



**UNIVERSIDAD CÉSAR VALLEJO**

FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA  
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL

**Estudio Comparativo de la Estabilización de Suelos Arcillosos  
Utilizando Aditivos Químicos, Huancaspata, 2022**

TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE:  
Ingeniero Civil

**AUTORES:**

Navarro Palacios, Karelly Jakary ([orcid.org/0000-0001-8296-1347](https://orcid.org/0000-0001-8296-1347))  
Ramirez Gutierrez, Jamcarlo Rafael ([orcid.org/0000-0002-1826-1896](https://orcid.org/0000-0002-1826-1896))

**ASESOR:**

Mgtr. Segura Terrones, Luis Alberto ([orcid.org/0000-0002-9320-0540](https://orcid.org/0000-0002-9320-0540))

**LÍNEA DE INVESTIGACIÓN:**

Diseño de Infraestructura Vial

**LÍNEA DE RESPONSABILIDAD SOCIAL UNIVERSITARIA:**

Desarrollo sostenible y adaptación al cambio climático

LIMA – PERÚ

2022

## DEDICATORIA

*Dedico principalmente a mis queridos padres, hermanas, esposa e hijos, por su apoyo y porque me incentivan y alientan a seguir avanzando en mi carrera profesional y porque mi familia es lo más importante en mi vida.*

## **AGRADECIMIENTO**

A Dios por habernos permitido llegar hasta esta etapa muy importante de nuestras vidas. A nuestro asesor Mgtr. Luis Alberto, Segura Terrones, quien más que nuestro asesor fue nuestro amigo y guía, muchas gracias por su asesoramiento, por el conocimiento transmitido, su comprensión y apoyo para culminar la presente tesis.

## INDICE

DEDICATORIA.....	ii
AGRADECIMIENTO.....	iii
INDICE .....	iv
ÍNDICE DE TABLAS .....	vi
ÍNDICE DE FIGURAS .....	vii
Resumen.....	viii
Abstract.....	ix
I. INTRODUCCIÓN .....	1
II. MARCO TEÓRICO.....	4
III. METODOLOGÍA.....	25
3.1. Tipo y diseño de la investigación .....	25
3.2. Variables y operacionalización .....	26
3.3. Población, muestra y muestreo .....	26
3.4. Técnicas e instrumentos de recolección de datos .....	26
3.5. Procedimiento.....	27
3.6. Métodos de análisis de datos .....	28
3.7. Aspectos éticos.....	28
IV. RESULTADOS.....	29
4.1. Ensayos de granulometria y consistencia del suelo natural.....	29
4.2. Resultado de los ensayos con 5% de cloruro de calcio liquido.....	33
4.3. Resultado de los ensayos con 5% de asfalto liquido RC-250.....	37
4.4. Análisis de resultados .....	42
V. DISCUSIÓN .....	47
VI. CONCLUSIONES .....	48
VII. RECOMENDACIONES.....	49
REFERENCIAS.....	50

ANEXOS ..... 54

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Clasificación del suelo de acuerdo al CBR.....	8
Tabla 2. Clasificación de Proctor.....	15
Tabla 3. Materiales A, B, C.....	16
Tabla 4. Materiales A, C.....	17
Tabla 5. Análisis mecánico por tamizado.....	29
Tabla 6. Resultados de los ensayos límite líquido y límite plástico.....	30
Tabla 7. Índice de plasticidad.....	31
Tabla 8. Resultado de ensayos muestra suelo natural.....	33
Tabla 9. Resultados de los ensayos límite líquido y límite plástico con 5% de cloruro de calcio.....	33
Tabla 10. Resultado de ensayos.....	34
Tabla 11. Resultado de ensayos muestra con 5% cloruro de calcio.....	37
Tabla 12. Resultados de los ensayos límite líquido y límite plástico con 5% de RC-250.....	37
Tabla 13. Resultado de ensayos.....	38
Tabla 14. Resultado de ensayos muestra con 5% cloruro de calcio.....	41
Tabla 15. Resumen límites de Atterberg.....	42
Tabla 16. PROCTOR Y CBR.....	44

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Curva de compactación.....	7
Figura 2. Propiedades de la arcilla .....	10
Figura 3. Gráfico de granulometría.....	29
Figura 4. Gráfico de fluidez .....	30
Figura 5. Curva de compactación Proctor modificado.....	31
Figura 6. CBR vs Densidad Seca ( $\text{g/cm}^3$ ) .....	32
Figura 7. Gráfico de fluidez .....	34
Figura 8. Curva de compactación Proctor modificado.....	35
Figura 9. CBR vs Densidad Seca ( $\text{g/cm}^3$ ) .....	36
Figura 10. Gráfico de fluidez .....	38
Figura 11. Curva de compactación Proctor modificado.....	39
Figura 12. CBR vs Densidad Seca ( $\text{g/cm}^3$ ).....	40
Figura 13. Comportamiento del límite líquido frente a adición de aditivos químicos .....	42
Figura 14. Comportamiento del límite plástico frente a adición de aditivos químicos.....	43
Figura 15. Comportamiento del índice de plasticidad frente a adición de aditivos químicos.....	43
Figura 16. Comportamiento del $D_{\text{max}}$ frente a adición de aditivos químicos ..	44
Figura 17. Comportamiento del contenido de humedad óptima frente a adición de aditivos químicos.....	45
Figura 18. Comportamiento del CBR al 95% frente a adición de aditivos químicos .....	45
Figura 19. Comportamiento del CBR al 100% frente a adición de aditivos químicos.....	46

## Resumen

El presente trabajo de investigación está enfocado en estudiar el procedimiento de estabilización de suelos arcillosos con dos aditivos químicos, el cloruro de calcio líquido y el asfalto líquido RC+250 con el objetivo de determinar el óptimo contenido del estabilizante que asegure un aumento significativo en la capacidad de soporte de la subrasante. La zona de estudio y de donde se extrajeron las muestras es la localidad de Huancaspata, progresiva 3+000 km de la carretera. Ambos aditivos como agentes estabilizantes tienen propiedades de absorción de agua y mejora la resistencia de suelos arcillosos mediante el encapsulamiento de partículas de arcilla. Es decir, al interactuar con las partículas de arcilla se produce un efecto de floculación, creando una doble capa difusa que reduce el potencial de hinchamiento y expansión de los suelos finos y aumentando la resistencia a la penetración. Se realizaron ensayos de granulometría, límites de consistencia, gravedad específica, Proctor modificado y el ensayo de CBR para muestras del suelo en estado natural y con porcentajes de 5 % de ambos aditivos químicos. También, se realizó la clasificación de suelos mediante el método AASHTO Y SUCS para complementar los cálculos necesarios.

El porcentaje óptimo según las fichas técnicas de los aditivos es 5%, con esto se logra incrementar el valor del CBR del suelo de 5% a 9% con el cloruro de calcio líquido y 15% con el asfalto líquido RC-250.

Palabras clave: estabilización; cloruro de calcio; asfalto líquido; arcilla.



## **Abstract**

The present research work is focused on studying the clay soil stabilization procedure with two chemical additives, liquid calcium chloride and RC+250 liquid asphalt, with the aim of determining the optimal content of the stabilizer that ensures a significant increase in the bearing capacity of the subgrade. The study area and where the samples were taken from is the town of Huancaspata, progressive 3+000 km from the highway.

Both additives as stabilizing agents have water absorption properties and improve the resistance of clay soils by encapsulating clay particles. That is, when interacting with the clay particles, a flocculation effect is produced, creating a diffuse double layer that reduces the swelling and expansion potential of fine soils and increases resistance to penetration. Granulometry tests, consistency limits, specific gravity, modified Proctor and the CBR test were carried out for soil samples in their natural state and with percentages of 5 % of both chemical additives. Also, the soil classification was carried out using the AASHTO and SUCS method to complement the necessary calculations.

The optimal percentage according to the technical specifications of the additives is 5%, with this it is possible to increase the CBR value of the soil from 5% to 9% with liquid calcium chloride and 15% with liquid asphalt RC-250.

Keywords: stabilization; calcium chloride; liquid asphalt; clay.

## I. INTRODUCCIÓN

El conocimiento de las características propias del suelo es importante desde el momento en que inicia un proyecto de construcción, pues esto tiene influencia tanto en la estabilidad de la estructura a construir, como en la seguridad de los trabajadores (Mapfre, 2017). En el caso de los suelos arcillosos, estos tienen la capacidad de hincharse ante la presencia de humedad y de contraerse en ausencia de la misma, es por este motivo que se presentan inconvenientes al momento de construir las cimentaciones de una estructura en este tipo de suelos, ya que, al ocurrir la expansión o contracción, se modifica la estructura de soporte, lo que puede causar el desequilibrio de la edificación (Castillo, 2019).

En la actualidad, el problema de los suelos arcillosos se ha convertido en algo muy notorio a nivel mundial, debido a sus extensiones y a los impactos económicos de los deterioros que perjudican la estética y la funcionalidad de las estructuras, representando pérdidas que, en algunos casos pueden llegar a conseguir los millones de dólares (Palomino & Ravines , 2016).

En el Perú existen muchos suelos que, en su estado natural, no son aptos para la construcción, porque su granulometría, ductilidad o capacidades portantes no reúnen las óptimas condiciones para su aprovechamiento. Por lo tanto, estos materiales son rechazados por no poseer las propiedades apropiadas para tal fin (Llamoga, 2017). Asimismo, en el país se ha identificado la presencia de arcilla expansiva, donde la modificación de volumen provoca serios problemas en las estructuras (Palomino & Ravines , 2016). El primer registro de extensas problemáticas de los suelos se dio durante la construcción del canal de Quiroz en Piura, mientras que, en cuanto a las construcciones, se tiene las documentaciones de daños en Paita, Talara, San Lorenzo, Chiclayo, y la presencia de arcilla expansiva en Bayóvar y Tumbes (Rojas & Alva, 2016)

En respuesta a esta realidad, diversas técnicas de estabilización son empleadas para lograr la modificación de las condiciones naturales del terreno y así poder adecuarlos a las exigencias de diferentes proyectos a ejecutar,

resultando de especial interés aquellas que tienen como objetivo aumentar la capacidad portante del suelo y su rigidez (Mapfre, 2017). Dichas modificaciones se logran mediante la adición de materiales, generalmente en estado granular, cuya interacción con las partículas del suelo, modifica su comportamiento mecánico. Sin embargo, la selección de estos materiales obedece a distintos criterios, donde principalmente se puede mencionar la disponibilidad en el lugar de la obra y la relación costo-beneficio en el empleo de los mismos. De allí que diversas investigaciones han incursionado en la búsqueda de nuevos y mejores aditivos para la estabilización de suelos de limitada capacidad estructural (Llamoga, 2017).

Según lo anteriormente expuesto, se hace necesario el desarrollo de la presente investigación, ya que con ella se busca generar nuevas herramientas para la estabilización de suelos arcillosos, que permita dotar al suelo de un mejor comportamiento y, de esta manera, evitar pérdidas, tanto estructurales como económicas. Por lo cual se planteó el siguiente problema general: ¿Cuál es el análisis comparativo de la estabilización de suelos arcillosos utilizando aditivos químicos, en Huancaspata, 2022?. En vista de esto, se generaron los siguientes problemas específicos: 1) ¿Cuáles son las características físicas y mecánicas del suelo, en Huancaspata, 2022? 2) ¿Cuál es el efecto de la adición de los aditivos químicos sobre la Máxima Densidad Seca y el CBR del suelo, en Huancaspata, 2022? 3) ¿Cuál es el aditivo óptimo, y cuál es el porcentaje óptimo de aplicación como estabilizante de suelos arcillosos en Huancaspata, 2022?

Con respecto, el actual estudio se justifica desde una perspectiva practica pues se considera que está orientada a la obtención de resultados aplicables en campo para la resolución de la realidad problemática, descartando entonces la formación de teorías. Del mismo modo, se comprueba desde la perspectiva metodológica, debido que, al corroborar el aumento de las capacidades portantes de las arcillas debido a una combinación de los agentes químicos mencionados, permitirá tener otra estrategia de solución para mejorar la resistencia de dichos suelos. Asimismo, la investigación posee justificación teórica, ya que el estudio de esta nueva metodología ayudará como base para otras indagaciones pertinentes y enriquecerá el conocimiento de la mecánica de suelos.

Por ello, este estudio pretende dar respuesta a la pregunta planteada, donde propone como objetivo principal: Realizar un análisis comparativo de la estabilización de suelos arcillosos utilizando aditivos químicos, en Huancaspata, 2022. Los resultados se logran mediante los siguientes objetivos específicos: a) Determinar las características físicas y mecánicas del suelo, en Huancaspata, 2022, b) Evaluar el efecto de la adición de los aditivos químicos sobre la Máxima Densidad Seca y el CBR del suelo, en Huancaspata, 2022, c) Determinar el aditivo óptimo, y el porcentaje óptimo de aplicación como estabilizante de suelos arcillosos en Huancaspata, 2022.

De esta manera, se plantea como hipótesis general: Existe un efecto positivo en la estabilización de suelos arcillosos cuando se utiliza el aditivo Cloruro de Calcio Líquido, mejorando las propiedades de Máxima Densidad Seca y CBR. Asimismo, se proponen las siguientes hipótesis específicas: a) Las características físicas y mecánicas del suelo natural no son adecuadas para su uso como fundación; b) La adición de aditivos químicos mejora de forma notable las propiedades de Máxima Densidad Seca y CBR del suelo en Huancaspata, 2022; c) El cloruro de calcio líquido resulta óptimo a un porcentaje de 5% para su aplicación como estabilizante de suelos arcillosos en Huancaspata, 2022.

## II. MARCO TEÓRICO

A nivel internacional, Bualuang et al (2021) investigaron la efectividad de realizar una estabilización de suelos para bases de pavimentos flexibles utilizando una combinación de materiales puzolánicos con emulsiones asfálticas, midiendo el efecto causado en la densidad, capacidad de soporte y durabilidad. Para proceder con el estudio, la muestra de suelo analizada fue mezclada con 10% del peso seco con la emulsión asfáltica. El efecto en el deterioro de la muestra fue analizada empleando la norma ASTM D559, induciendo ciclos de humedecimiento y secado de la muestra, y la capacidad portante fue medida con el ensayo de CBR. Encontraron como resultado que la mezcla ensayada se comportó significativamente mejor frente a los ciclos de humedad y secado, atribuido a la permeabilidad reducida al haber incluido la emulsión asfáltica, mientras que el aumento de la capacidad portante fue poco significativo, pero pudo alcanzar los valores mínimos según los estándares de construcción para bases de pavimento asfáltico ( $\text{CBR} > 6\%$ ).

Sharo et al., (2018) estudiaron la factibilidad de utilizar cloruro de calcio como agente estabilizador de suelos con arcillas expansivas, teniendo como muestra una porción de suelo arcilloso a la que se le aplicó una solución de cloruro de calcio en proporción 3:1 dándoles 28 días de curado, y sobre la que se ejecutaron ensayos de límites de consistencia, ensayo Proctor, resistencias a las compresiones no confinadas de los suelos y CBR. Como resultado obtuvo que, tras los 28 días, las muestras presentaron una disminución del 80% en el potencial de expansión, un aumento en las resistencias a compresiones no confinadas, un incremento en el peso unitario en estado seco, y un incremento en los ensayos de CBR de 2.11% a 8.32%, por lo que se concluyó que el cloruro de calcio es un tratamiento efectivo para controlar los suelos de arcillas expansivas.

Duclos, et al. (2017) analizaron las propiedades higroscópicas del cloruro de calcio que permiten la atracción de la humedad y la subsiguiente resistencia a la evaporación, mejorando la compactación durante la construcción. Para esto se aplica un 35% de cloruro de calcio para perfeccionar los rendimientos de las bases de una carretera, realizando pruebas de deflectómetro de caída de peso (FWD), antes y después de la estabilización de la base. Como resultado se

obtuvo un contenido de humedad in situ muy bajo, de 3% a 4%, mientras que los resultados de compactación correspondientes oscilan entre 96% a 99%. En conclusión, el análisis no reveló ningún beneficio para el control humedad, ya que no resulta un contenido de humedad uniforme, lo que otorga variabilidad en el nivel de compactación, esto a su vez tuvo un efecto perjudicial sobre el control de la densidad, tampoco se pudo observar ningún beneficio en el proceso de estabilización.

