

ESTABILIZACIÓN DE SUELOS CON CLORURO DE SODIO

**ORLANDO ESTEBAN PORRAS PEREA
ANDRÉS MAURICIO GARCÍA MANTILLA**

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

2014

ESTABILIZACIÓN DE SUELOS CON CLORURO DE SODIO

**ORLANDO ESTEBAN PORRAS PEREA
ANDRÉS MAURICIO GARCÍA MANTILLA**

Trabajo de Grado para optar al título de
Ingeniero Civil

Director:

EDUARDO ALBERTO CASTAÑEDA PINZÓN

Ingeniero Civil, M.Sc., PhD.

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

2014

CONTENIDO

| | |
|---|----|
| INTRODUCCIÓN | 14 |
| 1. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA..... | 15 |
| 1.1. SUELO ARCILLOSO | 15 |
| 1.2. SAL (CLORURO DE SODIO)..... | 18 |
| 2. METODOLOGÍA..... | 21 |
| 3. RESULTADOS | 24 |
| 3.1. CARACTERIZACIÓN DE SUELOS | 24 |
| 3.1.1. Granulometría..... | 24 |
| 3.1.2. Límite líquido y límite plástico..... | 25 |
| 3.2. ENSAYO DE PROCTOR MODIFICADO..... | 26 |
| 3.3. VARIACIÓN DE LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN INCONFINADA | 28 |
| 3.3.1. Suelo De Mayor Plasticidad (Arcilla Roja)..... | 28 |
| 3.3.2. Suelo De Menor Plasticidad (Arcilla Amarilla)..... | 30 |
| 3.4. PROPUESTA DE PROCEDIMIENTO DE LABORATORIO PARA ESTABILIZACIÓN DE SUELOS CON CLORURO DE SODIO | 33 |
| 3.4.1. CARACTERIZACIÓN DE SUELOS | 33 |
| 3.4.1.1. Granulometría..... | 33 |
| 3.4.1.2. Límites de Atterberg..... | 33 |
| 3.4.2. ENSAYO MODIFICADO DE COMPACTACIÓN..... | 33 |
| 3.4.3. ENSAYO DE COMPRESIÓN INCOFINADA..... | 34 |
| 4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES..... | 35 |
| BIBLIOGRAFÍA | 37 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1. Estructura de la lámina Silícica..... | 15 |
| Figura 2. Estructura de la lámina Aluminica..... | 16 |
| Figura 3. Curva Granulométrica..... | 24 |
| Figura 4. Variación de la Densidad Máxima Seca. Suelo2: suelo de mayor plasticidad. Suelo4: suelo de menor plasticidad. | 27 |
| Figura 5. Variación de la Humedad Óptima. Suelo2: suelo de mayor plasticidad. Suelo4: suelo de menor plasticidad. | 27 |
| Figura 6. Variación de la Resistencia..... | 29 |
| Figura 7. Variación de la Resistencia..... | 31 |
| Figura 8. Variación de la Resistencia en el Tiempo. Suelo2: suelo de mayor plasticidad. Suelo4: suelo de menor plasticidad. | 32 |

LISTA DE TABLAS

| | |
|---|----|
| Tabla. 1. Capacidad de cambio de algunas arcillas típicas. | 18 |
| Tabla. 2. Cantidad total de probetas ensayadas. | 22 |
| Tabla. 3. Porcentaje de gravas, arenas y finos..... | 25 |
| Tabla. 4. Límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad. | 25 |
| Tabla. 5. Cuadro de resultados para el suelo de mayor plasticidad. | 26 |
| Tabla. 6. Cuadro de resultados para el suelo de menor plasticidad. | 26 |
| Tabla. 7. Tabla de Resistencia del suelo de mayor plasticidad a diferentes días y a diferentes cantidades de cloruro de sodio..... | 29 |
| Tabla. 8. Tabla de Resistencia del suelo de menor plasticidad a diferentes días y a diferentes cantidades de cloruro de sodio..... | 30 |

RESUMEN

TÍTULO:

ESTABILIZACIÓN DE SUELOS CON CLORURO DE SODIO*

AUTORES:

Orlando Esteban Porras Perea
Andrés Mauricio García Mantilla**

PALABRAS CLAVE: Estabilización, arcilla, cloruro de sodio, suelo, granulometría, límite líquido, límite plástico, proctor modificado, compresión inconfiada, humedad, densidad máxima seca, suelos finos.

DESCRIPCIÓN:

En este documento se presenta el desarrollo de un estudio en el cual se investiga el efecto que tiene el cloruro de sodio en la variación de la resistencia a la compresión de suelos arcillosos. Se realizaron diferentes prácticas de laboratorio para caracterizar los materiales y para determinar la capacidad mecánica de los mismos. El estudio se realizó variando el contenido de cloruro de sodio en porcentajes de 0%, 1.5%, 3%, 5% y 7%. El tiempo de fraguado varió de 7 a 21 días para la mezcla de suelo sal. Los suelos presentaron aumento en la densidad máxima seca y una disminución en la humedad óptima a medida que se incrementaba la cantidad de sal. La resistencia a la compresión presentó un incremento con bajos contenidos de cloruro de sodio (1% - 2.5%). El incremento fue mayor en suelos de mayor plasticidad.

* Trabajo de grado

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Director: EDUARDO ALBERTO CASTAÑEDA PINZÓN.

ABSTRACT

TITLE:

SOIL STABILIZATION WITH SODIUM CHLORIDE*

AUTHORS:

Orlando Esteban Porras Perea
Andrés Mauricio García Mantilla**

KEYWORDS: Stabilization, clay, sodium chloride, soil, grain size, liquid limit, plastic limit, modified proctor, unconfined compression, moisture, maximum dry density, fine soil.

DESCRIPTION:

This paper presents the development of a study in which the effect of sodium chloride on the variation of the compressive strength of clay soils is investigated. Different labs were conducted to characterize the material and to determine the mechanical properties of them. The study was performed varying the content of sodium chloride, in percentages of 0%, 1.5%, 3%, 5% and 7. The setting time for the mixture ranged from 7 to 21 days. The soils showed an increase in maximum dry density and a decrease in optimum humidity as the amount of salt was increased. The compressive strength presents increases with low sodium chloride content (1% - 2.5%). The highest increase was in the soil of major plasticity.

* Work Degree

** Faculty of Engineering Physics and Mechanics. School of Civil Engineering. Director: EDUARDO ALBERTO CASTAÑEDA PINZÓN.

