

# **CAPÍTULO I**

## **INTRODUCCIÓN**

### **1.1 INTRODUCCIÓN**

Cuando se encuentran con suelos arcillosos en el ámbito de la construcción de caminos, lo primero que se piensa es la manera de cómo solventar este problema y a menudo se soluciona con el desalojo de todo el material arcilloso generando así un costo mayor.

La estabilización de un suelo es un proceso orientado hacia el mejoramiento de sus propiedades ingenieriles: incremento de la resistencia y disminución de la plasticidad en nuestro caso. La estabilidad de un suelo está asociada a su capacidad portante.

Existen diversos tipos de estabilización y mejoramiento de suelos para carreteras, en donde es importante tener conocimiento de conceptos teóricos, prácticos y experimentales sobre características y propiedades de los suelos en especial el comportamiento de los suelos finos.

Un buen tratamiento de suelos arcillosos mediante una estabilización, permitirá utilizar el suelo del lugar donde se realizará una obra, reduciendo costos en eliminación, uso de material de préstamo y transporte de mismo.

Con el diseño y técnica de construcción apropiada, el tratamiento con cloruro de calcio transforma químicamente los suelos arcillosos en materiales utilizables como subrasante para pavimentos, mejorando características y propiedades del suelo como ser la resistencia y plasticidad.

Esta investigación trata sobre los suelos arcillosos y el cloruro de calcio. Así mismo se realizaron los procedimientos en el laboratorio, regidos bajo las especificaciones de normas A.A.S.H.T.O., correspondientes a cada ensayo que se describe en esta investigación.

## **1.2 ANTECEDENTES**

En nuestro medio el material predominante es la arcilla, un tipo de suelo que debido a sus cambios volumétricos y baja resistencia, hacen que la construcción de carreteras y cualquier construcción civil puedan sufrir contratiempos debido al comportamiento de este suelo en presencia del agua.

Se ubicaron zonas en la ciudad de Tarija donde existe referencia de existir suelos altamente plásticos: Barrio Los Chapacos y la Nueva Terminal.

Se tomaron pequeñas muestras de suelos, y se realizaron los límites de Atterberg con el fin de definir la plasticidad de los suelos, al concluir con los ensayos se determinó que las muestras presentan un alto índice de plasticidad, cumpliendo los requerimientos de plasticidad de los suelos.

De acuerdo a la caracterización realizada, estos suelos presentan ser un material altamente plástico con una baja resistencia, lo cual es ideal para realizar los ensayos en este tipo de suelo y observar el comportamiento de este suelo en presencia del cloruro de calcio.

## **1.3 JUSTIFICACIÓN**

Esta investigación busca encontrar una nueva alternativa en la estabilización de suelos que resulte más económica, y que otorgue beneficios similares y/o mejores que los métodos tradicionales.

Se tomó como material de estudio a las arcillas de alta y baja plasticidad por ser suelos inestables que traen consigo grandes cambios en su estructura ante la presencia de agua, lo que ocasiona problemas en las obras civiles, acortando así su vida útil, además de generar un gasto extra debido al mantenimiento que se debe realizar en las carreteras por causa de este tipo de suelo.

El material de estudio fue extraído del barrio Los Chapacos y la Nueva Terminal, como en toda la zona predomina el material arcilloso, este trabajo será útil para tener una nueva alternativa de estabilización en las construcciones futuras de caminos que pudiera realizarse en esa zona, o en lugares que presenten este tipo de suelo.

Al encontrar suelo arcilloso en la construcción de caminos, por lo general se procede al retiro de este suelo trayendo como consecuencia un incremento en el presupuesto de la obra, lo que puede hacerlo inviable. Con este trabajo se busca encontrar un nuevo método para estabilizar suelos arcillosos y hacerlos aptos para su uso en carreteras, al conseguirlo se van a aligerar los costos, ya que no se tendrá que remover todo este tipo de suelo.

#### **1.4 SITUACIÓN PROBLEMICA**

La presencia de arcillas en la construcción de caminos representa un problema de suma importancia debido a la inestabilidad que presentan. Encontrar un método adecuado para el mejoramiento de la relación de soporte de la arcilla es necesario para obtener valores aceptables.

Cuando se encuentran suelos arcillosos en el ámbito de la construcción de caminos, lo primero que se piensa es la manera de cómo solventar este problema y a menudo se soluciona con el desalojo de todo el material arcilloso, debido a sus bajos valores de soporte e inestabilidad, generando así un mayor costo.

Para evitar este costo extra en el presupuesto de una obra que puede hacerla inviable desde el punto de vista económico, se buscan alternativas de solución para tratar el suelo arcilloso.

La estabilización química presenta alternativas que pueden mejorar las propiedades de la arcilla y hacerlas aptas para su uso como subrasante.

Es necesario realizar una serie de ensayos en suelo natural y suelo combinado con cloruro de calcio en diferentes porcentajes y observar si este químico influye en las mejoras de la relación de soporte de las arcillas.

### **1.4.1 Formulación del problema**

¿Cómo saber si la adición de cloruro de calcio en un porcentaje óptimo tendrá una influencia positiva en la calidad de las propiedades del suelo arcilloso?

## **1.5 OBJETIVOS**

### **1.5.1 Objetivo general**

Analizar el comportamiento de la relación de soporte del suelo arcilloso mediante la adición de cloruro de calcio, para observar si existe una mejoría en la calidad de las propiedades del suelo y hacerlo apto para su uso como subrasante.

### **1.5.2 Objetivos específicos**

- Realizar la planificación de los trabajos en laboratorio.
- Identificar la zona de extracción de las muestras.
- Realizar la caracterización de los suelos arcillosos.
- Establecer el porcentaje óptimo de cloruro de calcio a utilizarse en la estabilización de suelos arcillosos.
- Evaluar los cambios en las propiedades del suelo estabilizado con cloruro de calcio.
- Comparar los resultados con otros métodos empleados para la estabilización de suelos.

## **1.6 HIPÓTESIS**

Sí, a una muestra de suelo arcilloso de malas propiedades, se le adiciona un porcentaje óptimo de cloruro de calcio, entonces se podrá obtener un mejoramiento en la calidad de las propiedades de la subrasante.

### **1.6.1 Identificación de hipótesis**

Variables independientes: Suelo arcilloso

Variables dependientes: Propiedades del suelo estabilizado con cloruro de calcio

Tabla N°1.1: Conceptualización de la variable independiente

Variable independiente	Dimensión	Indicador	Valor o acción
Suelos arcillosos	Granulometría	A-6, A-7	<b>Norma A.A.S.H.T.O.</b>
	Límites de Atterberg	>10	
	Compactación	1800-1900 Kg/cm <sup>2</sup>	
	C.B.R.	<6	

Fuente: Elaboración propia

Tabla N°1.2: Conceptualización de la variable dependiente

Variable dependiente	Dimensión	Indicador	Valor/acción
Suelos estabilizados con cloruro de calcio	Límites de Atterberg	< 10	<b>Norma A.A.S.H.T.O.</b>
	C.B.R.	> 6	

Fuente: Elaboración propia

## 1.7 ALCANCE DE LA INVESTIGACIÓN

La presente investigación busca obtener una estabilidad en los suelos arcillosos de alta y baja plasticidad, mediante una estabilización química del mismo usando el cloruro de calcio, esta estabilización pretende mejorar la calidad de las propiedades de los suelos arcillosos como ser la resistencia y plasticidad, para disminuir los cambios volumétricos del mismo.

Para la utilización de este aditivo se recomienda el uso en suelo bien graduados y que cumplan con las recomendaciones de la Norma M147 de la AASHTO. Debido a que nosotros contamos con suelos de alta y baja plasticidad para su estudio, se establece que, en suelos diferentes a los anteriores se deben realizar ensayos previos de laboratorio para determinar si el cloruro aumenta la densidad del suelo. También se requiere la Norma M-144 de la AASHTO, esta especificación cubre el cloruro de calcio de grado técnico utilizado para el pre tratamiento y descongelación de superficies de carreteras, control de polvo, estabilización y acondicionamiento de superficies de carreteras, y para acelerar el conjunto de concreto no reforzado con acero.

Se realizarán ensayos con diferentes porcentajes de cloruro de calcio para observar la influencia de este químico en el suelo arcilloso y encontrar la dosificación óptima a fin de afirmar o descartar la hipótesis presentada.

Con la adición de cloruro de calcio se busca aumentar la calidad de la subrasante y hacerla apta para la construcción de carreteras, sin producir un incremento considerable en el presupuesto de la obra.

Se controlarán dos parámetros en esta investigación, que son:

*Plasticidad*

*Resistencia*

Para observar la influencia del químico en la arcilla, se realizan los límites de Atterberg cada semana por un tiempo determinado, para esto se preparara una mezcla de suelo arcilloso y cloruro de calcio en diferentes porcentajes, que irán reaccionando entre ellos, mostrando cada semana si existe una mejoría o no en la plasticidad del suelo.

Para el ensayo de C.B.R. al tratarse de una sal, se recomienda que debe existir un tiempo de curado en seco después de la compactación, ya que el encalque se produce después del mismo. Una vez pasado este tiempo, se sumergen los moldes en agua y se controla la expansión del suelo cada día, hasta el momento de hacer correr los moldes.

## **CAPÍTULO II**

### **ESTABILIZACIÓN DE SUELOS**

#### **2.1 SUBRASANTES**

Subrasante es el suelo de fundación (suelo natural libre de vegetación y compactado) en el que se apoya todo el paquete estructural. Este material puede ser tanto granular como afirmado, empedrado u otras carpetas granulares, seleccionados o cribados, productos cortos y extracciones de canteras.

Si el terreno es malo, debe desecharse el material que lo compone, sustituyéndolo por un suelo de mejor calidad, si no es tan malo se lo puede colocar una sub-base prescindiendo de esta última si el material de fundación es bueno o regular. La subrasante tiene una gran influencia en la construcción del pavimento y en la eficiencia del mismo, así las subrasantes inestables presentan problemas relativos a la colocación y compactación de los materiales base y sub-base ya que no dan el soporte adecuado para la subsiguientes operaciones de pavimentación, los problemas que se presentan no serán observados sino hasta después de la culminación de la construcción, cuando la estructura entre en funcionamiento y deba soportar las cargas de tránsito. Los esfuerzos, desplazamientos y agrietamientos son influidas en gran porcentaje por esta capa, un gran porcentaje de las deflexiones que se producen en la superficie de un pavimento se le puede atribuir a las subrasantes, por este motivo se debe asegurar una buena caracterización de la subrasante.

##### **2.1.1 Propiedades de la subrasante**

Entre las propiedades requeridas para estos suelos tenemos:

*Resistencia*

*Drenaje*

*Fácil compactación*

*Conservación de la compactación*

*Estabilidad volumétrica*

El material deberá cumplir con las normas y características de calidad, a continuación presentamos tablas en las cuales clasificamos de acuerdo al C.B.R., el tipo de terracerías y subrasantes:

*Tabla N°2.1: Categorías de suelos para terracerías y capa subrasante*

<b>Características</b>	<b>Suelos tolerables</b>	<b>Suelos adecuados</b>	<b>Suelos seleccionados</b>
Tamaño máximo	25 % > 15 cm	<10 cm	< 8cm
Contenido de finos, %	.....	Ö35	Ö25
Límite líquido, %	Ö40	Ö40	Ö30
Índice de plasticidad, %	.....	.....	Ö10
Peso vol. máximo, Kg/m <sup>3</sup>	× 1450	× 1750	.....
C.B.R. %	>3	>6	>10
Expansión, %	.....	<2	0

*Fuente: Instituto Mexicano del cemento y concreto IMCYC*

Las propiedades de los suelos pueden dividirse en dos categorías:

1. Propiedades físicas: Son usadas para selección de materiales, especificaciones constructivas y control de calidad.
2. Propiedades ingenieriles: Dan una estimación de la calidad de los materiales para caminos.

## **2.2 ARCILLAS EXPANSIVAS**

Las arcillas expansivas son posiblemente el material más problemático en Ingeniería Civil, Geotecnia e Ingeniería Geológica, es por eso, que su estudio en mecánica de suelos y Geotecnia es necesario para lograr que las obras de Ingeniería Civil no sufran daños con el pasar del tiempo.

Las arcillas expansivas son aquellas que conforman los suelos arcillosos, donde el tamaño de las partículas es inferior a 2 micras, y se caracterizan por la capacidad aumentar su volumen cuando absorben agua, o retracción que es la disminución de su volumen cuando baja la humedad.

El cambio de volumen en las arcillas expansivas, no es uniforme y no es constante, además responden a las condiciones físicas, ambientales y esfuerzos que muchas veces no se puede predecir. Sin embargo los problemas más comunes que causan en obras de Ingeniería Civil son:

*Generación de grietas en varias direcciones debido al asentamiento (retracción) o expansión de las arcillas.*

*Rotura de los elementos estructurales de una obra de construcción.*

*Deformación y rotura de los elementos de cimentación.*

La expansividad y retracción del suelo es característico en suelos del tipo arcilloso y es controlada por la variación de humedad en el suelo.

El término de expansividad puede definirse como la capacidad de un suelo de experimentar cambios volumétricos. En general, el fenómeno de la expansividad está asociado a algunos tipos de arcillas, especialmente las montmorillonitas, que modifican su estructura al absorber agua u otros líquidos. Del mismo modo, también puede producirse la retracción del suelo expansivo al desecarse o liberarse el agua contenida.

La propiedad principal de las arcillas es la plasticidad en su menor o mayor valor, según sea el intercambio de cationes. Los limos pueden llegar a tener la fineza de grano de arcillas, pero tienen muy poca plasticidad. Otra propiedad física de las arcillas es que su resistencia aumenta gradualmente a medida que aumenta la consistencia de estas.

Otra propiedad física de las arcillas es el estado plástico definido por el índice de plasticidad (IP); que es la diferencia entre el límite líquido (LL) y el límite plástico (LP), siendo un criterio muy útil para determinar las características plásticas de dicho suelo donde:

$$IP = LL - LP$$

Casagrande, mediante muchos ensayos de límites de consistencia en arcillas, dedujo la plasticidad en función al límite líquido.

Tabla N°2.2: Plasticidad en función al límite líquido

Límite líquido	Plasticidad
0 < 30	Baja plasticidad
30 < 50	Mediana plasticidad
> 50	Alta plasticidad

Fuente: Manual de laboratorio de suelos U.A.J.M.S.

## 2.3 ESTABILIZACIÓN DE SUELOS ARCILLOSOS

Llamamos estabilización de un suelo al proceso mediante el cual, se someten los suelos naturales a cierta manipulación o tratamiento, de modo que podamos aprovechar sus mejores propiedades, obteniéndose un firme estable, capaz de soportar los efectos del tránsito y las condiciones de clima más severa.

Cuando se encuentran suelos arcillosos en el ámbito de la construcción de caminos, lo primero que se piensa es la manera de cómo solventar este problema y a menudo se soluciona con el desalojo de todo el material arcilloso generando así un mayor costo.

Un buen tratamiento de los suelos arcillosos mediante una estabilización, permitirá utilizar los suelos del lugar donde se realizará la obra, reduciendo costos en eliminación del suelo arcilloso, uso de material de préstamo y transporte del mismo.

Con el diseño y técnica de construcción apropiada, el tratamiento con cloruro de calcio transformará químicamente a los suelos arcillosos en suelos utilizables como estructura de pavimento, mejorando así características y propiedades del suelo.

### 2.3.1 Beneficios de la estabilización de suelos

La estabilización de suelos sirve para modificar las propiedades geotécnicas del mismo y hacerlo apto para el trabajo en obra. La función de la estabilización es:

*Disminuir los asentamientos de estructuras.*

*Disminuir el potencial de expansión y contracción de los suelos.*

*Aumentar la resistencia de los suelos.*

*Facilitar la manejabilidad de los suelos.*

*Reducir la permeabilidad de ciertos suelos.*

*Reducir el índice de plasticidad.*

## **2.4 TIPOS DE ESTABILIZACIÓN DE SUELOS**

Dentro de la estabilización de suelo tenemos:

- **Estabilización mecánica:** Este método se utiliza para mejorar el suelo produciendo cambios físicos en el mismo. Hay varios métodos como lo son: Mezclas de suelos, este tipo de estabilización es de amplio uso, pero por si sola no logra producir los efectos deseados, necesitándose siempre de por lo menos la compactación como complemento.

Por ejemplo, los suelos de grano grueso como las grava-arenas tienen una alta fricción interna lo que les hace soportar grandes esfuerzos, pero esta cualidad no hace que sea estable como para ser firme de una carretera ya que al no tener cohesión sus partículas se mueven libremente y con el paso de los vehículos se pueden separar e incluso salirse del camino.

Las arcillas, por lo contrario, tienen una gran cohesión y muy poca fricción lo que provoca que pierdan estabilidad cuando hay mucha humedad. La mezcla adecuada de estos dos tipos de suelo puede dar como resultado un material estable en el que se puede aprovechar la gran fricción interna de uno y la cohesión del otro para que las partículas se mantengan unidas.

Compactación, este mejoramiento generalmente se hace en la sub-base, base y en las carpetas asfálticas.

- **Estabilización química:** La estabilización química implica la aplicación de aditivos químicos para mejorar el comportamiento de los suelos. Se utiliza para mejorar la manejabilidad del suelo, haciendo que el material sea más fácil de usar como material de construcción. También se usa para reducir la plasticidad y el potencial de expansión de los suelos. Si las arcillas son dispersivas, se utiliza para floccular las partículas. Cuando las arcillas son difíciles de compactar, se pueden añadir productos químicos para dispersar ligeramente sus partículas y

ayudar en el proceso. Normalmente la estabilización química se realiza con cal o cemento, pero también existen otras técnicas como ser:

**Productos asfálticos:** Es una emulsión muy usada para material triturado sin cohesión.

**Cloruro de sodio:** Impermeabilizan y disminuyen los polvos en el suelo, en especial para arcillas y limos.

**Cloruro de calcio:** Impermeabilizan y disminuyen los polvos en el suelo, en especial para arcillas y limos.

**Escorias de fundición:** Este se utiliza comúnmente en carpetas asfálticas para darle mayor resistencia, impermeabilizarla y prolongar su vida útil.

**Polímeros:** Este se utiliza comúnmente en carpetas asfálticas para darle mayor resistencia, impermeabilizarla y prolongar su vida útil.

**Hule de neumáticos:** Este se utiliza comúnmente en carpetas asfálticas para darle mayor resistencia, impermeabilizarla y prolongar su vida útil.

## **2.5. PROPIEDADES DE LOS SUELOS**

### **2.5.1. 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.

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 en arcillas más profundas.

### **2.5.2 Resistencia**

Existen varios métodos de estabilización que se ha revelado útil para mejorar la resistencia de muchos suelos. 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.

Sin embargo el empleo de mayores intensidades de compactación no siempre conduce a valores más altos de resistencia, muy especialmente si se considera la necesidad de mantener dicho parámetro en valores razonables durante tiempo largos. Algunas de las formas de estabilización más usadas para elevar resistencia son las siguientes:

*Compactación*

*Vibroflotación*

*Precarga*

*Drenaje*

*Estabilización mecánica con mezcla de otros suelos*

*Estabilización química con cemento, cal o aditivos líquidos.*

### **2.5.3 Permeabilidad**

La permeabilidad depende de varios factores: Viscosidad del fluido, distribución del tamaño de los poros, distribución granulométrica, relación de vacíos, rugosidad de las partículas minerales y grado de saturación del suelo. En los suelos arcillosos, la estructura juega un papel importante en la permeabilidad.

