

1 CAPÍTULO I: DISEÑO TEÓRICO

1.1 Introducción

La resistencia de los suelos arcillosos constituye un aspecto fundamental en el campo de la Ingeniería geotécnica, ya que determina la capacidad del suelo para soportar cargas sin experimentar fallas. Este tipo de suelos se caracteriza por su alta plasticidad, baja permeabilidad y una significativa sensibilidad al contenido de humedad, lo que puede afectar considerablemente su comportamiento mecánico. Los suelos arcillosos son muy comunes y deben ser aprovechados, pero para esto deben ser modificados de manera tal que cumplan con las características del suelo para infraestructura, agregando aditivos o por procesos mecánicos. Por lo tanto, en el presente trabajo de investigación se pretende evaluar el comportamiento de manera experimental y específica de la cohesión y resistencia a la compresión no confinada de un suelo arcilloso con la adición de diferentes tipos de cloruro como estabilizante químico, con este fin, se evalúa el comportamiento del material mediante ensayos de laboratorio, cuantificándose diferentes medidas del suelo y aditivo.

La resistencia al esfuerzo cortante, particularmente, es una propiedad clave que influye en el diseño de cimentaciones, taludes y estructuras de contención.

Debido a la naturaleza cohesiva de estos materiales, técnicas de estabilización y mejora del suelo como la adición de agentes químicos, han sido ampliamente estudiadas con el objetivo de incrementar su resistencia y mejorar su comportamiento ante cargas aplicadas. En este trabajo se expondrá al cloruro como estabilizante químico, con el cual se quiere lograr determinar de manera minuciosa la variación de la cohesión y resistencia a la compresión no confinada en un suelo arcilloso.

A través de la experiencia de los ingenieros geotecnistas se ha demostrado que dicha propiedad es un factor relevante en el diseño de cimentación de cualquier estructura para la prevención de la inestabilidad durante su vida útil. De igual manera estos suelos arcillosos están presentes en casi todas las regiones del país y evitarlos es casi que inevitable y en costos económicos no sale conveniente remover una gran cantidad de este suelo y sustituirlo por otro con mejores características.

Por lo anterior se hace conveniente desde todo punto de vista la estabilización del suelo, lo cual permite lograr un cambio considerable de las características físico-mecánicas, particularmente mejorar el comportamiento del suelo ante la acción de cargas y generar ahorros en términos económicos.

La construcción de obras viales, como principio, se basa en el aprovechamiento de suelos locales como material de fácil obtención y de bajo costo, pero que en ocasiones necesitan ser mejorados, dado que no cumplen las exigencias mínimas para su empleo.

1.2 Antecedentes de trabajos relacionados

La adición de cloruro disminuye las fuerzas de atracción entre las arcillas, incrementando notablemente la cohesión aparente. Las propiedades higroscópicas de estos productos mantienen la humedad en la superficie, reduciendo el punto de evaporación, si bien esta sal es fácilmente lavable.

Son muchas las sales que se pueden utilizar para la estabilización de suelos, especialmente aquellos arcillosos. Destacan el cloruro de potasio, el cloruro de magnesio, el nitrato de sodio, el cloruro de bario, el carbonato de sodio, el cloruro de calcio y el cloruro de sodio, entre otros.

A raíz de la imperiosa necesidad de construir obras civiles en zonas con carencia de agregados de buena calidad.

El cloruro de magnesio y calcio pueden aumentar la resistencia y la cohesión en las arcillas, especialmente cuando se usan para estabilizar suelos arcillosos.

Ambos son compuestos químicos de fórmula $MgCl_2$ y $CaCl_2$ respectivamente. Las sales se caracterizan por sus enlaces iónicos, lo cual da lugar a puntos de fusión relativamente altos, conductividad eléctrica en disolución o fundidas y estructura cristalina en estado sólido.

El cloruro de magnesio y calcio actúan en suelos arcillosos para mejorar su resistencia y cohesión a través de la estabilización química. Reducen la plasticidad y la humedad del suelo, promoviendo la compactación y la creación de enlaces más fuertes entre las partículas. Esto se debe a la capacidad de estos compuestos para reaccionar con los minerales del suelo, formando nuevos compuestos que endurecen el suelo y lo hacen más resistente.

- Estabilización de Suelos Arcillosos mediante Adición de Bischofita para Fines de Cimentación.

Uno de los principales problemas que afectan al Valle Chancay, Distrito de Pimentel, es el tipo de suelo que hay en aquel lugar por su alta plasticidad y su potencial de hinchamiento, generalmente no poseen una calidad adecuada para fines de cimentación, tuvo como objetivo determinar las propiedades físicas mecánicas del suelo arcilloso e incluir bischofita (cloruro de magnesio) como aditivo estabilizador del suelos con fines de cimentación, este tipo de investigación es de enfoque cuantitativo en lo cual se utilizó un diseño cuasi experimental ya que se buscó interpretar el comportamiento de este aditivo para el mejoramiento del suelo, implicó realizar 6 calicatas para estudios de mecánica de suelo, luego ser añadida con bischofita en porcentajes de 1%, 1.5%, 2%, y 3% con el fin de lograr resultados categóricos mediante ensayos correspondientes, la cual determina que en la calicata 01 arroja un buen porcentaje en contenido de humedad al 23.50%, un límite líquido de 34.40%, un límite plástico de 16.50% y un índice de plasticidad de 17.90% detallando en su descripción del suelo como arcilla arenosa de baja plasticidad tipo de suelo SC y según clasificación AASHTO con un A-4(2). Se concluye que si llegó a mejorar significativamente a estabilizar el suelo arcilloso adicionando un 1.5% de bischofita esto conlleva a comprobar que si llegó a cumplir con la hipótesis planteada generando así un gran aporte en la rama de la ingeniería.

- Estabilización química en carreteras no pavimentadas usando cloruro de magnesio, cloruro de calcio y cemento en la región Lambayeque.

Dada la problemática de hoy día en los suelos (carreteras) de la región Lambayeque como es la inestabilidad, fue el motivo que dio origen de nuestra investigación a la incorporación de aditivos para la estabilización de carreteras no pavimentadas en la región Lambayeque productos químicos como cloruro de magnesio, cloruro de calcio y cemento para brindar al suelo un mejor comportamiento en servicio y reducir el impacto ambiental. La tesis tuvo como objetivo realizar un estudio comparativo técnico y económico para evaluar la estabilidad de carreteras no pavimentadas usando el cloruro de magnesio, cloruro de calcio y cemento. La investigación que se realizó en esta tesis es experimental. Los métodos que se usaron en el desarrollo de la presente investigación implicó el proceso de estudio de mecánica de suelo, ensayos de estabilización para obtener los resultados físicas y mecánicas del

material extraído de las canteras siendo: deductivo, inductivo y análisis. Las técnicas de información básica que se obtuvieron a la incorporación de los productos químicos, cumpliendo con las normas precisadas para cada ensayo teniendo la observación y análisis de documentos, los estudios realizados en laboratorios. Se concluye que el agregado proveniente de las canteras cero escute y cachinche son materiales GP, con índice de plasticidad elevados y por ende es factible la estabilización. Se recomienda hacer ensayos con otras sales o agentes químicos que puedan producirse en el Perú y que puedan conformar nuevas alternativas para la estabilización de carreteras no pavimentadas.

- Comportamiento del cloruro de magnesio (bischofita) y óxido de calcio (cal) como estabilizadores de suelos para fines de pavimentación.

El pavimento mejora la transitabilidad vehicular, sin embargo, existen suelos como los arcillosos o limosos en donde es necesario mejorar la capacidad de la subrasante para que el pavimento se comporte eficientemente. Una forma de mejorar las propiedades del suelo es la estabilización por agentes químicos. El óxido de calcio, más conocido como cal, es un aglutinante conocido a nivel mundial. Pero el cloruro de magnesio o también llamado bischofita, tiene un uso reciente para fines de estabilización de suelos dado que se ha utilizado como controlador de polvo. Esta investigación tiene el objetivo de revisar sistemáticamente la literatura del uso de bischofita y cal como estabilizadores de suelos para fines de pavimentación. Los resultados mostraron que la estabilización con bischofita en un 4% y cal en porcentajes entre 4% a 7% mejoran las propiedades físicas y mecánicas del suelo, especialmente el CBR y el ensayo de resistencia a compresión uniaxial. Se concluye que la bischofita tiene un excelente comportamiento, aunque existen pocas investigaciones y para la cal se analizaron las mejoras de las propiedades físicas y mecánicas para diferentes tipos de suelo.

- Evaluación de las propiedades mecánicas de suelos cohesivos con cloruro de calcio para estabilización de subrasantes de pavimentos urbanos, Capote – 2019.

El Centro Poblado de Capote situada en el distrito de Picsi, provincia de Chiclayo, región de Lambayeque, en su mayoría de sus pavimentos urbanos son escasos debido a que en su totalidad de sus calles no están pavimentadas al 100%, producto al poco interés que le brindan las autoridades competentes y a la deficiencia de gestión de estudios definitivos, ya que en

épocas de verano cuando llueven se empapan de lodo en su totalidad de las calles por lo cual no se pueden realizar las actividades con normalidad consecuentemente se ve afectado a la producción de los cultivos y pérdida de recursos ya que los pobladores se sustentan de esos ingresos. Por lo cual se pretende determinar y evaluar el comportamiento de las propiedades físico mecánicas de sus suelos en la estabilización de los suelos cohesivos con cloruro de calcio, y en su mayoría estos tipos de suelos son muy comunes en diferentes ramas de la construcción por lo general existen gran cantidad en el departamento de Lambayeque. Debido a la utilización de la cal viva que es otro recurso indispensable que se tiene a la mano y a un bajo costo y económico se le puede dar un buen uso de aprovechamiento correcto para conseguir resultados satisfactorios. Se concluye que es necesario conocer el grado de vulnerabilidad de las calles del centro poblado, para brindar una propuesta de solución para mejorar sus suelos a nivel de subrasantes en todas sus pavimentaciones urbanas mediante la adición de CaCl_2 , compuestos minerales, materia de investigación. Se finaliza que con la aplicación del aditivo QUIM KD – 40 mejorara satisfactoriamente la estabilización del suelo, cumpliendo con las normas y parámetros establecidos en el reglamento de acuerdo a sus propiedades mecánicas del suelo en estudio.

- Cloruro de magnesio hexahidratado en la estabilización de suelos en el anexo León Pampa, Tayacaja, Huancavelica – 2020.

La hipótesis general que se contrastó fue que la adición de cloruro de magnesio hexahidratado influye significativamente en la estabilización de suelos en el Anexo León Pampa, Tayacaja, Huancavelica – 2020”. La investigación obedece al método científico, tipo aplicada y nivel explicativo, ya que se manipuló la proporción de adición de cloruro de magnesio hexahidratado en la estabilización de suelos del Anexo León Pampa en Huancavelica. La población estuvo compuesta por los suelos de las carreteras del departamento de Huancavelica y la muestra estuvo delimitada por 200 m de carretera no pavimentada del Anexo León Pampa, distrito de Colcabamba, provincia de Tayacaja, departamento de Huancavelica. La conclusión principal fue que la adición de cloruro de magnesio hexahidratado influye significativamente en la estabilización de suelos en el Anexo León Pampa, Huancavelica, siendo el tratamiento 2 (suelo con 4% de cloruro de magnesio) que mejores resultados de CBR presentó, ya que incrementó la capacidad de soporte del suelo, entre otras propiedades como la de retener la humedad interna del suelo evitando su

disgregación y la emisión de polvo cuando se coloque en la subrasante.

1.3 **Justificación**

1.3.1 **Aporte académico**

El valor de la presente investigación es poder identificar la manera en que afectara en la cohesión y la resistencia el cloruro como estabilizante en un suelo arcilloso; siendo este uno de los materiales más abundantes del suelo natural. Se pretende aumentar la resistencia a la compresión no confinada del suelo aplicando diferentes dosificaciones de cloruro de magnesio y cloruro de calcio, tras una serie de ensayos predeterminados bajo norma.

1.3.2 **Aplicación técnica – practica**

La ciudad de Tarija es una región con múltiples tipos de suelo donde el más representativo es el suelo arcilloso el cual no cumple con los estándares normativo y constructivos para ser utilizado en la construcción, es por ello que se busca la manera de mejorar este tipo de suelo donde se ejecuten obras que necesiten un elevado valor de resistencia, es de allí que la presente investigación busca determinar qué porcentaje de cloruro de magnesio y cloruro de calcio es adecuado en el aumento de la resistencia a la compresión no confinada del suelo antes mencionado.

La aplicación se realizará al área de estabilización de taludes, ya que estos dos compuestos ($MgCl_2$ y $CaCl_2$) al ser higroscópicos, atraen y retienen humedad. Además, pueden aumentar la cohesión entre las partículas del suelo, mejorando su resistencia y estabilidad.

El presente trabajo es factible de aplicar ya que contamos con todas las herramientas tanto teóricas como prácticas para poder realizarlo.

1.3.3 **Importancia social**

Con el presente trabajo se busca proporcionar una alternativa natural, innovadora y sencilla para conseguir disminuir el riesgo de accidentes por el incremento de carga en el suelo, ya que como es de conocimiento general esto es un grave problema para diferentes tipos de

proyectos. Entre ellos la estabilización de los taludes a lo largo de las carreteras, permite asegurar su estabilidad y reducir el riesgo de deslizamientos, mejorando la seguridad vial y facilitando el transporte.

En resumen, la estabilización de taludes de suelo arcilloso con cloruro de magnesio y calcio, o con cualquier otro método adecuado, es una medida socialmente importante que contribuye a la seguridad, el desarrollo y la calidad de vida de las comunidades, especialmente en regiones como Tarija, donde los problemas de deslizamientos son comunes.

1.4 Planteamiento del problema

1.4.1 Situación problemática

En múltiples regiones rurales, los taludes conformados por suelos arcillosos de baja cohesión natural muestran inestabilidad significativa bajo lluvias intensas. Esto provoca deslizamientos frecuentes, daños a la infraestructura vial y riesgos para las comunidades locales que dependen de estos caminos para acceder a servicios y comercializar sus productos. La cohesión del suelo, que en arcillas suele ser limitada, es clave para la resistencia de un talud.

Para mejorar dicha propiedad se utilizan diferentes métodos de estabilización como ser la estabilización química, la cual consiste en añadir al suelo otros materiales, o productos químicos, que modifican sus propiedades, ya sea por una reacción fisicoquímica, o mediante la creación de una matriz que aglomere las partículas del suelo.

En suelos arcillosos se pretende mejorar sus propiedades mecánicas y geotécnicas, cambiando las propiedades fisicoquímicas iniciales del suelo nativo con el objetivo de mitigar algunos problemas como ser el tema de la baja resistencia y cohesión. Para mejorar dichas propiedades se utilizan diferentes métodos de estabilización química, como ser la estabilización con diferentes tipos de sales.

Es necesario mejorar las características físicas y mecánicas de los suelos para disminuir el riesgo de deslizamientos y colapsos, protegiendo viviendas, carreteras y otras estructuras, lo que a su vez protege a las personas y reduce el riesgo de pérdidas humanas y daños materiales.

Corresponde hacer un análisis a la resistencia y cohesión del suelo y modificarlas hacia posibles mejoras.

1.4.2 **Delimitación del tiempo y espacio**

El proceso de investigación propone desarrollarse dentro de un laboratorio de suelos. Considerando traer muestras de barrios suburbanos de la ciudad de Tarija.

1.4.3 **Formulación del problema**

¿De qué manera influye la adición del cloruro de magnesio y cloruro de calcio como estabilizantes en la cohesión y resistencia a la compresión no confinada en suelo arcilloso?

1.5 **Objetivos**

1.5.1 **Objetivo General**

Analizar la variación de las propiedades mecánicas de un suelo arcilloso de baja a media compresibilidad a través del ensayo de Compresión Inconfinada, considerando la adición de dos diferentes tipos de cloruro como agentes estabilizantes.

1.5.2 **Objetivos Específicos**

- Estudiar la teoría o respaldo científico de la Resistencia a la compresión no confinada.
- Determinar la cohesión y resistencia a la compresión inconfinada como propiedades mecánicas del suelo.
- Realizar la caracterización del suelo.
- Determinar el contenido de humedad óptimo y la densidad seca máxima.
- Preparar probetas de suelo con tres porcentajes de cloruro de calcio y tres porcentajes de cloruro de magnesio, y someterlas a ensayos de compresión no confinada.
- Calcular la cohesión de cada ensayo como la mitad de la resistencia no confinada obtenida.

- Realizar un análisis de los resultados para determinar qué tipo y qué porcentaje de cloruro maximiza la mejora de cohesión y resistencia sin generar efectos adversos.

1.6 Hipótesis

A medida que se incremente el porcentaje de $MgCl_2 \cdot 6H_2O$ y $CaCl_2$ por separado, aumentará su cohesión y resistencia del suelo arcilloso, respecto al suelo natural sin tratamiento.

1.7 Conceptualización de las variables

1.7.1 Variable independiente

Incremento de cloruro de magnesio y cloruro de calcio en diferentes porcentajes en suelo arcilloso.

1.7.2 Variable dependiente

Aumento de la cohesión y resistencia.

1.7.3 Operacionalización de las variables.

Tabla N°1: Operacionalización de variables

Variable D/I	Concepto	Dimensión	Indicadores	Valor/Acción
Aumento de la cohesión y resistencia a la compresión no confinada en suelo arcilloso con incremento de dos tipos de	Se refiere a un incremento gradual de cloruro de magnesio y cloruro de calcio a un suelo arcilloso,	1. Masa de suelo	Gramos (gr)	Preparación de la mezcla
		2. Clasificación del suelo	Parámetro de Clasificación	Clasificación del suelo a estudiar
		3. Contenido de humedad	Porcentaje (%)	Se realiza mediante algún método en

cloruro	obteniendo como resultado el aumento de la cohesión y resistencia a la compresión no confinada			especifico
		4. Compactación (Proctor Estándar)	CHO (%) Densidad máx. (g/cm ³)	Determina el CHO y la densidad máxima del suelo caracterizado
		4. Cloruro de magnesio y calcio	Porcentaje (%)	Se calcula respecto del peso total de la muestra
		5. Mezcla de suelo - cloruro	Gramos (gr)	Se realiza en función a los valores previos determinados
		6. Prueba de resistencia a la compresión no confinada	(kg/cm ²)	Determina la variación de este valor con el aditivo

Fuente: Elaboración propia

1.8 Alcance

El diseño de la investigación responde al alcance causal o explicativo debido a que la variable independiente es manipulable por el investigador, respondiendo en jerarquía a un cuasi experimento.

La investigación se realiza en un laboratorio de suelos, donde se preparan y ensayan muestras con adición de cloruro de magnesio y cloruro de calcio en concentraciones de 1,5%, 3% y 4,5%, se evalúan los efectos de estos aditivos en la cohesión y resistencia a la compresión no confinada, limitando el alcance al tipo de suelo arcilloso de baja a media compresibilidad,

sin extender los resultados a otros estabilizantes y tipos de suelo.

Finalmente, con la información que se obtendrá después de haber realizado los diferentes ensayos en laboratorio y aplicando los cálculos correspondientes, podremos determinar la manera en que se verá afectada la cohesión y la resistencia a la compresión no confinada del suelo al aplicar diferentes porcentajes de cloruro de magnesio y calcio como estabilizante.

La información obtenida servirá como alternativa para el análisis de la cohesión de suelos arcillosos aplicado a la estabilización de taludes, empleando estabilizantes naturales y fáciles de obtener como ser las diferentes clases de cloruros en estudio.

2 CAPÍTULO II: COMPRESIÓN INCONFINADA (UU) EN SUELOS FINOS

2.1 Marco conceptual

2.1.1 Suelo.

Suelo en Ingeniería Civil son los sedimentos no consolidados de partículas sólidas fruto de la alteración de las rocas, o los suelos transportados por agentes como el agua, el hielo o el viento, con la contribución de la gravedad como fuerza direccional selectiva y que puede tener, o no materia orgánica.

El conocimiento del suelo que interviene en cualquier obra civil es de suma importancia para poder estimar el comportamiento futuro que tendrá, tanto durante como después del proceso constructivo, y así evitar cualquier posible imprevisto. Todas las obras se apoyan en el suelo de alguna u otra forma, e incluso algunas lo utilizan como material constructivo (diques, terraplenes, presas de tierra, carreteras, etc.). Es lógico prever que no todos los terrenos responderán de igual forma ante las mismas condiciones que impone una construcción o bien, el propio medio ambiente. Esto es debido a los distintos tipos de suelos existentes, su estructura, origen, composición y antecedentes geológicos. Existen una serie de suelos que requieren de un análisis particular a la hora de encarar un proyecto, por los efectos adversos que puede generar la modificación de las condiciones in-situ de los mismos.

Los suelos pueden ser definidos técnicamente como la capa superficial de la corteza terrestre, que resulta de la descomposición de las rocas por los cambios bruscos de temperatura, por la acción del agua y del viento; los suelos pueden ser objeto de estudio dependiendo del campo de acción al que se esté enfrentando, en la ingeniería se hace uso de esta palabra para referirse a la parte del suelo compuesta por material mineral, inorgánico, las cuales son empleadas en todo tipo de construcción que a su vez son la base de cualquier estructura.

2.1.2 Origen y formación

En la formación de los suelos, la roca madre se ve afectada por procesos de meteorización, tanto física (desagregación) como química (alteración). Luego mediante agentes naturales

los productos de la meteorización pueden ser transportados causando la erosión de aquellas rocas más superficiales de la corteza terrestre. Estos materiales se depositarán posteriormente y mediante diversos fenómenos se consolidará el suelo propiamente dicho. Los procesos de formación del suelo se denominan edafogénesis, y los factores que intervienen en este proceso son: el clima, la topografía, la acción biológica, la composición litológica y el tiempo de actuación de todos ellos. Dentro de estas acciones debemos saber que la desagregación dará como producto gravas, arenas o limos, ya que para la formación de arcillas se requiere de transformaciones químicas. Después de la meteorización el suelo formado puede permanecer en el lugar (suelo residual) o ser transportado por agentes naturales como el agua, tanto en estado líquido como sólido, y el aire.

2.1.3 Tipos de suelos

Suelos granulares

Este tipo de suelos está formado por partículas agregadas y sin cohesión entre ellas dado el gran tamaño de las mismas. Su origen obedece fundamentalmente a procesos de meteorización física: lajamiento, termoclástia, hialoclástia o fenómenos de hidratación física.

Las características principales de este tipo de suelos son su buena capacidad portante y su elevada permeabilidad, lo que permite una rápida evacuación del agua en presencia de cargas externas. Esta capacidad de drenaje es proporcional al tamaño de las partículas, o, dicho de otro modo, al volumen de vacíos o porosidad del suelo. Es destacable que, para un determinado grado de humedad, las partículas más finas presentan una cohesión aparente que desaparece al variar el contenido de agua.

