

**ESTUDIO DE LA DURABILIDAD EN LA ESTABILIZACIÓN DE SUELOS
ARCILLOSOS CON CAL**

**DAVID LEONARDO GUEVARA RODRÍGUEZ
CARLOS MAURICIO RIVERA TORRES**

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

2014

**ESTUDIO DE LA DURABILIDAD EN LA ESTABILIZACIÓN DE SUELOS
ARCILLOSOS CON CAL**

**DAVID LEONARDO GUEVARA RODRÍGUEZ
CARLOS MAURICIO RIVERA TORRES**

Trabajo de grado para optar el título de
INGENIERO CIVIL

Director
Eduardo Alberto Castañeda Pinzón
Ingeniero Civil

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

2014

DEDICATORIA

Doy gracias primordialmente a Dios por darnos la inteligencia, sabiduría, paciencia, entendimiento y la capacidad para desarrollar este proyecto.

A mis Padres y hermanas por todo su apoyo, comprensión y confianza, a mi compañera

David Leonardo Guevara Rodríguez por su compromiso y empeño puesto para sacar adelante este proyecto.

Y en especial al ingeniero Eduardo Alberto Castañeda Pinzón por su constante ayuda y guía a lo largo de la ejecución de este proyecto.

Carlos Mauricio Rivera Torres

DEDICATORIA

Principalmente a mis padres, las personas más importantes de mi vida, que siempre han estado presentes brindándome todo su cariño, amor sincero y su apoyo incondicional.

A mi padre Primitivo Guevara Estupiñan, este trabajo es el resultado de tanto sacrificio y compromiso con tu familia, muchas gracias por enseñarme el valor todo lo que tenemos y enseñarme a ser una persona humilde, comprometida y responsable pero sobre todo a ser un reflejo tuyo, un amigo de mis amigos.

A mi mamita Nubia Esperanza Rodríguez Gómez por ser la persona más incondicional del mundo, por todas las palabras y consejos sabios ante cualquier situación, por enseñarme a ser una persona preparada para encarar la vida.

A mis hermanas por todo su cariño y afecto.

A mis amigos y compañeros por todos los momentos maravillosos vividos, nuestro trabajo en equipo fue fundamental para lograr cumplir este objetivo.

A mi director, Ingeniero Eduardo Alberto Castañeda Pinzón, por todo el apoyo brindado durante este trabajo.

David Leonardo Guevara Rodríguez

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	15
1. OBJETIVOS	16
1.1 OBJETIVO GENERAL	16
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	16
2. LA DURABILIDAD DE MATERIALES	17
3. METODOLOGÍA	18
3.1 SELECCIÓN DE SUELOS A ENSAYAR	18
3.2 FABRICACIÓN DE PROBETAS	18
3.3 SIMULACIÓN DE CONDICIONES DE ENTORNO	19
3.3.1 Simulación de humedecimiento y secado	19
3.3.2 Simulación de flujo de agua subterránea	19
3.3.3 Simulación de medio ambiente con baja temperatura (5°C)	20
3.3.4 Acondicionamiento a Temperatura ambiente	20
3.4 CARACTERIZACIÓN MECÁNICA	20
3.5 EVALUACIÓN DE LA DURABILIDAD	22
4. RESULTADOS	23
4.1 RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN INCONFINADA.	23
4.2 RIGIDEZ DEL MATERIAL	26
5. ANÁLISIS DE RESULTADOS	29
6. CONCLUSIONES	30

7. RECOMENDACIONES

31

BIBLIOGRAFIA

32

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Confinamiento de las probetas con arena fina húmeda.	19
Figura 2. Diagrama de acondicionamiento de flujo de agua subterránea.	20
Figura 3. Ensayo de compresión inconfiada.	21
Figura 4. Resistencia en compresión inconfiada de muestras de arcilla.	23
Figura 5. Evolución de resistencia a la compresión inconfiada, arcilla 1.	24
Figura 6. Evolución de resistencia inconfiada, arcilla 2.	25
Figura 7. Evolución del módulo de rigidez arcilla 1.	27
Figura 8. Evolución del módulo de rigidez arcilla 2.	27

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Resistencia a la compresión inconfiada.	24
Tabla 2. Módulos de rigidez.	26

RESUMEN

Título: ESTUDIO DE LA DURABILIDAD EN LA ESTABILIZACIÓN DE SUELOS ARCILLOSOS CON CAL

Autores: DAVID LEONARDO GUEVARA RODRÍGUEZ
CARLOS MAURICIO RIVERA TORRES

Palabras Clave: Durabilidad, Estabilización, rigidez, resistencia.