INTRODUCCIÓN

La estabilización de los suelos en la ingeniería práctica, particularmente en las vías terrestres, ha sido una técnica ampliamente utilizada para mejorar el comportamiento esfuerzo deformación de los suelos. El mejoramiento de los suelos ha atendido a diversos requerimientos, tales como la resistencia al esfuerzo cortante, la deformabilidad o compresibilidad, la estabilidad volumétrica ante la presencia de agua, entre otros buscando, en todos los casos, un buen comportamiento esfuerzo deformación de los suelos y de la estructura que se coloque sobre ellos, a lo largo de su vida útil [1].

La Sal es un estabilizante natural, compuesto aproximadamente de 98% de NaCl y un 2% de arcillas y limos, cuya propiedad fundamental al ser higroscópico, es absorber la humedad del aire y de los materiales que lo rodean, aumentando el punto de evaporación y mejorando la cohesión del suelo. Tiene un alto poder coagulante lo que conlleva a un menor esfuerzo mecánico para lograr la densificación deseada, debido al intercambio iónico entre el Sodio y los minerales del suelo, produciéndose una acción cementante [2], aumentando la tensión superficial del material.

En el presente trabajo se analiza el comportamiento de diferentes arcillas al mezclarse con Cloruro de Sodio. A estas arcillas se les analiza la variación de algunas propiedades físicas y mecánicas al adicionarle sal en diferentes porcentajes.

Se analizaron dos formas de aplicar la sal al material, la primera es por medio de grano y la segunda por medio de salmuera o sal disuelta en agua. Para los dos métodos la cantidad de sal se calculó en porcentaje de peso seco del material a estabilizar.

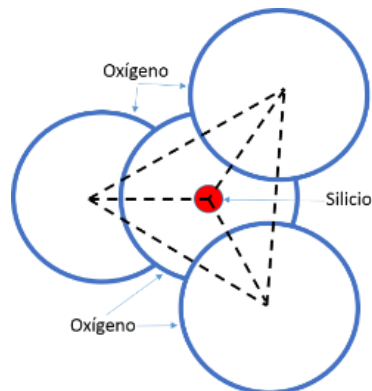
1. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

1.1. SUELO ARCILLOSO

Las arcillas están constituidas básicamente por silicatos de aluminio hidratados, presentando además, en algunas ocasiones, silicatos de magnesio, hierro u otros metales, también hidratados. Estos minerales tienen casi siempre, una estructura cristalina definida, cuyos átomos se disponen en láminas. Existen dos variedades de tales láminas: la Silícica y la Alumínica.

La primera, de tales láminas, está formada por un átomo de Silicio, rodeado de cuatro de Oxígeno, disponiéndose el conjunto en forma de tetraedro, tal como se muestra en la Figura 1. Estos tetraedros se agrupan en unidades hexagonales, sirviendo un átomo de Oxígeno de nexa entre cada dos tetraedros [3].

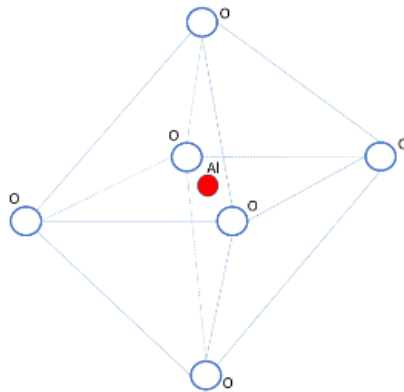
Figura 1. Estructura de la lámina Silícica.



Fuente: Elaboración propia.

Las láminas Alumínica están formadas por retículas de octaedros dispuestos con un átomo de aluminio al centro y seis de oxígeno alrededor, tal como aparece en la Figura 2. También ahora es el Oxígeno el nexa entre cada dos octaedros vecinos, para constituir la retícula.

Figura 2. Estructura de la lámina Aluminica.



Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo con su estructura, los minerales de arcilla se clasifican en tres grupos: caolinitas, montmorilonitas e ilitas [4].

Para entender mejor la respuesta de los materiales finos a la estabilización es importante conocer las características físico-químicas de estos. En general, se considera, que las partículas arcillosas tiene un tamaño del orden de 2 micras o menores y presentan una actividad eléctrica importante, que rige su comportamiento dada su gran superficie en relación con su volumen y aún su masa [5].

Una de las teorías más aceptadas, hasta ahora desarrolladas, para explicar la estructura interna de las arcillas es la que menciona que la superficie de cada partícula de suelo posee carga eléctrica negativa. La intensidad de la carga depende de la estructuración y composición de la arcilla. La partícula atrae a los iones positivos del agua (H^+) y a cationes de diferentes elementos químicos, tales como Na^+ , K^+ , Ca^{++} , Mg^{++} , Al^{+++} , Fe^{+++} , etc. Lo anterior conduce, en primer lugar, al hecho de que cada partícula individual de arcilla se ve rodeada de una capa de moléculas de agua orientadas en forma definida y ligadas a su estructura (agua adsorbida) [6].

Las moléculas de agua son polarizadas, es decir, en ellas no coinciden los centros de gravedad de sus cargas negativas y positivas, sino que funcionan como pequeños dipolos permanentes; al ligarse a la partícula por su carga positiva (+), el polo de carga negativa (-) queda en posibilidad de actuar como origen de atracción para otros cationes positivos. Los propios cationes atraen moléculas de agua gracias a la naturaleza polarizada de éstas, de modo que cada catión está en posibilidad de poseer un volumen de agua en torno a él. El agua adsorbida por cada catión aumenta con la carga eléctrica de éste y con su radio iónico. Por lo anterior, cuando las partículas de suelo atraen a los cationes, se ve reforzada la película de agua ligada a la partícula. El espesor de la película de agua adsorbida por el cristal de suelo es así función, no sólo de la naturaleza del mismo, sino también del tipo de cationes atraídos [7].

Las caolinitas son menos susceptibles de intercambiar sus cationes que las montmorilonitas y las ilitas poseen la propiedad de grado intermedio. La capacidad de intercambio crece con el grado de acidez de los cristales, es decir, es mayor si el pH del suelo es menor; la actividad catiónica se hace notable, en general, para valores de pH menores que 7 [8].