Dentro de esta clase de suelos se distinguen dos grandes grupos: el de las gravas y el de las arenas. El límite entre ambos grupos viene dado por su granulometría, ya que se considera arena la fracción de suelo de tamaño comprendida entre 2 mm y 0.05 mm, según las normas AASTHO; y entre 4.75 mm a 0.075 mm, según el sistema unificado SUCS. Dentro de esta clasificación pueden establecerse otras subdivisiones.

Las características mecánicas y resistentes de los suelos granulares vienen en un alto porcentaje determinadas por el ángulo de fricción interna.

- Gravas

Las gravas son acumulaciones sueltas de fragmentos de rocas y que tienen más de 2 milímetros de diámetro, según las normas AASHTO; y de 4.7 milímetros de diámetro, según el sistema unificado SUCS. Dado el origen, cuando son acarreadas por las aguas, las gravas sufren desgaste en sus aristas y son, por lo tanto, redondeadas. Como material suelto suele encontrarse en los lechos, en los márgenes y en los conos de deyección de los ríos, también en muchas depresiones de terrenos rellenados por el acarreo de los ríos y en muchos otros lugares a los cuales las gravas han sido transportadas.

- Arenas

La arena es el nombre que se le da a los materiales de granos finos procedentes de la denudación de las rocas o de su trituración artificial, y cuyas partículas varían entre 2 mm y 0.05 mm para las normas AASHTO y entre 4.75 mm y 0.075 mm para el sistema unificado SUCS de diámetro.

El origen y la existencia de las arenas son análogas a las de gravas: las dos suelen encontrarse juntas en el mismo depósito. La arena de río contiene muy a menudo proporciones relativamente grandes de grava y arcillas. Las arenas estando limpias no se contraen al secarse, no son plásticas, son menos compresibles que la arcilla y si se aplica una carga en su superficie, se comprimen casi de manera instantánea.

Suelos cohesivos

A diferencia de los suelos granulares, esta categoría de suelos se caracteriza por un tamaño más fino de sus partículas constituyentes (inferior a 0.08 mm, según el sistema unificado SUCS), lo que les confiere unas propiedades de superficie ciertamente importantes. Esto se debe a que la superficie específica (relación entre la superficie y el volumen de un cuerpo) de dichas partículas es más que considerable.

La cohesión es la principal propiedad desde el punto de vista mecánico de este tipo de suelos; se define como la fuerza interparticular producida por el agua de constitución del suelo, siempre y cuando no esté saturado. La cohesión es importante desde el punto de vista de la estabilidad de taludes, ya que aumenta la resistencia de un suelo frente a esfuerzos cortantes o de cizalla.

- Limos

Los limos son suelos de granos finos con poca o ninguna plasticidad, pueden ser limo inorgánico como el producido en canteras, o limo orgánico como el que suele encontrarse en los ríos, este último tiene características plásticas. El diámetro de las partículas de los limos está comprendido entre 0.05 mm y 0.002 mm de acuerdo con las normas AASHTO y en partículas menores a 0.075 mm según el sistema unificado SUCS. Los limos sueltos y saturados son completamente inadecuados para soportar cargas por medio de zapatas.

- Arcillas

Se da el nombre de arcilla a las partículas sólidas con diámetro menor de 0.002 mm según las normas AASHTO y cuya masa tiene la propiedad de volverse plástica al ser mezclada con agua. Químicamente es un silicato de alúmina hidratada, aunque en ocasiones contiene también silicatos de hierro o de magnesio hidratados.

2.1.4 **Clasificación de los suelos**

Un sistema de clasificación de suelos proporciona un lenguaje común para expresar en forma concisa las características generales de los suelos, que son infinitamente variadas sin una descripción detallada; consiste en categorizar y agrupar a los suelos junto con otros que posean características semejantes en cuanto a propiedades físicas, mecánicas e hidráulicas similares.

Según el tamaño de las partículas, podemos distinguir los siguientes tipos de suelos:

- Gravas
- Arenas
- Limos
- Arcillas

Se presenta a continuación un cuadro comparativo que contempla la clasificación de los suelos según el tamaño de sus partículas componentes, de acuerdo a la Norma IRAM 10535, el MIT (Massachusetts Institute of Technology), y los sistemas de clasificación ASTM D3282-93/97 ó VN - E4 - 84 (H.R.B.) y SUCS (Sistema Universal de Clasificación de

Suelos).

Tabla N°2.1: Cuadro comparativo de clasificación de suelos según el tamaño de sus partículas

NORMA IRAM 10535	MIT	SUCS	ASTM D3282 - 93/97
5 a 75	> 2	4,75 a 75	2 a 75
0,075 a 5	0,06 a 2	0,075 a 4,75	0,075 a 2
< 0,075	0,002 a 0,060	< 0,075	< 0,075
	< 0,002		

Fuente: Elaboración Propia

Estos, a su vez, podrían ser agrupados en dos grandes grupos: suelos gruesos y suelos finos. Algunas de las diferencias más importantes a destacar entre suelos de granos gruesos y suelos de granos finos son las siguientes.

Tabla N°2.2: Diferencias entre suelos de grano grueso y fino

Suelos Gruesos (>1mm)	Suelos Finos (<1mm)
Sus partículas componentes son visibles a simple vista	Sus partículas componentes no son visibles a simple vista
La forma de las partículas puede ser angular o redondeada	La forma de las partículas puede ser laminar, angular o redondeada
No poseen minerales arcillosos	Pueden poseer minerales arcillosos
Suelos no cohesivos	Suelos cohesivos
Muy alta permeabilidad	Permeabilidad: Alta (arenas finas), media a baja

$k > 10^{-2}$ cm/seg	(limos), muy baja o nula (arcillas) $k < 10^{-2}$ cm/seg
El tamaño de los vacíos es mayor, pero el volumen total de vacíos es menor: $e < 0,85$	El tamaño de los vacíos es menor, pero el volumen total de vacíos es mayor: arcilla blanda $e > 1,2$
Si se aplica una sobrecarga importante, el asentamiento del suelo es instantáneo	Si se aplica una sobrecarga importante, se tienen asentamientos diferidos en el tiempo

Fuente: Elaboración Propia

2.1.4.1 Clasificación de suelos SUCS

Este sistema fue propuesto por Arturo Casagrande como una modificación y adaptación más general a su sistema de clasificación propuesto en el año 1942 para aeropuertos.

Esta clasificación divide los suelos en:

- Suelos de grano grueso
- Suelos de grano fino
- Suelos orgánicos

Los suelos de granos grueso y fino se distinguen mediante el tamizado del material por el tamiz N° 200.

Los suelos gruesos corresponden a los retenidos en dicho tamiz y finos a los que pasan, de esta manera forma se considera que un suelo es grueso si más del 50% de las partículas son menores que dicho tamiz.

Tabla N°2.3: Clasificación SUCS, suelo fino

Divisiones mayores		Símbolo del grupo	Nombre del grupo
Suelos de grano fino, más del 50 % de la muestra pasa el tamiz No.200 (0,075 mm)	Limos y arcillas Limite liquido < 50 %	Inorgánico	ML Limo
			CL Arcilla
		Orgánico	OL Limo orgánico, arcilla inorgánica
	Limos y arcillas Limite liquido > 50 %	Inorgánico	MH Limo de alta plasticidad
			CH Arcilla de alta plasticidad
		Orgánico	OH Arcilla orgánica, limo orgánico

Fuente: Elaboración propia

Los suelos se designan por símbolos de grupo. El símbolo de cada grupo consta de un prefijo y un sufijo. Los prefijos son las iniciales de los nombres en inglés de los seis principales tipos de suelos (grava, arena, limo, arcilla, suelos orgánicos de grano fino y turbas), mientras que los sufijos indican subdivisiones en dichos grupos.

1. Suelos gruesos: Se dividen en gravas y arena, y se separan con el tamiz N° 4, de manera que un suelo pertenece al grupo de grava si más del 50% retiene el tamiz N° 4 y pertenecerá al grupo arena en caso contrario.
2. Suelos finos: también conocido como suelo dispersivo. El sistema unificado considera los suelos finos divididos entre grupos: limos inorgánicos (M), arcillas inorgánicas (C) y limos y arcillas orgánicas (O). Cada uno de estos suelos se subdivide a su vez según su límite líquido, en dos grupos cuya frontera es $LL=50\%$. Si el límite líquido del suelo es menor de 50% se añade al símbolo general la letra L (low compressibility). Si es mayor de 50 se añade la letra H (high compressibility). Obteniéndose de este modo los siguientes tipos de suelos:

ML: Limos inorgánicos de baja compresibilidad

CL: Arcillas inorgánicas de baja compresibilidad

MH: Limos inorgánicos de alta compresibilidad

CH: Arcillas inorgánicas de alta compresibilidad

OL: Arcillas y limos orgánicas de baja compresibilidad

OH: Arcillas y limos orgánicos de alta compresibilidad (Roldan, 2010).

Figura N°2.1: Clasificación del suelo



Fuente: Ingeniería Civil Pmade

2.1.4.2 Clasificación de la AASHTO

La American Association of State Highway Officials adoptó este sistema de clasificación de suelos (AASHTO M 145), tras varias revisiones del sistema adoptado por el Bureau of Public Roads de Estados Unidos, en el que los suelos se agrupan en función de su comportamiento como capa de soporte o asiento del firme. Es el sistema más utilizado en la clasificación de suelos en carreteras.

En esta clasificación los suelos se clasifican en siete grupos (A-1, A-2..., A-7), según su granulometría y plasticidad. Más concretamente, en función del porcentaje que pasa por los tamices n° 200, 40 y 10, y de los Límites de Atterberg de la fracción que pasa por el tamiz n° 40. Estos siete grupos se corresponden a dos grandes categorías de suelos, suelos granulares (con no más del 35% que pasa por el tamiz n° 200) y suelos limo-arcillosos (más del 35% que pasa por el tamiz n° 200).

La categoría de los suelos granulares; gravas, arenas y zahorras; está compuesta por los grupos A-1, A-2 y A-3, y su comportamiento en explanadas es, en general, de bueno a excelente, salvo los subgrupos A-2-6 y A-2-7, que se comportan como los suelos arcillosos

debido a la alta plasticidad de los finos que contiene, siempre que el porcentaje de estos supere el 15%. Los grupos incluidos por los suelos granulares son los siguientes:

- A-1: Corresponde a una mezcla bien graduada de gravas, arenas (gruesa y fina) y finos no plásticos o muy plásticos. También se incluyen en este grupo las mezclas bien graduadas de gravas y arenas sin finos.
- A-1-a: Incluye los suelos con predominio de gravas, con o sin material fino bien graduado.
- A-1-b: Incluye suelos constituidos principalmente por arenas gruesas, con o sin material fino bien graduado.
- A-3: Corresponde, típicamente, a suelos constituidos por arena fina de playa o de duna, de origen eólico, sin finos limosos o arcillosos o con una pequeña cantidad de limo no plástico. También incluyen este grupo, los depósitos fluviales de arena fina mal graduada con pequeñas cantidades de arena gruesa o grava.
- A-2: Este grupo comprende a todos los suelos que contienen un 35% o menos de material que pasa por el tamiz n° 200 y que no pueden ser clasificados en los grupos A-1 y A-3, debido a que el porcentaje de finos o la plasticidad de estos (o ambas cosas) están por encima de los límites fijados para dichos grupos. Por todo esto, este grupo contiene una gran variedad de suelos granulares que estarán entre los correspondientes a los grupos A-1 y A-3 y a los grupos A-4, A-5, A-6 y A-7.
- A-2-4 y A-2-5: En estos subgrupos se incluyen los suelos que contienen un 35% o menos de material que pasa por el tamiz n° 200 y cuya fracción que pasa por el tamiz n° 40 tiene las características de los grupos A-4 y A-5, de suelos limosos. En estos subgrupos están incluidos los suelos compuestos por grava y arena gruesa con contenidos de limo o índices de plasticidad por encima de las limitaciones del grupo A-1, y los suelos compuestos por arena fina con una proporción de limo no plástico que excede la limitación del grupo A-3.
- A-2-6 y A-2-7: En estos subgrupos se incluyen suelos como los descritos para en los subgrupos A-2-4 y A-2-5, excepto que los finos contienen arcilla plástica con tienen las características de los grupos A-6 y A-7.

La categoría de los suelos limo-arcillosos está compuesta por los grupos A-4, A-5, A-6 y A-7, cuyo comportamiento en explanadas va de regular a malo. En esta categoría los suelos se clasifican en los distintos grupos atendiendo únicamente a su límite líquido y a su índice de plasticidad, según las zonas del siguiente gráfico de plasticidad. De esta forma se clasifican también los suelos del grupo A-2 en los distintos grupos.

Los grupos incluidos en los suelos granulares son los siguientes:

- A-4: El suelo típico de este grupo es un suelo limoso no plástico o moderadamente plástico, que normalmente tiene un 75% o más de material que pasa por el tamiz N° 200. También se incluyen en este grupo los suelos constituidos por mezclas de suelo fino limosos y hasta un 64% de gravas y arenas.
- A-5: El suelo típico de este grupo es similar al descrito en el grupo A-4, salvo que suele tener carácter diatomáceo o micáceo, y pueden ser muy compresibles, como indica su elevado límite líquido.
- A-6: El suelo típico de este grupo es un suelo arcilloso plástico, que normalmente tiene un 75% o más de material que pasa por el tamiz N° 200. También se incluyen en este grupo las mezclas de suelo fino arcilloso y hasta un 64% de gravas y arenas.
- A-7: El suelo típico de este grupo es similar al descrito en el grupo A-6, salvo que tiene las características de elevado límite líquido del grupo A-5, y puede ser elástico y estar sujeto a grandes cambios de volumen.
- A-7-5: Se incluyen en este subgrupo los suelos con un índice de plasticidad moderado en relación con el límite líquido y que pueden ser altamente compresibles, además de estar sujetos a importantes cambios de volumen.
- A-7-6: Se incluyen en este subgrupo los suelos con un índice de plasticidad elevado en relación con el límite líquido y que están sujetos a cambios de volumen muy importantes.

2.1.5 **Suelo arcilloso**

Las arcillas son cualquier sedimento o depósito mineral formado por partículas muy pequeñas cuyo tamaño es inferior a los 0,002mm, y que se componen principalmente de

silicatos de aluminio hidratados. Se caracterizan por ser plásticas cuando se las humedecen y por la sonoridad y dureza al calentarla por encima de los 800°C. Como fue mencionado anteriormente, provienen de la alteración físico-química, por acción principalmente del agua, de minerales que forman parte de otras rocas preexistentes (feldespatos, piroxenos y micas), surgiendo así los “minerales de la arcilla”, en función de que roca se altera y en qué grado. Cuando se refiere a la arcilla no se habla de un único material de composición simple, sino de uno muy diverso en origen y composición.

La Arcilla es un tipo de Roca Natural Sedimentaria. Proviene de la descomposición de las Rocas Feldespato, siendo un silicato alumínico hidratado. Puede ser un elemento suelto o puede estar formando una masa en estado sólido, puede ser coherente o incoherente.

Es un material terroso de grano generalmente fino y capaz de convertirse en una masa plástica al mezclarse con cierta cantidad de agua. Conserva su forma inicial después del secado, adquiriendo a la vez la suficiente dureza para ser manejada. La Arcilla no se transforma en cerámica hasta que toda el agua que contiene de manera natural y química se elimina por el calor; cuando esto sucede al cocerlo en el horno, el producto que resulta posee una dureza y un estado inalterable a veces incluso mayor que el de algunas clases de piedra.

Para determinar el tipo de arcilla en estudio se puede recurrir a distintos métodos. Entre los métodos empíricos tradicionales ampliamente utilizados en los laboratorios se pueden citar ensayos de granulometría, límites de Atterberg, el equivalente de arena, etc. los cuales están bien definidos teóricamente, pero que presentan aún ciertas limitaciones en cuanto a la relación directa de las propiedades físico químicas de las partículas.

Figura N°2.2: Suelo Arcilloso



Fuente: Suelos cohesivos Jaron

2.1.5.1 *Características de las arcillas*

- Material de estructura laminar.
- Sumamente higroscópico.
- Su masa se expande con el agua.
- Con la humedad se reblandece y se vuelve plástica.
- Al secarse su masa se contrae en un 10% • Generalmente se le encuentra mezclada con materia orgánica.
- Adquiere gran dureza al ser sometida a temperaturas mayores a 600°C.

2.1.5.2 *Clasificación*

Cada una de las propiedades de la Arcilla puede dar lugar a una clasificación distinta. Así pues, puede clasificarse según su color, su temperatura de cocción, sus propiedades plásticas, su porosidad después de la cocción, su composición química, etc.

2.1.5.3 *Origen de la arcilla*

La arcilla es un silicato de aluminio hidratado, en forma de roca plástica, impermeable al agua y bajo la acción del calor se deshidrata, endureciéndose mucho. Desde el punto de vista químico está compuesta de silicio (Si), aluminio (Al), oxígeno (O) e hidrógeno (H). Las partículas que conforman la arcilla son de menos de 0,002 mm.

La época moderna ha incorporado a las arcillas en numerosos productos de uso cotidiano a través de las nuevas tecnologías de modo que, aunque no lo percibamos, las arcillas forman parte importante de nuestras vidas. Un ejemplo son los nuevos materiales poliméricos que incluyen en su composición las arcillas minerales con el fin de lograr superficies suaves al tacto y propiedades mecánicas mejoradas.

2.1.5.4 *Propiedades físico químicas*

Las arcillas tienen capacidad de intercambio catiónico, es decir son capaces de cambiar fácilmente los iones fijados en la superficie exterior de sus cristales, en los espacios interlaminares, o en otros espacios interiores de las estructuras, por otros existentes en las soluciones acuosas envolventes.

La capacidad de absorción es otra de las propiedades de las arcillas ya que pueden absorber agua u otras moléculas en el espacio interlaminar o en los canales estructurales. Las arcillas son eminentemente plásticas.

Esta propiedad se debe a que el agua forma una envuelta sobre las partículas laminares produciendo un efecto lubricante que facilita el deslizamiento de unas partículas sobre otras cuando se ejerce un esfuerzo sobre ellas. Su elevada plasticidad se debe a su morfología laminar, tamaño de partícula muy pequeño y a su alta capacidad de hinchamiento.

Todas las arcillas son refractarias, es decir resisten los aumentos de temperatura sin sufrir variaciones, aunque cada tipo de arcilla tiene una temperatura de cocción. La porosidad en las arcillas varía según el tipo de arcilla.

Las importantes aplicaciones industriales de las arcillas radican en sus propiedades físico-químicas. Dichas propiedades derivan, principalmente, de:

- Su extremadamente pequeño tamaño de partícula (inferior a 2 μm).
- Su morfología laminar (filosilicatos)
- Las sustituciones isomórficas, que dan lugar a la aparición de carga en las láminas y a la presencia de cationes débilmente ligados en el espacio interlaminar.

Como consecuencia de estos factores presentan un valor elevado del área superficial y, a la vez, la presencia de una gran cantidad de superficie activa, con enlaces no saturados. Por ello pueden interaccionar con muy diversas sustancias, en especial compuestos polares, por lo que tienen comportamiento plástico en mezclas arcilla - agua con elevada proporción sólido/líquido y son capaces en algunos casos de hinchar, con el desarrollo de propiedades reológicas en suspensiones acuosas.

2.1.5.5 *Capacidad de absorción de las arcillas*

El agua es una sustancia que puede alojarse fácilmente en los diferentes huecos de la estructura, así como en el espacio interlaminar. Cuantos más huecos tenga la estructura de arcilla, mayor será su capacidad de absorción.

La capacidad de absorción está directamente relacionada con las características texturales (superficie específica y porosidad) y existen dos tipos de procesos que difícilmente se dan de forma aislada: absorción y adsorción

Absorción: Cuando se trata fundamentalmente de procesos físicos como la retención por capilaridad y,

Adsorción: Cuando existe una interacción de tipo químico entre el adsorbente, en este caso la arcilla, y el líquido o gas adsorbido, denominado adsorbato. La capacidad de adsorción se expresa en porcentaje de adsorbato con respecto a la masa y depende, para una misma arcilla, de la sustancia de que se trate. La absorción de agua de arcillas absorbentes es mayor del 100% con respecto al peso. Dentro de este espacio y juntamente con el agua de contacto, van los iones de Intercambio presentes en el agua libre que está en contacto con el suelo. Dependiendo del ión que prevalezca en la solución, se puede predecir el comportamiento de la arcilla ya que la fuerza de fijación de los iones dependerá de la valencia del mismo.

2.1.5.6 *Hidratación e hinchamiento*

Cuando la absorción de agua tiene lugar en el espacio interlaminar, la cantidad de agua que puede entrar en este espacio depende de la fuerza de atracción entre las láminas. En las arcillas con uniones más débiles, el agua que entra en el espacio interlaminar es capaz de separar las láminas, provocando el hinchamiento de la estructura.

A medida que progresa el hinchamiento, alternándose las láminas de arcilla y las capas de agua, puede llegar a producirse la separación completa de las láminas, disgregándose la arcilla en láminas individuales, formándose un coloide.

En ingeniería, los suelos que contienen arcillas con gran capacidad de hinchamiento se conocen como suelos expansivos, y representan un riesgo para las construcciones civiles, ya

que son suelos inestables que, al cambiar de volumen, desestabilizan los cimientos y provocan el hundimiento de las estructuras.

2.1.5.7 *Plasticidad*

Una de las propiedades fundamentales de las arcillas es su plasticidad. Esto es debido a que, como las uniones entre las láminas son muy débiles, la entrada de agua entre dichas láminas facilita el deslizamiento de unas láminas sobre otras. También ayuda el hecho de estar formadas por partículas muy pequeñas.

La elevada plasticidad de las arcillas es consecuencia de su morfología laminar, tamaño de la partícula extremadamente pequeño y alta capacidad de hinchamiento.

Generalmente, esta plasticidad puede ser cuantificada mediante la determinación de los índices de Atterberg (Límite Líquido, Límite Plástico y Límite de Retracción). Estos límites marcan una separación arbitraria entre los cuatro estados o modos de comportamiento de un suelo sólido, semisólido, plástico y semilíquido o viscoso.

La relación existente entre el límite líquido y el índice de plasticidad ofrece una gran información sobre la composición granulométrica, comportamiento, naturaleza y calidad de la arcilla.

Existe una gran variación entre los límites de Atterberg de diferentes minerales de la arcilla, e incluso para un mismo mineral arcilloso, en función del catión de cambio. En gran parte, esta variación se debe a la diferencia en el tamaño de partícula y al grado de perfección del cristal. En general, cuanto más pequeñas son las partículas y más imperfecta su estructura, más plástico es el material.