Descripción:

La estabilización de suelos arcillosos con cal, es una técnica muy utilizada para el mejoramiento de las capas de fundación de las estructuras de rodamiento en carreteras. En la caracterización mecánica de las mezclas suelo-cal, se estudian sus propiedades en cortos periodos de tiempo, pero poco se hace en el estudio de la durabilidad de las mismas.

Este trabajo presenta un estudio exploratorio que permita identificar los cambios que se suceden en el material con transformación en las condiciones del entorno. Se presenta la alteración que experimenta una arcilla tratada con cal en sus propiedades expansión, rigidez y resistencia a la compresión simple cuando se somete a diferentes acondicionamientos de simulación del medio ambiente.

El efecto principal de la cal consiste en reducir por hidratación el agua libre en el suelo, también reduce la plasticidad y lo más probable es que el suelo aumente su resistencia con el tiempo.

El éxito de la estabilización es el tipo de mineral arcilloso del suelo que va a reaccionar con los iones de calcio, para disminuir el límite líquido o aumentar la resistencia del suelo, esta reacción química tiene dos aspectos:

El primero que aglomera las partículas finas de arcilla en partículas gruesas desmenuzables.

El segundo produce una acción de endurecimiento en la cual la cal reacciona con la sílice disponible y alguna alúmina en el suelo raso formando silicatos de calcio y aluminatos.

*Proyecto de Grado

** Facultad de ingenierías Físico-Mecánicas, Escuela de Ingeniería Civil

Director: Ingeniero Eduardo Alberto Castañeda Pinzón

ABSTRACT

Title: STUDY OF DURABILITY IN THE STABILIZATION OF CLAYEY SOILS WITH LIME

Authors: DAVID LEONARDO GUEVARA RODRÍGUEZ
CARLOS MAURICIO RIVERA TORRES

Key Words: Durability, Stabilization, rigidity, resistance.

Description:

The stabilization of clay soils with lime is a widely used technique for the improvement of the layers of foundation of the bearing structures in roads. In the mechanical characterization of soil mixtures-Cal, is studying their properties in short periods of time, but little is being done in the study of the durability of the same.

This work presents an exploratory study to identify the changes that occur in the material with transformation in the conditions of the environment. Presents the alteration that is experiencing a clay treated with lime in their expansion properties, rigidity and resistance to compression simple when it is subjected to different designs of simulation of the environment.

The main effect of the lime is to reduce by hydration water on the floor, also reduces plasticity and it is likely that the soil increases their resistance over time.

The success of the stabilization is the type of clay mineral of soil that will react with calcium ions, to reduce the liquid limit or increase the resistance of the soil, this chemical reaction has two aspects:

The first that concentrated fine particles of clay in the crumbly coarse particles.

The second produces an action of hardening in which the lime reacts with the silica available and any alumina in floor-length satin to form calcium silicates and calcium aluminates.

* Graduation project

** Faculty of engineering physical - mechanical, Civil Engineering School

Director: Ingeniero Eduardo Alberto Castañeda Pinzón

INTRODUCCIÓN

El uso de cal en la estabilización de suelos ha sido históricamente muy amplio y han quedado demostradas las múltiples ventajas de estas estabilizaciones, principalmente relacionadas con el incremento de sus propiedades mecánicas y la reducida susceptibilidad a condiciones ambientales adversas. Este trabajo evalúa la durabilidad de dos muestras de arcilla, estabilizadas con diferentes porcentajes de cal.