Zumrawi y Eltayeb (2017) evaluaron las influencias del cloruro de calcio como agente estabilizador sobre las propiedades de un suelo expansivo. Para esto se ejecutaron una serie de ensayos que incluyen los límites de consistencia y pruebas de compactación y resistencia al corte con la adición del aditivo en los porcentajes 0%, 2%, 5%, 10% y 15%. Los resultados alcanzados mostraron que cuando se incrementó el porcentaje de aditivos se registró el índice de plasticidad, lo que a su vez aumenta la Máxima Densidad Seca. La resistencia a la compresión no confinada del suelo estabilizado con 5% de cloruro de calcio aumentó aproximadamente en un 50% en comparación con el suelo natural. Los investigadores concluyeron que el uso del cloruro de calcio como aditivo para suelos expansivos muestra una influencia prometedora en la fuerza y las propiedades de hinchamiento del mismo.

En el ámbito nacional, Gamero (2019), desarrolló un estudio para determinar la capacidad portante de arcilla mejorada al agregar asfalto líquido RC-250 en porcentajes del 2%, 4% y 6% con el propósito de mejorar su comportamiento deformable frente a la presencia de agua y humedad. Fue de tipo aplicada su metodología con un diseño experimental. Para alcanzar los objetivos de la investigación se extrajo una calicata del suelo con el fin de obtener las características de la subrasante y el perfil estratigráfico del suelo. Para la conducción de los ensayos se usaron 12 especímenes en total, 3 por cada porcentaje de aditivo y 3 especímenes como muestra patrón. La cantidad de aditivo a incorporar se calculó en función del peso seco de la muestra. Posteriormente se ejecutaron pruebas de Proctor modificado y CBR. Como resultado obtuvo que la capacidad portante del suelo natural presentaba un valor de CBR de 5.8%, lo cual se considera pobre según los lineamientos del MTC. Por su parte, al adicionar el líquido asfáltico RC-250 se obtuvo un aumento de hasta 200% en la capacidad portante para el 6% de aditivo. Concluye que tal

mejora se debe principalmente al aumento de la densidad producida por el aditivo, además de que el material asfáltico disminuye la permeabilidad de la arcilla.

Por su parte, Rojas (2018), analizó en qué medida la adición de una emulsión asfáltica mejora las características de una subrasante arcillosa de una carretera de tierra afirmada. La investigación procedió con un diseño experimental, de tipo aplicada y nivel descriptivo, procediendo a medir los cambios introducidos en la muestra patrón en la densidad máxima de los suelos, los contenidos óptimos de humedad, la capacidad portante (CBR) y la resistencia a la abrasión al adicionar distintos porcentajes de emulsión asfáltica (2%, 4% y 6%). Como resultado encontró que a medida de que se incrementaba el porcentaje de emulsión asfáltica, incrementaba también el valor del CBR obtenido, con un aumento de 4.10% natural a 7.20% para un 6% de aditivo, mientras que la densidad del suelo pasó de 1.67 g/cm<sup>3</sup> a 1.8 g/cm<sup>3</sup>. Al realizar los cálculos estructurales del espesor de la vía en estudio, encontró una reducción significativa de esta, pasando de 35 cm a 28 cm de espesor requerido.

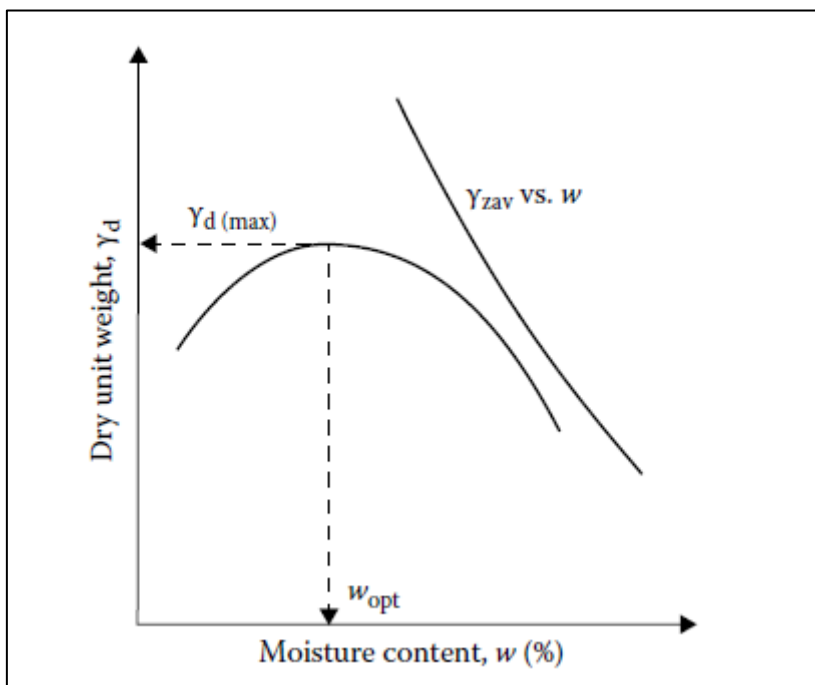
Por su parte, Ponce (2018), estudió los efectos del cloruro de calcio en los suelos bajo la capa de arcilla, calculando el cambio en los valores de soporte (CBR). El estudio es de tipo aplicado, con un grado explicativo y un diseño experimental. Para lograr los objetivos se extrajeron tres muestras de diferentes suelos, arcilloso, granular y orgánico. Los resultados evidenciaron que, para la arcilla, la adición de cloruro de calcio al 5% aumentó la capacidad de carga (CBR) de un 11,80% a 16,50%; en suelos granulares el aumento en las capacidades de cargas de la muestra varió de 22,89% a 43,01%; y, finalmente, el suelo orgánico la capacidad de carga disminuyó de 6,12% a un 6,11%. En conclusión, la aplicación de cloruro de calcio no afectó significativamente en los suelos arcillosos, sin embargo, mostró un excelente comportamiento en suelos granulares, donde se duplicó la capacidad de carga.

Desde el enfoque teórico, los suelos arcillosos son aquellos en los que existen un alto contenido de arcilla, es decir, está compuesto por partículas minerales muy pequeñas, con un diámetro menor a 0,001 mm. Este tipo de suelos pueden contener también parte de limo y arena en distintas proporciones (Gago, 2017). Este tipo de suelos no deben emplearse como apoyo para una cimentación, bien sea para una edificación o un pavimento, ya que estos poseen

características indeseables, como un índice plástico excesivamente alto, lo que indica un elevado potencial de contracción o expansión, es decir, que puede modificar su volumen al absorber o dejar de absorber agua, provocando inestabilidad en el asentamiento de la obra, que deriva en la aparición de grietas. El suelo arcilloso también se caracteriza por tener una baja capacidad de soporte de carga estructural (Fatahi, et al., 2012).

La Máxima Densidad Seca es la densidad más alta que el suelo puede alcanzar cuando se compacta al contenido óptimo de humedad. Esta densidad se determinada por medio del ensayo Proctor, ya sea por el Proctor Standard o el Proctor Modificado. El ensayo consta en compactar muestras de suelos dentro de un cilindro de volumen conocido, y variar los contenidos de humedad hasta conseguir una curva que vincule la densidad máxima de humedad y la densidad seca con una compactación específica (Shaivan & Sridharan, 2020). En la figura 1 muestra la curva densidad seca – humedad, donde establece las condiciones óptimas de compactación.

**Figura 1. Curva de compactación**



Fuente: tomado de *Advanced Soil Mechanics*. Das (2019).

La capacidad portante de los suelos es la capacidad que presenta los terrenos para tolerar las cargas que se aplican sobre él, es decir, es la presión máxima



que puede ejercer la cimentación sobre el terreno sin que esto llegue a producir una falla por cortante o un asentamiento diferencial excesivo (Kumar, 2014). Para establecer la capacidad portante del suelo se determina el denominado índice de CBR mediante un ensayo que consiste en determinar la carga aplicada a través de un pistón circular de 19,35 cm<sup>2</sup> sobre muestras de suelos a una velocidad de 1,27 mm/min hasta conseguir una penetración de 2,54 mm (Yato, y otros, 2018). La clasificación del suelo según el índice de CBR se puede observar en la tabla 1.

**Tabla 1. Clasificación del suelo de acuerdo al CBR**

<b>C.B.R.</b>	<b>Clasificación</b>
0 – 5	Subrasante muy mala
5 – 10	Subrasante mala
10 – 20	Subrasante regular a buena
20 – 30	Subrasante muy buena
30 – 50	Subbase buena
50 – 80	Base buena
80 - 100	Base muy buena

Fuente: Correlación entre el CBR, DCP, propiedades Índice y mecánicas en suelos del cantón Píllaro; Parroquia Marcos Espinel; de la provincia de Tungurahua. (Manzano, 2021).

Los límites de Atterberg se definen como método para diferenciar la consistencia de suelos de grano fino en función de los contenidos de humedad, llamando a estos Limite Líquido, Limite Plástico y Limite de Retracción, donde cada uno de estos define el punto en que los suelos cambian de un estado líquido a plástico o sólido. En función de ello, es posible determinar los índices de plasticidad como las diferencias entre el límite líquido y el límite plástico (Das, 2019).

La estabilización de un suelo es un procedimiento químico o físico que permite mejorar las condiciones mecánicas de los suelos. La estabilización química se realiza mediante la incorporación de sustancias químicas especiales que estabilizan los suelos de tipo arcilloso, produciendo los efectos deseados por acción inmediata (Akbar , et al., 2017). Existe una gran variedad de estabilizadores químicos, entre los que se pueden mencionar los subproductos del petróleo, productos enzimáticos, las sales y polímeros (Fondjo, et al., 2021). Es importante destacar que la selección del tipo y porcentaje de aditivo depende

de forma directa del tipo o clasificación del suelo y, además, de la expectativa de mejoramiento requerida. En términos generales, los criterios que definen si se debe usar o no un aditivo químico están basados en los límites de Atterberg, la densidad en estado seco y el valor del California Bearing Ratio (CBR) (Puppala & Pedarla, 2017).

Por su parte, el  $\text{CaCl}_2$  (cloruro de calcio) es una sal inorgánica obconseguida como subproducto del procedimiento Solvay para la fabricación de carbonato de sodio. Esta sal presenta menor toxicidad y no es corrosiva, además, tiene un punto de congelación muy bajo, lo que le permite permanecer en estado líquido (Shi, 2001). En tanto que en el ámbito de la construcción, el cloruro de calcio tiene diversas aplicaciones, entre las que destaca el uso en caminos no pavimentados como aditivo que permite controlar el polvo, debido a la capacidad de absorber agua del medio ambiente, las pistas aún retienen una cierta cantidad de humedad (Alfionita & Zainul, 2019).

Entre tanto, el líquido asfáltico RC-250, también conocido como asfalto líquido de curado rápido o asfalto fluidificado, es un producto de uso común en la preparación de mezclas asfálticas para pavimentación y como materia prima en el riego de imprimación y de adherencia. Se produce con la mezcla de un asfalto de penetración con un destilado de petróleo volátil en estado líquido, de donde su nombre es tomado como indicador de la viscosidad cinemática permisible (REPSOL, 2016).

Sobre su aplicación en suelos, Gamero (2019) indica que se debe principalmente a dos principios básicos:

Un aumento en la estabilidad debido a su comportamiento como aglomerante de las partículas del suelo

Como impermeabilizante, reduciendo la susceptibilidad a los cambios de humedad

## Arcilla

**Figura 2. Propiedades de la arcilla**

Arcilla	
	
Arcilla del <a href="#">período Cuaternario</a> (400 000 años), <a href="#">Estonia</a> .	
General	
Categoría	<a href="#">Mineral</a>
<a href="#">Clase</a>	<a href="#">Filosilicatos</a>
<a href="#">Fórmula química</a>	<a href="#">Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> · 2SiO<sub>2</sub> · 2H<sub>2</sub>O</a>
Propiedades físicas	
<a href="#">Color</a>	Blanco, rojo, café.
<a href="#">Transparencia</a>	Opaco
<a href="#">[editar datos en Wikidata]</a>	

Las arcillas son rocas sedimentarias descompuestas integradas por agregados de silicato de aluminio hidratado, como producto de las descomposiciones de rocas que poseen feldespato, como el granito. Tiene diferentes colores dependiendo de las impurezas que contenga, desde naranja y rojo hasta blanco

cuando está puro. Realmente, se estima un coloide, que posee partículas microscópicas y una superficie lisa. Partículas de arcilla de menos de 0,002 mm de diámetro. En la sección de la textura arcillosa, presentando partículas no metálicas, piedras vegetales. Químicamente, es un silicato de alúmina hidratado, con la fórmula:  $Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O$ . Se distingue por su plasticidad cuando se mezcla con agua, así como por su ductilidad y dureza cuando se calienta a más de 800 ° C. La primera cerámica realizada por el individuo es la arcilla cocida y hasta la actualidad se le considera uno de los materiales más usados y económicos. Objetos de arte, utensilios de cocina, azulejos, hasta instrumentos de música como la ocarina son hechos de arcilla. Además, se emplea en diversos procedimientos industriales, como los procesos químicos, la producción de cemento y la fabricación de papel (Joyce, 1997)

La arcilla se puede clasificar según varios factores. Por tanto, según el procedimiento geológico que lo produjo y la localización de los sedimentos en los que se encontró, se pueden clasificar de la siguiente manera:

**Arcilla primaria:** Esta categoría se utiliza cuando se deposita tal como está en el mismo sitio de donde vino. La única arcilla básica reconocida es el caolín.

**Arcilla Secundaria:** Arcilla que ha sido desplazada luego de sus formaciones por fuerzas químicas o físicas. Estos incluyen caolín secundario, pedernal, arcilla plástica, arcilla superficial y arenisca. (González, 1983).

Si consideramos la estructura de sus componentes, entonces distinguimos la arcilla fiteniana y la arcilla fibrosa.

Las arcillas también se pueden distinguir por su plasticidad. Por lo tanto, hay arcillas plásticas (como el caolín) y no plásticas (como las esmécticas, absorbentes de grasa).

Por último, también están las arcillas calcáreas, las arcillas (arcillas, cantos rodados y cantos rodados), las arcillas sinterizadas y las argelitas (lutitas).

Los minerales de la arcilla consisten en láminas tetraédricas con una fórmula química común de  $Si_2O_5$ , cada tetraedro ( $SiO_4$ ) está enlazado en sus esquinas por otros tres, integrado por redes hexagonales. El hierro y el aluminio pueden reemplazar gradualmente al silicio en las estructuras entretanto que 1. El átomo de oxígeno se ubica en los vértices del tetraedro de estas placas y al mismo tiempo se puede componer parte de otra placa paralela formada por el octaedro.

Estos octaedros están ordenados por los cationes Al, Mg, Fe<sup>3+</sup> y Fe<sup>2+</sup>. Los átomos de Li, V, Cr, Mn, Ni, Cu o Zn rara vez ocupan los sitios de coordinación anteriores.

Los minerales arcillosos son silicatos de aluminio hidratados que a veces contienen cantidades variables de magnesio, hierro, minerales alcalinotérreos y otros cationes. Los minerales arcillosos suelen tener un tamaño microscópico. Surgen de la meteorización hidrotermal o meteorización del feldespato, piroxeno y mica. Algunas resinas y partículas de 2 micrómetros o menos de tamaño, también conocidas como arcillas, son únicas o comunes de todos los minerales arcillosos.

La arcilla es maleable, cuando se hidrata se puede moldear fácilmente. A medida que se seca, se solidifica, y al exponerse a temperaturas altas, se producen reacciones químicas que, entre otras modificaciones, hacen que las arcillas se conviertan en un sólido permanente, conocido como cerámica. Debido a estas propiedades, la arcilla se utiliza en alfarería, para empleo diario o para decoración. Distintas clases de arcilla, cuando se combinan con minerales y condiciones diferentes, se utilizan en la fabricación de gres y loza. De acuerdo a los contenidos minerales de los suelos, la arcilla presenta variedades de colores, desde gris claro hasta rojo anaranjado intenso. Un horno específicamente diseñado para cocer las arcillas se le denomina hornos de alfareros. La humanidad halló las beneficiosas características de la arcilla en la época prehistórica, incluso los jarrones más antiguos que se hallaron estaban hechos de arcilla. También se ha utilizado, desde tiempos prehistóricos, para construir edificios de arcilla, tierra vertida y más tarde ladrillo, un elemento de construcción que todavía se usa y se usa más comúnmente para construir muros en el mundo moderno. La arcilla también se utilizó como medio de escritura en la antigüedad. La escritura cuneiforme fue tallada en tablillas de arcillas, elaboradas gracias a los Sumerios en los años antes de Cristo. (Barranzuela, 2014)

La terracota, la cerámica, es una de las maneras más económicas de elaborar artículos cotidianos y una de las materias primas más utilizadas, incluso hoy en día. Con arcilla se moldeaban ladrillos, paneles, objetos de arte, vasijas, instrumentos musicales e inclusive ataúdes, como las ocarinas. La arcilla se emplea en diversos procedimientos industriales, como la fabricación de

cementos, la fabricación de papeles y la recolección de filtros.

