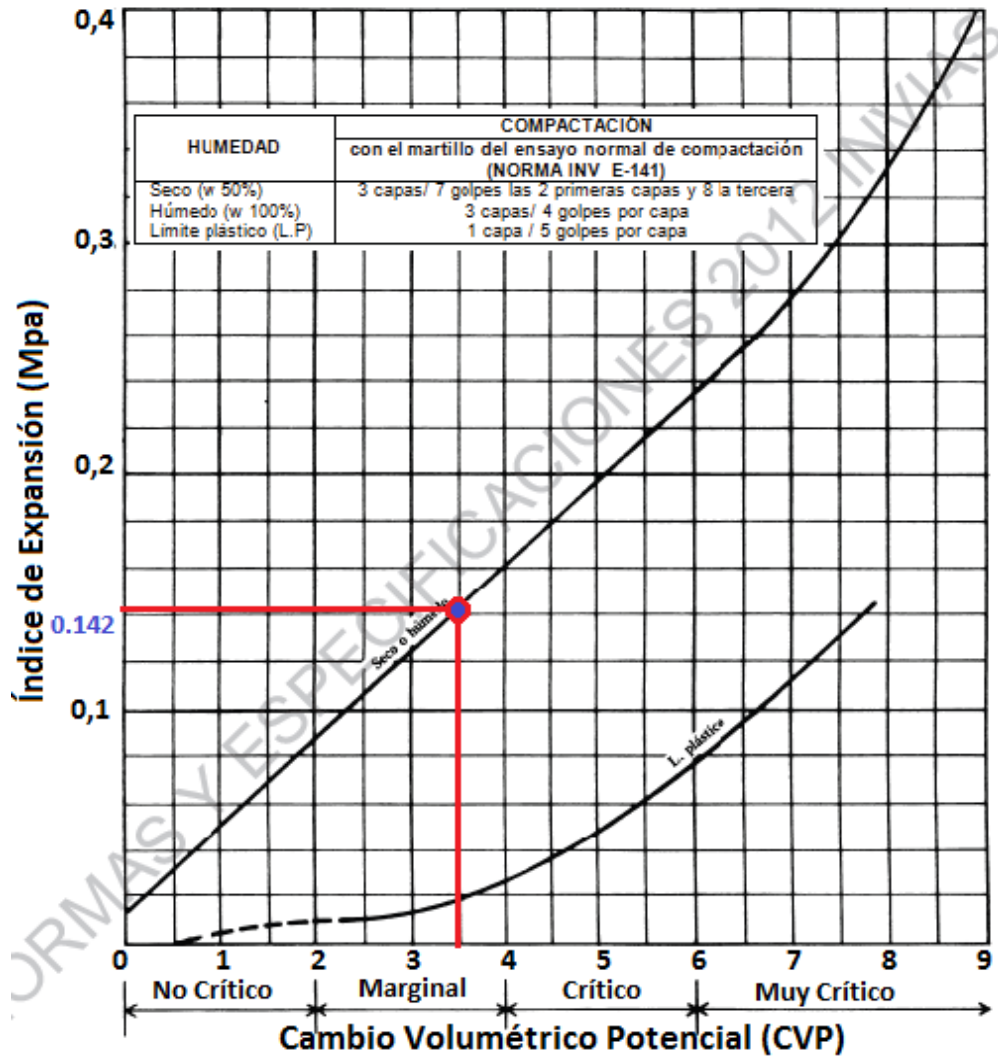
#### **4.5 DETERMINACIÓN DEL POTENCIAL DE CAMBIO VOLUMÉTRICO DE UN SUELO EMPLEANDO EL APARATO DE LAMBE**

Cabe recalcar que este ensayo es de identificación de suelos expansivos, como se realizó con muestras alteradas no se puede considerar la presión de expansión conseguida para conjeturar cuantitativamente la presión que requiere una cimentación que este apoyada en estos suelos.

Luego de la compactación adecuada de las muestras y del tiempo de curado respectivo, se ensayaron las muestras de suelo con sus respectivas concentraciones de aditivo, la gráfica 4 muestra el descenso que tuvo la presión de expansión debido a los aditivos.