1. OBJETIVOS

1.1 OBJETIVO GENERAL

Analizar la evolución del comportamiento mecánico y/o de las propiedades mecánicas de un suelo estabilizado con cal.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1.2.1 Someter la muestra de suelo arcilloso a acondicionamientos que simulen los efectos del medio ambiente y estudiar los resultados.

1.2.2 Determinar los factores que influyen en el cambio de las propiedades mecánicas del suelo.

1.2.3 Evaluar y comparar los resultados obtenidos con los diferentes ensayos de laboratorio.

2. LA DURABILIDAD DE MATERIALES

La formulación de procesos de estabilización de suelos con cal se hace determinando la resistencia de la mezcla, después de un proceso de curado. No se encontró, en la literatura recopilada, estudios de durabilidad de la estabilización y en la normatividad existente no se establecen procedimientos que permitan verificar la permanencia de las propiedades de los suelos mezclados con cal.

La durabilidad de un material es la capacidad de mantener su integridad estructural bajo las condiciones a las cuales es expuesto, factores como la variación de temperatura y humedad pueden afectar las propiedades de suelos estabilizados.

Entre las formas de evaluación de la durabilidad esta la pérdida de masa o la variación de absorción y expansión al final de determinado tiempo o número de ciclos de un proceso periódico como el humedecimiento y secado [**Ref. 8.1**]. Existen algunos suelos que sometidos a congelamiento y descongelamiento repetitivos, pierden gran parte de su resistencia. Arcillas y limos, por lo general, sufren este tipo de daño [**Ref. 8.8**].

Los estudios de durabilidad, son importantes en la caracterización de materiales como el concreto. El American Concrete Institute sugiere dos tipos de ensayos de durabilidad para suelo/cemento. Mediante la aplicación de normas como la ASTM D559 (1996) o NBR 13554 (1996)), se evalúa la pérdida de masa por ciclos de mojado y secado, y mediante la aplicación de normas como ASTM D560 (1996) se evalúa la pérdida de masa por ciclos de congelamiento y descongelamiento.

3. METODOLOGÍA

Con el propósito de simular algunas condiciones a las que se expone un suelo en su estado natural y estudiar la durabilidad de la estabilización con cal, se diseñó un conjunto de experimentos en laboratorio.

Se elaboraron probetas con suelos arcillosos a los cuales se les realizó pruebas de caracterización mecánica y se sometieron a diferentes simulaciones de factores naturales adversos.

El procedimiento fue el siguiente:

3.1 SELECCIÓN DE SUELOS A ENSAYAR

Se seleccionaron dos tipos de arcillas con diferente plasticidad.

Arcilla Índice de plasticidad de 21%, color amarillo.

Arcilla 2: Índice de plasticidad de 34%, color rojizo.

3.2 FABRICACIÓN DE PROBETAS

Se fabricaron probetas estabilizadas con diferentes contenidos de cal, se seleccionó 2% y 3% como porcentajes de cal para la estabilización de los materiales.

Luego de su elaboración, las probetas, se sometieron a un proceso de curado, así: 3 días a temperatura ambiente y 4 días sumergidas en agua.

Para su conservación, las probetas se confinaron en arena fina húmeda y se sometieron a acondicionamientos, como se expone seguidamente.

Figura 1. Confinamiento de las probetas con arena fina húmeda.

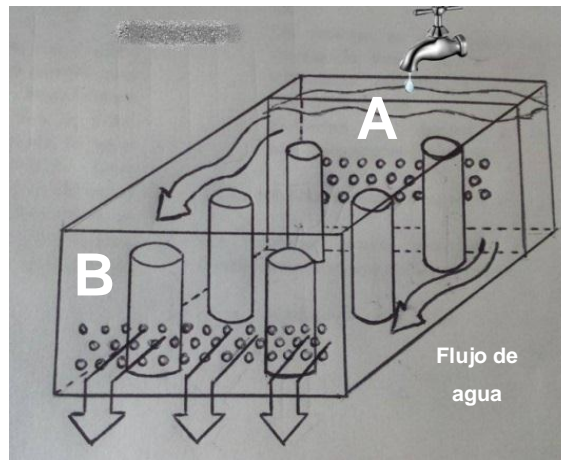


3.3 SIMULACIÓN DE CONDICIONES DE ENTORNO

3.3.1 Simulación de humedecimiento y secado. Este acondicionamiento se realizó a algunas probetas mantenidas a temperatura ambiente durante 9 semanas, alternando periodos de humedecimiento y secado. El humedecimiento se hizo recubriendo las probetas con arena fina húmeda y para el secado se expusieron las probetas a un ambiente aireado.