Los arqueólogos usan las propiedades magnéticas de la arcilla quemada que se encuentra en las bases de estufas, hornos y más. Para datar objetos de barro tienen la misma tendencia y contrastarlos con diversos periodos históricos.

### **Estabilización de suelos**

Consiste en perfeccionar las características de los suelos, ya sea a través de la adición de un producto químico, o mediante la aplicación de un tratamiento físico, y también se define como la corrección de deficiencias para dotar al suelo de una mayor resistencia o la reducción de la ductilidad del suelo.

Hay 4 formas de estabilizar el suelo, a saber:

#### **Estabilización físico mecánica:**

Este tipo de fijación se consigue por medios mecánicos, como la presión.

Esto se emplea para ayudar a la tierra haciendo modificaciones físicas en ella.

Hay diversos métodos como:

Mezcla de Suelos: Este tipo de fijación es muy utilizado, pero no puede fabricar los efectos deseados por sí solo y siempre requiere al menos una presión o método mecánico. (Compactación – Estabilización Físico –Mecánico)

A modo de ejemplo, en suelos de grano grueso como arena y grava, presentan un alto rozamiento interno, lo que los hace resistentes a grandes esfuerzos, pero esta cualidad no los hace estables en cuanto a la dureza del camino porque no son volátiles. Las partículas se trasladan de forma libre y con los movimientos del medio pueden separarse e incluso divergir.

Por otro lado, las arcillas tienen gran consistencia y poca fricción, lo que las hace inestables en condiciones de alta humedad. La combinación correcta de estos dos suelos puede producir materiales permanentes en que las grandes fricciones intrínsecas de uno y la fuerza cohesiva del otro pueden usarse para mantener unidas las partículas.

- Consolidación Previa
- Vibroflotación
- Geotextiles

**Estabilización Granulométrica:** Este tipo de estabilidad se logra mediante una mezcla de distintos tipos de suelo y algunos materiales.

**Estabilización Electro-Química:** A través del intercambio iónico.

**Estabilización Físico-Química:** Por medio de materiales cementantes como: Asfalto, Cemento y Cal.

Las estabilizaciones físicas realizadas con equipos mecánicos apropiados deben ser determinadas por un experto responsable.

Estabilidad por compacto; el procedimiento de estabilización de presión debe usarse en todas las construcciones que contengan material de suelo (presa, puente, canal de agua, suelo de cimentación, presa artificial, presa, terraplén de carretera, etc.). Este es el tipo que puede mejorar significativamente el suelo sin reacciones químicas significativas, y este tipo de fijación se realiza en el sustrato, el sustrato y en la ropa de cama.

Este procedimiento producirá lo siguiente

- Incrementar la resistencia al corte, para perfeccionar las estabilidades de los suelos.
- Reducir las comprensibilidades para disminuir los asentamientos.
- Reducir las relaciones de vacíos para disminuir las permeabilidades y así mismo la contracción, exposición por congelamiento o el potencial de expansión.

En cualquier instante se considerará la prueba Proctor Estándar o Modificado con energías de compactación, de laboratorio, dada por la fórmula siguiente:

$$E = N \times n \times P \times h / V$$

Dónde:

E = Energía de Compactación

N = Número de golpes por capa

n = Número de capas de suelo

P = Peso del pisón

h = Altura de caída libre del pisón

V = Volumen del suelo compactado

**Tabla 2. Clasificación de Proctor**

<b>Ensayo</b>	<b>Proctor Estándar</b>	<b>Proctor Modificado</b>
Norma	NTP-339.142	NTP-339.141
Energía de Compactación	12,300 Lb.ft/ft <sup>3</sup>	56,250Lb.ft/ft <sup>3</sup>
Peso del Martillo	5.50Lb	10Lb
Altura de Caída del Martillo	12Pulgadas	18Pulgadas
Número de golpes por capa	Depende del molde	Depende del molde
Número de capas	3	5
Volumen del molde (cm <sup>3</sup> )	Depende del método de prueba	Depende del método de prueba

La densidad de presión mínima, expresada como porcentaje de la densidad máxima de un ensayo Proctor estándar o modificado, deberá ser especificada por el profesional responsable (RP), según los requisitos del estudio. El monitoreo de la densidad del campo debe elaborarse usando un dispositivo de cono de arena, un densitómetro nuclear u otro método estándar para esta finalidad. El piso también se puede instalar de otras maneras según lo recomendado por el especialista responsable y aquellos con soporte técnico que lo respalden.

La estabilidad mecánica es una tecnología mejorada basada en mezclar diferentes materiales con propiedades adicionales para conseguir materiales de mejor calidad que realice con los requisitos requeridos.

Las propiedades que a menudo se mejoran con este estabilizador son la ductilidad y/o el tamaño de grano; en primer lugar, daña la sensibilidad al agua y la capacidad de drenaje de la sustancia; este último perjudica su gran fuerza, maniobrabilidad y compacidad. Por lo que la tarea del ingeniero se enfocará en establecer la relación de mezcla entre dos (o tres) de los materiales disponibles, en base a ensayos previos y el uso de la triangulación en caso de que los tres materiales sean distintos. En la actualidad, hay herramientas informáticas de análisis que ayudan fácilmente a resolver el cálculo, lo que limita al ingeniero a determinar solo los parámetros de calidad requeridos.



La instalación mecánica se puede realizar en el sitio de uso (on-site) o en la planta de procesamiento general; Esto requiere una serie de operaciones que, aunque eliminadas o modificadas de orden, son generalmente las siguientes:

- Filtración y trituración - filtrar el suelo, si el proceso se hace en sitio, o triturar solo si se hace en fábrica. En el caso de piedras, este paso no es necesario.
- Mezclar los ingredientes de forma firme y homogénea, tanto in situ, mediante gradas de discos como concentrados, mediante tolvas dosificadoras.
- Ampliar y nivelar la mezcla.
- Hidratado y comprimido hasta lograr la intensidad mínima especificada para la obra, generalmente 95 o 100% del Proctor modificado.

Debido a retrasos en la entrega de materiales, la dirección del proyecto tuvo que cambiar el diseño de Saleh para poder seguir pintando una vía de poco tráfico. Por ello se presenta en los materiales A, B y C, cuyas propiedades se especifican a continuación.

**Tabla 3. Materiales A, B, C.**

TAMIZ (mm)	% QUE PASA		
	A	B	C
40	100	-	-
25	78	100	100
20	58	40	96
10	36	38	90
5	22	33	72
2	20	29	54
0.40	17	26	10
0.080	15	22	0
LL	27	39	18
IP	15	21	5
EA	27	21	38

El suelo A debe estabilizarse mecánicamente con cualquier combinación de los otros dos suelos para lograr propiedades aceptables de la capa compacta.

La resolución de problemas tiene tres aspectos:

-Conseguir una granulometría que encaje dentro de uno de los usos granulométricos normalizados.

- Bajo nivel de finos, aceptable según normativa.

-Conseguir una adecuada plasticidad.

Debido a la escasa ductilidad del material B, optaremos por utilizar el material C exclusivamente para la estabilidad mecánica.

Para conocer las proporciones de cada material, se deben realizar sucesivos ensayos, de forma que todas las granulometrías estén dentro de las tolerancias determinadas por el husillo. Las informaciones iniciales para la estabilidad son los siguientes:

**Tabla 4. Materiales A, C.**

TAMIZ (mm)	% QUE PASA		ZN(40)	
	A	C		
40	100	-	100	
25	78	100	75	95
20	58	96	60	85
10	36	90	45	75
5	22	72	30	55
2	20	54	20	40
0.40	17	10	6	25
0.080	15	0	0	12
LL	27	18	< 25	
IP	15	5	< 10	
EA	27	38	≥ 30	

### **Cloruro de sodio**

El NaCl (cloruro de sodio), también llamado como sal común o halita, es un compuesto químico cuando el cloruro de sodio se encuentra en su forma mineral. El NaCl es una de las sales que componen la salinidad de los océanos, así como los fluidos extracelulares de muchos organismos vivos. Es impermeable y reduce el polvo en el piso, especialmente para barro y barro. El cloruro de sodio (NaCl) en forma cristalina es sencillamente soluble en agua, fácilmente higroscópico y fácil de obtener. Con la adición de NaCl al agua, se puede bajar el punto de

congelación de esta última. Una solución que contiene cloruro de sodio disuelto tiene una tensión superficial más alta que en el caso del agua destilada y al 1% de sal la tensión superficial aumenta de 1 a 2 dinas por  $\text{cm}^2$ . Agregar cloruro de sodio al agua reduce las presiones de vapor.

El cambio en el agua, se da por la adición de NaCl, en su punto de congelación, presión de vapor y tensión superficial dependen de la solubilidad de la sal. El cloruro de sodio se agrega al agua en una pequeña proporción y se disolverá rápidamente, pero debido a la alta velocidad de adición, se disolverá más difícilmente y habrá una cierta proporción más allá de la cual el cloruro de sodio no será más soluble. Hay una doble capa de iones adsorbidos en la superficie de las partículas de arcilla, la energía potencial presente en esta superficie se disipa, hasta que a cierta distancia se iguala al potencial de los líquidos circundantes.

La sal es un estabilizador natural, integrado aproximadamente por un 98 % de cloruro de sodio y un 2 % de arcilla y limo, cuyas propiedades principales son la higroscopicidad, que es la absorción de la humedad del aire y de las sustancias que la contienen. Su capacidad de coagulación conduce menores esfuerzos mecánicos para conseguir la densidad requerida, debido a los intercambios de iones entre los componentes de sodio y metal del sustrato más delgado del material, creando un efecto cementoso.

Agregar sal al suelo para disminuir los puntos de evaporación del agua es el resultado de una mayor tensión superficial. No obstante, a medida que la superficie de contacto se evapora, comienza a secarse y el NaCl cristaliza en las superficies y en el vacío, lo que puede apoyar a crear un obstáculo que evita una mayor evaporación. Es primordial ser consciente de la íntima reacción entre la sal y la tierra, así como la estancia de la instalación resultante y los efectos colaterales que provocará, en determinados factores de la textura de la vía.

La adición de NaCl a la arcilla provoca una disminución de las contracciones volumétricas, las formaciones de una costra superficial y una disminución del cambio de humedad; Asimismo, sostiene vinculadas las partículas de la superficie que no son de arcilla, lo que hace que sea menos probable que se desprendan cuando se exponen a los ataques abrasivos del tráfico.

La investigación sobre el tema de la estabilización del suelo con NaCl que detalla el comportamiento del estrés es rara.

- La densidad seca y la resistencia a la compresión aumentan al agregar NaCl hasta un 3%. • El límite líquido y el índice de plasticidad se reducen cuando se agrega NaCl.
- La adherencia y el ángulo de fricción interna parecen reducir con la adición de NaCl en muestras que no permiten la pérdida de humedad. Si se admite el blanqueo antes de analizar la muestra, la fuerza de adhesión y el ángulo de fricción interno aumentarán considerablemente.
- Las partículas de piedra caliza parecen ser solubles en solución de cloruro de sodio. • Aumentar las capacidades de retención de humedad en suelos tratados con cloruro de sodio.
- La tensión superficial del agua aumenta drásticamente, lo que luego del endurecimiento del suelo puede aumentar la densidad del suelo hasta en un 15% en comparación con el suelo no tratado. • La cristalización en clima seco hace que el cemento adhiera las partículas del suelo a la superficie del suelo. La expansión de estos cristales, cuando se forman, llena los vacíos en el suelo y disminuye el marchitamiento posterior.

Cuando se realizó el análisis de los estudios, obviamente, no todos los suelos contestando de manera adecuada a la adición de NaCl, para perfeccionar sus propiedades mecánicas y físicas.

La estabilidad del cloruro de sodio ayuda a ciertas propiedades de los suelos para su uso en sustrato y subsuelo. Al igual que ciertos métodos de estabilización, el cloruro de sodio necesita un método apropiado de mezcla con el suelo estabilizado para disminuir los peligros para la salud de los empleados del sitio y conseguir una mezcla de suelo y cloruro de sodio. Mejor resultado. Como el gran número de los estabilizadores, el cloruro de sodio se puede emplear de forma directa al suelo a tratar y se ha encontrado una proporción para estabilizar el suelo adecuadamente. Las formas de empleo del cloruro de sodio son:

En grano; este uso es aplicar cloruro de sodio al uno por ciento directamente al suelo, y el suelo será uniformemente uniforme. Este método de ejecución no es 100% efectivo, porque al homogeneizar los suelos con cloruro de sodio, las partes del suelo que quedan en él contienen menos cloruro de sodio que las otras partes. Sin pruebas de laboratorio, es fácil de homogeneizar mediante

métodos prácticos, lo que hace que la mezcla de suelo de NaCl sea tan fina que el NaCl esté presente en toda la muestra de suelo.

En salmuera; una de las propiedades esenciales del cloruro de sodio es que se disuelve fácilmente en agua. El uso de este método de dilución de agua produce una salmuera que se vierte en el suelo de manera controlada. La solución de salmuera llena los espacios entre las partículas del suelo y determina un método efectivo mientras agrega la humedad óptima del suelo. No obstante, al formar la salmuera, existe el peligro de dañar a la maquinaria utilizada para su elaboración, debido que la sal es un agente oxidante.

### **Cloruro de calcio**

El cloruro de calcio es una sal inorgánica con la fórmula  $\text{CaCl}_2$ , otros nombres para el compuesto son: dicloruro de calcio, cloruro de calcio. Se alcanza como subproducto del procedimiento Solvay para la fabricación de carbonato de sodio. El cloruro de cal es un compuesto no tóxico y no corrosivo.

Las soluciones de cloruro de calcio presentan un punto de congelación bajo y pueden ser líquidas a temperaturas muy bajas. Este compuesto químico puede estar en estado sólido, cloruro de calcio anhidro, y puede ser blanco o incoloro, y en forma de gránulos o escamas.

Una propiedad notable del cloruro de calcio es que es un compuesto químico muy higroscópico, es decir, permanece en estado sólido en ambientes secos, pero cuando se expone a la humedad del ambiente, empieza a absorber humedad. Moléculas de agua que, con el tiempo, en contacto con la humedad se disuelven en una solución saturada conocida como rabia. En cualquier caso, el cloruro cálcico facilita la compactación, contribuye a la solidez de emplear de dos maneras:

- En granos regulares o Tipo I
- En hojuelas o pelotillas o Tipo II

Dosifique de 7 a 10 libras de Clase I o de 5.6 a 8 libras de Clase II por tonelada de suelo. La mezcla, el prensado y el acabado son similares al cloruro de sodio estable. Se ha establecido que con la adición de cloruro de calcio disminuye la fuerza de repulsión entre arcillas; sin embargo, en ciertos libros se afirma que la capa de agua que rodea las partículas se fortalece eléctricamente mediante la

adición de cloruro de calcio, de modo que la cohesión aparente aumenta drásticamente.

Se observa un aumento de la masa aparente de hasta un 11% con la adición de 0,5 a 3% de cloruro de calcio, de acuerdo al tipo de suelo. No obstante, hay informaciones que indican una masa volumétrica menor en comparación con las arcillas que no contienen cloruro de calcio. Además, el cloruro de calcio ayuda a conservar la humedad constante en el suelo, lo que hace que esta sal se lave fácilmente. La evaporación se disminuye y puede absorber 10 veces su peso cuando la condición de humedad del ambiente es alta, y la humedad se puede mantener a 2/3 durante el día caluroso y seco, esto hace de esta sal un producto muy efectivo a la hora de prevención de la formación de polvo en caminos de tierra.

Sin embargo, existen limitaciones en el uso del cloruro de calcio, entre las principales:

- La humedad relativa en el ambiente es superior al 3%.
- Que hay metales que cruzan la rejilla 200 y que estos metales interactúan positivamente con la sal.