La superficie de toda partícula de arcilla de suelo lleva una carga eléctrica negativa, cuya intensidad depende principalmente de sus características mineralógicas. Las manifestaciones físicas y químicas debidas a la carga de la superficie constituyen lo que se llama **Capacidad de Cambio**. Esta capacidad de cambio está en relación directa con la cantidad de enlaces rotos o de cristales rotos que tienen cargas eléctricas opuestas en cada extremo y hace aumentar la capacidad de cambio cuanto más cristales rotos existan o cuando más pequeñas sean las partículas de arcilla. Esta gran cantidad de cargas insatisfechas son neutralizadas en parte por iones que se sitúan en las caras de las láminas de arcilla, estos iones son intercambiables y reciben el nombre de **iones de cambio**. Los iones monovalentes, como Na^+ , se hallan débilmente ligados al cristal del suelo, los bivalentes Ca^{++} y Mg^{++} están algo más firmemente unidos a él y el ión

H, ligeramente disociado, mientras que los cationes trivalentes Al⁺⁺⁺, Fe⁺⁺⁺ pueden encontrarse unidos fuertemente al cristal. La capacidad de cambio de cationes de un mineral describe su aptitud para adsorber cationes, su valor se expresa en Miliequivalente por 100 gramos de suelo seco [9].

En la Tabla 1 se indican algunos valores de la capacidad de cambio de cationes y de aniones de algunas arcilla típicas.

Tabla. 1. Capacidad de cambio de algunas arcillas típicas.

Fuente: Introducción a algunas propiedades fundamentales de los suelos, p.13.

| Arcilla | Capacidad de Cambio | |
|----------------|---------------------------|------------|
| | (Miliequivalente x 100 g) | |
| | Cationes | Aniones |
| Caolinita | 2,2 a 15 | 6,6 a 20,2 |
| Halloysita | 10 a 50 | 80 |
| Monmorillonita | 75 a 150 | 23 a 31 |
| Vermiculita | 100 150 | 4 |

1.2. SAL (CLORURO DE SODIO)

La Sal (Cloruro de Sodio) se produce mediante tres métodos, el más antiguo consiste en el empleo de calor solar para producir la evaporación de agua salada, con lo que se obtienen los residuos de sal. Otro método consiste en la extracción directa de las minas de sal y el tercer método consiste en la evaporación de agua de mar mediante el empleo de hornos.

El Cloruro de Sodio se presenta en forma de cristales, fácilmente solubles en agua, los cuales son higroscópicos y se les consigue en el mercado constituyendo cristales grandes o polvo fino y con diferentes grados de pureza [10].

Con la adición de sal al agua, se puede abatir la temperatura de congelamiento de ésta última. Se han reportado casos en los que el empleo de 2 a 3% de sal abatió el punto de congelamiento de un suelo hasta 2°C [11].

Los cambios que se presentan en el agua, debido a la adición de sal, tanto en la tensión superficial, como en la presión de vapor y como en el punto de congelamiento, dependen de la solubilidad de la sal en el agua. Ya que cierta cantidad de sal es disuelta en cierta cantidad de agua, pero sí agregamos cada vez más sal a la misma cantidad de agua, ésta se va haciendo menos soluble, hasta que llegará al punto en el que no se disolverá. Por consiguiente, y como veremos más adelante en el desarrollo de este trabajo, se verán resultados favorables a bajas cantidades de sal, por el orden del 1 al 2.5%, mientras que para cantidades mayores, 3%, 5%, etc, las condiciones o propiedades del material no serán las esperadas.

Aunque no se conoce completamente el mecanismo por medio del cual se produce la estabilización, se cree que se producen reacciones coloidales a través de las cuales el ion sodio del aditivo desplaza los iones naturales de los minerales arcillosos del suelo. La principal desventaja que se presenta es la solubilidad de la sal, lo que hace que pueda ser fácilmente lavada por el agua de percolación, lo que se traduce en una escasa durabilidad de la capa estabilizada [12].

Es de suma importancia conocer la íntima relación físico-química entre la sal y el suelo a estabilizar para determinar si la sal podría tener un efecto positivo o un efecto negativo en los materiales tratados.

Se han realizado diferentes estudios en Latinoamérica, en los cuales la sal ha tenido un gran impacto en su uso ingenieril, estos estudios han mostrado resultados tanto favorables como desfavorables dependiendo del suelo a estabilizar. Casos de alta relevancia acontecieron en México donde se construyeron carreteras estabilizadas con cloruro de sodio que dieron buenos resultados y otras carreteras donde el asfalto se deterioró al poco tiempo de

construido, cabe aclarar que no se realizaron estudios para determinar si la sal fue la responsable de la falla del pavimento.

El Ministerio de Transporte de la República del Perú legalizó una especificación técnica de construcción para estabilizar suelos con sal en la cual hace énfasis en la aplicación solamente de suelos con índice de plasticidad mayor al 8% y establece que la dosis adecuada debe ser determinada en laboratorios.

En nuestro país son pocos los casos estudiados; un estudio realizado en el antiguo Ministerio de Obras Públicas y Transportes con una arcilla de baja compresibilidad de Manaure (Guajira) indicó que la adición de sal produce modificaciones de escasa importancia en los límites líquido y plástico, aumentos en la humedad óptima de compactación y disminuciones en la densidad máxima y, curiosamente, en la resistencia a la compresión inconfiada [13].

Otro caso importante en Latinoamérica es el de Chile, en donde se ha utilizado la sal para corregir caminos de la red vial terciaria que se encontraban en muy mal estado, reduciendo el polvo y las calaminas, dejando una carretera de buena transitividad.

En la mayoría de estudios consultados se puede resaltar que la influencia del cloruro de sodio aumenta la densidad máxima seca y disminuye la humedad óptima, y presenta disminución en la resistencia a la compresión.

2. METODOLOGÍA

Para el caso de estudio de este trabajo, se utilizaron cuatro suelos arcillosos de diferentes canteras y se caracterizaron con el ensayo de granulometría de acuerdo a la norma del Instituto Nacional de Vías, INVIAS, INV E-123-07; Una vez conocida la granulometría de los suelos se dio paso a determinar el límite líquido y límite plástico según las normas INV E-125-07 y INV E-126-07 respectivamente.

A partir de estos resultados de granulometría y límites de Atterberg se clasifican los suelos por medio del Sistema de Clasificación de Suelos Unificado, USCS, utilizando el Ábaco de Casagrande. Se escogen dos suelos, aquellos que tengan mayor y menor plasticidad.

Con el fin de realizar un ensayo de resistencia a la compresión se debe conocer la humedad óptima de compactación; para los dos suelos y a diferentes dosis de cloruro de sodio se realizaron ensayos de proctor modificado según la norma INV E-142-07, se hallaron humedades óptimas y se analizó la variación de la densidad máxima seca en cada caso.