3.3.2 Simulación de flujo de agua subterránea. Las probetas se ubicaron en un recipiente con flujo de agua a través de una capa de arena. El periodo durante el que se mantuvo el flujo de agua fue de 9 semanas y la temperatura fue de aproximadamente 24°C.

Figura 2. Diagrama de acondicionamiento de flujo de agua subterránea.



Este acondicionamiento permite evaluar si la arcilla estabilizada pudiera ser afectada por lavado de los cementantes.

3.3.3 Simulación de medio ambiente con baja temperatura (5°C). Se ubicaron las probetas en un recipiente y se confinaron con arena fina húmeda conservando su humedad, luego permanecieron 9 semanas en un ambiente de 5°C.

3.3.4 Acondicionamiento a Temperatura ambiente. Se ubicaron las probetas en un recipiente confinándolas con arena fina húmeda, durante 9 semanas, en un ambiente con temperatura de aproximadamente 24°C.

3.4 CARACTERIZACIÓN MECÁNICA

Con el propósito de establecer la evolución de las propiedades mecánicas, se practicaron sobre las probetas, ensayos de resistencia y de relación carga/deformación.

- **Resistencia:** Se determinó con el ensayo de resistencia a la compresión inconfiada [Norma INV E-152-07]

Figura 3. Ensayo de compresión inconfiada.



- **Rigidez:** Se determinó según la expresión (1).

Según la expresión (1) se obtuvieron los valores del módulo de rigidez E.

$$E = \frac{\sigma}{\frac{\Delta}{L}} \quad (1)$$

Donde:

σ = Esfuerzo último soportado.

Δ = variación de longitud de la probeta.

L = Longitud inicial de la probeta.

Se realizaron pruebas de resistencia a la compresión simple a probetas de referencia, las cuales se conservaron a temperatura ambiente y se estabilizaron con 2% y 3% de adición de cal.

Las pruebas incluyeron tres estados de acondicionamiento:

- 14 días después del curado
- 5 semanas después del curado
- 9 semanas después del curado

Probetas acondicionadas mediante otros procesos, se ensayaron después de 9 semanas.

3.5 EVALUACIÓN DE LA DURABILIDAD

Luego de realizadas las pruebas de laboratorio, se analizaron y compararon resultados, con el fin de evaluar la durabilidad de la estabilización.

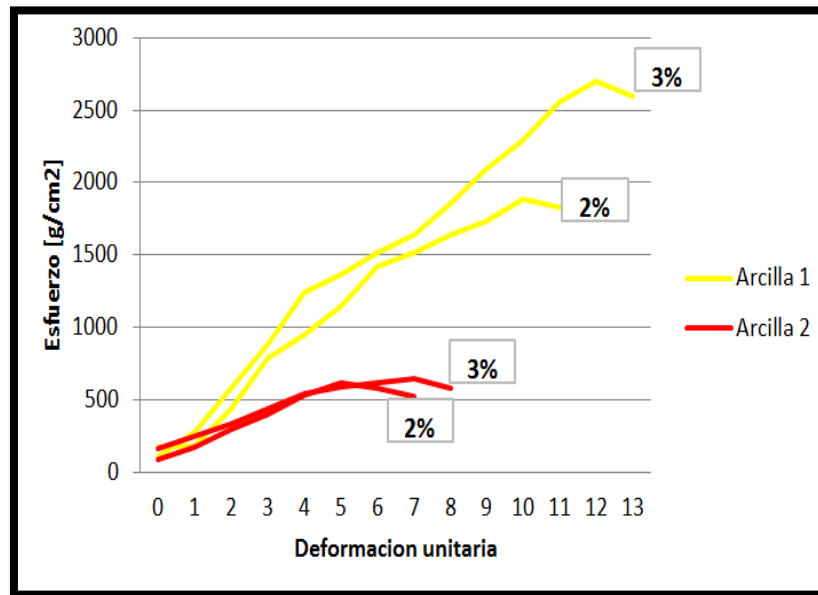
4. RESULTADOS

A continuación se muestran los resultados de los ensayos de caracterización.