### **Estabilización con ceniza volante**

Las cenizas volantes se definen según la norma ASTM C593-95 como los residuos finos de la combustión de carbón en polvo de una caldera por los gases de combustión.

Las propiedades físicas y químicas de las cenizas volantes cambian gradualmente según el método de combustión y la forma de las partículas de cenizas volantes. Dependiendo de la dirección, el carbón de diferentes fuentes produce diferentes propiedades de combustión, y estas diferencias afectan la efectividad de las cenizas volantes como estabilizador del suelo. Estas diferentes fuentes se pueden clasificar en carbón semibituminoso, carbón bituminoso y carbón antracita. Cada uno tiene propiedades diferentes según el contenido de carbono, la dureza y la edad geológica.

Esta sección de la norma ASTM C593-95 contiene información básica sobre la composición de las cenizas volantes, lo que ayudará a aclarar el rango de valores de propiedad que puede tener este material.

Las cenizas volantes se definen según la norma ASTM C593-95 como los residuos finos de la combustión de carbón en polvo de una caldera por los gases de combustión.

Las propiedades físicas y químicas de las cenizas volantes cambian gradualmente según el método de combustión y la forma de las partículas de cenizas volantes. Dependiendo de la dirección, el carbón de diferentes fuentes produce diferentes propiedades de combustión, y estas diferencias afectan la efectividad de las cenizas volantes como estabilizador del suelo. Estas diferentes fuentes se pueden clasificar en carbón semibituminoso, carbón bituminoso y carbón antracita. Cada uno tiene propiedades diferentes según el contenido de carbono, la dureza y la edad geológica.

Esta sección de la norma ASTM C593-95 contiene información básica sobre la composición de las cenizas volantes, lo que ayudará a aclarar el rango de valores de propiedad que puede tener este material. Dos de las principales tecnologías basadas en la generación de energía son: carbón pulverizado (PC) y combustión de fondo líquido (FBC). La tecnología informática es el método más común y se refiere a cualquier proceso de combustión que utilice carbón finamente molido en el proceso. En este tipo de sistema, el carbón se procesa moliéndolo hasta obtener una consistencia muy fina de combustión y se forma ceniza en la cámara de combustión, al mismo tiempo que se produce la combustión del carbón (Undeerc, 2007).

Este proceso produce del 65% al 85% de cenizas volantes, entretanto que las materias primas restantes son cenizas de fondo y escorias de caldera. La tecnología FBC usa una caldera de carbón en la que el carbón se quema mezclando carbón con un material absorbente como piedra caliza ( $\text{CaCO}_3$ ), dolomita o material de fondo. Es un método de combustión de bajo costo para conseguir energía fundamentalmente a partir de carbón con alto contenido de azufre en una forma ambientalmente aceptable. La mezcla de combustibles y la base se vuelve líquida durante la combustión para admitir la combustión completa y la eliminación del gas ácido. Durante este procedimiento, el azufre contenido en el carbón se libera en forma de dióxido de azufre ( $\text{SO}_2$ ) y se convierte en sulfato de calcio ( $\text{CaSO}_4$ ).

Las cenizas volantes se definen según la norma ASTM C593-95 como los residuos finos de la combustión de carbón en polvo de una caldera por los gases de combustión.

Las propiedades químicas y físicas de las cenizas volantes cambian gradualmente según el método de combustión y la forma de las partículas de cenizas volantes. Dependiendo de la dirección, el carbón de diferentes fuentes produce diferentes propiedades de combustión, y estas diferencias afectan la efectividad de las cenizas volantes como estabilizador del suelo. Estas distintas fuentes se clasifican en carbón semibituminoso, carbón bituminoso y carbón antracita. Cada uno presenta propiedades distintas según el contenido de carbono, la dureza y la edad geológica.

Esta sección de la normativa ASTM C593-95 presentan informaciones básicas sobre las composiciones de las cenizas volantes, lo que ayudará a aclarar el rango de valores de propiedad que puede tener este material. Dos de las esenciales tecnologías basadas en la generación de energía son: carbón pulverizado (PC) y combustión de fondo líquido (FBC). La tecnología informática es el método más común y se refiere a cualquier procedimiento de combustión que emplee carbón finamente molido en el proceso. En este tipo de sistema, el carbón se procesa moliéndolo hasta obtener una consistencia muy fina de combustión y se forma ceniza en la cámara de combustión, al mismo tiempo que se produce la combustión del carbón (Undeerc, 2007).

Este proceso produce del 65% al 85% de cenizas volantes, entretanto que las materias primas restantes son cenizas de fondo y escorias de caldera. La tecnología FBC emplea una caldera de carbón en la que el carbón se quema mezclando carbón con un material absorbente como piedra caliza ( $\text{CaCO}_3$ ), material de fondo o dolomita. Es un método de combustión de precio módico para conseguir energía fundamentalmente a raíz del carbón con altos contenidos de azufre en una manera ambientalmente permitida. La mezcla de combustibles y la base se vuelve líquida durante la combustión para admitir la combustión completa y la eliminación del gas ácido. Durante este procedimiento, el azufre contenido en el carbón se libera en forma de dióxido de azufre ( $\text{SO}_2$ ) y se cambia en sulfato de calcio ( $\text{CaSO}_4$ ).



**Resistencia**

Hay varios métodos de estabilización que han demostrado ser beneficiosos para mejorar la durabilidad de muchos tipos de suelo. Pero antes de profundizar en este aspecto, hay que decir que todos ellos parecen perder mucha fuerza ante la presencia de un alto contenido en materias orgánicas.

**Permeabilidad**

Por lo general, no es muy complejo modificar la permeabilidad de la composición del suelo mediante métodos como compactación, apisonamiento, etc. En materiales arcillosos, el empleo de coagulantes (por ejemplo, polifosfatos).

### III. METODOLOGÍA

#### 3.1. Tipo y diseño de la investigación

**El tipo** de investigación es básica, ya que no cuenta con un propósito aplicativo inmediato, sino que busca ampliar y profundizar los conocimientos científicos existentes sobre una realidad en particular (Carrasco, 2017). Es así que, el estudio comparativo de la estabilización de suelos arcillosos utilizando Cloruro de Calcio líquido y asfalto líquido RC-250 busca obtener información relevante acerca de la influencia de estos aditivos en suelos expansivos. Asimismo, la investigación aborda un **enfoque cuantitativo**, debido a que los datos y las hipótesis serán comprobadas a partir de la medición numérica (Hernández, et al., 2014)

**El diseño** de la investigación es experimental, en vista de que la variable independiente será manipulada de manera controlada para producir cambios en la variable dependiente, los cuales serán observados y analizados con el objeto de determinar el modo y el porqué de los resultados obtenidos (Palomino, et al., 2019).

Según Supo (2012, p.06) se condiciona a dos grupos experimentales y un grupo control, se puede decir que las propiedades de suelo de muestra natural física y mecánica se puede denominar:

$$\begin{aligned} GE(A) : Y_1 &\Rightarrow X_1 \Rightarrow Y_2 \\ GE(A) : Y_3 &\Rightarrow X_2 \Rightarrow Y_4 \\ GE(A) : Y_5 &\Rightarrow X_3 \Rightarrow Y_6 \\ GC(A) : Y_7 &\Rightarrow X' \Rightarrow Y_8 \end{aligned}$$

Ge: Grupo experimental

Gc: Grupo Control

X: Variable independiente

X': Tratamiento convencional

Y1, Y3, Y5, Y7: pre-test

Y2, Y4, Y6, Y8: pos-test

### 3.2. Variables y operacionalización

**Variables:** Variable independiente: Aditivos químicos, son sustancias químicas que modifican las características del suelo, reduciendo la plasticidad y aumentando la cohesión y la capacidad de soporte (Junco & Tejeda, 2011).

Variable dependiente: Estabilización de suelos arcillosos, es el procedimiento al que es sometido el suelo natural arcilloso con el fin de optimizar sus características y facilitar los trabajos de construcción reduciendo problemas en estructuras y pavimentos (Calcinor, 2021).

**Operacionalización de variables** La matriz de operacionalización de variables se puede encontrar en el anexo 1.

### 3.3. Población, muestra y muestreo

**Población:** La población es el universo, grupo o totalidad de componentes donde el cual se realiza la recolección de datos y que poseen características similares (Palomino, et al., 2019). Partiendo de esta definición se tiene que la población del presente estudio estará constituida por los suelos arcillosos del Distrito de Huancaspata.

**Muestra y muestreo:** La muestra es una parte o subgrupo simbólico de componentes escogidos a partir de la población en estudio que proporciona los datos necesarios para el estudio (Hernández, et al., 2014). De esta forma, la técnica usada para determinar la muestra de estudio será el muestreo no probabilístico intencionado, en donde la muestra es seleccionada en base a la información que el investigador maneja sobre las cualidades y comportamiento de la población en análisis (Palomino et al., 2019). De esta manera la muestra estará conformada por dos calicatas extraídas de zonas de suelo arcilloso, y sobre las cuales se llevaran a cabo los ensayos pertinentes.

### 3.4. Técnicas e instrumentos de recolección de datos

**Técnicas de recolección de datos:** Indica aquellos métodos utilizados por el autor con el fin de conseguir y recabar información relacionada con el objetivo del estudio (Carrasco, 2017). En la presente, se utilizará la técnica de la

observación, mediante la cual los investigadores podrá reconocer las características, cualidades y propiedades de las muestras estudiadas.

**Instrumentos de recolección de datos:** Se usará como instrumento de recolección de datos la ficha de observación contenida en el anexo 1, que permitirá llevar un registro de las características físicas y mecánicas de las muestras tanto de suelo natural como de suelo estabilizado.

### 3.5. Procedimiento

**Etapa pre campo:** A lo largo de la etapa inicial se aplicará un estudio de los fundamentos teóricos que sustentan la investigación, donde se elaborará los instrumentos de recolección de datos que permitirá llevar un registro detallado de la información recolectada.

**Etapa de campo:** A lo largo la etapa de campo se aplicará la toma de muestras a través de la extracción de dos calicatas a cielo abierto, cuya excavación se hará a una profundidad de 1.5 m o hasta donde el suelo lo permita, tal como está establecido en el Manual de Ensayos de Materiales del MTC-2016.

**Etapa de laboratorio:** La etapa de laboratorio comprende la realización de ensayos a las muestras tomadas durante la etapa de campo con la finalidad de establecer las características físicas y mecánicas del suelo. Los ensayos para el suelo natural serán: análisis granulométrico por tamizado (ASTM D-422); Límites de Atterberg (ASTM D-423); Proctor modificado (ASTM D-1557) y CBR (ASTM D-1883). Luego de realizados los ensayos al suelo natural se procederá con la estabilización del suelo, para esto cada aditivo seleccionado es mezclado en un 5% con una muestra de suelo natural, luego de haber transcurrido 48 horas de la aplicación del aditivo, estas muestras de suelo alteradas son sometidas a ensayos de límites de Atterberg, Proctor modificado y, finalmente son compactadas con la humedad óptima según ensayo Proctor modificado con el fin de alcanzar el índice de CBR.

**Etapa de gabinete:** En la etapa de gabinete se llevará a cabo la tabulación y análisis de la data, el cual será representado de forma gráfica y precisa. También se aplicará una contrastación del resultado obtenido con los antecedentes que

sirven de apoyo a la investigación. Finalmente, se establecerán las conclusiones y recomendaciones.

### **3.6. Métodos de análisis de datos**

Con el fin del procesamiento y análisis de datos del presente estudio se empleará la estadística descriptiva, ya que los datos serán almacenados y organizados de forma cuantitativa por medio de tablas y gráficos comparativos creados partiendo de una hoja de cálculo de Excel.

### **3.7. Aspectos éticos**

El presente estudio será desarrollado partiendo de los valores éticos de los autores, bajo los cuales se garantiza la obtención de datos reales y confiables mediante un instrumento de recolección de datos validado por expertos, así como la adecuada referencia de los autores consultados respetando el derecho de autor.



Fuente: resultados obtenidos del ensayo de laboratorio Geotecnia F&G Eirl

**Interpretación:** El resultado del ensayo de suelos se evidencian en la tabla 5. en el cual nos indica el suelo en de clasificación SUCS CL y en la clasificación ASSHTO A-6 (16), con una humedad natural de 11.27%

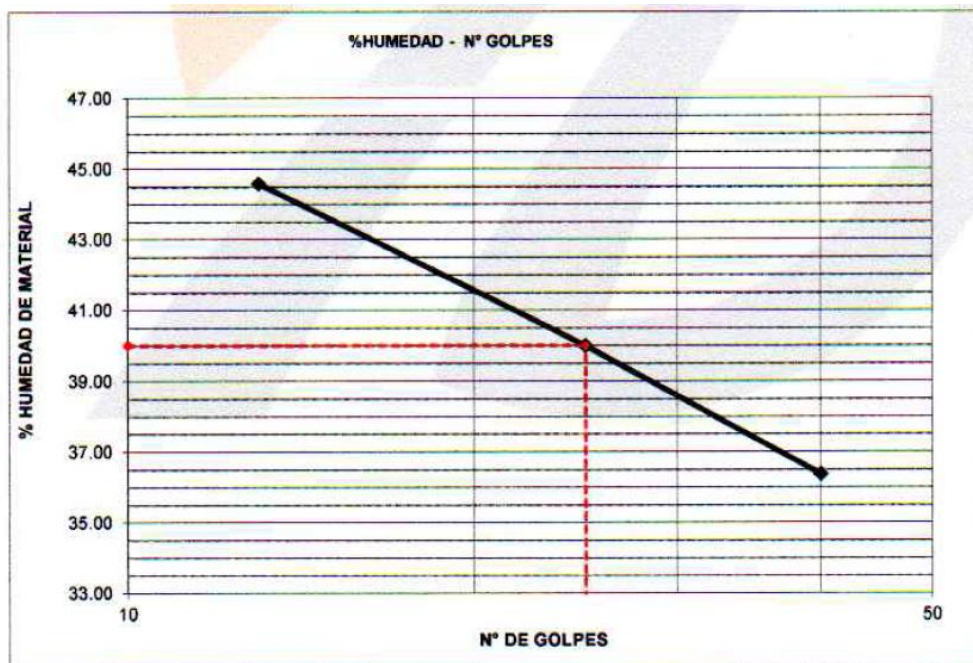
### Limite liquido y limite plastico

**Tabla 6. Resultados de los ensayos limite liquido y limite plastico**

Nro. DE ENSAYO	LIMITE LIQUIDO			LIMITE PLASTICO		
	1	2	3	1	2	3
PESO TARA + SUELO HUMEDO (gr.)	30.00	30.00	30.00	35.00	35.00	35.00
PESO TARA + SUELO SECO (gr.)	22.00	21.43	20.75	28.80	29.10	29.20
PESO DE LA TARA (gr.)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
PESO DEL AGUA (gr.)	8.00	8.57	9.25	6.20	5.90	5.80
PESO SUELO SECO (gr.)	22.00	21.43	20.75	28.80	29.10	29.20
CONTENIDO DE HUMEDAD (%)	36.36	39.99	44.58	21.53	20.27	19.86
Nro. DE GOLPES	40	25	13	20.56		

Fuente: resultados obtenidos del ensayo de laboratorio Geotecnia F&G Eirl

**Figura 4. Gráfico de fluidez**



Fuente: resultados obtenidos del ensayo de laboratorio Geotecnia F&G Eirl.

**Interpretación:** El resultado del ensayo de limite líquido y limite plástico se evidencian en la tabla 6. El límite líquido obtenido de la muestra patrón es de 40% tal y como se aprecia en la figura N? y el límite plástico obtenido de la muestra patrón es de 20.56%.

