

CAPÍTULO I
INTRODUCCIÓN

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1. Introducción

La estabilización de un suelo es un proceso orientado hacia el mejoramiento integral de sus propiedades geomecánicas: el incremento de la resistencia al esfuerzo cortante y la disminución de su compresibilidad y su permeabilidad.

Generalmente las sub rasantes estables se han construido utilizando agregados seleccionados y bien gradados proporcionando fácilmente la capacidad de carga de las capas de base o subbase, para soportar la capa final de rodadura de una carretera. Para ello se necesita una gran cantidad de materiales seleccionados siendo estos escasos, una de las formas de reducir la cantidad de material especial necesario para la construcción de una base es mejorar la capacidad del suelo existente en la sub rasante suministrándole resistencia de acuerdo a las normas de ingeniería.

La estabilización con sales es una solución que permite proporcionar a los caminos ciertas características que mejoran la serviciabilidad, transitabilidad y a la vez económicas.

Las sales normales tales como el cloruro de sodio (NaCl), cloruro de calcio (CaCl_2) o cloruro de potasio (KCl) son sales completamente neutralizadas, es decir que no contienen exceso de iones ácidos de hidrógeno (H^+) ni básicos de hidroxilo (OH^-). Se designan como sales ácidas aquellas que contienen exceso de iones de hidrógeno, como el bicarbonato de sodio (NaHCO_3) y a las que contienen exceso de iones hidroxilo se les designa como sales básicas.

El exceso de sales en la tierra puede ocasionar problemas en cultivos cercanos, conocido como salinidad, que ocasiona algunos efectos tanto fisiológicos como bioquímicos, tales como necrosis foliar, reducción de crecimiento del cultivo, pérdida de capacidad de germinación, afección en la producción de etileno, disminución de peso del fruto, etc.

Las sales afectan a las propiedades fisicoquímicas del suelo, produciendo un efecto importante sobre el rendimiento de los cultivos, ya que se produce un exceso de iones Na (sodicidad) con respecto a los iones Ca y Mg, rotura o dispersión de los agregados con lo

que se bloquean los poros conductores y, además, se reduce la permeabilidad del suelo, ya que se compacta y la capacidad del suelo para que la planta pueda absorber el agua queda severamente reducida.

Por ellos, en el presente proyecto se enfocará en la evaluación de las sales en la estabilización de suelos, utilizando tres tipos de sales, el cloruro de sodio, el cloruro de calcio y el cloruro de potasio. Realizando los respectivos ensayos de laboratorio de los materiales a utilizar como ser: ensayo de granulometría, ensayo de los límites de atterberg, ensayo de proctor modificado, ensayo de capacidad soporte california con dosificación de las sales.

Con la estabilización de suelos-sales se evaluará con los datos obtenidos ya analizados se medirá la resistencia y permeabilidad del suelo estabilizado.

1.1 Justificación

La estabilización de suelos se realiza para mejorar la estabilidad y transitabilidad de los suelos naturales arcillosos para mejorar sus cualidades: aumentar su resistencia, reducir su plasticidad, facilitar los trabajos de construcción o aumentar su estabilidad reduciendo problemas en estructuras y pavimentos.

Es de gran importancia la estabilidad y transitabilidad de las carreteras en general, en la ciudad de Tarija se sabe que una gran parte del sistema vial está compuesto por caminos secundarios de tierra según el Atlas de Potencialidades Productivas del Estado Plurinacional de Bolivia 2009 la red pavimentada llegó el 31%, la de ripio al 48% y un 21% de tierra, con la expansión de nuevos barrios en los últimos años el porcentaje de caminos de tierra se incrementaron, teniendo el conocimiento que en Tarija los suelos son de naturaleza sedimentaria y depósitos de origen aluvial compuestos de limos, arcillas, gravas y ripios que presentan una baja capacidad de soporte que generalmente conforman la capa sub rasante.

La estabilización química de suelos tiende a mejorar propiedades físicas, mecánicas, controla su estabilidad volumétrica, aumenta su resistencia y el módulo esfuerzo-deformación, mejora su permeabilidad y durabilidad y reduce su susceptibilidad al agua

con permanencia en el tiempo. El diseño de una estabilización con aditivo incluye clasificar el suelo, determinar el tipo y cantidad de estabilizante y el procedimiento para efectuar la estabilización.

Las sales más comunes en las estabilizaciones de suelos como materiales alternativos de bajo costo se han utilizado el cloruro de sodio (NaCl), cloruro de calcio (CaCl_2) y el cloruro de potasio (KCl). El objetivo de su uso es retener humedad y mejorar la compactación del material. Además, ayudan a reducir el punto de congelación del agua contenida en el suelo y en zonas muy secas evita la rápida evaporación del agua de compactación.

Los efectos del exceso de sales son muy variados, tanto fisiológicos como bioquímicos, tales como necrosis foliar, reducción de crecimiento del cultivo, pérdida de capacidad de germinación, afección en la producción de etileno, disminución de peso del fruto, por su efecto tóxico y la disminución del potencial osmótico del suelo, bloquea los poros conductores, se reduce la permeabilidad del suelo, ya que se compacta y la capacidad del suelo para que la planta pueda absorber el agua queda severamente reducida etc.

1.2 Planteamiento del problema

1.2.1 Situación problémica

La calidad de los suelos in-situ debe garantizar su durabilidad, resistencia, manejabilidad y economía para soportar una estructura de un pavimento en la construcción de vías, pero en la mayoría de ocasiones los suelos no presentan las mejores características para su uso, por lo que se hace necesario contar con ciertos materiales y procesos que mejoren las características de estos, así obtener parámetros de resistencia y durabilidad frente a las acciones de las cargas que se transmitan por el tráfico y las circunstancias que se manifiestan en la zona.

Los suelos que generalmente se estabilizan por su mala calidad son los suelos expansivos que resultan ser un gran problema para la construcción, porque los incrementos del volumen no se presentan de una manera uniforme, sino todo lo contrario al producirse incrementos en distintas zonas y al momento de contraerse generan asentamientos, que pueden dañar severamente las estructuras de un camino o carretera. Se sabe que las arcillas

expansivas son las más peligrosas para cimentar tanto en viviendas como carreteras, que el funcionamiento a largo plazo de cualquier proyecto de construcción depende de la calidad de los suelos subyacentes en el caso de una carretera o un camino son las bases o subbases, para apoyar a una cimentación de un pavimento, las principales características indeseables de una arcilla plástica serán: un índice plástico demasiado alto que significa un alto valor de expansión (o bien su opuesta contracción), así como una capacidad para soportar carga estructural que será demasiado baja cuando hay saturación, el cual es un fenómeno que siempre ocurre en un proyecto de campo y es muy difícil de controlar, ya que no se puede impermeabilizar el suelo en su totalidad.

No siempre se encuentra el suelo adecuado que garantice la estabilidad y durabilidad, la mejor opción económica para mejorar los suelos es a un procedimiento llamado estabilización de suelos que se define como el proceso mediante el cual se someten los suelos naturales a cierta manipulación o tratamiento de modo que se pueda aprovechar sus mejores cualidades, obteniéndose un firme estable, capaz de soportar las condiciones de carga a las cuales estará sometida y los climas más severos.

El empleo de estabilización química de suelos se ha convertido en una muy seria alternativa a considerar en estos momentos, a partir de contar con una gran cantidad de vialidades que han sido evaluadas y construidas con este método en los últimos años con resultados alentadores.

Con la estabilización química utilizando aditivos químicos o agentes estabilizadores en nuestro caso las sales tales como cloruro de sodio (NaCl), el cloruro de calcio (CaCl_2) y el cloruro de potasio (KCl), con los cuales mejorará o controlará su estabilidad volumétrica, aumenta su resistencia y el módulo esfuerzo-deformación, mejora su permeabilidad y durabilidad y reduce su susceptibilidad al agua de los suelos arcillosos.

1.2.2 Problema

¿La estabilización de los suelos arcillosos con el cloruro de sodio (NaCl), cloruro de calcio (CaCl_2) y cloruro de potasio (KCl) para sub rasante, mejorar sus propiedades físicas y cómo afectará en la vegetación adyacente en la carretera?

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

Realizar la evaluación de suelos de la sub rasante estabilizados con diferentes tipos de sales aplicados a pavimentos, mediante los respectivos ensayos de laboratorio, que permitirá determinar su resistencia y permeabilidad del suelo estabilizado, y evaluar su efecto en la vegetación circundante.

1.3.2 Objetivos específicos

- Caracterizar las propiedades físicas de los materiales de sub rasante que se emplearán en la estabilización de suelos, en el área de estudio.
- Realizar ensayos en laboratorio que determinen las propiedades mecánicas de los suelos estabilizados con el cloruro de sodio (NaCl), cloruro de potasio (KCl) y el cloruro de calcio (CaCl₂).
- Evaluar los resultados del suelo estabilizado en los parámetros de resistencia y permeabilidad con el cloruro de sodio (NaCl), cloruro de potasio (KCl) y el cloruro de calcio (CaCl₂).
- Evaluar el efecto de la estabilización de sales en la vegetación circundante.
- Establecer conclusiones y recomendaciones en base a los resultados obtenidos en el área de estudio.

1.4 Hipótesis

Si se estabiliza un suelo aplicando sales, que consiste en un proceso de una mezcla homogénea de suelo con sales seguido de su compactación, aplicando energía con el fin de incrementar su densidad o peso seco unitario y reducir el volumen de vacíos, entonces se podrá mejorar la calidad del suelo, teniendo un incremento de la resistencia al esfuerzo cortante, la disminución de su compresibilidad y su permeabilidad, con el fin de mejorar la serviciabilidad y transitabilidad del camino, y se demostrará que las sales afectan al crecimiento y desarrollo de las plantas de los cultivos aledaños.

1.5 Definición de variable independiente y dependiente

1.5.1 Variable independiente

Estabilización de suelos con utilización de sales.

1.5.2 Variable dependiente

Análisis de su resistencia y permeabilidad del suelo estabilizado.

Variable	Concepto	Medición	Unidad
Independientes Estabilización de suelos	Proceso que permite mejorar las características físicas, químicas y mecánicas.	Cloruro de sodio Cloruro de calcio Cloruro de potasio	3% 4% 5%
Dependientes Estabilización de los suelos, su resistencia y permeabilidad del suelo estabilizado.	Es la resistencia a los esfuerzos a las cargas aplicadas.	Resistencia	kg/cm ²
	Es la propiedad que tiene el suelo de transmitir el agua y el aire.	Permeabilidad	m/s

1.6 Alcance del estudio

El presente proyecto de investigación está enfocado en la evaluación de sales en la estabilización de suelos y su efecto en la vegetación circundante constará de cuatro capítulos, en los que se desarrollará el contenido del proyecto. La investigación consiste en primer lugar en buscar una alternativa de solución a un problema, siendo esta la mala calidad de un camino de acceso a los campos de cultivo de la comunidad, posteriormente se aplican técnicas experimentales en campo, para la extracción de muestras representativas de suelo natural del camino agrícola, teniendo conocimientos teórico y práctico de una estabilización química de suelos con diferentes tipos de sales, las cuales

se realizarán mediante ensayos de laboratorio y cálculos de gabinete, los cuales nos darán resultados que nos servirán para proponer la solución de mejora de las propiedades geomecánicas del suelo natural, tales como la densidad, resistencia a la compresión y la impermeabilidad, y se verificará si la utilización de las sales causa algún efecto en la vegetación circundante, gracias a los resultados se realizará las debidas conclusiones respecto a la estabilización química de suelos con sus respectivas recomendaciones.

En el primer capítulo del proyecto se realiza una presentación teórica del motivo por el cual se realizará una estabilización química de suelos con sales, justificando un enfoque global del proyecto, identificando los objetivos que representarán las metas que queremos alcanzar para establecer un criterio en la selección y secuencia del contenido, teniendo ya definido el propósito, poder desglosar puntualmente un problema para posteriormente utilizarlo en nuevas situaciones, teniendo en cuenta los factores que influyen, tanto las variables dependientes e independientes, generando una hipótesis confiable.

En el segundo capítulo del proyecto es importante tener el conocimiento teórico general de una estabilización de suelos, tanto en su definición como en sus características, que nos permita poder desarrollarlo de manera práctica. Todo el fundamento teórico estará desarrollado en primer lugar con una definición general de una estabilización de suelos, cuantos métodos o tipos de estabilizaciones hay, ya definiendo el tipo de estabilización que se desarrollará en el presente proyecto, siendo una estabilización química se proporcionará información de los tipos de sales que se puedan emplear, una vez desarrollada esta parte se explicará qué propiedades del suelo se llegará a mejorar, siendo una parte importante, ya que es el objetivo de este proyecto, como parte final se explicará el efecto de las sales en la vegetación circundante.

Este capítulo es considerado uno de los más importantes de todo el proyecto, ya que aquí es donde se desarrollará de manera práctica todas las técnicas y procedimientos de una estabilización química de suelos, como se ejecuta paso a paso. Se empieza realizando una recopilación de información, exploración y evaluación del tramo en estudio, es decir la ubicación y características de la zona donde nos podrá dar un enfoque de las circunstancias de la zona del proyecto, ya definiendo el tramo se procederá a realizar el muestreo, del cual se extraerá unas muestras del material que conforma la sub rasante del tramo, para

poder realizar los ensayos de laboratorio, que incluyen ensayos para determinar características esenciales del suelo, los ensayos para la estabilización química del suelo y ensayos de control para verificar el efecto de las sales en la vegetación circundante, con esto realizar los cálculos basándose en nuestros resultados de laboratorio, para poder concluir con un análisis de resultados.

En este capítulo se enfocará en la parte final del proyecto, donde una vez realizado el análisis de resultados obtenidos del laboratorio, se puede realizar las debidas conclusiones respecto a la estabilización química de suelos, donde se explicará si los objetivos se llevaron a cabo con éxito y si la hipótesis planteada resultó verdadera o falsa, finalizando con las recomendaciones que se originan durante el proceso de realización del proyecto, siendo recomendaciones desde un punto de vista mitológico, académico y práctico.

CAPÍTULO II

**CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES
DE LOS PAVIMENTOS Y LA
ESTABILIZACIÓN CON SALES**

CAPÍTULO II

CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES DE LOS PAVIMENTOS Y LA ESTABILIZACIÓN CON SALES

2.1 Pavimentos

En ingeniería civil, el pavimento forma parte del firme y es la capa constituida por uno o más materiales que se colocan sobre el terreno natural o nivelado, para aumentar su resistencia y servir para la circulación de personas o vehículos. Entre los materiales utilizados en la pavimentación urbana, industrial o vial están los suelos con mayor capacidad de soporte, los materiales rocosos, el hormigón y las mezclas asfálticas. En la actualidad se encuentra en investigación pavimentos que ayudan al medio ambiente como el formado por noxer.

Tienen como función el permitir el tránsito de vehículos:

- Con seguridad.
- Con comodidad.
- Con el costo óptimo de operación.
- Superficie uniforme.
- Superficie impermeable.
- Color y textura adecuados.
- Resistencia a la repetición de cargas.
- Resistencia a la acción del medio ambiente.
- Que no transmita a las capas inferiores esfuerzos mayores a su resistencia.

Es de gran importancia contar con caminos y vías pavimentadas reduce los tiempos de traslado, ya que tanto peatones como vehículos se pueden desplazar de forma sencilla y rápida por la población y zonas cercanas. Otro aspecto trascendental es la creación de empleos directos e indirectos para las localidades y ciudades. El contar con más áreas pavimentadas también beneficia a las zonas urbanas cercanas. Ya que así se pueden evitar cuellos de botella y el tráfico en determinados puntos, esto gracias a que se cuentan con más vías de salida o acceso a lugares donde antes solo existía una.

Relacionado al movimiento de mercancías locales, la pavimentación de caminos y carreteras permite llevar o traer productos en menor tiempo desde puertos, vías férreas y aeropuertos o zonas fronterizas.

2.2 Tipos de pavimentos

Existen diferentes tipos de pavimentos, los cuales pueden ser clasificados en:

- Pavimentos asfálticos o flexibles.
- Pavimentos de concreto o rígidos.
- Pavimentos articulados.

2.2.1 Pavimentos asfálticos o flexibles

Se denomina pavimento flexible a aquel cuya estructura total se deflecta o flexiona dependiendo de las cargas que transitan sobre él. El uso de pavimentos flexibles se realiza fundamentalmente en zonas de abundante tráfico como puedan ser vías, aceras o parkings.

Figura 2.1: Pavimento flexible



Fuente: <https://inforcivil.com/que-es-pavimento-en-carreteras>

Se entenderá por pavimento flexible aquel que está compuesto por una capa o carpeta asfáltica es decir el pavimento flexible utiliza una mezcla de agregado grueso o fino (piedra machacada, grava y arena) con material bituminoso obtenido del asfalto o petróleo,

y de los productos de la hulla. Esta mezcla es compacta, pero lo bastante plástica para absorber grandes golpes y soportar un elevado volumen de tránsito pesado.

Figura 2.2: Carpeta asfáltica



Fuente: <https://www.construar.com.ar/2020/07/8928-licitaron-materiales-para-conservacion-de-la-red-vial-de-san-juan-955-millones/>

2.2.1.1 Características de pavimento flexible

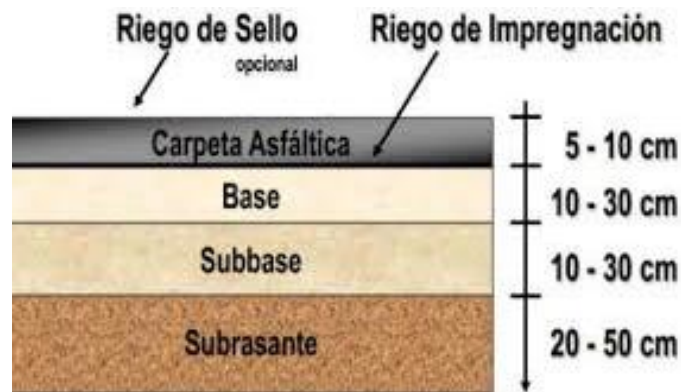
Los pavimentos flexibles se caracterizan por estar conformados principalmente de una capa bituminosa, que se apoya de otras capas inferiores llamadas base y subbase; sin embargo, es posible prescindir de estas capas dependiendo de la calidad de la sub rasante y de las necesidades de cada obra. Cada capa recibe las cargas por encima de la capa, se extiende en ella, entonces pasa estas cargas a la siguiente capa inferior.

Por lo tanto, la capa de más abajo en la estructura del pavimento, recibe menos carga. Con el fin de aprovechar al máximo esta propiedad, las capas son generalmente dispuestas en orden descendente de capacidad de carga, por lo tanto, la capa superior será la que posee la mayor capacidad de carga de material (y la más cara) y la de más baja capacidad de carga de material (y más barata) irá en la parte inferior.

2.2.1.2 Componentes de pavimento flexible

Los pavimentos flexibles son formados por una carpeta bituminosa apoyada generalmente sobre dos o tres capas no rígidas, la base, subbase y sub rasante. No obstante, puede prescindirse de cualquiera de estas capas dependiendo de las necesidades particulares de cada obra.

Figura 2.3: Sección transversal de pavimento flexible



Fuente: <https://es.slideshare.net/kenolivo1/presentación>

Carpeta asfáltica. - La carpeta asfáltica es la parte superior del pavimento flexible que proporciona la superficie de rodamiento, es elaborada con material pétreo seleccionado y un producto asfáltico dependiendo del tipo de camino que se va a construir, las principales características que debe cumplir el pétreo son las siguientes:

- a) Un diámetro menor de una pulgada y tener una granulometría adecuada.
- b) Deberá tener cierta dureza, para lo cual se le efectuarán los ensayos de desgaste, los ángulos, intemperie acelerados, densidad y durabilidad.
- c) La forma de la partícula deberá ser lo más cúbica posible, recomendamos no usar material en forma de laja o aguja, pues se rompen con facilidad alterando la granulometría y pudiendo provocar fallas en la carpeta, se efectuarán pruebas de equivalente de arena, ya que los materiales finos en determinados porcentajes no resultan adecuados.

Capa base. - Es la capa de material que se construye sobre la subbase. Los materiales con los que se construye deben ser de mejor calidad que los de la subbase y su función es la

de tener la resistencia estructural para soportar las presiones transmitidas por los vehículos. Tener el espesor suficiente para que pueda resistir las presiones transmitidas a la sub base. Aunque exista humedad, la base no debe de presentar cambios volumétricos perjudiciales.

La capa base tiene las siguientes funciones:

- Reducir las tensiones verticales que las cargas por eje ejercen sobre las capas sub-base y suelo natural.
- Reducir las deformaciones de tracción que las cargas por eje ejercen a la capa de revestimiento asfáltico.
- Permitir el drenaje del agua que se infiltra en el pavimento, a través de drenajes laterales longitudinales.

Capa subbase. - Es la capa de material que se construye directamente sobre la terracería y su función es reducir el costo de pavimento disminuyendo el espesor de la base. Proteger a la base aislándola de la terracería, ya que, si el material de la terracería se introduce en la base, puede sufrir cambios volumétricos generados al cambiar las condiciones de humedad, dando como resultado una disminución en la resistencia de la base. Proteger a la base impidiendo que el agua suba por capilaridad. Transmitir y distribuir las cargas a las terracerías.

Capa sub rasante. – Generalmente, es el terreno natural en la cual se apoya toda la estructura del pavimento, es decir, que no forma parte de la estructura en sí. Sin embargo, la capacidad soporté de la sub rasante es un factor básico que afecta directamente la selección de los espesores totales de las capas del pavimento. Su finalidad es resistir las cargas que el tránsito transmite al pavimento, transmitir y distribuir las cargas al cuerpo del terraplén, evitar que los materiales finos plásticos del cuerpo del terraplén contaminen el pavimento y economizar los espesores de pavimento.

2.2.2 Pavimentos de concreto o rígidos

Un pavimento rígido consiste básicamente en una losa de concreto simple o armado, apoyada directamente sobre una base o subbase. La losa, debido a su rigidez y alto módulo

de elasticidad, absorbe gran parte de los esfuerzos que se ejercen sobre el pavimento, lo que produce una buena distribución de las cargas de rueda, dando como resultado tensiones muy bajas en la sub rasante.

Figura 2.4: Pavimento rígido



Fuente: <https://www.arkiplus.com/pavimento-rigido>

Se compone de losas de concreto hidráulico que en algunas ocasiones presenta un armado de acero, tiene un costo inicial más elevado que el flexible, el mantenimiento que requiere es mínimo y solo se efectúa (comúnmente) en las juntas de las losas.

Figura 2.5: Losa de concreto



Fuente: <http://laalertaverde.blogspot.com/2012/12/cemex-presenta-beneficios-de-pavimentar.html>

2.2.2.1 Características de pavimento rígido

Este tipo de pavimento se caracteriza por transferir la carga hacia un área más amplia debido a que tiene una excelente resistencia a la flexión. A diferencia de un pavimento flexible, este no se fabrica con muchas capas de materiales. Por lo tanto, el pavimento rígido es colocado directamente sobre un material sub rasante que se encuentre bien compacto o sobre una sola capa de material granular. Como solo hay una capa entre el hormigón y la sub rasante, esta capa puede denominarse como capa base o subbase.

En el pavimento rígido, la carga relacionada con el tráfico vehicular hace que la carretera se comporte como una capa elástica apoyada sobre un medio viscoso. Para ello se construye utilizando cemento Portland simple. En cuanto a su diseño, se lo hace aplicando la teoría de placas en vez de la teoría de capas, como se lo hace con el pavimento flexible, asumiendo una placa elástica apoyada sobre una capa base viscosa.

2.2.2.2 Componentes de pavimento rígido

Los pavimentos rígidos son formados por la sub rasante, subbase, y losa o superficie de rodadura.

Figura 2.6: Sección transversal de pavimento rígido



Fuente: <http://alicaresp.com/2019/01/14/conceptos-basicos-de-pavimentos>

Sub rasante. - La sub rasante es el soporte natural, preparado y compactado, en la cual se puede construir un pavimento. La función de la sub rasante es dar un apoyo razonablemente uniforme, sin cambios bruscos en el valor soporte, es decir, mucho más

importante es que la sub rasante brinde un apoyo estable a que tenga una alta capacidad de soporte. Por lo tanto, se debe tener mucho cuidado con la expansión de suelos.

Es la capa de terreno de una carretera que soporta la estructura de pavimento y que se extiende hasta una profundidad que no afecte la carga de diseño que corresponde al tránsito previsto. Esta capa puede estar formada en corte o relleno y una vez compactada debe tener las secciones transversales y pendientes especificadas en los planos finales de diseño.

Subbase. - La capa de subbase es la porción de la estructura del pavimento rígido, que se encuentra entre la sub rasante y la losa rígida. Consiste de una o más capas compactas de material granular o estabilizado; la función principal de la subbase es prevenir el bombeo de los suelos de granos finos. La subbase es obligatoria cuando la combinación de suelos, agua, y tráfico pueden generar el bombeo. Tales condiciones se presentan con frecuencia en el diseño de pavimentos para vías principales y de tránsito pesado.

Cumple una cuestión de economía, ya que nos ahorra dinero al poder transformar un cierto espesor de la capa de base a un espesor equivalente de material de subbase (no siempre se emplea en el pavimento), impide que el agua de las terracerías ascienda por capilaridad y evitar que el pavimento sea absorbido por la sub rasante. Deberá transmitir en forma adecuada los esfuerzos a las terracerías.

Losa. - Es la capa superior de la estructura de pavimento, construida con concreto hidráulico, por lo que, debido a su rigidez y alto módulo de elasticidad, basan su capacidad portante en la losa, más que en la capacidad de la sub rasante, dado que no usan capa de base. La losa es de concreto de cemento Portland. El factor mínimo de cemento debe determinarse a base de ensayos de laboratorio y por experiencia previas de resistencia y durabilidad. Se deberá usar concreto con aire incorporado donde sea necesario proporcionar resistencia al deterioro superficial debido al hielo-deshielo, a las sales o para mejorar la trabajabilidad de la mezcla.¹

¹ Jiménez Calva J. S., (2004), Texto guía pavimentos, Universidad Mayor de San Simón, Facultad de Ciencias y Tecnología, Cochabamba-Bolivia.

2.2.3 Pavimentos articulados

Los pavimentos articulados son aquellos en los cuales la capa superior o acabado del pavimento está constituida por elementos prefabricados de concreto (adoquines). Estos se elaboran mecánicamente, lo que permite obtener un producto de gran homogeneidad, en sus dimensiones, forma, resistencia a la compresión, desgaste y a la absorción de agua, lo que le asegura una larga vida útil. Sobre una base adecuada, conforman una superficie apta para soportar la acción del rodamiento de vehículos y facilitar el escurrimiento de las aguas. Así se consigue, que la fracción de carga transmitida a la base por el elemento, sea igual al 40% de la carga que le es aplicada.

Figura 2.7: Pavimento articulados



Fuente: <http://pavimentosingunimeta.blogspot.com/p/pavimento-articulado.html>

Los pavimentos de adoquines poseen unas características particulares que se traducen en ventajas, sobre los otros tipos de pavimento, en varios aspectos específicos:

- Los adoquines que conforman la capa de rodadura son elementos prefabricados que llegan listos al lugar de la obra; por lo tanto, su calidad se controla en fábrica; para su verificación se dispone de ciertas normas “adoquines de hormigón”. La construcción de la capa de rodadura involucra, además de la colocación de los adoquines, el llenado de las juntas y la compactación de la capa terminada.