Tabla N°2.4: Cuadro comparativo entre limos y arcillas

Limos (entre 0,002 y 0,060 mm)	Arcillas (<0,002 mm)
No suelen tener propiedades coloidales	No suelen tener propiedades coloidales
A partir de 0,002 mm y a medida que aumenta el tamaño de las partículas, se va haciendo cada vez mayor la proporción de	Consisten en su mayor parte en minerales arcillosos

minerales no arcillosos	
Partículas de forma redondeada	Partículas de forma laminar
Tacto áspero	Tacto suave
Mayor permeabilidad: $10^{-5} > k > 10^{-7}$ cm/seg	Menor permeabilidad: $k < 10^{-6}$ cm/seg
Predominan las características de masa	Predominan las características de superficie
Se secan con relativa rapidez y no se pegan a los dedos	Se secan lentamente y se pegan a los dedos
Pueden ser colapsibles	No son colapsibles
No son expansivos	Pueden ser expansivos

Fuente: Elaboración Propia

2.1.6 Estabilización del suelo

Cuando un suelo presenta resistencia suficiente para no sufrir deformaciones ni desgastes inadmisibles por la acción del uso o de los agentes atmosféricos y conserva además esta condición bajo los efectos climatológicos normales en la localidad, se dice que el suelo es estable.

Figura N°2.3: Estabilización de suelo



Fuente: Horcalsa

El suelo natural posee a veces la composición granulométrica y la plasticidad, así como el grado de humedad necesario para que, una vez apisonado, presente las características mecánicas que lo hacen utilizable como firme de un camino.

El mejoramiento del suelo también es denominado estabilización del suelo por muchos ingenieros geotécnicos. Éste es un proceso de alteración de las propiedades de ingeniería de suelo in situ o tomado a un costo más bajo y con mejor control de calidad.

No siempre se encuentra el suelo adecuado que garantice la estabilidad y durabilidad de una explanada. Si se une a ello la creciente importancia medioambiental y la presión social por minimizar la apertura de nuevos préstamos y vertederos necesarios para el movimiento de tierras de una infraestructura, es evidente el esfuerzo necesario en utilizar materiales calificados como tolerables, marginales e incluso inadecuados. La estabilización permite reemplazar un suelo de baja calidad por otro estabilizado y mejorado. Se trata de una de las técnicas más antiguas utilizadas en bases y subbases, subrasantes para uso vial.

2.1.6.1 Tipos de estabilización

Se dice que la estabilización es la corrección de una deficiencia para darle una mayor resistencia al terreno o bien, disminuir su plasticidad. Las formas o técnicas más conocidas de lograrlo son las siguientes:

- Estabilización física: 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 sí sola no logra producir sus 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 lo hacen 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.

- Estabilización mecánica: Es aquella con la que se logra mejorar considerablemente un suelo sin que se produzcan reacciones químicas de importancia.

La estabilización mecánica implica metodologías que mejoran las propiedades de ingeniería de los suelos seleccionados sin la adición de agentes u otras energías de unión de partículas. En otras palabras, no hay efectos químicos o de unión incluidos en esta metodología.

Este 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 sí 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 lo hacen 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.

- Estabilización electroquímica: Implica un cambio de base producido por una corriente eléctrica.

Los cationes de aluminio se desprenden de un electrodo positivo de aluminio y emigran en el suelo, hacia el electrodo negativo y en el curso de sus movimientos se efectúa el cambio de base.

- Estabilización química: Se refiere principalmente a la utilización de ciertas sustancias químicas patentizadas y cuyo uso involucra la sustitución de iones metálicos y cambios en la constitución de los suelos involucrados en el proceso.

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 el material más fácil de usar como material de construcción. También se usa para reducir la plasticidad, la permeabilidad y el potencial de expansión-contracción. Si las arcillas son dispersivas, se utiliza para flocular las partículas. Cuando las arcillas son difíciles de

compactar, se pueden añadir productos químicos para dispersar ligeramente sus partículas y ayudar en el proceso. En este capítulo vamos a discutir la estabilización química mediante el uso del Cloruro de magnesio y de calcio.

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

- Estabilidad Volumétrica
- Resistencia
- Permeabilidad
- Compresibilidad
- Durabilidad

Figura N°2.4: Estabilización química del suelo



Fuente: Horcalsa

2.1.7 Estabilización de suelos utilizando sales

Se desarrollaron numerosos estabilizadores, entre ellos los estabilizadores químicos como las sales de tipo ácido y alcalino, atacan químicamente a los componentes del suelo, especialmente a las arcillas, produciéndose en la reacción nuevos compuestos de naturaleza cementante mejorando la estabilidad de una masa de suelo a los esfuerzos, las sales producen en los firmes un aumento en la densidad seca, reducción del efecto de las heladas, reducción de polvo.

Como materiales alternativos de bajo costo se han utilizado sales tales como cloruro de magnesio (MgCl_2) y cloruro de calcio (CaCl_2). El objetivo de su uso es retener humedad y mejorar la compactación del material. Además, ayudan a reducir el punto de congelación del agua contenida en el suelo y en zonas muy secas evita la rápida evaporación del agua de compactación.

Las propiedades plásticas de suelos arcillosos dependen del intercambio catiónico. Cuando las partículas de arcilla están cubiertas con cargas similares se repelen entre sí; cuando existen partículas con cargas diferentes se atraen; si el entorno es un ambiente ácido, es decir, exceso de H^+ ($\text{pH} < 7$), las partículas tienden a estar cargadas positivamente, lo que conlleva a la floculación de la arcilla, y en un entorno básico resulta una estructura dispersa.

La estabilización de suelos arcillosos con sales, es una técnica para mejorar sus propiedades físicas y mecánicas, reduciendo su índice de plasticidad y aumentando su capacidad de soporte. Se logra a través de la adición de sales a la mezcla del suelo, lo que provoca un intercambio iónico que reduce la atracción entre el agua y la arcilla, disminuyendo la hinchazón y el encogimiento.

2.1.8 Descripción del cloruro de magnesio (MgCl_2)

El cloruro de magnesio, de fórmula MgCl_2 , es un compuesto mineral iónico a base de cloro, cargado negativamente, y magnesio, cargado positivamente. El cloruro de magnesio puede extraerse de salmueras o del agua de mar y es una gran fuente de magnesio, obtenido por electrólisis. El cloruro de magnesio puede presentarse en forma anhidrida, bi-hidratado o hexahidratado. Este último compuesto se presenta como cristales romboides de gran belleza ornamental. Es una sal deliquescente (del latín *deliquescere*, hacerse líquido), por lo que tiene afinidad química por el agua, pudiendo absorber cantidades relativamente altas de agua si se expone a la atmósfera, formando una solución líquida.

2.1.8.1 Propiedades del cloruro de magnesio

El cloruro de magnesio (MgCl_2) es un compuesto químico con diversas propiedades y usos. Es un compuesto iónico que se forma a partir de iones de magnesio y cloro, y puede encontrarse en diferentes formas como anhidro, bihidratado o hexahidratado. Sus principales

características incluyen su capacidad para absorber la humedad (delicuescencia), su solubilidad en agua y su uso en diversas aplicaciones industriales y médicas.

Propiedades principales:

- Composición iónica: El cloruro de magnesio está formado por iones de magnesio (Mg^{2+}) y iones de cloro (Cl^{-}).
- Delicuescencia: Absorbe humedad del ambiente, transformándose en una solución acuosa.
- Solubilidad: Es soluble en agua y alcohol.
- Formas: Se encuentra en forma anhidra, bihidratada y hexahidratada

Propiedades físicas

- Estado físico: El cloruro de magnesio es un compuesto sólido a temperatura ambiente.
- Apariencia: Se presenta en forma de cristales blancos o incoloros. También puede encontrarse en forma de polvo.
- Solubilidad: Es altamente soluble en agua, lo que significa que se disuelve fácilmente en ella.

Propiedades químicas

- Solubilidad: El cloruro de magnesio es altamente soluble en agua, formando una solución ligeramente ácida. Su solubilidad en agua es de 54,2 g/100 mL a 20°C.
- Higroscopicidad: Es una sustancia higroscópica, lo que significa que absorbe fácilmente la humedad del aire, haciéndolo útil como desicante o para controlar la humedad en espacios cerrados.
- Formación de hidratos: El cloruro de magnesio puede formar varios hidratos (compuestos que contienen agua en su estructura), siendo el más común el hexahidrato ($MgCl_2 \cdot 6H_2O$).

Reacciones

- Reacción con agua: El cloruro de magnesio reacciona con el agua de forma exotérmica, liberando calor.

- **Reacción con otros compuestos:** Puede reaccionar con otros ácidos y bases, así como con ciertos metales.

Descomposición

A altas temperaturas (aproximadamente 300°C), el cloruro de magnesio se descompone, desprendiendo humos o gases tóxicos e irritantes.

Usos del cloruro de magnesio

- **Industria:** Se utiliza en la producción de magnesio metálico, como aditivo en la industria de la construcción (para controlar la humedad) y en la fabricación de baterías.
- **Agricultura:** Se utiliza como fertilizante y acondicionador del suelo para mejorar la absorción de magnesio por las plantas.
- **Medicina:** El cloruro de magnesio se utiliza en suplementos dietéticos y lociones tópicas para aliviar dolores musculares y mejorar la densidad ósea.
- **Alimentación:** Se utiliza como aditivo alimentario (E511) para potenciar el sabor y estabilizar la textura de los alimentos.

Otros usos (Ingeniería)

Se usa como desicante, como agente antideslizante y en la producción de materiales refractarios.

El cloruro de magnesio se usa en ingeniería civil para controlar el polvo en carreteras, estabilizar suelos y prevenir la formación de hielo. También se utiliza en la protección catódica de estructuras metálicas contra la corrosión, mediante el uso de ánodos de magnesio

En resumen, el cloruro de magnesio es una sustancia versátil con propiedades químicas y fisiológicas importantes, que se utiliza en diversas industrias y aplicaciones, desde la producción de materiales hasta la medicina y la alimentación.

2.1.8.2 *Estabilización con Cloruro de Magnesio*

El principal uso de la sal es como matapolvo en bases y superficies de rodamiento para tránsito ligero. También se utiliza en zonas muy secas para evitar la rápida evaporación del

agua de compactación.

La sal es un producto higroscópico; es decir, es capaz de absorber la humedad del aire y de los materiales que le rodean, de ahí que sea un efectivo matapolvo al mantener la capa con un alto contenido de humedad.

La estabilización con cloruro de magnesio, comúnmente conocido como bischofita, se utiliza para mejorar la calidad de suelos, especialmente en carreteras y caminos no pavimentados. La bischofita se disuelve en agua y se aplica al suelo, creando una capa granular compactada que ayuda a reducir el polvo, mejorar la resistencia y la durabilidad de la superficie.

Igual que en la mayoría de las estabilizaciones, el cloruro de magnesio puede aplicarse directamente al suelo a tratar y encontrar una relación en porcentaje que permita estabilizar adecuadamente el suelo.

Beneficios de la estabilización con cloruro de magnesio

- Reducción de polvo: La bischofita ayuda a mantener la humedad en el suelo, evitando que se desintegre y reduciendo la emisión de polvo, según la Universidad Andrés Bello.
- Mejora de la resistencia y durabilidad: La capa granular compactada aumenta la resistencia del suelo a la erosión y el desgaste, haciéndolo más duradero.
- Mayor capacidad de soporte: La estabilización con bischofita incrementa la capacidad de soporte del suelo, lo que permite soportar mejor el tráfico vehicular, según un estudio de la Universidad Ricardo Palma.
- Alternativa económica: La bischofita puede ser una opción más económica que otros métodos de estabilización de suelos.

Proceso de estabilización con cloruro de magnesio

- Preparación del suelo: Se limpia el suelo y se realiza una compactación inicial.
- Preparación de la solución: Se disuelve la bischofita en agua en una proporción específica.
- Aplicación de la solución: La solución se aplica al suelo mediante aspersores o camiones cisterna.

- Compactación final: Se compacta el suelo nuevamente para asegurar una buena adherencia de la bischofita }

Consideraciones importantes:

- Dosificación: La dosificación del cloruro de magnesio debe ser precisa para obtener los mejores resultados.
- Tipo de suelo: La eficacia de la bischofita puede variar según el tipo de suelo.
- Condiciones climáticas: Las condiciones climáticas, como la humedad y la temperatura, pueden afectar el proceso de estabilización.
- Evaluación de la calidad: Se deben realizar pruebas de laboratorio para evaluar la calidad del suelo estabilizado.

Las formas de aplicación del cloruro de sodio son:

- Esparcidores: Se pueden usar esparcidores para dispersar copos o gránulos de cloruro de magnesio sobre la superficie de la carretera.
- Mezcla con agua: En algunos casos, se mezcla el cloruro de magnesio sólido con agua antes de la aplicación para facilitar la distribución.

En resumen: La aplicación de cloruro de magnesio para estabilizar suelos implica una combinación de humedecer la carretera, aplicar el compuesto en forma líquida o sólida, y permitir que se absorba en el suelo para mejorar su resistencia y reducir la erosión.

2.1.9 Descripción del Cloruro de Calcio (CaCl_2)

El cloruro de calcio (CaCl_2) es un compuesto químico inorgánico, una sal, que se encuentra en forma de escamas o pellets blancos y es altamente soluble en agua. Es conocido por sus propiedades higroscópicas, es decir, su capacidad para absorber humedad del aire, lo que lo hace útil como desecante. Los desecantes de cloruro de calcio funcionan bien en un rango de temperatura que va desde el punto de congelación hasta 80 °C o más.

2.1.9.1 *Propiedades del Cloruro de Calcio*

El cloruro de calcio (CaCl_2) es una sal inorgánica de fórmula química CaCl_2 . Es altamente soluble en agua y tiene propiedades higroscópicas, lo que significa que absorbe humedad del aire. Se encuentra en forma de escamas blancas o pellets a temperatura ambiente.

Aquí hay un resumen de las propiedades más importantes del cloruro de calcio:

- Fórmula química: CaCl_2
- Solubilidad: Muy soluble en agua
- Higroscopicidad: Absorbe humedad del aire
- Apariencia: Escamas blancas o pellets a temperatura ambiente
- Reacción con el agua: Disuelve en agua de forma exotérmica, es decir, liberando calor

Propiedades físicas

- Estado físico: Sólido cristalino.
- Apariencia: Escamas o pellets blancos o incoloros.
- Solubilidad: Altamente soluble en agua.
- Higroscopicidad: Absorbe humedad del aire.
- Punto de fusión: $772\text{ }^\circ\text{C}$.
- Punto de ebullición: $1935\text{ }^\circ\text{C}$.
- Densidad: $2,15\text{ g/cm}^3$ a $20\text{ }^\circ\text{C}$.
- Estructura cristalina: Octaédrica.
- Delicuescencia: Se disuelve en la humedad que absorbe, formando una solución clara

Propiedades químicas clave

- Higroscopicidad: El cloruro de calcio tiene una gran capacidad para absorber la humedad del ambiente, convirtiéndolo en un buen secante para diversos usos.
- Solubilidad en agua: Es altamente soluble en agua, formando soluciones acuosas que pueden ser utilizadas en diferentes procesos.

- Reacción exotérmica: La disolución del cloruro de calcio en agua es una reacción exotérmica, lo que significa que libera calor.
- Fuente de iones calcio: En disolución acuosa, el cloruro de calcio proporciona iones de calcio, lo que puede ser utilizado en procesos de coagulación o para corregir deficiencias de calcio.
- Reacciones con otros compuestos: El cloruro de calcio puede reaccionar con diversos compuestos, como el hidróxido de calcio para formar hidróxido de calcio, o con ácido clorhídrico para neutralizarse.
- Descomposición por calentamiento: Al ser calentado, el cloruro de calcio puede descomponerse, liberando humos tóxicos de cloro.

Aplicaciones

- Desecante: Su capacidad para absorber humedad lo hace ideal para secar gases, solventes y ambientes.
- Anticongelante: Reduce el punto de congelación del agua, evitando la formación de hielo en carreteras y otros lugares.
- Aditivo alimentario: Se utiliza como agente de firmeza, coagulante y estabilizante en la industria alimentaria.
- Control de polvo: Se utiliza en caminos no pavimentados para absorber la humedad y evitar la formación de polvo.
- Refrigeración: Se usa en sistemas de refrigeración como líquido de refrigeración.
- Construcción: Se utiliza para mantener la humedad en materiales de construcción y para acelerar el fraguado del concreto.

Otros Usos (Ingeniería)

El cloruro de calcio (CaCl_2) se utiliza en ingeniería principalmente para mejorar la resistencia y durabilidad de materiales como el hormigón y los suelos de carreteras, además de para el control del polvo. También se usa para acelerar el fraguado del hormigón en climas fríos y en algunos casos para reducir la corrosión del refuerzo, aunque esta última aplicación ha disminuido.

- Estabilización de suelos: El cloruro de calcio puede utilizarse para estabilizar suelos de carreteras sin pavimentar, mejorando su resistencia y capacidad portante.
- Control del polvo: El cloruro de calcio retiene la humedad en el suelo, lo que ayuda a evitar la formación de polvo y a mejorar la calidad de la vía.
- Rehabilitación de carreteras: Se utiliza en proyectos de rehabilitación de carreteras para reducir el tiempo y los costos, ya que elimina la necesidad de transportar y dispersar nuevos materiales.

2.1.10 **Compresión no Confinada (UU)**

La compresión no confinada (o resistencia a la compresión simple) es una medida de la resistencia de un material, específicamente bajo condiciones de compresión axial sin confinamiento lateral, es un ensayo de laboratorio ampliamente utilizado en la Ingeniería Geotécnica para determinar la resistencia a la compresión de suelos cohesivos.

Esta prueba consiste en aplicar una carga axial a una muestra cilíndrica de suelo sin ningún tipo de confinamiento lateral, hasta que esta falle. Su principal ventaja es su simplicidad y rapidez, ya que no requiere la aplicación de presión lateral ni el uso de celdas triaxiales.

Figura N°2.5: Equipo de compresión inconfiada



Fuente: Laboratorio de suelos UAJMS

Esta prueba es especialmente adecuada para suelos cohesivos saturados, como las arcillas, ya que estos poseen suficiente cohesión para mantenerse estables sin confinamiento lateral. La resistencia que se obtiene se interpreta como la resistencia no drenada del suelo.

El valor obtenido es útil para el diseño de cimentaciones superficiales, estabilidad de taludes y análisis de capacidad portante a corto plazo. Se asume que durante la prueba no ocurre drenaje, por lo que se considera una condición no drenada (condición UU: sin consolidación y sin drenaje).

Importancia:

- Geotecnia:

Permite evaluar la resistencia de los suelos y rocas, lo cual es crucial para el diseño de cimentaciones, taludes y otros elementos geotécnicos.

- Ingeniería civil:

Ayuda a evaluar la resistencia de materiales como el concreto y la madera, especialmente en aplicaciones donde no hay confinamiento lateral.

2.1.10.1 Tipos de rotura

El tipo de falla de la muestra durante el ensayo permite clasificar la rotura en diferentes tipos:

- Rotura tipo I – Falla frágil o quebradiza

Característica de arcillas duras o suelos cementados. Se observa una rotura limpia con formación de un plano de falla.

- Rotura II – Falla plástica

Ocurre en arcillas blandas, la muestra se deforma notablemente sin una ruptura clara.

- Rotura III – Falla en barril

La muestra se abomba en la parte media debido a deformaciones laterales, sin formación de plano de falla definido.

- Rotura IV – Falla por deslizamiento

Se observan varias fisuras o planos de deslizamiento, comunes en suelos heterogéneos. La identificación del tipo de rotura proporciona información sobre la consistencia y estructura interna del suelo.

Figura N°2.6: Tipos de rotura

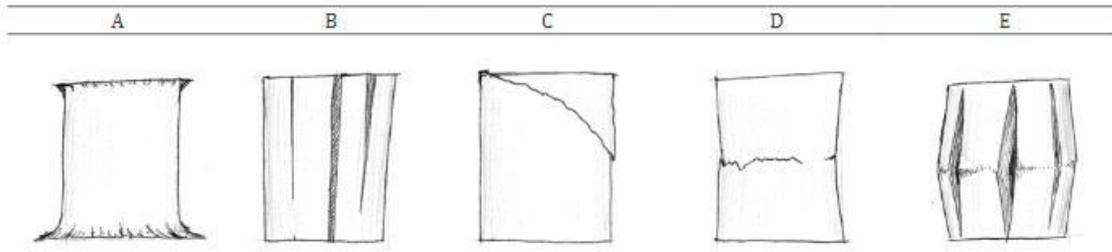


Figura 5. A) Falla por aplastamiento. B) Falla por tensión de las fibras. C) Falla por corte. D) Falla por pandeo general de las fibras en dirección interna E) Falla por pandeo general de las fibras en dirección externa.

Fuente: Librería Electrónica científica

2.1.10.2 *Parámetros obtenidos en la prueba*

1. Resistencia a la compresión inconfiada (q_u): es el esfuerzo máximo que puede soportar la muestra antes de fallar.
2. Resistencia no drenada (c_u): se obtiene como la mitad de q_u , es decir:

$$c_u = \frac{q_u}{2}$$

2.1.10.3 *Cohesión o Resistencia no drenada*

La cohesión en el suelo arcilloso se refiere a la fuerza interna que une sus partículas finas y plásticas, debido a la mineralogía de la arcilla y la presencia de agua actuando como puente entre las partículas. Esta propiedad, que hace al suelo capaz de mantener una forma sin desmoronarse y de excavarse en taludes verticales, es alta en las arcillas y prácticamente nula en suelos granulares como las arenas.

¿Qué es la cohesión?

- Fuerzas internas:

La cohesión es la resistencia al corte de un suelo causada por las fuerzas internas que mantienen unidas sus partículas.

- Naturaleza plástica:

En suelos cohesivos como la arcilla, esta fuerza se debe a la atracción entre las partículas y la acción del agua que actúa como un puente molecular.

- Plasticidad:

La cohesión se correlaciona con la plasticidad, la cual se manifiesta en la arcilla cuando está húmeda y no se desmorona fácilmente.

¿Por qué los suelos arcillosos son cohesivos?

- Partículas finas:

Las arcillas están compuestas por partículas muy finas que, al estar en contacto y con la humedad adecuada, pueden formar uniones fuertes entre ellas.

- Atracción electroquímica:

Las interacciones entre los minerales de la arcilla y las moléculas de agua generan fuerzas adhesivas y cohesivas significativas.

Características de la cohesión en suelos arcillosos:

- Alta resistencia:

Los suelos arcillosos tienen una alta cohesión, lo que les permite mantener taludes verticales, a diferencia de los suelos no cohesivos como la arena.

- Sensibilidad a la humedad:

La cohesión de una arcilla puede variar con el contenido de humedad. El agua en exceso puede debilitar la cohesión, mientras que la falta de humedad puede hacer que el suelo pierda su plasticidad y cohesión.

- Uso en construcción:

La alta cohesión de las arcillas las hace adecuadas para construir cimentaciones y otras estructuras, aunque su plasticidad en húmedo puede requerir una planificación cuidadosa.