### Índice de plasticidad

**Tabla 7. Índice de plasticidad**

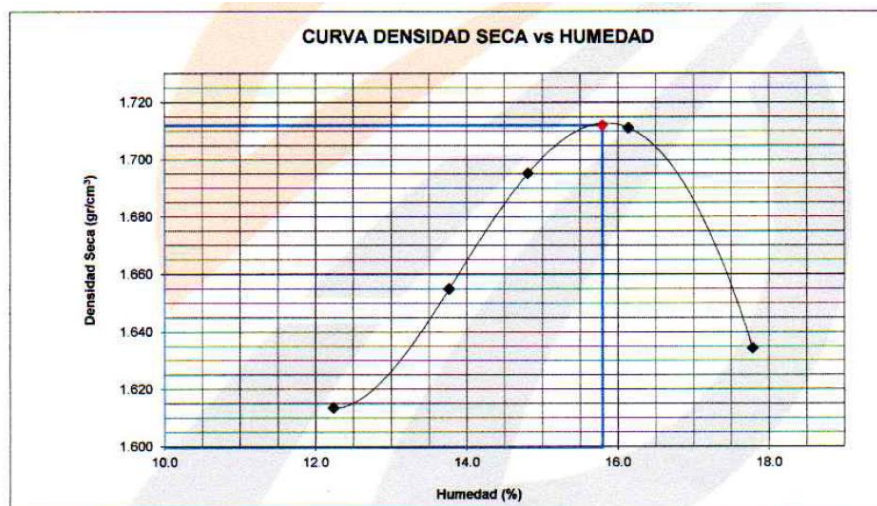
<b>LIMITE LIQUIDO</b>		
(MTC E-110, ASTM D-4318 y AASHTO T89)		
LL :	%	40.00
<b>LIMITE PLASTICO</b>		
(MTC E-111, ASTM D-4318 y AASHTO T90)		
LP :	%	20.56
<b>INDICE DE PLASTICIDAD</b>		
ASTM D-438		
IP :	%	19.44

Fuente: resultados obtenidos del ensayo de laboratorio Geotecnia F&G Eirl

Interpretación: el índice de plasticidad de la muestra patrón resulto 19.44%. ver tabla 7.

### Proctor Modificado y CBR del suelo natural

**Figura 5. Curva de compactación Proctor modificado**

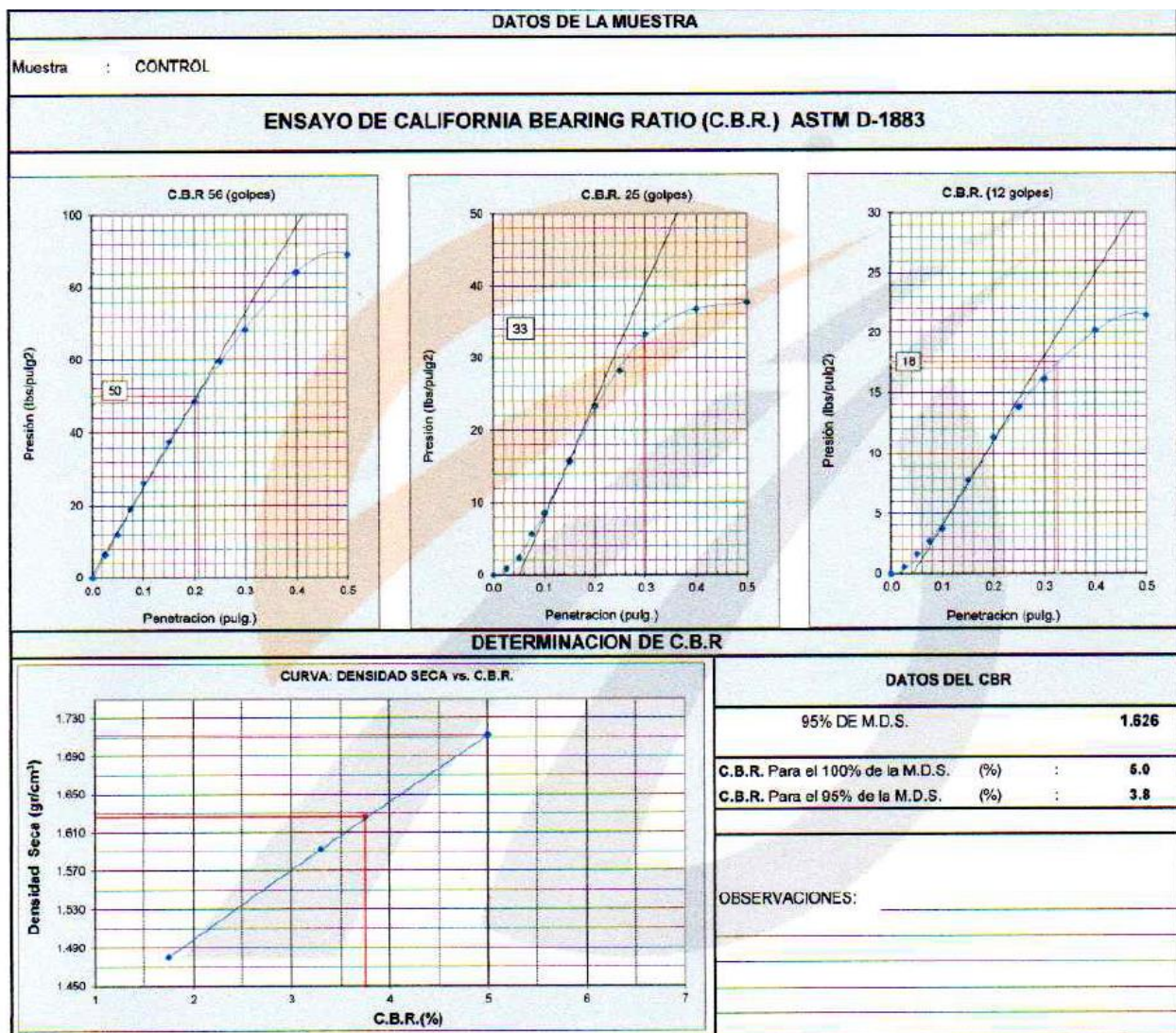




Fuente: resultados obtenidos del ensayo de laboratorio Geotecnia F&G Eirl.

**Interpretación:** el resultado del Proctor modificado para la muestra patrón, el óptimo contenido de humedad es 15.8%, con este resultado se consigue una máxima densidad seca (MDS) de 1.7212 gr/cm<sup>3</sup>. Asimismo, en la figura N5 se puede evidenciar la máxima densidad seca que se alcanza para el óptimo contenido de humedad.

**Figura 6. CBR vs Densidad Seca (g/cm<sup>3</sup>)**



Fuente: resultados obtenidos del ensayo de laboratorio Geotecnia F&G Eirl.

**Interpretación:** con los valores obtenidos en el ensayo de CBR de la muestra patrón se obtiene que el CBR al 95% de la MDS es de 3.8% y el CBR al 100% de la MDS es de 5.0% con un óptimo contenido de humedad de 15.8%.

## Resumen de resultados suelo natural

**Tabla 8. Resultado de ensayos muestra suelo natural**

ENSAYO	RESULTADO
Clasificación SUCS	CL
Clasificación AASHTO	A-6 (16)
Limite Liquido %	40
Limite Plástico %	20.56
Índice de Plasticidad IP %	19.44
Proctor Modificado	
MDS gr/cm <sup>3</sup>	1.712
Óptimo Contenido de humedad %	15.8
CBR	
CBR diseño al 95% de la MDS %	3.8
CBR diseño añ 100% de la MDS %	5.0

Fuente: elaboración propia resultados obtenidos del ensayo de laboratorio Geotecnia F&G Eirl

## 4.2. Resultado de los ensayos con 5% de cloruro de calcio liquido

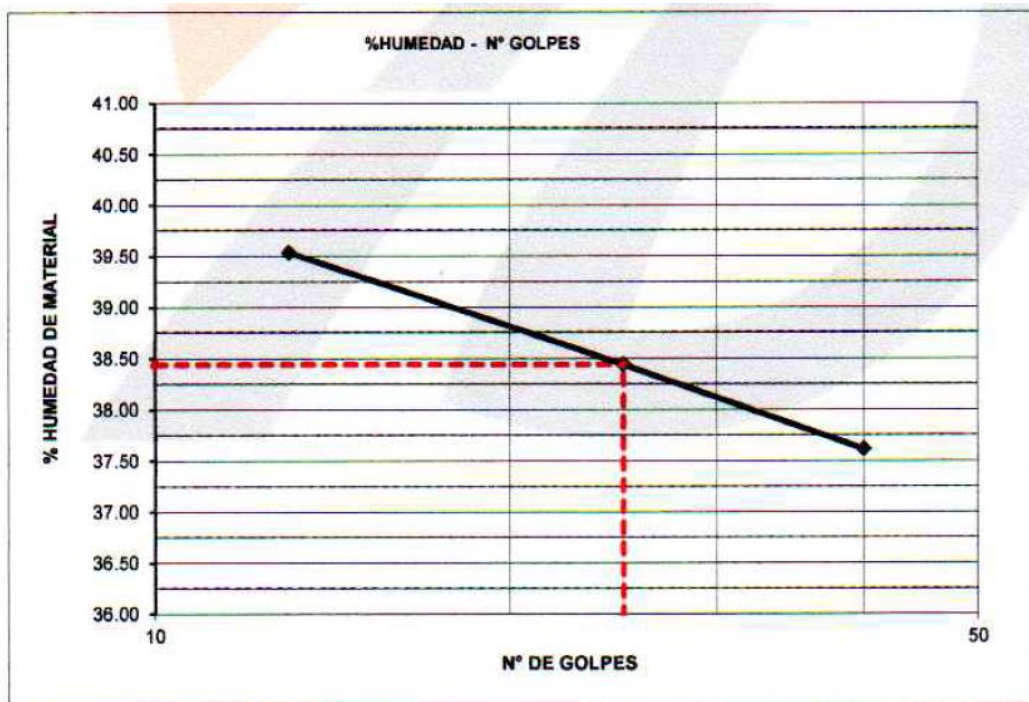
### Limite líquido y limite plástico

**Tabla 9. Resultados de los ensayos limite liquido y limite plastico con 5% de cloruro de clacio**

Nro. DE ENSAYO	LIMITE LIQUIDO			LIMITE PLASTICO		
	1	2	3	1	2	3
PESO TARA + SUELO HUMEDO (gr.)	30.00	30.00	30.00	35.00	35.00	35.00
PESO TARA + SUELO SECO (gr.)	21.80	21.67	21.50	28.90	28.70	29.00
PESO DE LA TARA (gr.)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
PESO DEL AGUA (gr.)	8.20	8.33	8.50	6.10	6.30	6.00
PESO SUELO SECO (gr.)	21.80	21.67	21.50	28.90	28.70	29.00
CONTENIDO DE HUMEDAD (%)	37.61	38.44	39.53	21.11	21.95	20.69
Nro. DE GOLPES	40	25	13	21.25		

Fuente: resultados obtenidos del ensayo de laboratorio Geotecnia F&G Eirl

**Figura 7. Gráfico de fluidez**



Fuente: resultados obtenidos del ensayo de laboratorio Geotecnia F&G Eirl.

**Interpretación:** Los resultados del ensayo de límite líquido y límite plástico agregando el aditivo cloruro de calcio al 5% se muestran en la tabla N9. El límite líquido obtenido de la muestra con aditivo es de 39% tal y como se aprecia en la figura N7 y el límite plástico obtenido de la muestra con aditivo cloruro de calcio al 5% es de 21.25%.

### Índice de plasticidad

**Tabla 10. Resultado de ensayos**

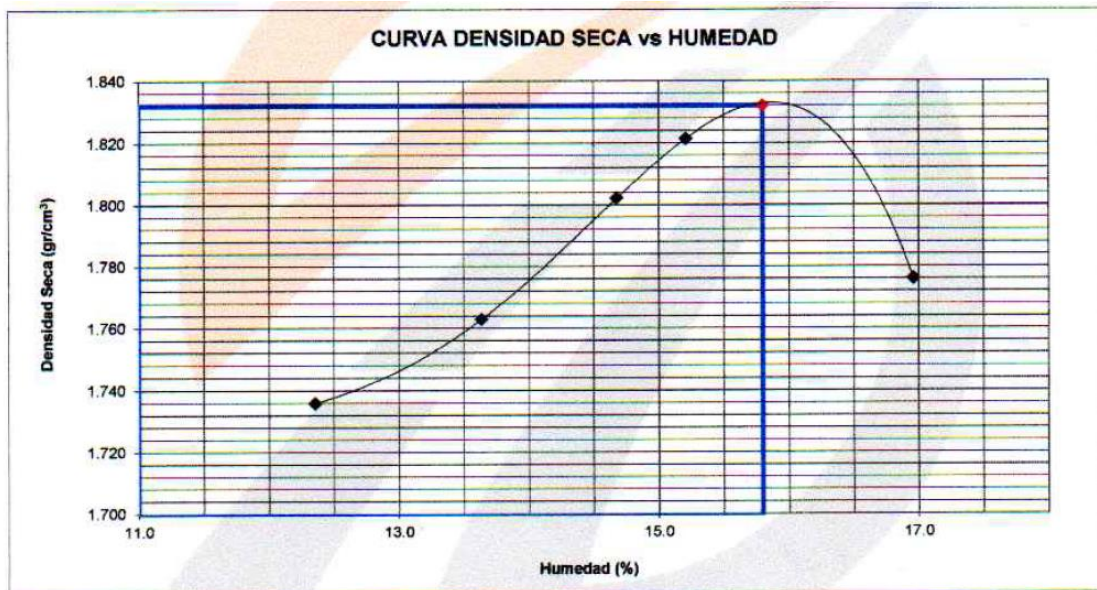
<b>LIMITE LIQUIDO</b>		
(MTC E-110, ASTM D-4318 y AASHTO T89)		
LL :	%	39.00
<b>LIMITE PLASTICO</b>		
(MTC E-111, ASTM D-4318 y AASHTO T90)		
LP :	%	21.25
<b>INDICE DE PLASTICIDAD</b>		
ASTM D-438		
IP :	%	17.75

Fuente: resultados obtenidos del ensayo de laboratorio Geotecnia F&G Eirl.

**Interpretación:** el índice de plasticidad de la muestra con cloruro de calcio líquido al 5% resulto 17.75%. ver tabla N10.

### Proctor modificado y CBR de la muestra con 5% de cloruro de calcio

**Figura 8. Curva de compactación Proctor modificado**

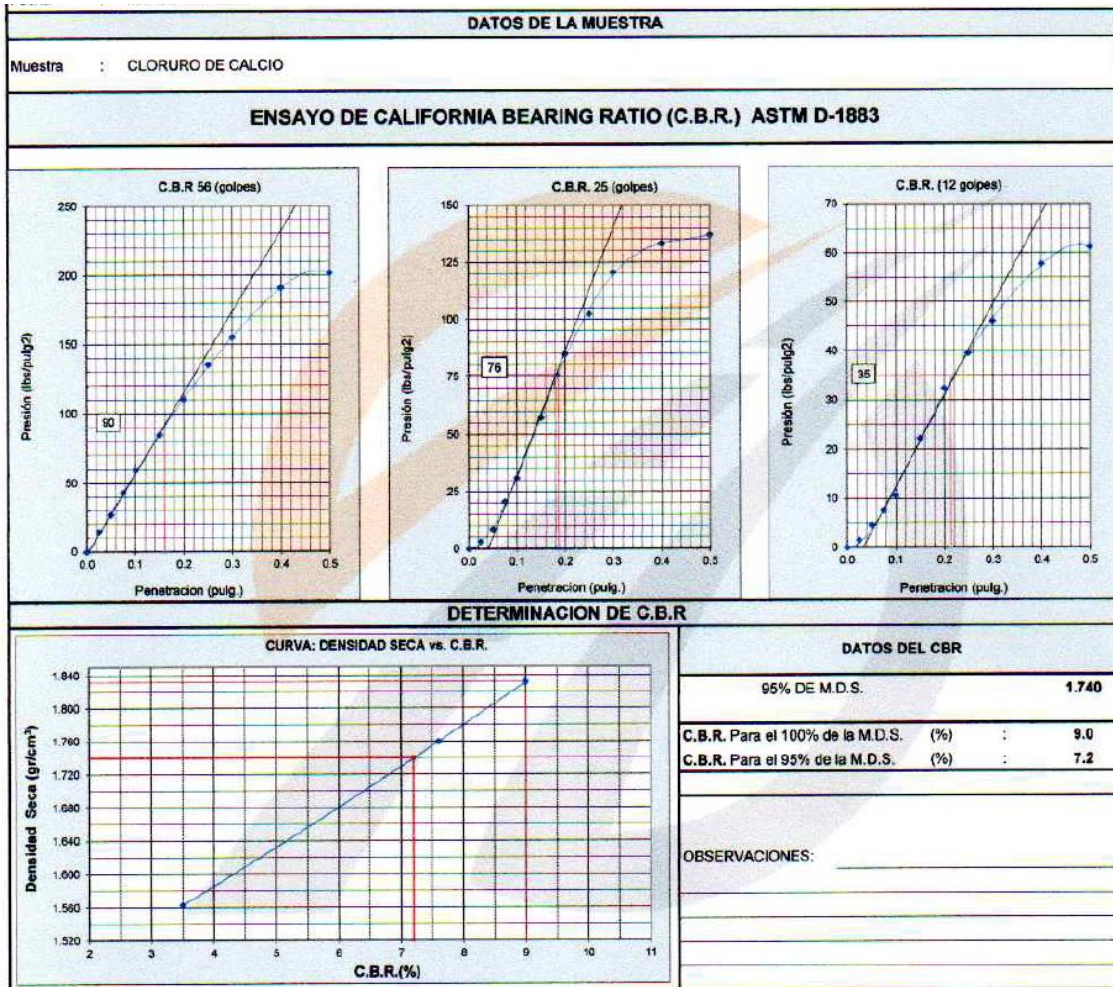


Fuente: resultados obtenidos del ensayo de laboratorio Geotecnia F&G Eirl.