- Sin embargo, el de adoquines es un pavimento de muy fácil terminado, donde no intervienen procesos térmicos, ni químicos, ni períodos de espera. Debido a la sencillez del proceso constructivo, toda la estructura del pavimento se puede construir y dar al servicio en un mismo día, por lo cual las interrupciones en el tráfico son mínimas y se logran economías en tiempo, equipos, materiales, costos financieros y sociales; además, como se trabaja con pequeñas zonas a la vez, cualquier área se puede adoquinar por etapas con lo cual no se altera ninguna economía de escala, cosa que sí ocurriría con otros tipos de pavimento; esto resulta especialmente útil para la pavimentación de unas cuantas vías cuando no se dispone de los recursos completos para acometer un plan a gran escala; se puede, por lo tanto, adoquinar en varias etapas, a medida que se vayan produciendo las piezas o se obtengan los recursos.
- Todos los procesos que intervienen en la construcción son sencillos y requieren de la utilización de poca maquinaria.
- Como la labor de colocación de las piezas es fundamentalmente artesanal, se utiliza mano de obra, que, según se organice el proceso constructivo, se puede multiplicar al crear varias frentes de trabajo simultáneamente.
- Como los adoquines son piezas pequeñas que no están unidas rígidamente unas con otras, el pavimento de adoquines se adapta a cualquier variación en el alineamiento horizontal o vertical de la vía sin necesidad de elaborar juntas de construcción.
- La capa de rodadura es quizá el elemento más costoso de cualquier pavimento. Cuando se presenta una falla en los pavimentos o cuando hay que instalar o reparar las redes de servicios que van enterrados por la vía, es indispensable retirar, y con esto destruir, las distintas capas del pavimento.
- Cuando se tiene un pavimento de adoquines, la capa de rodadura es recuperable, pues como no van pegados unos con otros se pueden retirar y almacenar ordenadamente para reutilizarlos luego, en el mismo o en otro lugar, para la construcción de un nuevo pavimento. Esta propiedad es la que hace que el pavimento de adoquines sea especial, pues se puede reparar fácilmente y, por lo tanto, resulta ideal para pavimentar aquellas vías que aún no tengan completas las redes de servicios.

- El mantenimiento de los pavimentos de adoquines es muy simple. Además de la reparación de las zonas que por problemas constructivos puedan presentar algún hundimiento, el pavimento de adoquines solo requiere que se le retire la vegetación que pueda aparecer dentro de las juntas, en aquellas zonas abandonadas o por donde no exista tráfico permanente, y del llenado, mediante barrido de arena fina, de las juntas que se hayan vaciado.
- Nunca requiere de sobre capas para mantener un buen nivel de servicio.²

Figura 2.8: Capa de rodadura de adoquines de concreto



Fuente: <https://www.tecnocarreteras.es/2012/11/18/una-maquina-para-adoquinar-automaticamente-las-calles/>

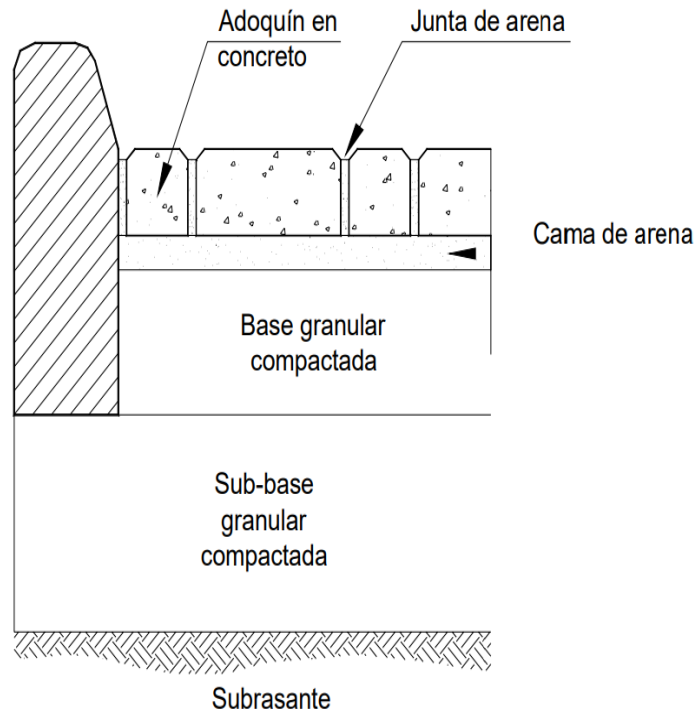
2.2.3.1 Componentes de pavimento articulado

Un pavimento articulado está compuesto por una capa de rodadura de adoquines de concreto; la capa de base y la de subbase cuando la anterior exista y opcionalmente una

² [https://www.vialitec.com/contenido/ventajas-y-aplicaciones-de-pavimentos-articulados-\(adoquines-de-concreto\)](https://www.vialitec.com/contenido/ventajas-y-aplicaciones-de-pavimentos-articulados-(adoquines-de-concreto))

capa de mejoramiento de la sub rasante. Es importante que este tenga unas restricciones laterales de confinamiento adecuado.

Figura 2.9: Sección transversal pavimento articulados



Fuente: Diseño de pavimentos articulados para tráfico medio y alto

Capa de rodadura de adoquines de concreto. - Esta capa debe soportar directamente las cargas y resistir el desgaste producido por la abrasión del tráfico al desplazarse, en conjunto con la agresión del clima. Está conformada por un conjunto de adoquines separados por juntas selladas con arena, apoyado sobre una capa delgada de arena. Debido a que se entaba, se establece como una superficie en la que los adoquines deben actuar de forma mancomunada en un sistema que se asemeja al de un material homogéneo y flexible, que combina la durabilidad del concreto con la flexibilidad característica de los pavimentos asfálticos.

- **Adoquines de concreto.** - Son elementos macizos, prefabricados, de espesor uniforme e iguales entre sí, con forma de prisma recto tal que, al colocarlos sobre una superficie, encajen unos con otros de manera que solamente queden juntas entre ellos.

- **Junta de arena.** - Está constituido por arena fina que se coloca para llenar las juntas entre los adoquines. Sirve como sello de las mismas y garantiza el buen comportamiento a flexión y la capacidad portante de la superficie del pavimento.
- **Capa de arena.** - Capa de arena gruesa y limpia de poco espesor sobre la cual se colocan los adoquines. Está compuesta por partículas resistentes a la degradación, con una granulometría uniforme que facilita su colocación, la infiltración, y el flujo libre de agua.

Capas de cuerpo. – El cuerpo está compuesto por la capa base, subbase y la sub rasante o capa de conformación

- **Base.** - Es la principal capa estructural del pavimento, colocada directamente bajo la capa de arena. Esta capa es la que proporciona mayor capacidad estructural y suministra un apoyo uniforme, estable y permanente al pavimento. Para tráficos medio y alto, es recomendable emplear una base negra (granular con ligante asfáltico) o una base granular con ligante hidráulico. Es importante anotar en este punto que lo anterior es una de las principales diferencias entre el diseño para tráfico bajo y para tráfico medio y alto, pues en el primero es común considerar una base no tratada.
- **Subbase.** - Capa estructural localizada directamente bajo la base. Consta de un material granular no tratado o estabilizado según los parámetros de diseño. Para vías de bajo tráfico se puede reemplazar por un tratamiento de la sub rasante.

Su función es:

- a) Sirve de capa de drenaje al pavimento.
- b) Controlar o eliminar en los posibles cambios de volumen, elasticidad y plasticidad perjudiciales que pudieran tener el material de la subrasante.
- c) Controlar la ascensión capilar del agua provenientes de las capas friáticas cercanas protegiendo así al pavimento contra los hinchamientos que se producen en épocas de helada. Este hinchamiento es causado por el congelamiento del agua capilar, fenómeno que se observa especialmente en los suelos limosos donde la ascensión capilar del agua es considerable.

- **Capa de conformación.** - Capa de transición entre la sub rasante y el resto de estructura del pavimento, que funciona como capa estructural pues mejora las características del suelo de sub rasante y como plataforma de trabajo para proteger la sub rasante durante la etapa de construcción, especialmente sobre subrasantes de baja capacidad de soporte. Puede ser material de la sub rasante que haya sido modificado o un material diferente.

La Sub rasante es la capa en la que se apoya la estructura del pavimento y la característica especial que define la propiedad de los materiales que componen la sub rasante se conoce como módulo de resiliencia (Mr).

Su finalidad es resistir las cargas que el tránsito transmite al pavimento, transmitir y distribuir las cargas al cuerpo del terraplén, evitar que los materiales finos plásticos del cuerpo del terraplén contaminen el pavimento y economizar los espesores de pavimento.³

2.3 Estabilización en pavimentos

En la construcción de una obra de ingeniería es natural que se prefiera utilizar materiales de óptima calidad. Sin embargo, en muchos casos prácticos, no es posible alcanzar este ideal a costos razonables comparados con la utilidad de la obra y en un lapso de construcción compatible con los programas establecidos previamente. Lo anterior es especialmente cierto en la construcción de pavimentos para carreteras y para calles en ciudades, casos en los cuales puede ocurrir que dichos materiales sean difíciles de conseguir en la zona del proyecto y que el costo de la extracción y transporte de los materiales que cumplan con los requisitos de calidad deseados sean tales que resulte muy costosa y onerosa la construcción de un proyecto vial. En estas condiciones, es entonces obligatorio o deseable emplear materiales de características inferiores a las ideales, pero mejorándolos mediante determinados procesos que, a la postre, den como resultado un material adecuado para los fines que se persiguen, a un costo relativamente bajo comparado con el costo de un material ideal. De estas consideraciones, nació la necesidad

³Sánchez Castillo X. A., Diseño de pavimento articulados, (2003), Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Bogotá, D.C.

de estabilizar o mejorar los suelos para la construcción de pavimentos y otras obras de ingeniería, tales como terraplenes, protección de las caras de las presas, revestimientos de canales, etc.

Existen en la práctica diversos métodos para estabilizar los suelos; cada método, utiliza diferentes agentes estabilizadores, entre los que se pueden encontrar: La cal, el cloruro de sodio, el cemento, los asfaltos, las imprimaciones reforzadas, la Bischofita entre otros; incluso se ha utilizado la combinación de diferentes productos estabilizadores, así como la mezcla de suelos con el fin de dar soluciones óptimas a problemas particulares. Según el Manual para el diseño de carreteras no pavimentadas, la capacidad portante o CBR (California Bearing Ratio) de los materiales de las capas de sub rasante y del afirmado, deberá estar de acuerdo a los valores de diseño; no se admitirán valores inferiores.

En consecuencia, sí los materiales a utilizarse en la carretera no cumplen las características generales previamente descritas, se efectuará la estabilización correspondiente del suelo. De esta forma, se podrán utilizar suelos de características marginales como sub rasante o en 3 capas inferiores de la capa de rodadura y suelos granulares de buenas características, pero de estabilidad insuficiente (CBR menor al mínimo requerido) en la capa de afirmado. La estabilización puede ser granulométrica o mecánica, conformada por mezclas de dos o más suelos de diferentes características, de tal forma que se obtenga un suelo de mejor granulometría, plasticidad, permeabilidad o impermeabilidad, etc. También la estabilización se realiza mediante aditivos que actúan física o químicamente sobre las propiedades del suelo.

Los procesos que conducen a la sustitución de materiales de acuerdo con las consideraciones expresadas anteriormente se pueden reducir, en general, a dos, denominados: “estabilización” y “mejoramiento” de suelos. En sentido general, estabilizar un suelo significa mejorar sus propiedades (tales como resistencia, durabilidad, plasticidad, permeabilidad, densidad, etc.)

Por medio de cualquier sistema, que generalmente consiste en uno de los siguientes:

- Mezclas de agregados (estabilización mecánica).

- Mezclas de aditivos (cemento, cal viva o apagada, asfalto, cloruro de calcio o de sodio, cenizas del alto horno, anilina furfural, acrilato de calcio, lignina de cromo, etc.).
- Compactación apropiada (la cual se puede emplear sola o en combinación obligada con cualquiera de los otros procedimientos mencionados anteriormente).

Es necesario, además, que el suelo mejorado conserve permanentemente sus nuevas propiedades. De acuerdo con lo dicho antes, normalmente no se consideran como estabilizaciones las bases construidas con materiales que son naturalmente estables, tales como piedra triturada, concreto, etc., pero sí todos aquellos tratamientos que permitan mejorar la resistencia de un suelo mediante la reducción de su susceptibilidad a la acción del agua y de las cargas de tránsito. Por otra parte, al tratar suelos arcillosos es necesario distinguir los términos “modificación” y “estabilización”, especialmente cuando se trata de aditivos como la cal.

a. Modificación

La modificación es un tratamiento que se le da a la arcilla mezclándole porcentajes relativamente pequeños de un aditivo para producir, por lo menos, los siguientes efectos benéficos:

- Reducir la plasticidad.
- Reducir los cambios potenciales de volumen.
- Mejorar sustancialmente la trabajabilidad.

b. Estabilización

La estabilización consiste en mezclar al suelo cohesivo una cantidad suficiente de aditivo para producir reacciones químicas que cementan las partículas de suelo, de tal manera que la resistencia del suelo aumenta de forma significativa. Normalmente, la estabilización requiere mayor porcentaje de aditivo que la modificación.

En resumen, se dice que un suelo es estable cuando muestra en estado seco o húmedo una resistencia marcada y sostenida a la deformación bajo la aplicación de cargas repetidas o continuas. En un principio, el término estabilización significaba incremento en un sentido cualitativo únicamente. recientemente, la estabilización se ha asociado con los valores

cuantitativos de resistencia y durabilidad, los cuales están relacionados con su funcionamiento. Estos valores cuantitativos se expresan en función de la resistencia a la compresión o al esfuerzo cortante o de algunas medidas de capacidad de soporte o de flexión bajo carga (para indicar la capacidad de soporte) y en función de la absorción, ablandamiento y reducción de resistencia directa al hielo y deshielo, humedecimiento y secado, para indicar la durabilidad de una construcción estabilizada.

2.4 Tipos de estabilización

Los suelos pueden ser mejorados por medios mecánicos, químicos, eléctricos y térmicos. El grado de estabilización obtenido puede mostrar diferencias dentro de un método dado y también entre los diferentes métodos. Ya que existen tipos distintos de suelos que difieren de forma marcada en cuanto a sus propiedades y puesto que suelos diferentes reaccionan de manera distinta a los diversos métodos, es evidente que no se tengan solo muchas formas de estabilización, sino también amplias variaciones en los grados de estabilidad alcanzados. La siguiente es una lista de los diferentes tipos de estabilización que se han utilizado o que pueden utilizarse en la construcción de carreteras; sobre algunos de ellos, ya mencionados antes, se tratará más adelante:

- a) Mecánicos (bases granulares estabilizadas por mezclas de varios materiales naturales).
- b) Físicos (geotextiles)
- c) Químicos (cemento, cal viva, apagada o puzolánica, cloruro de calcio, cloruro de sodio, anilina furfural, acrilato de calcio, lignina de cromo, etc.).

2.4.1 Estabilización mecánica

La estabilización mecánica consiste en compactar el suelo de forma estática o dinámica para aumentar su densidad, su resistencia mecánica, disminuir su porosidad y su permeabilidad. Puede incluir también previamente la mezcla de suelos de diferente gradación para obtener la especificación apropiada.

Figura 2.10: Estabilización mecánica



Fuente: Estudio comparativo de la estabilización de suelos arcillosos con valvas de moluscos para pavimentación

Los objetivos ingenieriles de dicho procedimiento son principalmente:

- Aumentar su capacidad portante.
- Disminuir el asentamiento de las estructuras.
- Controlar cambios volumétricos indeseables.
- Reducir la permeabilidad al agua.
- Aumentar la estabilidad de los taludes.

Se denomina compactación de suelos al proceso mecánico por el cual se busca mejorar las características de resistencia, compresibilidad y esfuerzo-deformación de los suelos.

La compactación de suelos es el proceso artificial por el cual las partículas de suelo son obligadas a estar más en contacto las unas con las otras, mediante una reducción del índice de vacíos, empleando medios mecánicos; es la primera etapa del proceso de estabilización de los suelos que tiene como objetivo principal el obtener un suelo de tal manera estructurado que posea y mantenga un comportamiento mecánico adecuado a través de toda vida útil de la obra.

La compactación ha figurado entre las técnicas de construcción desde las épocas más remotas de la que se tiene noticia. Los métodos de apisonado por el paso de las personas

o animales se utilizaron en épocas muy lejanas, como por ejemplo en la construcción de grandes obras hidráulicas en diversas partes de Asia.

Las principales variables que afectan el proceso de compactación de los suelos son:

- **La naturaleza del suelo:** La clase de suelo arcilloso, grueso o finos con la que se trabaja es una de las variables que influye de manera decisiva en el proceso de compactación de los suelos; tanto es así que las técnicas y resultados que se obtengan responderán a un tipo de suelo.
- **El método de compactación:** Los métodos de compactación pueden ser por impactos, por amasado, por aplicación de carga estática o por vibración.
- **La energía específica:** Entendida como tal a la energía que se entrega al suelo por unidad de volumen; es decir, es la energía de compactación.
- **El contenido de agua original del suelo:** Se refiere este concepto al contenido natural de agua que el suelo poseía antes de añadirle o quitarle humedad para compactarlo, en busca del contenido óptimo.
- **La temperatura:** Ejerce un importante efecto en los procesos de compactación de campo, en primer lugar, por efectos de evaporación del agua incorporada al suelo o de condensación de la humedad ambiente en el mismo.
- **Otras variables:** Otras variables que afectan el proceso de compactación de los suelos son el sentido de agua del suelo, la recompactación, el contenido de sales, la naturaleza de la arcilla, el número de pasadas del equipo de compactación por cada punto y el número de golpes del pisón compactador.

2.4.2 Estabilización física

Las estabilizaciones físicas de mejoramiento de suelos son:

❖ **Confinamiento (suelos no cohesivos):**

El confinamiento de un depósito de suelo puede lograrse con la aplicación de columnas de grava, cuya construcción implica el reemplazo parcial de entre un 15 y 35% del suelo, que usualmente penetra hasta alcanzar un estrato resistente. La presencia de la columna crea un material compuesto de menor compresibilidad

media y de mayor resistencia al corte que la del suelo natural. Los procedimientos para su construcción incluyen la vibro sustitución, que consiste en introducir un tubo por vibración, con inyección en la hinca para llegar hasta la profundidad máxima. El orificio se rellena luego con material de aporte (grava de tamaños en el rango de 2 a 80 mm); o bien con pilotes de grava, para lo cual se encamisa la perforación y, alcanzado el nivel previsto se la rellena, para luego extraer la camisa.

❖ **Preconsolidación (suelos cohesivos):**

La preconsolidación se logra aplicando una sobrecarga sobre un depósito de suelo, la que debe exceder la carga máxima que este va a soportar. Se busca así que la consolidación parcial sea equivalente al mayor grado que alcanzará con la carga máxima, la que requerirá mayor tiempo para producirse.

El proceso puede acelerarse por medio de drenes verticales, conectados en su parte superior por un manto de arena que permita la liberación de la humedad.

❖ **Mezclas de suelos:**

La mezcla de suelos requiere la realización de una serie de ensayos, con el fin de evaluar las características de cada uno de los tipos de suelo que se desean mezclar. Este método requiere la remoción de gran cantidad de material de la superficie y no resulta práctico para el mejoramiento mecánico de depósitos de gran profundidad, por lo que su uso se limita a obras viales.

❖ **Vibroflotación:**

La vibroflotación es un método apto para suelos granulares con un bajo contenido de finos. Consiste en introducir en el terreno un tubo con una cabeza vibratoria, cuya acción producirá un reacomodamiento de sus granos, lo que aumentará su densidad.

El método se aplica siguiendo una red de geometría diseñada en la superficie del terreno, de forma tal que el tratamiento alcance la totalidad del depósito. Tiene la ventaja de alcanzar profundidades importantes sin afectar edificaciones cercanas. Conforme se retira la cabeza vibratoria, el espacio vacío se rellena con material de

aporte. En la superficie puede ser necesario agregar un cierto volumen de material para compensar la pérdida de volumen por el reacomodo de los granos.

2.4.3 Estabilización química

La estabilización química se refiere al cambio de las propiedades de suelos logrado mediante la adición de cementantes orgánicos, inorgánicos o sustancias químicas especiales. Es una tecnología que se basa en la aplicación de un producto químico, genéricamente denominado estabilizador químico, el cual se debe mezclar íntima y homogéneamente con el suelo a tratar y curar de acuerdo a especificaciones técnicas propias del producto.

La aplicación de un estabilizador químico tiene como objetivo principal transferir al suelo tratado, en un espesor definido, ciertas propiedades tendientes a mejorar sus propiedades de comportamiento ya sea en la etapa de construcción y/o de servicio.

Las estabilizaciones químicas se realizan:

2.4.3.1 Con cemento

Se mezcla el suelo con cemento Portland, lo que genera dos procesos:

- a) Los silicatos cálcicos del cemento afectan al agua convirtiéndola en alcalina.
- b) La abundancia de calcio es usada por el suelo para modificar sus cargas superficiales, una vez que los iones de calcio son absorbidos por el suelo, el cemento se adhiere a sus partículas, para originar una cohesión que aumenta la resistencia al corte del material.

Para que el proceso sea aceptable es necesario modificar la humedad del material, compactar a la máxima densidad e incorporar suficiente cemento para que se reduzca la pérdida de peso o se produzcan cambios de volumen y humedad. Prácticamente todos los suelos pueden tratarse con este método, pero si los materiales son mal graduados se requerirá mayor cantidad de cemento para lograr el efecto deseado.

Figura 2.11: Distribución de cantidad de cemento



Fuente: <https://www.360enconcreto.com/blog/detalle/cemento/cemento-para-estabilización-de-suelos>

Figura 2.12: Estabilización química con cemento



Fuente: Estabilización de suelos con suelo – cemento

2.4.3.2 Con asfalto

Al mezclar las partículas granulares con asfalto, se produce un material más durable y resistente. También se le agregan algunas partículas finas para llenar los vacíos. Es importante el contenido de humedad del material al anexar el asfalto y también esperar a que se evaporen los gases que este contiene antes de tenderlo y compactarlo.

Figura 2.13: Estabilización química con asfalto



Fuente: Estabilización de suelos con emulsión asfáltica.

2.4.3.3 Con sales

Se forman a partir de la neutralización de un ácido con una base. Las sales normales tales como el cloruro de sodio (NaCl), cloruro de calcio (CaCl_2) o cloruro de potasio (KCl) son sales completamente neutralizadas, es decir que no contienen exceso de iones ácidos de hidrógeno (H^+) ni básicos de hidroxilo (OH^-). Se designan como sales ácidas aquellas que contienen exceso de iones de hidrógeno, como el bicarbonato de sodio (NaHCO_3) y a las que contienen exceso de iones hidroxilo se les designa como sales básicas. En el laboratorio, se han estudiado, un gran número de sales (NaCl , CaCl_2 , NaNO_3 , Na_2CO_3 , BaCl_2 , MgCl_2 , KCl) pero tanto la economía como su disponibilidad han hecho que solamente se utilicen algunas, siendo las más utilizadas el cloruro de sodio y el cloruro de calcio.⁴

⁴ Montejo Piratova A., Montejo Piratova A., Montejo Fonseca A. (2018). Estabilización de Suelos, 1ra. edición, Bogotá.

Figura 2.14: Estabilización química con sales



Fuente: Manual de estabilización de suelo tratado con cal.

2.5 Tipo de sales

Las sales más comunes en las estabilizaciones de suelos son:

- a) Cloruro de sodio (NaCl)
- b) Cloruro de calcio (CaCl_2)
- c) Cloruro de potasio (KCl)

2.5.1 Cloruro de sodio (NaCl)

El cloruro de sodio, sal común o sal de mesa, denominada en su forma mineral como halita, es un compuesto químico con la fórmula NaCl. El cloruro de sodio es una de las sales responsable de la salinidad del océano y del fluido extracelular de muchos organismos. Es también el componente de la sal común, usada como condimento y conservante de alimentos.

Figura 2.15: Cloruro de sodio (sal común)



Fuente: <http://ingesport.blogspot.com/2012/10/reducir-el-consumo-de-sal.html>

En la antigüedad, el cloruro de sodio era muy apetecido como un bien transable y como condimento, y se remuneraba en la época preclásica romana a los soldados que construían la Vía Salaria, que empezaba en las canteras de Ostia hasta Roma, con un generoso *salarium argentum*. También era el salario de un esclavo, ya que se entregaba una pequeña bolsa con sal; por lo que la palabra asalariado tiene un significado etimológicamente peyorativo.

El cloruro de sodio disuelto en el mar o en grandes masas sólidas. Su composición química es NaCl y se trata de un complemento para una dieta equilibrada en la salud de los seres humanos, es mejor conocido como sal de mesa o sal común.

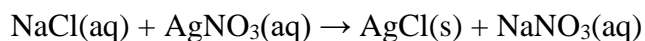
El cloruro de sodio se disuelve fácilmente en el agua y es insoluble o poco soluble en casi todos los demás líquidos. El cloruro de sodio no tiene olor, pero sí sabor, uno muy singular, es un sabor salado y tiene forma de cubos de cristal blanco. Básicamente, el cloruro de sodio es la sal o sal de mesa.

La sal de mesa común puede tener diferentes niveles de cloruro y de sodio. Tiene compuestos iónicos, es decir, sustancias diferentes, compuestas por un número igual de positivos de sodio, y con iones negativos en el cloro. Cuando estos caen en agua se disuelven, de tal manera que el cloruro de sodio es un conductor de electricidad y puede hacer que corrientes eléctricas pasen a través de él.

Características

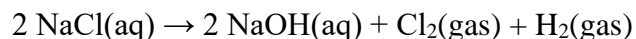
Propiedades químicas

Es un compuesto iónico formado por un catión sodio (Na^+) y un anión cloruro (Cl^-), y, puede sufrir las reacciones características de cualquiera de estos dos iones. Como cualquier otro cloruro iónico soluble, precipita cloruros insolubles cuando es agregado a una disolución de una sal metálica apropiada, como nitrato de plata:



Otro método para separar ambos componentes es mediante la electrólisis.

Si se aplica una corriente eléctrica continua con un elevado potencial a una salmuera alcalina, el producto anódico es gas dicloro (Cl_2) y los catódicos son hidróxido de sodio (NaOH) y dihidrógeno (H_2), electrólisis:



Como la mayoría de las sales iónicas confiere propiedades coligativas a sus disoluciones, es decir, es capaz de variar la presión de vapor de la disolución, elevar el punto de ebullición y descender el punto de congelación según su concentración molar.

- Solubilidad en agua. - 359 g/l en agua
- Producto de solubilidad. - $37,79 \text{ mol}^2$

Propiedades físicas

- Apariencia. - Incoloro; aunque parece blanco si son cristales finos o pulverizados.
- Densidad. - 2160 kg/ m^3 , $2,16 \text{ g/cm}^3$
- Fácil disolución en el agua 35.9 g/100 ml a 25° C
- Punto de fusión. - 1074 k (801° C)
- Punto de ebullición. - 1738 k (1465° C)
- Estructura cristalina. - f.c.c.
- Índice de refracción. - 1,544202
- Solubilidad en amoníaco 2.15 g/100 ml solubilidad en metanol 1.49 g/100 ml (Soluble en etilenglicol, glicerol, glicol y ácido fórmico)

- Insoluble solo en ácido clorhídrico
- pH neutro
- Masa molar de 58.443 g/mol
- No es inflamable y su densidad es de 2.165 g/cm³.
- No se obtiene ningún tipo de reacción ante otros compuestos químicos, de normal se requiere la adición de energía para alcanzar una reacción química (electrólisis de NaCl en agua y forma gas de cloro).⁵

2.5.2 Cloruro de calcio (CaCl₂)

El cloruro de calcio o cloruro cálcico es un compuesto químico, inorgánico, mineral utilizado como medicamento en enfermedades o afecciones ligadas al exceso o deficiencia de calcio en el organismo. Es una solución incolora. Se presenta en forma líquida en una concentración del 35% aproximadamente, o en escamas, en sacos de polietileno de 25 kg en pallets de 50 bolsas completando 1.250 kg por pallet.