4.1 RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN INCONFINADA.

La Figura 4 ilustra los resultados de resistencia de los suelos estabilizados, después de permanecer 5 semanas en capa de arena húmeda y a temperatura ambiente (24°C).

Figura 4. Resistencia en compresión inconfiada de muestras de arcilla.



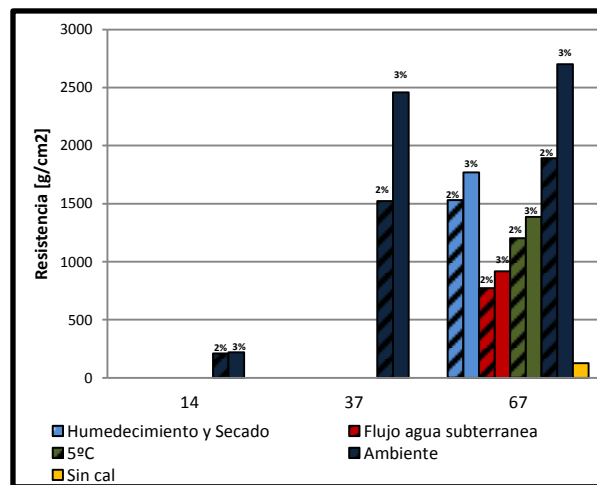
La Tabla 1 muestra los resultados a la compresión inconfiada de las probetas.

Tabla 1. Resistencia a la compresión inconfiada.

Acondicionamiento	Tiempo en dias	Resistencia a la compresión inconfiada [g/cm ²]			
		Arcilla 1		Arcilla 2	
		2%	3%	2%	3%
Ambiente	14	209	219	187	194
Ambiente	37	1521	2459	600	646
Ambiente	67	1890	2701	615	657
Humedecimiento y Secado	67	1530	1769	995	1266
Flujo agua subterranea	67	771	918	458	697
5°C	67	1201	1385	585	884
Sin cal	67	125	125	103	103

En la Figura 5 se muestran los resultados de compresión inconfiada de la arcilla

Figura 5. Evolución de resistencia a la compresión inconfiada, arcilla 1.



Los resultados en la arcilla 1, muestran que la resistencia del material fue afectada por los diferentes acondicionamientos. La simulación de flujo de agua subterránea

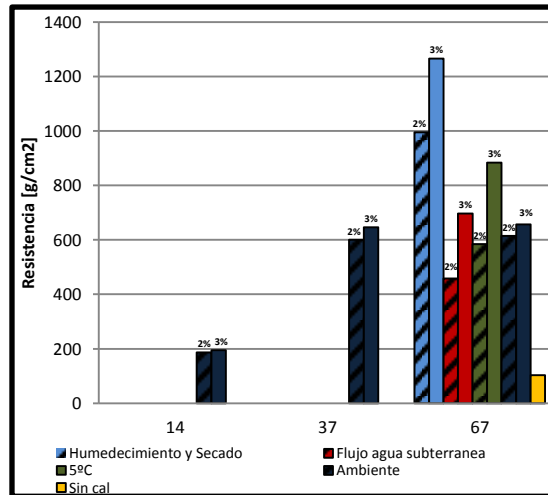
tuvo un mayor efecto que el ambiente de temperatura baja y el proceso que menor efecto produjo fue la simulación de humedecimiento y secado.

Mientras la cal a temperaturas del orden de 24°C mejora la resistencia de 9 a 12 veces la inicial, en temperaturas de conservación de 5°C el incremento de resistencia se redujo a 6 veces la resistencia inicial.