En este punto del experimento se agregó la sal en dos formas distintas: en la primera se utilizó sal no refinada, en cristales grandes y no disuelta; en la segunda forma se agregó sal refinada, en cristales muy pequeños y disueltos en agua.

Para los dos suelos se agregó cloruro de sodio en diferentes cantidades en porcentaje del peso seco de la muestra a experimentar, los porcentajes fueron al 0%, 3%, 5% y 7%. Para todos estos porcentajes se desarrolló el ensayo modificado de compactación.

La cantidad de cloruro de sodio es disuelta en agua y ésta mezcla se va agregando al material a medida que se va realizando el ensayo hasta tener los cuatros puntos mínimos para realizar la gráfica de densidad máxima seca.

Para finalizar los laboratorios de este experimento y para determinar la evolución en la resistencia a la compresión simple se realizó el ensayo de comprensión

inconfinada siguiendo la norma INV E-152-07. Para este ensayo se prepararon probetas con el equipo Harvard Miniatura de Compactación, en 3 tres capas de 25 golpes cada una.

Para conocer la variación de la resistencia en función del tiempo, se deja un tiempo de fraguado de cero a veintiún días, midiendo valores de resistencia cada siete días.

Las probetas elaboradas se conservan en un ambiente húmedo por los días de fraguado para estudiar el efecto que tendría la sal en la variación de la resistencia de los materiales utilizados.

Para el ensayo se elaboraron dos probetas por cada 7 días de fraguado y para cada porcentaje de adición de sal, organizadas como se muestra en la Tabla 2.

Tabla. 2. Cantidad total de probetas ensayadas.

Fuente: Elaboración propia.

| Día | Cantidad de Probetas | | | | |
|-----------------------------------|----------------------|----------|--------|--------|-----------|
| | 0% Sal | 1.5% Sal | 3% Sal | 5% Sal | 7% Sal |
| 7 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 |
| 14 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 |
| 21 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 |
| Cantidad Total de Probetas | | | | | 30 |

Esta cantidad de probetas es para un solo suelo ensayado, es decir que para los dos suelos, suelo dos y suelo cuatro, la cantidad total de probetas ensayadas es de sesenta. Las probetas son compactadas con la humedad óptima de cada suelo a los distintos porcentajes de adición de cloruro de sodio.

El ensayo se elaboró controlando la deformación, a una velocidad de 0.01 pulgadas cada 10 segundos y no cada 15 segundos debido a que es un suelo blando según lo que dice la norma, en el caso de materiales muy blandos que

exhiben deformaciones mayores a la falla, deberán ensayarse a una rata mayor de deformación y lo inverso para materiales duros o quebradizos [14].

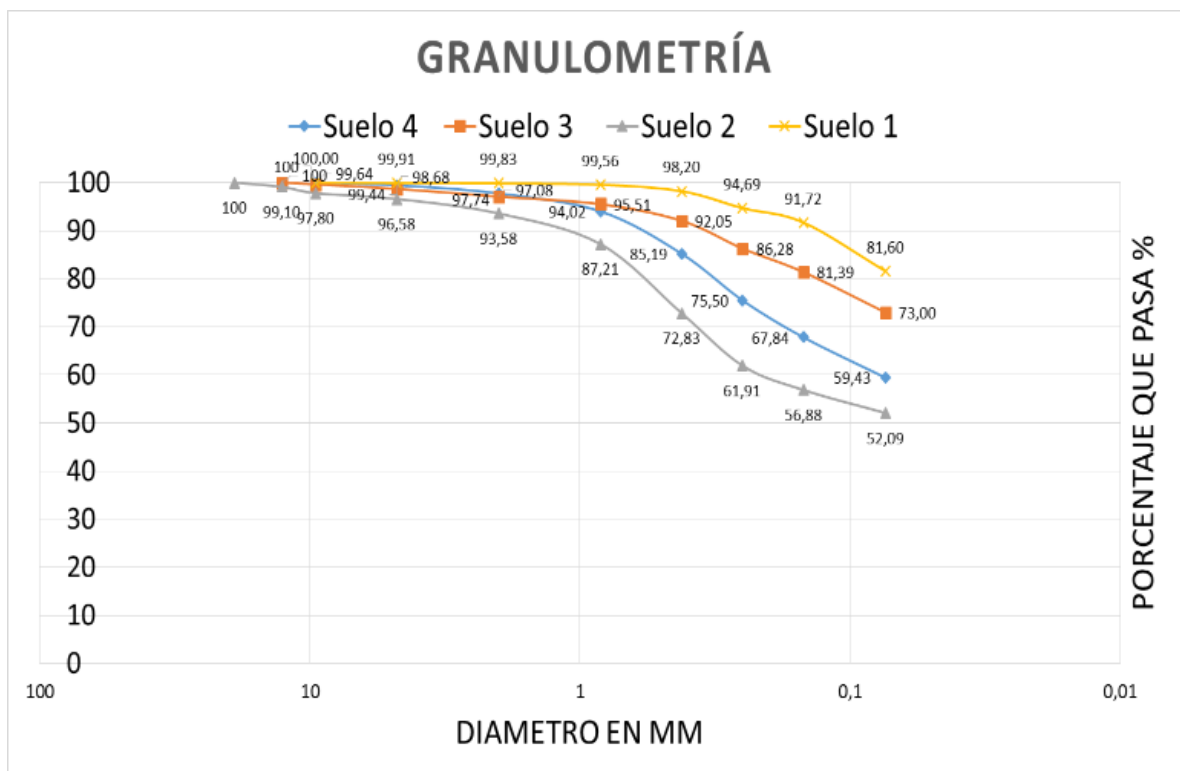
3. RESULTADOS

3.1. CARACTERIZACIÓN DE SUELOS

3.1.1. Granulometría

La curva granulométrica se muestra en la Figura 3 y la granulometría de los cuatro suelos se muestra en la Tabla 3.

Figura 3. Curva Granulométrica.



Fuente: Elaboración propia.

Tabla. 3. Porcentaje de gravas, arenas y finos.

Fuente: Elaboración propia.

| | GRAVAS | ARENAS | FINOS |
|----------------|---------------|---------------|--------------|
| SUELO 1 | 0.09 % | 18.31 % | 81.60 % |
| SUELO 2 | 3.42 % | 44.50 % | 52.09 % |
| SUELO 3 | 1.32 % | 25.67 % | 73.00 % |
| SUELO 4 | 0.56 % | 40.01 % | 59.43 % |

Según la granulometría los suelos presentan mayor cantidad de finos.

3.1.2. Límite líquido y límite plástico

El límite líquido, el límite plástico y el índice de plasticidad se muestran en la Tabla 4.