Figura 2.16: Cloruro de calcio



Fuente: https://es.wikipedia.org/wiki/cloruro_de_calcio

El cloruro de calcio fabricado por EFICE es una solución incolora. Se presenta en forma líquida en una concentración del 35% aproximadamente, o en escamas al 60%, en bolsas de poliestireno de 25 kg en pallets de 55 bolsas, completando 1.375 kg por pallet.

- Higroscópico: El cloruro de calcio absorbe la humedad del aire o de la superficie.

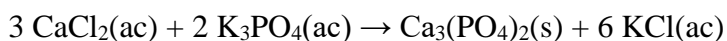
⁵ https://es.wikipedia.org/wiki/cloruro_de_sodio

- Delicuescente: El cloruro de calcio se disuelve en la humedad que absorbe formando una solución clara extremadamente resistente a la evaporación.
- Larga-duración: el cloruro de calcio retiene la humedad que absorbe por un período indefinido de tiempo.

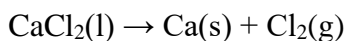
Características

Propiedades químicas

El cloruro de calcio puede dar una fuente de iones de calcio en una solución, por ejemplo, por precipitación porque muchos compuestos con el calcio son insolubles, por esa razón se utiliza como coagulante en algunos tipos de tratamientos de aguas residuales:



El cloruro de calcio fundido puede ser electrolizado depositándose calcio metálico en el cátodo y recogiendo cloro gaseoso en el ánodo:



Propiedades físicas

- Estado de agregación Sólido.
- Apariencia sólido blanco o incoloro.
- Densidad 2150 kg/m³; 2,15 g/cm³.
- Masa molar 110,99 g/mol.
- Punto de fusión 1045,15 K (772 °C).
- Punto de ebullición 2208,15 K (1935 °C).
- Estructura cristalina octaédrica, rutilo deformada⁶.

2.5.3 Cloruro de potasio (KCl)

El compuesto químico cloruro de potasio (KCl), también denominado muriato de potasio, es un haluro metálico compuesto de potasio y cloro. En su estado puro es inodoro. Se presenta como un cristal vítreo de blanco a incoloro, con una estructura cristalina cúbica

⁶ https://es.wikipedia.org/wiki/cloruro_de_calcio

centrada en las caras que se fractura fácilmente en tres direcciones. El cloruro de potasio se utiliza en medicina, aplicaciones científicas, procesamiento de alimentos y en ejecución legal por medio de inyección letal. Se presenta naturalmente como el mineral silvita y en combinación con cloruro de sodio como silvinita. Es un compuesto inorgánico.

Figura 2.17: Cloruro de potasio



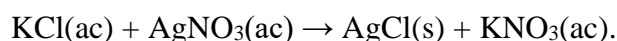
Fuente: <https://www.quiminet.com/articulos/conozca-las-aplicaciones-industriales-del-cloruro-de-potasio-2657523.htm>

El cloruro de potasio es una fuente de potasio y de cloro. El 48% del peso del cloruro de potasio corresponde al cloro y el 52% al potasio.

Características

Propiedades químicas

El cloruro de potasio puede reaccionar como una fuente de ion cloruro. Como cualquier otro cloruro iónico soluble, precipita cloruros insolubles cuando es agregado a una solución de una sal metálica apropiada como nitrato de plata:



Aunque el potasio es más electropositivo que el sodio, el KCl puede reducirse a metal por medio de una reacción con sodio metálico si el potasio es retirado por destilación, debido al Principio de Le Châtelier.

Este es el método principal para producir potasio metálico. La electrólisis utilizada para el sodio falla debido a la alta solubilidad del potasio en KCl líquido.

Propiedades físicas

- Estado físico: cristalino
- Color: blanco
- Olor: inodoro
- Punta/intervalo de fusión: 778 °C
- Punto /intervalo de ebullición: aprox. 1.420 °C
- Punto de inflamación: no aplicable
- Peligro de explosión: El producto no es explosivo.
- Densidad: aprox. 1,98 g/cm³; 20 °C
- Densidad aparente: aprox. 1.000 kg/m³
- Hidrosolubilidad: aprox. 340 g/l; 20 °C
- pH: neutro⁷

2.6 Propiedades de los suelos a estabilizar

Las propiedades de los suelos que más frecuentemente se estudian en problemas de estabilización son:

- a. Estabilidad volumétrica.
- b. Resistencia.
- c. Permeabilidad.
- d. Compresibilidad.
- e. Durabilidad.

Frecuentemente, es posible utilizar tratamientos que mejoren simultáneamente varias de esas propiedades, pero también se debe estar preparado para encontrar evoluciones contradictorias en la lista, de manera que el mejoramiento de una propiedad signifique el deterioro de otra u otras. No debe verse a la estabilización solo como una medida correctiva; algunos de los mejores usos de estas técnicas presentan, más bien, medidas preventivas contra condiciones adversas susceptibles de un ulterior desarrollo.

⁷ https://es.wikipedia.org/wiki/Cloruro_de_potasio

A continuación, se insiste un poco sobre las propiedades de los suelos más susceptibles de ser mejoradas por estabilización.

2.6.1 Estabilidad volumétrica

La expresión se refiere, por lo general, a los problemas relacionados con los suelos expansivos por cambio de humedad, relacionado con variaciones estacionales o con la actividad del ingeniero. La estabilización suele ofrecer una alternativa de tratamiento para estos suelos, diferente del uso de cargas, capas permeables, introducción de agua, etc., que forman la gama de líneas de acción más usual. Se trata de transformar la masa de arcilla expansiva bien sea en una masa rígida o en una granulada, con sus partículas unidas por lazos suficientemente fuertes como para resistir las presiones internas de expansión. Esto se logra por tratamientos químicos o térmicos. La experiencia, muy orientada por factores económicos, ha demostrado que los tratamientos químicos son útiles sobre todo para arcillas ubicadas cerca de la superficie del terreno, en tanto que los tratamientos térmicos se han aplicado más bien a arcillas más profundas.

En muchos de los casos de tratamientos de capas superficiales de arcilla expansiva, la economía impone estabilizar solamente la parte superior del manto, en un cierto espesor, y ello será suficiente siempre que se balancee correctamente la presión de expansión que producirá el espesor no tratado.

2.6.2 Resistencia

Existen varios métodos de estabilización que se han revelado útiles para mejorar la resistencia de muchos suelos. Sin embargo, antes de profundizar más en este aspecto, será preciso decir que todos ellos parecen perder mucho de su poder en el momento en que se tienen importantes contenidos de materia orgánica, circunstancia desafortunada, dado que, como es bien sabido, muchos de los más graves problemas de falta de resistencia ocurren precisamente en suelos orgánicos.

La compactación es de hecho una forma de estabilización mecánica a la que se recurre para incrementar la resistencia de los suelos como uno de sus objetivos más comunes. El empleo de mayores intensidades de compactación no siempre conduce a valores más altos

de la resistencia, muy especialmente si se considera la necesidad de mantener dicho parámetro en valores razonables durante tiempos largos. Algunas de las formas de estabilización más usadas para elevar la resistencia son las siguientes:

- Compactación.
- Vibroflotación.
- Precarga.
- Drenaje.
- Estabilización mecánica con mezclas de otros suelos.
- Estabilización química con cemento, cal o aditivos líquidos.

La estabilización con empleo de calor se ha utilizado también, aunque mucho más raramente.

2.6.3 Permeabilidad

No suele ser muy difícil modificar sustancialmente la permeabilidad de formaciones de suelo por métodos tales como la compactación, la inyección, etc. En materiales arcillosos, el uso de floculantes (por ejemplo, polifosfatos) puede reducir la permeabilidad también significativamente; el uso de floculantes (muchas veces hidróxido de cal o yeso) aumenta correspondientemente el valor de la permeabilidad. En la actualidad, se va disponiendo de algunas sustancias que introducidas en el suelo en forma de emulsión pueden reducir mucho su permeabilidad, si bien el uso de estas sustancias ha de ser cuidadosamente analizado, ya que no es raro que ejerzan efectos desfavorables en la resistencia del efecto cortante de los suelos.

2.6.4 Compresibilidad

La compactación es una forma rutinaria de estabilización que modifica fuertemente la compresibilidad de los suelos. Sin embargo, la compactación no es la única forma de estabilización que influye en la compresibilidad y, de hecho, puede decirse que todos los métodos de estabilización mencionados anteriormente tienen influencia en dicho concepto.

2.6.5 Durabilidad

Suelen involucrarse en este concepto aquellos factores que se refieren a la resistencia a la intemperie, a la erosión o a la abrasión del tráfico. De esta manera, los problemas de durabilidad en las vías terrestres suelen estar muy asociados a suelos situados relativamente cerca de la superficie de rodamiento. En rigor, estos problemas pueden afectar tanto a los suelos naturales como a los estabilizados, si bien es en estos últimos donde se producen los peores comportamientos, que suelen ser consecuencia de diseños inadecuados, tales como una mala elección del agente estabilizador o un serio error en su uso, tal como podría ser el caso cuando se ignora la bien conocida susceptibilidad de los suelos arcillosos estabilizados con cemento a la presencia con sulfatos.⁸

2.7 Métodos de estabilización con sales

2.7.1 Estabilización con cloruro de calcio (CaCl_2)

El cloruro de calcio se obtiene como un subproducto en forma de salmuera en algunos procesos industriales, aunque también se puede obtener de algunos arroyos y pozos naturales siendo la fuente más común el obtenido en la elaboración de carbonato de sodio mediante procedimientos químicos.

La solubilidad del cloruro de calcio es de 60 g aproximadamente, por cada 100 c.c. de agua destilada a 0° C, o de 159 g aproximadamente, por cada 100 c.c. de agua destilada a 100° C.

Se ha demostrado que con la adición de cloruro de calcio disminuyen las fuerzas de repulsión entre las arcillas, pero hay autores que inclusive aseguran que la película de agua que rodea a las partículas se ve eléctricamente reforzada con la adición del cloruro de calcio, a tal grado que se incrementa notablemente la cohesión aparente. Como en el intercambio catiónico se sustituye un ion Ca^{++} por 2 iones Na^+ , la doble capa se ve reducida en su espesor lo que hace que se reduzca el potencial eléctrico y en consecuencia

⁸ Montejo Piratova A., Montejo Piratova A., Montejo Fonseca A. (2018). Estabilización de Suelos, 1ra. edición, Bogotá.

se reduzcan las fuerzas de repulsión entre las partículas. Se ha encontrado un incremento en los pesos volumétricos hasta en un 11% con la adición de 0.5 a 3% de cloruro de calcio, según el tipo de suelo. Sin embargo, existen datos que reportan disminuciones en el peso volumétrico con respecto a un suelo arcilloso que no contenga el cloruro de calcio. Así también se tiene que el cloruro de calcio ayuda a mantener constante la humedad en un suelo, pero desafortunadamente esta sal es muy fácilmente lavable. Se reduce la evaporación y es capaz de absorber hasta 10 veces su propio peso cuando las condiciones de humedad son altas en el medio ambiente, pudiéndose mantener dicha humedad en sus dos terceras partes durante un día de calor seco, lo que hace de esta sal un producto muy eficaz cuando se trata de evitar la formación de polvo en terracerías, lo que acepta el Cuerpo de ingenieros para el caso de caminos con tránsito muy ligero.

Se tiene sin embargo que existen limitaciones para el empleo del cloruro de calcio, entre las más importantes se tienen:

- Que en el medio ambiente se tenga una humedad relativa superior al 30%.
- Que se tengan minerales que pasen la malla 200 y que estos reaccionen favorablemente con la sal.
- Que el nivel freático no se encuentre a distancias que provoquen la emigración de la sal.

2.7.1.1 Aplicaciones del cloruro de calcio como estabilizador

La estabilización de suelos (suelo-cal) se obtiene por mezcla íntima de suelo, cal y agua. La cal que se utiliza se compone fundamentalmente de óxido cálcico (cal viva), obtenido por calcinación de materiales calizos, o hidróxido cálcico (cal apagada). Este método de estabilización con cal se utiliza con doble propósito; mejorar la resistencia o capacidad de soporte (CBR) del suelo y reducir su plasticidad.

El cloruro de calcio también es usado como producto para el tratamiento antideslizante. Si bien es cierto el cloruro de calcio es una sal para carretera buena para el tratamiento antideslizante en invierno; puede ser aún mejor humedeciendo el cloruro de sodio con cloruro de calcio, la nieve y el hielo se funden con mayor rapidez, se reduce el riesgo de nueva congelación y la sal para carretera es eficaz a temperaturas de hasta 20 grados

negativos. También es posible eliminar totalmente el uso de cloruro de sodio y tratar la carretera únicamente con cal, requiriéndose solamente pequeñas cantidades para conseguir un resultado eficaz. Además, utilizando solo cloruro cálcico también se reduce la carga total de cloruro, lo que obviamente es positivo para el medio ambiente. Cuando el viento se lleva el polvo, también desaparecen las partículas finas que consolidan la carretera, lo que se traduce en baches, huellas de rodadura y corrugaciones; lo cual causa que la carretera empeora paulatinamente al mismo tiempo que la seguridad del tráfico; para contrarrestar este problema, se usa el cloruro de calcio como agente para combatir el polvo. El cloruro de calcio atrae la humedad del aire y del suelo y se transforma en una solución que liga el 54 agregado fino con el agregado grueso. El resultado es una carretera de afirmado segura para el tráfico y rentable con una larga vida útil.⁹

Figura 2.18: Evaporación producida en un suelo al extender cal



Fuente: Tratamientos de suelos con cal, Chile 2005.

⁹ Gutiérrez Montes C. A., (2010), Estabilización química de carreteras no pavimentadas en el Perú y ventajas comparativas del cloruro de magnesio (bischofita) frente al cloruro de calcio, Escuela profesional de Ingeniería Civil, Lima-Perú.

2.7.2 Estabilización con cloruro de sodio (NaCl)

El cloruro de sodio se produce mediante 3 métodos. El más antiguo consiste en el empleo del calor solar para producir la evaporación del 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 método más reciente consiste en la evaporación del 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 (la ASTM y la AASHTO han fijado especificaciones al respecto). Con la adición de sal al agua, se puede abatir la temperatura de congelamiento de esta 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. Las soluciones que contengan cloruro de sodio (NaCl) disueltas, presentan una mayor tensión superficial que en el caso del agua destilada y en 1% de sal incrementa la tensión superficial en 1 a 2 dinas por cm², asimismo, la adición de sal al agua abate la presión de vapor. Los cambios en el agua, debidos a la adición de sal, tanto en el punto de congelación como en la tensión superficial y la presión de vapor, dependen de la solubilidad de la sal. Ahora bien, la sal se adiciona al agua en pequeños porcentajes, esta se disuelve rápidamente, pero a medida que el porcentaje adicionado va siendo más elevado, la sal se disuelve con más dificultad y se tendrá un cierto porcentaje más allá del cual la sal ya no se disuelve. Existe en la superficie de las partículas arcillosas una doble capa de iones adsorbidos, en la cual la energía potencial existente se disipa a partir de dicha superficie, hasta que a una cierta distancia se tenga el mismo potencial que el líquido circundante. La magnitud de este potencial se puede expresar por una cantidad asignada como:

$$z = \frac{4Qd}{AK}$$

En donde:

- Q = Carga eléctrica
- d = Espesor de la doble capa

- A = Área superficial
- K = Constante dieléctrica

De los parámetros anteriores, el único que se puede modificar es el espesor de la doble capa, lo cual se logra incrementando la concentración de electrolito en el agua de mezclado y sustituyendo iones de valencia alta por iones de valencia menor. Al sustituir iones de valencia superior por iones de valencia menor en la superficie de una partícula de arcilla se tendrán entonces, menos iones susceptibles a crecer debido a que están rodeados por moléculas de agua sobre dicha superficie y en consecuencia se reduce el espesor de la doble capa.

Cuando las partículas se encuentran rodeadas por cargas del mismo signo se repelen; pero si alguna de las partículas o parte de ellas tiene carga opuesta entonces se desarrollan fuerzas de atracción. Se ha observado que, si el medio que rodea a estas partículas es con un bajo pH, entonces los bordes de las partículas tienden a cargarse en forma positiva, en cuanto a las caras estas permanecen con carga negativa, por lo que resulta una floculación de las caras de unas partículas con los bordes de las otras. En tanto que, si se tiene un alto pH, tanto los bordes como las caras tienden a quedar con cargas negativas y la estructura puede quedar en forma dispersa.

En las partículas arcillosas el tipo de intercambio importante es el catiónico, es decir, intercambio de iones positivos, debido a que las superficies de las partículas están cargadas negativamente. En lo que respecta a la estabilización de suelos con cloruro de sodio se ha discutido mucho en lo concerniente al cambio en el peso volumétrico de una arcilla con la adición de esta sal, pues mientras algunos investigadores aseguran un pequeño incremento, otros no han encontrado tal cosa; pero en lo que, si parece existir un común acuerdo, es en que la adición de sal hace que se disminuya la humedad óptima.

Al agregar la sal se considera que se reduce la evaporación del agua debido al incremento en la tensión superficial. Sin embargo, cuando la aportación de agua a la superficie expuesta es menor que la evaporación, la superficie se empieza a secar y el cloruro de sodio se cristaliza en la superficie y en los vacíos, lo que puede ayudar a formar una barrera que impedirá posteriores evaporaciones. En el caso del empleo del cloruro de sodio se han tenido en México aplicaciones exitosas, como en las terracerías de las salinas de Guerrero

Negro, California, en donde estas están constituidas por arenas de mar compactadas con agua de mar y cuya condición salina se mantiene siempre constante, pero existen otras experiencias como las de las aeropistas de Loreto e Islas Marías, cuyas bases fueron compactadas con agua de mar y los tratamientos superficiales posteriormente colocados, se han desprendido formando ámpulas que se destruyen fácilmente por los efectos abrasivos de las llantas. De lo anterior se deduce que es de suma importancia tener conocimiento de la reacción íntima entre la sal y el suelo, así como la permanencia a través del tiempo de la estabilización lograda y sus efectos colaterales que causaría, en algunos elementos de la estructura del camino.

Se tiene que se ha logrado mayor efectividad y durabilidad de los efectos de la sal a medida que el límite líquido es más alto. Según lo manifiestan algunos investigadores, la adición de sal en una arcilla produce un decremento en la contracción volumétrica o lineal y estos cambios físicos, la formación de costra superficial y la reducción de la variación en la humedad, mantienen más unidas las partículas no arcillosas y cuando estas se encuentran en la superficie, se desprenden con menor facilidad cuando sufren los ataques abrasivos del tránsito.

Las técnicas empleadas para la incorporación de sal a un suelo, son generalmente las mismas empleadas en otros tipos de aditivos y varían desde la sofisticada mezcla en plantas con alto grado de control, hasta la simple mezcla en el lugar realizada con el equipo tradicional en la construcción de pavimentos. Si se desea utilizar el equipo tradicional, los pasos a seguir son:

- Escarificación.
- Disgregación.
- Adición de cloruro de sodio.
- Adición del agua.
- Mezclado con moto conformador.
- Tendido y compactación.

Cuando el mezclado se hace en planta ha sido práctica común adicionar la sal en forma de solución y cuando se intente la estabilización con sal deberán tenerse presentes las siguientes limitaciones:

- El cloruro de sodio es muy útil en climas con problemas de congelamiento.
- Se puede esperar un mejor resultado si el suelo contiene material fino que reaccione con la sal.
- La materia orgánica inhibe la acción de la sal.
- El rodillo pata de cabra no ha dado buenos resultados en la compactación de suelos con sal adicionada.
- Es indispensable la intervención de un técnico especializado en todo estudio de estabilización con sal, incluyendo las pruebas correspondientes.

2.7.2.1 Aplicaciones del cloruro de sodio como estabilizador

La sal es un estabilizante natural que modifica la estructura del material pétreo mejorando sus propiedades físicas, lo que contribuye a aumentar la resistencia a los esfuerzos de tracción y compresión, y por lo tanto a la disminución de la permeabilidad. Su uso es para todo tipo de suelo, pero su eficacia decrece ante la presencia de material orgánico. Es sabido que el cloruro de sodio es bastante soluble en agua lo cual le permite una fácil y rápida distribución de él dentro de la masa de suelo; así, la sal disuelta es llevada a través de los huecos del suelo, los que va ocupando.

Durante el periodo de fraguado, la mezcla suelo-sal va perdiendo humedad. Esta pérdida de agua permite la cristalización del cloruro de sodio dentro de los vacíos del suelo que llena en calidad de sólido. Esto debe producir un aumento en la densidad del suelo. En lo que respecta a la estabilización de suelos con cloruro de sodio se ha discutido mucho en lo concerniente al cambio en el peso volumétrico de una arcilla con la adición de esta sal, pues mientras algunos investigadores aseguran un pequeño incremento, otros no han encontrado tal cosa; pero en lo que sí parece existir un común acuerdo, es en que la adición de sal hace que se disminuya la humedad.

Al agregar la sal se considera que se reduce la evaporación del agua debido al incremento en la tensión superficial. Sin embargo, cuando la aportación de agua a la superficie expuesta es menor que la evaporación, la superficie se empieza a secar y el cloruro de sodio se cristaliza en la superficie y en los vacíos, lo que puede ayudar a formar una barrera que impedirá posteriores evaporaciones. El agua que se use para la construcción de Bases de suelo – sal debe estar limpia, no debe contener materia orgánica y debe estar libre de

aceites, ácidos y álcalis perjudiciales. Se podrá incorporar al agua, sal (cloruro de sodio), produciendo salmuera o también podrá aplicarse el agua de mar, mediante riego de salmueras, verificando que la cantidad de agua regada contenga la dosis adecuada de sal.

2.7.2.2 Comportamiento de suelos estabilizados con cloruro de sodio

Pocos son los trabajos publicados que presentan en detalle el comportamiento esfuerzo-deformación de suelos estabilizados con cloruro de sodio. Existen varios autores que han estudiado el efecto del cloruro de sodio en las propiedades de los suelos, principalmente en las propiedades físicas y entre las principales observaciones podemos citar las siguientes:

- a) El peso volumétrico seco y la resistencia a la compresión se incrementan al adicionar cloruro de sodio hasta en un 3%. El límite líquido y el índice plástico se reducen al adicionar cloruro de sodio (Ogawa et al,1963).
- b) La cohesión y el ángulo de fricción interna parecen disminuir al adicionar cloruro de sodio y en especímenes en los que no se permita la pérdida de humedad. Parece que si se permite el secado antes de ensayar los especímenes tanto la cohesión como el ángulo de fricción aumentan de manera importante (Ogura & Uto, 1963).
- c) Las partículas de roca caliza parecen ser solubles a soluciones de cloruro de sodio (Wood,1969).
- d) La capacidad de retención de humedad aumenta en los suelos tratados con cloruro de sodio (Marks et al 1970).

A partir de la revisión en la literatura se parece evidenciar, en todo caso, que existen suelos que al parecer no responden a la estabilización con cloruro de sodio. En su trabajo doctoral El-Sekelly, 1987, estudio tres mezclas de suelo. En todos ellos observó mejoras de los valores de resistencia a la compresión, a la tensión, de valor relativo de soporte e incluso en los valores de módulo de resiliencia. Cabe mencionar, sin embargo, que en varios casos agregó un 2% de cal además del cloruro de sodio.

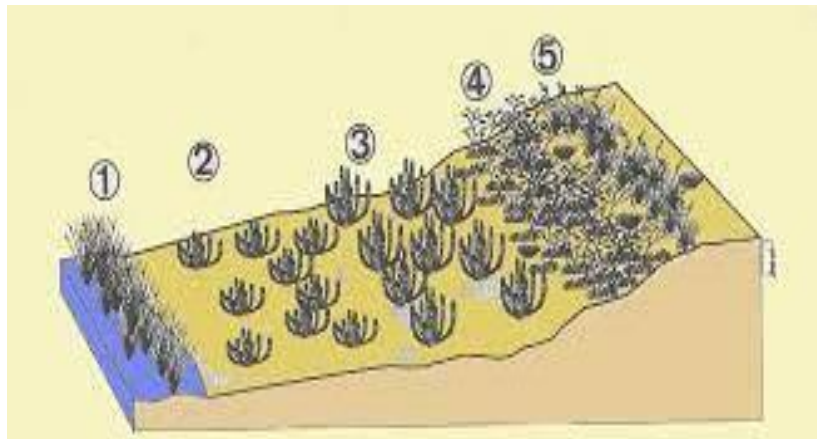
Adicionalmente, es de llamar la atención en el trabajo de El-Sekelly, el hecho de que dos de las mezclas de suelo que estudio eran suelos gruesos, con clasificaciones SC y GC según el SUCS.

El otro suelo estudiado por El-Sekelly se clasifica como MH, con un límite líquido de 54% y un índice plástico del 38% y el porcentaje de arcilla es del 28%, con una gran proporción de limo y arena. Lo anterior es muy importante, ya que no hay manera de diferenciar si esa aparente mejora de propiedades se logró porque disminuyó el contenido de agua del espécimen o por una real contribución del cloruro de sodio.¹⁰

2.8 Efecto de las sales en la vegetación circundante

El problema del estrés salino no es algo desconocido hoy en día. Son muchos los cultivos que se ven afectados por esta problemática como por ejemplo el trigo, tomate o brócoli a nivel mundial. Esta dificultad no solo afecta al sector agropecuario, sino a toda la humanidad, ya que los efectos se ven reflejados en muchos de los alimentos que consumimos a diario. En los últimos años, este problema se ha incrementado en los cultivos a nivel mundial como consecuencia principalmente de la falta de conciencia medioambiental y de la explotación de los recursos hídricos irracionalmente, además de otros factores morfoclimáticos que influyen directamente sobre la salinidad de los suelos.

Figura 2.19: Salinidad en vegetación



Fuente: Tratamientos de suelos con cal, Chile 2005.

¹⁰ Garnica Anguas P., Pérez Salazar A., Gómez López J. A., Obil Veiza E. Y., (2002), Estabilización de suelos con cloruro de sodio para su uso en las vías terrestres, 1ra. edición, Ciudad de México.

Algunos de los efectos que pueden originarse por el exceso de sales son muy variados, tanto fisiológicos como bioquímicos, tales como necrosis foliar, reducción de crecimiento del cultivo, pérdida de capacidad de germinación, afección en la producción de etileno, disminución de peso del fruto, etc.

¿Qué entendemos por salinidad?

Cuando hablamos de “salinidad” nos referimos a la presencia en el suelo de una elevada concentración de sales que perjudican a las plantas por su efecto tóxico y la disminución del potencial osmótico del suelo. Las sales presentes en suelos salinos son el cloruro sódico (NaCl), el cloruro magnésico (MgCl₂), el sulfato magnésico (MgSO₄) y el sulfato sódico (Na₂SO₄). Además, tenemos que diferenciar entre dos tipos de salinidad: natural y adquirida. La primera hace referencia al fenómeno natural asociado a condiciones climáticas de aridez con presencia de materiales originales ricos en sales, mientras que el segundo concepto hace referencia a aquellos suelos que han adquirido un elevado contenido en sales como consecuencia del riego prolongado con aguas de elevado contenido de sales, así como también del riego con agua de buena calidad, pero mal manejada bajo climas secos, semihúmedos o semisecos. También hay que tener en cuenta la salinidad “urbana” que hace referencia a aquellos residuos procedentes de núcleos urbanos y la salinidad “agrícola” que hace referencia a la cantidad de fertilizantes aplicados, el uso de aguas subterráneas para riego, etc.

2.8.1 Efectos de la salinidad en el suelo

Como consecuencia de la acumulación de las sales del agua de riego, se incrementa la salinización de los suelos desencadenando numerosos efectos sobre el mismo.

Las sales afectan a las propiedades fisicoquímicas del suelo, produciendo un efecto importante sobre el rendimiento de los cultivos, ya que se produce un exceso de iones Na (sodicidad) que bloquean los poros conductores y, además, se reduce la permeabilidad del suelo, ya que se compacta y la capacidad del suelo para que la planta pueda absorber el agua queda severamente reducida.