En temperaturas de 24°C, pero con flujo de agua, la resistencia solamente alcanzo valores entre 3 y 4 veces de la resistencia inicial.

En la Figura 6 se muestran los resultados de la resistencia a compresión inconfiada de la arcilla 2.

Figura 6. Evolución de resistencia inconfiada, arcilla 2.



En la arcilla 2, los acondicionamientos no muestran un efecto significativo sobre el material, a excepción del secado. Este acondicionamiento tuvo un efecto de incremento en la resistencia del material entre 5 y 6.5 veces la inicial.

4.2 RIGIDEZ DEL MATERIAL

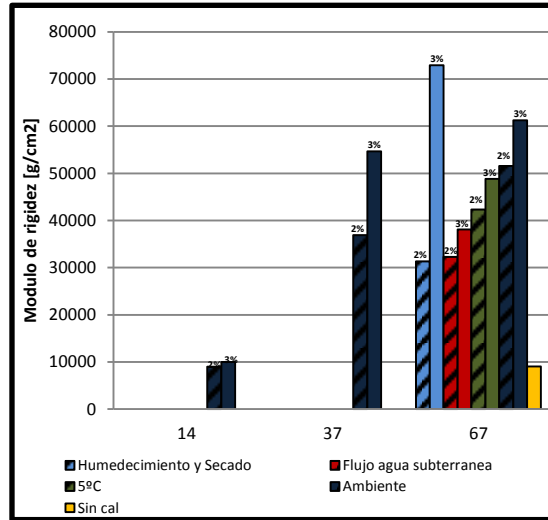
La Tabla 2 y muestra los resultados de rigidez en las probetas después de 9 semanas (67 días).

Tabla 2. Módulos de rigidez.

Acondicionamiento	Tiempo en días	Modulo de rigidez E [g/cm ²]			
		Arcilla 1		Arcilla 2	
		2%	3%	2%	3%
Ambiente	14	8953	9992	8951	9468
Ambiente	37	36868	54653	19187	27088
Ambiente	67	51534	61260	23885	29551
Humedecimiento y Secado	67	31313	72927	39581	52484
Flujo agua subterranea	67	32277	38066	22087	28471
5°C	67	42304	48823	23574	35855
Sin cal	67	9028	9028	5841	5841

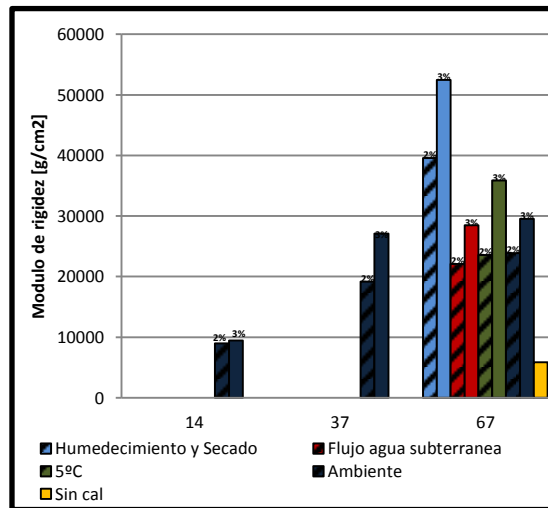
La Figura 7 y la Figura 8, muestran la evolución del modulo de rigidez de las probetas.

Figura 7. Evolución del módulo de rigidez arcilla 1.



La arcilla 1 muestra una pequeña pérdida de rigidez al ser sometida a un flujo de agua subterránea. A temperatura promedio de 24°C la arcilla tiene un efecto de mejoramiento en la rigidez entre 5 y 6 veces la inicial. No se presenta un cambio notorio de la rigidez al someter las probetas a bajas temperaturas.

Figura 8. Evolución del módulo de rigidez arcilla 2.



Exceptuando el proceso de humedecimiento y secado, el cual tiene un efecto superior de mejoramiento de la rigidez, en los demás acondicionamientos se presenta un leve incremento de la propiedad, este incremento no es suficientemente considerable para concluir un mejoramiento de propiedades debido a la estabilización con cal.