La muestra natural presento una presión de expansión de 1.45 kg/cm<sup>2</sup> o bien, un índice de hinchamiento correspondiente 0.142 Mpa, según la curva para determinar el Potencial de Cambio Volumétrico (CVP) de expansión (según lambe) presentada en la figura 3, el suelo natural se clasifica con un CVP “MARGINAL”, es importante aclarar que el hecho de entrar con cualquier valor a la gráfica es porque el suelo presenta características expansivas. [14]

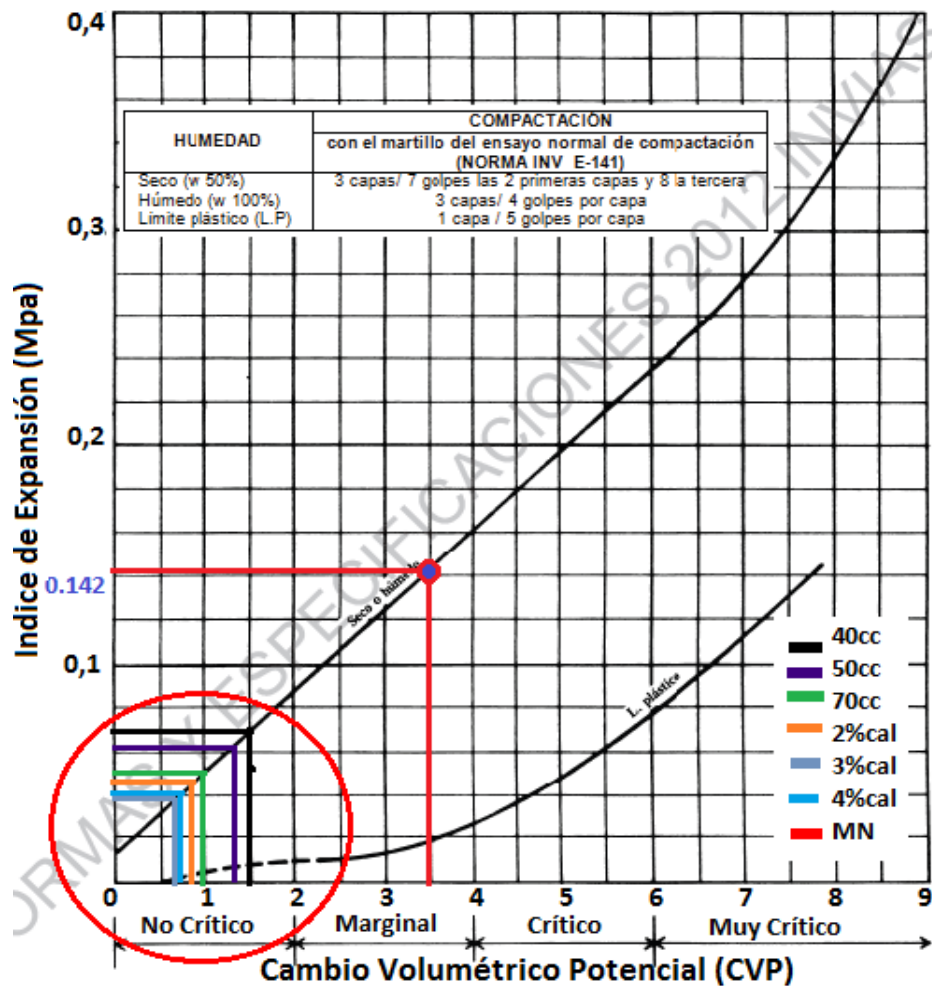
Figura 3. Curva para determinar el CVP de expansión (según lambe).



Fuente: INV E -120-13

Los índices de hinchamiento se redujeron con ambos aditivos y por lo tanto el CVP ya no es considerado "MARGINAL" si no que ahora corresponde a "NO CRÍTICO" como muestra la figura 4.

Figura 4. Disminución del índice de hinchamiento por la acción del aceite sulfonado y la cal.