Tabla. 4. Límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad.

Fuente: Elaboración propia.

| SUELO | LUGAR | Color | LL | LP | IP | CLASIFICACIÓN USCS |
|----------------|--|--------------|-----------|-----------|-----------|--|
| Suelo 1 | Ladrillera barrio Porvenir | Beige | 29.00% | 17.00% | 12.00% | CL (Arcilla de baja Plasticidad) |
| Suelo 2 | Ladrillera barrio Porvenir | Rojo | 39.00% | 24.00% | 15.00% | CL (Arcilla de baja Plasticidad) |
| Suelo 3 | Ladrillera barrio Porvenir | Gris | 26.00% | 16.00% | 10.00% | CL (Arcilla de baja Plasticidad) |
| Suelo 4 | Talud Ubicado en el anillo vial de la vía entre Floridablanca y Girón en Santander | Amarillo | 22.00% | 14.00% | 8.00% | CL-ML (Arcilla-Limosa de baja Plasticidad) |

Según los resultados obtenidos de granulometría y límites se puede clasificar los suelos mediante el USCS en el cual tres de los suelos estudiados están bajo la

misma clasificación. Se opta por trabajar con dos suelos, suelo 2 y suelo 4 de mayor y menor plasticidad respectivamente.

3.2. ENSAYO DE PROCTOR MODIFICADO

Los resultados se muestran en la Tabla 5 y Tabla 6 para los de mayor y menor plasticidad respectivamente y son graficados en la Figura 4 y en la Figura 5.

Tabla. 5. Cuadro de resultados para el suelo de mayor plasticidad.

Fuente: Elaboración propia.

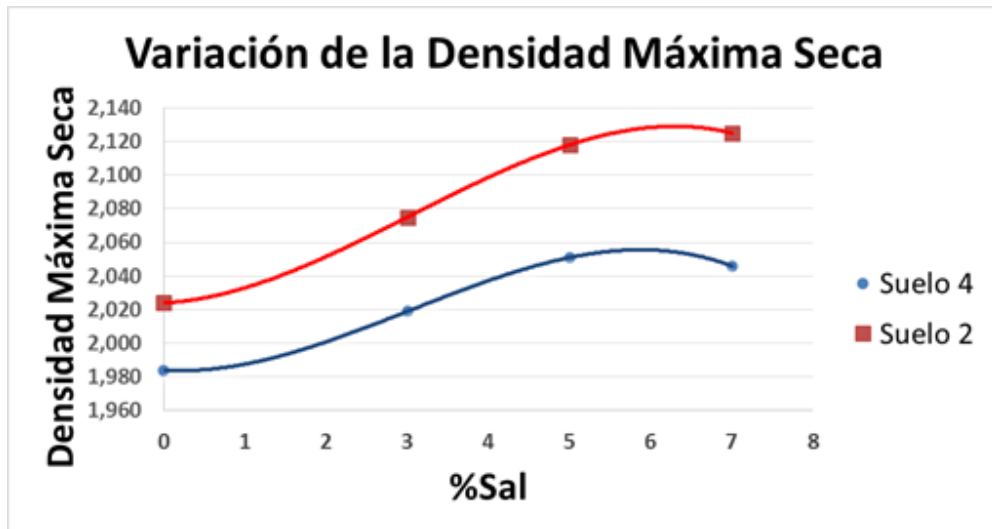
| %Sal | Densidad [gr/cm3] | Humedades Optimas |
|-------------|--------------------------|--------------------------|
| 0 | 2.02 | 13.50 % |
| 3 | 2.07 | 11.80 % |
| 5 | 2.12 | 11.20 % |
| 7 | 2.13 | 10.10 % |

Tabla. 6. Cuadro de resultados para el suelo de menor plasticidad.

Fuente: Elaboración propia.

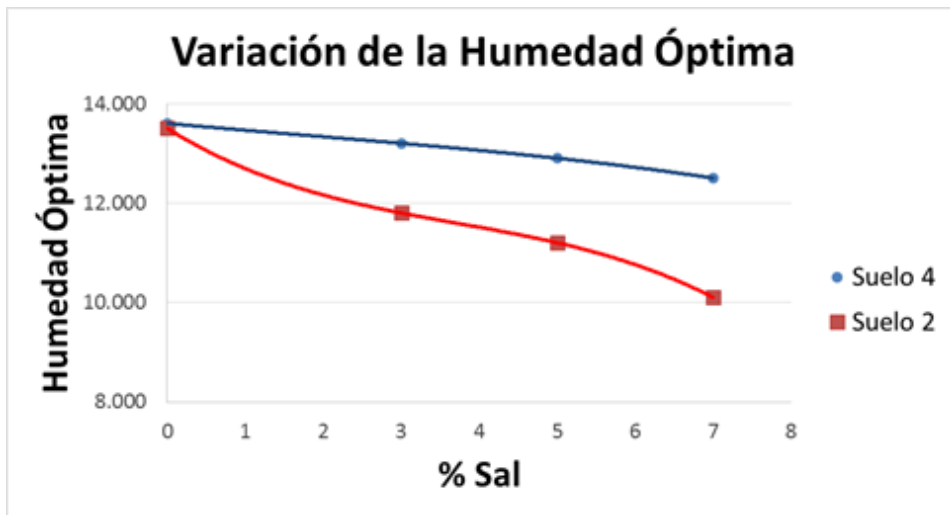
| %Sal | Densidad [gr/cm3] | Humedades Optimas |
|-------------|--------------------------|--------------------------|
| 0 | 1.98 | 13.60 % |
| 3 | 2.02 | 13.20 % |
| 5 | 2.05 | 12.90 % |
| 7 | 2.05 | 12.50 % |

Figura 4. Variación de la Densidad Máxima Seca. Suelo2: suelo de mayor plasticidad. Suelo4: suelo de menor plasticidad.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 5. Variación de la Humedad Óptima. Suelo2: suelo de mayor plasticidad. Suelo4: suelo de menor plasticidad.



Fuente: Elaboración propia.

De la Figura 4 se puede deducir que la densidad máxima seca aumenta a medida que se incrementa la cantidad de sal proporcionada al material, se cree que esto

puede deberse al incremento de los cristales de sal que se suman a los minerales de suelo. Por otra parte, de la Figura 5 se deduce que la humedad óptima del material disminuye con el incremento de sal.