Otros factores mayores que afectan la permeabilidad de las arcillas son la concentración iónica y el espesor de las capas de agua adheridas a la arcillosos, el uso de defloculantes (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, pues no es raro que ejerzan efectos desfavorables en la resistencia al esfuerzo cortante de los suelos.

#### **2.5.4 Durabilidad**

La durabilidad suele involucrarse en este concepto aquellos factores que se refieren a la resistencia al intemperismo, 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 en estos últimos los peores comportamientos suelen ser consecuencias 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 de sulfatos.

#### **2.5.5 Compresibilidad**

En el estudio de la consolidación un suelo puede considerarse como un esqueleto compresible de partículas minerales (que en sí mismas son incompresibles). Si también se supone que el suelo permanece saturado a lo largo del todo el proceso de consolidación, se puede decir que la disminución de volumen que se produce es igual al volumen del agua que se expulsa hacia afuera y que este está representado por la variación de la relación de vacíos.

### **2.6 CLORURO DE CALCIO**

El cloruro de calcio es uno de los agentes estabilizadores de suelos más económicos, siendo usado, por los beneficios que reporta, tanto en la construcción de capas de subrasante, sub-base y base para autopistas y carreteras, como en capas de rodadura de caminos ordinarios de tierra. El cloruro, debe advertirse, no convierte un suelo en un material con las características del suelo cemento, por ejemplo, sino que origina cambios en el suelo que son a veces intangibles, pero que mejoran la estabilidad de los pavimentos y reducen el coste de la conservación.

Al cloruro de calcio se lo puede encontrar en diferentes grados de hidratación o pureza, es decir, en combinación con otras sales. El uso de cloruro de calcio basándose en la hidratación de éste depende de los precios y los gastos de transporte, cuando se tiene un costo de transporte elevado se deben analizar el uso de cloruro cálcico sin hidratar para que estos costos se reduzcan. El grado de pureza no influye en el uso del cloruro ya que

las impurezas más comunes son el cloruro de sodio (ClNa) y el cloruro magnésico ( $\text{Cl}_2\text{Mg}$ ), estas dos sales producen efectos parecidos al cloruro cálcico en el suelo.

Sin embargo, debido a que el cloruro de magnesio es muy corrosivo su contenido debe ser el menor posible cuando el cloruro cálcico se emplea en tratamientos superficiales.

El producto que se utiliza para realizar los ensayos es el cloruro de calcio 77% de grado técnico, se presenta en forma de escamas y color blanco:

Pureza %:	77 mín
Cloruro de sodio %:	2.5 máx.
Cloruro de magnesio %:	0.25 máx.
Insolubles en agua %:	0.20 máx.
Sulfato %:	0.2 máx.
Metales pesados, Pb %:	0.001 máx.

*Figura N°2.1: Cloruro de calcio*



*Fuente: Elaboración propia*

El cloruro de calcio se usa en mezclas de hormigón para acelerar su tiempo de fraguado, pero los iones de cloro son corrosivos para el hierro por lo que no debe usarse el hormigón armado. La forma anhidra del cloruro de calcio también puede usarse para este fin y puede servir para determinar la cantidad de humedad en el hormigón.

En la industria del petróleo, el cloruro de calcio se utiliza para aumentar la densidad de salmueras libres de sólidos. También se utiliza para inhibir las arcillas expansivas en los fluidos de perforación.

El cloruro de calcio anhidro se usa también como desecante debido a su higroscopia.

En el tratamiento de firmes en vialidad invernal; carreteras o aeropuertos, se muestra más efectivo que el cloruro sódico a temperaturas más bajas.

### **2.6.1 Estabilización con cloruro de calcio**

El cloruro de calcio se ha usado para el control de polvos desde inicios del siglo XX, en la década de 1930 se empezaron a realizar investigaciones sobre sus efectos en el suelo con lo que se logró observar que además de controlar el polvo también aumentó la densidad al compactar y la estabilidad de la carretera en general. El cloruro de calcio puede disolverse absorbiendo la humedad de la atmósfera cuando la humedad relativa de aire está por encima de ciertos valores.

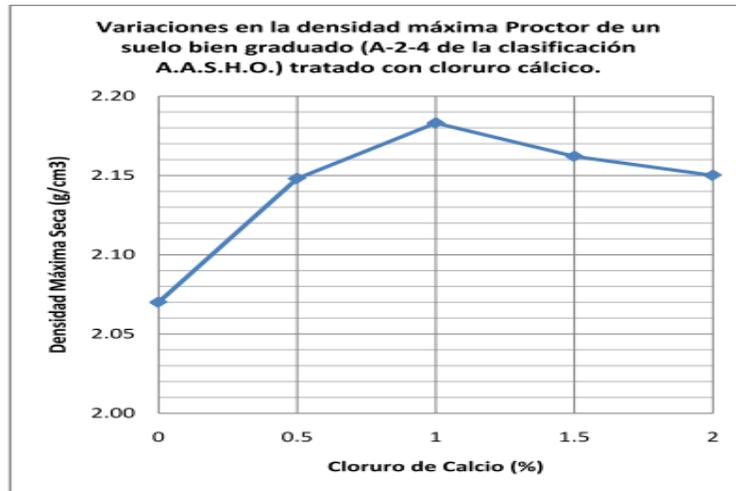
Los suelos que mejor respondían al tratamiento eran las compuestas de materiales de diversos tamaños, incluyendo un pequeño porcentaje de finos ligeramente plásticos, formando una granulometría bien graduada.

La propiedad del cloruro de retener agua de la solución es un factor positivo puesto que al evaporarse el agua con más dificultad, se necesitan de menos pasadas con el tanque regador para mantener la humedad óptima para el esfuerzo de compactación usado. Para un mismo esfuerzo de compactación los suelos tratados con cloruro de calcio suelen producir una densidad seca mayor.

Con el uso de cloruro de calcio se alarga el periodo de tiempo durante el cual se puede compactar a la humedad óptima, reduciéndose la cantidad de agua a aplicar durante la compactación.

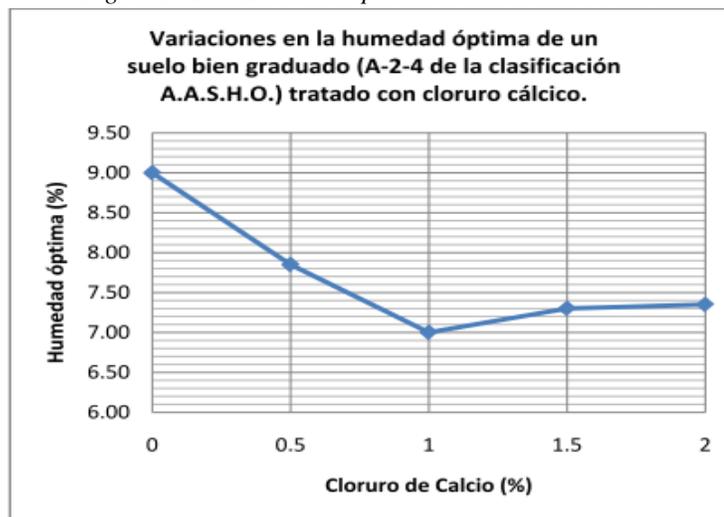
Esta capacidad del cloruro de calcio de mantener la humedad es sumamente importante en la compactación de suelos granulares, en donde el control de humedad es el factor más crítico.

Figura N°2.2: Densidad máxima con cloruro de calcio



Fuente: Miranda J., Negrete O. (2011)

Figura N°2.3: Humedad óptima con cloruro de calcio



Fuente: Miranda J., Negrete O. (2011)

Con el cloruro de calcio se puede llegar a una densidad determinada con un número menor de pasadas con el compactador. Este aumento en la densidad es causado por la modificación en el estado de dispersión de las partículas arcillosas que se unen más fácilmente a las partículas gruesas para que cambien de posición durante la compactación.

Una solución con cloruro de calcio se congela a menor temperatura y de la concentración de esta sal depende la temperatura de congelación, esto es favorable puesto que los suelos tratados con este tipo de solución son más resistentes a la

congelación y descongelación, debido a que estos se encuentran helados por menor tiempo.

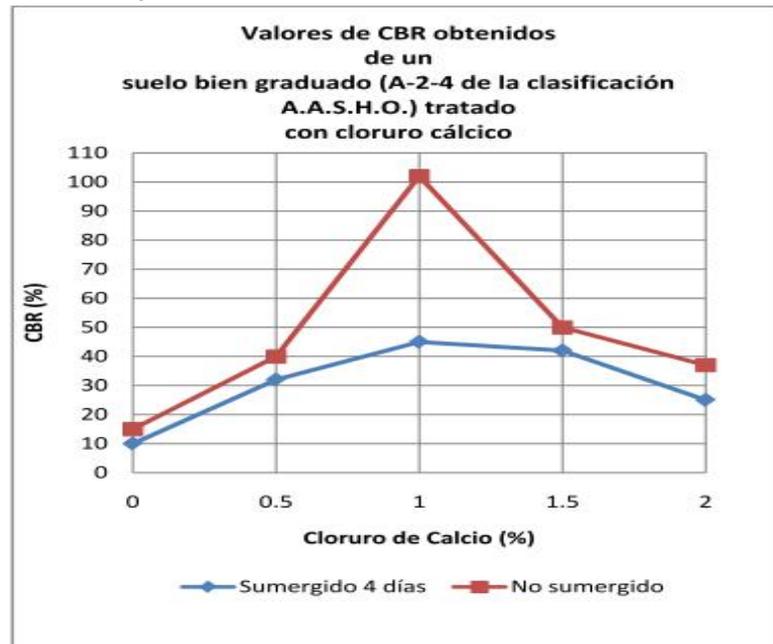
Los suelos tratados con cloruro de calcio sufren una densificación que se le conoce como curado ya que este proceso ocurre luego de la compactación; este proceso puede estar relacionado con la disminución de las películas de agua que rodean a las partículas del suelo debido a la pérdida de parte de la humedad estabilizada. La pérdida de humedad durante el curado favorece también la concentración de la solución, aumentando la tensión superficial de la concentración, lo que también puede ayudar al incremento de la densidad. Este aumento en la densidad durante el periodo de curado contribuye con un 90 % en la estabilidad de los suelos tratados con cloruro.

Otras de las propiedades del cloruro cálcico es que brinda iones de calcio que pueden ser intercambiados por otros en la superficie de las partículas de arcilla, mejorando la plasticidad de las arcillas y reduciendo el hinchamiento de las mismas cuando absorben agua.

El cloruro de calcio se puede también añadir a los suelos de alta plasticidad cuando se quiere sustituir iones de calcio por iones de sodio en un intercambio de cationes, ya que los iones de calcio son adsorbidos con preferencia en la superficie de las partículas de arcilla. Los iones de calcio están rodeados de una corteza de agua más pequeña que la de iones de sodio, con lo que al existir el intercambio de iones hay una reducción en la plasticidad de los suelos arcillosos. El límite líquido disminuye y el límite elástico aumenta, por lo tanto el índice de plasticidad disminuye, con esto la plasticidad del suelo se ve alterada.

Los iones de calcio también reducen el efecto perjudicial que los suelos ácido-orgánicos producen en el suelo-cemento. Añadiendo cloruro de calcio al suelo, antes de agregar el cemento, los iones de calcio adicionales equilibran la demanda de los ácidos orgánicos, impidiendo que estos reaccionen con el calcio que existe en el cemento, retardando o impidiendo la hidratación.

Figura N°2.4: Valor de C.B.R. con cloruro de calcio



Fuente: Miranda J., Negrete O. (2011)

Para obtener el mayor beneficio del tratamiento con cloruro de calcio se requieren pocas cantidades de este producto. La cantidad de cloruro a añadir es generalmente entre 3 y 10 kilogramos por tonelada métrica de suelo a tratar para la construcción de cimientos de pavimentos, en aplicaciones superficiales se puede emplear 0,5 kilogramos por metro cuadrado, repitiendo la aplicación cada vez que se observe excesiva sequedad en la superficie de la carretera, y siempre la humedad relativa sea mayor a la crítica para la temperatura del pavimento durante parte del día.

### 2.6.2 Limitaciones del empleo del cloruro de calcio

Para la utilización de este aditivo se recomienda el uso en suelo bien graduados y que cumplan con las recomendaciones de la Norma M-147 de la A.A.S.H.T.O.

Para suelos diferentes de los anteriores se deben realizar ensayos previos de laboratorio para determinar si el cloruro aumenta la densidad del suelo.

### **2.6.3 Construcción con cloruro de calcio**

Se pueden usar varios tipos de maquinarias en cada una de las etapas de la estabilización de suelos, aunque se debe saber que algunos tipos de maquinarias producen material de mejor calidad, más uniforme o son más económicos de manejar que otros.

Cuando se usan plantas estacionarias la dosificación y mezcla de los materiales es más perfecta, pero estas plantas estacionarias solo pueden utilizarse en canteras que producen áridos con la granulometría deseada mezclando otros áridos de tamaños diferentes.

La incorporación del cloruro en plantas estacionarias se puede realizar de un modo automático utilizando dosificadores y cintas transportadoras existentes en la planta o adaptando dosificadores especiales para aditivos. Las plantas que producen suelo tratado con productos estabilizadores deben estar dotadas de un mezclador de paletas para producir una mezcla uniforme.

La distribución del cloruro en el campo para mezclas in-situ varía según como se emplee el cloruro en estado sólido o en una solución acuosa. Existen equipos especiales para la distribución en estado sólido que se montan en la parte posterior de camiones con caja volquete. Se puede distribuir también a pala desde un camión rodando a poca velocidad. La distribución del cloruro en solución acuosa puede hacerse utilizando los camiones cisterna.

El mezclado del cloruro con los agregados se puede efectuar in situ con roto mezcladores de varias pasadas o con los que requieren solamente una pasada, estos roto mezcladores producen una mezcla muy uniforme y son los que se recomienda usar. Si no se tiene roto mezcladores, se puede realizar un mezclado bastante uniforme con el uso de moto-niveladoras.

La compactación no presenta dificultades ya que todo constructor dispone de máquinas compactadoras. Si el cloruro de calcio se utiliza para estabilizar suelos que se desmenuzan fácilmente, suelto, los rodillos de pata de cabra no podrán compactar este material. La combinación de compactadoras de neumático, de ruedas planas de acero, vibradores, etc., y el número de pases con cada compactador depende de las condiciones de trabajo, tipo de suelo y compactadoras disponibles. La experiencia del ingeniero es la

que debe dictar el orden de empleo de cada compactador y el número de pasadas para obtener la densidad deseada de la manera más económica.

Después de la compactación se recomienda dejar el pavimento estabilizado que se cure por un periodo de dos a siete días, dependiendo de las condiciones atmosféricas del lugar.

#### **2.6.4 Efectos del aditivo**

##### **Efectos beneficiosos:**

*Mantienen estable la humedad durante el proceso de compactación.*

*Aumenta la densidad máxima para un mismo esfuerzo de compactación.*

*Mantiene la superficie del pavimento húmeda, reduciendo la formación de polvo con el tránsito y reteniendo los agregados en la carretera.*

*Rebaja la temperatura de congelación del agua, por lo que los suelos sufren menos los efectos de la helada.*

*Aumenta la densidad durante el ócuradoö.*

*Suministra cationes de calcio, que pueden mejorar las características de las arcillas.*

##### **Limitaciones:**

*Se recomienda emplear con suelos bien graduados.*

*Se disuelve y es arrastrado por las aguas de lluvia.*

*Para usarse como paliativo del polvo la humedad relativa debe de ser mayor que la crítica durante parte del día.*

*Cuando se usa en tratamientos superficiales, partículas de cloruro se pueden depositar en los vehículos acentuando la corrosión de las partes metálicas.*

## **2.7 CAL**

Los efectos provocados por suelos que contienen un porcentaje de minerales arcillosos en su composición son varios como por ejemplo sus cambios de estado, deformabilidad o sus variaciones volumétricas, debido a esto es necesario realizar un mejoramiento sobre este material para poder utilizarlo en la construcción de obras de ingeniería; la estabilización de suelos especialmente de grano fino por medio de la cal es una de las

técnicas más antiguas, fue a inicios de la década de 1950 cuando se empezó a utilizar este material para estabilizar suelos arcillosos con excesiva humedad mostrando excelentes resultados.

El tratamiento de los suelos con cal transforma químicamente los suelos inestables en materiales utilizables, al agregar cal a los suelos expansivos se generan reacciones químicas como son el intercambio catiónico, la floculación y aglomeración de las partículas. En los suelos estabilizados con cal se modifican las propiedades mejorando su resistencia, se incrementa la durabilidad de los suelos de grano fino y también se genera una variación de las características de la fracción fina en los suelos granulares; la cal puede ser utilizada en el tratamiento de suelos, en varios grados o cantidades, dependiendo del objetivo.

Una de las principales manifestaciones de la aplicación de la cal en los suelos arcillosos es la reducción de la plasticidad, característica ilustrativa y diferencial de este tipo de suelos.

Esta reducción, se manifiesta y cuantifica mediante la reducción del límite plástico sin afectar al límite líquido. Tan sólo parece verse este afectado en las primeras veinticuatro horas desde la aplicación de la cal, pero en todo caso, en menor proporción que el límite líquido.

### **2.7.1 Reacción química de la arcilla con cal**

La cal reacciona químicamente con las partículas de arcilla alterando la interacción molecular. Las arcillas sin tratar tienen una estructura molecular similar a algunos polímeros, y dan propiedades plásticas.

La estructura puede atrapar agua entre sus capas moleculares, causando cambios en la densidad y el volumen. A mayor área superficial de una arcilla, mayor será su capacidad de atraer agua y mayor también será su comportamiento expansivo.

En suelos arcillosos tratados con cal, los átomos de calcio (de la cal) han re-emplazado los átomos de sodio e hidrogeno, produciendo un suelo con características muy friables.

El intercambio iónico expulsa también las partículas de cal que se hallaban acumuladas en la superficie de la arcilla.

La siguiente reacción ocurre con la sílice y alúmina disponible en suelo, formando un material cementante (el efecto puzolánico), ganando resistencia a la compresión progresivamente.

Con la floculación, la textura cambia, decrece el índice de plasticidad y se hace trabajable el material tratado.

### **2.7.2 Características de la estabilización con cal**

*Reducción de la humedad natural del suelo*

*Modificación de la granulometría*

*Aumento de la permeabilidad*

*Mayor trabajabilidad*

*Reducción del índice de plasticidad*

*Reducción del potencial de cambios volumétricos*

*Modificación de las características de compactación*

*Aumento inmediato de la consistencia*

*Mayor resistencia a medio y largo plazo*

### **2.7.3 Beneficios de la cal**

Los efectos o beneficios que puede tener el uso de la cal en la estabilización de suelos son los siguientes:

**Secado del suelo:** La cal es muy efectiva para el secado de cualquier suelo con humedad. Tras el mezclado con la tierra arcillosa la cal absorbe el agua mediante una reacción exotérmica, reduciendo drásticamente la humedad del suelo por hidratación y evaporación. La disminución de la humedad variará en función de la cal añadida y las condiciones ambientales, pero puede oscilar un 2 % y un 5 %, según. Este proceso sucede inmediatamente después de adicionar la cal.