La cohesión en el ensayo de compresión inconfiada es la propiedad del suelo que le permite mantener su forma y resistencia sin soporte lateral, y se estima a partir del resultado de la prueba, donde la cohesión no drenada “ c_u ” es la mitad del esfuerzo a la falla “ q_u ”, es decir,

“ $c_u = q_u/2$ ”. Este ensayo se realiza exclusivamente en suelos cohesivos para determinar su resistencia al corte, la cual se debe en gran parte a su cohesión.

2.1.10.4 Norma técnica

La prueba de compresión inconfiada se ejecuta siguiendo los lineamientos de la Norma ASTM D2166/D2166M -16, titulada “Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Cohesive Soil”. Esta norma especifica los procedimientos para la preparación de muestras, condiciones de carga, velocidad de deformación y criterios para interpretar los resultados.

2.1.10.5 Compresión Inconfiada en Suelos Arcillosos

En el caso de suelos arcillosos, esta prueba adquiere particular relevancia. Las arcillas son materiales cohesivos que presentan una respuesta significativa en condiciones no drenadas. Su resistencia está muy influenciada por factores como el contenido de humedad, el tipo de minerales arcillosos, la estructura del suelo, y los tratamientos químicos que puedan aplicarse para mejorar sus propiedades.

En su estado natural, las arcillas pueden tener baja resistencia y alta compresibilidad. Sin embargo, mediante la adición de estabilizantes (como cal, cemento o sales), es posible modificar su comportamiento mecánico, aumentando su resistencia y reduciendo su deformabilidad.

La compresión inconfiada en suelos arcillosos permite estudiar los efectos de estas modificaciones, siendo un ensayo clave para evaluar la efectividad de técnicas de estabilización.

2.1.10.6 Factores que afectan los resultados

Los resultados del ensayo pueden variar significativamente debido a:

- Contenido de humedad: Influye directamente en la cohesión y resistencia del suelo.
- Tiempo de curado (en suelos tratados): El tiempo de reacción entre el suelo y los aditivos químicos afectan la resistencia.

- Densidad seca: Una mayor compactación incrementa la resistencia.
- Presencia de estabilizantes químicos
- Temperatura y condiciones de laboratorio
- Velocidad de deformación: Recomendado entre 0,5 % a 2 % por minuto según ASTM D2166.

2.1.11 **Estabilidad de Taludes**

La estabilización de taludes es una técnica fundamental en Ingeniería geotécnica para garantizar la estabilidad de masas de suelo en pendientes. En suelos arcillosos, que suelen presentar baja resistencia al corte y alta plasticidad, el uso de aditivos estabilizantes se ha convertido en una práctica eficaz para mejorar sus propiedades mecánicas.

Una de las formas más utilizadas para evaluar la mejora de la resistencia del suelo es mediante el ensayo de compresión inconfiada (UCS, por sus siglas en inglés).

Este ensayo permite determinar la resistencia a la compresión axial sin la aplicación de confinamiento lateral, lo que lo hace particularmente útil para suelos cohesivos como las arcillas.

Diversos aditivos, como las sales, la cal o el cemento, han demostrado mejorar significativamente la resistencia mecánica del suelo. Estos materiales reaccionan con las partículas arcillosas, reduciendo su plasticidad, aumentando la cohesión y disminuyendo la susceptibilidad al agua. El aumento en la resistencia a la compresión inconfiada es un indicador directo de la efectividad del aditivo en la estabilización del talud.

Estudios previos han demostrado que, tras la aplicación de aditivos y un adecuado periodo de curado, la resistencia del suelo tratado puede duplicarse, lo que contribuye a una mayor estabilidad y durabilidad de los taludes intervenidos.

Ventajas de la estabilización con sales:

- Económica: La sal es un material relativamente económico y accesible.
- Mejora de la resistencia: Aumenta la resistencia del suelo arcilloso a la compresión y la capacidad de carga.

- Reducción de la plasticidad: Disminuye la plasticidad del suelo arcilloso, lo que facilita su uso en la construcción de taludes.
- Facilita la compactación: Permite una compactación más eficiente del suelo, lo que aumenta su estabilidad.

2.1.12 Ensayos

2.1.12.1 Resistencia a la Compresión no Confinada

La prueba de compresión no confinada es un tipo especial de prueba no consolidada-no drenada que se utiliza comúnmente para las muestras de arcilla. En esta prueba la presión de confinamiento es 0. A la muestra se le aplica rápidamente una carga axial para provocar una falla.

El ensayo de compresión no confinada, también conocido con el nombre de ensayo de compresión simple o ensayo de compresión uniaxial, es muy importante en Mecánica de Suelos, ya que permite obtener un valor de carga última del suelo, el cual, como se verá más adelante se relaciona con la resistencia al corte del suelo y entrega un valor de carga que puede utilizarse en proyectos que no requieran de un valor más preciso, ya que entrega un resultado conservador. Este ensayo puede definirse en teoría como un caso particular del ensayo triaxial.

Es importante comprender el comportamiento de los suelos sometidos a cargas, ya que es en ellos o sobre ellos que se van a fundar las estructuras, ya sean puentes, edificios o carreteras, que requieren de una base firme, o más aún que pueden aprovechar las resistencias del suelo en beneficio de su propia capacidad y estabilidad, siendo el estudio y la experimentación las herramientas para conseguirlo, y finalmente poder predecir, con una cierta aproximación, el comportamiento ante las cargas de estas estructuras.

Debido a la compleja y variable naturaleza de los suelos, en especial en lo referido a la resistencia al esfuerzo cortante, existen muchos métodos de ensayo para evaluar sus características. Aun cuando se utilizan otros métodos más representativos, como el triaxial, el ensayo de compresión simple cumple el objetivo buscado, sin tener que hacer un método tan complejo ni usar un equipo que a veces puede ser inaccesible, lo que significa menor

costo. Este método de ensayo es aplicable solo a materiales cohesivos que no expulsan agua durante la etapa de carga del ensayo y que mantienen su resistencia intrínseca después de remover las presiones de confinamiento, como las arcillas o los suelos cementados. Los suelos secos friables, los materiales fisurados, laminados o varvados, los limos, las turbas y las arenas no pueden ser analizados por este método para obtener valores significativos de la resistencia a la compresión no confinada.

Este ensayo se realiza con el fin de determinar la resistencia o esfuerzo último de un suelo cohesivo a la compresión no confinada, mediante la aplicación de una carga axial con control de deformación y utilizando una muestra de suelo inalterada tallada en forma de cilindro, generalmente con una relación alto/diámetro igual a 2.

Debido a numerosos estudios, se ha hecho evidente que este ensayo generalmente proporciona un valor bastante confiable de la resistencia al corte de un suelo cohesivo, debido a la pérdida de la restricción lateral provista por la masa de suelo, las condiciones internas del suelo como el grado de saturación o la presión de poros que no puede controlarse y la fricción en los extremos producidas por las placas de apoyo. Sin embargo, si los resultados se interpretan adecuadamente, reconociendo las deficiencias del ensayo, estos serán razonablemente confiables.

Como el ensayo de compresión simple en arcillas relativamente impermeables se efectúa cargando la probeta con bastante rapidez, resulta que, en definitiva, constituye también un ensayo sin drenaje si dicha arcilla está saturada.

Tipos de rotura

En un ensayo de compresión simple se pueden producir distintos tipos de rotura, los cuales son la rotura frágil y la rotura dúctil. En la primera predominan las grietas paralelas a la dirección de la carga, y la rotura ocurre de un modo brusco y bajo deformaciones muy pequeñas, presentándose después de ella un desmoronamiento de la resistencia. En la segunda la muestra se limita a deformarse, sin que aparezcan zonas de discontinuidad en ella. De forma intermedia, la rotura se produce a través de un plano inclinado, apareciendo un pico en la resistencia y un valor residual.

En arcillas blandas aparece la rotura dúctil en el ensayo de compresión simple, mientras que en suelos cementados se suele registrar rotura frágil en este tipo de ensayos. Las teorías de rotura frágil fueron iniciadas por Allan Griffith en 1920, “al atribuir la reducida resistencia a la tracción de muchos materiales a la presencia de diminutas fisuras en su interior, en cuyos extremos se produce concentración de tensiones. La rotura se produce debido a la propagación de la micro-fisura existente bajo dicha concentración de tensiones”

En una probeta sometida a compresión simple también se pueden producir tracciones locales en el contorno de las fisuras, especialmente sobre planos paralelos a la dirección de la compresión. Esto explica la aparición de grietas verticales. En suelos blandos sometidos a presiones no muy altas, la rotura dúctil se presenta bajo la forma de un ensanchamiento sólo por el centro, ya que por los extremos lo impide la fricción entre el suelo y las placas de carga.

Según el valor de la resistencia máxima a compresión simple, una arcilla se puede clasificar del modo que se indica a continuación (Terzaghi y Peck, 1955).

Tabla N°2.5: Consistencia del suelo según el valor de la resistencia máxima a la compresión simple

Consistencia del suelo	Resistencia a la compresión no confinada	
	kg/cm ²	(kPa)
Muy blanda	< 0.25	(< 25)
Blanda	0.25 - 0.50	(25 - 50)
Mediana	0.50 - 1.00	(50 - 100)
Firme	1.00 - 2.00	(100 - 200)
Muy firme	2.00 - 4.00	(200 - 400)
Dura	> 4.00	(> 400)

Fuente: Manual de ensayos y materiales de suelos ABC

Este método de ensayo abarca la determinación de la resistencia a la compresión no confinada de suelos cohesivos en condiciones de compresión, intactas, o remoldeados, utilizando la aplicación de una carga axial de deformación controlada.

Muestras inalteradas: Se preparan los especímenes inalterados a partir de muestras obtenidas de acuerdo con las normas INVIAS E-104 o INVIAS E-105, y preservadas y transportadas de acuerdo con las directrices para el grupo de muestras C de la norma INVIAS E-103.

Muestras remodeladas: Las muestras remodeladas se pueden preparar a partir de una muestra inalterada o a partir de una muestra alterada, siempre y cuando sea representativa de la muestra inalterada fallada. En el caso de las muestras inalteradas falladas, se envuelve el material en una membrana de caucho delgado y se amasa completamente el material con los dedos para asegurar un remoldeo completo.

Muestras compactadas: Las muestras se deben preparar con un contenido de agua predeterminado y con la densidad prescrita por quien solicita el ensayo. Después de preparada la muestra, se recortan los extremos perpendicularmente al eje longitudinal, se retira del molde donde se compactó y se determinan su masa y sus dimensiones.

Importancia en la Ingeniería.

Esta prueba es sencilla y económica, pero solo es adecuada para suelos cohesivos y homogéneos, donde se puede suponer que las condiciones son uniformes en todas las direcciones.

La prueba de compresión inconfiada es importante en el diseño de cimentaciones, la estabilidad de taludes y otras aplicaciones donde es necesario conocer la resistencia del suelo sin las influencias de las tensiones laterales. Tiene aplicaciones importantes en la ingeniería geotécnica, especialmente en proyectos que requieren un conocimiento detallado de las propiedades mecánicas de los suelos cohesivos. A continuación, se describen algunas de las principales aplicaciones:

- Diseño en cimentaciones: capacidad portante, la resistencia a la compresión inconfiada (q_u) se utiliza para estimar la capacidad portante del suelo, lo cual es esencial en el diseño de cimentaciones superficiales y profundas. Una capacidad portante adecuada asegura que la cimentación podrá soportar las cargas estructurales sin hundimientos excesivos.
- Estabilidad de taludes: en el análisis de estabilidad de taludes y cortes en suelos

cohesivos, la cohesión del suelo, derivada de la prueba de compresión inconfiada, es un parámetro clave. Esta información permite calcular los factores de seguridad contra deslizamientos y determinar si es necesario reforzar el talud.

- Diseño de presas de tierra: en el diseño y construcción de presas de tierra o rellenos, se necesita asegurar que el suelo utilizado tenga la resistencia adecuada para soportar la estructura. La compresión inconfiada ayuda a verificar que el suelo cumple con los requisitos de resistencia.
- Evaluación de suelos durante la construcción: control de calidad, durante la construcción, la prueba se puede utilizar para evaluar la calidad del suelo compactado en sitio. Esto es común en proyectos de carreteras y obras civiles donde se requiere verificar que el suelo cumple con las especificaciones de resistencia.
- Investigaciones geotécnicas: durante la fase de investigación geotécnica de un proyecto, se realiza la prueba de compresión inconfiada para obtener un perfil de resistencia del suelo. Estos datos ayudan a caracterizar el terreno y son fundamentales para el diseño de estructuras seguras.
- Determinación de la cohesión del suelo: parámetros de diseño, la cohesión, calculada como la mitad de la resistencia a la compresión inconfiada en suelos saturados, es un parámetro importante en el análisis de la capacidad de carga y estabilidad de suelos.
- Evaluación de suelos blandos: suelos arcillosos y limosos, la prueba es esencialmente útil en suelos arcillosos blandos donde otras pruebas, como la triaxial, pueden ser más complejas y costosas.

En resumen, la prueba de compresión inconfiada es una herramienta clave para los ingenieros geotécnicos, ya que proporciona información esencial sobre la resistencia de los suelos cohesivos, permitiendo así el diseño y la construcción segura de diversas estructuras.

2.1.12.2 *Contenido de Humedad natural*

Es un ensayo que busca conocer el peso del agua en una masa de suelo, se expresa en porcentaje, hallar este valor es fácil teniendo: un horno de secado, balanzas y recipientes se

determina mediante la fórmula.

$$w = \frac{\text{Peso del agua}}{\text{Peso del suelo secado}} \times 100$$

Esta propiedad física del suelo es de gran utilidad en la construcción civil y se obtiene de una manera sencilla, pues el comportamiento y la resistencia de los suelos en la construcción están regidos por la cantidad de agua que contienen. El contenido de humedad de un suelo es la relación del cociente del peso de las partículas sólidas y el peso del agua que guarda, esto se expresa en términos de porcentaje.

El contenido de humedad de una masa de suelo, está formado por la suma de sus aguas libres, capilares e higroscópicas. La importancia del contenido de agua que presenta un suelo representa junto a la cantidad de aire una de las características más importantes para explicar el comportamiento de este en especial a aquellos que su textura es más fina como por ejemplo cambios de volumen, cohesión, estabilidad mecánica.

El método tradicional de determinación de la humedad del suelo en laboratorio, es por medio del secado a horno, donde la humedad de un suelo es la relación expresada en porcentaje entre el peso del agua existente en una determinada masa de suelo y el peso de las partículas sólidas.

El material debe permanecer un periodo de doce horas en el horno, por esta razón se acostumbra a iniciar el calentamiento de la muestra de suelo al final del día, para que así de deshidrate durante toda la noche.

Cumplidas ya las 12 horas de secado de la muestra de tamaño normal se procede a retirar y pesar, para así obtener el peso del suelo seco. El peso del agua será la diferencia entre el peso de la muestra en estado natural y la muestra seca de suelo. Ya se cuenta con los valores necesarios para la obtención del contenido de humedad, en caso de tener mucha prisa en la obtención de resultados de ensayo, la muestra podría ser retirada del horno al cabo de cinco o seis horas para así pesarla, luego se introduciría de nuevo al horno y se compararía con este peso con el obtenido a las seis horas de secado. Si no se obtiene ninguna diferencia, podría utilizarse este valor como el peso seco de dicha muestra de suelo.

2.1.12.3 *Límites de Atterberg*

Los límites de Atterberg se basan en el concepto de que los suelos finos, presentes en la naturaleza, pueden encontrarse en diferentes estados, dependiendo de su propia naturaleza y la cantidad de agua que contengan. Entonces, un suelo se puede encontrar en un estado sólido, semisólido, plástico y líquido o viscoso.

- Límite líquido (LL). Humedad de un suelo remoldeado, límite entre los estados líquido y plástico.
- Límite plástico (LP). Humedad de un suelo remoldeado, límite entre los estados plástico y semi - sólido.

El contenido de agua con que se produce el cambio entre estados varía de un suelo a otro y en mecánica de suelos interesa fundamentalmente conocer el rango de humedades para el cual el suelo presenta un comportamiento plástico, es decir, acepta deformaciones sin romperse (plasticidad). Se trata de la propiedad que presentan los suelos hasta cierto límite.

El método usado para medir estos límites de humedad fue ideado por el científico sueco Albert Atterberg en el año 1911. Los límites de Atterberg son propiedades, valores de humedad de los suelos que se utilizan en la identificación y clasificación de un suelo.

Atterberg (1911) realizó una serie de experimentos con suelos finos haciendo variar su contenido de humedad, con el objetivo de encontrar la relación que existe entre el contenido de humedad y la consistencia del suelo. Este investigador observó que para ciertos contenidos de humedad el suelo presentaba uno de los cuatro estados distintos de consistencia, que son: sólido, semisólido, plástico y líquido. Posteriormente Terzaghi y Casagrande idearon métodos para determinar estos contenidos de humedad específicos para los distintos estados de consistencia, en la actualidad a estos contenidos de humedad especiales se los conoce como límites de Atterberg o de consistencia. Puede hablarse de los límites de Atterberg en suelos que tienen un tamaño de partículas que pasan por el tamiz Nro. 40.

Los límites de Atterberg son las determinaciones que con más frecuencia se practican en los laboratorios de Mecánica del Suelo. Su utilidad deriva de que, gracias a la experiencia acumulada en miles de determinaciones, es suficiente conocer sus valores para poderse dar una idea bastante clara del tipo de suelo y sus propiedades. Como, por otra parte, se trata de

determinaciones sencillas y rápidas, permiten una pronta identificación de los suelos y la selección adecuada de muestras típicas para ser sometidas a ensayos más complicados.

Los límites de Atterberg pertenecen, junto al análisis granulométrico, al tipo de ensayos de identificación. Pero, si el análisis granulométrico nos permite conocer la magnitud cuantitativa de la fracción fina, los límites de Atterberg nos indican su calidad, completando así el conocimiento del suelo.

- Índice de plasticidad

Es la diferencia entre los límites líquido y plástico. Algunos valores usuales según el tipo de suelo;

Tabla N°2.6: Índice de plasticidad según el tipo de suelo

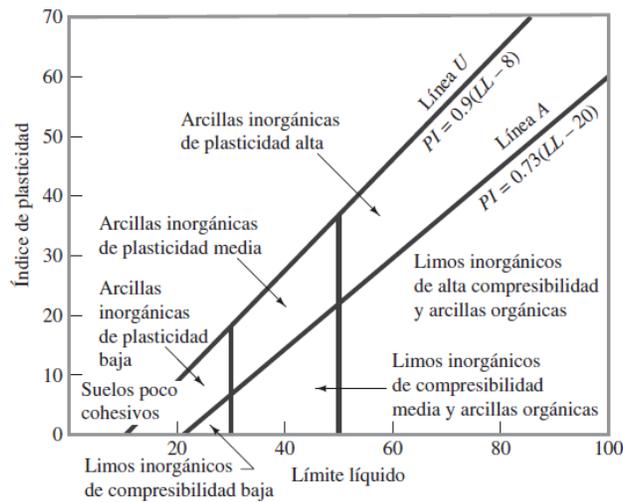
Tipo de Suelo	Índice de Plasticidad
Suelo desmenuzable	$IP < 1$
Suelo débilmente plástico	$1 < IP < 7$
Suelo medianamente plástico	$7 < IP < 15$
Suelo altamente plástico	$IP > 15$

Fuente: Manual de ensayos y materiales de suelos ABC

- Carta de plasticidad:

Los límites líquido y plástico se determinan por pruebas de laboratorio relativamente sencillas que proporcionan información sobre la naturaleza de los suelos cohesivos. Las pruebas han sido utilizadas ampliamente por los ingenieros para correlacionar varios parámetros físicos del suelo, así como para la identificación del mismo.

Figura N°2.7: Carta de plasticidad



Fuente: Braja M. Das

2.1.12.4 Ensayo de análisis granulométrico

El análisis granulométrico de suelos tiene como objetivo determinar la distribución según los tamaños de las partículas presentes en una muestra, se puede utilizar la serie de tamices completa o una alternativa que también brinda una separación uniforme.

Tabla N°2.7: Serie de tamices

Serie completa de tamices

Tamices	Abertura (mm)
3"	75.000
2"	50.800
1 1/2"	38.100
1"	25.400
3/4"	19.000
3/8"	9.500
N°4	4.760
N°10	2.000
N°20	0.840
N°40	0.425
N°60	0.260
N°140	0.106
N°200	0.075

Fuente: Elaboración propia

Para seleccionar el tamaño de porción, se debe conocer el tamaño máximo de partículas.

Tabla N°2.8: Peso mínimo de la muestra según el tamaño máximo de partículas

Diámetro nominal de las partículas más grande mm (plg)	Peso mínimo aproximado de la porción (g)
9.5 (3/8")	500
19.6 (3/4")	1000
25.7 (1")	2000
37.5 (1 1/2")	3000
50.0 (2")	4000
75.0 (3")	5000

Fuente: Manual de ensayos y materiales de suelos ABC

2.1.12.5 Ensayo de Proctor estándar (compactación)

El ensayo de Proctor modificado tiene como finalidad determinar la relación entre el contenido de agua y el peso unitario seco del suelo para al final poder realizar la curva de compactación; existen tres distintos métodos dependiendo de las características del suelo:

- Método A: Este método aplica cuando el 20 % o menos de la muestra de suelo es retenida en el tamiz N° 4, para el ensayo se utiliza la parte de la muestra que pasa por el tamiz N° 4 y un molde de 101.6 mm, en 5 capas con 25 golpes por cada una compactada.
- Método B: Este método aplica cuando más del 20 % de la muestra de suelo es retenida en el tamiz N° 4 y 20 % o menos en el de 3/8", para el ensayo se utiliza la parte de la muestra que pasa por el tamiz N° 3/8" y un molde de 101.6 mm, en 5 capas con 25 golpes por cada una compactada.
- Método C: Este método aplica cuando más del 20 de la muestra de suelo es retenida en el tamiz N° 3/8" y menos del 30 % en el de 3/4", para el ensayo se utiliza la parte de la muestra que pasa por el tamiz N° 3/4" y un molde de 152.4 mm, en 5 capas con 25 golpes por cada una compactado.

2.2 Marco normativo

La norma para la realización del ensayo compresión inconfiada se describe en AASHTO T 208 y ASTM D 2126, la cual será descrita al final.

Las Normas descritas a continuación fueron tomadas del manual de ensayos y materiales de suelos de la ABC.

1. Contenido de humedad:

- Norma ABC: S0301. Determinación en laboratorio del contenido de agua.
- Norma ASTM equivalente: ASTM D2216
- Descripción: Este ensayo determina el contenido de agua en una muestra de suelo por secado en horno. Es esencial para calcular parámetros como la densidad seca y la relación de vacíos.