Se cree que el incremento en la densidad máxima seca puede deberse a lo planteado en la revisión bibliográfica en la referencia número 6, en la que se menciona que cada partícula de suelo posee carga eléctrica negativa. La partícula atrae a los iones positivos del agua (H^+) y al catión del sodio, Na^+ . Esta atracción puede generar un aumento en la tensión superficial del material y por ende un aumento en la cohesión del mismo. Lo que conlleva a que cada partícula individual de arcilla se ve rodeada de una capa de moléculas de agua orientadas en forma definida y ligadas a su estructura. Cuando las partículas de suelo atraen a los cationes, se ve reforzada la película de agua ligada a la partícula. La disminución en la humedad óptima se podría atribuir a la propiedad higroscópica de la sal, la cual absorbe la humedad del aire y de los materiales que lo rodean.

En el suelo de mayor plasticidad se obtuvo un incremento en la densidad máxima seca de 5.24% y en el suelo de menor plasticidad un incremento de 3.63% respecto al suelo con 0% de cloruro de sodio.

De esta prueba se deduce que es mejor utilizar la sal refinada, en cristales pequeños y disueltos en agua, ya que los resultados obtenidos fueron coherentes debido a la alta homogenización de la mezcla. En contrario con la sal no refinada, en cristales grandes y no disueltos, los resultados no permiten definir algún tipo de tendencia, debido a la poca homogenización de la mezcla.

3.3. VARIACIÓN DE LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN INCONFINADA

Los resultados para este ensayo son los siguientes:

3.3.1. Suelo De Mayor Plasticidad (Arcilla Roja)

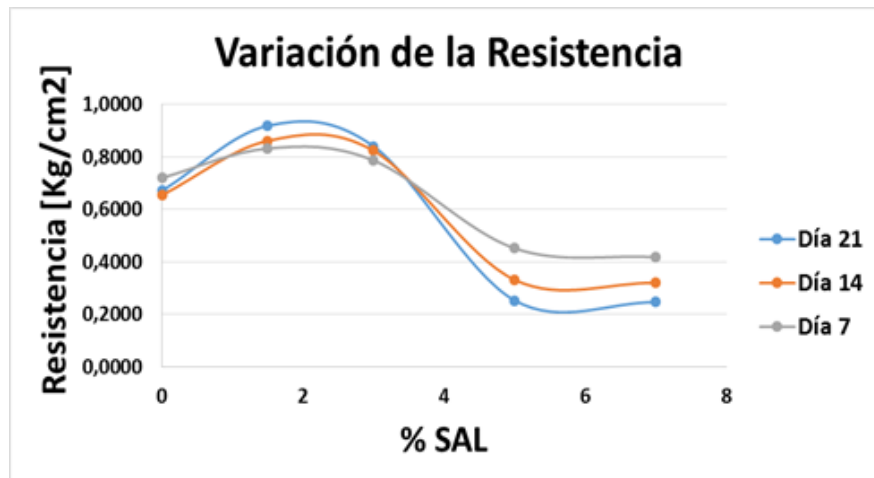
Los resultados obtenidos se encuentran tabulados en la Tabla 7 y graficados en la Figura 6.

Tabla. 7. Tabla de Resistencia del suelo de mayor plasticidad a diferentes días y a diferentes cantidades de cloruro de sodio.

Fuente: Elaboración propia.

| | % SAL | Esfuerzo [Kg/cm ²] | % Incremento |
|---------------|-------|--------------------------------|--------------|
| Día 7 | 0 | 0.72 | 0.00% |
| | 1.5 | 0.83 | 15.52% |
| | 3 | 0.79 | 9.20% |
| | 5 | 0.45 | -37.29% |
| | 7 | 0.42 | -41.95% |
| Día 14 | 0 | 0.65 | 0.00% |
| | 1.5 | 0.86 | 31.66% |
| | 3 | 0.82 | 25.90% |
| | 5 | 0.33 | -49.30% |
| | 7 | 0.32 | -51.02% |
| Día 21 | 0 | 0.67 | 0.00% |
| | 1.5 | 0.92 | 36.93% |
| | 3 | 0.84 | 25.28% |
| | 5 | 0.25 | -62.25% |
| | 7 | 0.25 | -63.21% |

Figura 6. Variación de la Resistencia.



Fuente: Elaboración propia.

Los resultados mostrados en la Figura 6 indican un incremento en la resistencia cuando el contenido de cloruro de sodio se encuentra entre 1% y 2.5%, donde se evidencia un aumento al pasar los días de fraguado. A mayores contenidos de cloruro de sodio se nota un descenso en la resistencia al pasar los días.

3.3.2. Suelo De Menor Plasticidad (Arcilla Amarilla)

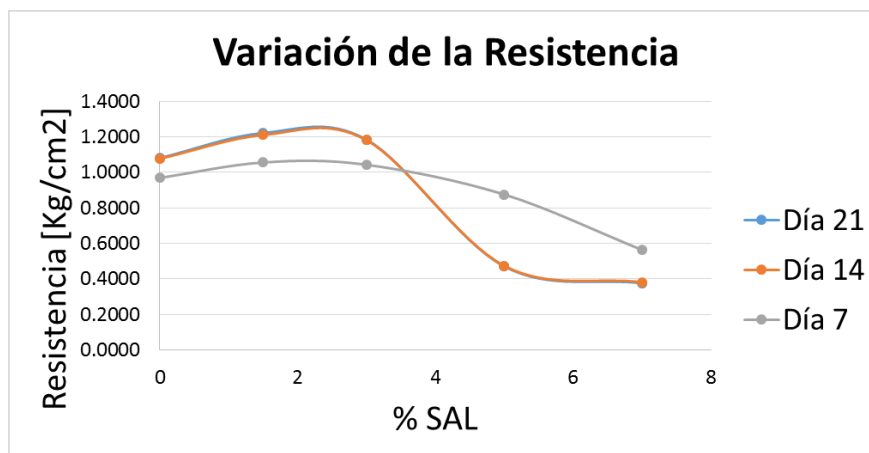
Los resultados obtenidos se encuentran tabulados en la Tabla 8 y graficados en la Figura 7.

Tabla. 8. Tabla de Resistencia del suelo de menor plasticidad a diferentes días y a diferentes cantidades de cloruro de sodio.