**Modificación del suelo:** Al añadir la cal al suelo, el reparto de cargas en la superficie de las partículas del suelo arcilloso se modifica. Este proceso sucede también inmediatamente tras la adición de la cal. El efecto es que la tierra pierde su propiedad para retener agua.

**Estabilización del suelo:** En este caso el efecto se produce más a medio plazo y de una manera gradual. La arcilla del suelo en contacto con la cal es capaz de formar silicatos y aluminatos cálcicos hidratados. Esta reacción es llamada *õpuzolánicaõ* y da como resultado un aumento de la compresión simple del suelo, así como una mayor estabilidad frente a las heladas.

## 2.8 ENSAYOS

### 2.8.1 Granulometría

En cualquier masa de suelo los tamaños de los granos varían considerablemente, por lo cual, para clasificar apropiadamente un suelo se debe conocer su distribución granulométrica, esta distribución puede obtenerse mediante análisis granulométrico por mallas o con el hidrómetro en el caso de partículas finas.

Los límites de tamaño de las partículas que constituyen un suelo ofrecen un criterio obvio para una clasificación descriptiva del mismo. Tal criterio fue usado en la mecánica de suelos desde en principio e incluso antes de la etapa moderna de esta ciencia.

*Figura N° 2.5: Juego de tamices estandarizados*



*Fuente: Elaboración propia*

Originalmente, el suelo se dividía únicamente en tres o cuatro fracciones debido a lo engorroso de los procedimientos disponibles de separación por tamaños.

Posteriormente, con la llegada de la técnica del cribado, fue posible efectuar el trazo de curvas granulométricas, contando con agrupaciones de partículas del suelo en mayor número de tamaños diferentes. Actualmente se pueden ampliar notablemente las curvas en los tamaños finos, gracias a la ampliación de técnicas de análisis de suspensiones. Un análisis granulométrico por mallas se efectúa tomando una cantidad medida de suelo seco, bien pulverizado y pasándolo a través de una serie de mallas cada vez más pequeñas y con una charola en el fondo.

La cantidad de suelo retenido en cada malla se mide por ciento acumulado de suelo que pasa a través de cada malla es determinado. Este porcentaje es generalmente denominado el porcentaje que pasa. Estas mallas se usan comúnmente para el análisis de suelos con fines de clasificación. El porcentaje que pasa por cada malla, determinado por análisis granulométrico por mallas, se grafica sobre papel semilogarítmico.

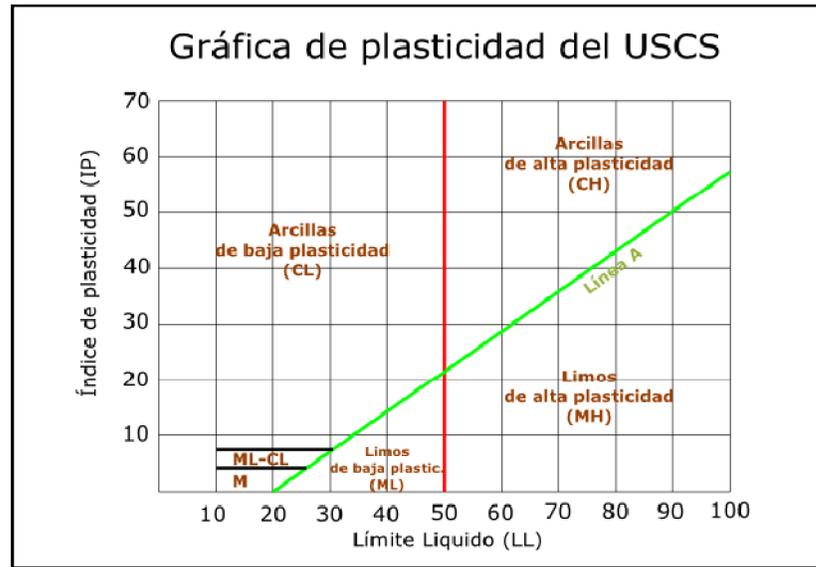
### **2.8.2 Límites de Atterberg**

Los límites de Atterberg son ensayos de laboratorio normalizados que permiten obtener los límites del rango de humedad dentro del cual el suelo se mantiene en estado plástico. Con ellos, es posible clasificar el suelo en la Clasificación Unificada de Suelos (Unified Soil Classification System, USCS).

Fueron originalmente ideados por un sueco de nombre Atterberg especialista en agronomía y posteriormente redefinidos por Casagrande para fines de mecánica de suelos de la manera que hoy se conocen.

Para obtener estos límites se requiere remoldear (manipular) la muestra de suelo destruyendo su estructura original y por ello es que una descripción del suelo en sus condiciones naturales es absolutamente necesaria y complementaria. Para realizar los límites de Atterberg se trabaja con todo el material menor que pasa la malla N°40 (0.42 mm). Esto quiere decir que no solo se trabaja con la parte fina del suelo (< malla #200), sino que se incluye igualmente la fracción de arena fina.

Figura N°2.6: Carta de plasticidad



Fuente: <https://www.diccionario.geotecnia.online/palabra/carta-de-plasticidad-de-casagrande/>

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 agregarle 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.

### 2.8.2.1 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 o copa de Casagrande, y se golpea consecutivamente contra la base de la máquina, haciendo girar la manivela, hasta que el surco que previamente se ha hecho en la muestra se cierre en una longitud de 12,7 mm (1/2"). Si el número de golpes para que se cierre el surco es 25, la humedad del suelo (razón peso de agua/peso de suelo seco) corresponde al límite líquido.

### 2.8.2.2 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.

Se define el límite plástico como la humedad más baja con la que pueden formarse con un suelo cilindros de 3 mm de diámetro, rodando dicho suelo entre los dedos de la mano y una superficie lisa, hasta que los cilindros presenten grietas.

### 2.8.2.3 Índice de plasticidad

El índice de plasticidad es la diferencia matemática entre el límite líquido y límite plástico.

$$IP = LL - LP$$

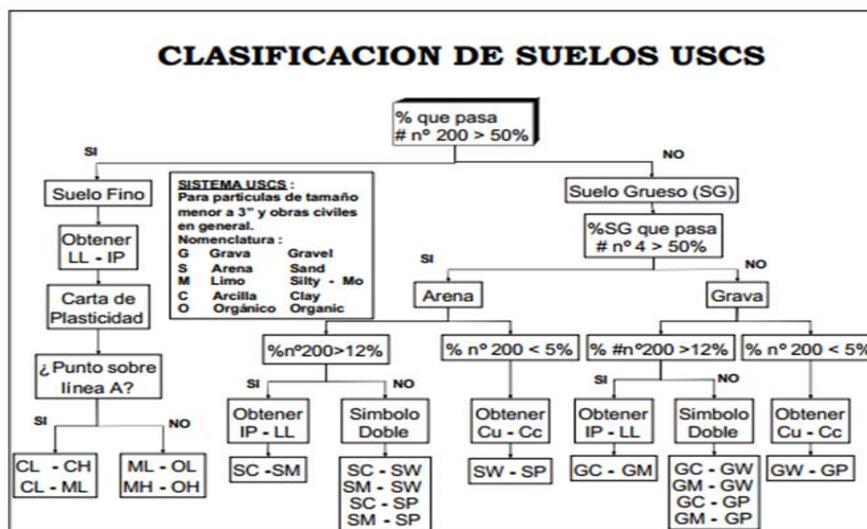
### 2.8.3 Clasificación de suelos

Hay dos sistemas de clasificación de suelos de uso común para propósitos de ingeniería:

- **Sistema Unificado de Clasificación del Suelo (SUCS o USCS)**

Es un sistema de clasificación de suelos usado en ingeniería y geología para describir la textura y el tamaño de las partículas de un suelo. Este sistema de clasificación puede ser aplicado a la mayoría de los materiales sin consolidar y se representa mediante un símbolo con dos letras. Cada letra es descrita debajo (con la excepción de **Pt**). Para clasificar el suelo hay que realizar previamente una granulometría del suelo mediante tamizado u otros. También se le denomina clasificación modificada de Casagrande.

Figura N°2.7: Sistema Unificado de Clasificación de Suelos USCS



Fuente: www.civilgeeks.com

- **American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO)** Es un órgano que establece normas, publica especificaciones y hace pruebas de protocolos y guías usadas en el diseño y construcción de autopistas en todo los Estados Unidos. A pesar de su nombre, la asociación representa no sólo a las carreteras, sino también al transporte por aire, ferrocarril, agua y transporte público.

Figura N°2.8: Clasificación de suelos A.A.S.H.T.O.

Clasificación general	Materiales granulares (35% o menos pasa el tamiz #200)						Materiales limoarcillosos (más de 35% pasa el tamiz #200)				
	A-1		A-3 <sup>A</sup>	A-2				A-4	A-5	A-6	A-7 A-7-5 A-7-6
Clasificación de grupo	A-1-a	A-1-b		A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7				
Tamizado, % que pasa											
No. 10 (2.00mm)	50 máx.	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
No. 40 (425µm)	30 máx.	50 máx.	51 mín.	...	...	...	...	...	...	...	...
No. 200 (75µm)	15 máx.	25 máx.	10 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	36 mín.	36 mín.	36 mín.
Consistencia	...			B				...			
Límite líquido	...			B				40 máx.	41 mín.	40 máx.	41 mín.
Índice de plasticidad	6 máx.		N.P.	B				10 máx.	10 máx.	11 mín.	11 mín. <sup>B</sup>
Tipos de materiales característicos	Cantos, grava y arena		Arena fina	Grava y arena limoarcillosas				Suelos limosos		Suelos arcillosos	
Calificación	Excelente a bueno							Regular a malo			

<sup>A</sup> La colocación de A3 antes de A2 en el proceso de eliminación de izquierda a derecha no necesariamente indica superioridad de A3 sobre A2.

<sup>B</sup> El índice de plasticidad del subgrupo A-7-5 es igual o menor que LL-30. El índice de plasticidad del subgrupo A-7-6 es mayor que LL-30.

Fuente: American Association of State Highway Officials A.A.S.H.T.O.

Ambos sistemas utilizan los resultados del análisis granulométrico y la determinación de los límites de Atterberg para determinar la clasificación del suelo.

Las fracciones texturales del suelo son: grava, arena, limo, arcilla. A un suelo que comprende uno o más de estos componentes se le da un nombre descriptivo y una designación que consta de letras o números y letras. Estas letras dependen de las proporciones relativas de los componentes y de las características de plasticidad del suelo.

#### **2.8.4 Proctor modificado**

La compactación de un suelo produce un incremento en la densidad del material y con ello tres beneficios importantes:

- *Reducción de la compresibilidad*
- *Incremento de la resistencia al corte*
- *Disminución de la permeabilidad*

De este modo, la compactación de suelos es uno de los métodos más utilizados para mejorar las propiedades de un suelo y por ello es primordial conocer sus características de compactación y puesta en obra.

Los ensayos de compactación proctor normal y proctor modificado son dos de los ensayos más utilizados en el estudio de compactación de suelos para la construcción de terraplenes y otras obras de tierra. Se rige por la norma ASTM y es imprescindible para caracterizar la puesta en obra de un material:

- *Proctor normal ASTM D-698*
- *Proctor modificado ASTM D-1557*

Complementariamente, en el estudio de reutilización de suelos y su posible idoneidad para la compactación, se utiliza el ensayo C.B.R., granulometrías de suelos, límites de Atterberg, entre otros ensayos de laboratorio de suelos.

### 2.8.5 California Bearing Ratio C.B.R.

El ensayo C.B.R. se emplea para evaluar la capacidad portante de terrenos compactados como terraplenes, capas de firme, sub-rasantes, explanadas así como en la clasificación de terrenos.

Las siglas C.B.R. significan California Bearing Ratio y proviene que este ensayo fue desarrollado, antes de la segunda guerra mundial, por el departamento de transportes de California.

La prueba C.B.R. de suelos 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.

*Tabla N°2.3: Clasificación y uso del suelo según el valor de C.B.R.*

<b>C.B.R.</b>	<b>Clasificación cualitativa del suelo</b>	<b>Uso</b>
2 - 5	Muy mala	Sub-rasante
5 - 8	Mala	Sub-rasante
8 - 20	Regular - Buena	Sub-rasante
20 - 30	Excelente	Sub-rasante
30 - 60	Buena	Sub-base
60 - 80	Buena	Base
80 - 100	Excelente	Base

*Fuente: Assis A. 1988*

## CAPÍTULO III

### RELEVAMIENTO DE INFORMACIÓN

#### 3.1 UBICACIÓN

Las zonas de estudio se encuentran ubicados en la zona de la Nueva Terminal y el barrio Los Chapacos de la ciudad de Tarija, ya que al realizar el ensayo de límites de Atterberg, en estas zonas se obtuvo el suelo con las características necesarias para este trabajo de investigación.

*Figura N°3.1: Imagen satelital de la zona de extracción*



*Fuente: Google Earth*

La zona de extracción de la Nueva Terminal, se encuentra ubicado en las siguientes coordenadas:

Sur  $21^{\circ}33'30''$

Norte  $64^{\circ}40'29''$

Coordenada U.T.M.:

X: 673414.5 m

Y: 238487.4 m

Zona: 41

La zona de extracción del barrio Los Chapacos, se encuentra ubicado en las siguientes coordenadas:

Sur  $21^{\circ}30'02.6''$

Norte  $64^{\circ}44'13.5''$

### 3.2 MUESTREO DE MATERIALES

Previo al muestreo del material, se hizo una inspección de la zona donde se observó la presencia de material arcilloso, se tomaron pequeñas muestras de cada zona para realizar el ensayo de límites de Atterberg y determinar el índice de plasticidad de dichas muestras.

Al realizar los cálculos de los mismos, se determina que las muestras presentan índices de plasticidad apropiados.

*Figura N°3.2: Zona de extracción*



*Fuente: Elaboración propia*

### 3.3 ENSAYOS DE CARACTERIZACIÓN

#### 3.3.1 Contenido de humedad in situ

Al momento de realizar la extracción de la muestra, se separo una pequeña muestra para realizar el contenido del humedad del suelo, esta muestra se coloco en una bolsa plástica herméticamente cerrada para evitar la pérdida de humedad.

Para muchos tipos de suelo, el contenido de agua es una de las propiedades índices más significativas, que se emplea para establecer una correlación entre el comportamiento de dicho suelo y otras propiedades índices.

*Tabla N°3.1: Contenido de humedad in situ suelo N°1*

Número	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3
1	17.1	14.32	20.23
2	18.67	15.17	20.56
3	17.48	15.73	19.85
Promedio	17.75	15.07	20.21
<b>Promedio</b>	<b>17.68</b>		

*Fuente: Elaboración propia*

*Tabla N°3.2: Contenido de humedad in situ suelo N°2*

Número	Muestra 1	Muestra 2
1	15.2	16.4
2	15.8	16.6
Promedio	15.5	16.5
<b>Promedio</b>	<b>16</b>	

*Fuente: Elaboración propia*

*Figura N° 3.3: Taras con muestras de suelo para el contenido de humedad*



*Fuente: Elaboración propia*

### 3.3.2 Análisis granulométrico por tamizado

Este ensayo permite, mediante el tamizado, determinar la distribución por tamaños de las partículas mayores que 0.075 mm de una muestra de suelo.

Para realizar la granulometría del suelo fino, se debe utilizar 500 gramos de suelo que pase por el tamiz N°10.

Para realizar el método de lavado, se debe utilizar el tamiz N°200, el material retenido en este tamiz, debe colocarse a secar en el horno por 24hrs, para realizar el tamizado se debe usar los tamices N°40 y N°200

*Figura N°3.4: Juego de tamices para el ensayo de granulometría*



*Fuente: Elaboración propia*

*Figura N°3.5: Ensayo de granulometría por el método del lavado*



*Fuente: Elaboración propia*

Figura N°3.6: Tamizado de suelo seco



Fuente: Elaboración propia

Tabla N°3.3: Resultados del análisis granulométrico del suelo N°1

Tamices	Muestra N°1	Muestra N°2	Muestra N°3
	% que pasa del total	% que pasa del total	% que pasa del total
N°4	100.0	100.0	100.0
N°10	100.0	99.84	100.0
N°40	99.18	99.20	99.22
N°200	94.88	95.08	95.30

Fuente: Elaboración propia

Tabla N°3.4: Resultados del análisis granulométrico del suelo N°2

Tamices	Muestra N°1	Muestra N°2
	% que pasa del total	% que pasa del total
N°4	100	100
N°10	100	100
N°40	96.36	95.88
N°200	94.72	94.68

Fuente: Elaboración propia

### 3.3.3 Análisis granulométrico por hidrómetro

Este ensayo se encuentra basado en el principio de sedimentación de granos de suelo en agua, cuando un espécimen de suelos se sedimenta en agua, las partículas se asientan a diferentes velocidades, dependiendo de sus formas, tamaños y pesos. Por simplicidad, se supone que todas las partículas de los suelos son esferas y que la velocidad de las partículas se expresa por la ley de Stokes, por lo dicho anteriormente se presentan unas

restricciones a esta ley que son necesarias tener en cuenta como objeto del estudio que se hace:

- Las partículas finas no son esferas
- El suelo no es homogéneo en cuanto a su composición
- La temperatura del fluido no es constante
- Las partículas finas forman grumos debido a la iteración eléctrica que ocurre entre ellas.

El ensayo por hidrómetro se usa para determinar el porcentaje de partículas de suelos dispersados, que permanecen en suspensión en un determinado tiempo.

Para ensayos de rutina con fines de clasificación, el análisis con hidrómetro se aplica a partículas de suelos que pasan el tamiz N°10.

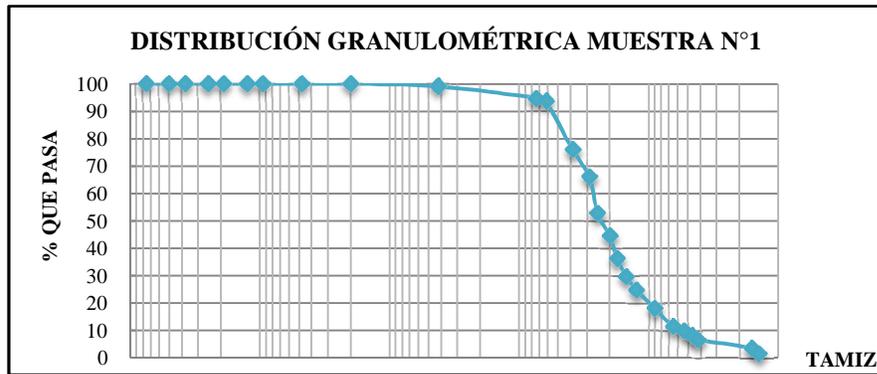
Cuando se quiere más precisión, el análisis con hidrómetro se debe realizar a la fracción de suelo que pase el tamiz N°200.