2.8.2 Efectos de la salinidad en las plantas

Los efectos que producen las sales sobre las plantas han sido ampliamente estudiados:

- **Efecto osmótico:**

Se produce un déficit hídrico que va a conllevar una pérdida de turgencia, inhibición de la extensión celular, inhibición de la acumulación de clorofila en hojas, pérdida de regulación estomática, inhibición del crecimiento, etc.

- **Toxicidad iónica:**

Este efecto puede ser debido a la toxicidad directa causada por la acumulación de un determinado ion, por la formación de productos tóxicos para la planta o bien por interacción en el equilibrio nutritivo de la misma. Los principales elementos con efecto iónico son el sodio, el cloruro y el boro, pero su efecto varía incluso entre especies vegetales cercanas.

- **Desequilibrio nutricional:**

Se produce un desbalance nutricional, debido a los altos niveles de sodio y cloruro que reducen la captación de K^+ , NO_3^- , PO_4^{3-} , etc. A modo de conclusión podemos decir que la afectación por concentración de sales presenta efectos adversos, los cuales son irreparables, ya que las respuestas van desde necrosis hasta pérdida de crecimiento, en donde el fruto a su vez es afectado total o parcialmente.¹¹

¹¹ <https://www.fertibox.net/single-post/exceso-sales-en-suelos-y-plantas>

CAPÍTULO III
APLICACIÓN PRÁCTICA

CAPÍTULO III

APLICACIÓN PRÁCTICA

3.1 Ubicación

El tramo en estudio se encuentra en la comunidad de Santa Ana la Vieja del departamento de Tarija, está situada al sureste de La Cabaña, y al este de La Pinta, con Latitud $21^{\circ}36'21''$ S y Longitud $62^{\circ}36'56''$ O, el tramo se encuentra en Santa Ana La Vieja - Cruce el Valle hasta Cieneguillas, consta de 5 kilómetro el tramo en estudio.

El tramo inicia en Latitud $21^{\circ}37'54.28''$ S y Longitud $64^{\circ}37'45.51''$ O y finaliza en Latitud $21^{\circ}36'55.57''$ S y Longitud $64^{\circ}36'13.22''$ O

Figura 3.1: Ubicación del tramo en estudio

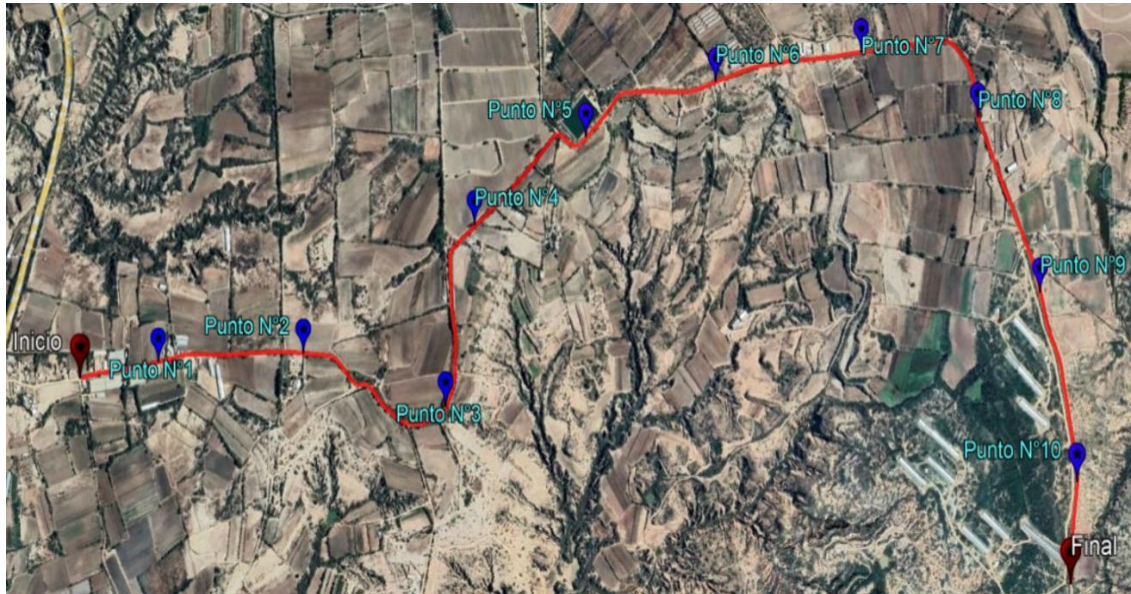


Fuente: Elaboración propia.

3.2 Muestreo del suelo

Para el muestreo se realizó la extracción del suelo en 10 puntos, el tramo constará de 5 kilómetros de longitud y se tomará una muestra cada 500 metros, siendo en total 10 muestras en todo el tramo, con la finalidad de conocer qué tipo de material se encuentra en la totalidad del tramo en estudio.

Figura 3.2: Puntos de extracción



Fuente: Elaboración propia.

En cada punto de extracción se tomaba muestras en bolsa con pala, haciendo una excavación con barreta y pico a una profundidad de 1 metro, una vez retirado el suelo se rellenará con el mismo material.

Figura 3.3: Extracción del suelo



Fuente: Elaboración propia.

3.3 Vegetación circundante en el tramo en estudio

Para conocer el tipo de vegetación que se encontraba en la totalidad del tramo en estudio se realizó un recorrido y se pudo identificar una gran variedad de vegetación aledaña al camino, como ser:

Hortalizas:

- ❖ Zanahoria (apiáceas)
- ❖ Papa (solanáceas)
- ❖ Cebolla (amarilidáceas)
- ❖ Tomate (solanáceas)

Legumbres:

- ❖ Alfalfa (herbácea)

Frutos:

- ❖ Uva (vides)
- ❖ Higuera (ficus carica)
- ❖ Durazno (prunus pérsica)

Cactáceas:

- ❖ Nopal (opuntia ficus-indica)

Árboles:

- ❖ Schinus molle (árbol leñoso)
- ❖ Churqui (vachellia caven)

Plantas:

- ❖ Hierba (herbáceo o arbóreo)

La vegetación que se encontró más en el transcurso de la totalidad del tramo fue: los cultivos de uva, seguido de los cultivos de alfalfa, zanahoria, cebolla, en cuanto a los árboles en su mayoría los molles.

3.4 Caracterización del material a estabilizar

Para conocer las propiedades del suelo a estabilizar del proyecto, se tomaron muestras en diferentes puntos ya mencionados, posteriormente en el Laboratorio de suelos se determinaron sus propiedades y clasificación de las mismas, según el sistema de clasificación AASHTO y el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos - SUCS

3.4.1 Análisis granulometría (ASTM D422, AASHTO T88)

El análisis granulométrico consiste en la medición y gradación de los granos o partículas constitutivas de una muestra de suelo o formación sedimentaria con el fin de determinar sus propiedades mecánicas, cálculos de abundancia, y la separación de los componentes del sustrato.

Tabla 3.1 Distribución de partículas

Escala granulométrica	
Partícula	Tamaño
Arcillas	< 0.002 mm
Limos	0.002 - 0.06 mm
Arenas	0.06 - 2 mm
Gravas	2 - 60 mm
Cantos rodados	60 - 250 mm
Bloques	> 250 mm

Fuente: Guía de laboratorio.

Para un suelo arcilloso se realiza el método del lavado, que consiste en tamizar la muestra por el Tamiz N°10, aproximadamente 1000 gramos. La muestra se dejó reposar en agua hasta que se sature completamente, logrando con el suelo una pasta suave con características similares al barro o lodo. Generalmente se satura el suelo durante 24 horas o más. Una vez saturado el suelo se procede a lavar el material en el Tamiz N°200, hasta que el agua pasante tome un aspecto más claro sin sedimentos, el material que se retiene en el tamiz N°200 se dispone en un recipiente para realizar un secado del suelo en el horno

durante 24 horas, seguido se procederá a tamizar el suelo por los tamices N°40 y N°200, para finalizar se procederá a realizar el pesaje del material retenido en cada tamiz.

Figura 3.4: Método de lavado



Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.2 Resultados de granulometría P1-P3

Tramo en estudio	Punto N°1	Punto N°2	Punto N°3
Tamices	% Que pasa	% Que pasa	% Que pasa
2 1/2"	100,00	100,00	100,00
2"	100,00	100,00	100,00
1 1/2"	100,00	100,00	100,00
1"	100,00	100,00	100,00
3/4"	100,00	100,00	100,00
1/2"	100,00	100,00	100,00
3/8"	100,00	100,00	100,00
N°4	100,00	100,00	99,72
N°10	99,37	99,66	99,11
N°40	97,99	98,64	97,46
N°100	96,95	94,07	89,21
N°200	89,17	84,77	82,06

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.3 Resultados de granulometría P4-P6

Tramo en estudio	Punto N°4	Punto N°5	Punto N°6
Tamices	% Que pasa	% Que pasa	% Que pasa
2 1/2"	100,00	100,00	100,00
2"	100,00	100,00	100,00
1 1/2"	100,00	100,00	100,00
1"	100,00	100,00	100,00
3/4"	100,00	100,00	100,00
1/2"	100,00	100,00	100,00
3/8"	100,00	100,00	100,00
N°4	99,75	99,42	98,70
N°10	99,30	99,00	96,93
N°40	97,61	88,34	94,12
N°100	91,09	62,30	88,64
N 200	82,94	58,18	81,41

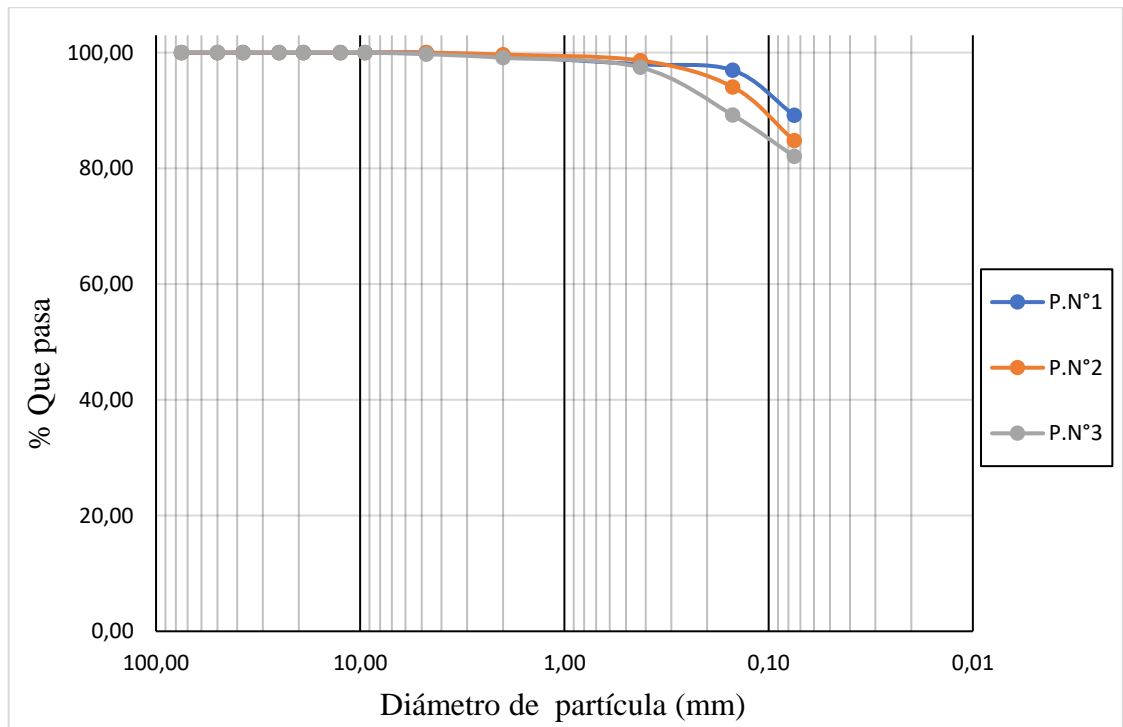
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.4 Resultados de granulometría P7-P10

Tramo en estudio	Punto N°7	Punto N°8	Punto N°9	Punto N°10
Tamices	% Que pasa	% Que pasa	% Que pasa	% Que pasa
2 1/2"	100,00	100,00	100,00	100,00
2"	100,00	100,00	100,00	100,00
1 1/2"	100,00	100,00	100,00	100,00
1"	100,00	100,00	100,00	100,00
3/4"	100,00	100,00	100,00	100,00
1/2"	100,00	100,00	100,00	100,00
3/8"	100,00	100,00	100,00	100,00
N°4	99,79	100,00	99,65	99,45
N°10	97,77	98,91	98,32	98,42
N°40	94,82	96,95	95,78	90,37
N°100	90,24	93,93	84,76	80,28
N°200	82,16	80,95	75,73	73,29

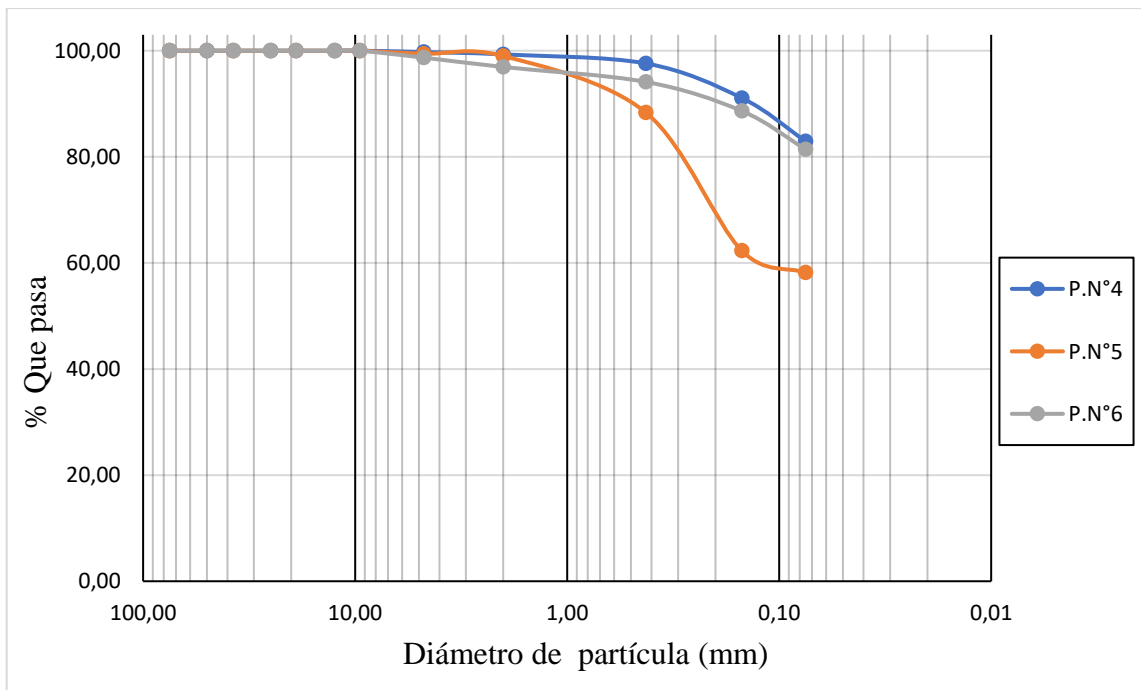
Fuente: Elaboración propia.

Gráfica 3.1 Granulometría del suelo a estabilizar P1-P3



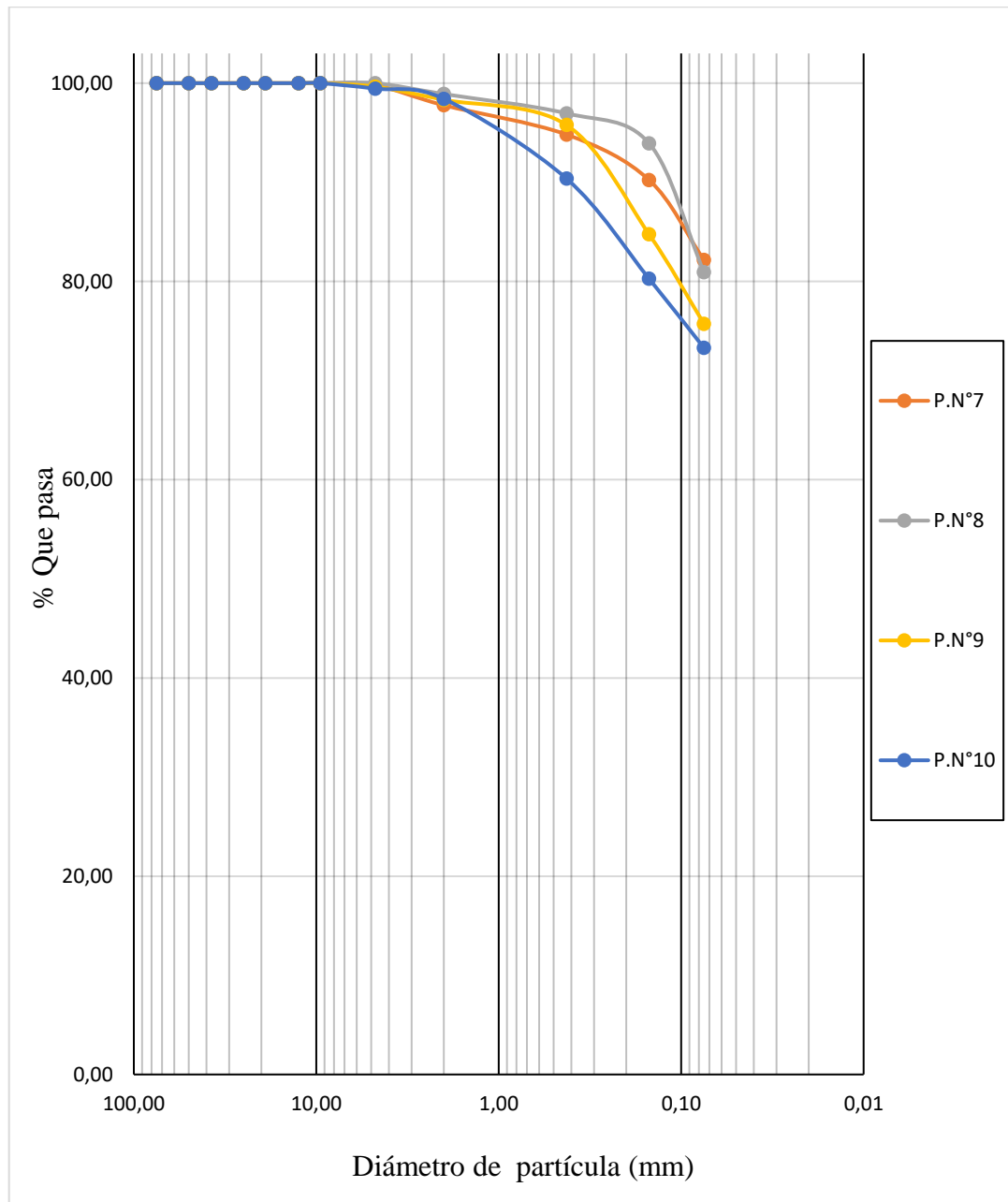
Fuente: Elaboración propia.

Gráfica 3.2 Granulometría del suelo a estabilizar P4-P6



Fuente: Elaboración propia.

Gráfica 3.3 Granulometría del suelo a estabilizar P7-P10



Fuente: Elaboración propia.

3.4.2 Límites de atterberg (ASTM D4318, AASHTO T89-T90)

Los límites de Atterberg, límites de plasticidad o límites de consistencia, se utilizan para caracterizar el comportamiento de los suelos finos, aunque su comportamiento varía a lo largo del tiempo.

Los límites se basan en el concepto de que en un suelo de grano fino solo pueden existir cuatro estados de consistencia según su humedad. Así, un suelo se encuentra en estado sólido cuando está seco. Al agregársele agua poco a poco, va pasando sucesivamente a los estados de semisólido, plástico y, finalmente, líquido.

Los contenidos de humedad en los puntos de transición de un estado al otro son los denominados límites de Atterberg.

Los ensayos se realizan en el laboratorio y miden la cohesión del terreno y su contenido de humedad, para ello se forman pequeños cilindros de espesor con el suelo. Siguiendo estos procedimientos se definen tres límites: Límite líquido, Límite plástico y Límite de retracción o contracción.

- ❖ **Límite líquido:** Esta propiedad se mide en laboratorio mediante un procedimiento normalizado en que una mezcla de suelo y agua, capaz de ser moldeada, se deposita en la cuchara de Casagrande, copa de Casagrande o cazuela de Casagrande y se golpea consecutivamente contra la base de la máquina.

El ensayo consiste en preparar una muestra seca que haya pasado por el tamiz N°40, se lo deposita dentro de un recipiente y se le agrega agua, para que con una espátula se realice una homogenización de la humedad con el suelo, hasta que la muestra haya adoptado la forma de una pasta de consistencia suave, con la ayuda de una espátula se coloca la muestra suavemente y tratando que siempre este de manera horizontal sobre la copa de casa grande, una vez que la muestra este horizontal se realiza la ranura de manera firme de una sola pasada, tratando que el fondo sea visible, seguido se acciona la copa de Casagrande, al ritmo de dos golpes por segundo teniendo en cuenta el número de golpes hasta que se produzca una unión de aproximadamente 1.27 cm.

Generalmente del ancho de una espátula, con la espátula de forma perpendicular a la ranura realizar dos cortes a la muestra, que pasaran por los extremos de la unión, luego extraer la parte de la unión y depositarla en una cápsula para realizar su pesaje y seguido introducirla al horno durante 24 horas, este procedimiento se realiza cuatro veces en rangos de 15-20, 20-25, 25-30, 30-35 golpes, los datos que

se necesitan del ensayo son el número de golpes, el peso de la muestra húmeda, el peso de la muestra seca.

La humedad correspondiente al límite líquido será a los 25 golpes, y se lo determina interpolando en una gráfica normalizada de los cuatro resultados obtenidos.

- ❖ **Límite plástico:** Para medir la plasticidad de las arcillas se han desarrollado varios criterios de los cuales se menciona el desarrollado por Atterberg, el cual dijo en primer lugar que la plasticidad no es una propiedad permanente de las arcillas, sino circunstancial y dependiente de su contenido de agua.

Una arcilla muy seca puede tener la consistencia de un ladrillo, con plasticidad nula, y esa misma, con gran contenido de agua, puede presentar las propiedades de un lodo semilíquido o, inclusive, las de una suspensión líquida. Entre ambos extremos, existe un intervalo del contenido de agua en que la arcilla se comporta plásticamente.

El límite plástico se determina mediante la formación de pequeños cilindros delgados, con el material que pase el tamiz N°40, se forma los cilindros con la palma de la mano rodando para que tome una forma más delgada, luego se hace lo mismo con el vidrio reloj hasta que tenga un diámetro de aproximadamente tres mm, observar si los rollitos presentan pequeñas rajaduras en ese diámetro, eso quiere decir que se encuentra con la humedad del límite plástico, este procedimiento se realizara tres veces, para finalizar los rollitos se los introducirá en el horno por 24 horas, los datos que se obtendrán son el peso de los rollitos húmedos y secos.

- ❖ **Índice de plasticidad:** El índice de plasticidad se expresa con el porcentaje del peso en seco de la muestra de suelo, e indica el tamaño del intervalo de variación del contenido de humedad con el cual el suelo se mantiene plástico.

En general, el índice de plasticidad depende solo de la cantidad de arcilla existente e indica la finura del suelo y su capacidad para cambiar de configuración sin alterar su volumen. Un IP elevado indica un exceso de arcilla o de coloides en el suelo. Siempre que el LP sea superior o igual al LL, su valor será cero.

Figura 3.5: Límites de atterberg



Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.5 Resultados de límites de atterberg P1 – P3

Tramo en estudio	Punto N°1	Punto N°2	Punto N°3
Límite líquido (%)	29,894	27,064	27,714
Límite plástico (%)	20,051	17,867	20,448
Índice de plasticidad (%)	9,843	9,196	7,265

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.6 Resultados de límites de atterberg P4 – P6

Tramo en estudio	Punto N°4	Punto N°5	Punto N°6
Límite líquido (%)	33,360	25,121	32,725
Límite plástico (%)	24,275	18,369	22,816
Índice de plasticidad (%)	9,084	6,752	9,909

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.7 Resultados de límites de atterberg P7 – P10

Tramo en estudio	Punto N°7	Punto N°8	Punto N°9	Punto N°10
Límite líquido (%)	28,213	29,346	30,896	32,093
Límite plástico (%)	19,692	20,825	21,004	23,026
Índice de plasticidad (%)	8,521	8,521	9,891	9,067

Fuente: Elaboración propia.

3.4.3 Contenido de humedad y clasificación

La humedad o contenido de humedad de un suelo es la relación, expresada como porcentaje, del peso de agua en una masa dada de suelo, al peso de las partículas sólidas.

Se determina el peso de agua eliminada, secando el suelo húmedo hasta un peso constante en un horno controlado a 110 ± 5 °C. El peso del suelo que permanece del secado en horno es usado como el peso de las partículas sólidas. La pérdida de peso debido al secado es considerada como el peso del agua.

Tabla 3.8 Resultados de contenido de humedad P1 – P3

Tramo en estudio	Punto N°1	Punto N°2	Punto N°3
Cont. humedad (%)	16,59	15,48	13,37

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.9 Resultados de contenido de humedad P4 – P6

Tramo en estudio	Punto N°4	Punto N°5	Punto N°6
Cont. humedad (%)	14,24	5,55	9,85

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.10 Resultados de contenido de humedad P7 – P10

Tramo en estudio	Punto N°7	Punto N°8	Punto N°9	Punto N°10
Cont. humedad (%)	12,34	14,52	9,59	10,03

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.11 Clasificación de los suelos según AASHTO Y SUCS P1 – P3

Clasificación del suelo			Descripción
Punto N°1	SUCS:	CL	Arcilla inorgánica baja compresibilidad
	AASHTO:	A - 4 (8)	Suelo limoso no plástico
Punto N°2	SUCS:	CL	Arcilla inorgánica baja compresibilidad
	AASHTO:	A - 4 (8)	Suelo limoso no plástico
Punto N°3	SUCS:	CL	Arcilla inorgánica baja compresibilidad
	AASHTO:	A - 4 (8)	Suelo limoso no plástico

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.12 Clasificación de los suelos según AASHTO Y SUCS P4 – P6

Clasificación del suelo			Descripción
Punto N°4	SUCS:	CL	Arcilla inorgánica baja compresibilidad
	AASHTO:	A - 4 (8)	Suelo limoso no plástico
Punto N°5	SUCS:	ML - CL	Arcilla limosa inorgánica
	AASHTO:	A - 4 (5)	Suelo limoso no plástico
Punto N°6	SUCS:	CL	Arcilla inorgánica baja compresibilidad
	AASHTO:	A - 4 (8)	Suelo limoso no plástico

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.13 Clasificación de los suelos según AASHTO Y SUCS P7 – P10

Clasificación del suelo			Descripción
Punto N°7	SUCS:	CL	Arcilla inorgánica baja compresibilidad
	AASHTO:	A - 4 (8)	Suelo limoso no plástico
Punto N°8	SUCS:	CL	Arcilla inorgánica baja compresibilidad
	AASHTO:	A - 4 (8)	Suelo limoso no plástico
Punto N°9	SUCS:	CL	Arcilla inorgánica baja compresibilidad
	AASHTO:	A - 4 (8)	Suelo limoso no plástico
Punto N°10	SUCS:	CL	Arcilla inorgánica baja compresibilidad
	AASHTO:	A - 4 (8)	Suelo limoso no plástico

Fuente: Elaboración propia.

3.4.4 Compactación proctor estándar o modificado (AASHTO T-180)

La compactación del suelo es el prensado de las partículas de suelo cercanas entre sí por métodos mecánicos. El aire durante la compactación del suelo es expulsado del espacio vacío en la masa del suelo y por lo tanto la densidad de masa se incrementa, se hace para

mejorar las propiedades de ingeniería del suelo. La compactación permite conocer el grado de humedad de un suelo para alcanzar una densidad máxima, aplicando una energía de compactación determinada.