**Interpretación:** el resultado del Proctor modificado para la muestra que contiene el 5% de cloruro de calcio líquido, el óptimo contenido de humedad es 15.8%, con este resultado se consigue una máxima densidad seca (MDS) de 1.832 gr/cm³.

Asimismo, en la figura 8 se puede apreciar la máxima densidad seca que se consigue para el óptimo contenido de humedad.

**Figura 9. CBR vs Densidad Seca (g/cm<sup>3</sup>)**



Fuente: resultados obtenidos del ensayo de laboratorio Geotecnia F&G Eirl.

**Interpretación:** con los valores obtenidos en el ensayo de CBR de la muestra con el 5% de cloruro de calcio líquido se obtiene que el CBR al 95% de la MDS es de 7.2% y el CBR al 100% de la MDS es de 9.0% con un óptimo contenido de humedad de 15.8%

## Resumen de resultados muestra con 5% de cloruro de calcio liquido

**Tabla 11. Resultado de ensayos muestra con 5% cloruro de calcio**

<i>ENSAYO RESULTADO</i>	
<i>Limite Liquido %</i>	39.00
<i>Limite Plástico %</i>	21.25
<i>Índice de Plasticidad IP %</i>	17.75
<i>Proctor Modificado</i>	
<i>MDS gr/cm<sup>3</sup></i>	1.832
<i>Optimo Contenido de humedad %</i>	15.8
<i>CBR</i>	
<i>CBR diseño al 95% de la MDS %</i>	7.2
<i>CBR diseño al 100% de la MDS %</i>	9.0

Fuente: elaboración propia resultados obtenidos del ensayo de laboratorio Geotecnia F&G Eirl.

### 4.3. Resultado de los ensayos con 5% de asfalto liquido RC-250

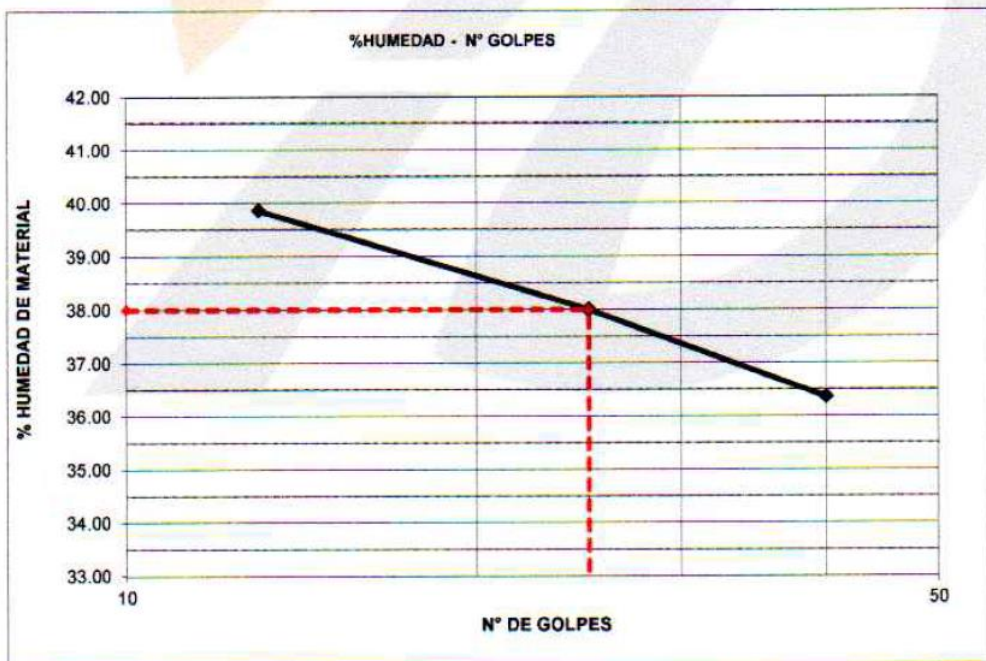
#### Limite líquido y limite plástico

**Tabla 12. Resultados de los ensayos limite liquido y limite plastico con 5% de RC-250**

Nro. DE ENSAYO	LIMITE LIQUIDO			LIMITE PLASTICO		
	1	2	3	1	2	3
PESO TARA + SUELO HUMEDO (gr.)	30.00	30.00	30.00	35.00	35.00	35.00
PESO TARA + SUELO SECO (gr.)	22.00	21.74	21.45	28.85	28.80	28.80
PESO DE LA TARA (gr.)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
PESO DEL AGUA (gr.)	8.00	8.26	8.55	6.15	6.20	6.20
PESO SUELO SECO (gr.)	22.00	21.74	21.45	28.85	28.80	28.80
CONTENIDO DE HUMEDAD (%)	36.36	37.99	39.86	21.32	21.53	21.53
Nro. DE GOLPES	40	25	13	21.46		

Fuente: resultados obtenidos del ensayo de laboratorio Geotecnia F&G Eirl

**Figura 10. Gráfico de fluidez**



Fuente: resultados obtenidos del ensayo de laboratorio Geotecnia F&G Eirl.

**Interpretación:** El resultado del ensayo de límite líquido y límite plástico agregando el aditivo asfalto líquido al 5% se muestran en la tabla N12. El límite líquido obtenido de la muestra con aditivo es de 38% tal y como se aprecia en la figura N10 y el límite plástico obtenido de la muestra con aditivo asfalto líquido al 5% es de 21.46%.

**Índice de plasticidad**

**Tabla 13. Resultado de ensayos**

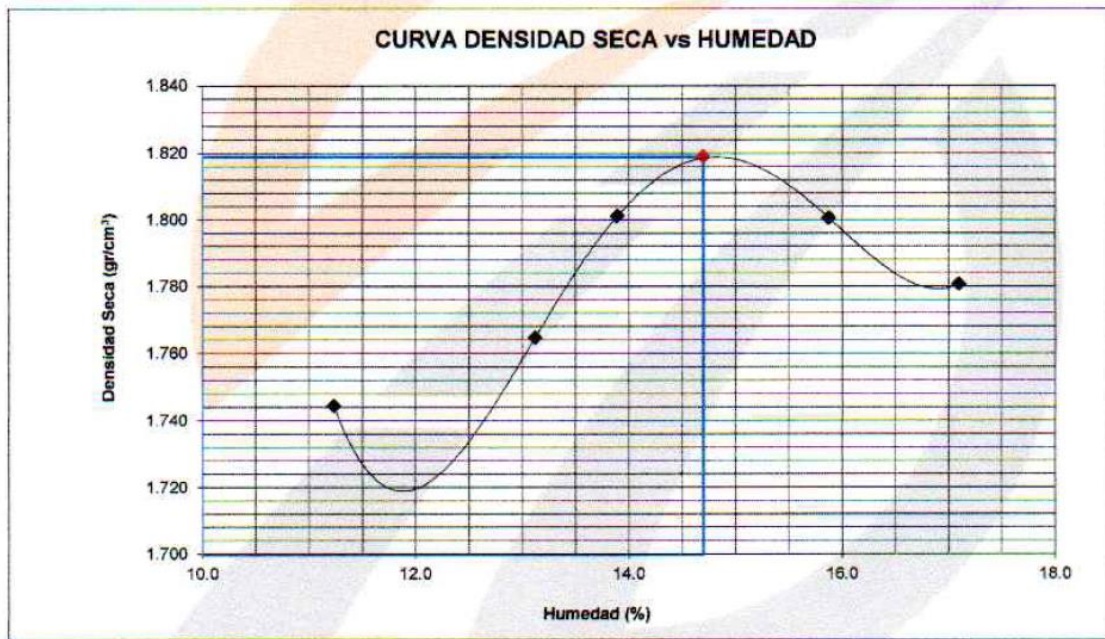
<b>LIMITE LIQUIDO</b>		
(MTC E-110,ASTM D-4318 y AASHTO T89)		
LL :	%	38.00
<b>LIMITE PLASTICO</b>		
(MTC E-111,ASTM D-4318 y AASHTO T90)		
LP :	%	21.46
<b>INDICE DE PLASTICIDAD</b>		
ASTM D-438		
IP :	%	16.54

Fuente: resultados obtenidos del ensayo de laboratorio Geotecnia F&G Eirl.

**Interpretación:** el índice de plasticidad de la muestra con asfalto líquido al 5% resultado 16.54%. ver tabla N13.

**Proctor modificado y CBR de la muestra con 5% de cloruro de calcio**

**Figura 11. Curva de compactación Proctor modificado**



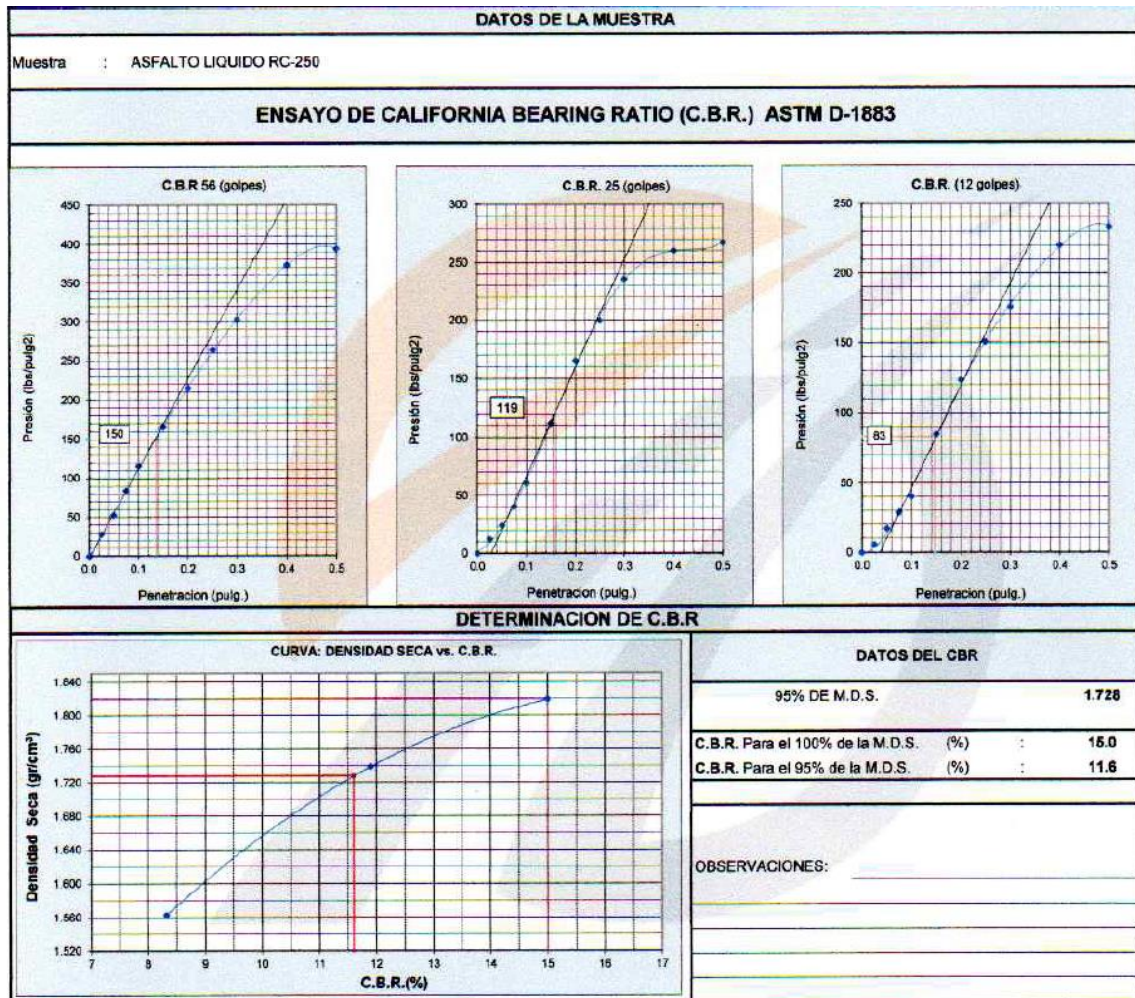
Fuente: resultados obtenidos del ensayo de laboratorio Geotecnia F&G Eirl.

**Interpretación:** el resultado del Proctor modificado para la muestra que contiene el 5% de asfalto líquido, el óptimo contenido de humedad es 14.7%, con este resultado se logra una máxima densidad seca (MDS) de 1.819 gr/cm³.

En la figura N11 se puede evidenciar la máxima densidad seca que se consigue para el óptimo contenido de humedad.



**Figura 12. CBR vs Densidad Seca ( $\text{g/cm}^3$ )**



Fuente: resultados obtenidos del ensayo de laboratorio Geotecnia F&G Eirl.

**Interpretación:** con los valores obtenidos en el ensayo de CBR de la muestra con el 5% de asfalto liquido se obtiene que el CBR al 95% de la MDS es de 11.6% y el CBR al 100% de la MDS es de 15% con un óptimo contenido de humedad de 15.8%.

## Resumen de resultados muestra con 5% de cloruro de calcio liquido

**Tabla 14. Resultado de ensayos muestra con 5% cloruro de calcio**

<i>ENSAYO</i>	<i>RESULTADO</i>
<i>Limite Liquido %</i>	38.00
<i>Limite Plástico %</i>	21.46
<i>Índice de Plasticidad IP %</i>	16.54
<i>Proctor Modificado</i>	
<i>MDS gr/cm<sup>3</sup></i>	1.819
<i>Optimo Contenido de humedad %</i>	14.70
<i>CBR</i>	
<i>CBR diseño al 95% de la MDS %</i>	11.60
<i>CBR diseño al 100% de la MDS %</i>	15.00

Fuente: elaboración propia resultados obtenidos del ensayo de laboratorio Geotecnia F&G Eirl.