2. Análisis granulométrico por tamizado

- Norma ABC: S0302. Análisis granulométrico de suelos por tamizado.
- Norma ASTM equivalente: ASTM D422
- Descripción: Permite determinar la distribución del tamaño de partículas del suelo mediante tamices, información clave para su clasificación y comportamiento mecánico.

3. Límites de Atterberg (Límite líquido, Límite plástico e Índice de plasticidad)

Límite líquido

- Norma ABC: S0304. Determinación del límite líquido.
- Norma ASTM equivalente: ASTM D4318

Límite plástico e Índice de plasticidad

- Norma ABC: S0305. Determinación del límite plástico e índice de plasticidad.
- Norma ASTM equivalente: ASTM D4318

Descripción: Los límites de Atterberg determinan las transiciones de estado del suelo (sólido,

plástico y líquido) en función de su humedad.

Son parámetros fundamentales en la clasificación de suelos finos.

4. Compactación Proctor Estándar

- Norma ABC: S0405. Compactación de suelos en laboratorio – Ensayo Proctor estándar.
- Norma ASTM equivalente: ASTM D698
- Descripción: Permite establecer la relación entre el contenido de humedad y la densidad seca, determinando así la humedad óptima y la densidad máxima seca bajo una energía de compactación estándar.

5. Resistencia a la Compresión Inconfinada

- Norma ABC: S0604. Resistencia a la compresión simple (inconfinada) de suelos cohesivos.
- Norma ASTM equivalente: ASTM D2166
- Descripción: Este ensayo mide la resistencia de un suelo cohesivo a cargas axiales sin confinamiento lateral, siendo clave en el análisis de estabilidad y capacidad de carga del terreno. La muestra cilíndrica de suelo se ensaya bajo carga axial creciente hasta el fallo, midiendo el esfuerzo máximo que puede resistir sin deformaciones laterales contenidas. La resistencia a la compresión inconfinada se calcula como la carga máxima dividida entre el área corregida de la muestra. Además, se determina el módulo de deformación, si se requiere un análisis de comportamiento elástico.

Este ensayo es de gran relevancia para estimar la cohesión aparente ($c = qu/2$) en análisis geotécnicos, y sirve como parámetro de entrada en diseños de cimentaciones superficiales, estabilidad de taludes y mejoramientos de suelos. Así mismo, se emplea en estudios comparativos cuando se introducen aditivos estabilizantes, permitiendo medir su efecto sobre la resistencia del suelo tratado.

2.3 Marco referencial

- Cloruro de magnesio

El cloruro de magnesio es un compuesto químico, $MgCl_2$, que se utiliza como estabilizante de suelos debido a su capacidad de absorber humedad del aire y unirse a las partículas del suelo, formando una capa dura que reduce la emisión de polvo y aumenta la resistencia. Su efecto higroscópico y su capacidad de disolverse en agua lo hacen útil en caminos sin pavimentar y superficies no pavimentadas.

El cloruro de magnesio, especialmente el hexahidratado ($MgCl_2 \cdot 6H_2O$), actúa como un ligante que une las partículas de suelo, creando una estructura más compacta y resistente.

Este concepto es fundamental para la elaboración del documento.

- Cloruro de calcio

Indican que el uso del Cloruro de Calcio proporcionará un mejor desempeño al reducir la plasticidad de un suelo arcilloso destinado a usarse como un material de mejoramiento, por su incidencia en la capacidad de soporte del suelo.

Este concepto es fundamental para la elaboración del documento.

- Suelo arcilloso

Se debe de conocer el suelo en estudio; el concepto citado a continuación es simple, pero brinda la información deseada.

Son partículas de cualquier sustancia inorgánica menores a 0,02 mm., tamaño para el cual empiezan a tener influencia las acciones fisicoquímicas. Los terrenos arcillosos son en principio, los más peligrosos para cimentar. En ellos se pueden producir grandes asientos en un largo o aun larguísimo plazo de tiempo (ABC).

- Compresión Inconfinada

La resistencia a la compresión no confinada (UCS) es el esfuerzo de compresión axial máximo que puede tolerar una muestra de material cilíndrica recta bajo condiciones no confinadas; el esfuerzo de confinamiento es cero.

- Cohesión

La cohesión en el suelo arcilloso se refiere a la fuerza interna que une sus partículas finas y plásticas, debido a la mineralogía de la arcilla y la presencia de agua actuando como puente entre las partículas.

- Estabilizador de Suelos

Producto químico, natural o sintético que, por su acción y/o combinación con el suelo, mejora una o más de sus propiedades de desempeño (ABC).

- Estabilización química de suelos

La estabilización química de suelos es una tecnología que se basa en la aplicación de un producto químico, genéricamente denominado estabilizador químico, el cual se debe mezclar íntima y homogéneamente con el suelo a tratar y curar de acuerdo a especificaciones técnicas propias del producto.

Los conceptos nombrados a continuación son de gran importancia para realizar los ensayos previos al de carga variable, los cuales se deben de realizar conociendo sus características principales.

- Índice de Plasticidad

Diferencia numérica entre el Límite Líquido y el Límite Plástico de un suelo (ABC).

- Límite Líquido

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, fluyan y entren en contacto en una longitud de 10 mm, aplicando 25 golpes (ABC).

- Límite Plástico

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 3 mm de diámetro se disgreguen en trozos de 0,5 a 1 cm de largo y no puedan ser reamasados ni reconstituidos (ABC).

- Clasificación de suelos

Los suelos con propiedades similares pueden ser clasificados en grupos y subgrupos en función de las características mecánicas y su comportamiento para la ingeniería. Los sistemas de clasificación proporcionan un lenguaje común para expresar de forma concisa las características generales de los suelos, que son infinitamente variadas, sin una descripción detallada.

En la actualidad, dos elaborados sistemas de clasificación que utilizan la distribución granulométrica y la plasticidad de los suelos son comúnmente utilizados para aplicaciones ingenieriles. Se trata del American Association of State Highway Officials (AASHTO) y el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos. En Estados Unidos, el sistema AASHTO es utilizado principalmente por los departamentos de carreteras estatales y del condado, mientras que los ingenieros geotécnicos normalmente prefieren utilizar el Sistema Unificado (BRAJA M. DAS).

- Consistencia del suelo

Cuando los minerales de arcilla están presentes en el suelo de grano fino, el suelo se puede remover en presencia de algo de humedad sin que se desmorone. Esta naturaleza cohesiva se debe al agua adsorbida que rodea a las partículas de arcilla.

2.4 **Análisis del aporte teórico**

La teoría identificada y estudiada de libros, textos virtuales, páginas web, aportan en gran magnitud al desarrollo del tema de investigación, ya que para la realización del trabajo se necesita de conocer los diferentes conceptos, características, normas a emplear para un correcto desarrollo del tema.

La investigación se sustenta en la mecánica de suelos y en la teoría de estabilización química, donde la compresión no confinada es indicador clave de la resistencia mecánica de arcillas.

Con este trabajo se extiende la teoría de estabilización química de suelos al cuantificar cómo distintos porcentajes de cloruro de magnesio y calcio modifican la cohesión efectiva y, por tanto, la curva de falla no confinada. También se busca introducir un análisis comparativo entre dos tipos de cloruro como agentes estabilizantes, aportando datos empíricos que

contrastan su eficacia según su valencia iónica.

El tema de investigación se centra principalmente en la forma en que afecta a la cohesión y resistencia la Estabilización de suelos con la adición de cloruro de magnesio y cloruro de calcio, por ende, se tuvo que estudiar y centrar en los diferentes conceptos de interés relacionados con el mismo, de la misma manera se estudia en concreto la resistencia y cohesión como propiedades, por lo consiguiente no se toca el tema de otras propiedades.

El tipo de suelo en estudio es la arcilla ligera de baja a media compresibilidad, para eso se tuvo que extraer información para clasificar el tipo suelo, y sus diferentes características.

3 CAPÍTULO III: CRITERIOS DE RELEVAMIENTO DE LA INFORMACIÓN

3.1 Material de estudio

3.1.1 Ubicación

En Tarija tenemos varios bancos de material de distinta calidad, para el estudio de la investigación se obtuvo el material de la zona Norte de la ciudad de Tarija, en el Barrio Carlos Wagner con las Coordenadas siguientes:

Tabla N°3.1: Coordenadas del banco de arcilla

COORDENADAS			
UTM (Universal Transversa de Mercator)		Geográficas	
Este	Norte	Latitud	Longitud
318398,78	7620965,58	21°30'17,24" S	64°45'11,03" O

Fuente: Elaboración propia

Figura N°3.1: Ubicación del banco de arcilla



Fuente: Elaboración propia

3.1.2 Universo objetivo

El universo comprende la totalidad de los depósitos de suelo arcilloso ubicados en la zona Norte de la ciudad Tarija Cercado.

3.1.3 Población o universo muestral

La población concreta está formada por todos los horizontes de suelo arcilloso presentes en el barrio Carlos Wagner.

3.1.4 Muestra

Banco de arcilla de la parte Norte de la ciudad, Barrio Carlos Wagner, adaptado para el número de muestras a realizar en laboratorio. La determinación de muestra se realizó por el método de cuarteo manual, como se indica:

- Se colocó la muestra de campo sobre una superficie plana, dura y limpia, donde no hay pérdida de material, se mezcló el material hasta formar una pila cónica.
- Se dividió el material en cuatro partes de tal manera que se obtenga un espesor y diámetro uniforme para cada parte.
- Se eliminó dos de las partes diagonales opuestas (Seleccionadas de color rojo) y se mezcló el material restante (fue tomado para el uso de los ensayos en laboratorio)

3.2 Criterios de muestreo

Se asignó de manera directa el nivel de confianza del 95% considerando una población infinita, sin embargo, mediante la metodología estratificada se puede asignar números lógicos para hacer el correspondiente ajuste.

Se adoptará una varianza de ($\sigma^2 = 0.10$) debido a que el tiempo asignado para la realización de trabajos está entre 3 a 4 meses.

El error correspondiente está en ($e = 5\%$), valor estándar usado en investigaciones.

$$NC = 95\% \rightarrow Z = 1.96 \text{ (valor a usar para nuestro cálculo)}$$

Tabla N°3.2: Criterios de muestreo

ETAPA	ENSAYOS	Ni	σ_2	Ni* σ_2	fa	ni
Exploratoria	De exploración	6	0,10	0,6	0,04	3
	Contenido de humedad	6	0,10	0,6	0,04	3
	Granulometría	6	0,10	0,6	0,04	3
Caracterización	Limite Liquido	6	0,10	0,6	0,04	3
	Limite Plástico	6	0,10	0,6	0,04	3
	Índice de Plasticidad	6	0,10	0,6	0,04	3
Dosificación 1,5%, 3% y 4,5 %	Limite Liquido (MgCl ₂)	6	0,10	0,6	0,04	3
	Limite Plástico (MgCl ₂)	6	0,10	0,6	0,04	3
	Índice de Plasticidad (MgCl ₂)	6	0,10	0,6	0,04	3
	Limite Liquido (CaCl ₂)	6	0,10	0,6	0,04	3
	Limite Plástico (CaCl ₂)	6	0,10	0,6	0,04	3
	Índice de Plasticidad (CaCl ₂)	6	0,10	0,6	0,04	3
	Compactación (Proctor Estándar)	6	0,10	0,6	0,04	3
	Compactación (Harvard)	6	0,10	0,6	0,04	3
Dosificación 1,5%, 3% y 4,5 %	Compactación Harvard (MgCl ₂)	6	0,10	0,6	0,04	3
	Compactación Harvard (CaCl ₂)	6	0,10	0,6	0,04	3
Pruebas definitivas	Compresión inconfiada (patrón)	10	0,10	1	0,06	5
	Compresión inconfiada (cloruro de magnesio)	32	0,10	3,2	0,19	15
	Compresión inconfiada (cloruro de calcio)	32	0,10	3,2	0,19	15
		$\Sigma =$	170	17		80

Fuente: Elaboración propia

El total de ensayos cubierto por la investigación en el periodo entre 3 a 4 meses corresponde a **80 ensayos** bien definidos en cada categoría.

3.2.1 Zona de muestreo

La zona de muestreo corresponde al barrio Carlos Wagner, ubicado en la zona norte del municipio de Tarija Cercado. Se tomaron muestras de suelo en tres puntos específicos del área, representativos de su topografía y su entorno.

Figura N°3.2: Zonas de muestreo



Fuente: Elaboración propia

3.3 Métodos y técnicas

3.3.1 Diseño de la investigación

El diseño de la investigación es experimental, debido a que “la esencia de esta concepción de experimento es que requiere la manipulación intencional de una acción, para analizar sus posibles resultados”, es así que la investigación desarrollará la manipulación de la adición

del cloruro de magnesio hexahidratado y cloruro de calcio en diferentes proporciones para determinar el efecto en la estabilización de suelos.

El diseño de la investigación se realizó con 2 variables de estudio y con cuatro niveles para cada variable como se muestran en la siguiente tabla.

Tabla N°3.3: Variables independientes y niveles de estudio

Variables Independientes de Estudio	Niveles de Estudio
Factor A	a1
	a2
	a3
	a4
Factor B	b1
	b2
	b3
	b4
Variables Dependientes de Estudio Resistencia a la compresión no confinada (Kg/cm ²)	

Fuente: Elaboración propia

Donde:

Factor A: Porcentaje de cloruro de magnesio

a1 = 0%, a2 = 1,5%, a3 = 3%, a4 = 4,5%

Factor B: Porcentaje de cloruro de calcio

b1 = 0%, b2 = 1,5%, b3 = 3%, b4 = 4,5%

3.3.2 **Matriz de Diseño**

Se aplicó el diseño experimental tipo monofactorial con cinco repeticiones por cada nivel como se muestra en la tabla siguiente.

Tabla N°3.4: Matriz de diseño

Factor A/B	Y					Ý
Niveles	1	2	3	4	5	
a1	Y11	Y12	Y13	Y14	Y15	Y1
a2	Y21	Y22	Y23	Y24	Y25	Y2
a3	Y31	Y32	Y33	Y34	Y35	Y3
a4	Y41	Y42	Y43	Y44	Y45	Y4

Fuente: Elaboración propia

$[(N^{\circ} \text{ Niveles de A}) * (N^{\circ} \text{ de réplicas})] = [(4) *(5)] = 20 \text{ probetas.}$

Número total de pruebas a realizar = 20

Esto se realizará tanto para el Cloruro de Magnesio como para el Cloruro de Calcio.

3.3.3 **Técnicas, instrumentos y procedimiento de recolección de datos**

3.3.3.1 *Técnicas*

Observación directa: Técnica que consiste en determinar las propiedades y/o cambios mediante la percepción al momento de la toma de datos o resultados durante los distintos ensayos, en ese sentido esta técnica tuvo mayor relevancia cuando se realizaron los trabajos de campo y los ensayos de laboratorio, para posteriormente discutir en función a los resultados obtenidos.

3.3.3.2 *Instrumentos*

Fichas de ensayos de laboratorio: Medio empleado para la recolección y almacenamiento de la información durante los ensayos realizados en laboratorio. Los instrumentos de recolección de datos se adjuntan en el anexo de ensayos de laboratorio, los mismos que se encuentran con la información de los ensayos realizados.

Los ensayos aplicados al suelo en estudio están realizados como especifica la norma determinada para mecánica de suelos, los cuales son necesarios para establecer si hay una

mejora en la resistencia a la compresión no confinada de un suelo arcilloso aplicando cloruro de magnesio y cloruro de calcio como estabilizante químico.

Estos ensayos fueron supervisados por el personal encargado del laboratorio y realizados por el asesor de la tesis.

Tabla N°3.5: Ensayos en laboratorio

ENSAYOS (PROPIEDADES FISICAS)
Contenido de Humedad Análisis Granulométrico Límites de Atterberg (Limite Líquido, Limite Plástico e Índice de Plasticidad) Clasificación SUCS (Sistema Unificado de clasificación de suelos)
ENSAYOS (PROPIEDADES MECANICAS)
Proctor Estándar (Ensayo de compactación) Compresión no Confinada

Fuente: Elaboración propia

3.3.3.3 *Análisis de confiabilidad y validez*

La confiabilidad de un cuestionario se refiere a la consistencia de las puntuaciones obtenidas por las mismas personas, cuando se las examinan en distintas ocasiones con los mismos cuestionarios.

Un instrumento de medición es válido cuando mide aquello para lo cual está destinado tiene que ver con lo mide el cuestionario y cuan bien lo hace.

3.4 **Procedimiento Experimental**

3.4.1 **Reducción de muestras de campo a muestras de ensayo**

Las muestras en bolsa se tomaron con ayuda de una pala, barrena o cualquier otra herramienta de mano conveniente y se colocan en bolsas sin tratar de mantener el suelo en condición

inalterada.

Se colocó la muestra sobre una superficie dura, limpia y horizontal evitando cualquier pérdida de material o la adición de sustancias extrañas.

Se mezcló bien hasta formar una pila en forma de cono, repitiendo esta operación cuatro veces.

Cada palada tomada de la base se depositó en la parte superior del cono, de modo que el material caiga uniformemente por los lados del mismo.

Cuidadosamente se procedió a aplanar y extender la pila cónica hasta darle una base circular, espesor y diámetro uniforme, presionando hacia abajo con la cuchara de la pala, de tal manera que cada cuarteo del sector contenga el material original.

Posteriormente se dividió diametralmente el material en cuatro partes iguales, de las cuales se separan dos cuartos diagonalmente opuestos. Los dos cuartos restantes se mezclaron sucesivamente y se repitió la operación hasta obtener la cantidad de muestra requerida.

Cuando la cantidad de muestra fue apropiada para ello, se operó encima de una mesa con una paleta o cuchara pequeñas.

Se disgregaron los terrones que aún quedaban sin desmenuzar, en los casos difíciles resultó útil subdividir lo retenido mediante tamices, en dos o tres partes, con objeto de facilitar la disgregación con el mazo de caucho.

A continuación, se enseñará los datos y resultados obtenidos en todo el proceso de laboratorio de una repetición del suelo en estudio. Los resultados restantes de las otras repeticiones se mostrarán a detalle en el **Anexo C** de dicho documento.

3.4.2 **Caracterización del suelo**

3.4.2.1 ***Análisis granulométrico por tamizado***

Se dispuso toda la muestra poco a poco en el tamiz N° 200, luego se dejó caer agua dentro del tamiz, procediendo con el lavado sin perder suelo, con la mano se estrujó el mismo para que el fino comience a desaparecer, dejando el agua cristalina y en el tamiz solo quedarán cantidades muy pequeñas de arena.

El suelo que pasa el tamiz N° 200, junto con el agua se desechó ya que la diferencia de cálculos establecerá cuanto se ha perdido.

Se recogió el suelo retenido en el tamiz N° 200, que además está saturado y se dispuso en un recipiente para el secado del mismo.

Una vez secado y oreado, la arena seca se dispuso dentro de una serie de tamices finos.

A continuación, se muestran los resultados de dicho tamizado.

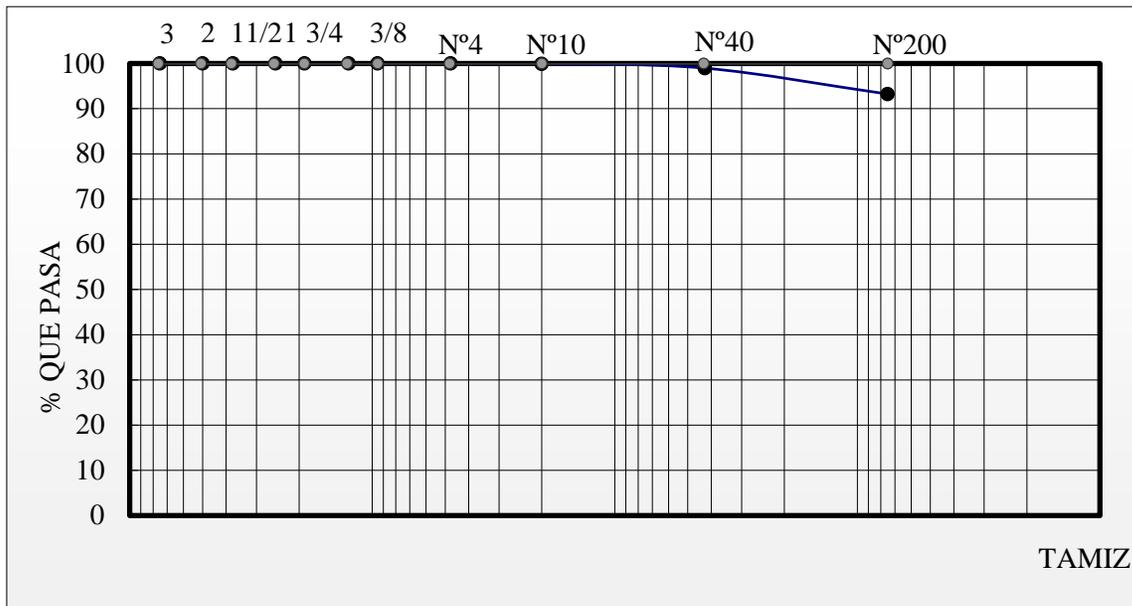
Tabla N°3.6: Granulometría del suelo

Peso Total (gr.)			1500		
Tamices	Tamaño (mm)	Peso Ret. (gr)	Ret. Acum (gr)	% Ret	% Que Pasa del Total
3"	75	0,00	0,00	0,00	100,00
2"	50	0,00	0,00	0,00	100,00
1 1/2"	37,50	0,00	0,00	0,00	100,00
1"	25,00	0,00	0,00	0,00	100,00
3/4"	19,00	0,00	0,00	0,00	100,00
1/2"	12,50	0,00	0,00	0,00	100,00
3/8"	9,50	0,00	0,00	0,00	100,00
N°4	4,75	0,00	0,00	0,00	100,00
N°10	2,00	1,41	1,41	0,09	99,91
N°40	0,425	14,33	15,74	1,05	98,95
N°200	0,075	85,77	101,51	6,77	93,23

Fuente: Elaboración propia

Con la tabla presentada anteriormente se pudo generar la curva granulométrica del suelo en estudio.

Gráfico N°3.1: Granulometría del suelo



Fuente: Elaboración propia

A continuación, se presenta una tabla resumen con los diferentes porcentajes de suelo que pasan los distintos tamices.

Tabla N°3.7: Tabla resumen granulometría

Muestra	Granulometría % que pasa del total		
	Nro. 10	Nro. 40	Nro. 200
Suelo 1	99,96	99,51	96,83
Suelo 2	99,97	99,54	96,86
Suelo 3	99,95	99,48	96,79

Fuente: Elaboración propia

3.4.2.2 *Contenido de humedad*

Se determinó mediante el método del horno, el cual es un método sencillo que nos permitió conocer la cantidad de agua presente en el suelo en relación con su peso seco.