El procedimiento del ensayo consiste en apisonar una muestra de suelo en tres capas consecutivas en una totalidad aproximada de cinco kilogramos de suelo, previamente tamizada por el tamiz N°4. La muestra se humecta y se introduce en un molde metálico de dimensiones normalizadas con un volumen de 2124 cm³, la humedad que se utilizó fue de 6, 12, 18 y 25%.

Para llevar a cabo el apisonado se emplea un pistón también normalizado, de forma que su peso y altura de caída no varíen, lo que asegura una energía de compactación constante. La normativa estipula una cantidad de 56 golpes con el pistón por cada capa. Se realizan alrededor de 4 a 5 determinaciones con diferentes grados de humedad, construyendo la curva “humedad – densidad seca”, las humedades que se utilizaron fueron de 6, 12, 18 y 25%.

Figura 3.6: Proceso de compactación



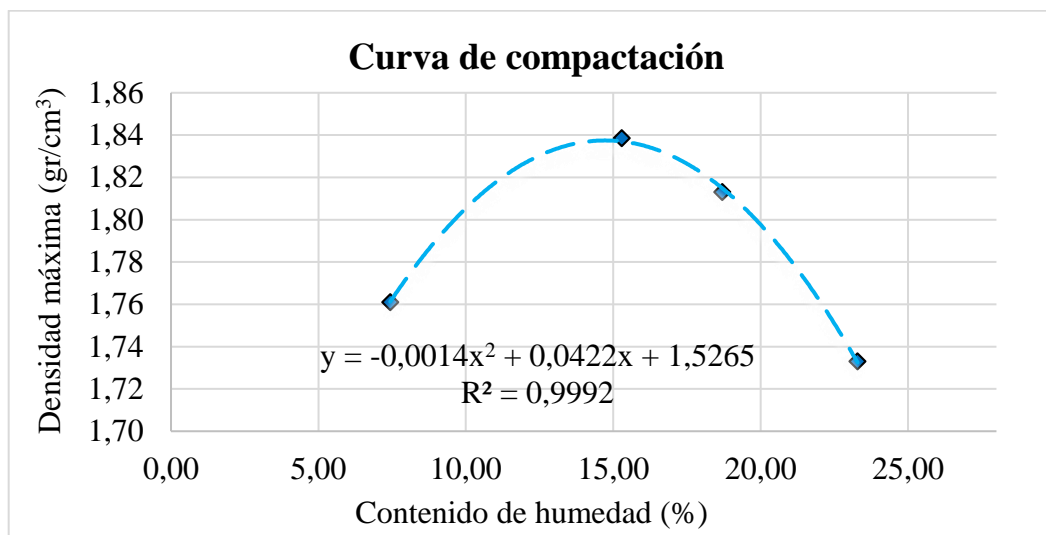
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.14 Resultados de compactación P1 – P3

Tramo en estudio	Punto N°1	Punto N°2	Punto N°3
Humedad óptima (%)	15,071	16,560	14,000
Densidad máxima (gr/cm ³)	1,845	1,742	1,919

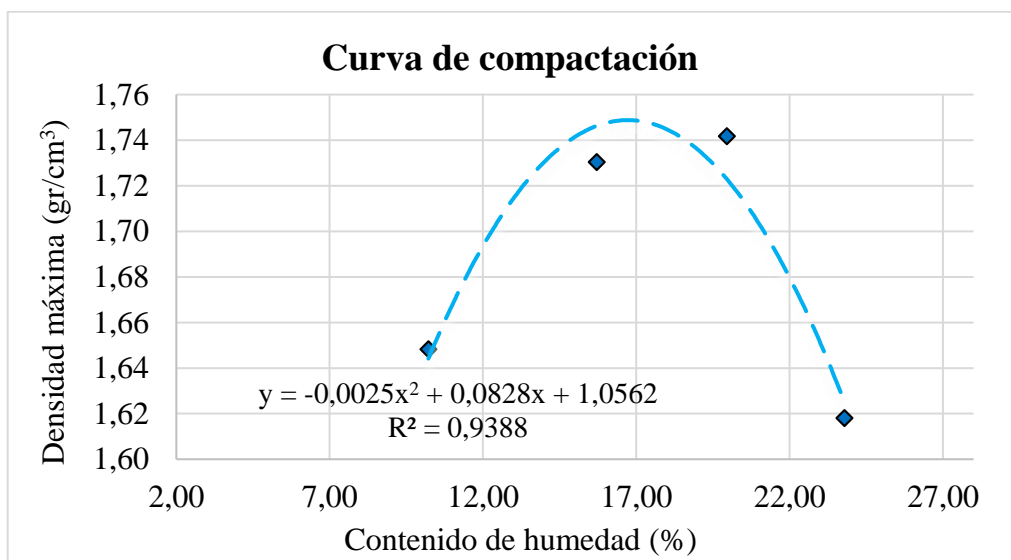
Fuente: Elaboración propia.

Gráfica 3.4 Curva de compactación punto N°1



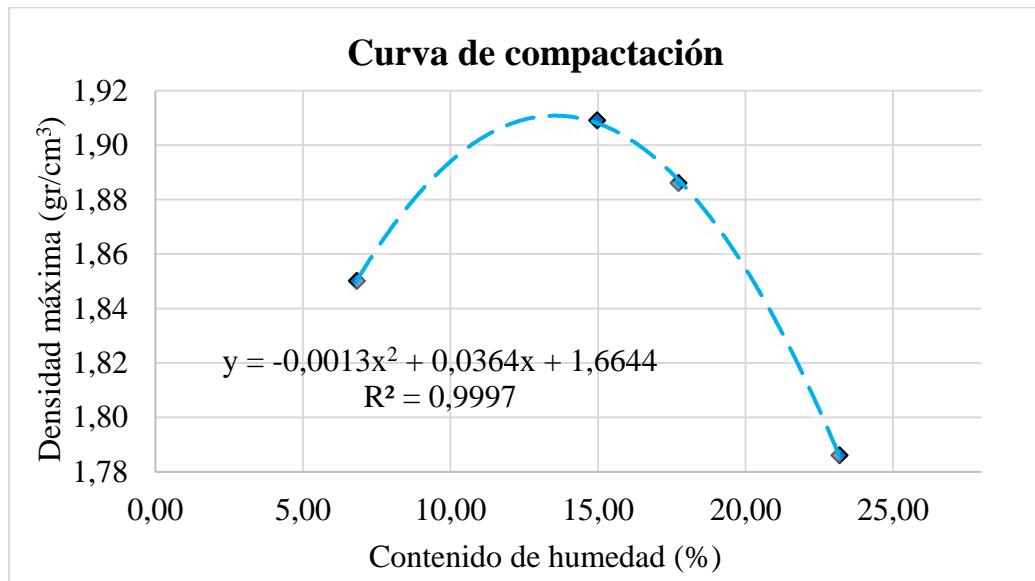
Fuente: Elaboración propia.

Gráfica 3.5 Curva de compactación punto N°2



Fuente: Elaboración propia.

Gráfica 3.6 Curva de compactación punto N°3



Fuente: Elaboración propia.

3.4.5 CBR (Relación de Soporte de California)

El ensayo CBR se emplea para evaluar la capacidad portante de terrenos compactados como terraplenes, capas de firme, explanadas, así como en la clasificación de terrenos.

Consiste básicamente en compactar un terreno en unos moldes normalizados, sumergirlos en agua y aplicar un punzonamiento sobre la superficie del terreno mediante un pistón normalizado, que determina la carga que hay que aplicar a un pistón circular de 19,35 cm² para introducirlo en una muestra de suelo a una velocidad de 1,27 mm/min y hasta obtener una penetración de 2,54 mm.

A través de este procedimiento se determina lo que se llama el Índice CBR que es la relación entre la carga determinada y la que se obtiene por el mismo procedimiento para una muestra tipo de roca machacada. Se expresa en porcentaje.

Para obtener los diferentes CBR, es necesario determinar la humedad óptima y densidad máxima de las muestras del suelo mediante el ensayo Proctor modificado o normal, la muestra se compactará en tres moldes estandarizados de 15,24 cm de diámetro y 17,78 cm de altura, la muestra se compactará en 5 capas a 12, 25 y 56 golpes por capa mediante un

pistón que se deja caer a una altura determinada, posteriormente se enrasa el molde, se desmonta y se vuelve a montar invertido, después se sumerge los moldes en agua colocando el vástago con pesas, con el objeto de simular las cargas tanto vehiculares como de la estructura de pavimento y por otro lado determinar su expansión efectuando 4 lecturas empleando un extensómetro debidamente calibrado.

A los 4 días de estar sumergida la muestra se deja escurrir el agua, para aplicarle la carga sobre el pistón de penetración mediante la prensa CBR y tomar las lecturas de la curva presión penetración.

Figura 3.7: Proceso de ensayo CBR



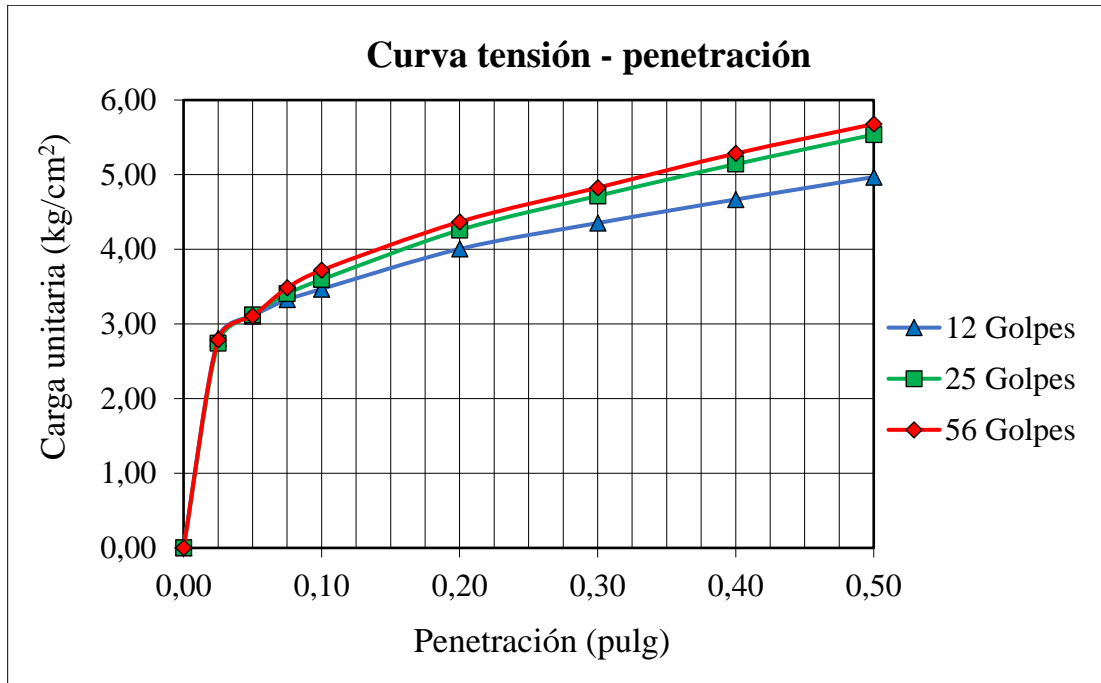
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.15 Resultados del ensayo de CBR P1 – P3

Tramo en estudio	Punto N°1	Punto N°2	Punto N°3
CBR 100% D. máx.	4,430	5,699	9,391
CBR 95% D. máx.	4,074	5,204	6,585

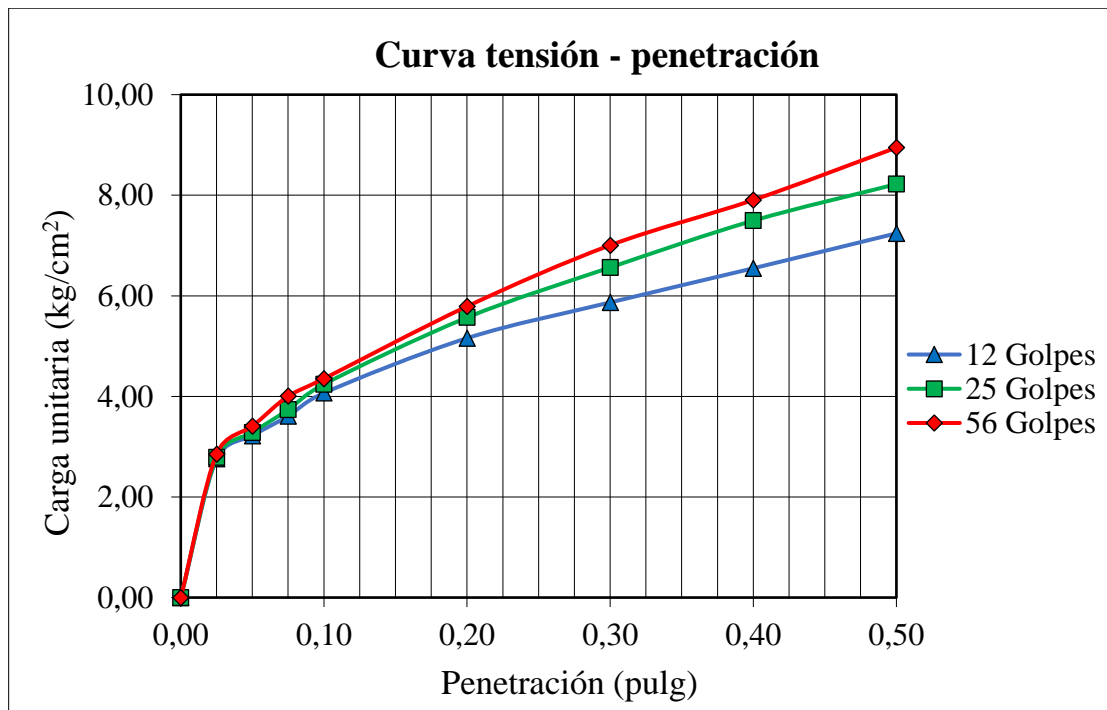
Fuente: Elaboración propia.

Gráfica 3.7 Curva tensión – penetración punto N°1



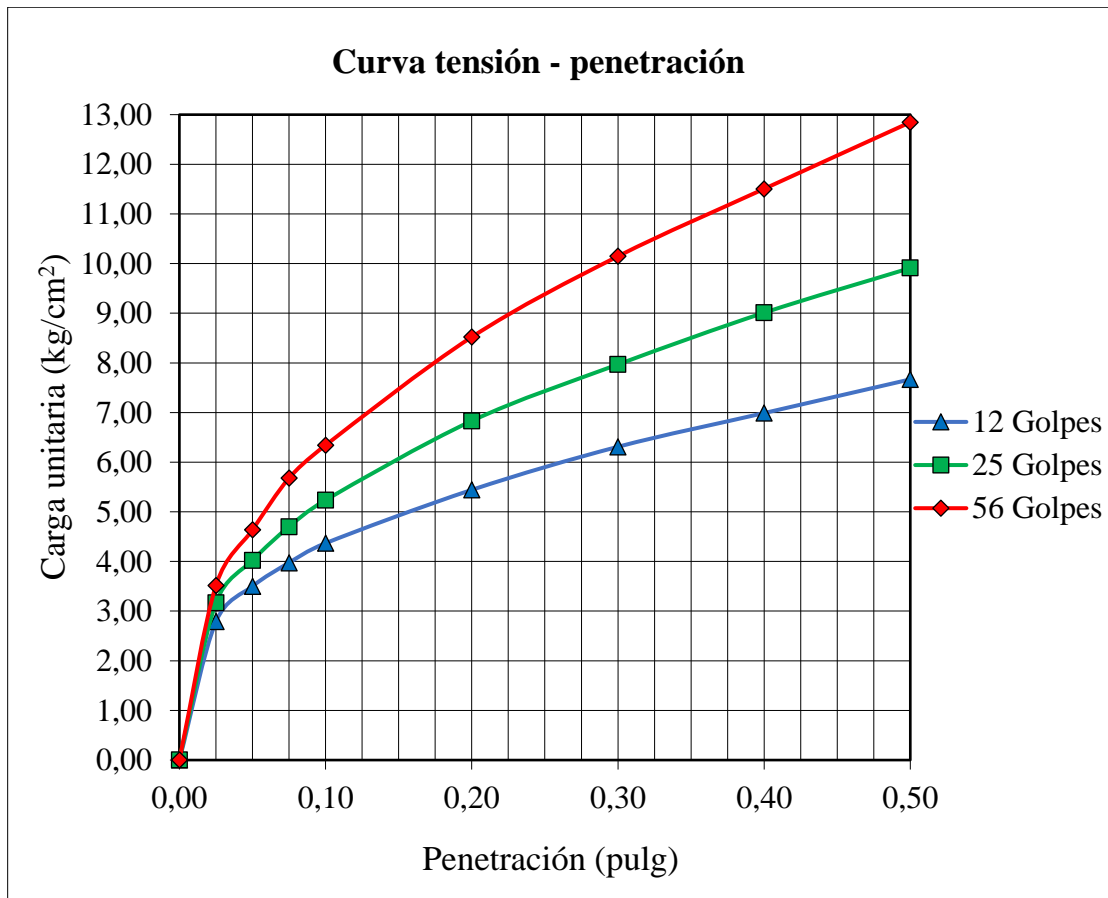
Fuente: Elaboración propia.

Gráfica 3.8 Curva tensión – penetración punto N°2



Fuente: Elaboración propia.

Gráfica 3.9 Curva tensión – penetración punto N°3



Fuente: Elaboración propia.

3.4.6 Permeabilidad

La permeabilidad es la capacidad que tiene un material de permitirle a un fluido que lo atraviese sin alterar su composición, este valor se lo determinará en laboratorio con el permeámetro. El coeficiente de permeabilidad es expresado en términos de velocidad. Este fenómeno es gobernado por las mismas leyes físicas en todos los tipos de suelos y la diferencia en el coeficiente de permeabilidad en tipos de suelos extremos es solo una cuestión de magnitud. Existen dos métodos carga constante para los suelos con permeabilidad alta como las gravas y arenas. Y la carga variable para los suelos con permeabilidad mediana y baja como los limos y arcillas.

Se realizó el método de carga variable por el tipo de suelo, el ensayo consiste en preparar la mezcla en el permeámetro que recibirá agua desde el embudo por una manguera hasta

el permeámetro y del permeámetro se expulsará el agua por otra manguera en la parte inferior. Para la preparación de la mezcla tiene que estar totalmente seco y de ahí llevarlo a la humedad óptima determinada ya con el ensayo de compactación, para compactarlo en el permeámetro colocando 3 capas con 25 golpes cada una. El método consiste en saturar el suelo hasta que el agua pueda pasar en su totalidad, se tomarán medidas de alturas del agua en un determinado tiempo.

Figura 3.8: Ensayo de permeabilidad



Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.16 Resultados del ensayo permeabilidad

Tramo en estudio	Punto N°1
k (cm/s)	2,979E-07

Fuente: Elaboración propia.

3.5 Sales empleadas en la estabilización de suelos

La estabilización de los suelos es un tema ampliamente estudiado en el que se busca mejorar diferentes factores como resistencia, compresibilidad, estabilidad volumétrica entre otros. En terrenos arcillosos es factible encontrar problemas con inestabilidades volumétricas relacionados con la pérdida y ganancia de agua, por lo tanto, se realizará el siguiente estudio en el cual se implementará la utilización de las siguientes sales tales como:

- Cloruro de sodio (NaCl)
- Cloruro de calcio (CaCl_2)
- Cloruro de potasio (KCl)

Figura 3.9: Presentación de sales



Fuente: Elaboración propia.

3.5.1 Porcentajes de sales

Para la selección de los porcentajes que se emplearán en la realización del presente proyecto, se tomaron como referencia los siguientes proyectos:

- ❖ Tesis de maestría “Estabilización de arcilla orgánica usando sales” de Mohd Yunus, Nor Zurairahetty Universiti Teknologi Malaysia, Malaysia, 2007, utilizó porcentajes de 2 al 10%.

- ❖ “Estabilización de suelos con cloruro de sodio para su uso en las vías terrestres”, de Paul Garnica Anguas, Alfonso Pérez Salazar, José Antonio Gómez López, Edda Yhaaraby Obil Veiza, Publicación Técnica No.201 Sanfandila, Qro, 2002, utilizó porcentajes de 5, 10 y 20%.
- ❖ “Estabilización de suelos con cloruro de sodio (NaCl) para bases y sub bases”, Jairon Roldán de Paz. Guatemala mayo del 2010, utilizó porcentajes de 2, 4, 6%.
- ❖ “Estabilización de suelos cohesivos con el uso de cloruro de calcio”, Juan Emilio Miranda Jarrín, David Francisco Negrete Olives, Quito 2011, utilizó porcentajes de 0,5 al 2%.

Por lo cual se utilizó unos porcentajes promedios, los porcentajes que se utilizaron en el presente proyecto fueron el 3, 4, 5%

3.6 Estabilización de suelo con cloruro de sodio (NaCl)

3.6.1 Compactación proctor estándar o modificado (AASHTO T-180)

Se realiza el ensayo de compactación proctor estándar o modificado, con la adición del cloruro de sodio para obtener la humedad y densidad máxima, con diferentes porcentajes de cloruro de sodio (NaCl) en la mezcla, los porcentajes que se utilizarán será 3,4 y 5%.

Figura 3.10: Adición de sal para compactación



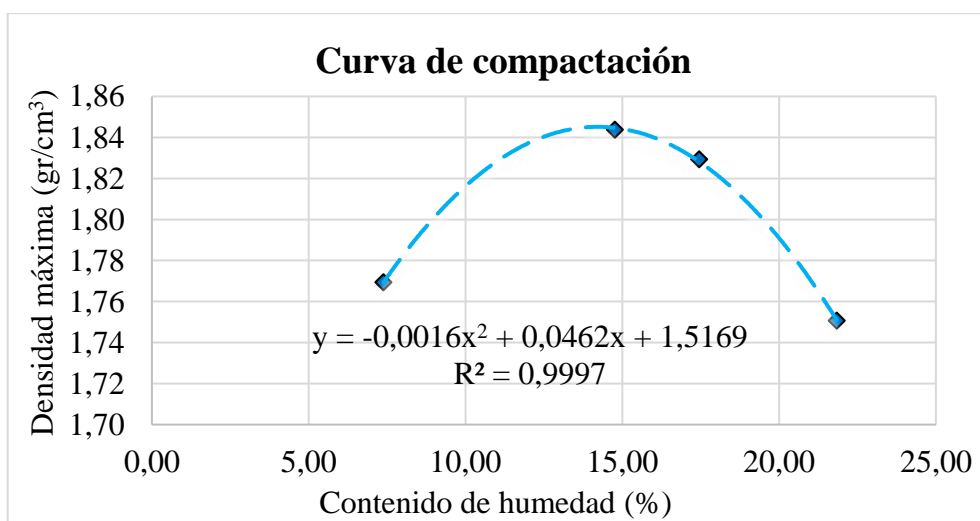
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.17 Resultados de compactación con cloruro de sodio (NaCl)

Tramo en estudio	Punto N°1		
	3%	4%	5%
Humedad óptima (%)	14,438	13,675	13,130
Densidad máxima (gr/cm ³)	1,850	1,867	1,888

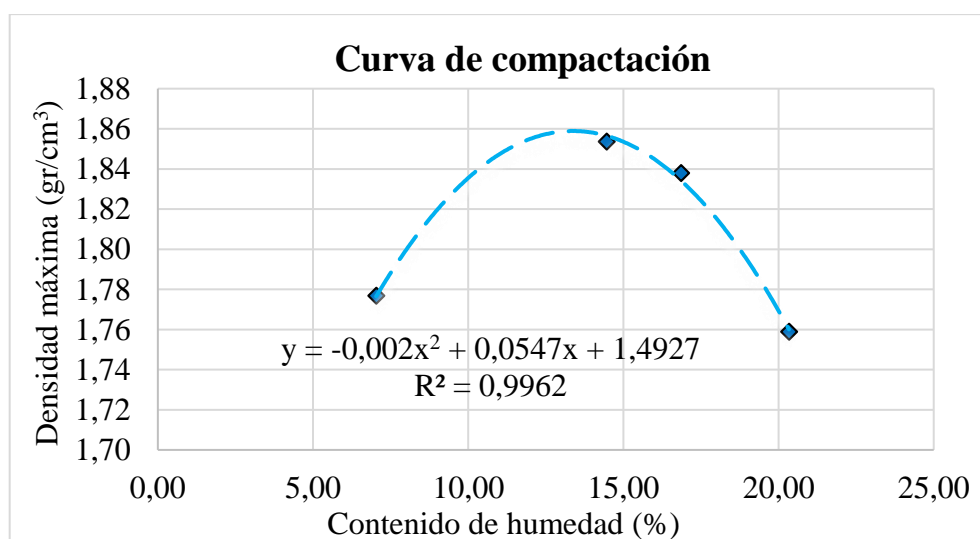
Fuente: Elaboración propia.

Gráfica 3.10 Curva de compactación con 3% cloruro de sodio (NaCl)



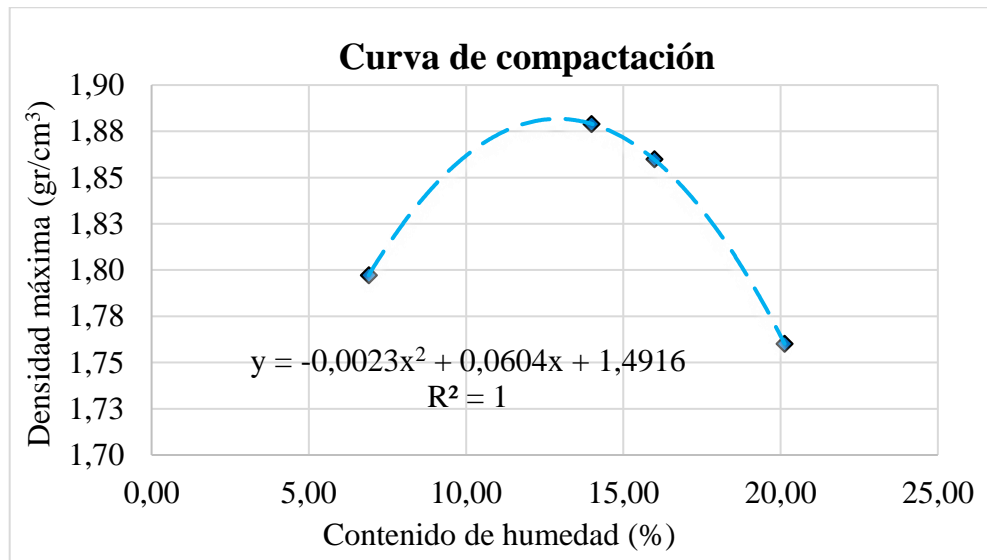
Fuente: Elaboración propia.

Gráfica 3.11 Curva de compactación con 4% cloruro de sodio (NaCl)



Fuente: Elaboración propia.

Gráfica 3.12 Curva de compactación con 5% cloruro de sodio (NaCl)



Fuente: Elaboración propia.

3.6.2 CBR (Relación de Soporte de California)

Con la determinación de las humedades óptimas para cada porcentaje de cloruro de sodio (NaCl) ya mencionado en el ensayo de compactación, se determinará el ensayo de CBR, para determinar qué porcentaje de sal le proporcionará una mejor resistencia.