#### 4.4. Análisis de resultados

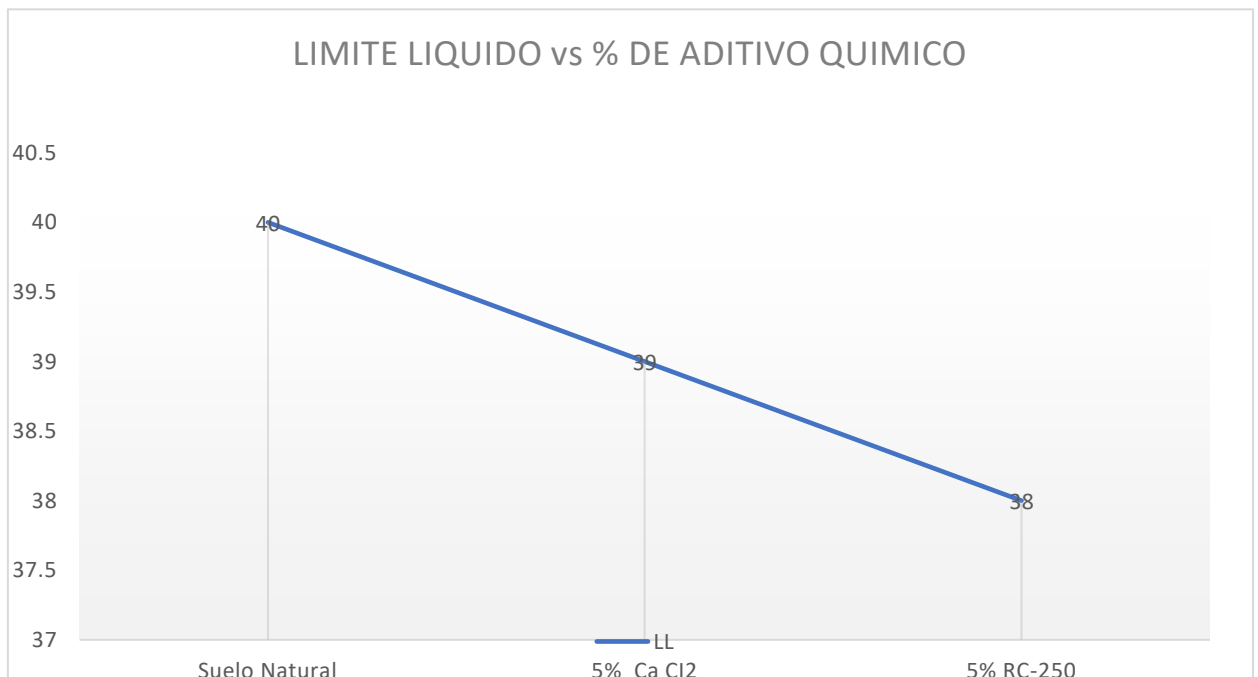
#### Limite líquido, limite plástico y índice de plasticidad

**Tabla 15. Resumen límites de Atterberg**

% de Aditivo Químico	Limite Líquido	Limite Plástico	Índice de Plasticidad	% que decae el IP
Suelo Natural	40	20.56	19.44	
5% cloruro de calcio líquido	39	21.25	17.75	9.00
5% de asfalto líquido RC-250	38	21.46	16.54	15.00

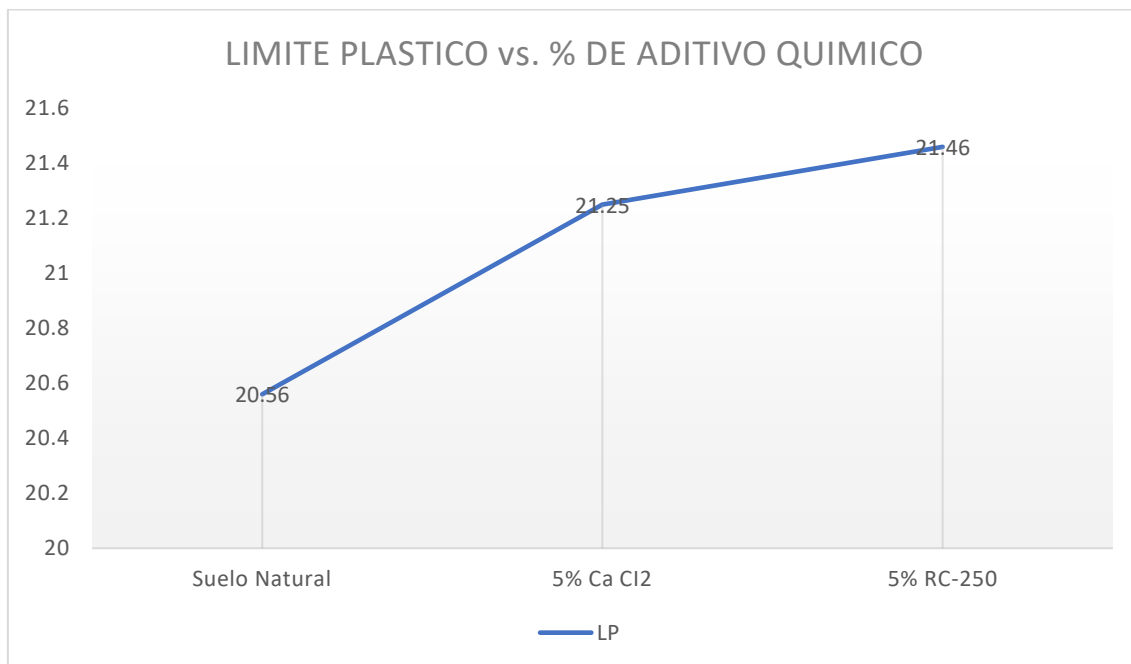
Fuente: elaboración propia resultados obtenidos del ensayo de laboratorio Geotecnia F&G Eirl.

**Figura 13. Comportamiento del límite líquido frente a adición de aditivos químicos**



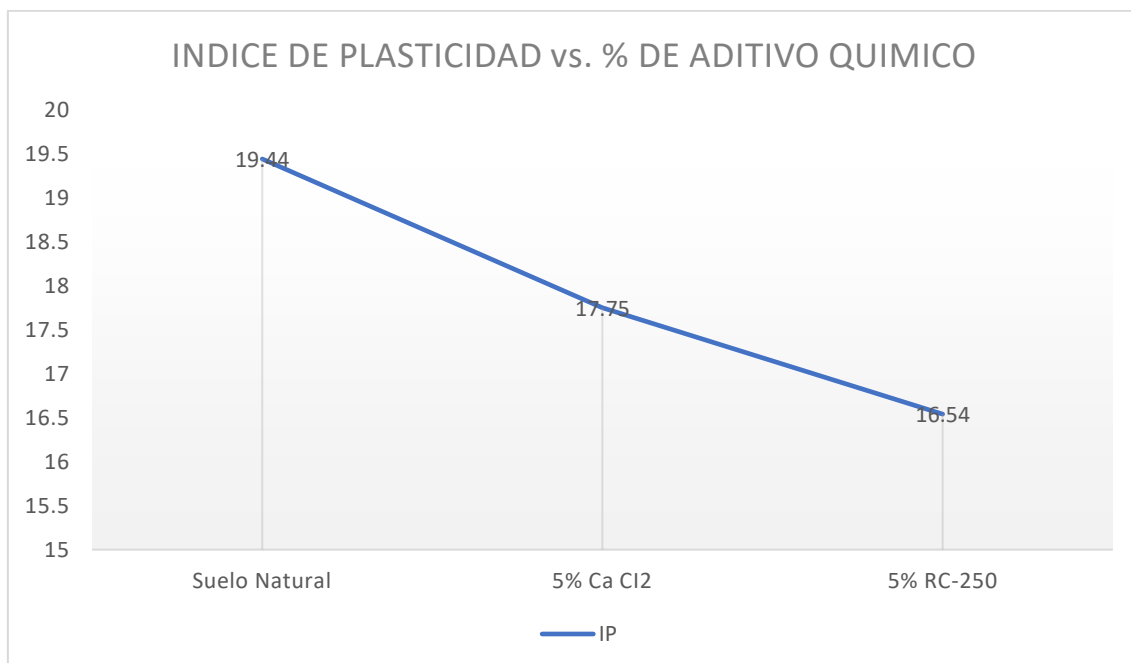
Fuente: elaboración propia, 2022.

**Figura 14. Comportamiento del límite plástico frente a adición de aditivos químicos**



Fuente: elaboración propia, 2022

**Figura 15. Comportamiento del índice de plasticidad frente a adición de aditivos químicos**



Fuente: elaboración propia, 2022

En la figura N13 se puede evidenciar como el límite líquido sufrió un decrecimiento en sus valores al adicionarle los aditivos químicos, esto se debe a que al sellamiento que ocurre en los espacios de las partículas de arcilla con lo cual se obstaculiza el ingreso del agua. De esta forma el límite plástico tubo un incremento considerable y el índice de plasticidad decreció de forma considerable.

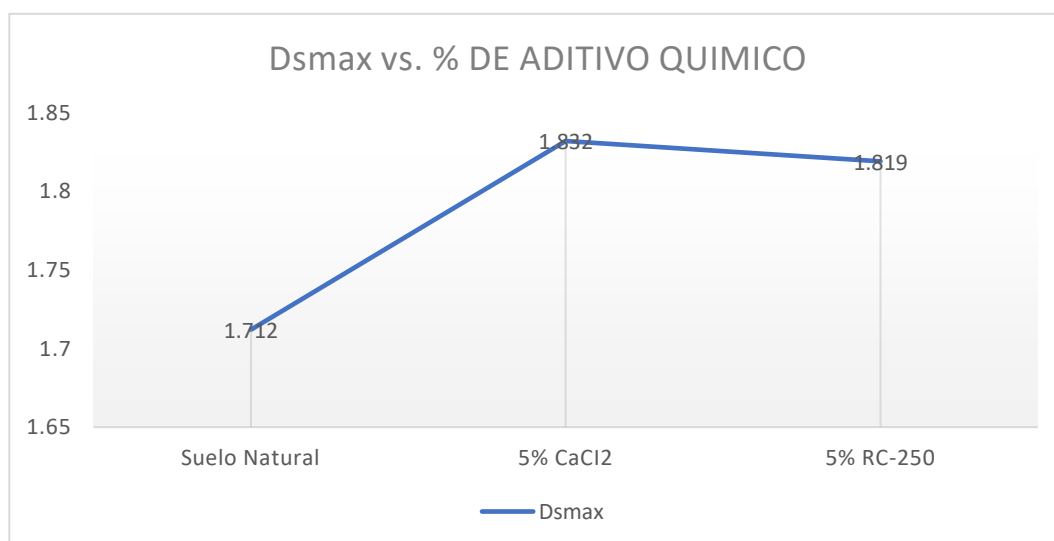
## PROCTOR Y CBR

**Tabla 16. PROCTOR Y CBR**

% de Aditivo Químico	Dsmax (gr/cm <sup>3</sup> )	W %	CBR al 95% de la MDS	CBR al 100% de la MDS	% variación de CBR
Suelo Natural	1.712	15.8	3.70	5.0	35.13
5% de CaCl <sub>2</sub>	1.832	15.8	7.20	9.0	25.00
5% de RC-250	1.819	14.7	11.60	15.0	29.31

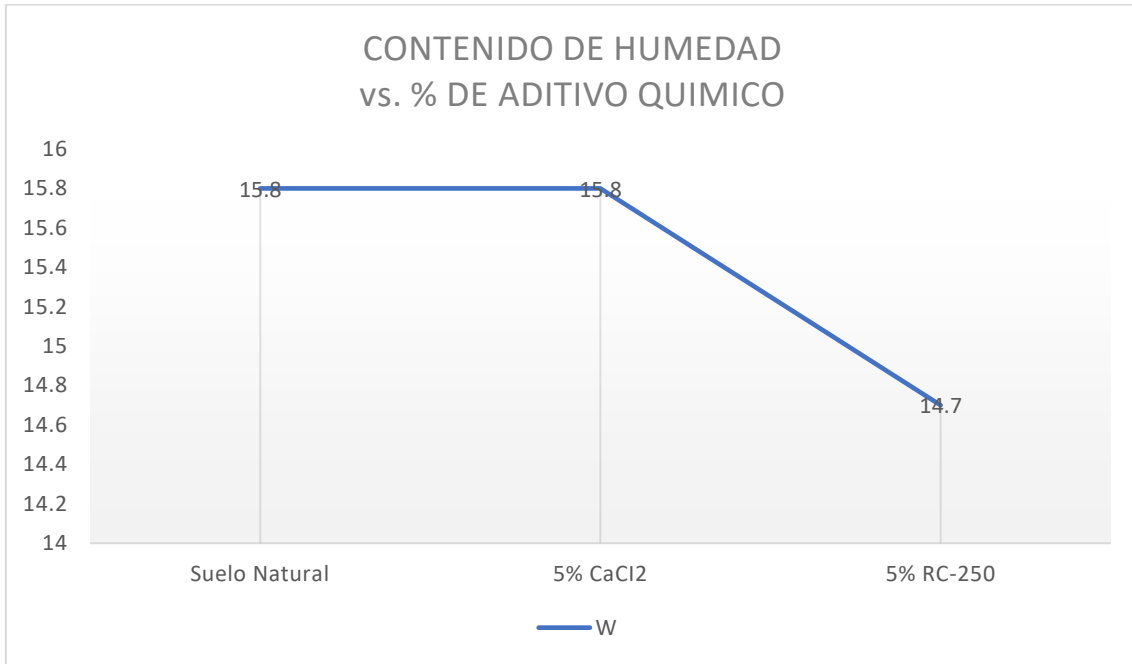
Fuente: elaboración propia resultados obtenidos del ensayo de laboratorio Geotecnia F&G Eirl

**Figura 16. Comportamiento del Dsmax frente a adición de aditivos químicos**



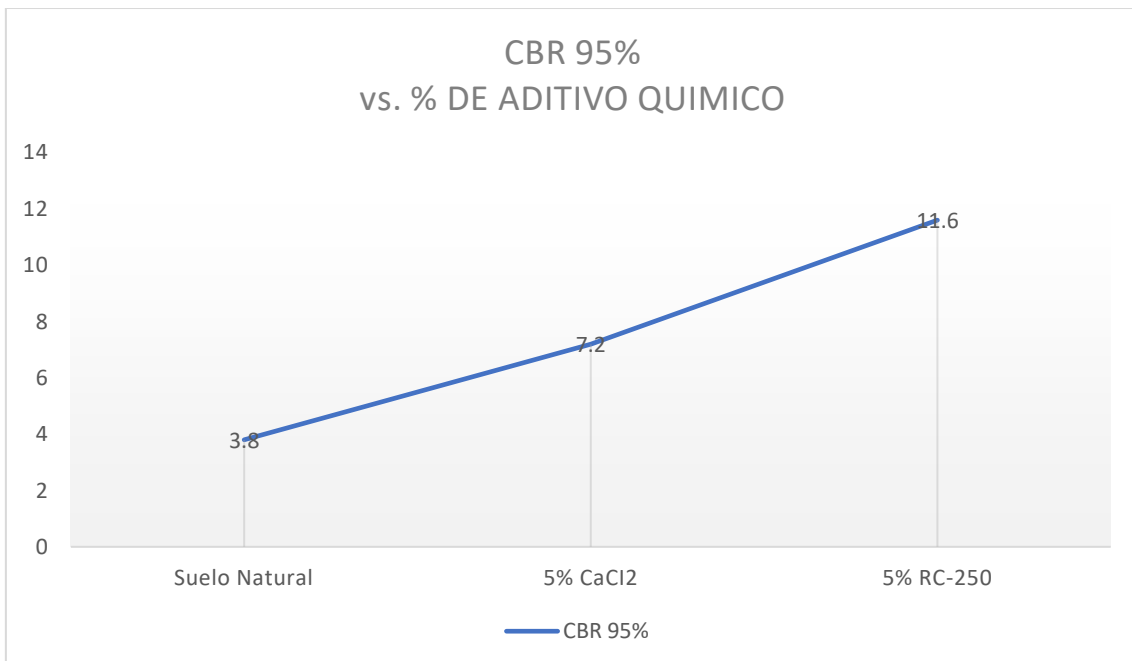
Fuente: elaboración propia, 2022

**Figura 17. Comportamiento del contenido de humedad optima frente a adición de aditivos químicos**



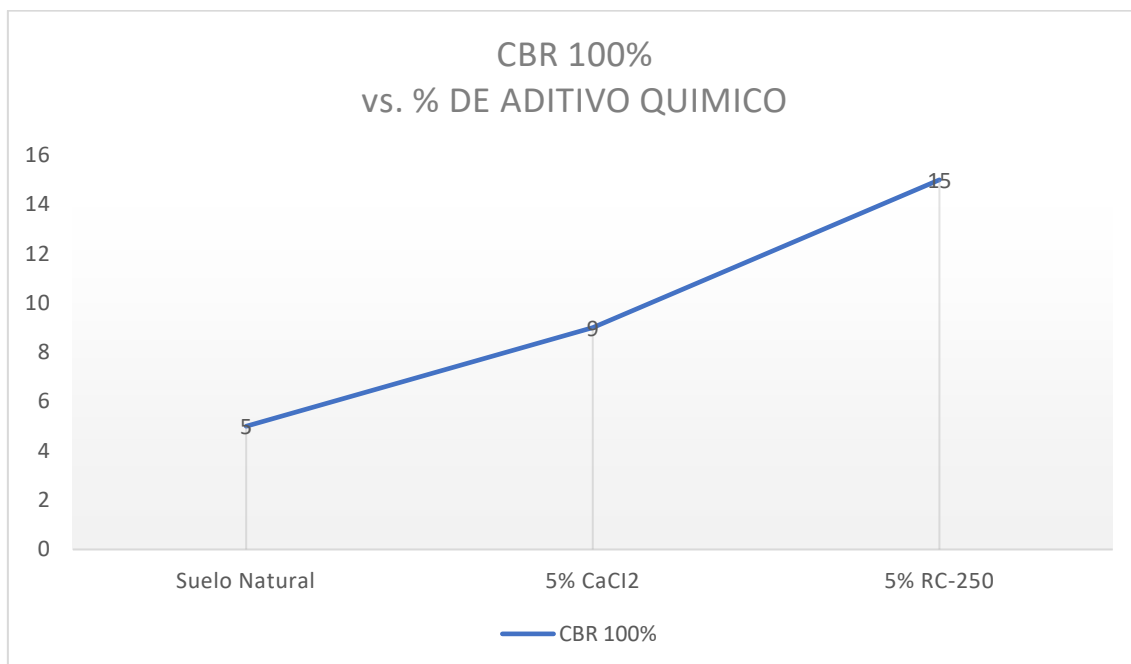
Fuente: elaboración propia, 2022.