Fuente: Elaboración propia.

| | % SAL | Esfuerzo [Kg/cm ²] | % Incremento |
|---------------|-------|--------------------------------|--------------|
| Día 7 | 0 | 0.97 | 0.00% |
| | 1.5 | 1.06 | 9.00% |
| | 3 | 1.04 | 7.66% |
| | 5 | 0.88 | -9.64% |
| | 7 | 0.56 | -41.88% |
| Día 14 | 0 | 1.08 | 0.00% |
| | 1.5 | 1.21 | 12.41% |
| | 3 | 1.18 | 9.70% |
| | 5 | 0.47 | -56.06% |
| | 7 | 0.38 | -64.54% |
| Día 21 | 0 | 1.08 | 0.00% |
| | 1.5 | 1.22 | 13.03% |
| | 3 | 1.18 | 9.58% |
| | 5 | 0.47 | -56.48% |
| | 7 | 0.38 | -65.23% |

Figura 7. Variación de la Resistencia.



Fuente: Elaboración propia.

Los resultados para el día 14 son similares a los del día 21, para este material el mayor incremento en la resistencia se presentó cuando el contenido de sal se encuentra entre 1% y 2.5%.

El bajo incremento en la resistencia de los materiales podría atribuirse, basado en las referencias bibliográficas, a los iones de sodio, Na^+ , los cuales son monovalentes y se hallan débilmente ligados al cristal del suelo. La intensidad de la carga eléctrica negativa de toda partícula de arcilla depende principalmente de sus características mineralógicas. El espesor de la película de agua absorbida por el cristal de suelo es así función, no sólo de la naturaleza del mismo, sino también del tipo de cationes atraídos, ya que cationes bivalentes o trivalentes pueden encontrarse más fuertemente unidos al cristal. La disminución en la resistencia a la compresión a mayores contenidos de sal, después de 2.5%, se cree que puede deberse a que a mayores contenidos de cloruro de sodio, se va a retener más humedad, lo que haría del suelo un material más blando.

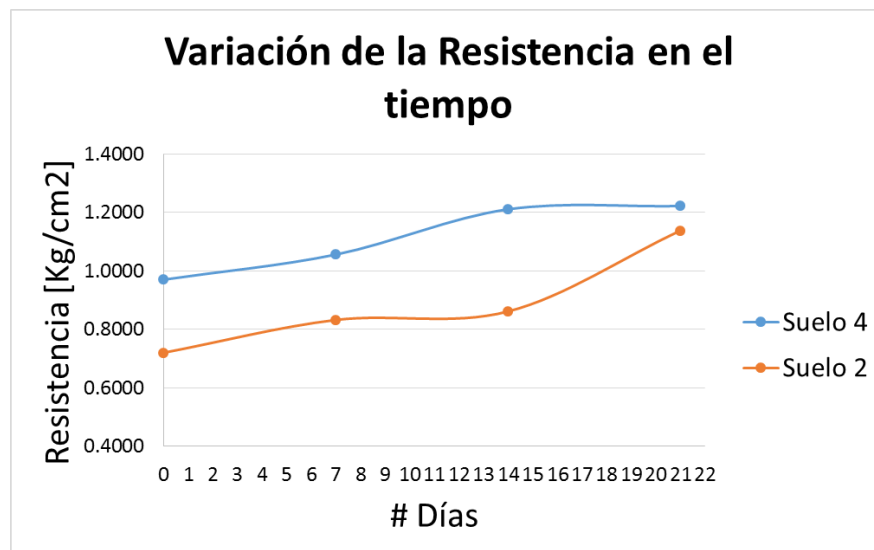
En este ensayo se observó que las probetas con contenido de sal presentaban mayor humedad que las probetas sin sal. Esto puede deberse a la formación de

una capa cementante a razón de la atracción entre moléculas, la cual impediría una rápida evaporación de la humedad.

La mezcla de suelo y un agente como el cloruro de sodio deben fraguar suficientemente para permitir la reacción que cambia las propiedades del material. La duración de este período de fraguado debe basarse en el juicio de ingeniería y depende del tipo de suelo [15].

El tiempo de fraguado de un suelo estabilizado se da cuando este alcanza su mayor resistencia o el aumento de este con respecto al tiempo no es significativo, los resultados que se obtuvieron para los dos suelos presentan incremento en su resistencia al 1.5% de contenido de sal. Los resultados obtenidos se encuentran graficados en la Figura 8.

Figura 8. Variación de la Resistencia en el Tiempo. Suelo2: suelo de mayor plasticidad. Suelo4: suelo de menor plasticidad.



Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 8 se aprecia que el suelo de mayor plasticidad presenta aumento en su resistencia después del día 14 y en el día que se suspende el estudio, el día

21, mantiene la tendencia a seguir aumentando, mientras que el suelo de menor plasticidad después del día 17 el aumento en su resistencia no es significativo.

El suelo de mayor plasticidad tuvo un incremento en su resistencia del 37%, mientras que el suelo de menor plasticidad presentó un incremento del 13%.

3.4. PROPUESTA DE PROCEDIMIENTO DE LABORATORIO PARA ESTABILIZACIÓN DE SUELOS CON CLORURO DE SODIO

3.4.1. CARACTERIZACIÓN DE SUELOS

3.4.1.1. Granulometría

Determinar la granulometría de los materiales a trabajar con el fin de conocer su contenido en gravas, arenas y finos. Realizar el ensayo cumpliendo la normatividad del INVIAS.

3.4.1.2. Límites de Atterberg

Realizar los ensayos que permiten conocer el límite líquido y el límite plástico de los materiales a trabajar, siguiendo las normas existentes, y clasificar los suelos con estos valores por medio del U.S.C.S.

En este trabajo se realizó el ensayo sin adicionarle cloruro de sodio a los suelos estudiados. Se recomienda realizar el ensayo adicionando sal, en diferentes porcentajes, en forma de salmuera, para determinar el comportamiento de los límites de Atterberg ante la presencia del cloruro de sodio.

3.4.2. ENSAYO MODIFICADO DE COMPACTACIÓN

Desarrollar el ensayo de proctor modificado, de acuerdo a la normatividad existente del INVIAS, a diferentes porcentajes de contenido de cloruro de sodio, siendo el primero al 0%. La cantidad de cloruro de sodio debe ser calculada en porcentaje de peso seco del material a estabilizar. La aplicación de la sal al suelo, se recomienda hacerla en forma de salmuera o sal disuelta en agua, ya que de

esta manera se logra una alta homogenización de la mezcla. La salmuera debe contener la cantidad de sal y la cantidad de agua necesaria para encontrar la humedad óptima del suelo. Toda la sal disuelta en agua se debe agregar al material.

La mezcla suelo-salmuera debe ser amasada hasta garantizar que todo el material a estabilizar se encuentra humedecido y mezclado.