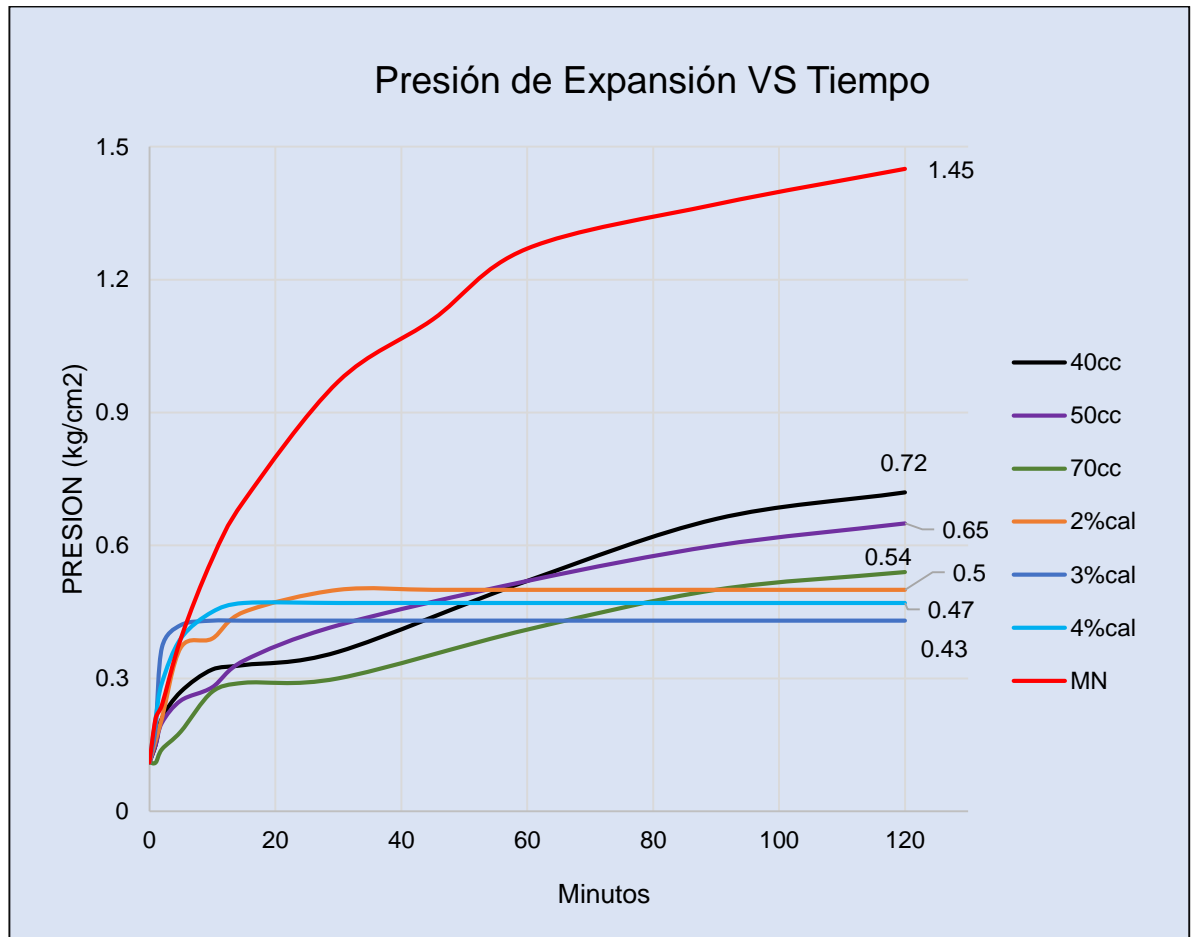


Fuente: INV E-120-13

En este ensayo se disminuyó a 0.046 Mpa (67.6%) el índice de hinchamiento conseguido con el 3% de cal, este fue el índice más bajo que se logró pero no difiere mucho con el índice de hinchamiento que se consiguió con el aceite sulfonado (70cc) ya que disminuyó a 0.053 Mpa (62.7%), como se puede observar en la gráfica 4 la cal en todas sus concentraciones tiene una tendencia a mantenerse constante en un tiempo más temprano a comparación con el aceite sulfonado.

Se considera que la cal en este ensayo es la de mejor eficiencia por lo mencionado anteriormente.

Gráfica 5. Presión de Expansión en Muestras de Suelo Tratadas con Aceite Sulfonado y Cal.



#### 4.6. HINCHAMIENTO LIBRE DE UN SUELO EN EDÓMETRO

Los resultados que se obtuvieron con los dos aditivos son favorables, ya que se logró decrecer el hinchamiento libre (HL).

La muestra natural presenta un 12.5% de HL y se pudo disminuir a un 5.1% logrado con el aceite sulfonado con una concentración correspondiente a 70cc, a un 9.6% con 40cc y 8.5% con 50cc.

La cal logró en promedio una disminución en el hinchamiento libre que llegó a 5.7% con el 3 y 4%.