*Tabla N°3.5: Resultados del análisis granulométrico por hidrómetro suelo N°1*

<b>Muestra 1</b>		<b>Muestra 2</b>		<b>Muestra 3</b>	
<b>Diámetro</b>	<b>% que pasa</b>	<b>Diámetro</b>	<b>% que pasa</b>	<b>Diámetro</b>	<b>% que pasa</b>
0.0624	94.05	0.0610	95.205	0.0576	89.100
0.0382	75.90	0.0365	85.305	0.0388	79.200
0.0285	66.00	0.0273	77.055	0.0291	69.300
0.0248	52.80	0.0242	60.555	0.0249	59.400
0.0199	44.55	0.0192	55.605	0.0202	49.500
0.0174	36.30	0.0174	39.105	0.0178	39.600
0.0149	29.70	0.0148	35.805	0.0156	28.050
0.0124	24.75	0.0123	29.205	0.0131	19.800
0.0090	18.15	0.0090	19.305	0.0094	14.850
0.0065	11.55	0.0065	14.355	0.0068	9.900
0.0053	9.90	0.0054	11.055	0.0056	8.250
0.0046	8.25	0.0047	6.105	0.0049	4.950
0.0042	6.60	0.0042	6.105	0.0043	4.950
0.0016	3.63	0.0016	3.960	0.0016	4.455
0.0014	1.65	0.0014	2.310	0.0014	2.805

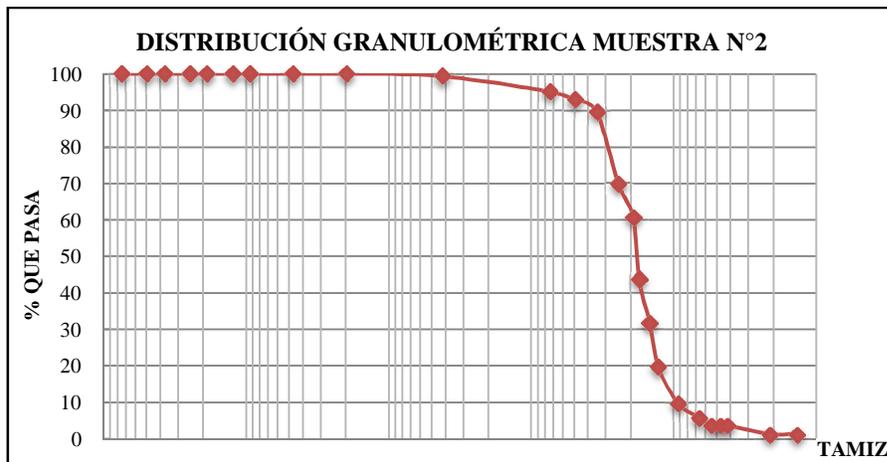
*Fuente: Elaboración propia*

Gráfico N° 3.1: Distribución granulométrica del suelo N°1 - muestra 1



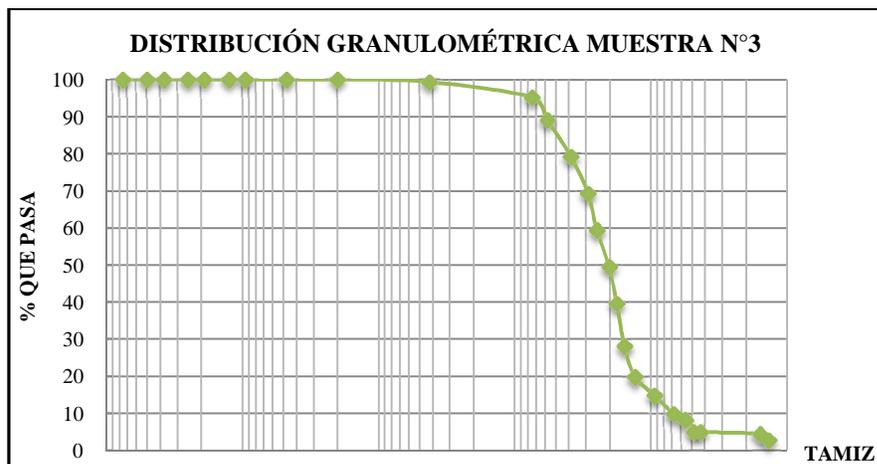
Fuente: Elaboración propia

Gráfico N° 3.2: Distribución granulométrica del suelo N° 1 - muestra 2



Fuente: Elaboración propia

Gráfico N° 3.3: Distribución granulométrica del suelo N° 1 - muestra 3



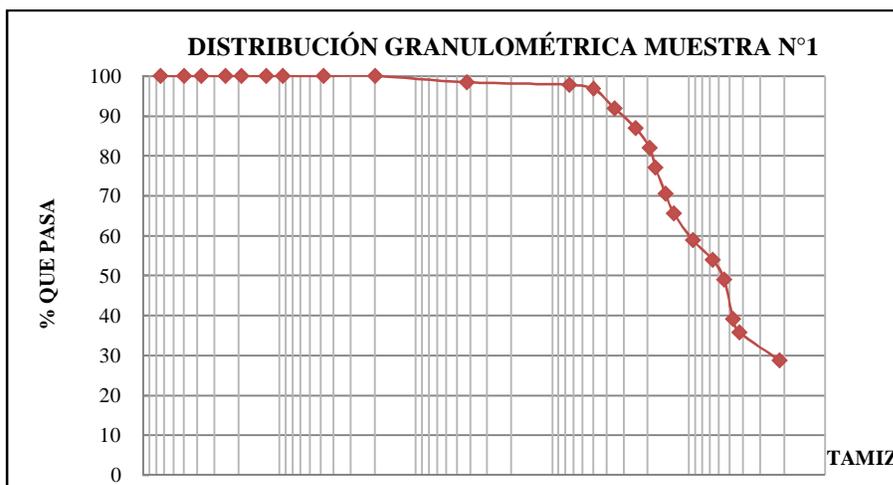
Fuente: Elaboración propia

Tabla N°3.6: Resultados del análisis granulométrico por hidrómetro suelo N°2

Muestra 1		Muestra 2	
Diámetro	% que pasa	Diámetro	% que pasa
0.0258	96.855	0.0275	97.35
0.0193	91.905	0.0205	94.05
0.0171	86.955	0.0176	89.1
0.0152	82.005	0.0160	84.15
0.0145	77.055	0.0149	79.2
0.0121	70.455	0.0127	75.9
0.0087	65.505	0.0093	70.95
0.0064	58.905	0.0067	67.65
0.0053	53.955	0.0056	61.05
0.0046	49.005	0.0049	57.75
0.0016	39.105	0.0016	42.9
0.0014	35.805	0.0014	31.35
0.0010	28.710	0.0010	27.555

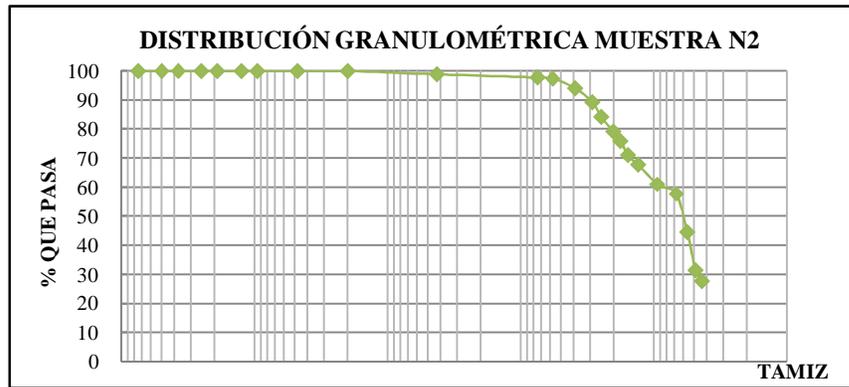
Fuente: Elaboración propia

Gráfico N° 3.4: Distribución granulométrica de suelo 2 - muestra N°1



Fuente: Elaboración propia

Gráfico N° 3.5: Distribución granulométrica de suelo 2 - muestra N°2



Fuente: Elaboración propia

### 3.3.4 Calibración de frasco volumétrico

Los frascos volumétricos de vidrio, cuando son expuestos a diferentes temperaturas, sufren ligeros cambios en su volumen es decir si se aumenta la temperatura el vidrio tiende a la dilatación incrementando ligeramente su volumen y cuando se disminuye la temperatura su volumen también disminuye.

El agua sufre un incremento en su peso cuando se aumenta su temperatura o viceversa. Estos cambios si bien no son considerables, pueden corregirse a través de la realización de una curva de calibración para cada frasco volumétrico.

La calibración del frasco será de utilidad para realizar los cálculos del peso específico del suelo.

Figura N° 3.7: Calibración del frasco volumétrico



Fuente: Elaboración propia

Figura N° 3.8: Lectura de temperaturas en el frasco volumétrico



Fuente: Elaboración propia

Tabla N°3.7: Peso del frasco volumétrico

Muestra	N°1	N°2	N°3
Peso del frasco (gr)	178.4	178.4	164.6

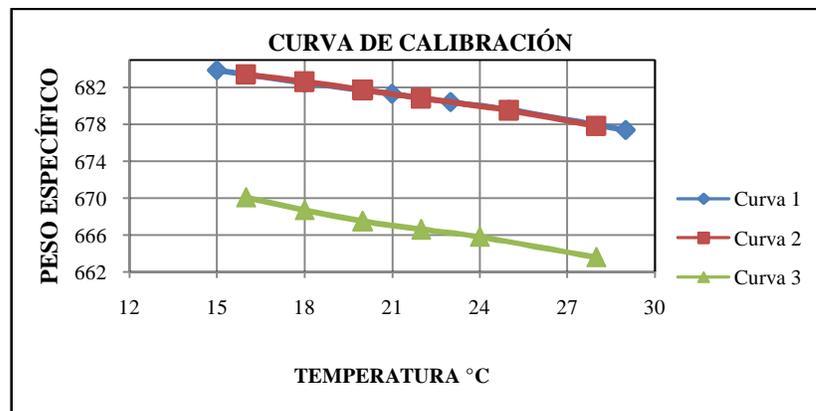
Fuente: Elaboración propia

Tabla N°3.8: Resultados de la calibración del frasco volumétrico

N°	Muestra N°1		Muestra N°2		Muestra N°3	
	Temp. °C	Peso (gr)	Temp. °C	Peso (gr)	Temp. °C	Peso (gr)
1	29	677.4	27	677.8	28	739.3
2	25	679.6	24	679.5	24	739.9
3	23	680.4	22	680.7	22	740.2
4	21	681.3	20	681.7	20	740.5
5	18	682.5	18	682.6	18	740.8
6	15	683.9	16	683.4	16	741.1

Fuente: Elaboración propia

Gráfico N° 3.6: Curva de calibración de los frascos volumétricos



Fuente: Elaboración propia

### 3.3.5 Determinación del peso específico

El peso específico relativo de los sólidos de un suelo se determina en laboratorio haciendo uso de un frasco con marca de enrase. El peso específico se determina mediante la siguiente ecuación:

$$\gamma = \frac{W_s}{W_{fw} + W_s - W_{fsw}}$$

Donde:

= Peso específico relativo de un suelo

$W_s$  = Peso del suelo seco

$W_{fw}$  = Peso del frasco lleno de agua

$W_{fsw}$  = Peso del frasco con suelo y agua

Tabla N°3.9: Resultados del ensayo de peso específico

N°	Muestra 1		Muestra 2		Muestra 3	
	Temp. °C	Peso específico	Temp. °C	Peso específico	Temp. °C	Peso específico
1	28	2.83	27	2.84	27	2.81
2	25	2.72	23	2.70	24	2.73
3	20	2.57	19	2.57	20	2.63
	Promedio	2.70	Promedio	2.70	Promedio	2.72

Fuente: Elaboración propia

### 3.3.6 Límites de Atterberg

#### 3.3.6.1 Límite líquido

Figura N° 3.9: Equipo de Casagrande para el límite líquido



Fuente: Elaboración propia

*Figura N° 3.10: Límite líquido de la muestra de arcilla*



*Fuente: Elaboración propia*

Este método establece el procedimiento para determinar el límite líquido de los suelos, mediante la máquina Casagrande.

El límite líquido es la humedad expresada como porcentaje de la masa de suelo seco en horno, de un suelo remoldeado en el límite entre los estados líquido y plástico.

Corresponde a la humedad necesaria para que una muestra de suelo remoldeada, depositada en la taza de bronce de la máquina Casagrande y dividida en dos porciones simétricas separadas 2 mm entre sí, fluya y entren en contacto en una longitud de 10 mm, aplicando 25 golpes.

### **3.3.6.2 Límite plástico**

Este método establece el procedimiento para determinar el límite plástico y el índice de plasticidad de los suelos.

El límite plástico, es la humedad expresada como porcentaje de la masa de suelo seco en horno, de un suelo remoldeado en el límite entre los estados plástico y semisólido.

Corresponde a la humedad necesaria para que bastones cilíndricos de suelo de 3mm de diámetro se disgreguen en trozos de 0.5 a 1cm de largo y no puedan ser reamasados ni reconstituidos.

Figura N° 3.11: Límite plástico de la muestra de arcilla



Fuente: Elaboración propia

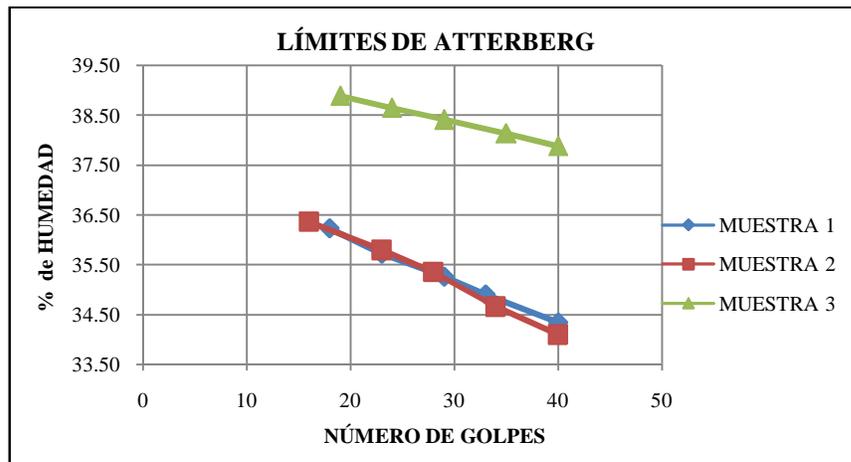
En la siguiente tabla se muestran los valores obtenidos de este ensayo.

Tabla N°3.10: Resultados de los límites de Atterberg suelo N°1

Muestra N°	Límite líquido (%)	Límite plástico (%)	Índice de plasticidad (%)	Índice de grupo
1	37	20	17	15
2	38	20	18	15
3	40	20	20	15

Fuente: Elaboración Propia

Gráfico N° 3.7: Cuadro resumen de los límites de Atterberg suelo N°1



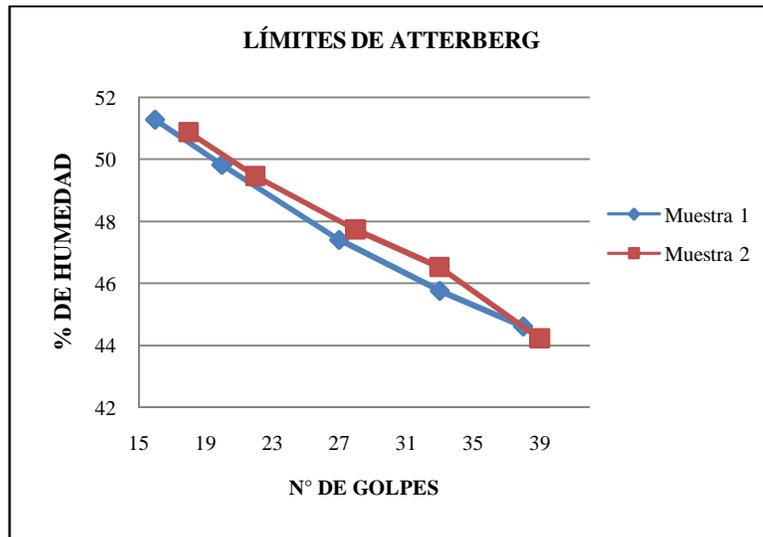
Fuente: Elaboración propia

Tabla N°3.11: Resultados de los límites de Atterberg suelo N°2

Muestra N°	Límite líquido (%)	Límite plástico (%)	Índice de plasticidad (%)	Índice de grupo
1	55	27	28	15
2	55	27	28	15

Fuente: Elaboración Propia

Gráfico N° 3.8: Cuadro resumen de los límites de Atterberg suelo N°2



Fuente: Elaboración Propia

### 3.3.7 Proctor modificado

Este método establece el procedimiento para determinar la relación entre la humedad y la densidad de un suelo compactado en un molde normalizado mediante un pisón de 4,5 kg. en caída libre, desde una altura de 460 mm, con una energía específica de compactación de 2,67 J/cm<sup>3</sup>.

Para realizar la compactación se debe usar suelo seco que pasa por el tamiz N°4, pero debido a que las partículas del suelo no se disgregaron de forma adecuada, se trabajó con el tamiz N°10 para tener una mejor distribución del tamaño de la muestra.

En la siguiente tabla se explica los diferentes métodos a usar según el tipo de suelo por usarse:

Tabla N°3.12: Especificaciones para la prueba de proctor modificado

Concepto	Método A	Método B	Método C
<b>Diámetro de molde</b>	101.6 mm	101.6 mm	152.4 mm
<b>Volumen de molde</b>	944 cm <sup>3</sup>	944 cm <sup>3</sup>	2124 cm <sup>3</sup>
<b>Peso del pisón</b>	44.5 N	44.5 N	44.5 N
<b>Altura de caída del pisón</b>	457.2 mm	457.2 mm	457.2 mm
<b>N° golpes de pisón por capa de suelo</b>	25	25	56
<b>Numero de capas</b>	5	5	5
<b>Energía de compactación (KN-m/m<sup>3</sup>)</b>	2696	2696	2696
<b>Suelo por usarse</b>	Porción que pasa la malla N°4. Se usa si 20% o menos por peso de material es retenido en la malla N°4	Porción que pasa la malla de 9.5 mm. Se usa si el suelo retenido en la malla N°4 es más del 20%, y 20% o menos por peso retenido en la malla de 9.5mm.	Porción que pasa la malla de 19 mm. Se usa si más del 20% por peso de material es retenido en la malla de 9.5 mm, y menos de 30% por peso retenido en la malla de 19 mm.

Fuente: Manual de laboratorio de suelos U.A.J.M.S.

De acuerdo a las especificaciones establecidas, el método para nuestro ensayo es el Método A.