Figura 3.11: Adición de sal para CBR



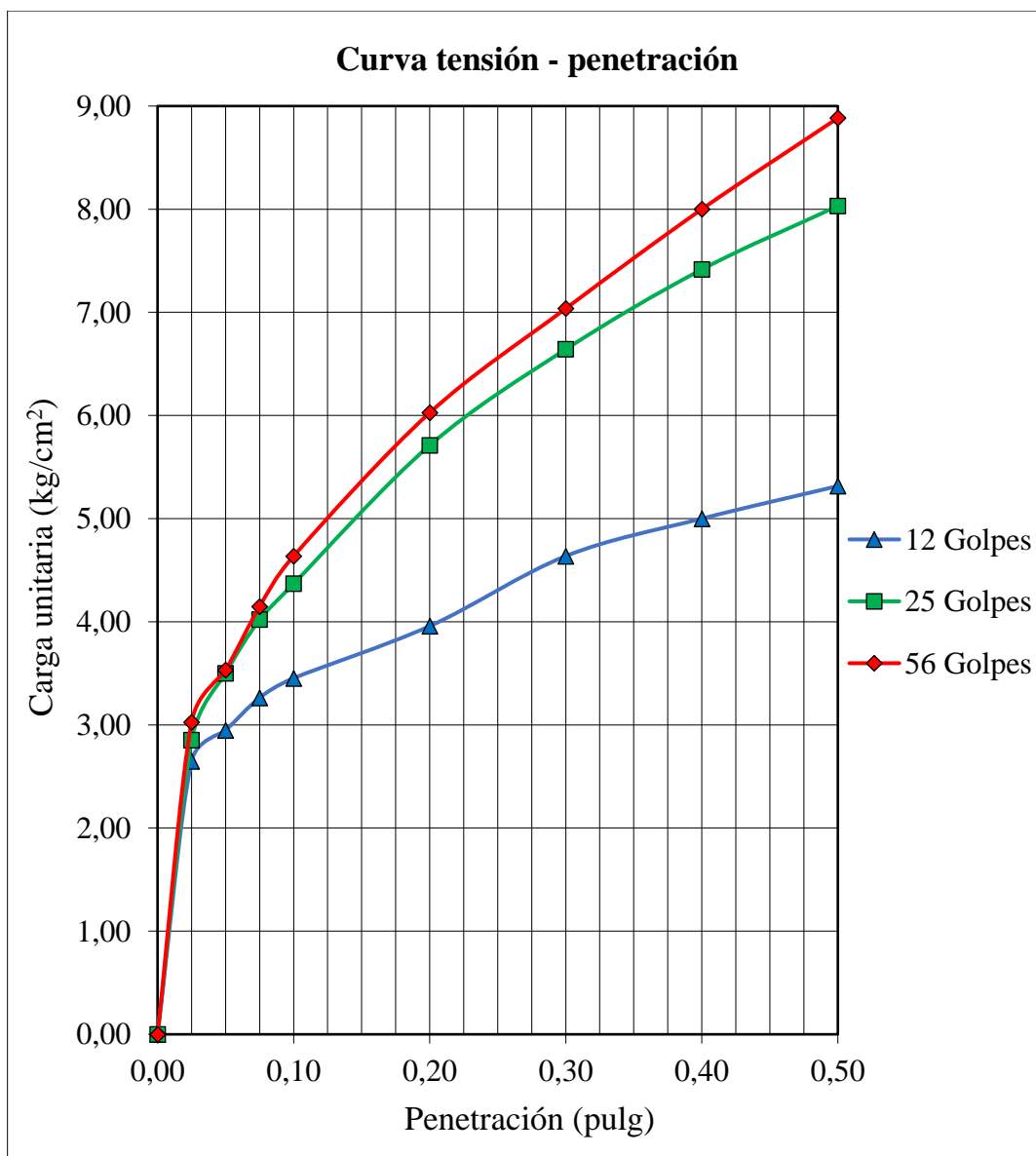
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.18 Resultados del ensayo de CBR con cloruro de sodio (NaCl)

Tramo en Estudio	Punto N°1		
	3%	4%	5%
CBR 100% D. máx.	7,624	9,345	10,867
CBR 95% D. máx.	5,447	6,400	7,216

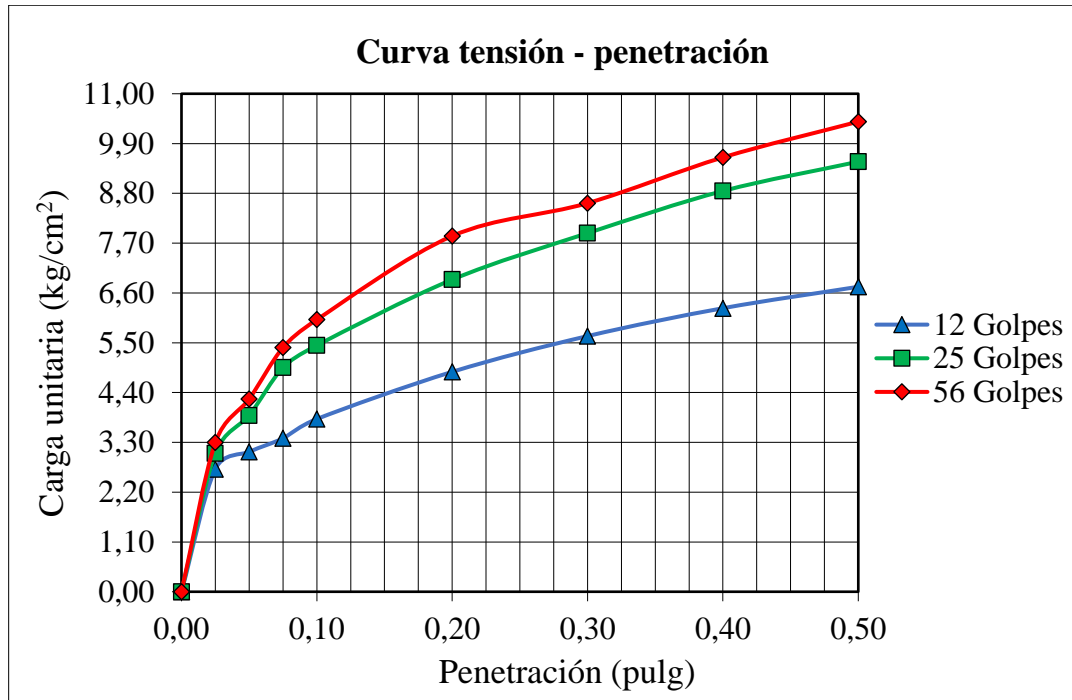
Fuente: Elaboración Propia.

Gráfica 3.13 Curva tensión – penetración 3% de sodio (NaCl)



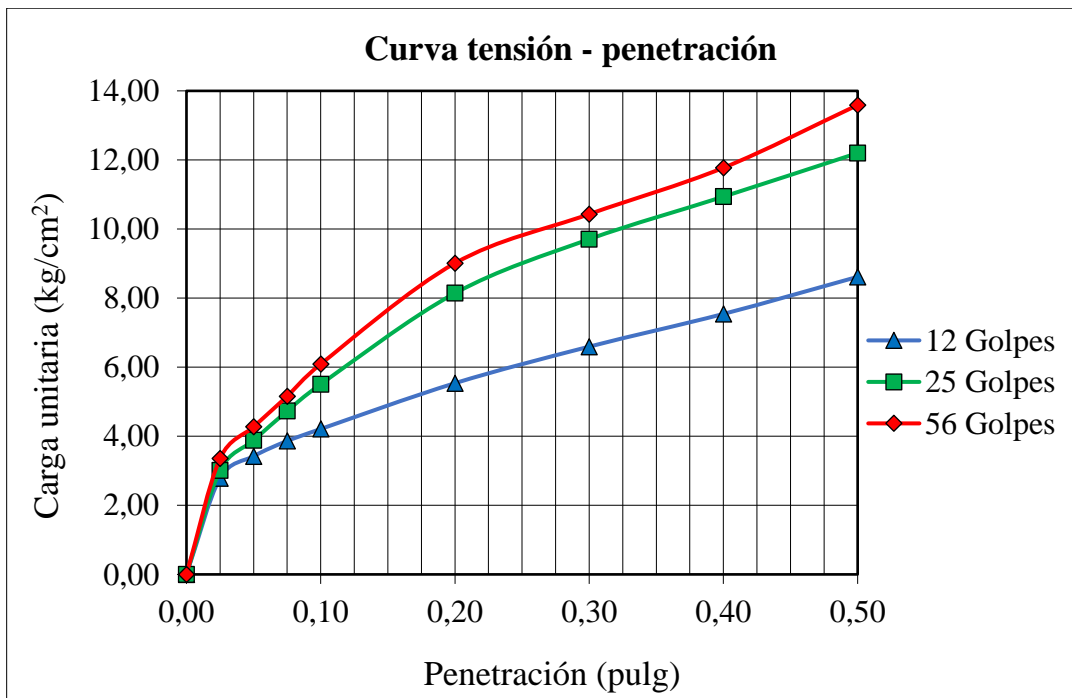
Fuente: Elaboración propia.

Gráfica 3.14 Curva tensión – penetración 4% de sodio (NaCl)



Fuente: Elaboración propia.

Gráfica 3.15 Curva tensión – penetración 5% de sodio (NaCl)

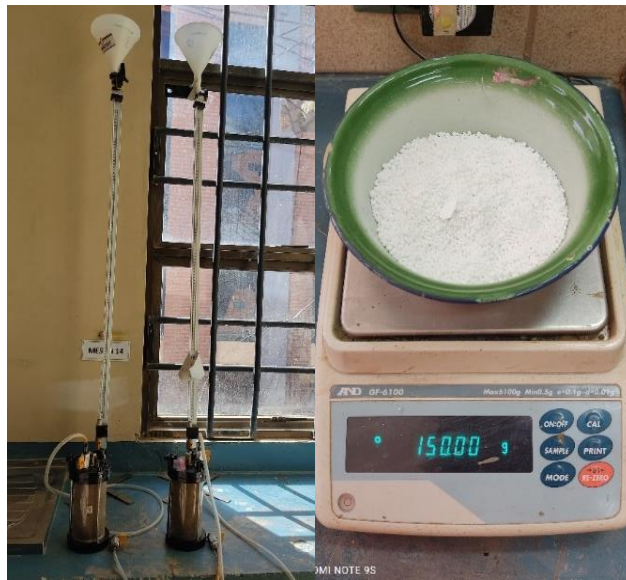


Fuente: Elaboración propia.

3.6.3 Permeabilidad

Se realizó la permeabilidad con la adición del cloruro de sodio (NaCl), con la finalidad de observar con varía la permeabilidad con el porcentaje de cloruro de sodio de mayor resistencia en cuanto al CBR, se utilizó 5% de cloruro de sodio con el mismo procedimiento del ya mencionado método de carga variable.

Figura 3.12: Adición de sal para permeabilidad



Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.19 Resultados del ensayo permeabilidad con cloruro de sodio (NaCl)

Tramo en estudio	Punto N°1
	5%
k (cm/s)	2,482E-07

Fuente: Elaboración propia.

3.7 Estabilización de suelo con cloruro de calcio (CaCl₂)

3.7.1 Compactación proctor estándar o modificado (AASHTO T-180)

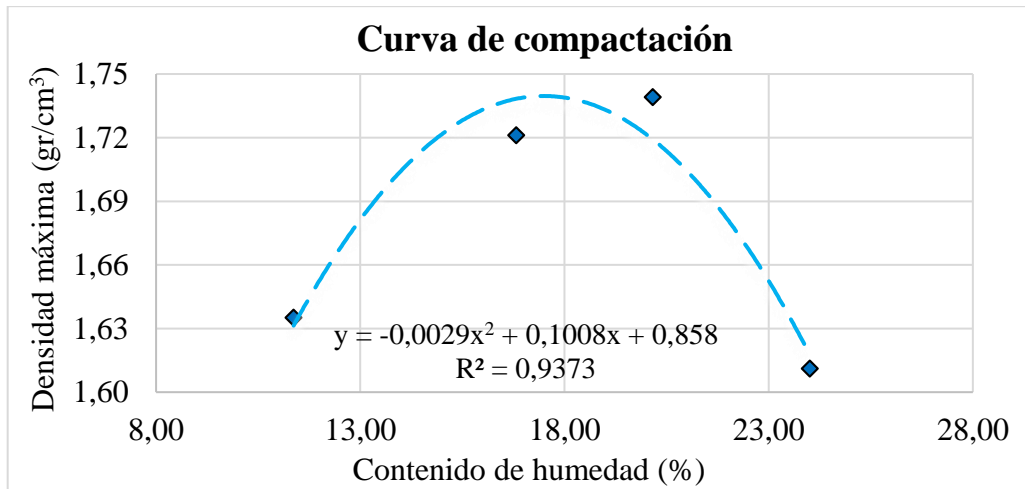
Se realizó el ensayo de compactación proctor estándar o modificado, con la adición del cloruro de calcio para obtener la humedad y densidad máxima, con diferentes porcentajes de cloruro de calcio (CaCl₂) en la mezcla, los porcentajes que se utilizaran será 3,4 y 5%.

Tabla 3.20 Resultados de compactación con cloruro de calcio (CaCl₂)

Tramo en estudio	Punto N°2		
	3%	4%	5%
Humedad óptima (%)	17,379	14,427	14,171
Densidad máxima (gr/cm³)	1,734	1,756	1,781

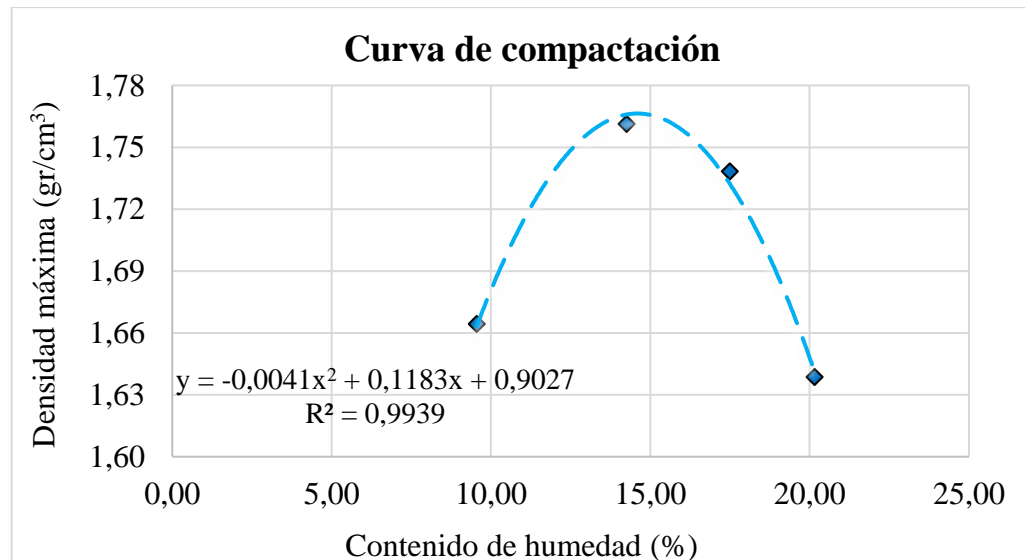
Fuente: Elaboración propia.

Gráfica 3.16 Curva de compactación con 3% cloruro de calcio (CaCl₂)



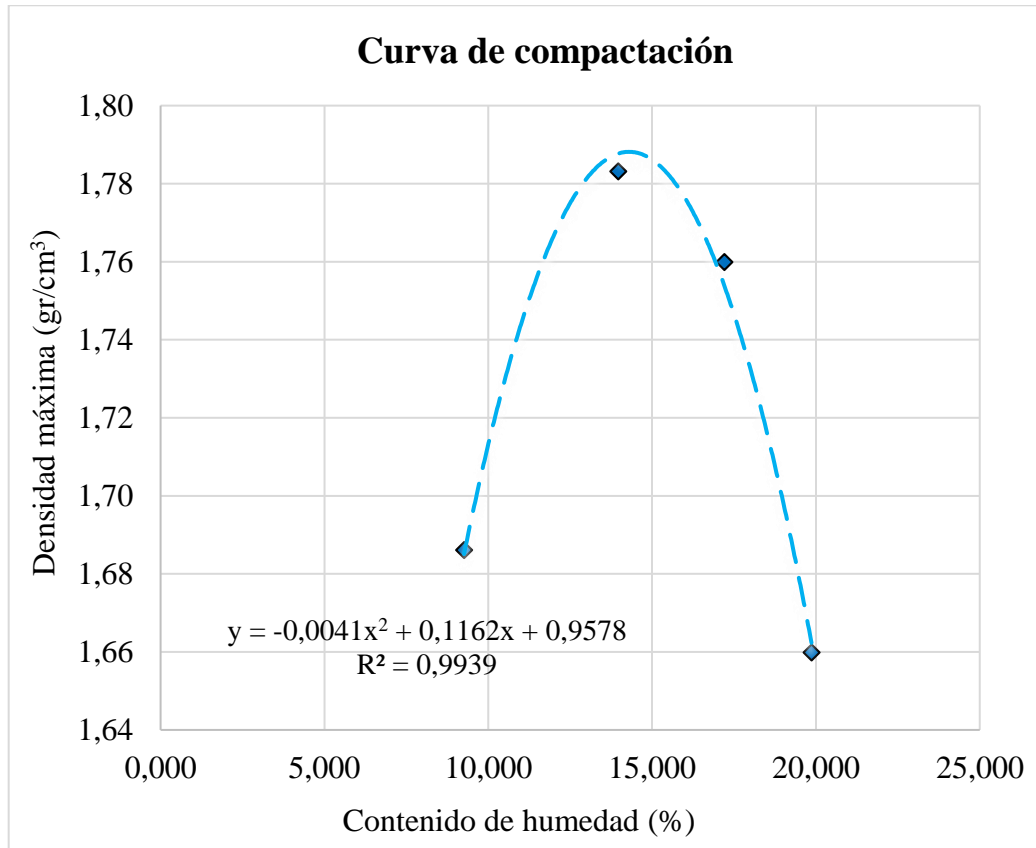
Fuente: Elaboración propia.

Gráfica 3.17 Curva de compactación con 4% cloruro de calcio (CaCl₂)



Fuente: Elaboración propia.

Gráfica 3.18 Curva de compactación con 5% cloruro de calcio (CaCl₂)



Fuente: Elaboración propia.

3.7.2 CBR (Relación de Soporte de California)

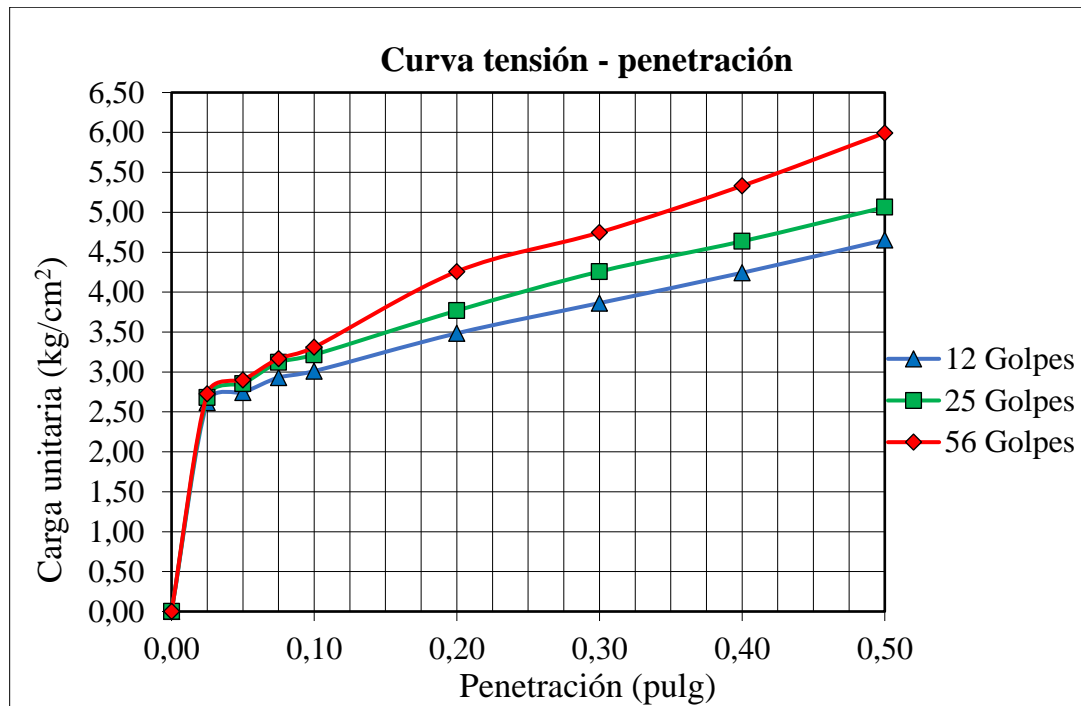
Con la determinación de las humedades óptimas para cada porcentaje de cloruro de calcio (CaCl₂) ya mencionado, se determinará el ensayo de CBR, para determinar qué porcentaje de sal le proporcione una mejor resistencia.

Tabla 3.21 Resultados del ensayo de CBR con cloruro de calcio (CaCl₂)

Tramo en estudio	Punto N°2		
	3%	4%	5%
CBR 100% D. máx.	4,414	4,784	6,160
CBR 95% D. máx.	3,753	4,144	5,633

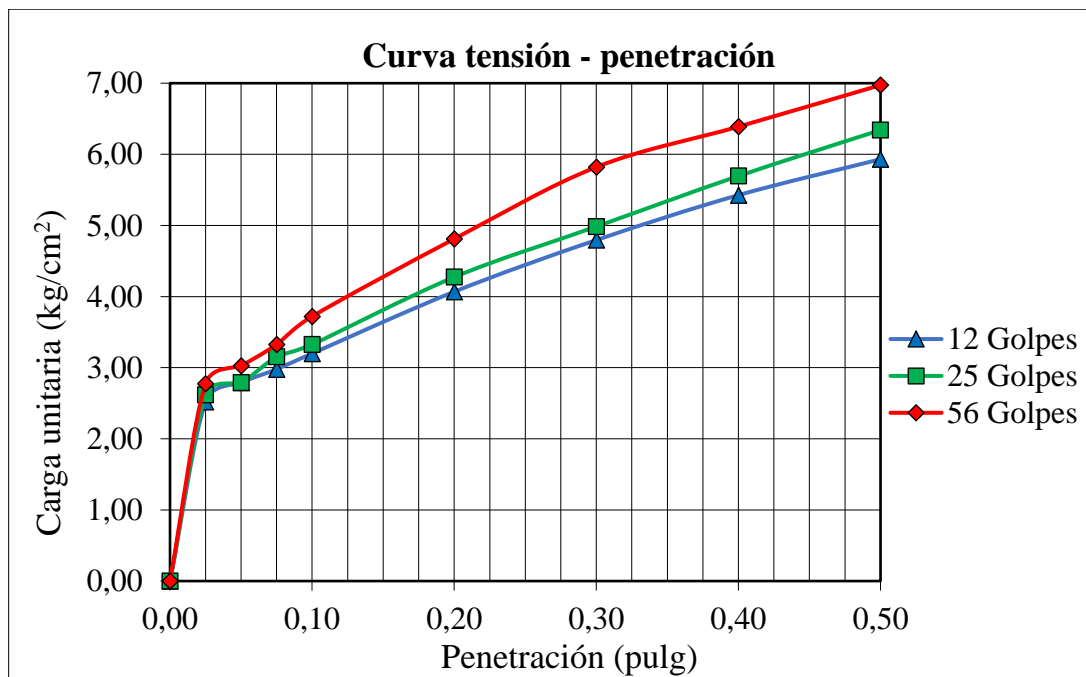
Fuente: Elaboración propia.

Gráfica 3.19 Curva tensión – penetración 3% de calcio (CaCl₂)



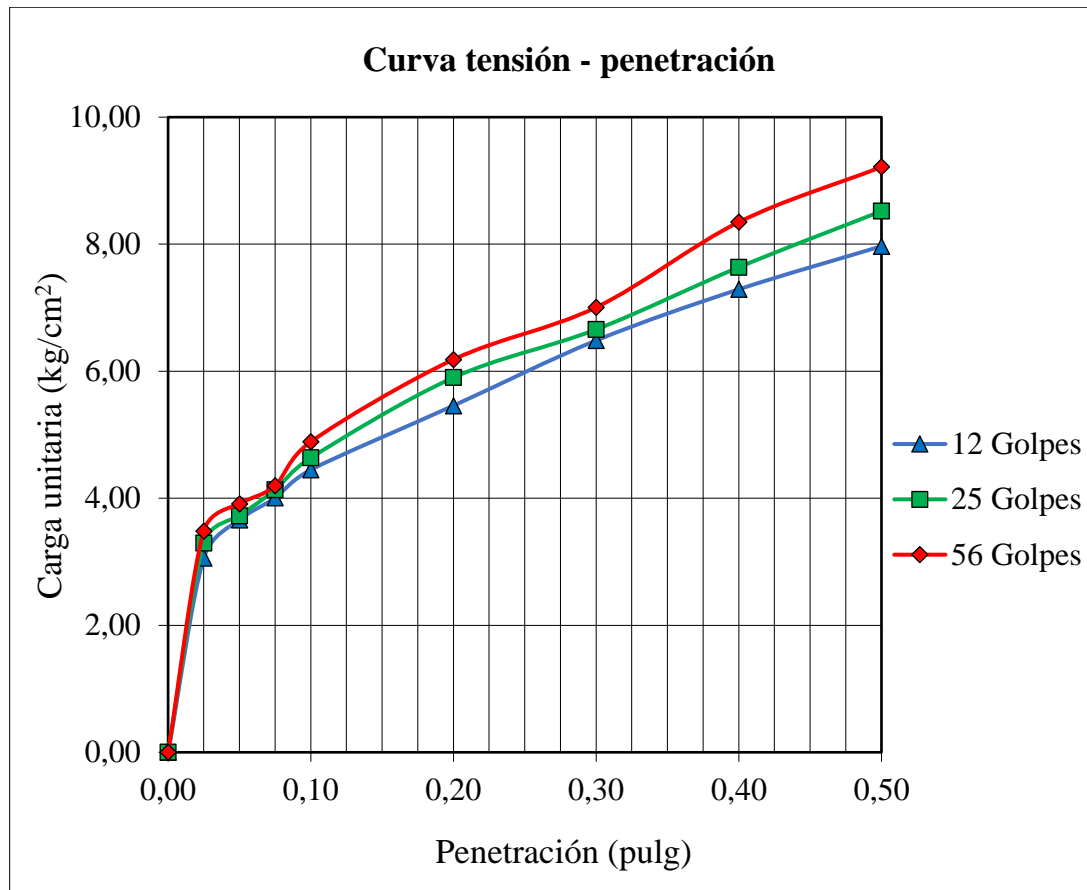
Fuente: Elaboración propia.

Gráfica 3.20 Curva tensión – penetración 4% de calcio (CaCl₂)



Fuente: Elaboración propia.

Gráfica 3.21 Curva tensión – penetración 5% de calcio (CaCl₂)



Fuente: Elaboración propia.

3.7.3 Permeabilidad

Se realizó la permeabilidad con la adición del cloruro de calcio (CaCl₂), con la finalidad de observar con varía la permeabilidad con el porcentaje de cloruro de calcio de mayor resistencia en cuanto al CBR, se utilizó 5% de cloruro de calcio con el mismo procedimiento del ya mencionado método de carga variable.

Tabla 3.22 Resultados del ensayo permeabilidad con cloruro de calcio (CaCl₂)

Tramo en estudio	Punto N°1
	5%
k (cm/s)	7,967E-08

Fuente: Elaboración Propia.