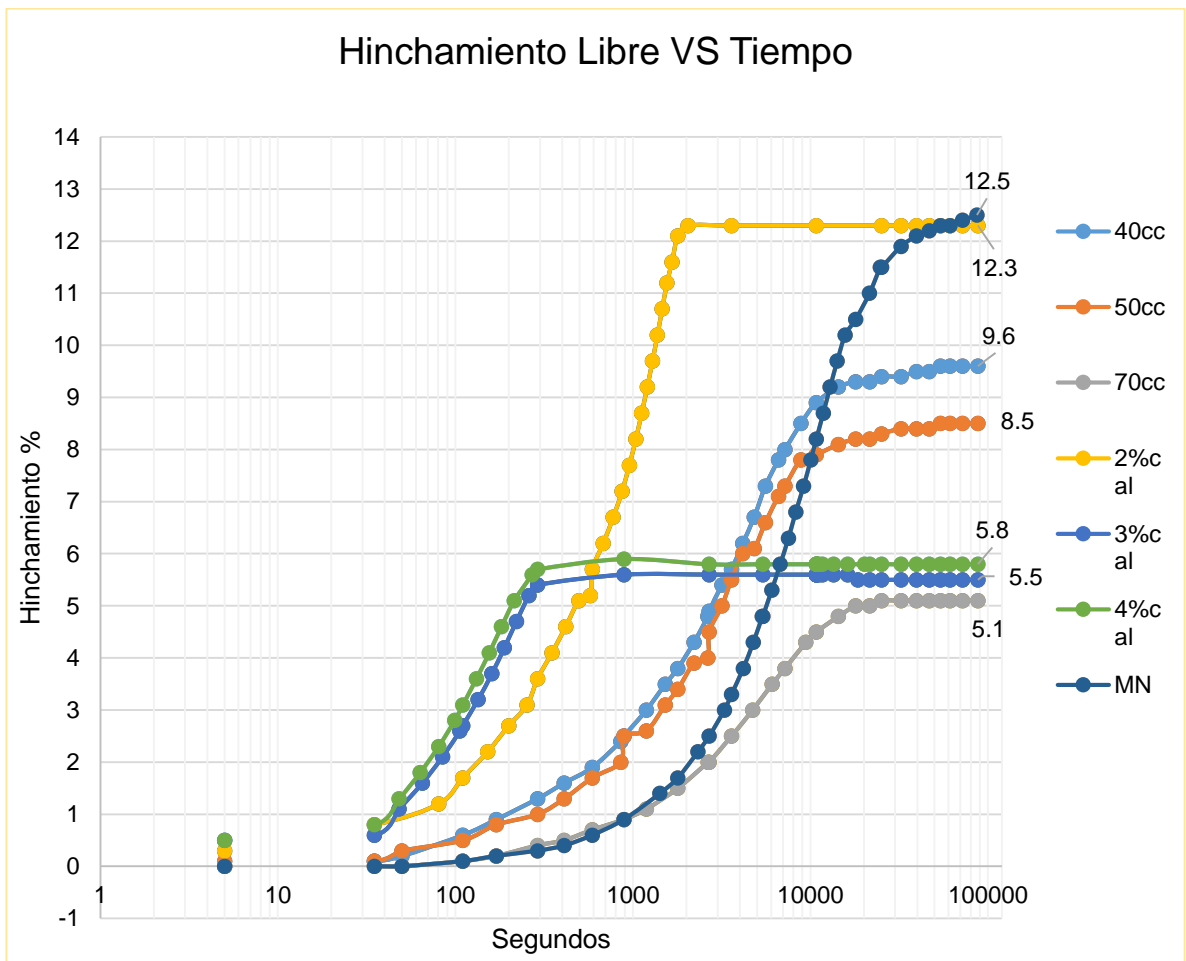
Con el 2% se presentó una variación muy diminuta, sólo disminuyó 0.2%, en la gráfica 5 se muestran los valores de hinchamiento libre y cómo se comporta la pastilla de suelo con las diferentes concentraciones de aditivos a medida que pasa el tiempo.

Se puede observar en la gráfica mencionada anteriormente la rápida acción que tuvo la cal en el suelo logrando una estabilización mucho más temprana que con el aceite sulfonado.

**Nota:**

*Los resultados obtenidos en esta investigación con el aceite sulfonado no describen el comportamiento real del material y sólo sirven para realizar análisis comparativos.*

Gráfica 6. Hinchamiento libre en Muestras de Suelo Tratadas con Aceite Sulfonado y Cal.



## 5. ANÁLISIS DE COSTOS

Para realizar el análisis de costos tomamos como ejemplo un tramo de vía de 100 m de longitud y 5 m de ancho al cual se le va a realizar la respectiva estabilización con aceite sulfonado y cal.