Figura N° 3.12: Preparación de la muestra para secado en el horno



Fuente: Elaboración propia

Figura N° 3.13: Tamizado de la muestra para secado en el horno



Fuente: Elaboración propia

Figura N° 3.14: Extracción de muestra para densidad seca y humedad óptima



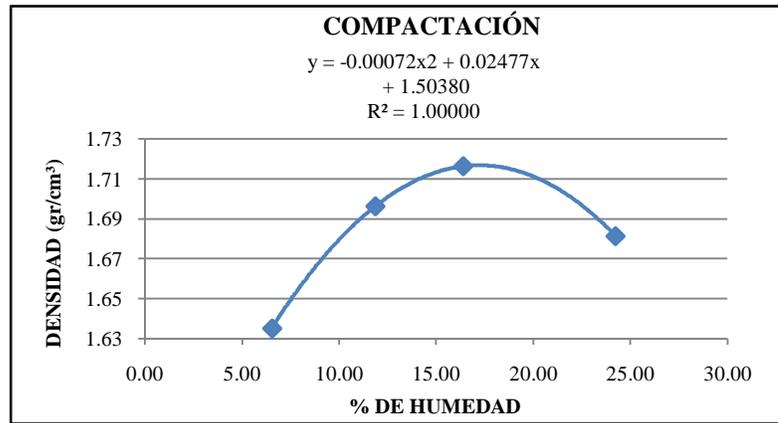
Fuente: Elaboración propia

Tabla N°3.13: Resultados de proctor modificado suelo N°1

Muestra N°	Humedad óptima (%)	Densidad seca (gr/cm <sup>3</sup> )
1	17.20	1.72
2	17.28	1.73
3	16.34	1.74

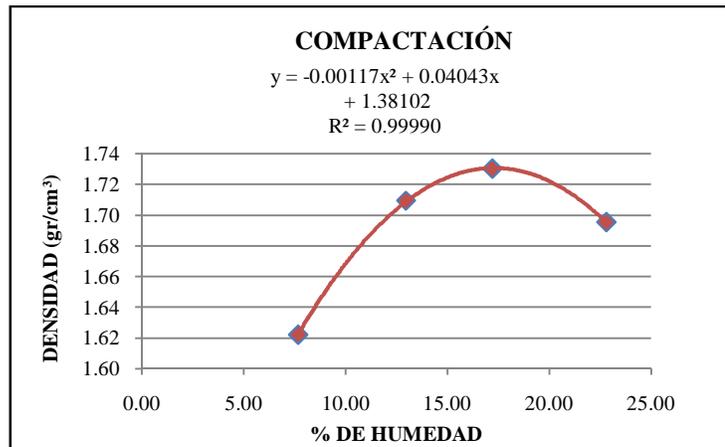
Fuente: Elaboración propia

Gráfico N°3.9: Curva de compactación suelo N°1 muestra 1



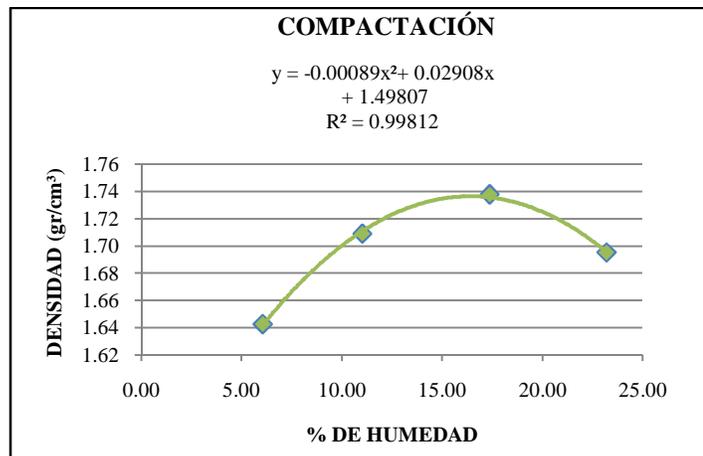
Fuente: Elaboración propia

Gráfico N°3.10: Curva de compactación suelo N°1 muestra 2



Fuente: Elaboración propia

Gráfico N°3.11: Curva de compactación suelo N°1 muestra 3



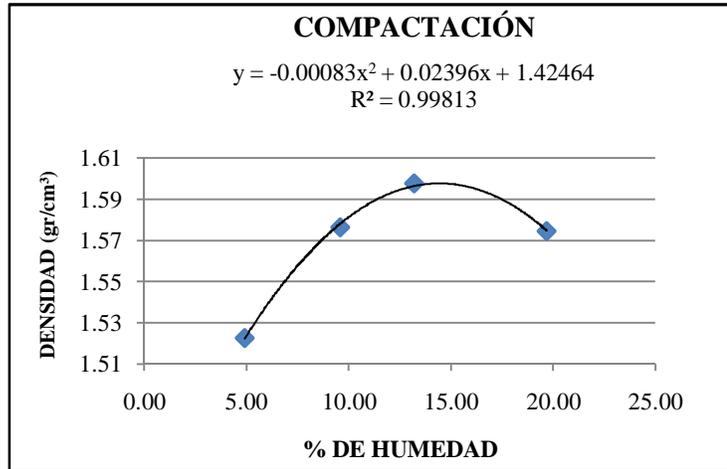
Fuente: Elaboración propia

Tabla N°3.14: Resultados de proctor modificado suelo N°2

Muestra N°	Humedad óptima (%)	Densidad seca (gr/cm <sup>3</sup> )
1	17.61	1.68
2	15.22	1.69

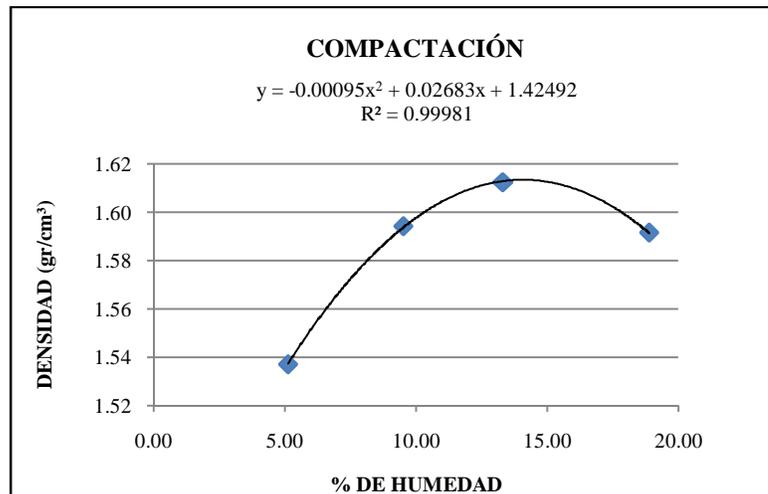
Fuente: Elaboración propia

Gráfico N°3.12: Curva de compactación suelo N°2 muestra 1



Fuente: Elaboración propia

Gráfico N°3.13: Curva de compactación suelo N°2 muestra 2



Fuente: Elaboración propia

### 3.3.8 Relación de soporte de California C.B.R.

El ensayo de C.B.R. se realizó de acuerdo a la norma A.A.S.H.T.O. T193, para obtener la resistencia del suelo, y así evaluar la capacidad de soporte del suelo en la capa de subrasante.

De acuerdo a la norma, para la obtención de los diferentes C.B.R. se efectuaron tres moldes con distinta energía de compactación, cada uno con 5 capas de 12, 25 y 56 golpes respectivamente.

Las muestras elaboradas bajo estos procedimientos, se sometieron a un proceso de inmersión en agua para simular las condiciones de saturación a las cuales podrían estar sometidos los suelos como es la subrasante de una carretera, y en esta forma, obtener los C.B.R. de los suelos bajo las condiciones más críticas; esto durante un periodo de 96 horas donde se colocan 2 pesas sobre las mismas con el objeto de simular las cargas tanto vehiculares como estructurales del pavimento, y por otro lado determinar su expansión efectuando lecturas diarias.

*Tabla N°3.15: Clasificación y uso del suelo según el valor de C.B.R.*

<b>C.B.R.</b>	<b>Clasificación cualitativa del suelo</b>	<b>Uso</b>
2 - 5	Muy mala	Sub-rasante
5 - 8	Mala	Sub-rasante
8 - 20	Regular - Buena	Sub-rasante
20 - 30	Excelente	Sub-rasante
30 - 60	Buena	Sub-base
60 - 80	Buena	Base
80 - 100	Excelente	Base

*Fuente: Assis A. 1988*

Figura N°3.15: Lectura de la resistencia en prensa de C.B.R.



Fuente: Elaboración propia

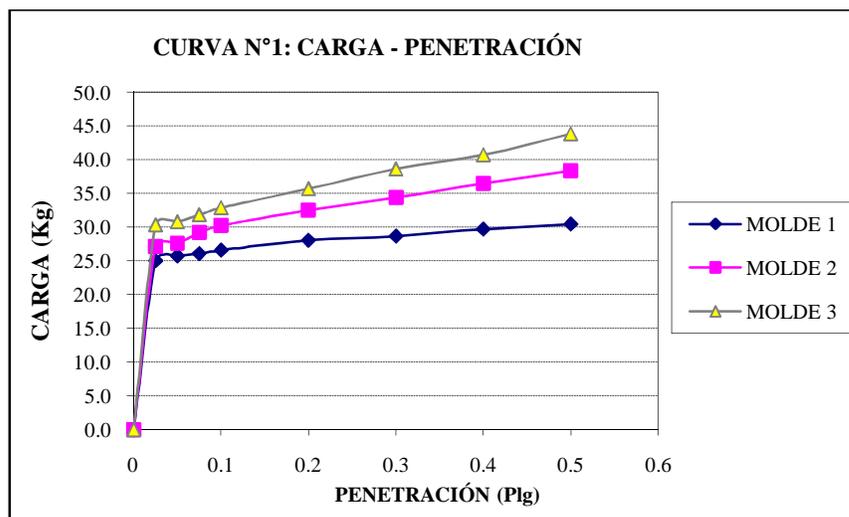
A continuación se presentan gráficos y valores obtenidos del ensayo:

Tabla N°3.16: Resultados de pesos unitarios del ensayo de C.B.R. suelo N°1

Número de golpes	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3
	C.B.R.( % )	C.B.R.( % )	C.B.R.( % )
12 golpes	2.0	2.0	2.0
25 golpes	2.2	2.3	2.2
56 golpes	2.4	2.4	2.4

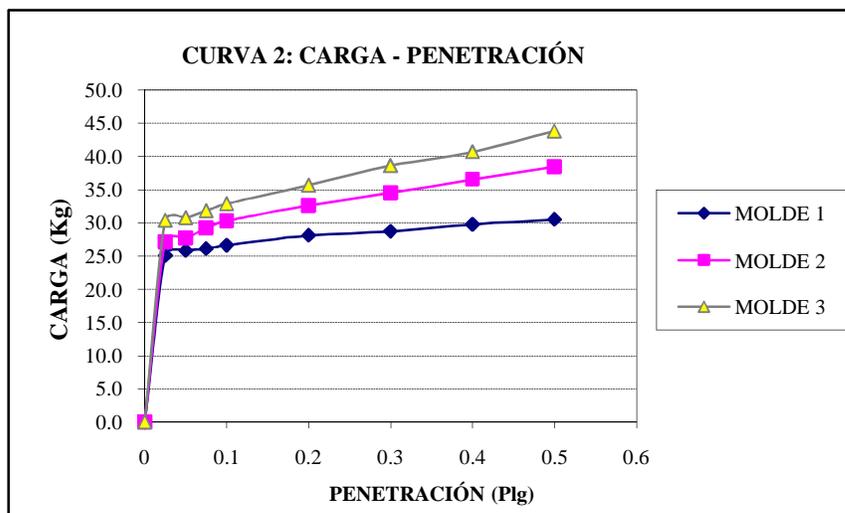
Fuente: Elaboración propia

Gráfico N°3.14: Gráfico carga - penetración. Suelo N°1 muestra 1



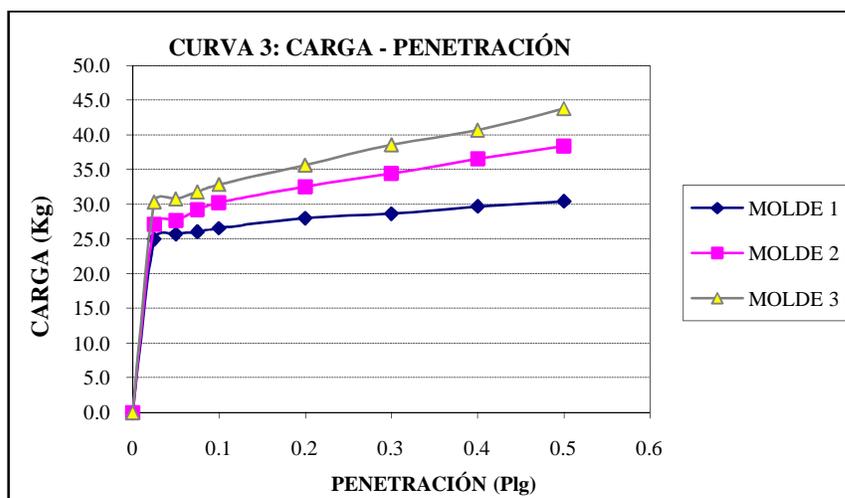
Fuente: Elaboración propia

Gráfico N°3.15: Gráfico carga - penetración. Suelo N°1 muestra 2



Fuente: Elaboración propia

Gráfico N°3.16: Gráfico carga - penetración. Suelo N°1 muestra 3



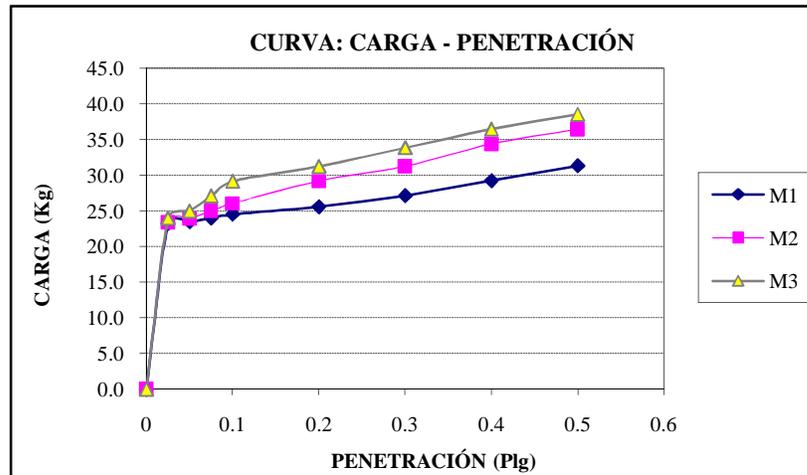
Fuente: Elaboración propia

Tabla N°3.17: Resultados del ensayo de C.B.R. suelo N°2

Número de golpes	Muestra 1	Muestra 2
	C.B.R.( % )	C.B.R.( % )
12 golpes	1.80	1.84
25 golpes	1.92	1.92
56 golpes	2.15	2.07

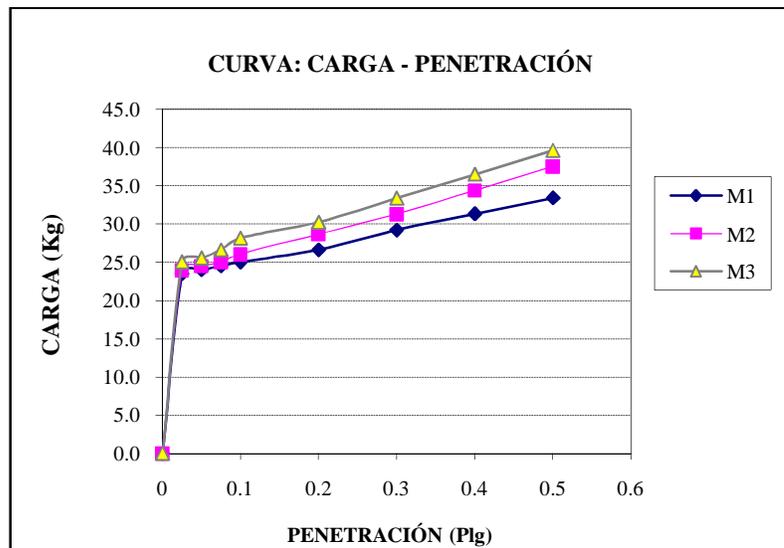
Fuente: Elaboración propia

Gráfico N°3.17: Gráfico carga - penetración. Suelo N°2 muestra 1



Fuente: Elaboración propia

Gráfico N°3.18: Gráfico carga - penetración. Suelo N°2 muestra 2



Fuente: Elaboración propia

### 3.4 CLASIFICACIÓN DE SUELOS

Con los resultados obtenidos del análisis granulométrico y los límites de Atterberg del suelo, se realizó la clasificación de la muestra de acuerdo a las clasificaciones mediante AASHTO y SUCS.

En la siguiente tabla se muestran los resultados:

Tabla N°3.18: Resultados de la clasificación de suelos N°1

N°	SUCS	AASHTO
1	CL	A-6(11)
2	CL	A-6(11)
3	CL	A-6(12)

Fuente: Elaboración Propia

Tabla N°3.19: Resultados de la clasificación de suelos N°2

N°	SUCS	AASHTO
1	CH	A-7-6(18)
2	CH	A-7-6(18)

Fuente: Elaboración Propia

En los suelos A-6, predomina la arcilla ya que más del 75 % del material pasa por el tamiz N°200, este suelo contiene pequeños porcentajes de arena fina y limo cuyas características son absorbidas por el gran porcentaje de arcilla. Este tipo de suelo experimenta por lo general grandes cambios de volumen entre los estados húmedo y seco. Ante la presencia del agua el suelo perteneciente a este grupo, sufre un incremento en su volumen, que va decreciendo mientras el agua se elimina.

Ambos suelos como subrasante A-6(11) y A-7-5(18) presentan una mala condición ya que los índices de grupo altos, traen como consecuencia un mayor espesor en el diseño del pavimento (subrasante, base, capa de rodadura) por tratarse de un terreno de fundación de mala calidad.

## **CAPÍTULO IV**

### **APLICACIÓN, CÁLCULO Y DISEÑO**

#### **4.1 DOSIFICACIÓN ÓPTIMA**

Debido a que la información sobre el cloruro de calcio como estabilizante no es muy extensa se optó a realizar dosificaciones en 1 % con respecto al peso de suelo seco.

Para obtener la dosificación del cloruro de calcio se realizaron ensayos de C.B.R. con diferentes porcentajes observando que, con la adición del 4 % del aditivo se encuentra el valor más elevado del C.B.R. en comparación con las demás dosificaciones realizadas.

Para la dosificación de la cal se realizaron dosificación en un rango de 1 a 10 %, observando que al 5 % se encuentra un valor aceptable de C.B.R.

Dosificación con cloruro de calcio:

Mezcla 1: Arcilla - 1 % Cloruro de calcio

Mezcla 2: Arcilla - 2 % Cloruro de calcio

Mezcla 3: Arcilla - 3 % Cloruro de calcio

Mezcla 4: Arcilla - 4 % Cloruro de calcio

Mezcla 5: Arcilla - 5 % Cloruro de calcio

Dosificación con cal:

Mezcla 1: Arcilla - 1 % Cal

Mezcla 2: Arcilla - 3 % Cal

Mezcla 3: Arcilla - 5 % Cal

Mezcla 4: Arcilla - 7 % Cal

Mezcla 5: Arcilla - 10 % Cal

## 4.2. ENSAYOS DE LABORATORIO CON CLORURO DE CALCIO.

### 4.2.1. Límites de Atterberg con cloruro de calcio

Para observar la influencia del aditivo en la plasticidad del suelo, se preparó una muestra representativa para realizar los límites por el lapso de seis semanas, y así poder observar su comportamiento.

Cabe recalcar que al realizar los ensayos de límites con 1 % y 2 % del aditivo no se obtuvo variaciones significativas durante las primeras semanas del ensayo, por tal motivo, no se continuó realizando los ensayos con dichas dosificaciones.