Finalmente realizar los cálculos matemáticos necesarios para encontrar la humedad óptima y la densidad máxima seca. Se recomienda realizar al menos cuatro puntos para la gráfica de densidad máxima seca.

3.4.3. ENSAYO DE COMPRESIÓN INCOFINADA

Para este ensayo se elaboran probetas compactadas con la humedad óptima de compactación a los diferentes porcentajes de adición de cloruro de sodio, utilizando el equipo de Harvard Miniatura, en tres capas de 25 golpes cada una.

Para determinar un tiempo de fraguado, las probetas se conservan en un ambiente húmedo, simulando condiciones críticas a las que puede estar sometido un material, para este trabajo el tiempo de fraguado es de cero a veintiún días, midiendo valores de resistencia cada siete días.

En este ensayo se recomienda realizar la prueba a una rata mayor de deformación, siguiendo lo establecido en la normatividad del INVIAS ya que la falla no se alcanza a en el tiempo establecido por dicha norma, pero la misma permite fallar a una rata mayor cuando se trate de suelos blandos.

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Los resultados mostraron un aumento en la resistencia a bajos contenidos de cloruro de sodio entre 1% y 2.5%.

Del ensayo de proctor modificado se concluye que entre mayor sea el porcentaje de cloruro de sodio aplicado, la densidad máxima seca del suelo aumenta y al mismo tiempo el porcentaje de humedad óptima disminuye.

Se observó que al adicionar cloruro de sodio disuelto en agua en forma de salmuera se obtiene una mejor mezcla.

El suelo de mayor plasticidad presentó un mayor incremento en su resistencia a la compresión que el suelo de menor plasticidad.

Para futuros estudios se recomienda estudiar la composición química de los elementos presentes en los suelos y la reacción con el estabilizante, ya que para entender mejor la respuesta de los materiales finos a la estabilización es importante conocer las características físico-químicas de estos. Es de suma importancia conocer la íntima relación físico-química entre la sal y el suelo a estabilizar para determinar si la sal podría tener un efecto positivo o un efecto negativo en los materiales tratados.

En este estudio se determinó que el tiempo de fraguado varía dependiendo del tipo de suelo.

El suelo de menor plasticidad mostró la mayor resistencia a los 17 días, después de estos se presentaron leves incrementos. El suelo de mayor plasticidad al momento de suspender el estudio exhibe una tendencia a seguir aumentando su resistencia.

Se observó que las probetas con contenido de sal presentaban mayor humedad que las probetas sin sal.

El incremento en la resistencia a la compresión alcanzado en este estudio no es suficiente para justificar un estudio económico, sin embargo en los caminos destapados y cercanos a una fuente de sal, la aplicación se recomienda debido a la facilidad y beneficios en resistencia.

El estudio realizado en esta investigación es un punto de partida para futuros trabajos de investigación que se quieran desarrollar en el país en la estabilización de suelos con cloruro de sodio. Debido al poco tiempo del estudio y a impedimentos técnicos de laboratorio, la cantidad de muestras a analizar fueron pocas. Se recomienda aumentar el campo muestral para tener mayor argumento que sustente lo planteado en esta investigación, de igual forma realizar adicionalmente otros ensayos para analizar el comportamiento de los suelos a diferentes cantidades de sal a distintas solicitaciones y aumentar el tiempo de fraguado para tener más claridad del comportamiento en la variación de la resistencia en el tiempo a diferentes porcentajes de adición de cloruro de sodio.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] P. Garnica, A. Pérez, J. A. Gómez, E. Y. Obil, Estabilización de suelos con cloruro de sodio para su uso en las vías terrestres; Publicación Técnica No.201; Ciudad de México, México, 2002, p. 7.
- [2] Ministerio de Transportes y Comunicaciones, Republica del Perú, Suelo estabilizado con sal (Cloruro de Sodio), Publicación Técnica Sección 309B; Lima, Perú, 2005, p. 309B.01.
- [3] P. Garnica, A. Pérez, J. A. Gómez, E. Y. Obil, Estabilización de suelos con cloruro de sodio para su uso en las vías terrestres; Publicación Técnica No.201; Ciudad de México, México, 2002, p. 1.
- [4] P. Garnica, A. Pérez, J. A. Gómez, E. Y. Obil, Estabilización de suelos con cloruro de sodio para su uso en las vías terrestres; Publicación Técnica No.201; Ciudad de México, México, 2002, p. 2.
- [5] P. Garnica, A. Pérez, J. A. Gómez, E. Y. Obil, Estabilización de suelos con cloruro de sodio para su uso en las vías terrestres; Publicación Técnica No.201; Ciudad de México, México, 2002, p. 3.
- [6] J. Badillo, R. Rodríguez; Mecánica de suelos, Tomo 1, Fundamentos de la mecánica de suelos; Limusa Noriega Editores; Ciudad de México, México, 2005, p. 41.
- [7] J. Badillo, R. Rodríguez; Mecánica de suelos, Tomo 1, Fundamentos de la mecánica de suelos; Limusa Noriega Editores; Ciudad de México, México, 2005, p. 42.
- [8] J. Badillo, R. Rodríguez; Mecánica de suelos, Tomo 1, Fundamentos de la mecánica de suelos; Limusa Noriega Editores; Ciudad de México, México, 2005, p. 43.

- [9] J. R. Nadeo, A. J. Leoni, Introducción a algunas propiedades fundamentales de los suelos, Tomo 1; Buenos Aires, Argentina, 2005; p. 13.
- [10] Ministerio de Transportes y Comunicaciones, Republica del Perú, Suelo estabilizado con sal (Cloruro de Sodio), Publicación Técnica Sección 309B; Lima, Perú, 2005, p. 309B.03.
- [11] P. Garnica, A. Pérez, J. A. Gómez, E. Y. Obil, Estabilización de suelos con cloruro de sodio para su uso en las vías terrestres; Publicación Técnica No.201; Ciudad de México, México, 2002, p. 14.
- [12] A. Montejo; Ingeniería de pavimentos para carreteras, Tomo 1, Ágora Editores; Bogotá, Colombia, 2002, p. 121.
- [13] A. Montejo; Ingeniería de pavimentos para carreteras, Tomo 1, Ágora Editores; Bogotá, Colombia, 2002, p. 121.
- [14] Instituto Nacional de Vías, República de Colombia, Compresión Inconfinada en Muestra de Suelo I.N.V.E_152_07; Bogotá, Colombia, 2007, p 7.
- [15] Publicación de la National Lime Association; Manual de estabilización de suelo tratado con cal; Boletín 326; Artlington, Estados Unidos, 2006, p. 21.