3.8 Estabilización de suelo con cloruro de potasio (KCl)

3.8.1 Compactación proctor estándar o modificado (AASHTO T-180)

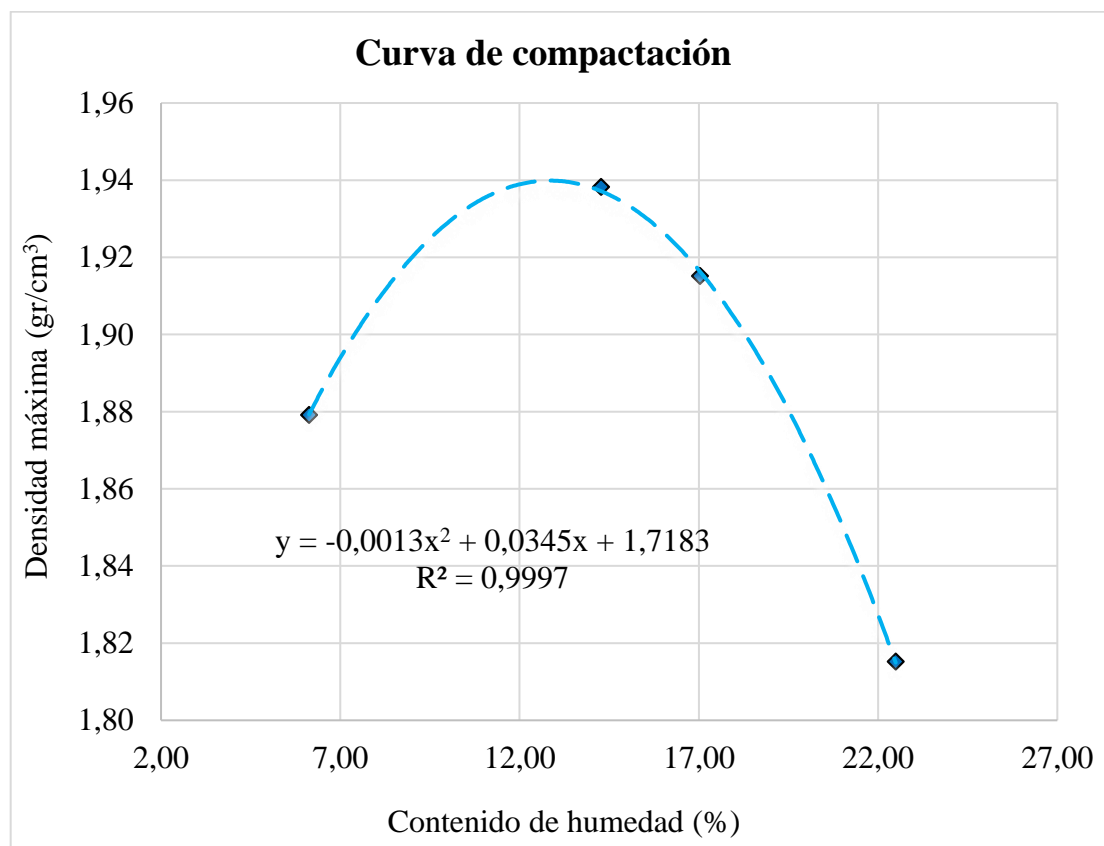
Se realizó el ensayo de compactación proctor estándar o modificado, con la adición del cloruro de potasio para obtener la humedad y densidad máxima, con diferentes porcentajes de cloruro de potasio (KCl) en la mezcla, los porcentajes que se utilizarán serán 3,4 y 5%.

Tabla 3.23 Resultados de compactación con cloruro de potasio (KCl)

Tramo en estudio	Punto N°3		
	3%	4%	5%
Humedad óptima (%)	13,269	14,077	14,143
Densidad máxima (gr/cm ³)	1,947	1,908	1,862

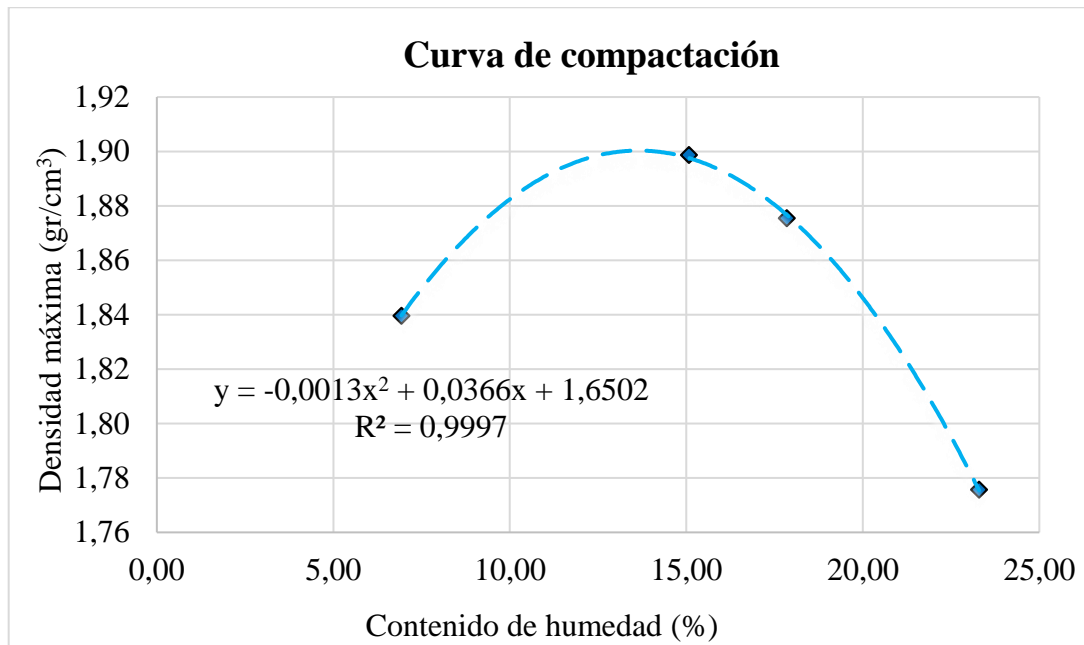
Fuente: Elaboración propia.

Gráfica 3.22 Curva de compactación con 3% cloruro de potasio (KCl)



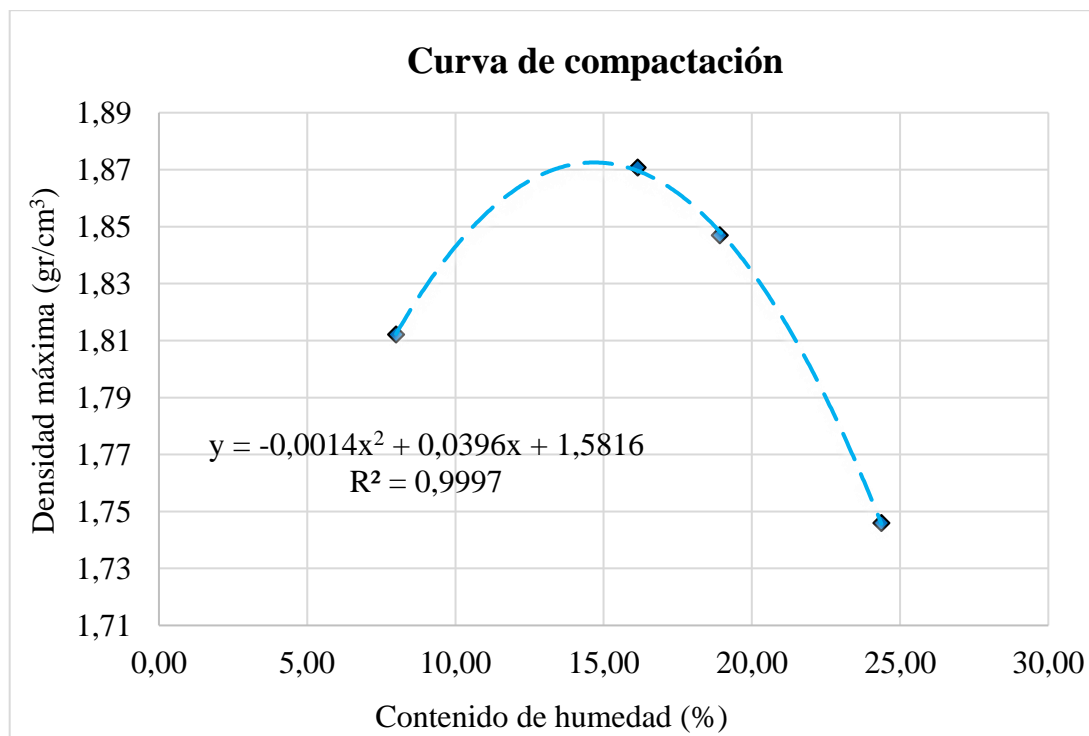
Fuente: Elaboración propia.

Gráfica 3.23 Curva de compactación con 4% cloruro de potasio (KCl)



Fuente: Elaboración propia.

Gráfica 3.24 Curva de compactación con 5% cloruro de potasio (KCl)



Fuente: Elaboración propia.

3.8.2 CBR (Relación de Soporte de California)

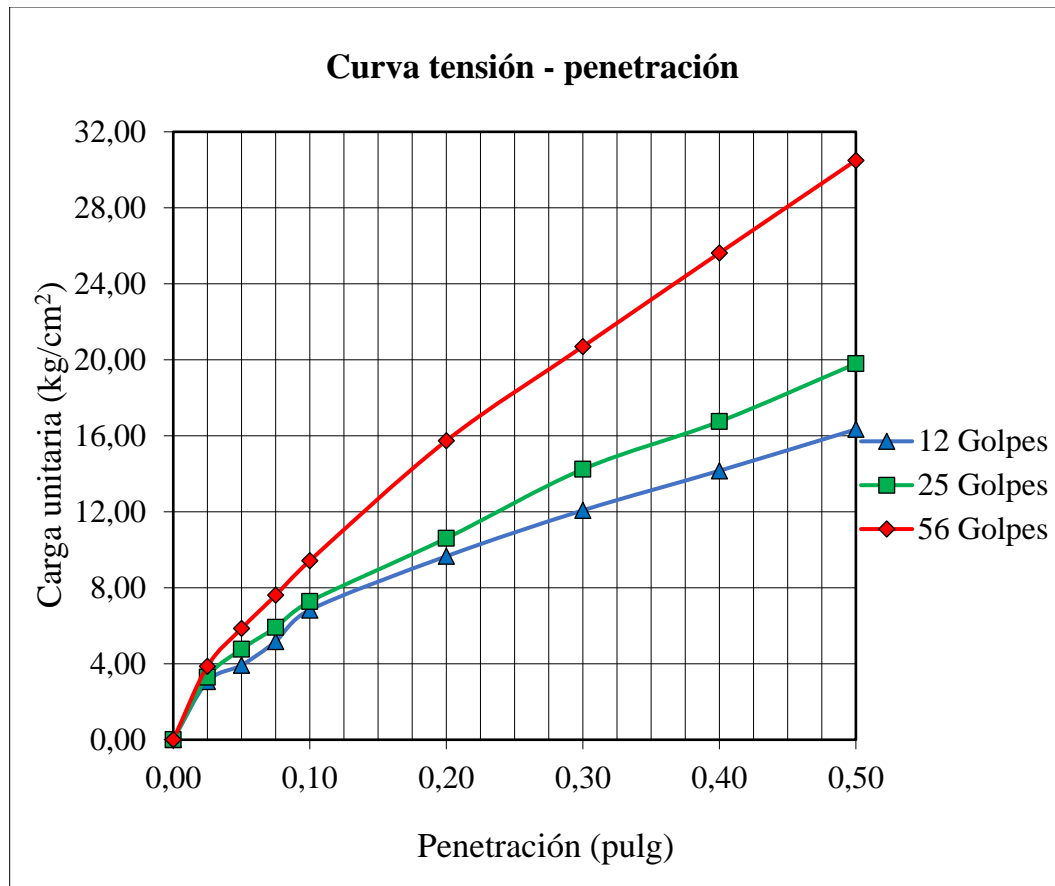
Con la determinación de las humedades óptimas para cada porcentaje de cloruro de potasio (KCl) ya mencionado, se determinará el ensayo de CBR, para determinar qué porcentaje de sal le proporcioné una mejor resistencia.

Tabla 3.24 Resultados del ensayo de CBR con cloruro de potasio (KCl)

Tramo en estudio	Punto N°3		
	3%	4%	5%
CBR 100% D. máx.	18,994	13,174	10,018
CBR 95% D. máx.	13,896	10,467	6,997

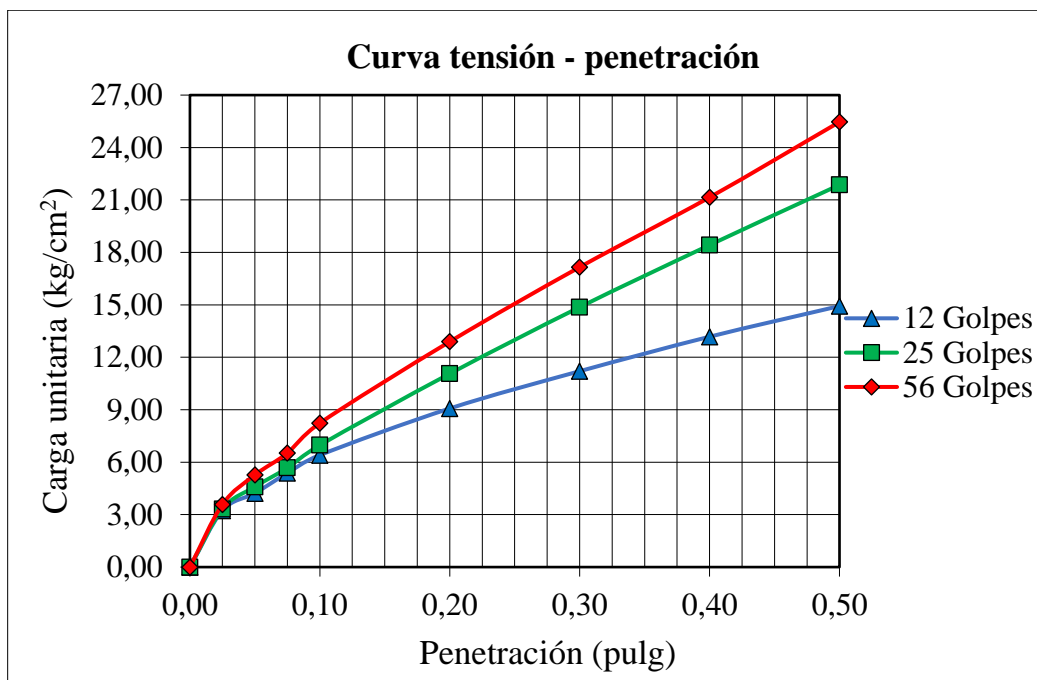
Fuente: Elaboración propia.

Gráfica 3.25 Curva tensión – penetración 3% de potasio (KCl)



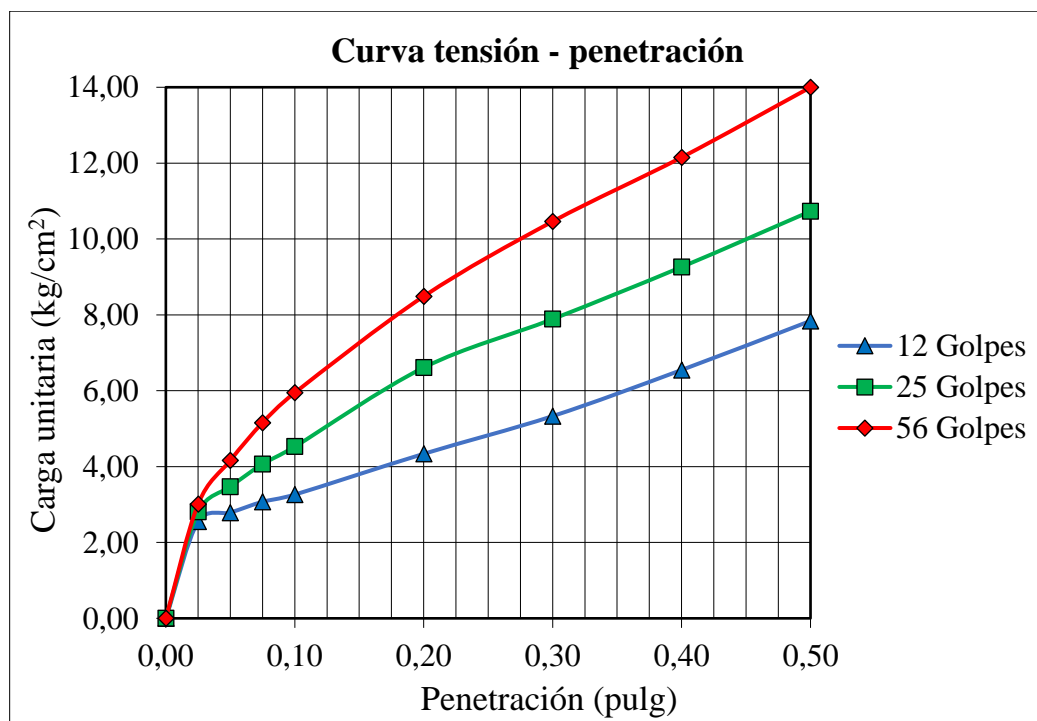
Fuente: Elaboración propia.

Gráfica 3.26 Curva Tensión – Penetración 4% de potasio (KCl)



Fuente: Elaboración propia.

Gráfica 3.27 Curva tensión – penetración 5% de potasio (KCl)



Fuente: Elaboración propia.

3.8.3 Permeabilidad

Se realizó la permeabilidad con la adición del cloruro de potasio (KCl), con la finalidad de observar con varía la permeabilidad con el porcentaje de cloruro de potasio de mayor resistencia en cuanto al CBR, se utilizó 3% de cloruro de potasio con el mismo procedimiento del ya mencionado método de carga variable.

Tabla 3.25 Resultados del ensayo permeabilidad con cloruro de potasio (KCl)

Tramo en estudio	Punto N°1
	3%
k (cm/s)	1,657E-07

Fuente: Elaboración propia.

3.9 Análisis de regresión del CBR con adición de las sales

El análisis de regresión es una herramienta de frecuente uso en estadística. La cual permite investigar las relaciones entre diferentes variables cuantitativas. Esto, mediante la formulación de ecuaciones matemáticas.

Con el análisis de regresión nos facilita que podamos calcular un valor futuro de los porcentajes del CBR con la adición de los diferentes tipos de sales, con el cloruro de sodio, cloruro de calcio y cloruro de potasio.

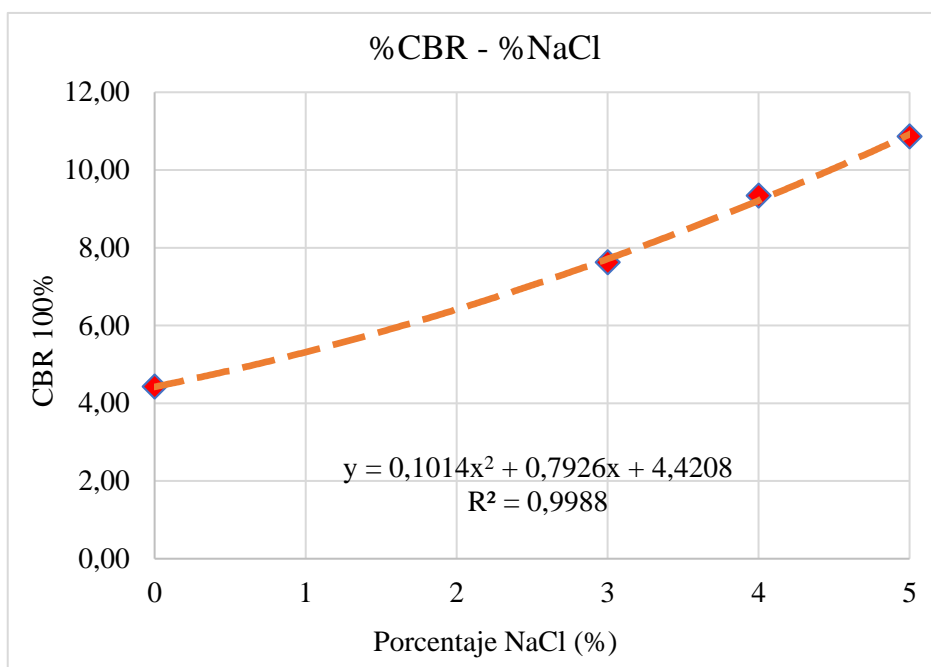
3.9.1 Análisis de regresión %CBR con cloruro de sodio (NaCl)

Tabla 3.26 Resultados de variacion del CBR con cloruro de sodio (NaCl)

Tramo en estudio	Punto N°1			
	Natural	3% (NaCl)	4% (NaCl)	5% (NaCl)
CBR 100%	4,430	7,624	9,345	10,867

Fuente: Elaboración propia.

Gráfica 3.28 Curva CBR 100% - porcentaje de cloruro de sodio (NaCl)



Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.27 Resultados de regresión del CBR con cloruro de sodio (NaCl)

Punto N°1 con NaCl	
Porcentaje NaCl (%)	CBR 100%
6,0	12,827
7,0	14,938
8,0	17,251

Fuente: Elaboración propia.

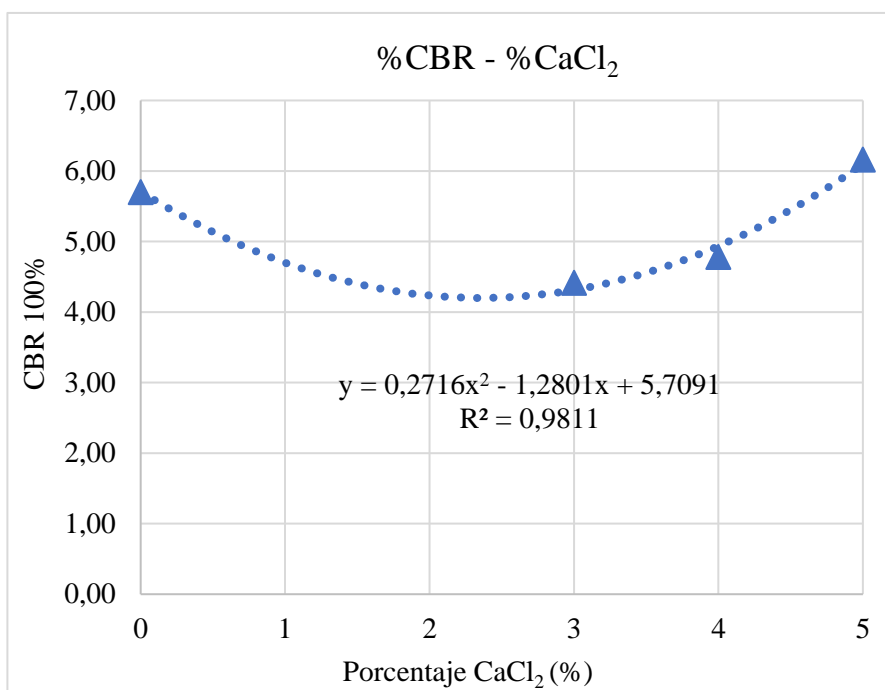
3.9.2 Análisis de regresión %CBR con cloruro de calcio (CaCl₂)

Tabla 3.28 Resultados de variación del CBR con cloruro de calcio (CaCl₂)

Tramo en estudio	Punto N°2			
	Natural	3% (CaCl ₂)	4% (CaCl ₂)	5% (CaCl ₂)
CBR 100%	5,699	4,414	4,784	6,160

Fuente: Elaboración propia.

Gráfica 3.29 Curva CBR 100% - porcentaje de cloruro de calcio (CaCl₂)



Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.29 Resultados de regresión del CBR con cloruro de calcio (CaCl₂)

Punto N°2 con CaCl ₂	
Porcentaje CaCl ₂ (%)	CBR 100%
6,0	7,806
7,0	10,057
8,0	12,851

Fuente: Elaboración propia.

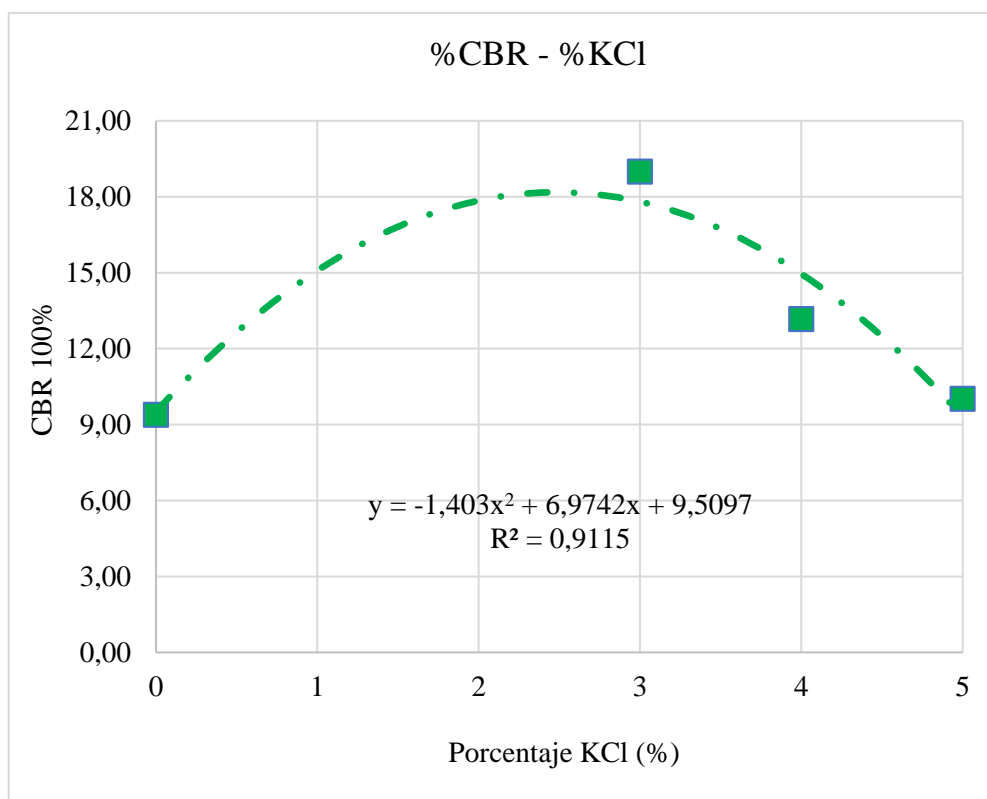
3.9.3 Análisis de regresión %CBR con cloruro de calcio (KCl)

Tabla 3.30 Resultados de variación del CBR con cloruro de potasio (KCl)

Tramo en estudio	Punto N°3			
	Natural	3% (KCl)	4% (KCl)	5% (KCl)
CBR 100%	9,391	18,994	13,174	10,018

Fuente: Elaboración propia.

Gráfica 3.30 Curva CBR 100% - porcentaje de cloruro de potasio (KCl)



Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.31 Resultados de regresión del CBR con cloruro de potasio (KCl)

Punto N°3 con KCl	
Porcentaje KCl (%)	CBR 100%
6,0	0,847
7,0	0,000
8,0	0,000

Fuente: Elaboración propia.

3.10 Ensayos de control

3.10.1 Límites de atterberg (ASTM D4318, AASHTO T89-T90)

Se realizó nuevamente los ensayos de límites de atterberg con la finalidad de ver como afectaba las sales en la determinación del límite líquido y límite plástico, el procedimiento

de los ensayos mencionados se mantiene, lo que variaría es la implementación de la sal al suelo tamizado, se escogió tres diferentes suelos, los suelos escogidos ya se determinaron los límites de atterberg anteriormente, se utilizó el suelo del punto N°4, 5 y 6.

Figura 3.13: Límites de atterberg con sales



Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.32 Resultados del ensayo de límites de atterberg con sales

Tramo en estudio	Punto N°4	Punto N°5	Punto N°6
Límite líquido (%)	28,498	23,416	28,273
Límite plástico (%)	17,179	15,444	18,951
Índice de plasticidad (%)	11,319	7,972	9,322

Fuente: Elaboración propia.

3.10.2 Clasificación de suelo AASHTO y SUCS

Obteniendo los resultados de los límites de atterberg, se realizó nuevamente la clasificación de los suelos mediante AASHTO y SUCS, para averiguar si la implementación de las sales afectaría mucho en los límites, así cambiando su clasificación de los suelos del punto N°4, 5 y 6.