5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Después de 9 semanas, las muestras de suelo muestran incremento de la rigidez y de la resistencia con la adición de cal.

En la arcilla 1 la temperatura tiene efecto en el mejoramiento de las propiedades. Cuando las probetas se acondicionaron a temperaturas más elevadas se logró un incremento superior de la resistencia y de la rigidez del material. La simulación de corrientes de aguas subterráneas mostro un efecto negativo en el incremento de las propiedades mecánicas, quizás consecuencia de un lavado de los cementantes, lo que debilita el suelo.

Sobre las dos muestras de arcilla no se consiguieron efectos similares bajo los diversos acondicionamientos a los que se sometieron las probetas. Mientras en la arcilla 1 se observó efectos negativos de la temperatura y del flujo de agua, en la arcilla 2 no se percibieron efectos significativos.

6. CONCLUSIONES

Los resultados del estudio muestran que fenómenos como el flujo de agua subterránea y bajas temperaturas pueden afectar negativamente la estabilización de suelos con cal.

Procesos de humedecimiento y secado no muestran efectos negativos en las propiedades mecánicas de un suelo estabilizado con cal.

La diferencia de comportamiento, de las 2 arcillas ensayadas, indica que la formulación de procesos de estabilización con cal debería complementarse con estudios de durabilidad.

7. RECOMENDACIONES

Para avanzar en el estudio de la durabilidad de una estabilización, se recomienda un estudio que incluya la evaluación en una mayor cantidad de tiempo, que permita la estabilización de las propiedades del material.

Para conocer la cantidad de cementantes lavados, se recomienda realizar un estudio en el que se capture el agua que sale del sistema de acondicionamiento y hacer el respectivo estudio de determinación de carbonatos de calcio presentes.

BIBLIOGRAFIA

ACOSTA VALLE Cecilio, materiales de construcción, vol. 51, # 262, abril/mayo/junio 2001, DURABILIDAD DE LADRILLOS PRENSADOS DE SUELO-CEMENTO.

BAUZA CASTELLÒ Juan Diego, MEZCLAS CON CEMENTO EN LAS INFRAESTRUCTURAS DE TRANSPORTE MADRID, ESTABILIZACIÓN DE SUELOS CON CAL. Fecha de publicación: [Enero de 2.003]

CAVANZO GUIZA José, ESTABILIZACIÓN DE SUELOS CON CAL, Proyecto de grado, Fecha de publicación: [1971]

DURABILIDAD DEL SUELO, DOCUMENTO;

<http://www.arqhys.com/arquitectura/durabilidad-suelo.html>; [citado el 25 de Julio de 2014].

GÓMEZ RINCÓN Ricardo, JEREZ LEÓN Carlos Eduardo, ESTABILIZACIÓN DE SUELOS MEDIANTE LA UTILIZACIÓN DE CENIZAS VOLANTES Y CAL, Proyecto de grado, Fecha de publicación: [26 de Marzo de 1990]

JIMÉNEZ ROJAS José W, CONSOLI Nilo C, SALVAGNI HEINECK Karla, Revista Ingeniería de Construcción Vol. 23 N°3, PAG. 163- 170, DURABILIDAD DE UN SUELO CONTAMINADO Y TRATADO CON CEMENTO PORTLAND, Fecha de publicación: [Diciembre de 2008]

Publicación original de la Nacional Lime Association, MANUAL DE ESTABILIZACIÓN DE SUELO TRATADO CON CAL, Fecha de publicación: [Enero de 2004]

SAMPEDRO RODRÍGUEZ Ángel, TRATAMIENTOS DE SUELOS CON CAL.
PLANTEAMIENTO GENERAL, DISEÑO Y CONTROL DE CALIDAD, Fecha de
publicación: [Abril de 2005]

UNIDAD TEMÁTICA N°12 “DURABILIDAD DE LOS MATERIALES”, Universidad
Tecnológica Nacional, Cátedra tecnológica de los materiales.