En la siguiente tabla, se presentan los valores obtenidos del índice de plasticidad durante el transcurso de 42 días:

*Tabla N°4.1: Resultados de plasticidad con cloruro de calcio al 3 %*

<b>Cloruro de calcio ( % )</b>	<b>Días</b>	<b>LL ( % )</b>	<b>LP ( % )</b>	<b>IP ( % )</b>
3%	7	39	19	20
	14	35	17	18
	21	34	16	18
	28	33	16	17
	35	31	16	15
	42	28	15	13

*Fuente: Elaboración propia*

*Tabla N°4.2: Resultados de plasticidad con cloruro de calcio al 4 %*

<b>Cloruro de calcio ( % )</b>	<b>Días</b>	<b>LL ( % )</b>	<b>LP ( % )</b>	<b>IP ( % )</b>
4%	7	39	20	19
	14	37	18	19
	21	34	17	17
	28	31	16	15
	35	29	16	13
	42	27	15	12

*Fuente: Elaboración propia*

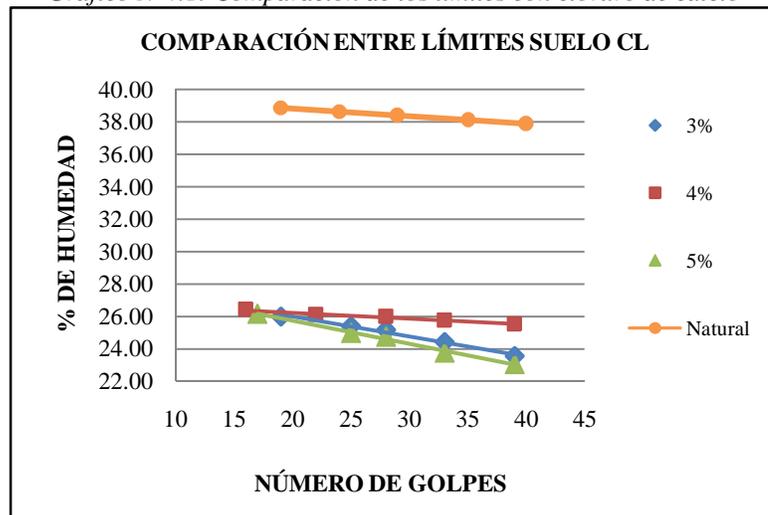
Tabla N° 4.3: Resultados de plasticidad con cloruro de calcio al 5 %

Cloruro de calcio ( % )	Días	LL ( % )	LP ( % )	IP ( % )
5%	7	38	18	20
	14	34	18	16
	21	32	18	14
	28	30	17	13
	35	30	17	13
	42	28	16	12

Fuente: Elaboración propia

A continuación, se muestra la gráfica del suelo natural y el grafico de los límites al 3, 4 y 5 %.

Gráfico N°4.1: Comparación de los límites con cloruro de calcio



Fuente: Elaboración propia

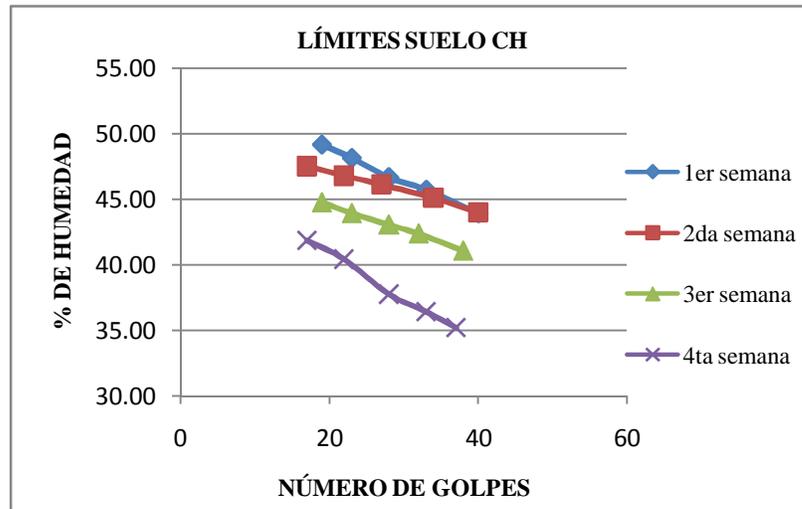
Para los límites de Atterberg del suelo CH se usa la dosificación óptima ya encontrada con el suelo CL.

Tabla N° 4.4: Resultados de plasticidad suelo CH con cloruro de calcio al 4%

Cloruro	Días	LL ( % )	LP ( % )	IP ( % )
4%	7	53	25	28
	14	50	25	25
	21	48	26	21
	28	47	27	20
	42	40	30	10

Fuente: Elaboración propia

Gráfico N° 4.2: Comparación de los límites suelo CH con cloruro de calcio



Fuente: Elaboración propia

#### 4.2.2 Proctor modificado con cloruro de calcio

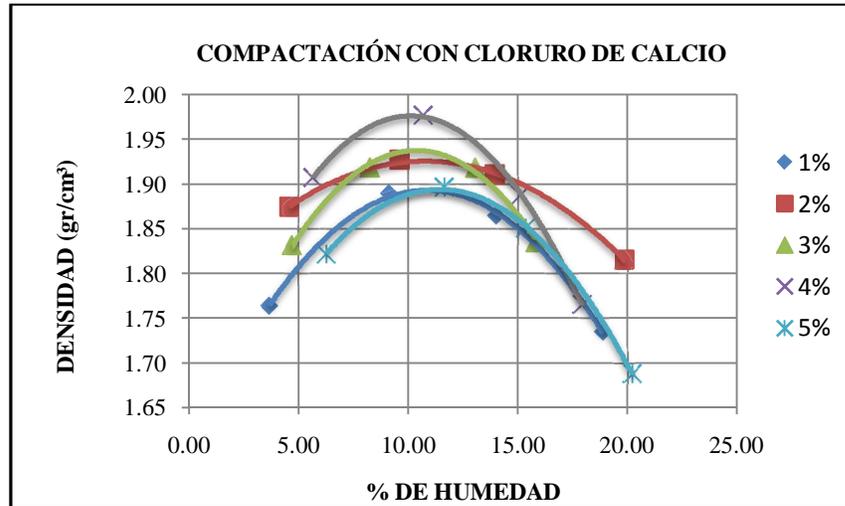
Para realizar la compactación se trabajó con el cloruro de calcio en forma de salmuera, en la siguiente tabla se muestran los resultados de la compactación:

Tabla N° 4.5: Resultados de densidad máxima con cloruro de calcio

Porcentajes %	Humedad óptima (%)	Densidad máxima ( gr/cm <sup>3</sup> )
1	10.85	1.89
2	10.76	1.93
3	10.34	1.94
4	10.09	1.98
5	11.43	1.93

Fuente: Elaboración propia

Gráfico N° 4.3: Curva de compactación suelo CL con cloruro de calcio



Fuente: Elaboración propia

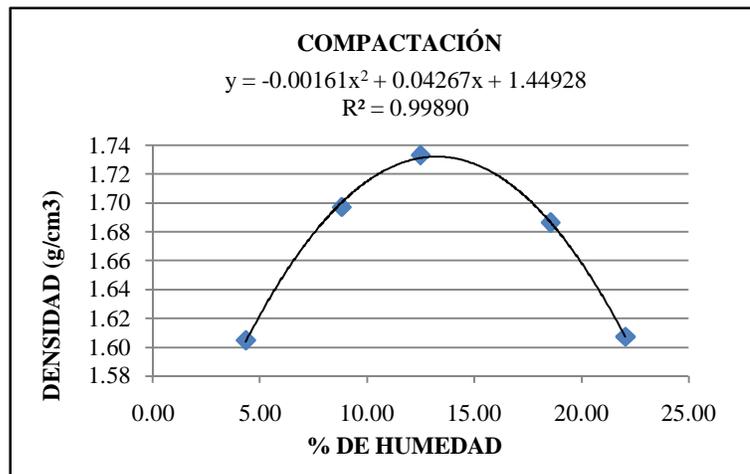
Para el suelo CH se trabajó con la dosificación óptima obtenida con el suelo CL

Tabla N° 4.6: Resultados de densidad máxima con cloruro de calcio para el suelo N° 2

Porcentajes	Humedad óptima	Densidad máxima
%	( % )	( gr/cm <sup>3</sup> )
4	13.25	1.73

Fuente: Elaboración propia

Gráfico N° 4.4: Curva de compactación suelo CH con cloruro de calcio



Fuente: Elaboración propia

### 4.2.3 California Bearing Ratio C.B.R. con cloruro de calcio

Los suelos tratados con cloruro de calcio experimentan una densificación o encalque, debido exclusivamente al cloruro. A esta densificación se la identifica como el òcurado ò porque tiene lugar despu3s de la compactaci3n, debido a esta raz3n se necesita curar en seco los moldes ya compactados de C.B.R. para reci3n sumergirlos en agua, y realizar el ensayo de manera normal.

Tabla 4.7: Resultados del valor de C.B.R. suelo CL con cloruro de calcio

Nº	C.B.R.	C.B.R.
%	100 %	95 %
1	2.271	2.033
2	2.840	2.639
3	3.144	2.890
4	4.240	3.781
5	3.548	3.316

Fuente: Elaboraci3n propia

Para el suelo CH se utiliza la dosificaci3n 3ptima

Tabla 4.8: Resultados del valor de C.B.R. suelo CL con cloruro de calcio

% Cloruro de calcio	C.B.R. 100%	C.B.R. 95 %
4	2.27	2.16
4	2.34	2.22
4	2.31	2.19

Fuente: Elaboraci3n propia

## 4.3 ENSAYOS DE LABORATORIO CON CAL

### 4.3.1 L3mites de Atterberg con cal

Con el uso de la cal, se observa que la plasticidad del suelo va disminuyendo de manera favorable, se observan variaciones en ambos l3mites, tanto l3quido como pl3stico.

En la siguiente tabla se muestran los resultados obtenidos.

*Tabla N° 4.9: Resultados de plasticidad con cal al 3 %*

<b>Cal (%)</b>	<b>Días</b>	<b>LL (%)</b>	<b>LP (%)</b>	<b>IP (%)</b>
3	7	41	20	21
	14	38	20	17
	21	37	21	15
	28	35	22	13
	35	34	22	11

*Fuente: Elaboración propia*

*Tabla N° 4.10: Resultados de plasticidad con cal al 5 %*

<b>Cal (%)</b>	<b>Días</b>	<b>LL (%)</b>	<b>LP (%)</b>	<b>IP (%)</b>
5	7	40	20	20
	14	37	21	16
	21	36	22	14
	28	34	23	11
	35	34	23	11

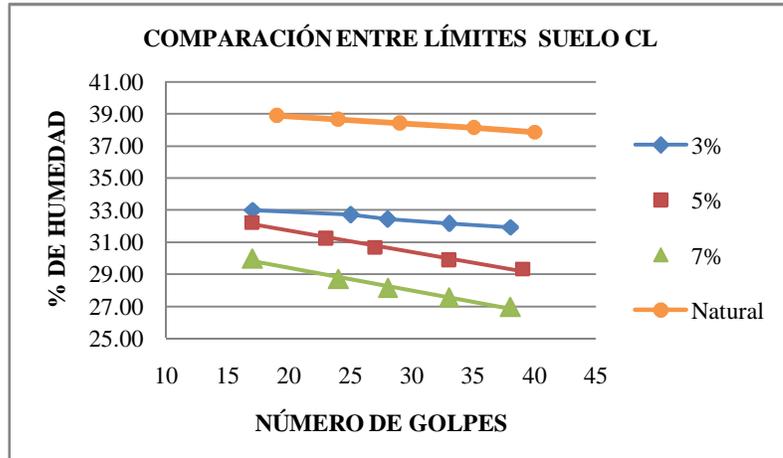
*Fuente: Elaboración propia*

*Tabla N° 4.11: Resultados de plasticidad con cal al 7 %*

<b>Cal (%)</b>	<b>Días</b>	<b>LL (%)</b>	<b>LP (%)</b>	<b>IP (%)</b>
7	7	37	20	17
	14	35	22	13
	21	34	24	10
	28	33	25	8
	35	32	25	7

*Fuente: Elaboración propia*

Gráfico N° 4.5: Comparación de los límites con cal



Fuente: Elaboración propia

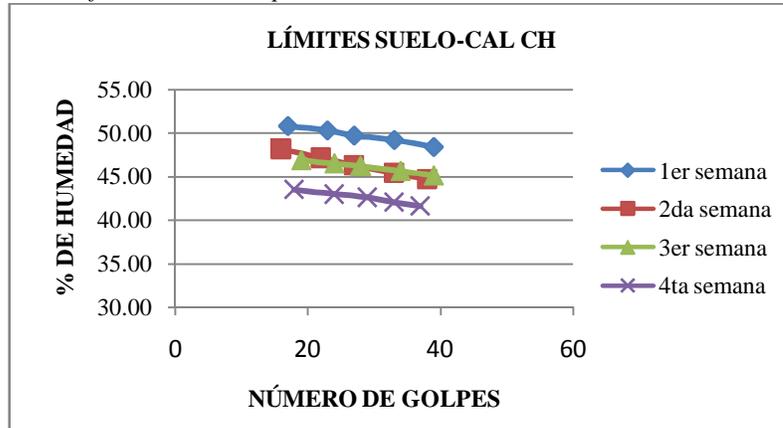
Para los límites de Atterberg del suelo CH, se utilizara la dosificación óptima con cal obtenido con el suelo CL.

Tabla N° 4.12: Resultados de plasticidad del suelo CH con cal

Cal	Días	LL ( % )	LP ( % )	IP ( % )
5%	7	52	28	25
	14	50	31	19
	21	48	34	14
	28	45	36	9
	42	45	38	6

Fuente: Elaboración propia

Gráfico N° 4.6: Comparación de los límites del suelo CH con cal



Fuente: Elaboración propia

### 4.3.2. Proctor modificado con cal

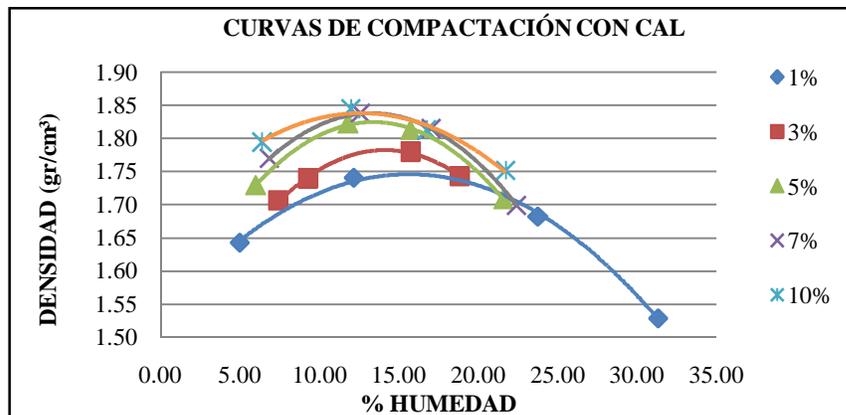
En la siguiente tabla se muestran los resultados obtenidos.

Tabla N° 4.13: Resultados de compactación con cal suelo CL

Porcentaje de cal %	Humedad óptima %	Densidad máxima gr/cm <sup>3</sup>
1	15.61	1.75
3	14.11	1.78
5	13.37	1.82
7	13.29	1.84
10	12.95	1.85

Fuente: Elaboración propia

Gráfico N° 4.7: Curva de compactación con cal suelo CL



Fuente: Elaboración propia

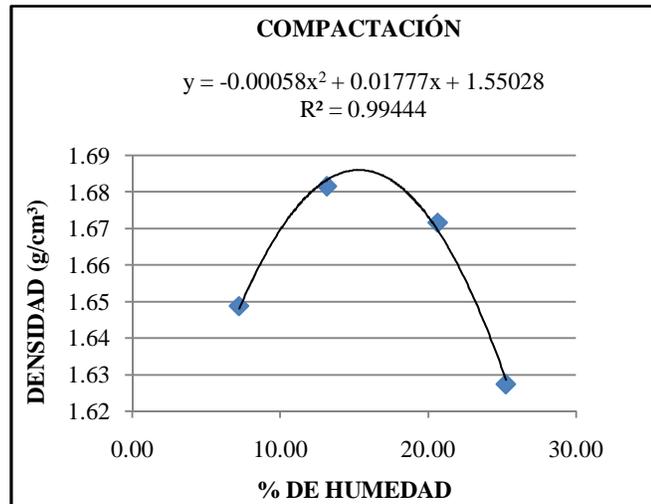
Para el suelo CH se utiliza la dosificación óptima del suelo CL

Tabla N° 4.14: Resultados de compactación con cal suelo CH

Porcentaje de cal %	Humedad óptima %	Densidad máxima gr/cm <sup>3</sup>
5	15.32	1.69

Fuente: Elaboración propia

Gráfico N° 4.8: Curva de compactación con cal suelo CH



Fuente: Elaboración propia

### 4.3.3. Ensayo de C.B.R. con cal

En la siguiente tabla se muestran los resultados obtenidos.

Tabla N° 4.15: Resultados de los C.B.R. de suelo CL con cal

Porcentaje cal %	C.B.R. 100%	C.B.R. 95%
1	3.8	3.6
3	4.2	4.0
5	10	9.5
7	12	11.4
10	17	16.5

Fuente: Elaboración propia

Tabla N° 4.16: Resultados de los C.B.R. de suelo CH con cal

Porcentaje cal %	C.B.R. 100%	C.B.R. 95%
5	7.05	6.70

Fuente: Elaboración propia

## **4.4 ANÁLISIS DE RESULTADOS**

### **4.4.1 Análisis de los resultados del suelo en estado natural**

De acuerdo a la granulometría del suelo nos muestra un alto contenido de material fino, lo cual indica que se trata de un suelo arcilloso con material fino de 94.88%, con presencia de poca arena fina.

De acuerdo a los límites de Atterberg, se observa que estamos ante la presencia de un suelo plástico, ya que se obtuvo un límite líquido de 40, límite plástico de 20 e índice de plasticidad de 20, además el índice de grupo nos arroja un valor de 12, lo cual nos indica que estamos trabajando con un suelo de mala calidad para subrasante.

Esto pudo ser verificado al realizar el ensayo de C.B.R. el cual nos arroja valores muy bajos de resistencia, de los valores obtenidos en la caracterización se trabaja con el valor más crítico 2.1 de C.B.R. al 95 %

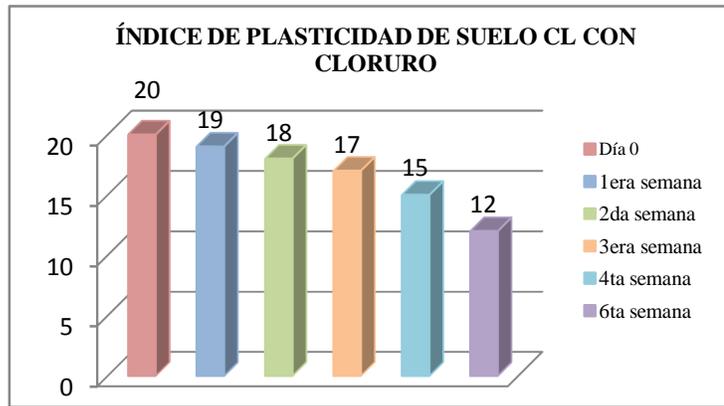
### **4.4.2 Análisis de los resultados con cloruro de calcio.**

#### **4.4.2.1 Influencia del cloruro de calcio en los límites de Atterberg**

Se puede observar que con la acción del cloruro de calcio el límite líquido va en descenso, por el contrario el límite plástico no aumenta de manera significativa como ocurre con la cal, esto se debe a la propiedad higroscópica que presenta el cloruro de calcio, la cual es de retener el agua evitando que sufra cambios volumétricos de consideración.