Tabla 3.33 Resultados de clasificación AASHTO y SUCS con sales

Clasificación del suelo			Descripción
Punto N°4	SUCS:	CL	Arcilla inorgánica baja compresibilidad
	AASHTO:	A - 6 (9)	Suelo arcilloso plástico
Punto N°5	SUCS:	ML - CL	Arcilla limosa inorgánica
	AASHTO:	A - 4 (5)	Suelo limoso no plástico
Punto N°6	SUCS:	CL	Arcilla inorgánica baja compresibilidad
	AASHTO:	A - 4 (8)	Suelo limoso no plástico

Fuente: Elaboración propia.

3.11 Pérdida de agentes estabilizadores por efecto de precipitaciones

Después de realizar la estabilización con sales el camino se vuelve prácticamente impermeable a la humedad y el agua de lluvia escurre en forma similar a un camino pavimentado, pero durante los meses de lluvias intensas y persistentes, las sales se pueden disociar en el agua de la lluvia y escurrir a los costados del camino e incluso llegar a infiltrarse, teniendo la posibilidad de contaminar la vegetación y cultivos aledaños.

Para comprobar si existiera una disociación de las sales de los suelos estabilizados, se realizó unos ensayos de CBR con las sales que dieron mejores resultados en cuanto a la resistencia, 3% para el cloruro de potasio y 5% para el cloruro de calcio y cloruro de sodio, con la finalidad de saturar el suelo estabilizado simulando una lluvia.

Figura 3.14: Comprobación de pérdida de agentes estabilizadores



Fuente: Elaboración propia.

3.11.1 Ensayos de control de pH en suelos de cultivos aledaño

La determinación del pH de los suelos se realizó en el laboratorio de suelos de la facultad de ciencias agrícolas y forestales, el ensayo se lo realizo por el método de potenciométrico, desarrollado por los laboratoristas.

El suelo en estudio se lo extrajo de un terreno de un viñedo ubicado al costado del camino

Figura 3.15: Extracción de suelo para pH



Fuente: Elaboración propia.

Se realizaron cuatro ensayos del pH, el primero el suelo en estado natural y los demás saturado con el agua obtenida con el ensayo de comprobación de pérdidas de agentes estabilizadores, con la finalidad de ver si afectaría al suelo de los cultivos aledaños.

Tabla 3.34 Resultados del ensayo de ph

N°	Identificación	pH
1	Suelo natural	8,08
2	Suelo saturado con NaCl	7,57
3	Suelo saturado con CaCl ₂	7,18
4	Suelo saturado con KCl	7,42

Fuente: Elaboración propia.

3.12 Resumen de resultados

Tabla 3.35 Resultados de los ensayos de caracterización de suelos a estabilizar

Tramo en estudio	Clasif. (AASHTO)	Clasifi. (SUCS)	Contenido de humedad (%)	Límites de atterberg (%)			Compactación T-180		CBR		Expansión (%)
				L.L	L.P	I.P	Dens. máx. (gr/cm ³)	Hum. opt. (%)	95%	100%	
Punto N°1	A - 4 (8)	CL	16,586	29,894	20,051	9,843	1,845	15,071	4,074	4,430	5,54
Punto N°2	A - 4 (8)	CL	15,480	27,064	17,867	9,196	1,742	16,560	5,204	5,699	3,09
Punto N°3	A - 4 (8)	CL	13,367	27,714	20,448	7,265	1,919	14,000	6,585	9,391	0,98

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.36 Resultados de los ensayos de caracterización de suelos en estudio

Tramo en estudio	Clasificación (AASHTO)	Clasificación (SUCS)	Contenido de humedad (%)	Límites de atterberg (%)		
				L.L	L.P	I.P
Punto N°4	A - 4 (8)	CL	14,237	33,36	24,275	9,084
Punto N°5	A - 4 (5)	ML - CL	5,545	25,121	18,369	6,752
Punto N°6	A - 4 (8)	CL	9,852	32,725	22,816	9,909
Punto N°7	A - 4 (8)	CL	12,344	28,213	19,692	8,521
Punto N°8	A - 4 (8)	CL	14,525	29,346	20,825	8,521
Punto N°9	A - 4 (8)	CL	9,591	30,896	21,004	9,891
Punto N°10	A - 4 (8)	CL	10,029	32,093	23,026	9,067

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.37 Resultados de los ensayos de límites de atterberg con adición de cloruro de sodio (NaCl)

Tramo en estudio	Tramo N°4	Tramo N°4
	Natural	NaCl 5%
L.L.	33,360	28,498
L.P.	24,275	17,179
I.P.	9,084	11,319

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.38 Resultados de los ensayos de límites de atterberg con adición de cloruro de potasio (KCl)

Tramo en estudio	Tramo N°5	Tramo N°5
	Natural	KCl 3%
L.L.	25,121	23,416
L.P.	18,369	15,444
I.P.	6,752	7,972

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.39 Resultados de los ensayos de límites de atterberg con adición de cloruro de calcio (CaCl₂)

Tramo en estudio	Tramo N°6	Tramo N°6
	Natural	CaCl ₂ 5%
L.L.	32,725	28,273
L.P.	22,816	18,951
I.P.	9,909	9,322

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.40 Resultados de clasificación de suelos con adición de sales

Tramo en estudio	AASHTO	SUCS
Punto N°4	A - 4 (8)	CL
P4 + NaCl 5%	A - 6 (9)	CL
Tramo N°5	A - 4 (5)	ML - CL
P5 + KCl 3%	A - 4 (5)	ML - CL
Tramo N°6	A - 4 (8)	CL
P6 + CaCl ₂ 5%	A - 4 (8)	CL

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.41 Resultados de los ensayos de compactación con adición de cloruro de sodio (NaCl)

Tramo en estudio	Tramo N°1	Tramo N°1	Tramo N°1	Tramo N°1
	Natural	NaCl 3%	NaCl 4%	NaCl 5%
Hum. ópt. (%)	15,071	14,438	13,675	13,130
Dens. máx. (gr/cm ³)	1,845	1,850	1,867	1,888

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.42 Resultados de los ensayos de compactación con adición de cloruro de calcio (CaCl₂)

Tramo en estudio	Tramo N°2	Tramo N°2	Tramo N°2	Tramo N°2
	Natural	CaCl ₂ 3%	CaCl ₂ 4%	CaCl ₂ 5%
Hum. ópt. (%)	16,560	17,379	14,427	14,171
Dens. máx. (gr/cm ³)	1,742	1,734	1,756	1,781

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.43 Resultados de los ensayos de compactación con adición de cloruro de potasio (KCl)

Tramo en estudio	Tramo N°3	Tramo N°3	Tramo N°3	Tramo N°3
	Natural	KCl 3%	KCl 4%	KCl 5%
Hum. ópt. (%)	14,000	13,269	14,077	14,143
Dens. máx. (gr/cm ³)	1,919	1,947	1,908	1,862

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.44 Resultados de los ensayos de CBR con adición de cloruro de sodio (NaCl)

Tramo en estudio	Tramo N°1	Tramo N°1	Tramo N°1	Tramo N°1
	Natural	NaCl 3%	NaCl 4%	NaCl 5%
CBR 95 %	4,074	5,447	6,400	7,216
CBR 100 %	4,430	7,624	9,345	10,867
Expansión %	5,54	1,73	2,14	1,28

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.45 Resultados de los ensayos de CBR con adición de cloruro de calcio (CaCl₂)

Tramo en estudio	Tramo N°2	Tramo N°2	Tramo N°2	Tramo N°2
	Natural	CaCl ₂ 3%	CaCl ₂ 4%	CaCl ₂ 5%
CBR 95 %	5,204	3,753	4,144	5,633
CBR 100 %	5,699	4,414	4,784	6,160
Expansión %	3,09	2,20	2,03	1,19

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.46 Resultados de los ensayos de CBR con adición de cloruro de potasio (KCl)

Tramo en estudio	Tramo N°3	Tramo N°3	Tramo N°3	Tramo N°3
	Natural	KCl 3%	KCl 4%	KCl 5%
CBR 95 %	6,585	13,896	10,467	6,997
CBR 100 %	9,391	18,994	13,174	10,018
Expansión %	0,98	0,91	1,42	0,88

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.47 Resultados de los ensayos de permeabilidad con adición de las sales

Tramo en estudio	Tramo N°1	Tramo N°1	Tramo N°1	Tramo N°1
	Natural	NaCl 5%	CaCl ₂ 5%	KCl 3%
k (cm/s)	2,98E-07	2,48E-07	7,97E-08	1,66E-07

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.48 Resultados de los ensayos de pH

N°	Identificación	pH
1	Suelo natural	8,08
2	Suelo saturado con NaCl	7,57
3	Suelo saturado con CaCl ₂	7,18
4	Suelo saturado con KCl	7,42

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.49 Resumen de la estabilización de suelos con sales

Tramo en estudio	Punto N°1				Punto N°2				Punto N°3			
	Natural	3% (NaCl)	4% (NaCl)	5% (NaCl)	Natural	3% (CaCl ₂)	4% (CaCl ₂)	5% (CaCl ₂)	Natural	3% (KCl)	4% (KCl)	5% (KCl)
Den. máx. (gr/cm³)	1,845	1,850	1,867	1,888	1,742	1,734	1,756	1,781	1,919	1,947	1,908	1,862
Hum. ópt. (%)	15,071	14,438	13,675	13,130	16,560	17,379	14,427	14,171	14,000	13,269	14,077	14,143
CBR 95%	4,074	5,447	6,400	7,216	5,204	3,753	4,144	5,633	6,585	13,896	10,467	6,997
CBR 100%	4,430	7,624	9,345	10,867	5,699	4,414	4,784	6,160	9,391	18,994	13,174	10,018
Expansión (%)	5,540	1,732	2,144	1,278	3,087	2,204	2,033	1,192	0,978	0,909	1,420	0,883

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.50 Resumen del efecto de sales a los límites de atterberg

Tramo en estudio	Punto N°4		Punto N°5		Punto N°6	
	Natural	NaCl 5%	Natural	KCl 3%	Natural	CaCl ₂ 5%
Límite líquido (%)	33,360	28,498	25,121	23,416	32,725	28,273
Límite plástico (%)	24,275	17,179	18,369	15,444	22,816	18,951
Índice de plasticidad (%)	9,084	11,319	6,752	7,972	9,909	9,322

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.51 Resultados de regresión del CBR con cloruro de sodio (NaCl)

Punto N°1 con NaCl	
Porcentaje NaCl (%)	CBR 100%
6,0	12,827
7,0	14,938
8,0	17,251

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.52 Resultados de regresión del CBR con cloruro de calcio (CaCl₂)

Punto N°2 con CaCl₂	
Porcentaje CaCl₂ (%)	CBR 100%
6,0	7,806
7,0	10,057
8,0	12,851

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.53 Resultados de regresión del CBR con cloruro de potasio (KCl)

Punto N°3 con KCl	
Porcentaje KCl (%)	CBR 100%
6,0	0,847
7,0	0,000
8,0	0,000

Fuente: Elaboración propia.

3.13 Análisis de resultados

3.13.1 Análisis de resultados de las propiedades de los suelos a estabilizar

A continuación, se presentan los análisis de los resultados de los ensayos realizados a cada una de las muestras de suelos antes de ser tratados con cloruro de sodio, cloruro de calcio y cloruro de potasio.

Las muestras de suelo utilizadas se han clasificado según el lugar de donde fueron extraídas, es decir de cada punto de extracción, teniendo en cuenta que eran 10 puntos en todo el tramo.

La ubicación de los 10 puntos de extracción de muestras tiene las siguientes coordenadas:

- ❖ Muestra N°1 - Latitud 21°37'47.63"S; Longitud 64°37'40.11"O
- ❖ Muestra N°2 – Latitud 21°37'36.52"S; Longitud 64°37'28.72"O
- ❖ Muestra N°3 – Latitud 21°37'29.35"S; Longitud 64°37'13.76"O
- ❖ Muestra N°4 - Latitud 21°37'16.32"S; Longitud 64°37'22.76"O
- ❖ Muestra N°5 - Latitud 21°37'2.83"S; Longitud 64°37'19.10"O
- ❖ Muestra N°6 - Latitud 21°36'49.90"S; Longitud 64°37'11.82"O
- ❖ Muestra N°7 - Latitud 21°36'37.18"S; Longitud 64°37'1.60"O
- ❖ Muestra N°8 - Latitud 21°36'32.80"S; Longitud 64°36'47.95"O
- ❖ Muestra N°9 - Latitud 21°36'39.74"S; Longitud 64°36'32.42"O
- ❖ Muestra N°10 - Latitud 21°36'48.89"S; Longitud 64°36'18.51"O

Para las muestras el primer ensayo que se realizó fue el contenido de humedad dando como resultado un máximo de 16,6% y un mínimo de 5,5% ver en Tabla (3,8;3,9;3,10), lo que indicaba que la humedad del suelo variaba en diferentes tramos lo que es importante saber para realizar una correcta estabilización de suelos. Seguido se realizó el ensayo de granulometría que nos dio como resultado un máximo de 89,17% y mínimo de 58,18% que pasaba el tamiz N°200 ver en Tabla (3,2;3,3;3,4), lo cual nos indicaba que se estaría tratando de unos suelos limo arcilloso según la clasificación de suelo AASHTO, que nos dice que si un suelo pasa como mínimo un 36% se lo considera un suelo limo arcilloso.

Después se realizó los ensayos de límites de atterberg para cada punto, teniendo como máximo un límite líquido de 33,36% y un mínimo de 25,12%, los resultados de los límites plásticos tiene un máximo de 24,27% y un mínimo de 17,87%, dando un índice de plasticidad como máximo un 9,91% y un mínimo de 6,75% ver en Tabla (3,5;3,6;3,7), cuando los suelos presentan un índice de plasticidad entre 5 a 10% se considera que tiene un grado de plasticidad baja lo que nos indica que los suelos del tramo en estudio tienen esa característica. Teniendo los resultados de granulometría y los límites de atterberg, ya se puede saber qué tipo de suelo se está estudiando con la ayuda de la clasificación AASHTO y SUCS, los resultados de la clasificación por AASHTO salió un A-4(8), con excepción de tramo N°5 que varió en el índice de grupo A-4(5), siendo un suelo limoso no plástico, en cuanto a la clasificación SUCS, se clasificó con un CL que es una arcilla

inorgánica baja compresibilidad, a excepción del tramo N°5 que salió un ML-CL, que es una arcilla limosa inorgánica ver en Tabla (3,11;3,12;3,13).

Con la finalidad de comparar las características que le adiciona las sales al suelo en estudio se realizó el ensayo de compactación T-180 y en ensayo de CBR Californian Bearing Ratio para los tres primeros tramos, en el tramo N°1 se obtuvo un valor de 1,845gr/cm³ de densidad máxima y 15,071% de humedad óptima, con un CBR(100%) de 4,430% y una expansión de 5,54%, para el punto N°2 y punto N°3 se realizó el mismo procedimiento de ensayos ver en tabla (3,15).

3.13.2 Análisis de resultados de propiedades de los suelos con la adición de sales

Para realizar correctamente los ensayos de CBR para la estabilización de suelos con las sales se tiene que realizar en ensayo de compactación T-180 con la adición de la sal, con la finalidad de observar cómo afecta a la densidad y humedad óptima a los tres primeros puntos que ya se calculó esos parámetros, para el tramo N°1 se trabajó con la adición del cloruro de sodio, para el tramo N°2 se trabajó con el cloruro de calcio y para el tramo N°3 con el cloruro de potasio.

La cantidad de sales que se utilizó fue de 3,4,5%, para el tramo N°1 la densidad máxima en estado natural era de 1,845 gr/cm³ con 15,071% de humedad óptima y fue aumentando a medida que se adicionaba el cloruro de sodio, llegó a una densidad de 1,888 gr/cm³ con 13,130% de humedad óptima, con eso quiere decir que con la implementación de la sal la densidad aumentó y la humedad óptima disminuyó, fue el mismo caso para el tramo N°2 el suelo en estado natural tenía 1,742 gr/cm³ con 16,560%, con la adición del cloruro de calcio llegó a tener 1,781 con 14,171%, pero en el caso del tramo N°3 el suelo en estado natural presentaba una densidad máxima de 1,919 gr/cm³ con 14% de humedad óptima, con la adición de la sal llegó a tener una densidad máxima de 1,862 gr/cm³ con 14,143% de humedad óptima, es decir la densidad disminuyó y el contenido de humedad aumentó, pero no fue gradual con el 3% de sal la densidad máxima aumentó y la humedad óptima disminuyó, pero al seguir aumentando el cloruro de potasio la densidad máxima empezó a disminuir y la humedad a aumentar ver en tabla (3,17;3,20;3,23).

3.13.3 Análisis de los resultados de CBR estabilizados con sales

Una vez teniendo las densidades máximas y humedades óptimas de los suelos en estudio se realizó los ensayos de CBR con los diferentes porcentajes de sales adicionadas, para el tramo N°1 el suelo natural presentaba un CBR (100%) igual a 4,430% y una expansión de 5,54%, con la adición del 5% de cloruro de sodio llegó a tener un CBR (100%) de 10,867% y una expansión de 1,28%, aumentando el CBR y disminuyendo la expansión del mismo, el incremento del CBR fue gradual a medida que se aumentaba el cloruro de sodio.

Para el tramo N°2 el suelo natural presentó un CBR (100%) de 5,699% y una expansión de 3,09%, con la adición del 5% del cloruro de calcio llegó a tener un CBR (100%) de 6,160% y una expansión de 1,19%, en este caso al adicionar el primer porcentaje de sal el CBR disminuyó, con el siguiente porcentaje aumento hasta llegar al porcentaje del 5% de cloruro de calcio.

En el tramo N°3 el suelo natural presento un CBR (100%) de 9,391% y una expansión de 0,98%, con la adición del 3% de cloruro de potasio llegó a tener un CBR (100%) de 18,994% y una expansión 0,91%, en el caso del cloruro de potasio con el aumento de la sal el CBR empezó a disminuir de manera gradual llegando a tener un CBR (100%) de 10,018% con el 5% de sal, aun así un mayor CBR que el suelo natural, en el caso de la expansión con el 3% disminuyó, con el 4% aumentó y con el 5% disminuyó nuevamente ver Tabla (3,18;3,21;3,24).

Con los resultados obtenidos del ensayo de CBR con las diferentes sales tales como el cloruro de sodio, cloruro calcio y cloruro de potasio, se pudo observar los beneficios que aportaron las sales desde el punto de vista mecánico con los siguientes resultados en cuanto al incremento del CBR:

- ❖ Cloruro de sodio. – Tuvo un incremento del 6,437% de CBR al 100% con un 5% de (NaCl)
- ❖ Cloruro de calcio. – Tuvo un incremento del 0,461% de CBR al 100% con un 5% de (CaCl₂)
- ❖ Cloruro de potasio. – Tuvo un incremento de 9,603% de CBR al 100% con un 3% de (KCl)

Siendo el cloruro de potasio la sal que favoreció de mejor manera desde un punto de vista mecánico al suelo estabilizado.

3.13.4 Análisis de resultados regresión del %CBR - %sales

Se realizó un análisis de regresión con los resultados de los porcentajes del CBR con sus respectivos porcentajes de sales que se utilizaron en la elaboración del proyecto con la finalidad de poder predecir resultados de los CBR con la adición de mayores porcentajes de sales.

Los resultados con las curvas de %CBR - %NaCl, indicaban que el suelo mejoraría gradualmente llegando a 17,251 al 100% CBR con 8% de sal.

Con la curva %CBR - %CaCl₂, indicaba que el suelo de igual manera mejoraría llegando a 12,851 al 100% CBR con el 8% de sal.

Con la curva %CBR - %KCl, indicaba que el suelo con mayor adición de sal, disminuiría su resistencia llegando a un 0 al 100% CBR con 7% de sal.

3.13.5 Análisis de los resultados de ensayos de control

Se realizó nuevamente el ensayo de los límites de Atterberg, con la finalidad de observar cómo afectaría la adición de la sal y verificar si el suelo se mantenía con la misma clasificación en el sistema AASHTO y SUCS

Los tramos que se estudiaron fue el 4,5 y 6 con los porcentajes que dieron el mayor CBR, 5% de cloruro de sodio, 5% de cloruro de calcio y 3% para el cloruro de potasio.

En el tramo N°4 se utilizó el cloruro de sodio, teniendo inicialmente un límite líquido de 33,360% a un 28,498% y el límite plástico de 24,275% a 17,179%, dando a conocer que disminuyeron ambos parámetros, pero aumentando el índice de plasticidad de 9,084% a 11,319%. En el tramo N°5 se utilizó el cloruro de potasio, teniendo inicialmente un límite líquido de 25,121% a un 23,416% y el límite plástico de 18,369% a 15,444%, dando a conocer que disminuyeron ambos parámetros, pero aumentando el índice de plasticidad de 6,752% a 7,972%. En el tramo N°6 se utilizó el cloruro de calcio, teniendo inicialmente

un límite líquido de 32,725% a un 28,273%, el límite plástico de 22,816% a 18,951% y el índice de plasticidad de 9,909% a 7,972%.

En todos los casos la adición de las sales redujo los parámetros de límite líquido y límite plásticos, en caso del índice de plasticidad para el cloruro de sodio y potasio aumento, pero para el cloruro de calcio ese parámetro también se redujo.

Teniendo los resultados de los límites de atterberg nuevamente se clasificará los suelos para controlar si los suelos se mantenían en su misma clasificación, el tramo N°5 y el N°6 se mantuvieron en la misma clasificación, pero el tramo N°4 cambio en la clasificación AASHTO, de ser un A-4 (8) paso a un A-6 (9) siendo un suelo arcilloso plástico ver Tabla (3,26;3,27).

3.13.6 Análisis de los resultados de permeabilidad

Se realizó la permeabilidad a un mismo suelo, en estado natural, con cloruro de sodio, cloruro de calcio y cloruro de potasio con la finalidad de observar que resultados del coeficiente de permeabilidad nos indicaba el efecto de las sales en el suelo, se utilizó los porcentajes que proporcionaron la mayor resistencia en cuanto a CBR, el suelo natural presentaba un coeficiente de permeabilidad de $2,98 \times 10^{-7}$ cm/s, con la adición del 5% de cloruro de sodio llegó a disminuir a $2,48 \times 10^{-7}$ cm/s, con el 5% del cloruro de calcio llegó a disminuir aún más a $7,97 \times 10^{-8}$ cm/s y con el cloruro de potasio a $1,66 \times 10^{-7}$ cm/s, siendo el cloruro de calcio la sal que da una menor permeabilidad a al suelo, pero las tres sales le dan mejor permeabilidad que el suelo sin sal.

3.13.7 Análisis de resultados de efectos de las sales en la vegetación circundante

Se realizó el ensayo de pH de un mismo suelo, en estado natural, y saturado con el agua que se saturaron los ensayos de CBR con la posibilidad de haber perdido sales por la disociación con el agua, el suelo natural presentó un pH de 8,08 y con el cloruro de sodio bajo a 7,57 eso quiere decir que si se perdió sal por la disociación con el agua haciendo que el pH bajara, de igual manera para la muestra del cloruro de calcio el pH bajo a 7,18 y con el cloruro de potasio igual bajo a 7,42.

CAPÍTULO IV

CONCLUSIONES Y

RECOMENDACIONES

CAPÍTULO IV

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 Conclusiones

Al culminar con los diferentes ensayos al suelo natural y al suelo con los diferentes porcentajes de cloruro de sodio, cloruro de calcio y cloruro de potasio, y al analizar los resultados obtenidos se pudieron obtener las siguientes conclusiones:

1. Al terminar los ensayos de caracterización de los suelos se clasificaron en su mayoría en un suelo A-4 mediante el sistema de clasificación AASHTO y un CL en el sistema de clasificación SUCS, a excepción de un punto que varió en ML-CL en la clasificación SUCS por su índice de plasticidad más bajo.
2. Se realizó los respectivos ensayos de laboratorio para determinar las características físicas de los tres primeros puntos de extracción con la finalidad de comparar y observar el efecto de las sales en los suelos.
3. En los ensayos de los límites de atterberg se pudo notar al adicionar las sales a los suelos una reducción de los límites líquido y plástico en los tres casos del cloruro de sodio, calcio y potasio, en cuanto al índice de plasticidad en el cloruro de sodio y potasio el valor se incrementó, lo que nos indica que mejoró su compresibilidad del suelo, en cambio el cloruro de calcio redujo su índice de plasticidad.
4. En los ensayos de compactación al adicionar los porcentajes de las sales, se observó que la humedad óptima disminuye y aumenta su densidad máxima, esto sucede porque las sales convierten al suelo en un suelo básico aglomerante favoreciendo a su compactación, en el caso del cloruro de sodio y cloruro de calcio. Cuando al adicionar los porcentajes de sales, la humedad óptima aumenta y disminuye la densidad máxima, esto sucede porque las sales convierten al suelo en un medio ácido, siendo un material disgregante lo cual no favorece a la compactación de los suelos, esto en el caso del cloruro de potasio, con el primer porcentaje de sal dio resultados favorables, pero al adicionarle más sal y suelo se volvió más ácido.

5. En los ensayos de CBR se utilizaron tres porcentajes de sales 3, 4, 5%, con la adición de cloruro de sodio el valor del CBR fue aumentando gradualmente, dando el mayor CBR con 5% de cloruro de sodio y disminuyendo su expansión.
Con la adición del cloruro de calcio los valores del CBR igual aumentaron gradualmente, pero el incremento fue menos favorable que el cloruro de sodio, y de igual manera su expansión disminuyó.
Con la adición del cloruro de potasio el mayor CBR se obtuvo en el primer porcentaje, ya que al adicionar los siguientes porcentajes el CBR empezó a disminuir, dando a conocer que al adicionar mayor porcentaje de cloruro de potasio hace que el suelo pierde resistencia.
6. Al realizar los análisis de regresión con los resultados obtenidos de los porcentajes utilizados, los resultados que se estiman son favorables en cuanto a la resistencia, pero no se realizó estimaciones con valores más altos de los porcentajes de sales, porque el suelo puede reaccionar de diferentes maneras con cada porcentaje de sal, volviéndose un suelo básico o un suelo ácido como ya mencionado anteriormente, teniendo una variación en los resultados de compactación y CBR.
7. En cuanto a la permeabilidad las sales favorecen a tener una permeabilidad más baja siendo la sal que mejor favorece al suelo con los resultados obtenidos el cloruro de calcio.
8. El suelo se hace más fácil de trabajar y de compactar con la adición de las sales, en este tipo de estabilización puede considerarse el cloruro de sodio, calcio y potasio como un activante apto para generar un suelo resistente, mecánica y químicamente a partir de su acción con el suelo de carácter limo arcilloso.
9. Con los ensayos del pH se pudo demostrar que las sales que se disocian por el agua de las lluvias pueden llegar a la vegetación circundante, aunque el valor del pH disminuye de una manera insignificante, pero este proceso se puede repetir y seguir bajando el pH del suelo llegando a ser un suelo ácido, produciendo un efecto importante sobre el rendimiento de los cultivos y vegetación circundante cercano al camino.

4.2 Recomendaciones

1. Se recomienda que solo una persona realice los ensayos de laboratorio, porque varían los resultados por la manipulación de diversas maneras de la muestra o al realizar las respectivas compactaciones.
2. Se recomienda adicionar la sal al suelo en solución, para que el porcentaje de sal se puede mezclar de manera homogénea en la totalidad del suelo.
3. Optimizar el porcentaje del cloruro de potasio, a mayor adición los beneficios disminuyen.
4. Investigar otros tipos de suelos adicionando el cloruro de sodio, cloruro de calcio y cloruro de potasio.
5. Antes de manipular un químico, se debe averiguar su composición y riesgos en su empleo y conocer normas de manipulación del mismo para no poner en riesgo la integridad física del laboratorista.
6. Como una medida de control luego de su aplicación, se aconseja definir un programa de mantenimiento periódico especialmente en épocas de lluvia.
7. Es recomendable utilizar las sales para la estabilización química, porque su objetivo es retener humedad y mejorar la compactación del material. Además, ayudan a reducir el punto de congelación del agua contenida en el suelo y en zonas muy secas evita la rápida evaporación del agua de compactación.