**Figura 18. Comportamiento del CBR al 95% frente a adición de aditivos químicos**



Fuente: elaboración propia, 2022

**Figura 19. Comportamiento del CBR al 100% frente a adición de aditivos químicos**



Fuente: elaboración propia, 2022.

En la figura 16 se identifica que la  $D_{smax}$  aumenta al agregar el 5% de  $CaCl_2$ .

En la figura 17 se establece que el contenido de humedad permanece intacto al adicionar el 5% de  $CaCl_2$  y decrece con la adición del 5% del RC-250

En la figura 19 se observa que el CBR al 100% aumenta al adicionarle el 5% del asfalto liquido RC-250

## V. DISCUSIÓN

Según el tipo de suelo corresponde a la apertura C-3. Se hará una comparación correspondiente de los valores de CBR (%) correspondientes al 100% de máxima densidad seca, obtenida del ensayo de California Bearing Ratio C.B.R. basado en una prueba de muestra estándar, que es una prueba realizada sin ninguna prueba adicional, cloruro de calcio, para comparar con muestras de prueba al 5% Cloruro de calcio por metro cúbico de materia prima. Para realizar la comparación correspondiente, se realizará el cálculo del cambio porcentual con base en los resultados de la mezcla estándar, se determinará el porcentaje y aumento de la capacidad de carga resultante de la adición de cloruro de calcio de muestra de estudio.

Según lo obtenido el aditivo correcto es el cloruro de calcio, es un componente inorgánico, una sal con la fórmula química  $\text{CaCl}_2$ . Son escamas o gránulos de color blanco a temperatura ambiente y muy solubles en agua. El secador de cloruro de calcio funciona bien en el rango de temperatura desde congelación hasta  $80^\circ\text{C}$  o más. El cloruro de cal es el compuesto activo. El cloruro de calcio se usa comúnmente como agente descongelante o control de polvo en caminos empedrados, en el alimento o como absorbente en secadoras. En muchas partes del mundo, el cloruro de calcio procede de la piedra caliza como subproducto del procedimiento Solvay. Asimismo, el cloruro de cal se puede conseguir de la purificación de salmuera.

De esta forma, su uso como aditivo facilita la hidratación durante el fraguado y fijación del hormigón. Los aditivos son modificadores y aditivos para mezclas de concreto. Es un producto soluble en agua, que se adicionan en el amasado, en proporciones que no excedan el 1% en masa de cemento, con el objeto de provocar un cambio en la conducta del concreto en su estado nuevo o en condiciones de trabajo.



## VI. CONCLUSIONES

- Se realizó el ensayo de sus propiedades físicas y se concluye que las características del suelo son: porcentaje de grava 0%, porcentaje de arena 9.00% y cantidad de finos 81.34%, limite liquido 40%, limite plástico 20.56% e índice de plasticidad de 19.44%.
- Se determinó la clasificación de los suelos por los métodos de SUCS y AASHTO y se concluyó que la muestra patrón en estudio es un suelo arcilloso de baja plasticidad CL conforme al método SUCS y un suelo arcilloso plástico con índice de grupo 16; A-6 (16) según AASHTO. Este suelo estaría clasificado de regular a malo como terreno de fundición para obras viales.
- Con la adición de los aditivos químicos Cloruro de calcio liquido en su forma comercial KD-40 y el asfalto liquido RC-250 de determino la MDS en los siguientes valores 1.832 para el CaCL<sub>2</sub>, 1.819 para el RC-250 y 1.712 para el suelo natural. En cuanto al CBR se obtuvieron los siguientes valores con la adición del 5% de aditivo; al 95% de MDS para el CaCL<sub>2</sub> es 7.20% y al 95% de MDS para el RC-250 es 11.60%, para el suelo natural el valor es 3.80%; al 100% de MDS para el CaCL<sub>2</sub> es 9.00% y al 100% de la MDS para el RC-250 es 15.0%, para el suelo natural el valor es 5.0%.
- En base al resultado obtenido de los ensayos de laboratorio se concluye que para el tipo de suelos de huancaspata el aditivo correcto sería el asfalto liquido RC-250 y el porcentaje optimo sería el 5% ya que con este se logró elevar el CBR de forma considerable.

## VII. RECOMENDACIONES

- Dadas las circunstancias del suelo y de la zona es recomendable realizar la toma de muestras en épocas oportunas.
- Se recomienda utilizar el 5% de asfalto líquido RC-250 para estabilizar el suelo en las condiciones dadas con esto se garantiza un incremento del CBR al 15%
- Según el manual de carreteras de bajo volumen del MTC recomienda que cuando las subrasantes tengan un CBR menor al 6% se debe de excluir el material e instalar como reemplazo un material granular que cuente con un CBR mayor al 10% y un índice de plasticidad menos al 10%. En esta investigación el CBR obtenido de la subrasante fue de 5% por lo cual no se recomienda construir sobre esta.
- Se sugiere para unas futuras investigaciones trabajar con diferentes dosificaciones y analizar los costos de este tipo de estabilización para que pueda ser viable.

## REFERENCIAS

- Akbar , A., Olgun, G., Asghar, A., & Shojaei, M. (2017). Fundamentals of soil stabilization. *International Journal of Geo-Engineering*, 8(26). Obtenido de <https://link.springer.com/article/10.1186/s40703-017-0064-9>
- Alfionita, T., & Zainul, R. (2019). Calcium Chloride (CaCl<sub>2</sub>): Characteristics and Molecular Interaction in Solution. *INA-Rxiv papers*.
- Bualuang, T., Jitsangiam, P., & Tanchaisawat, T. (2021). Sustainable flexible pavement base stabilization with pozzolanic materials incorporating sodium hydroxide and asphalt emulsion. *Transportation Engineering*, 6, 1-9. doi:10.1016/j.treng.2021.100094
- Calcinor. (2021). *Calcinor.com*. Recuperado el 13 de enero de 2022, de <https://www.calcinor.com/es/actualidad/reviews-producto/cal-estabilizacion-de-suelos>
- Carrasco, S. (2017). *Metodología de la investigación*. Lima - Perú: San Marcos.
- Castillo, S. (2019). *Tipos de suelo en la construcción*. Obtenido de Fultum: <https://www.fultum.com.mx/tipos-de-suelo-en-la-construccion>
- Chinchay, L. (2018). *Influencia del aditivo Sika Dust Seal como agente estabilizador de suelos en la trocha carrozable tramo La Serma - Tambillo Jaen, Cajamarca (tesis de pregrado)*. Universidad Nacional de Cajamarca. Cajamarca.
- Das, B. (2019). *Advanced Soil Mechanics*. Boca Raton: Taylor & Francis Group.
- Duclos, A., Ambaiowei, D., & Wheildon, L. (2017). Effectiveness and Benefits of Calcium Chloride Stabilized Road Base: A Township of Woolwich Study. *Presentation at the Innovations in Pavement Management, Engineering and Technologies Session of the 2017 Conference of the Transportation Association of Canada St. John's, NL*.
- Fatahi, B., Khabbaz, H., & Fatahi, B. (junio de 2012). Mechanical characteristics of soft clay treated with fibre and cement. *Geosynthetics International*, 19(3), 252-262. Recuperado el 11 de enero de 2022, de <https://www.icevirtuallibrary.com/doi/abs/10.1680/gein.12.00012>
- Fondjo, A., Theron, E., & Ray, R. (6 de junio de 2021). Stabilization of Expansive Soils Using Mechanical and Chemical Methods: A Comprehensive

- Review. *Civil Engineering and Architecture*, 9(5), 1295-1308.  
doi:10.13189/cea.2021.090503
- Gago, M. (16 de noviembre de 2017). *Ecología verde*. Obtenido de <https://www.ecologiaverde.com/el-suelo-arcilloso-681.html>
- Gamero, C. (2019). *Capacidad portante (CBR) de un suelo areno arcilloso con la incorporación de asfalto líquido RC- 250 al 2%, 4% y 6%*. (tesis de pregrado). Universidad Privada del Norte. Lima.
- Hernández, R., Fernández , C., & Baptista , P. (2014). *Metodología de la investigación*. México: McGraw Hill.
- Junco, J., & Tejeda, E. (agosto de 2011). Aditivo químico obtenido de sales cuaternarias empleado para la estabilización de suelos arcillosos de subrasantes de carreteras. *Revista de Arquitectura e Ingeniería*, 5(2). Recuperado el 13 de enero de 2022, de <https://www.redalyc.org/pdf/1939/193921394002.pdf>
- Kumar, D. (enero de 2014). A Study of Correlation Between California Bearing Ratio (CBR) Value With Other Properties of Soil. *Internacional Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, 4(1). Recuperado el 11 de enero de 2022, de <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.643.688&rep=rep1&type=pdf>
- Llamoga, L. (2017). *Evaluación del potencial de expansión y capacidad portante de suelos arcillosos usados en subrasantes al adicionar ceniza de cascarilla de arroz, Cajamarca 2016*. Cajamarca.
- Manzano, P. (2021). *Correlación entre el CBR, DCP, propiedades Índice y mecánicas en suelos del cantón Píllaro; Parroquia Marcos Espinel; de la provincia de Tungurahua*. Universidad Técnica de Ambato. Ambato.
- Mapfre. (2017). *Prontuario Características técnicas de los terrenos y cimentaciones adecuadas a los mismos* . Lima.
- MTC. (2016). *Manual de ensayos de materiales*. Lima: Ministerio de transporte y comunicaciones.
- Muñoz, I. (marzo de 2018). *Comportamiento de los suelos y procesos de mejoramiento*. Obtenido de <https://infobasicingcivil.blogspot.com/2018/03/caracteristicas-del-comportamiento-de.html>

- Palomino, J., Peña, J., & Zevallos, G. (2019). *Metodología de la investigación. Guía para elaborar un proyecto en salud y educación*. Lima: Editorial San marcos.
- Palomino, K., & Ravines, I. (2016). *Capacidad portante (CBR) de un suelo arcilloso, con la incorporación del estabilizador Maxxseal 100*. Cajamarca.
- Polidori, E. (octubre de 2007). Relationship Between the Atterberg Limits and Clay Content. *Soils and Foundations*, 47(5), 887-896. Recuperado el 11 de enero de 2022, de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038080620304807>
- Ponce, D. (2018). *Uso del cloruro de calcio para estabilización de la subrasante en suelos arcillosos de la avenida Ccoripaccha - Puyhuan Grande - Huancavelica (tesis de pregrado)*. Universidad Nacional de Huancavelica. Huancavelica.
- Puppala, A., & Pedarla, A. (19 de junio de 2017). Innovative ground improvement techniques for expansive soils. *Innovative Infrastructure Solutions*, 2(24). Recuperado el 12 de enero de 2022, de <https://link.springer.com/article/10.1007/s41062-017-0079-2>
- REPSOL. (2016). *Asfalto líquido RC-250*. Obtenido de [https://www.repsol.pe/imagenes/repsolporpe/es/ASFALTO\\_LIQUIDO\\_RC250\\_tcm76-83172.pdf](https://www.repsol.pe/imagenes/repsolporpe/es/ASFALTO_LIQUIDO_RC250_tcm76-83172.pdf)
- Rojas, J. (2018). *Aplicación de la emulsión asfáltica en la estabilización de la subrasante de la carretera afirmada de tercera clase, Emp. PE 18 Quilca – Cochamarca, año 2017*. (tesis de pregrado). Universidad César Vallejo. Lima.
- Rojas, J., & Alva, J. (2016). *Arcillas y lutitas expansivas en el norte y nororiente peruano*. Lima.
- Shaivan, H., & Sridharan, A. (19 de junio de 2020). Comparison of Reduced Modified Proctor vs Modified Proctor. *Geotechnical and Geological Engineering*, 38, 6891-6897. Recuperado el 11 de enero de 2022, de <https://link.springer.com/article/10.1007/s10706-020-01405-3>
- Sharo, A., Abdulla, A., & Al-Tawaha, M. (2018). Feasibility of Calcium Chloride Dehydrate as Stabilizing Agent for Expansive Soil. *Journal of Engineering Science and Technology Review*, 11(6), 156-161. doi:10.25103/jestr.116.19


- Shi, C. (septiembre de 2001). Formation and stability of  $3\text{CaO}\cdot\text{CaCl}_2\cdot 12\text{H}_2\text{O}$ . *Cement and Concrete Research*, 31(9), 1373-1375. Recuperado el 12 de enero de 2022, de <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0008884601005762>
- Sika. (2018). *Hoja técnica Sika Dust Seal PE*.
- Sulla, D. (2018). *Evaluación de la aplicación del polímero Sika Dust Seal PE en caminos no pavimentados, intersección Av. San Luis y cuadra 1 - Palian - Huancayo 2017*. Universidad Peruana de los Andes. Huancayo.
- Yato, V., Moupe, S., Manefouet, B., Sylvain, A., Wouatong, L., & Aleh, L. (21 de junio de 2018). Correlation of California Bearing Ratio (CBR) Value with Soil Properties of Road Subgrade Soil. *Geotechnical and Geological Engineering*, 37, 217-234. Recuperado el 11 de enero de 2022, de <https://link.springer.com/article/10.1007%2Fs10706-018-0604-x>
- Zumrawi, M., & Eltayeb, K. (2017). Laboratory Investigation of Expansive Soil Stabilized with Calcium Chloride. *International Journal of Environmental, Chemical, Ecological, Geological and Geophysical Engineering*, 10(2). Recuperado el 14 de enero de 2022, de <https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/42970694/laboratory-investigation-of-expansive-soil-stabilized-with-calcium-chloride-with-cover-page-v2.pdf?Expires=1642175708&Signature=BragiGeZzwld85uCeWU-J5AhY8w9RqluAwgS3dpIY-LPIfEvQe-DFhV4gOMvcmOly6bU~fUnfFFXlznz>

## ANEXOS

### Anexo 1. Matriz de operacionalización de variables

Variables	Definición conceptual	Definición operacional	Dimensiones	Indicadores	Escala
<b>Variable independiente:</b> Aditivos químicos	Aditivos químicos, son sustancias químicas que modifican las características de los suelos, reduciendo la plasticidad y aumentando la cohesión y la capacidad de soporte (Junco & Tejeda, 2011).	La selección del porcentaje de aditivo depende de la clasificación del suelo, los límites de Atterberg, la densidad en estado seco y el valor del California Bearing Ratio (Puppala & Pedarla, 2017)	Cloruro de Calcio Líquido	Máxima Densidad Seca	Kg/cm <sup>3</sup>
				California Bearing Ratio	%
			Asfalto líquido RC-250	Máxima Densidad Seca	Kg/cm <sup>3</sup>
				California Bearing Ratio	%
<b>Variable dependiente:</b> Estabilización de suelos arcillosos	Estabilización de suelos arcillosos, es el proceso al que son sometidos los suelos naturales arcillosos para mejorar sus cualidades y facilitar los trabajos de construcción reduciendo problemas en estructuras y pavimentos (Calcinor, 2021).	La estabilización del suelo arcilloso permite incrementar la capacidad portante del suelo compactado y disminuyendo su índice de plasticidad- otorgándole mayor estabilidad volumétrica (Muñoz, 2018)	Propiedades físicas del suelo	Limite Líquido	Adimensional
				Limite Plástico	Adimensional
				Índice de plasticidad	Adimensional
			Propiedades Mecánicas del suelo	Máxima Densidad Seca	Kg/cm <sup>3</sup>
				California Bearing Ratio	%

## Anexo 2. Ficha de recolección de datos

 Proyecto: “Estudio Comparativo de la Estabilización de Suelos Arcillosos Utilizando Aditivos Químicos, Huancaspata, 2022”							
Lugar y Fecha:							
Elaborado por:							
Muestra	LL	LP	IP	Proctor		CBR	
				MDS	OCH	95%	100%