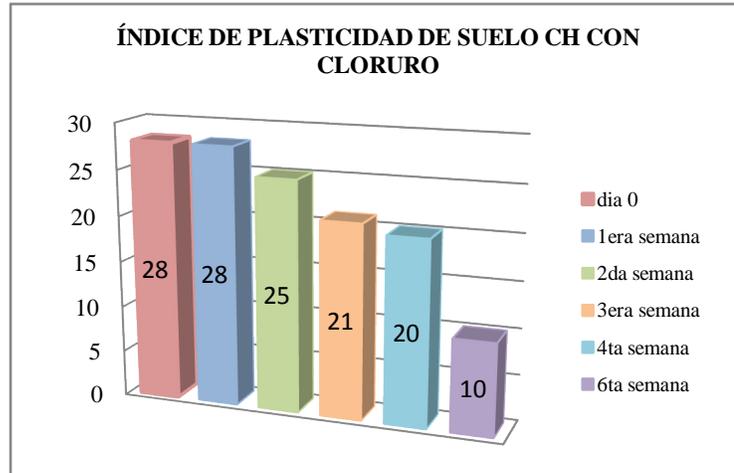
Para el suelo CL se observa que existe una reducción considerable del índice de plasticidad con la adición del cloruro de calcio en un 4%, en cambio para el suelo CH se consigue una reducción inferior del índice de plasticidad, mostrando que en cuanto a plasticidad se obtienen mejores resultados con los suelos de baja plasticidad.

Gráfico N° 4.9: Índice de plasticidad con porcentaje óptimo de cloruro de calcio en suelo CL



Fuente: Elaboración propia

Gráfico N° 4.10: Índice de plasticidad con porcentaje óptimo de cloruro de calcio en suelo CH



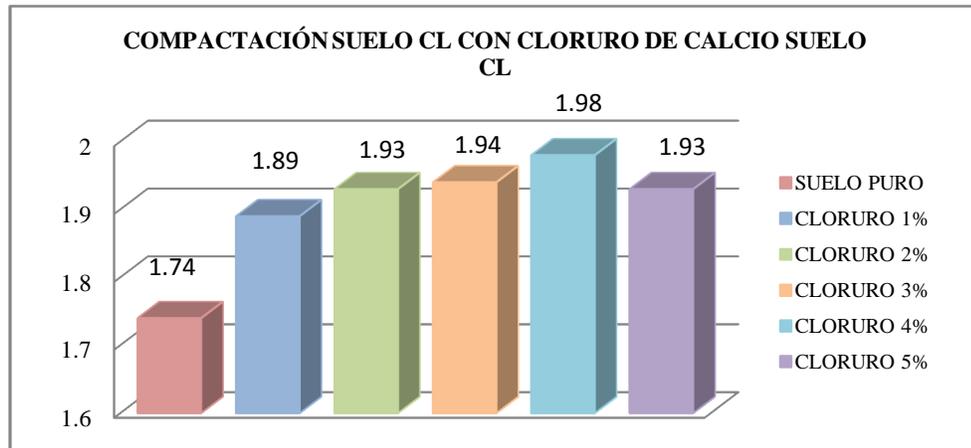
Fuente: Elaboración propia

#### 4.4.2.2 Influencia del cloruro de calcio en la compactación

Para el ensayo de compactación, se observa que existe un incremento considerable en la densidad seca del suelo CL, de acuerdo a la gráfica se puede observar que, con el 4% de cloruro existe un incremento en la densidad de 1.74gr/cm<sup>3</sup> a 1.98 g/cm<sup>3</sup>.

Sin embargo con el suelo CH se observa que, a pesar de que se obtiene un incremento de 1.60 gr/cm<sup>3</sup> a 1.69 g/cm<sup>3</sup> en la densidad seca no es tan considerable como ocurre con el suelo CL, por ende en cuanto a la densidad seca del suelo el cloruro de calcio funciona mejor en suelos de baja plasticidad.

Gráfico N° 4.11: Densidad máxima con diferentes porcentajes de cloruro de calcio para el suelo CL



Fuente: Elaboración propia

#### 4.4.2.3 Influencia del cloruro de calcio en el ensayo de C.B.R.

Se presentan los valores de C.B.R. al 95 %, como se puede apreciar, el cloruro de calcio no otorga al suelo una mejoría en su resistencia, debido a que el químico es una sal, que al entrar en contacto con el agua, esta va eliminando el cloruro y por ende las propiedades que adquirió durante la compactación no pueden apreciarse.

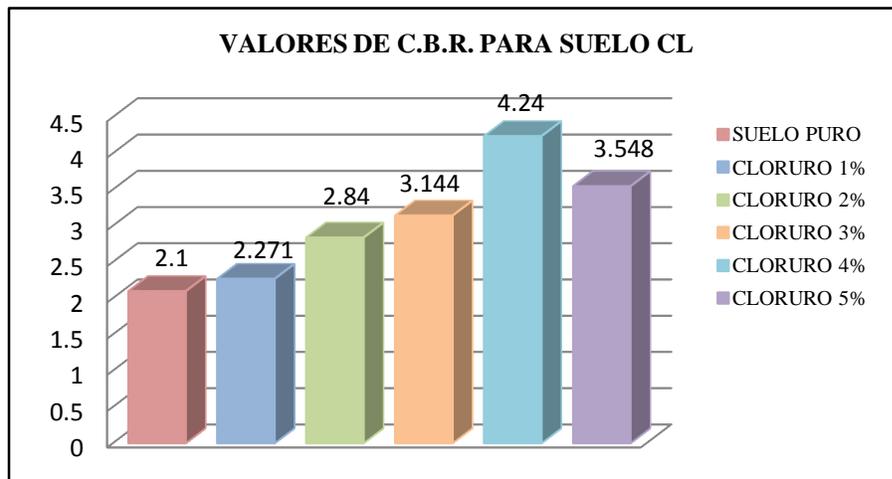
Al realizar el ensayo sin un tiempo de curado en seco, se obtuvieron valores de C.B.R. muy bajos como los del suelo en estado natural. De acuerdo a la teoría, se dice que el cloruro de calcio proporciona al suelo un encalque después de la compactación, esto se pudo apreciar al repetir en el ensayo con un tiempo de curado de 3 días (de acuerdo a lo establecido en investigaciones previas), se observó un pequeño incremento en la resistencia pero no cumple con el valor mínimo de resistencia del C.B.R.

Debido a que con porcentajes mayores de cloruro de calcio, la resistencia continuaba decreciendo, se tomó como dosificación óptima del aditivo el valor de 4 %, que es el valor más elevado de resistencia que se pudo obtener.

En cambio en los suelos CH se obtuvo un valor de C.B.R. al 95% de 1.79% en estado natural, con la adición del cloruro de calcio se obtuvo un C.B.R. de 2.16%,

A continuación se muestra un gráfico del incremento de las resistencias del C.B.R. de acuerdo al porcentaje indicado.

Gráfico N° 4.12: Valor de C.B.R. para suelo CL con diferentes porcentajes de cloruro de calcio



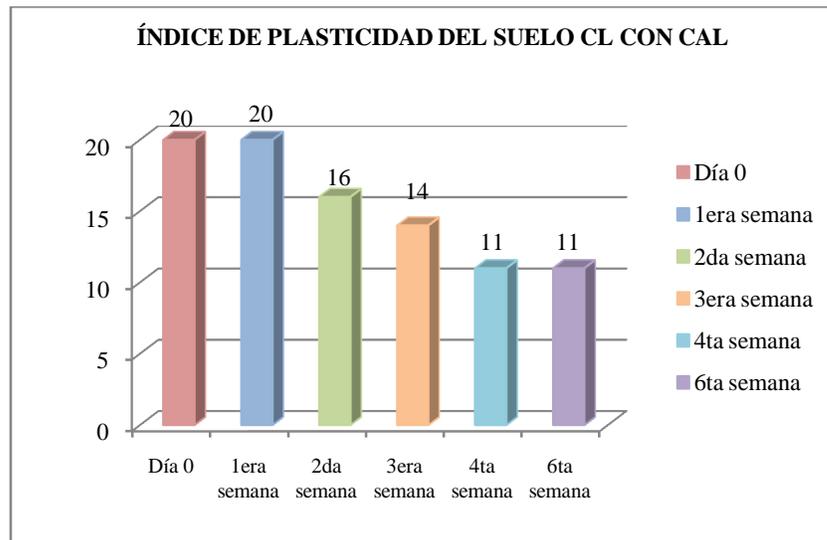
Fuente: Elaboración propia

#### 4.4.3 Análisis de los resultados con cal

##### 4.4.3.1 Influencia de la cal en los límites de Atterberg.

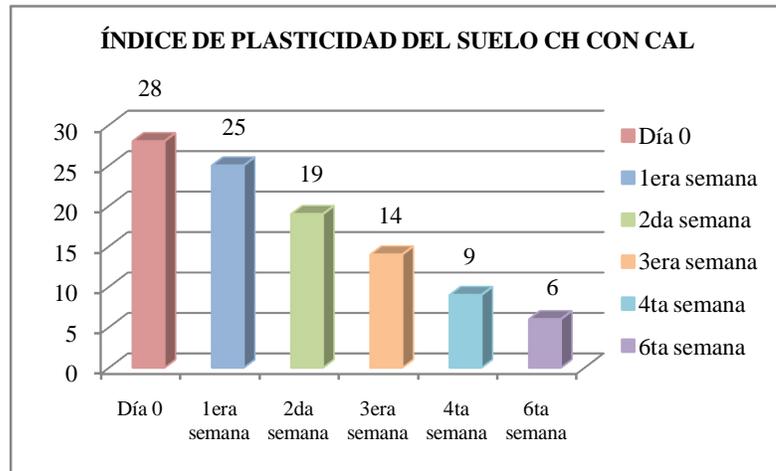
Al analizar la plasticidad del suelo se puede observar que la cal reduce considerablemente la plasticidad del suelo. Se muestra la dosificación óptima para ambos suelos, donde con el suelo CH se obtiene mejores resultados.

Gráfico N° 4.13: Índice de plasticidad con porcentaje óptimo de cal suelo CL



Fuente: Elaboración propia

Gráfico N° 4.13-1: Índice de plasticidad con porcentaje óptimo de cal suelo CH



Fuente: Elaboración propia

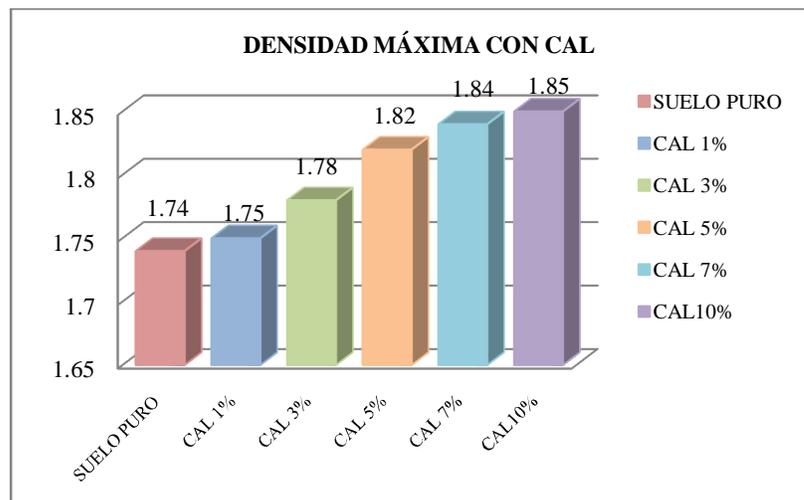
#### 4.4.3.2 Influencia de la cal en la compactación.

El efecto de la cal en la densidad seca del suelo arcilloso es de forma gradual ascendente, dependiendo del porcentaje que se adicione la densidad aumenta, esta no disminuye en al algún punto como ocurre con el cloruro de calcio, la densidad del suelo irá incrementando.

De acuerdo a la dosificación óptima del 5% de cal, para el suelo CL se obtiene un incremento en la densidad de 1.74 g/cm<sup>3</sup> a 1.82 g/cm<sup>3</sup>.

Para el suelo CH se obtiene un incremento en la densidad de 1.60 g/cm<sup>3</sup> a 1.69 g/cm<sup>3</sup>.

Gráfico N° 4.14: Densidad máxima con diferentes porcentajes de cal suelo CL

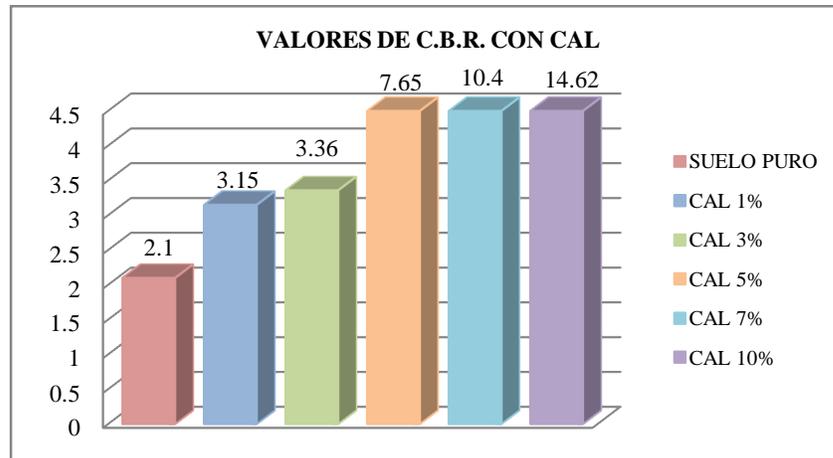


Fuente: Elaboración propia

#### 4.4.3.3 Influencia de la cal en el ensayo de C.B.R.

Se puede observar que el incremento de la resistencia del suelo con la cal es favorable, de acuerdo a la cantidad de cal que se agregue la resistencia seguirá incrementando, se determina como valor de C.B.R. aceptable al valor encontrado con el 5% de cal, ya que este supera el valor mínimo aceptable.

Gráfico N° 4.15: Densidad máxima de suelo CL con diferentes porcentajes de cal



Fuente: Elaboración propia

A pesar de tener mejores valores con una dosificación de 10% se tomara el porcentaje de 5 % como dosificación óptima tomando en cuenta el factor económico.

Al realizar el ensayo de C.B.R. con el suelo CH, se tiene que el valor obtenido cumple con el valor mínimo de C.B.R., que al 95% se tiene un resultado de 6.25%

#### 4.4.4 Comparación de los resultados entre cloruro de calcio y cal

Al comparar el cloruro de calcio y cal, hay una marcada diferencia entre ambos, ya que el cloruro de calcio carece de la reacción puzolánica, sin embargo su capacidad de retener agua, juega en favor al momento de controlar la expansión. Sin embargo, al mantener mucha cantidad de agua, transforma al suelo en blando, evitando generar resistencia como lo hace la cal. Se pudo observar que el cloruro tiene mejores resultados con el suelo CL, aunque no consigue obtener buenos resultados al mejorar la resistencia del suelo y hacerla apta para su uso como subrasante

## 4.5 COMPARACIÓN CON OTROS MÉTODOS

Se realizara una comparación de la resistencia obtenida en este trabajo de investigación con otros métodos a fin de observar si este método representa un beneficio en la estabilización de suelos.

Para esto, se emplearan los datos de estudios ya realizados como ser:

- Estabilización con rap cemento.
- Estabilización con Rocamix cemento.
- Estabilización con cascarilla de arroz.
- Estabilización con vinaza de caña de azúcar.
- Estabilización con ceniza volcánica.

### 4.5.1 Estabilización con rap cemento

Se usará el trabajo "Valoración de las mezclas de suelo rap cemento como material de subrasante" de Vargas Gómez Carlo Emanuel del año 2010, para realizar comparaciones entre ambos métodos observándose que con la combinación de rap-cemento al 5% y 2% respectivamente, se consigue un considerable incremento en el valor de C.B.R.

*Tabla N° 4.17: Tabla resumen ensayos con rap cemento*

CL A-6 (13)		0%	5%-2%	10%-2%	20%-2%
Compactación	Humedad óptima (%)	18.36	17.10	15.70	13.35
	Densidad máxima (gr/cm <sup>3</sup> )	1.76	1.81	1.84	1.86
C.B.R.	95 %	4.20	20.81	24.74	34.69

*Fuente: Vargas G. (2010)*

### 4.5.2 Estabilización con Rocamix cemento

Del trabajo titulado "Estabilización de suelos arcillosos con Rocamix" de Martínez Velasco Cristian Heriberto del año 2017, se puede apreciar que la combinación de estos, no produce un cambio significativo en la plasticidad de los suelos sin embargo consigue aumentar el valor de C.B.R. con un porcentaje pequeño del aditivo.

Tabla N° 4.18: Tabla resumen ensayos con Rocamix cemento

CL A-6 (12)		0%	0.016	0.028	0.032	0.036
Limites de Atterberg	Límite líquido (%)	46.77	46.36	45.92	45.55	45.39
	Límite plástico (%)	36.09	36.45	36.72	36.87	37.09
	I. de plasticidad (%)	10.68	9.91	9.20	8.68	8.30
Compactación	Humedad óptima (%)	16.56	16.12	15.75	15.48	14.69
	Den. máxima (gr/cm <sup>3</sup> )	1.80	1.84	1.85	1.87	1.87
C.B.R.	95 %	2.96	9.04	13.12	17.06	20.32

Fuente: Martínez V. (2010)

#### 4.5.3 Estabilización con vinaza de caña de azúcar

Del trabajo "Estabilización de suelos cohesivos con vinaza de caña de azúcar" de José Amado Aguilera Quispe de 2010, se puede apreciar que se requiere un mayor porcentaje de vinaza para obtener el valor mínimo de C.B.R., sin embargo a medida que se incrementa el porcentaje de vinaza, el límite plástico disminuye lo que provoca un incremento en el índice de plasticidad. En cambio en suelos con presencia escasa de limos, se observa que se requiere un porcentaje menor para obtener el valor mínimo de C.B.R. además de que el incremento del porcentaje de la vinaza favorece a la reducción del índice de plasticidad.

Tabla N° 4.19: Tabla resumen ensayos con vinaza de caña de azúcar

B/ Las Palmeras ( CL A6 (11) )		0%	25%	50%	75%	100 %
Limites de Atterberg	Límite líquido (%)	34.55	29.35	26.05	21.53	20.33
	Límite plástico (%)	18.19	15.59	15.87	16.89	20.06
	I. de plasticidad (%)	16.35	13.75	10.18	4.64	0.26
Compactación	Humedad óptima (%)	12.08	11.64	11.64	11.64	11.62
	Densidad máxima (g/cm <sup>3</sup> )	2.09	2.09	2.09	2.09	1.7
C.B.R.	95 %	4.1	7.6	12.2	18.3	26.6

Fuente: Aguilera Q, (2010)

#### 4.5.4 Estabilización con cascarilla de arroz

Del trabajo "Estabilización de suelos arcillosos con sustancia cementante (ceniza de cascarilla de arroz-cal) de Nélide Noemí Camata Cari del año 2014, se debe resaltar que se uso la cal en un porcentaje de 3% para cada una de las combinaciones con ceniza de

cascarilla de arroz, lo que permitió un efectivo control de la plasticidad, además de con un porcentaje mínimo de 3% de ceniza y 3% de cal, el C.B.R. obtuvo resultados de 33.40 convirtiendo al suelo apto su uso.