Se tomó una muestra representativa de suelo, aproximadamente entre 70 y 100 gramos,

procurando que no se evapore agua durante el traslado, se pesó el recipiente (tara metálica) y se registró su peso, seguidamente se colocó la muestra de suelo en el recipiente y se pesó nuevamente para en definitiva introducirla al horno durante 24 horas, o hasta alcanzar peso constante.

Pasado el tiempo determinado se sacó el recipiente, se dejó enfriar y se procedió a pesarlo nuevamente obteniendo los resultados siguientes.

Tabla N°3.8: Contenido de humedad

Humedad natural			
Cápsula	1	2	3
Peso de suelo húmedo + Cápsula	86,63	85,95	85,28
Peso de suelo seco + Cápsula	81,32	80,4	79,60
Peso de cápsula	12,87	12,67	13,69
Peso de suelo seco	68,45	67,73	65,91
Peso del agua	5,31	5,55	5,68
Contenido de humedad	7,76	8,19	8,62
Promedio	8,13		

Fuente: Elaboración propia

A continuación, se presenta una tabla resumen con los contenidos de humedad calculados durante la practica:

Tabla N°3.9: Tabla resumen contenido de humedad

Muestra	Contenido de humedad (%)
Suelo 1	8,13
Suelo 2	8,16
Suelo 3	8,14

Fuente: Elaboración propia

3.4.2.3 Límites de Consistencia

Son parámetros que indican el comportamiento plástico del suelo según su contenido de humedad.

- Limite Liquido

Se colocó una porción de suelo tamizado (pasante N° 40) en una capsula de porcelana y se añadió agua hasta obtener una pasta uniforme.

Se llenó la copa del aparato Casagrande con la pasta, nivelando la superficie, con una espátula se hizo una ranura estándar en el centro de la masa. Seguidamente se giró la manivela y se contó los golpes necesarios para cerrar la ranura de 12 mm, se registró el número de golpes, y con la espátula en forma perpendicular a la ranura se realizó dos cortes a la muestra, luego se extrajo la porción entre los cortes y se la colocó en una tara para determinar el contenido de humedad.

Se repitió el procedimiento variando el contenido de agua, para obtener al menos cuatro puntos.

La tabla de datos y resultados que se obtuvo durante el ensayo es la siguiente:

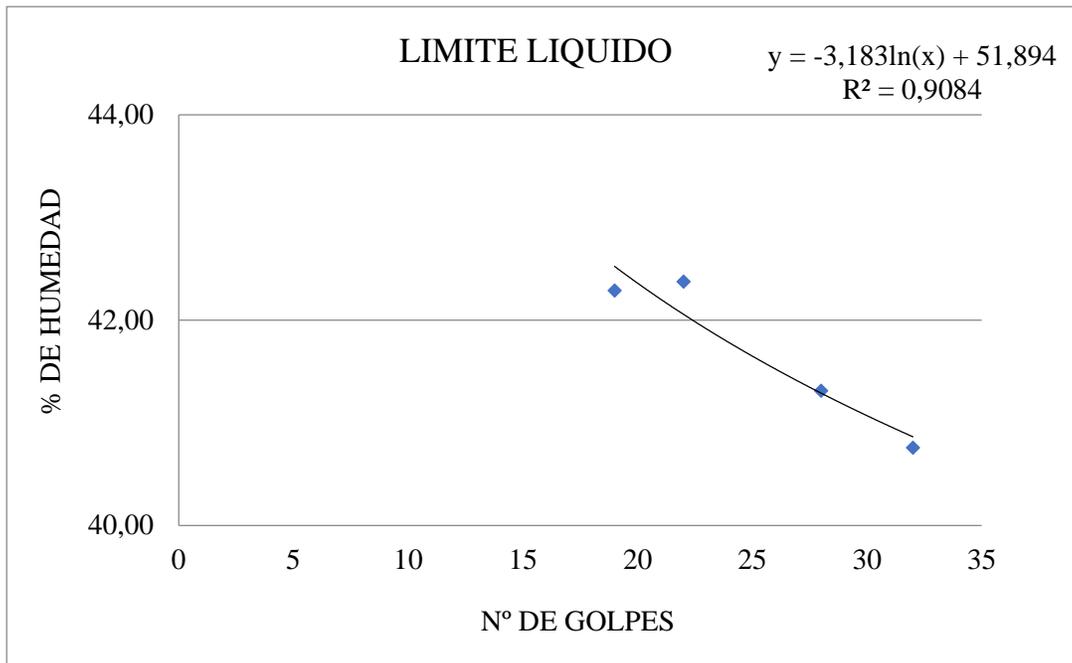
Tabla N°3.10: Limite liquido

Capsula N°	1	2	3	4
N° de golpes	19	22	28	32
Suelo Húmedo + Cápsula	23,12	23,34	20,84	25,34
Suelo Seco + Cápsula	19,72	20,45	18,51	21,79
Peso del agua	3,4	2,89	2,33	3,55
Peso de la Cápsula	11,68	13,63	12,87	13,08
Peso Suelo seco	8,04	6,82	5,64	8,71
Porcentaje de Humedad	42,29	42,38	41,31	40,76

Fuente: Elaboración propia

Finalmente se realizó la gráfica (contenido de humedad vs. numero de golpes) y se determinó el contenido de humedad a 25 golpes.

Gráfico N°3.2: Limite liquido



Fuente: Elaboración propia

Para determinar el límite líquido se hizo el uso de la ecuación de correlación que forman los puntos, en el valor de la incógnita X, se reemplazó el valor de 25. El valor resultante de la ordenada Y, corresponde al valor de la humedad que se asigna al límite líquido.

$$y = -3,183 * \ln(25) + 51,894 = 41,65 = LL$$

- Limite Plástico

Para determinar el LP se usó una parte de la pasta del límite líquido (la menos húmeda), se procedió a amasarla y formar cilindros de 3mm de diámetro sobre una superficie de vidrio.

Cuando la muestra comenzó a agrietarse al llegar a los 3 mm de diámetro, se tomó una porción de la parte agrietada y se determinó su contenido de humedad. El contenido de humedad es el Limite Plástico.

Los datos y resultados obtenidos durante la práctica se presentarán a continuación:

Tabla N°3.11: Limite plástico

Cápsula	1	2	3
Peso de suelo húmedo + Cápsula	13,84	14,38	13,39
Peso de suelo seco + Cápsula	13,60	14,13	13,24
Peso de cápsula	12,69	13,17	12,68
Peso de suelo seco	0,91	0,96	0,56
Peso del agua	0,24	0,25	0,15
Contenido de humedad	26,37	26,04	26,79

Fuente: Elaboración propia

$$LP = \frac{26,37 + 26,04 + 26,79}{3} = 26,40$$

- Índice de plasticidad

Es un valor resultante de la diferencia de los valores del Limite Liquido menos el Limite Plástico.

$$IP = LL - LP = 41,65 - 26,40 = 15,25$$

A continuación, se muestra la tabla resumen de los ensayos realizados:

Tabla N°3.12: Tabla resumen límites de consistencia

Muestra	Límites de Consistencia		
	LL	LP	IP
Suelo 1	41,65	26,40	15,25
Suelo 2	41,56	26,29	15,27
Suelo 3	42,49	27,10	15,38

Fuente: Elaboración propia

3.4.2.4 Clasificación del Suelo (S.U.C.S.)

Como ya contamos con datos de granulometría y de plasticidad, es posible realizar la clasificación de nuestro suelo en estudio.

A continuación, se presenta una tabla resumen con lo necesario para poder clasificar nuestro suelo.

Tabla N°3.13: Datos necesarios para la clasificación del suelo

Tamices	N°4	N°10	N°40	N°200
% Que pasa del Total	100,00	99,91	98,95	93,23

Limite Liquido (LL)	41,65
Limite Plástico (LP)	26,40
Índice de Plasticidad (IP)	15,25

Fuente: Elaboración propia

Con estos datos/resultados pudimos realizar la clasificación, según la clasificación de suelos SUCS. nuestro suelo es de tipo:

CL = Arcilla ligera de baja a mediana compresibilidad

3.4.3 Propiedades Mecánicas

3.4.3.1 Compactación (Proctor Estándar T-99)

Se realizó la práctica siguiendo las especificaciones del Método A (el cual indica el número de golpes = 25 y el número de capas de compactación = 3), ya que el peso del total del material retenido en el tamiz N°4 es menor a 20 %.

Primeramente, se tamizó la muestra por el tamiz N°10 y se dividió la cantidad total de muestra en 5 partes en lo posible iguales, ya que a cada una se le incrementara agua en diferentes proporciones.

Como el suelo en estudio es una arcilla ligera, se aplicó humedades iniciales a partir de 14

%, 16 %, 18 %, 20 % y 22 %.

Se humedeció una porción de suelo con la cantidad de agua previamente calculada, seguidamente se colocó el suelo en el molde cilíndrico en 3 capas de igual volumen, compactando cada una con 25 golpes de un pisón de 2,5 kg. desde 30,5 cm de altura.

Se retiró el exceso de suelo, se niveló la superficie, y se procedió a pesar el molde con el suelo compactado. Seguidamente se tomó una muestra del centro del suelo compactado para obtener el contenido de humedad real del mismo.

Todo el procedimiento se repitió unas cinco veces a distintos contenidos de humedad, o hasta que el peso del suelo compactado reduzca al pesarlo.

A continuación, se presenta los datos obtenidos en el ensayo, como también los resultados de humedades y densidades calculados para dicho propósito.

Tabla N°3.14: Volumen del cilindro de compactación

Volumen del cilindro	
Diámetro (cm)	10,2
Altura (cm)	11,5

Fuente: Elaboración propia

Tabla N°3.15: Compactación Proctor estándar

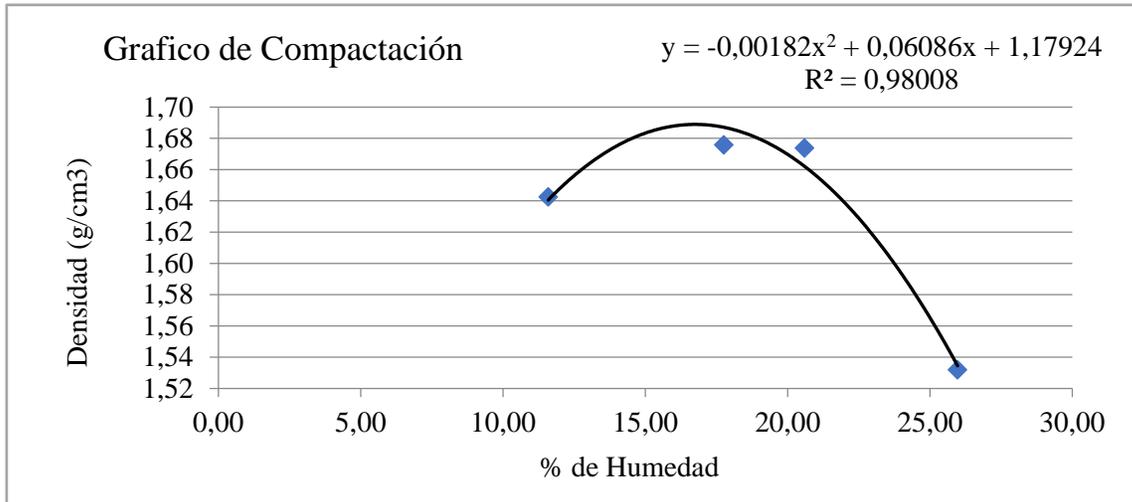
N° de capas	3	3	3	3
N° de golpes por capa	25	25	25	25
Peso suelo húmedo + molde	5886,20	6018,20	6060,60	5977,20
Peso del molde	4163,80	4163,80	4163,80	4163,80
Peso suelo húmedo	1722,40	1854,40	1896,80	1813,40
Volumen de la muestra	939,70	939,70	939,70	939,70
Densidad suelo húmedo (gr/cm ³)	1,83	1,97	2,02	1,93
Cápsula N°	A1	A2	A3	A3
Peso suelo húmedo + capsula	51,50	62,63	36,64	45,94
Peso suelo seco + cápsula	47,46	55,10	32,68	39,04
Peso del agua	4,04	7,53	3,96	6,90
Peso de la cápsula	12,60	12,69	13,45	12,47
Peso suelo seco	34,86	42,41	19,23	26,57

Contenido de humedad (%)	11,59	17,76	20,59	25,97
Densidad suelo seco (gr/cm ³)	1,64	1,68	1,67	1,53

Fuente: Elaboración propia

Para determinar la curva de compactación se grafica porcentaje de humedad vs densidad de suelo seco. A continuación, se muestra la gráfica generada.

Gráfico N°3.3: Curva de compactación (Proctor Estándar)



Fuente: Elaboración propia

Utilizando la ecuación de correlación, se puede obtener el valor del contenido de humedad óptimo y la densidad máxima seca.

$$x = \frac{-b}{2a} = \frac{-0,06086}{2 * (-0,00182)} = 16,72 \% = CHO$$

Reemplazando en la ecuación tenemos:

$$Dmax = -0,00182 * (16,72)^2 + 0,06086 * 16,72 + 1,17924 = 1,68 \frac{g}{cm^3}$$

Tabla resumen de los ensayos de compactación:

Tabla N°3.16: Tabla resumen compactación Proctor estándar

Muestra	Compactación	
	Densidad seca máx. (g/cm ³)	Contenido de Humedad Optimo (%)
Arcilla Ligera CL	1,68	16,72
	1,65	17,09
	1,68	16,71

Fuente: Elaboración propia

3.4.3.2 *Compresión Inconfinada*

Finalmente se realizó el ensayo de compresión inconfinada en muestras alteradas o compactadas de nuestro suelo ya clasificado como una Arcilla Ligera CL.

Para la realización del ensayo se elaboraron las probetas a partir de muestras compactadas a su contenido de humedad optimo (CHO), determinado previamente mediante el ensayo Proctor Estándar.

Con el objetivo de facilitar la formación y manejo de las probetas, se utilizó un molde Harvard, el cual permite la compactación del suelo directamente en una celda cilíndrica con dimensiones estándar, asegurando la obtención de especímenes con geometría uniforme (altura y diámetro) y listos para ser ensayados sin la necesidad del tallado posterior.

Como el ensayo de compactación Harvard no está normado, se buscó información para determinar el número de capas y el número de golpes a realizar en la compactación. Se realizó la compactación con 4 capas y 30 golpes, pero los resultados variaban del ensayo Proctor Estándar, así que se redujo el número de golpes y el número de capas a 25 y 3 respectivamente, lo cual fue un acierto ya que los resultados de la densidad máxima y el CHO fueron prácticamente iguales a los del ensayo Proctor Estándar.

Tabla N°3.17: Volumen del cilindro compactación Harvard

Volumen del cilindro	
Diámetro (cm)	3,30
Altura (cm)	7,80

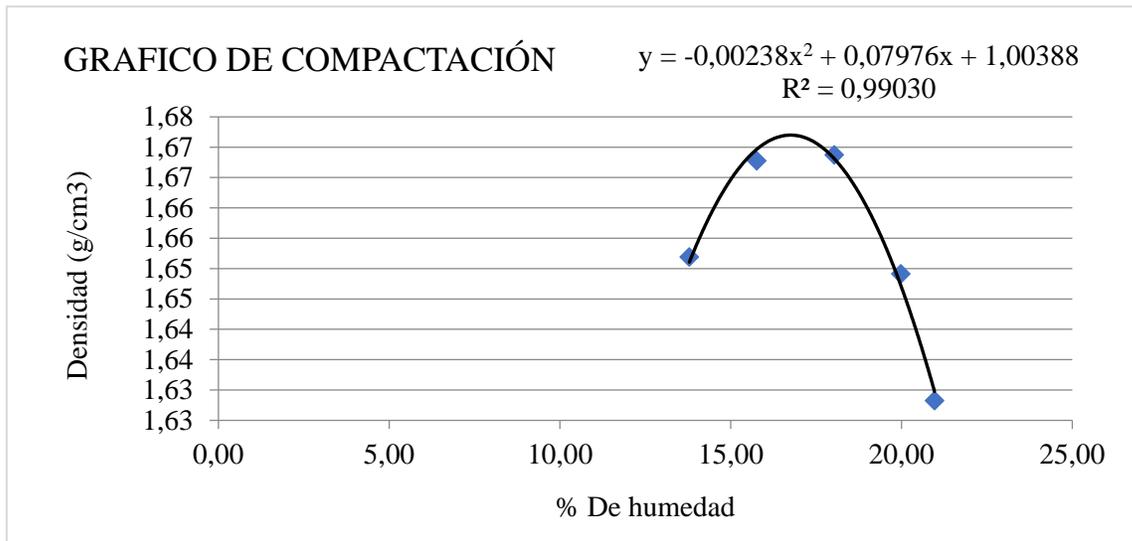
Fuente: Elaboración propia

Tabla N°3.18: Compactación Harvard

N° de capas	3	3	3	3	3
N° de golpes por capa	25	25	25	25	25
Peso suelo húmedo + molde	1223,60	1227,00	1229,60	1230,20	1229,60
Peso del molde	1098,20	1098,20	1098,20	1098,20	1098,20
Peso suelo húmedo	125,40	128,80	131,40	132,00	131,40
Volumen de la muestra	66,71	66,71	66,71	66,71	66,71
Densidad suelo húmedo (gr/cm ³)	1,88	1,93	1,97	1,98	1,97
Cápsula N°	A1	A2	A3	A4	A5
Peso suelo húmedo + capsula	218,20	240,20	230,60	229,80	245,60
Peso suelo seco + cápsula	203,60	223,20	211,00	208,37	223,55
Peso del agua	14,60	17,00	19,60	21,43	22,05
Peso de la cápsula	97,71	115,35	102,30	101,11	118,38
Peso suelo seco	105,89	107,85	108,70	107,26	105,17
Contenido de humedad (%)	13,79	15,76	18,03	19,98	20,97
Densidad suelo seco (gr/cm ³)	1,65	1,67	1,67	1,65	1,63

Fuente: Elaboración propia

Gráfico N°3.4: Curva de compactación Harvard



Fuente: Elaboración propia

De la ecuación de correlación se obtuvo:

$$CHO = 16,76\% , Dmax = 1,67 \frac{g}{cm^3}$$

Este método resulta especialmente útil cuando se busca garantizar la reproducibilidad en la forma y dimensiones de las probetas, evitando errores que puedan surgir durante el tallado manual. Además, el uso del aparato Harvard reduce el tiempo de preparación y manipulación del espécimen, minimizando la posibilidad de fisuras o alteraciones en el cuerpo de la muestra, como así también el cambio en el CHO.

El ensayo de compresión no confinada se realizó en una máquina de compresión inconfiada, utilizada para realizar ensayos de compresión simple en suelos cohesivos. El equipo consiste en una prensa uniaxial automática diseñada para aplicar carga axial de manera controlada a una muestra cilíndrica sin confinamiento lateral, típicamente preparada con dimensiones estándar (altura y diámetro) y previamente compactada a su CHO obtenido en el ensayo Proctor Estándar, la cantidad de suelo para cada ensayo fue de 500 gramos.

Una vez extraídas del molde Harvard, las probetas fueron ensayadas bajo carga axial sin confinamiento lateral, según el procedimiento establecido en la Norma ASTM D2126. Se registraron las deformaciones unitarias y la carga axial máxima alcanzada por cada muestra

hasta la falla, lo que permitió determinar la resistencia a la compresión inconfina del suelo tratado.

Los datos y resultados obtenidos durante la práctica se presentarán a continuación:

Tabla N°3.19: Características físicas de la probeta

Características de la probeta	
Diámetro (cm)	3,30
Longitud (cm)	7,70
Área (cm ²)	8,55
Volumen (cm ³)	65,86
Peso (gr)	122,85

Fuente: Elaboración propia

Tabla N°3.20: Compresión Inconfinada

Lectura Dial	Penet.	Def.	Lect.	Def.	Factor Correc.	Área Correg.	Esfuerzo Desviador	Resistencia al Corte
(mm)	(cm)	(cm)	Carga (kg)	Unitaria (ε)	(1-ε)	(cm ²)	(kg/cm ²)	(kg/cm ²)
0,0000	0,000	7,700	0,00	0,0000000	1,00000	7,5530	0,000000	0,000000
0,0570	0,006	7,694	3,08	0,0007403	0,99926	7,5537	0,408208	0,204104
0,1170	0,012	7,688	5,27	0,0015195	0,99848	7,5545	0,697291	0,348645
0,1770	0,018	7,682	6,90	0,0022987	0,99770	7,5553	0,912617	0,456309
0,2340	0,023	7,677	8,57	0,0030390	0,99696	7,5560	1,133569	0,566785
0,2930	0,029	7,671	9,94	0,0038052	0,99619	7,5568	1,314814	0,657407
0,3570	0,036	7,664	11,86	0,0046364	0,99536	7,5576	1,569669	0,784835
0,4160	0,042	7,658	12,08	0,0054026	0,99460	7,5584	1,597836	0,798918
0,4800	0,048	7,652	12,55	0,0062338	0,99377	7,5592	1,659982	0,829991
0,5420	0,054	7,646	13,19	0,0070390	0,99296	7,5600	1,744778	0,872389
0,6030	0,060	7,640	14,00	0,0078312	0,99217	7,5608	1,852268	0,926134
0,6680	0,067	7,633	13,75	0,0086753	0,99132	7,5617	1,818022	0,909011
0,7250	0,073	7,628	12,93	0,0094156	0,99058	7,5624	1,710246	0,855123
0,7830	0,078	7,622	12,12	0,0101688	0,98983	7,5632	1,602488	0,801244

Fuente: Elaboración propia

Las fórmulas usadas para la elaboración de la tabla anterior son las siguientes:

$$\text{Deformacion Unitaria } (\varepsilon) = \frac{\Delta L}{L_o}$$

Donde:

ΔL = Variación de la altura de la probeta (cm)

L_o = Altura inicial de la probeta

$$\text{Area Corregida } (A_c) = \frac{A}{1 - \varepsilon}$$

Donde:

A = Área de la sección de la probeta

$$\text{Esfuerzo de Compresion no Confinada } (\sigma_c) = \frac{P}{A} \left(\frac{kg}{cm^2} \right)$$

Donde:

P = Carga aplicada

El ensayo de la probeta se realizó controlando la carga, es decir se lo realizó hasta que la carga aplicada en la probeta disminuye o se mantiene constante durante 4 lecturas.

Explicación: Cuando la muestra comienza a fallar, la capacidad de la muestra para soportar más carga disminuye. Esta disminución puede ser notoria en la curva de carga vs deformación, indicando que el ensayo debe finalizar. Si la carga se mantiene constante por varias lecturas consecutivas, esto puede indicar que la muestra ha alcanzado su capacidad máxima de carga y no se deformará más bajo esa carga. Esto también puede ser un punto de referencia para finalizar el ensayo.