Se considera que el tramo a estabilizar es corto y que se utilizaron las mismas máquinas para el escarificado, esparcimiento de los aditivos y la respectiva compactación.

### 5.1 COSTOS CORRESPONDIENTES AL ACEITE SULFONADO GEO-STAB

Primero se determina el volumen del tramo a estabilizar, el tramo al cual se le va a hacer la estabilización como anteriormente habíamos nombrado, tiene las siguientes características:

$$\text{Ancho} = 5 \text{ [m]}$$

$$\text{Largo} = 100 \text{ [m]}$$

$$\text{Espesor} = 0.3 \text{ [m]}$$

$$\text{Volumen total} = 5 \times 100 \times 0.3 = 150 \text{ [m}^3\text{]}$$

Según el fabricante del Geo-Stab recomienda que 1 litro de Geo-Stab se disuelve en 200 litros de agua (10 litro de solución para tratar 1 m<sup>3</sup> de suelo).

$$\text{litros de solución} = \frac{10 * 150}{1} = 1.500$$

Ahora bien,

Dividimos los litros de solución en los litros que en los que se disuelve un litro de geo-Stab.

$$\# \text{ de litros de Geostab} = \frac{1.500}{200} = 8 \text{ litros}$$

El Geo-Stab es producido y comercializado por la empresa HYDRAM Ltda; con sede en Bogotá D.C en un valor de \$84.000, entonces para estabilizar 150 m<sup>3</sup> de suelo, se necesitan 8 litros de Geo Stab y 15 m<sup>3</sup> de agua.

$$\text{Costo de estabilización} = 8 * 84.000 = \$672.000$$

## **5.2 COSTOS CORRESPONDIENTES A LA CAL**

Como ya sabemos el volumen a estabilizar es de 150 m<sup>3</sup>.

Este volumen es multiplicado por el Peso Específico Seco obtenido del proctor modificado realizado a la muestra natural, determinado así el peso del mismo.

$$\text{Peso} = 150 \text{ m}^3 * 2.010 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 301.500 \text{ Kg}$$

Multiplicando el valor encontrado por el porcentaje de cal (4% con el cual se lograron en general mejores resultados).

$$\text{Peso} = 301.500 * 4\%$$

$$\text{Peso} = 12.060 \text{ Kg}$$

El número total de bolsas de cal que deberá contener el tramo, vendrá dado en dividir el peso encontrado anteriormente y el peso de la bolsa de cal.

$$\# \text{ de Bolsas de Cal} = \frac{12.060\text{Kg}}{50\text{Kg}} \cong 241$$

El valor de una bolsa de cal de 50 kg tiene un valor de \$21.700 (Valor proporcionado por Depósitos de Materiales el Nogal-San Gil).

Entonces:

$$\text{Costo de Estabilización} = 241 \times \$21.700$$

$$\text{Costo de Estabilización} = \$5'229.700$$

En los costos de estabilización del aceite sulfonado Geo-Stab como en los costos de estabilización con cal no se tuvieron en cuenta la maquinaria necesaria para la estabilización, ni el transporte de los aditivos tanto como el aceite sulfonado, el agua y las bolsas de cal.

## 6. CONCLUSIONES

- Según los resultados obtenidos en esta investigación se puede afirmar que el aditivo que obtuvo mayor desempeño, mejores resultados fue la CAL, entre las consideraciones generales que hacen de este aditivo el más apto para controlar el suelo expansivo se considera la granulometría y la plasticidad del suelo.

- La cal disminuye en gran proporción la plasticidad del suelo reduciendo de igual forma la cohesión y los cambios volumétricos (expansión), aumenta la capacidad portante y la trabajabilidad.
- El aceite sulfonado (Geo Stab) mejora las propiedades del suelo pero en menores proporciones respecto a la cal y no existe una metodología experimental que logre conseguir de mejor manera la reacción del aditivo.
- El curado del suelo en condiciones ambientales juega un papel importante en la estabilización con el aceite sulfonado ya que se logran resultados que no son posibles conseguirlos en laboratorio. **Nota:** Se recomienda que en estudios futuros relacionados con geostab se traten muestras curadas en campo para verificar los resultados obtenidos por arellana (2004).
- Uno de los resultados más significativo dentro de nuestra investigación fue el de expansión libre logrado con 70cc de Geo-Stab que redujo alrededor del 60% respecto a la muestra natural.
- Teniendo en cuenta los costos calculados se puede afirmar que el aditivo más económico para estabilizar un tramo de vía de 100 m de largo y 5m de ancho, con un escarificado de 30 cm es el aceite sulfonado ya que reduce los costos de forma considerable independiente de la efectividad del aditivo. Nota: El costo del aceite sulfonado geostab no incluye el envío, ya que este aumenta o disminuye dependiendo del lugar donde se requiera para ejecutar la estabilización.

## CITAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1]. López, T., Bosco, J., Horta, J., Coronado, Aleyda., & Castaño, V. M. (2010). Polímeros Para La Estabilización Volumétrica de Arcillas Expansivas. *Iberoamericana de Polímeros*, 11(3).159-160.
- [2]. Camacho, J.F., Reyes, O.J., Mayorga, C., & Méndez, D. (2006). Evaluación de aditivos usados en el tratamiento de arcillas expansivas. *Universidad Militar Nueva Granada*, 16(2). 47.
- [3]. Musso, M., Rostan A., & Behak, L.  
<http://www.eva.universidad.edu.uy/mod/resource/view.php?id=136061>
- [4]. San Pedro, A. (2010). Diseño y ejecución de las estabilizaciones con cal. VII Congreso nacional FIRMES, 1(1). 1-4.
- [5]. Publicación de la NACIONAL LIME ASSOCIATION. (2006). Manual de estabilización de suelo tratado con cal. *LIME*, 326(1). 11-13.
- [6]. <http://www.hydramltda.com/geostab.html> [citado el 15 de Octubre de 2015].
- [7]. “Determinación de los Tamaños de las Partículas de Suelo”. Instituto Nacional de Vías. Santa fe de Bogotá D.C. INV, 2012. INV E-123.
- [8]. “Determinación del Límite Líquido de los Suelos”. Instituto Nacional de Vías. Santa fe de Bogotá D.C. INV, 2012. INV E-125.

[9]. “Límite Plástico e Índice de Plasticidad de los Suelos”. Instituto Nacional de Vías. Santa fe de Bogotá D.C. INV, 2012. INV E-126.

[10.] “Determinación de los Factores de Contracción de los Suelos”. Instituto Nacional de Vías. Santa fe de Bogotá D.C. INV, 2012. INV E-127.

[11]. “CBR de Suelos Compactados en el Laboratorio y Sobre Muestras Inalteradas”. Instituto Nacional de Vías. Santa fe de Bogotá D.C. INV, 2012. INV E-148.

[12]. “Determinación del Potencial de Cambio Volumétrico de un Suelo Empleando el Aparato de Lambe”. Instituto Nacional de Vías. Santa fe de Bogotá D.C. INV, 2012. INV E-120.

[13]. “Ensayo del Hinchamiento Libre de un Suelo en Edómetro” Una Norma Española. Editada e Impresa por AENOR, Mayo 1996. UNE 103 601.

[14]. Solano, G.A, & Niño. O.F. (2010). Evaluación de la Estabilización de Arcillas Expansivas en Laboratorio Implementando Pilotines con Sal y Cal (tesis de pregrado). Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia.

[15]. “Programa de Manejo, Seguridad y Vencimiento del aditivo Geostab” Instituto Desarrollo Urbano, UDI. Alcaldía Mayor de Bogotá, Republica de Colombia (2007).

[16]. Huevo, H.M, & Orellana, C.A. (2009). Guía Básica Para Estabilización de Suelos con Cal en Caminos de Baja Intensidad Vehicular en el Salvador (tesis de pregrado). Universidad de el Salvador, San Salvador, Salvador.

## **BIBLIOGRAFÍA**

ALDANA CAMPOS, Katia L, & TARAZONA ROJAS, María F. Diseño de un modelo de laboratorio para analizar el comportamiento de las arcillas expansivas. Trabajo de grado Ingeniería Civil. Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, 2010.

ARANCIBIA GALLEGUILLOS, Carolina A. Arcillas expansivas: Comportamiento, identificación y su correlación mediante ensayos de fácil ejecución. Tesis de grado de Constructor Civil. Universidad Austral de Chile, Valdivia, 2003.

HUEZO MALDONADO, Heber M, & ORELLANA A. Guía básica para estabilización de suelos con cal en caminos de baja intensidad vehicular en el salvador. Trabajo de grado Ingeniería Civil. Universidad de el Salvador, San salvador, 2009.

SOLANO TICO, German A, & NIÑO CARREÑO, Oscar F. Evaluación de la estabilización de arcillas expansivas en laboratorio implementando pilotines con sal y cal. Trabajo de grado Ingeniería Civil. Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, 2010.