*Tabla N° 4.20: Tabla resumen ensayos con cascarilla de arroz*

B/ Miraflores A-7-6		0%	3%	5%	7%	10%
Límites de Atterberg	Límite líquido (%)	50	NP	NP	NP	NP
	Límite plástico (%)	31				
	I. de plasticidad (%)	20				
Compactación	Humedad óptima (%)	18.19	17.86	17.07	18.72	19.21
	Den. máxima (g/cm <sup>3</sup> )	1.74	1.84	1.87	1.81	1.78
C.B.R.	95 %	1.6	33.40	40	47.30	76

*Fuente: Camata C. (2014)*

#### 4.5.5 Estabilización con ceniza volcánica

Tomando en cuenta los valores obtenidos del trabajo "Estabilización de arcillas expansivas mediante la adición de cenizas volcánicas" de Reider Hipólito Cari Ruiz del año 2009, se observa que este método no es eficiente para la estabilización de suelos ya que los valores de C.B.R. obtenidos son muy bajos, aunque es efectivo en el control de la plasticidad del suelo.

*Tabla N° 4.21: Tabla resumen ensayos con ceniza volcánica*

Suelo CL A6 (9)		0%	5%	10%	15%
Límites de Atterberg	Límite líquido (%)	26.04	26.09	29.35	40.11
	Límite plástico (%)	12.73	18.24	25.46	38.59
	I. de plasticidad (%)	13.31	7.85	3.89	1.52
Compactación	Humedad óptima (%)	10.21	10.46	12.5	12.79
	Den. máxima (g/cm <sup>3</sup> )	1.996	1.960	1.912	1.896
C.B.R.	95 %	0.87	0.99	1.05	1.36

*Fuente: Cari R. (2009)*

## 4.6 VALIDACIÓN DE LA HIPÓTESIS

### 4.6.1 Tratamiento estadístico para muestra arcilla-cloruro de calcio

Para el tratamiento estadístico se toma como variable dependiente a la resistencia del suelo obtenida del ensayo de C.B.R. al 95 %

Tabla N°4.22: Cuadro resumen de la resistencia del suelo.

N°	Resistencia	(Xi- X)²
1	3.90	0.001
2	3.80	0.004
3	4.20	0.113
4	4.00	0.018
5	4.00	0.018
6	3.90	0.001
7	4.40	0.287
8	3.60	0.070
9	3.40	0.216
10	3.80	0.004
11	4.10	0.056
12	3.60	0.070
13	3.50	0.133
14	3.90	0.001

Fuente: Elaboración propia

Se tomaran datos que son relevantes para la investigación como ser:

Promedio de la resistencia  $\bar{X}$  :

$$\bar{X} = \sum \frac{X_i}{n}$$

$$\bar{X} = 3.864$$

Valor máximo de los datos = 4.40

Valor mínimo de los datos = 3.40

Rango = Valor máximo - valor mínimo

$$\text{Rango} = 4.40 - 3.40$$

$$\text{Rango} = 1.00$$

$$\text{Número de intervalos} = 1 + 3.3 * \log n$$

$$\text{Número de intervalos} = 1 + 3.3 * \log 14$$

$$\text{Número de intervalos} = 4.782$$

$$\text{Número de intervalos} = 5$$

$$\text{Amplitud} = \text{Rango} / \text{Número de intervalos}$$

$$\text{Amplitud} = 1 / 5$$

$$\text{Amplitud} = 0.20$$

Para los intervalos de clase, se parte del valor mínimo al cual se sumara la amplitud.

*Tabla N° 4.23: Tabla de frecuencias acumuladas para el cloruro de calcio*

N°	Límite inferior	Límite superior	Frecuencia	Frecuencia relativa	Frecuencia acumulada
1	3.4	3.6	2	0.143	14.29
2	3.6	3.8	2	0.143	14.29
3	3.8	4	5	0.357	35.71
4	4	4.2	4	0.286	28.57
5	4.2	4.4	1	0.071	7.14
Sumatoria			15	1	100

*Fuente: Elaboración propia*

Especificación técnica:

Resistencia del C.B.R. = 6 %

Resistencia promedio = 3.684 %

$$3.684 < 6$$

#### 4.6.2 Estadística inferencial

Para el error de los datos se toma la desviación estándar

**Desviación Estándar:**

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n-1}}$$

$$S = \sqrt{\frac{0.992}{14-1}}$$

$$S = 0.276$$

**Varianza:**

$$S^2 = 0.0763$$

**Error medio de la medida:**

$$E\bar{x} = \frac{S}{\sqrt{n}}$$

$$E\bar{x} = \frac{0.350}{\sqrt{14}}$$

$$x = 0.0738$$

**Error probable:**

$$Ep = Z * E\bar{x}$$

Para un nivel de significancia del 95 %,  $Z = 1.96$

$$Ep = Z * E\bar{x}$$

$$Ep = 1.96 * 0.0738$$

$$Ep = 0.1447$$

### **Intervalo de confianza**

Valor aceptado =  $Va$

$$Va = \bar{X} \pm Ep$$

$$Va_{sup} = 3.864 + 0.1447$$

$$Va_{sup} = 4.009$$

$$Va_{inf} = 3.864 - 0.1447$$

$$Va_{inf} = 3.720$$

Intervalo de confianza: **[4.009; 3.720]**

### **4.6.3 Prueba de hipótesis**

Una prueba de hipótesis es una regla que especifica si se puede aceptar o rechazar una afirmación acerca de una población dependiendo de la evidencia proporcionada por una muestra de datos.

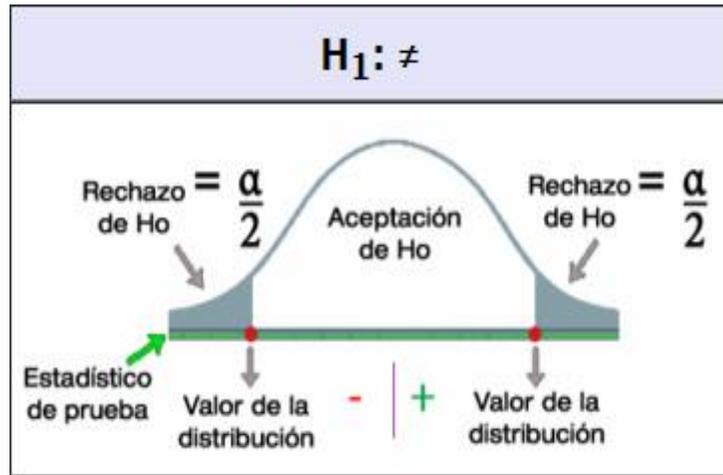
Una prueba de hipótesis examina dos hipótesis opuestas sobre una población: la hipótesis nula y la hipótesis alternativa. La hipótesis nula es el enunciado que se probará. Por lo general, la hipótesis nula es un enunciado de que "no hay efecto" o "no hay diferencia". La hipótesis alternativa es el enunciado que se desea poder concluir que es verdadero de acuerdo con la evidencia proporcionada por los datos de la muestra.

En las pruebas de hipótesis para la media poblacional,  $\mu$  denota el valor hipotético y para la prueba de hipótesis hay que escoger uno de los siguientes casos:

**Caso 1:**  $H_0: x = \mu$

$H_1: x \neq \mu$

Figura N° 4.1: Caso N° 1

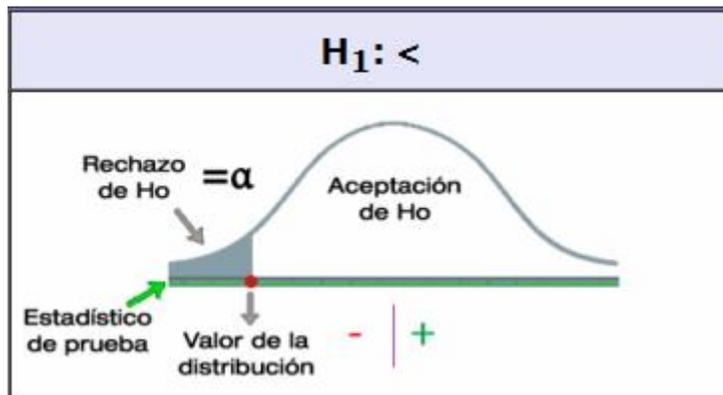


Fuente: [www.wikibooks.org](http://www.wikibooks.org)

**Caso 2:**  $H_0: x \geq \mu$

$H_1: x < \mu$

Figura N° 4.2: Caso N° 2

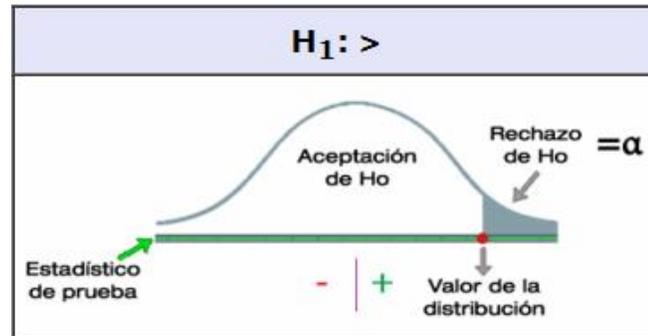


Fuente: [www.wikibooks.org](http://www.wikibooks.org)

**Caso 3:**  $H_0: x \leq \mu$

$H_1: x > \mu$

Figura N° 4.3: Caso N° 3



Fuente: [www.wikibooks.org](http://www.wikibooks.org)

Nivel de confianza NC = 95 %, nivel de significancia es de 0.05.

Para la prueba de T-Student se debe usar la siguiente fórmula:

$$t_c = \frac{\bar{X} - \mu}{\frac{S}{\sqrt{n}}}$$

Nosotros nos encontramos en el caso 3, ya que queremos saber si nuestra hipótesis planteada al principio del semestre será mayor o igual al valor de especificación.

$n = 14$

Promedio de la resistencia  $\bar{X}$  : 3.864

Desviación estándar:  $S = 0.276$

Media poblacional de especificación:  $\mu = 6 \%$

Al generar la hipótesis, se tiene:

$H_0: x \leq \mu$        $H_1: x > \mu$

Nivel de significancia = 0.05

Este caso presenta 1 cola, entonces  $\alpha = 0.05$

Para un 95% el valor de  $t=1.96$

$$tc = \frac{\bar{X} - \mu}{\frac{S}{\sqrt{n}}}$$

$$tc = \frac{3.864 - 6}{\frac{0.276}{\sqrt{14}}}$$

$$tc = -2.066$$

$$t = 1.96$$

Entonces, tenemos que:  $tc < t$

Para que este resultado sea aceptado,  $tc$  debería ser mayor que  $t$ , entonces la hipótesis alternativa se rechaza, y la hipótesis nula queda aceptada.

## CAPÍTULO V

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 5.1 CONCLUSIONES

Se concluye que:

- Al finalizar este trabajo de investigación, si se cumplieron con los objetivos planteados al principio del semestre, ya que después de realizar los ensayos de laboratorio se verifico que la hipótesis resultante fue nula, si bien el cloruro de calcio otorga buenos resultados en suelos graduados no ocurre lo mismo en suelos arcillosos, no cumpliendo con los requisitos de porcentajes de C.B.R. para trabajar como subrasante.
- El cloruro de calcio no es un aditivo que aporte cambios significativos en cuanto a resistencia en el suelo arcilloso, dado que la resistencia adquirida gracias al aditivo es inferior al mínimo requerido. Debido a que se trata de una sal, cuando la mezcla entra en contacto con el agua esta se disuelve, haciendo que las mejorías adquiridas por el suelo se pierdan.
- A pesar de que el cloruro de calcio no fue eficiente al momento de incrementar la resistencia del suelo, se observa que tuvo una influencia positiva en la plasticidad de los suelos, ya que al momento de clasificar el suelo se observo lo siguiente:  
Suelo N°1 con cloruro: CL A-6(12) se obtuvo como resultado un suelo OL A-6(9)  
Suelo N°1 con cal: CL A-6(12), se obtuvo como resultado un suelo a OL A-5(8).  
Suelo N°2 con cloruro: Se tiene un suelo inicial de CH A-7-6(18) que después de ser tratado con cloruro de calcio, se obtuvo un suelo ML A-4(8) donde se observa el cambio en este suelo, así mismo se redujo el índice de grupo de 18 a 8.  
Suelo N°2 con cal: Se tiene un suelo inicial CH A-7-6(18) que después de ser tratado con cal, se obtuvo un suelo ML A-5(9), en ambos casos se consigue una

reducción similar del índice de grupo, sin embargo, aún es un suelo de mala calidad para su uso.

- En cuanto a resistencia se observaron mejores resultados con el suelo A-6 ya que con el suelo A-7 no hubo mejorías de consideración, sin embargo la plasticidad se vio controlada en ambos tipos de suelo.
- Al trabajar con diferentes porcentajes del aditivo se observa que al 4 % se tiene un aumento de la resistencia en los suelos A-6 de un 2 % a 3.7% en cambio en el suelo A-7 el incremento de la resistencia fue de 2% al 2.16%, por lo que no son valores significativos para esta investigación.
- Al realizar la prueba de hipótesis, se comprobó lo que nos arrojaron los resultados de laboratorio, la hipótesis es nula, por lo tanto el cloruro de calcio no es un aditivo apto para la estabilización de suelos arcillosos.
- Se observa que existe un aumento de la densidad seca del suelo en combinación del cloruro de calcio:  
Para el suelo A-6 la densidad seca del suelo natural es de 1.74 gr/cm<sup>3</sup> con un 4 % de cloruro de calcio la densidad incremento hasta 1.98 gr/cm<sup>3</sup>., incluso con la adición de 1% del aditivo, se obtuvo una mejoría de la densidad seca.  
Para el suelo A-7 la densidad seca del suelo natural es de 1.61 gr/cm<sup>3</sup>, al agregar la dosificación optima de cloruro de calcio, se obtuvo una densidad de 1.73 gr/cm<sup>3</sup>.
- Los límites de Atterberg muestran que existe una reducción de la plasticidad en el suelo, conforme pasaron las semanas, se observó que el suelo era más trabajable para realizar los ensayos, en el suelo A-6 se inicio con un índice plástico de 20, con la adición de cloruro de calcio se tiene que este se redujo hasta obtener un índice de plasticidad de 12 y 11 con la adición de cal, con el

suelo A-7 se inicio con un índice de plasticidad de 28 que se logro reducir hasta un índice de plasticidad de 9 con cal y 8 con cloruro de calcio.

- Los límites de Atterberg obtuvieron un mejor resultado al trabajar con cal que con cloruro de calcio, ya que la reducción de índice plástico fue mayor con cal, además que en la primera semana de reacción de este suelo con cal, se obtuvo una mejor manejabilidad, lo que no ocurrió con el cloruro de calcio.
- Las densidades secas provenientes de la compactación, son mayores con cloruro de calcio que con cal, las densidades de las dosificaciones óptimas tienen una gran diferencia entre ambas:

*Tabla N° 4.24: Tabla de densidades*

<b>Tipo de suelo</b>	<b>Densidad de suelo natural</b>	<b>Densidad máxima con cal</b>	<b>Densidad máxima con cloruro de calcio</b>
A-6	1.74 gr/cm <sup>3</sup>	1.82 gr/cm <sup>3</sup>	1.98 gr/cm <sup>3</sup>
A-7	1.61 gr/cm <sup>3</sup>	1.69 gr/cm <sup>3</sup>	1.73 gr/cm <sup>3</sup>

*Fuente: Elaboración propia*

Sin embargo, con ambos se obtuvieron mejoras de la densidad máxima del suelo.

- Al realizar las comparaciones entre los métodos empleados en este trabajo de investigación y otros ya usados se concluye:

-Al comparar el cloruro de calcio con la cal, se observa que no ofrece mejores resultados ya que la resistencia es inferior que la obtenida con cal, sin embargo cabe recalcar que la densidad adquirida es mucho mayor con cloruro de calcio que con cal, en cuanto a la plasticidad ambos aditivos aportan cambios que controlan el mismo.

-Al comparar el cloruro de calcio con vinaza de caña de azúcar, se puede observar que la vinaza ofrece más beneficios en cuanto a plasticidad y

resistencia, sin embargo en suelos limo arcillosos, se observa que se necesita una mayor cantidad de vinaza, que con un suelo con poca presencia de limo. A su vez, se observa que el cloruro obtiene mejores resultados con suelos de baja plasticidad que en suelos de alta plasticidad.

-En cuanto a la ceniza de cascarilla de arroz en combinación con la cal, se observa que ofrece cambios positivos en los suelos A-7-6 controlando por completo su plasticidad, y haciendo al suelo apto para su uso como subrasante, ya que subió el valor del C.B.R. de 1.6 a 33.40 con un porcentaje mínimo del 3% de ceniza.

-En esta comparación se observa que el cloruro de calcio ofrece mejores resultados que con la ceniza volcánica, se tiene que este método, que si bien es favorable para el control de la plasticidad del suelo no ofrece mejores resultados en cuanto a densidad y resistencia como lo hace el cloruro de calcio, también se observa que se necesita mayor porcentaje de ceniza para conseguir esta mejoría, en cambio con cloruro el porcentaje óptima es menor.

Tabla N° 4.25: Tabla de resultados

<b>SUELOS ESTABILIZADOS</b>						
<b>Estabilizante</b>	<b>%</b>	<b>Tipo de suelo</b>	<b>L.L</b>	<b>I.P.</b>	<b>DEN. MAX</b>	<b>C.B.R. 95 %</b>
<b>Cloruro de calcio</b>	4%	CL A-6	27	12	1.98	3.7
	4%	CH A-7-5	40	10	1.73	2.16
<b>Cal</b>	5%	CL A-6	34	11	1.82	7.65
	5%	CH A-7-5	45	6	1.69	6.25
<b>Rap - cemento</b>	5%	CL A-6(13)	--	--	1.81	20.81
<b>Rocamix - cemento</b>	0.016%	CH A-7-6	46.36	9.91	1.84	9.04
<b>Vinaza de caña de azúcar</b>	25%	CL A-6	29.35	13.75	2.09	7.6
<b>Ceniza de cascarilla de arroz</b>	3%	A-7-6	NP	NP	1.84	33.40
<b>Ceniza volcánica</b>	15%	CL A-6	40.11	1.52	1.91	1.36

Fuente: Elaboración propia

## 5.2 RECOMENDACIONES

Se recomienda:

- Aprender sobre el funcionamiento de la prensa de C.B.R. para evitar lecturas incorrectas por fallas del equipo.
- Realizar investigaciones futuras con cloruro de calcio en otros tipos de suelo, ya que en la teoría dice que se obtiene mejores resultados en suelos bien graduados.
- Realizar los ensayos con cloruro de calcio con un tiempo de curado, ya que al realizar el ensayo de C.B.R. sin tiempo de curado no se obtuvieron buenos resultados.
- Planificar el tiempo destinado a diferentes actividades para realizar el trabajo de manera eficiente, ya que para la realización de los C.B.R. se debe dejar reaccionar el suelo con la cal por un lapso de 3 días. A su vez se debe dejar curando el molde de C.B.R. cuando se trabaja con cloruro de calcio para realizar el ensayo.
- Realizar un muestreo mayor a fin de tener una caracterización más exacta del suelo en estudio.
- Tratar de evitar el uso de suelos con alta presencia de limos que pueden afectar los resultados de los ensayos.
- Tener cuidado al momento de manipular el cloruro de calcio, ya que al entrar en contacto con el produce una reacción química que produce calor, que si bien no es peligrosa pueda causar irritación en la piel.