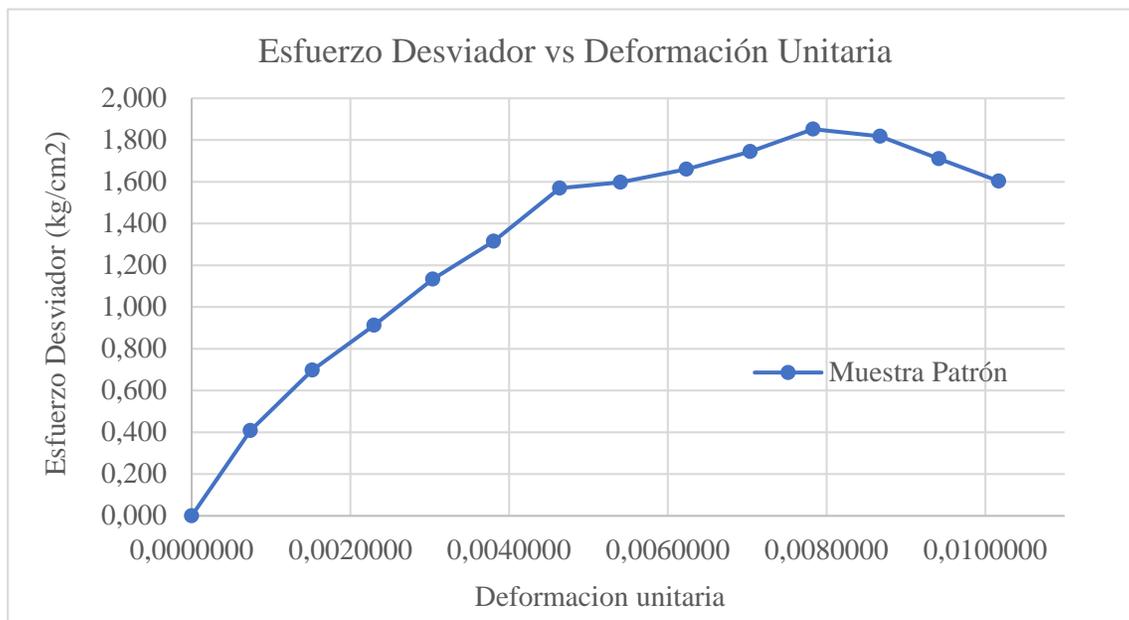
Se puede considerar que la resistencia a la compresión inconfiada es la carga máxima por unidad de área alcanzada durante el ensayo.

A continuación, se muestra el máximo esfuerzo de compresión no confinada obtenido y calculado durante el ensayo.

$$q_u = 1,85 \frac{kg}{cm^2}$$

Por último, se puede graficar la curva “Esfuerzo Desviador vs. Deformación Unitaria” la cual se muestra a continuación:

Gráfico N°3.5: Esfuerzo Desviador vs. Deformación unitaria (muestra patrón)



Fuente: Elaboración propia

Tabla resumen de las repeticiones realizadas:

Tabla N°3.21: Tabla resumen compresión inconfínada

Rep.	Compresión Inconfínada		
	Esfuerzo Desviador	Deformación Unitaria	Cohesión
1	1,83	0,01177	0,92
2	1,85	0,01128	0,93
3	1,82	0,01192	0,91
4	1,84	0,01175	0,92
5	1,85	0,01182	0,93

Fuente: Elaboración propia

Durante la ejecución del ensayo en el suelo estudiado, se observó que la mayoría de las probetas presentaron un comportamiento característico de rotura dúctil. Este tipo de falla se manifestó mediante una deformación progresiva y significativa antes de la falla, sin una fractura definida o un plano de falla abrupto. Las probetas tendieron a abultarse lateralmente en lugar de romperse de manera frágil, lo cual es consistente con el comportamiento típico de las arcillas plásticas saturadas, donde la cohesión y la plasticidad del material permiten una redistribución de esfuerzos antes de alcanzar la falla.

3.5 Dosificación y preparación de las muestras

Para llevar a cabo la presente investigación, se seleccionaron 3 porcentajes de dosificación para ambos aditivos utilizados: 1,5 %, 3 % y 4,5 % en peso respecto al peso seco del suelo.

Cada porcentaje cumple un rol específico en el estudio:

- 0% muestra patrón: Sirve como referencia o línea base para evaluar el comportamiento natural del suelo sin influencia química. Permite cuantificar el aporte real de los aditivos al comparar resultados.
- 1,5% de aditivo: Representa la dosis mínima capaz de generar cambios detectables en resistencia y deformabilidad. Con ella se evalúa la sensibilidad inicial del suelo al aditivo y se descarta si pequeñas adiciones ya son efectivas.
- 3% de aditivo: Se basa en hallazgos bibliográficos que ubican este rango como óptimo para muchos aditivos similares, equilibrando ganancia de resistencia con una buena trabajabilidad y costos moderados.
- 4,5% de aditivo: Explora la zona de sobre dosificación practica antes de que el incremento en aditivo deje de traducirse en mejoras significativas o incluso empeore la manejabilidad de la mezcla.

Estos valores fueron elegidos con el objetivo de evaluar el comportamiento mecánico (cohesión y resistencia a la compresión inconfiada) del suelo tratado a diferentes niveles de concentración, permitiendo así observar de manera comparativa el efecto progresivo de cada aditivo en las propiedades del material.

La preparación de las muestras se realizó mediante la disolución del aditivo en agua, con el

fin de asegurar una distribución homogénea del mismo en el suelo.

Posteriormente, esta solución fue incorporada al suelo seco durante el proceso de mezclado, garantizando una adecuada integración del aditivo en la masa del material antes de ser moldeado para los ensayos correspondientes.

En el siguiente capítulo se presentarán las tablas de resultados obtenidos de muestras adicionadas con los porcentajes de aditivo ($MgCl_2$ y $CaCl_2$), las cuales serán analizadas a detalle.

4 CAPÍTULO IV: PROCESAMIENTO Y VALIDACIÓN DE RESULTADOS

4.1 Resultados del tratamiento y análisis de la información

4.2 Análisis de los resultados de ensayos suelo – aditivo ($MgCl_2$, $CaCl_2$)

Se realizará el análisis de resultados de ensayos de suelo con los aditivos $MgCl_2$ y $CaCl_2$, lo cual implica evaluar cómo estos aditivos modifican las propiedades del suelo, como los límites de consistencia, la densidad seca máxima, el CHO y por sobre todo la cohesión y resistencia a la compresión inconfinaada.

4.3 Análisis de los Límites de Consistencia del suelo

Se evaluó la variación de los límites de consistencia (Limite Liquido, Limite plástico e Índice de Plasticidad) de una arcilla CL al ser tratada con diferentes porcentajes de cloruro de magnesio ($MgCl_2$) y cloruro de calcio ($CaCl_2$), en dosificación de 1,5% 3% y 4,5%.

Los resultados obtenidos son los siguientes:

Tabla N°4.1: Tabla resumen Límites de consistencia aditivo ($MgCl_2$)

Cloruro de Magnesio ($MgCl_2$)

Muestra	Dosificación (%)	Límites de consistencia		
		LL	LP	IP
Arcilla ligera CL	0	41,65	26,40	15,25
	1,5	40,97	26,38	14,59
	3	39,88	26,93	12,95
	4,5	39,38	26,96	12,42

Fuente: Elaboración propia

Tabla N°4.2: Tabla resumen Limites de consistencia aditivo (CaCl₂)

Cloruro de Calcio (CaCl₂)

Muestra	Dosificación (%)	Límites de consistencia		
		LL	LP	IP
Arcilla ligera CL	0	41,65	26,40	15,25
	1,5	40,70	26,53	14,17
	3	39,39	26,87	12,52
	4,5	38,08	26,66	11,42

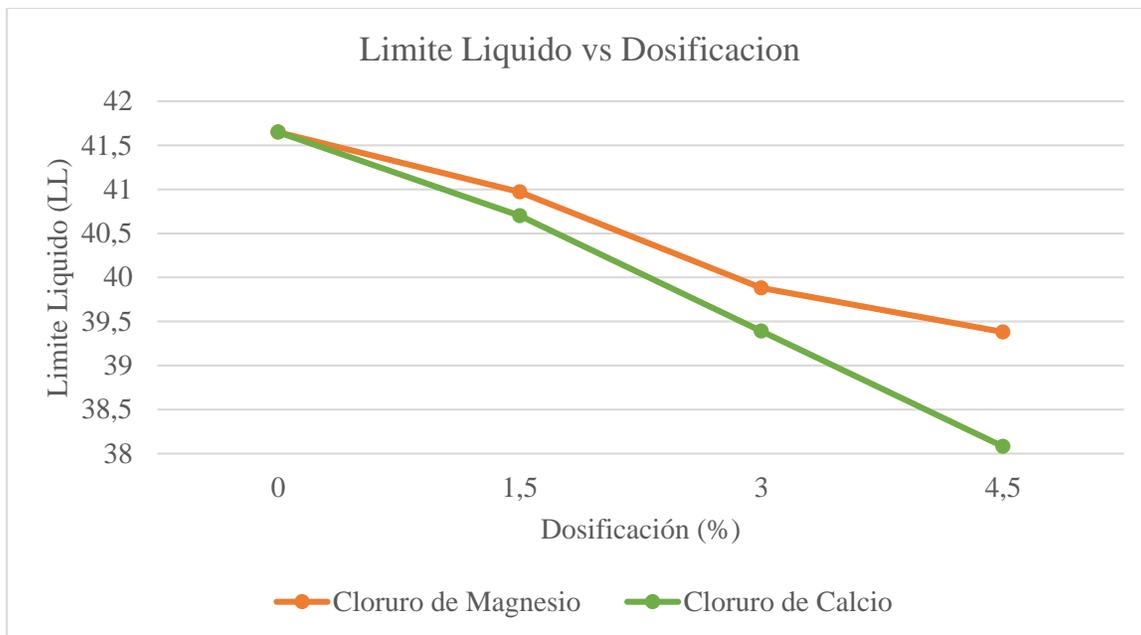
Fuente: Elaboración propia

Limite Liquido

- Tendencia decreciente en ambos tratamientos
- Con MgCl₂, el LL baja de 41,65 a 39,38 (reducción del 5,45 %)
- Con CaCl₂, la reducción es mayor, de 41,65 a 38,08 (reducción del 8,57 %)

Esto indica que el CaCl₂ tiene mayor capacidad de absorción de agua del suelo, probablemente debido a su mayor afinidad iónica y mayor poder floculante.

Gráfico N°4.1: Limite liquido vs. Porcentaje de dosificación (MgCl₂, CaCl₂)



Fuente: Elaboración propia

Ambos aditivos reducen el LL con el aumento de la dosificación,

El CaCl_2 muestra una reducción más pronunciada, especialmente a partir del 3%, bajando de 41,65 % a 38,08 %, esto puede deberse a la mayor capacidad del calcio para flocular las partículas arcillosas, disminuyendo su afinidad con el agua.

El MgCl_2 reduce el LL más suavemente, de 41,65 % a 39,38 %.

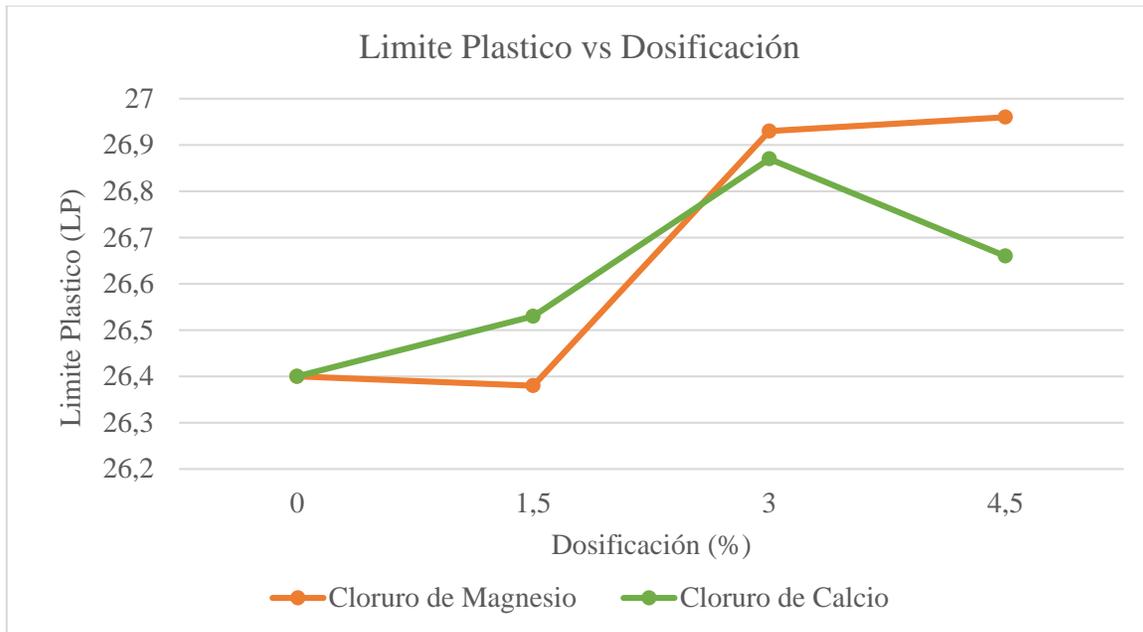
Conclusión Comparativa:

El LL disminuyó conforme aumento la dosificación de los estabilizantes, este comportamiento puede explicarse por la interacción química entre los iones aportados por las sales (Ca^{2+} y Mg^{2+}) y las partículas de arcilla. Ambos iones divalentes provocan una floculación de las partículas de arcilla, reduciendo la cantidad de agua necesaria para llevar el suelo a un estado líquido. Esto se debe a que los cationes de magnesio y calcio neutralizan las cargas negativas en la superficie de las partículas de arcilla favoreciendo la formación de agregados o microestructuras más estables que retienen menos agua.

Limite Plástico

- Los valores de LP se mantienen relativamente estables o aumentan ligeramente.
- Esto sugiere que los aditivos no alteran radicalmente la cantidad de agua necesaria para alcanzar el estado plástico, pero sí modifican la estructura interna del suelo, haciéndola más compacta.

Gráfico N°4.2: Limite plástico vs. Porcentaje de dosificación (MgCl₂, CaCl₂)



Fuente: Elaboración propia

Se mantiene relativamente estable en ambos casos, aumenta ligeramente con la dosificación, pero no sigue una tendencia clara ni crítica para el análisis.

Conclusión Comparativa:

A diferencia del LL, el límite plástico tendió a aumentar ligeramente, lo que sugiere que las muestras tratadas requerían un poco más de humedad para comportarse de forma plástica. Este efecto puede estar relacionado con la reestructuración interna del suelo, donde la formación de agregados más densos genera resistencia a las deformaciones plásticas a bajas humedades, desplazando el punto de transición entre sólido y plástico a valores ligeramente superiores.

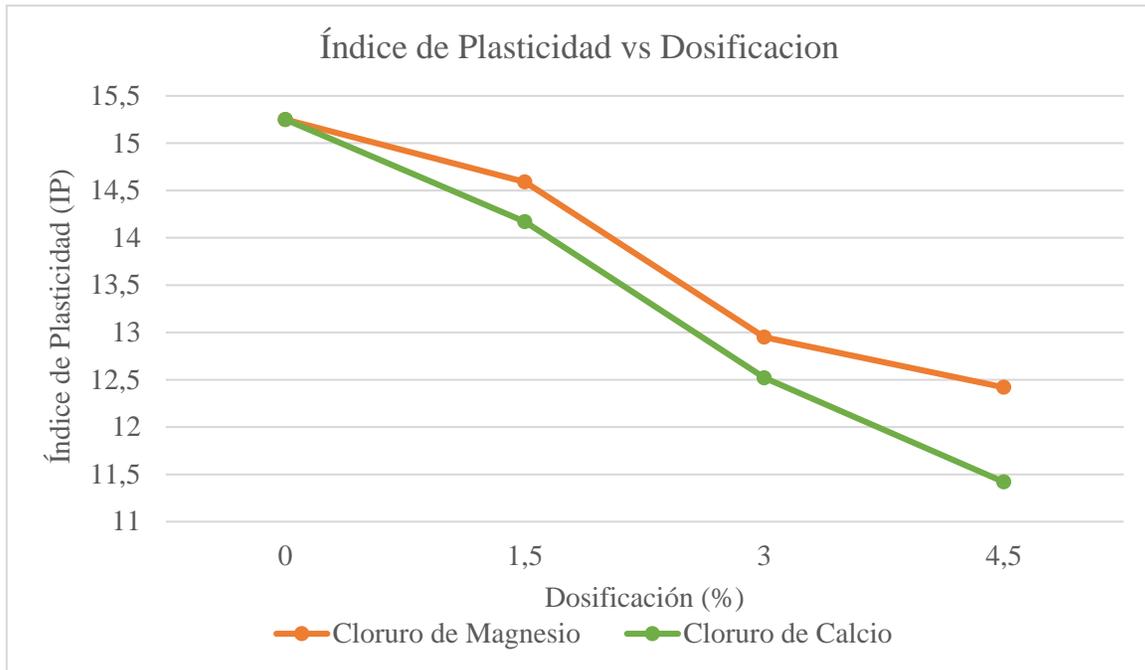
Índice de Plasticidad

- Tendencia decreciente clara en ambos casos
- Con MgCl₂, el IP disminuye de 15,25 a 12,42 (reducción del 18,56 %)
- Con CaCl₂, el IP disminuye de 15,25 a 11,42 (reducción del 25,11 %)

Esta reducción refleja que el suelo pierde plasticidad con la incorporación de sales, haciéndose más granular y menos expansivo, lo cual es favorable para su estabilidad como material de construcción.

El CaCl_2 muestra una mayor reducción, lo que puede implicar una mejor eficiencia como estabilizante para reducir la plasticidad del suelo.

Gráfico N°4.3: Índice de plasticidad vs. Porcentaje de dosificación (MgCl_2 , CaCl_2)



Fuente: Elaboración propia

Conclusión comparativa:

Ambos tratamientos muestran una tendencia positiva para la mejora del suelo, lo que puede mejorar su comportamiento mecánico. Sin embargo, el Cloruro de Calcio presenta una mayor efectividad en la reducción del límite líquido e índice de plasticidad, lo cual puede atribuirse a la mayor valencia del calcio (Ca^{2+} vs. Mg^{2+}), que mejora la floculación y disminuye la plasticidad del suelo.

4.4 Densidad Máxima y contenido de humedad óptimo

El objetivo del ensayo de compactación es determinar la relación entre el contenido de humedad y la densidad seca del suelo, con el fin de establecer las condiciones óptimas para alcanzar la máxima densidad posible, lo que mejora la estabilidad del terreno.

Los resultados del ensayo de compactación para el tipo de suelo en estudio (arcilla ligera CL), tratada con cloruro de magnesio y cloruro de calcio, en diferentes dosificaciones, se mostrarán a continuación.

Tabla N°4.3: Tabla resumen Compactación Harvard (MgCl₂)

Cloruro de Magnesio

Muestra	Dosificación (%)	Compactación	
		D. Max (gr/cm ³)	CHO (%)
Arcilla ligera CL	0	1,688	16,72
	1,5	1,692	17,92
	3	1,741	18,31
	4,5	1,682	18,95

Fuente: Elaboración propia

Tabla N°4.4: Tabla resumen Compactación Harvard (CaCl₂)

Cloruro de Calcio

Muestra	Dosificación (%)	Compactación	
		D. Max (gr/cm ³)	CHO (%)
Arcilla ligera CL	0	1,688	16,72
	1,5	1,743	17,97
	3	1,761	18,42
	4,5	1,702	19,20

Fuente: Elaboración propia

Densidad máxima seca

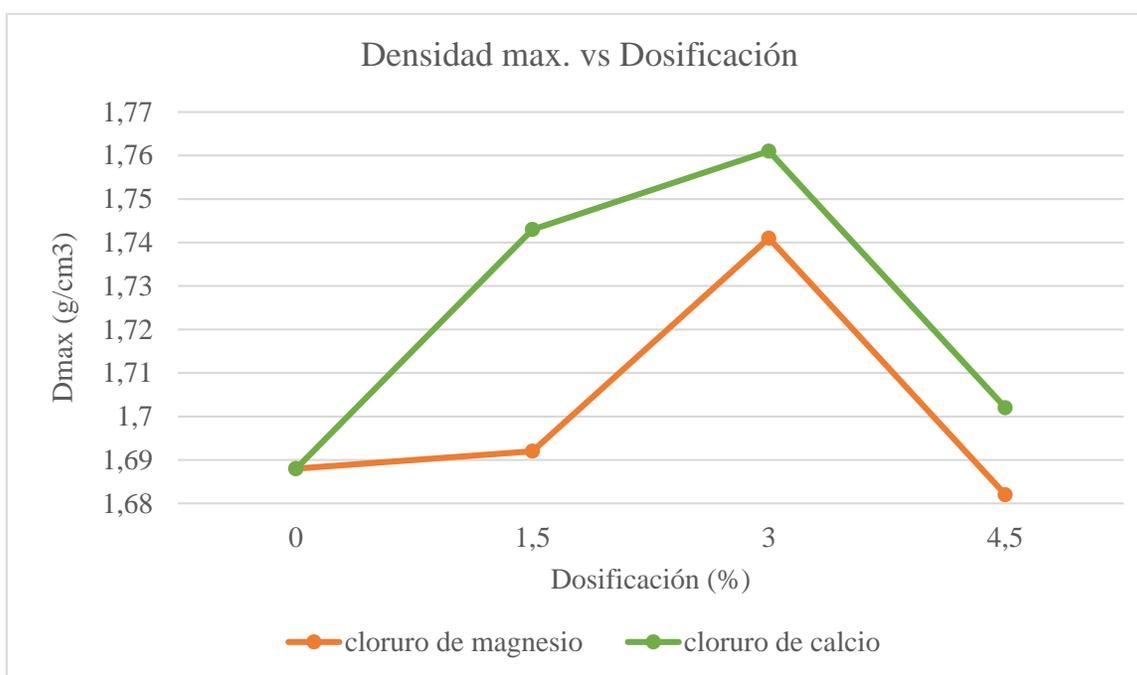
- Cloruro de Magnesio

Aumenta hasta 3 % (máximo en 1,741 g/cm³). Luego disminuye a 1,682 g/cm³ con 4,5 %. Esto indica que hay un pico óptimo de dosificación en 3 % donde la estructura del suelo logra mejor acomodación.

- Cloruro de Calcio

Similar tendencia, máxima densidad en 3 % (1,761 g/cm³). Disminuye a 1,702 g/cm³ en 4,5 %, al igual que con el cloruro de magnesio hay un pico óptimo en 3 %.

Gráfico N°4.4: Densidad seca máxima vs. Porcentaje de dosificación (MgCl₂, CaCl₂)



Fuente: Elaboración propia

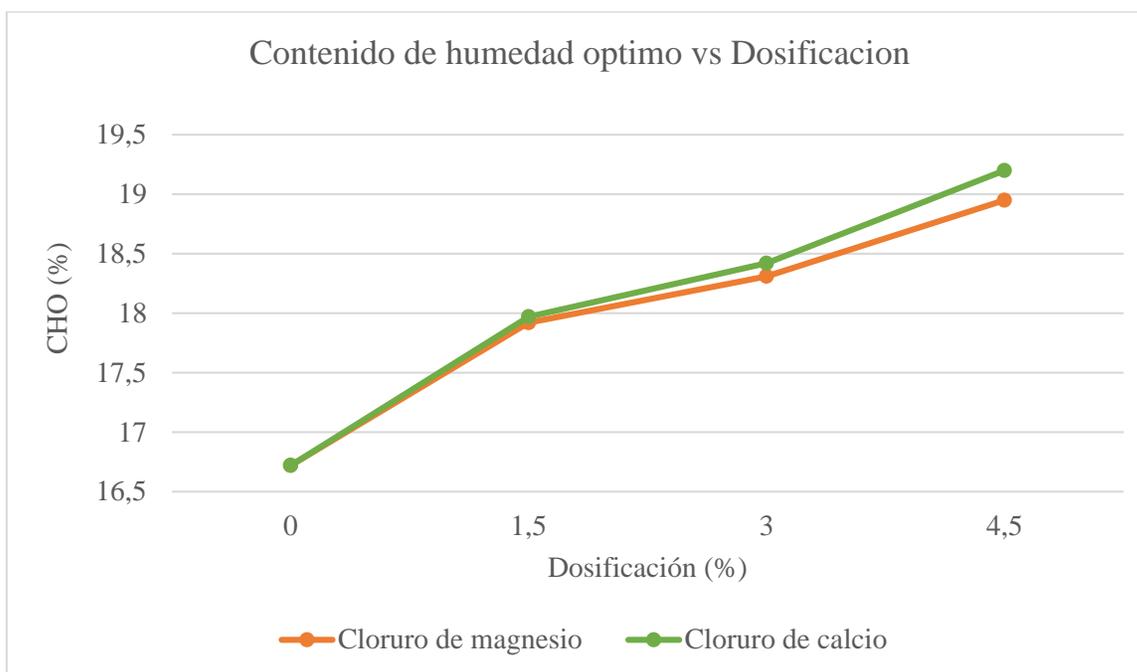
Contenido de Humedad Óptimo

Aumenta progresivamente en ambos casos:

- Cloruro de Magnesio: de 16,72 % a 18,95 %.
- Cloruro de Calcio: de 16,72 % a 19,20 %.

Esto es coherente con la naturaleza higroscópica de las sales, que atraen agua, lo que incrementa la humedad óptima necesaria para compactar.

Gráfico N°4.5: Contenido de humedad óptimo vs. Porcentaje de dosificación (MgCl₂, CaCl₂)



Fuente: Elaboración propia

El tratamiento con sales mejora la compactación del suelo arcilloso (CL), el cloruro de calcio muestra mejores resultados de compactación que el cloruro de magnesio, especialmente a una dosificación de 3 %.

La dosificación del 3 % parece ser la más eficiente para ambos aditivos, tanto en términos de densidad como de estabilidad. A mayores dosificaciones (4,5 %) la densidad empieza a disminuir, probablemente por saturación del sistema suelo-aditivo, pérdida de floculación afectando la estructura granular óptima o exceso de humedad no aprovechada.

Las sales aumentan la capacidad del suelo de retener agua, especialmente en forma absorbida, ambos tratamientos incrementan la necesidad de agua para alcanzar la compactación óptima, posiblemente por la mayor absorción y floculación del suelo, este aumento del CHO es esperado y deseable hasta cierto punto, ya que refleja una mayor capacidad de ajuste estructural del suelo.

El cloruro de calcio tiene un efecto más fuerte debido a una mayor capacidad de hidratación que el magnesio, lo que mejora la eficiencia de floculación y por eso se logra mayor densidad con CaCl_2 .

La presencia de Mg^{2+} y Ca^{2+} genera un aumento en la capacidad de retención de agua del suelo, debido a que estas sales influyen en la interacción entre las partículas de arcilla y el agua.

Conclusión comparativa:

Los dos aditivos mejoran la densificación del suelo hasta un límite (3 %), después del cual la eficiencia disminuye.

El comportamiento de ambos aditivos es similar, pero el cloruro de calcio muestra un efecto más marcado tanto en el aumento de la densidad máxima como en el contenido de humedad óptimo en todos los niveles de dosificación.

Ambos aditivos promueven la floculación y mejoran la estructura interna del suelo, permitiendo alcanzar mayores densidades secas. No obstante, existe un punto óptimo de dosificación después del cual los beneficios disminuyen. Este comportamiento destaca la importancia de un diseño experimental previo antes de aplicar tratamientos a campo, ya que un exceso de estabilizante puede generar efectos adversos.

Estos resultados son indicios de mejora en la estructura interna del suelo, lo cual puede influir positivamente en su comportamiento mecánico (resistencia, estabilidad).

4.5 **Compresión no Confinada (Resistencia)**

Se evaluó la variación de la resistencia a la compresión inconfiada de una arcilla CL, al ser tratada con diferentes porcentajes de cloruro de magnesio (MgCl_2) y cloruro de calcio (CaCl_2), en dosificación de 1,5%, 3% y 4,5%.

4.5.1 **Cloruro de Magnesio (1,5 % de dosificación)**

Tabla N°4.5: Compresión inconfiada (muestra patrón)

Muestra Patrón

Muestra	Dosificación (%)	Compresión Inconfiada	
		Deformación unitaria	Esfuerzo desviador (kg/cm ²)
Arcilla ligera CL	0	0,0000000	0,000
		0,0006623	0,314
		0,0014935	0,566
		0,0022987	0,793
		0,0030390	0,957
		0,0038442	1,113
		0,0046364	1,269
		0,0054026	1,336
		0,0061818	1,416
		0,0069870	1,483
		0,0077662	1,546
		0,0085844	1,591
		0,0093766	1,645
		0,0101558	1,684
		0,0109221	1,777
		0,0117532	1,836
0,0125325	1,811		
0,0133636	1,746		
0,0136623	1,667		

Fuente: Elaboración propia

Tabla N°4.6: Compresión inconfiada (1,5 % MgCl₂)

Cloruro de Magnesio

Muestra	Dosificación (%)	Compresión Inconfiada	
		Deformación unitaria	Esfuerzo desviador (kg/cm ²)
Arcilla ligera CL	1,5	0,0000000	0,000
		0,0006104	0,476
		0,0014675	0,845

	0,0022468	1,145
	0,0030000	1,343
	0,0038182	1,558
	0,0045974	1,717
	0,0053506	1,864
	0,0061558	1,926
	0,0069740	2,000
	0,0077273	2,050
	0,0085065	2,107
	0,0093247	2,122
	0,0100909	2,027
	0,0109481	2,004
	0,0117532	1,972
	0,0121299	1,862

Fuente: Elaboración propia

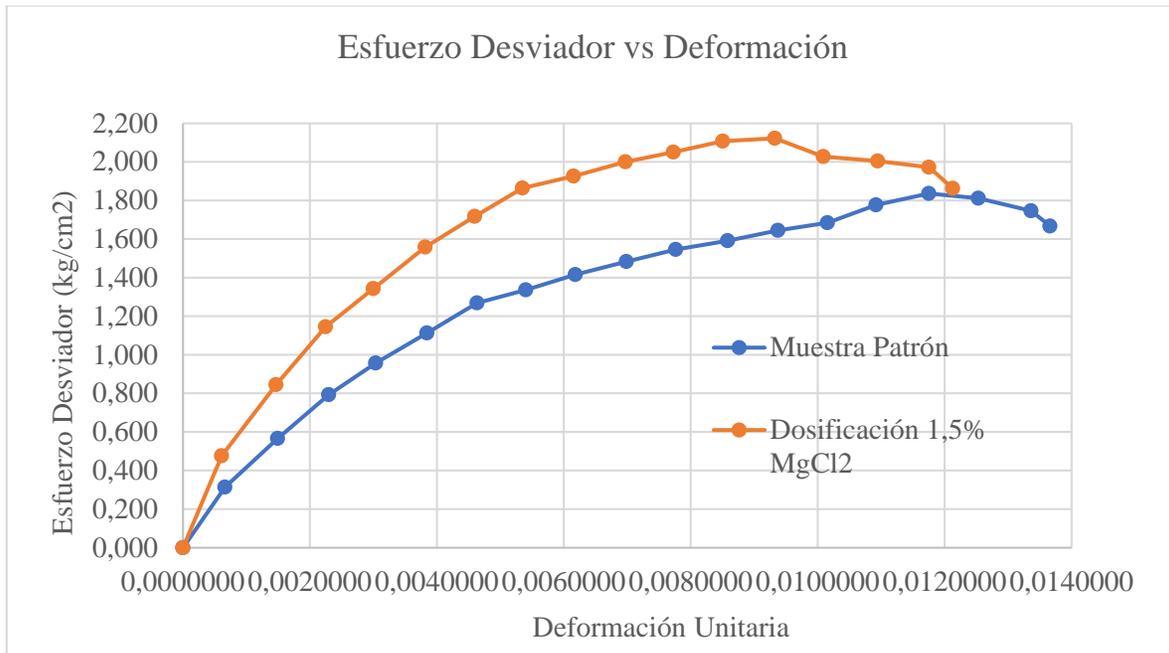
Se genera una variación de la resistencia de +15,38 % respecto a la muestra patrón, mientras que en la deformación unitaria la variación es de -20% aproximadamente.

Interpretación:

El aumento en la resistencia sugiere que el $MgCl_2$ mejora la cohesión entre las partículas del suelo. Esto ocurre porque el cloruro de magnesio reduce el espesor de la capa que rodea a las partículas de arcillosas, promoviendo una mayor compactación a nivel microestructural.

Respecto a la deformación unitaria, el suelo tratado se vuelve más rígido (menos deformable), esto indica un incremento en la rigidez ya que habría una mejora estructural que limita la deformación plástica, como también habría una menor ductilidad, aunque mejora la resistencia la muestra se deforma menos antes de fallar, lo cual es común en suelos tratados químicamente a bajas dosis.

Gráfico N°4.6: Esfuerzo Desviador vs. Deformación (1,5 % MgCl2)



Fuente: Elaboración propia

Conclusión:

La adición de 1,5 % de MgCl₂ mejora significativamente la resistencia del suelo y lo vuelve más rígido, esto es ideal cuando se busca aumentar la capacidad de soporte sin comprometer excesivamente la deformabilidad.

4.5.2 Cloruro de Magnesio (3 % de dosificación)

Tabla N°4.7: Compresión inconfiada (muestra patrón)

Muestra Patrón

Muestra	Dosificación (%)	Compresión Inconfiada	
		Deformación unitaria	Esfuerzo desviador (kg/cm ²)
Arcilla ligera CL	0	0,0000000	0,000
		0,0006623	0,314
		0,0014935	0,566
		0,0022987	0,793
		0,0030390	0,957
		0,0038442	1,113

	0,0046364	1,269
	0,0054026	1,336
	0,0061818	1,416
	0,0069870	1,483
	0,0077662	1,546
	0,0085844	1,591
	0,0093766	1,645
	0,0101558	1,684
	0,0109221	1,777
	0,0117532	1,836
	0,0125325	1,811
	0,0133636	1,746
	0,0136623	1,667

Fuente: Elaboración propia

Tabla N°4.8: Compresión inconfiada (3 % MgCl₂)

Cloruro de Magnesio

Muestra	Dosificación (%)	Compresión Inconfiada	
		Deformación unitaria	Esfuerzo desviador (kg/cm ²)
Arcilla ligera CL	3	0,0000000	0,000
		0,0005974	0,515
		0,0014416	0,940
		0,0021948	1,263
		0,0029870	1,484
		0,0037662	1,687
		0,0045455	1,801
		0,0053636	1,919
		0,0060909	2,049
		0,0068571	2,180
		0,0077143	2,332
		0,0084675	2,383
		0,0093117	2,445
		0,0100909	2,479
		0,0109351	2,512
0,0117662	2,314		
0,0124286	2,082		

Fuente: Elaboración propia

Se genera una variación de la resistencia de +36,48 % respecto a la muestra patrón, mientras que en la deformación unitaria la variación es de -6,96% aproximadamente.

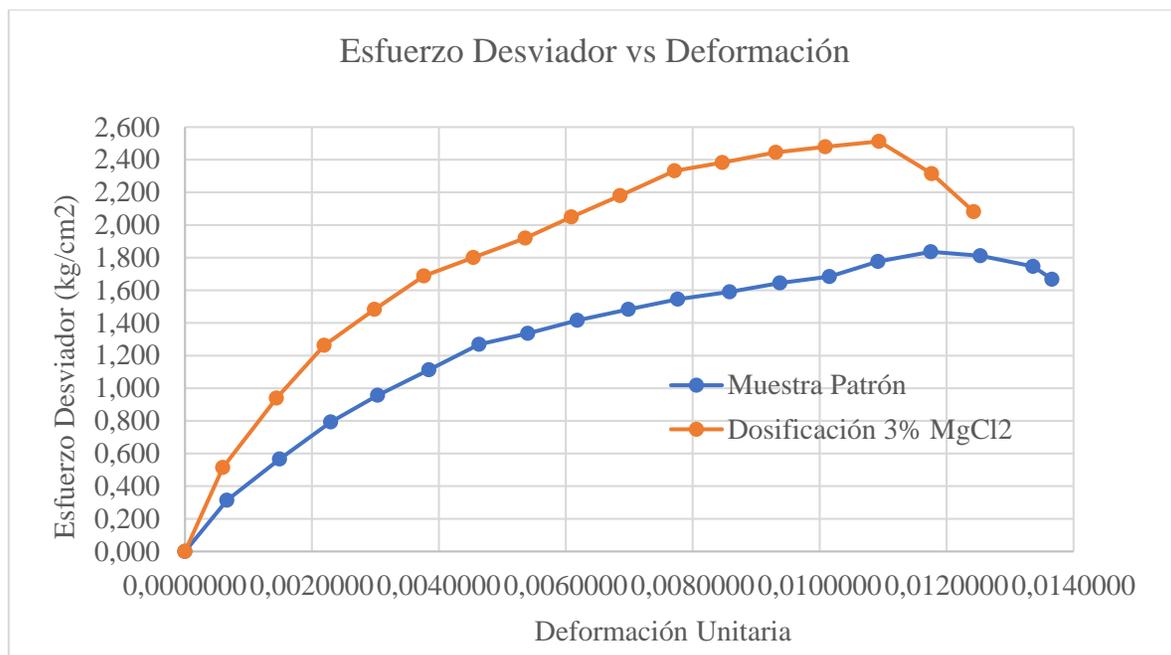
Interpretación:

Se presenta el incremento más alto entre todas las dosificaciones, a 3% se logra una óptima reorganización de partículas con una fuerte floculación, sin que se presenten efectos negativos como exceso de sales.

El cloruro de magnesio sigue reduciendo la capa y mantiene un equilibrio ideal entre aglutinamiento de partículas y humedad de compactación.

El suelo tratado aún se deforma de manera similar al patrón, aunque ligeramente menos, esto sugiere que mantiene cierta ductilidad mientras mejora significativamente su resistencia.

Gráfico N°4.7: Esfuerzo Desviador vs. Deformación (3 % MgCl₂)



Fuente: Elaboración propia

Conclusión:

La dosificación al 3 % representa la mejor relación resistencia/deformabilidad, se logra el mayor aumento en resistencia con una pérdida mínima de deformación, lo cual es ideal para estructuras que necesitan tanto, soporte como algo de flexibilidad.

4.5.3 **Cloruro de Magnesio (4,5 % de dosificación)**

Tabla N°4.9: Compresión inconfiada (muestra patrón)

Muestra Patrón

Muestra	Dosificación (%)	Compresión Inconfiada	
		Deformación unitaria	Esfuerzo desviador (kg/cm ²)
Arcilla ligera CL	0	0,0000000	0,000
		0,0006623	0,314
		0,0014935	0,566
		0,0022987	0,793
		0,0030390	0,957
		0,0038442	1,113
		0,0046364	1,269
		0,0054026	1,336
		0,0061818	1,416
		0,0069870	1,483
		0,0077662	1,546
		0,0085844	1,591
		0,0093766	1,645
		0,0101558	1,684
		0,0109221	1,777
		0,0117532	1,836
0,0125325	1,811		
0,0133636	1,746		
0,0136623	1,667		

Fuente: Elaboración propia

Tabla N°4.10: Compresión inconfiada (4,5 % MgCl₂)

Cloruro de Magnesio

Muestra	Dosificación (%)	Compresión Inconfiada	
		Deformación unitaria	Esfuerzo desviador (kg/cm ²)
Arcilla ligera CL	4,5	0,0000000	0,000
		0,0006364	0,515
		0,0014545	0,991

	0,0022727	1,308
	0,0030519	1,580
	0,0038571	1,778
	0,0045974	1,880
	0,0053506	2,022
	0,0062208	2,123
	0,0069610	2,175
	0,0077922	2,191
	0,0085844	2,293
	0,0093377	2,315
	0,0101169	2,315
	0,0109481	2,360
	0,0115974	2,386
	0,0125065	2,291
	0,0133117	2,235
	0,0136883	2,152

Fuente: Elaboración propia

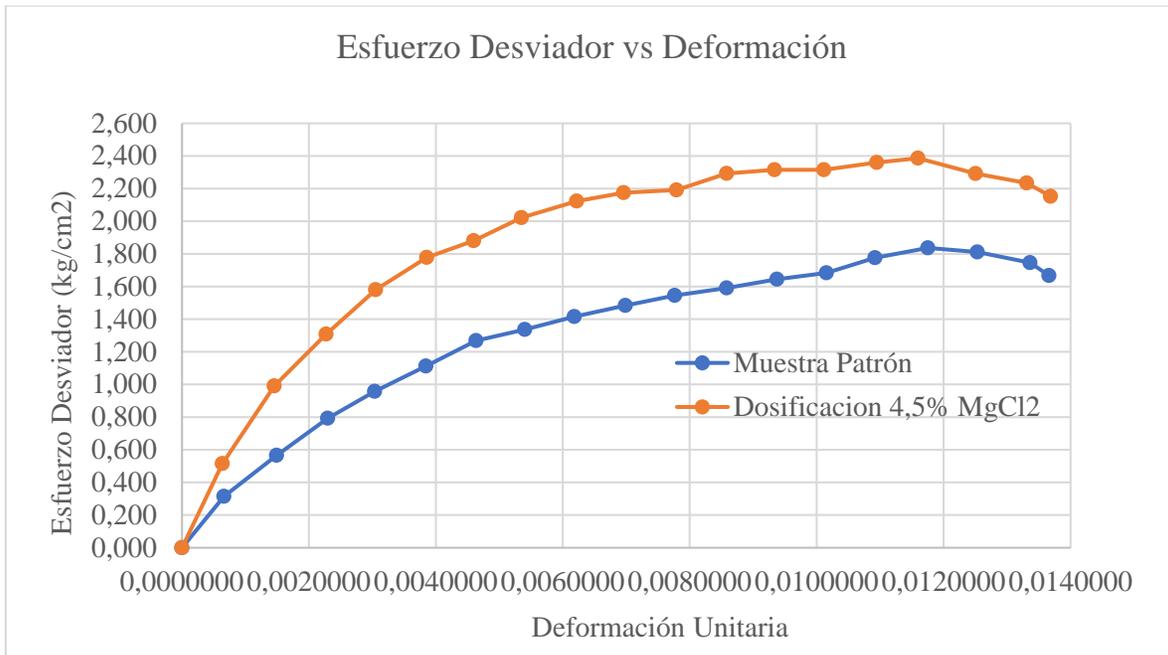
Se genera una variación de la resistencia de +30,48 % respecto a la muestra patrón, mientras que en la deformación unitaria la variación es de -1,33 % aproximadamente.

Interpretación:

Aún se genera una mejora significativa en la resistencia frente a la muestra patrón, sin embargo, menor que la obtenida con 3 %, lo cual puede deberse a un exceso de sal, lo que provocaría una redistribución del agua hacia las zonas externas de los agregados, reduciendo la efectividad del enlace interno. Altas concentraciones de $MgCl_2$ pueden atraer humedad, alterando la humedad de compactación real del suelo.

El suelo conserva casi la misma deformabilidad que la muestra sin tratar (patrón), esto puede indicar que la estructura interna no se ha vuelto más rígida o que la mejora en agregación a alcanzado su límite.

Gráfico N°4.8: Esfuerzo Desviador vs. Deformación (4,5 % MgCl₂)



Fuente: Elaboración propia

Conclusión:

Aunque se mantiene una mejora frente a la muestra patrón, la dosificación del 4,5 % no supera en rendimiento a la de 3 %, y podría estar cerca del punto de saturación, donde el exceso de aditivo deja de aportar beneficios y podría incluso volverse contraproducente a largo plazo.

Recomendación final basada en los tres análisis:

Tabla N°4.11: Resumen dosificaciones de MgCl₂

1,5 % MgCl ₂	3 % MgCl ₂	4,5 % MgCl ₂
Mejora moderada en resistencia y notable rigidez, útil si se requiere un suelo más firme	Mejor desempeño general, óptimo equilibrio entre resistencia y deformación	Mejora aceptable, pero ya no progresiva, riesgo de saturación

Fuente: Elaboración propia

4.5.4 **Cloruro de Calcio (1,5 % de dosificación)**

Tabla N°4.12: Compresión inconfiada (muestra patrón)

Muestra Patrón

Muestra	Dosificación (%)	Compresión Inconfiada	
		Deformación unitaria	Esfuerzo desviador (kg/cm ²)
Arcilla ligera CL	0	0,0000000	0,000
		0,0006623	0,314
		0,0014935	0,566
		0,0022987	0,793
		0,0030390	0,957
		0,0038442	1,113
		0,0046364	1,269
		0,0054026	1,336
		0,0061818	1,416
		0,0069870	1,483
		0,0077662	1,546
		0,0085844	1,591
		0,0093766	1,645
		0,0101558	1,684
		0,0109221	1,777
		0,0117532	1,836
0,0125325	1,811		
0,0133636	1,746		
0,0136623	1,667		

Fuente: Elaboración propia

Tabla N°4.13: Compresión inconfiada (1,5 % CaCl₂)

Cloruro de Calcio

Muestra	Dosificación (%)	Compresión Inconfiada	
		Deformación unitaria	Esfuerzo desviador (kg/cm ²)
Arcilla ligera CL	1,5	0,0000000	0,000
		0,0007143	0,584
		0,0014805	0,952

	0,0022727	1,253
	0,0031039	1,536
	0,0038961	1,768
	0,0046623	1,983
	0,0054935	2,142
	0,0062987	2,260
	0,0070260	2,351
	0,0078312	2,396
	0,0086623	2,415
	0,0094805	2,422
	0,0102857	2,427
	0,0107143	2,270

Fuente: Elaboración propia

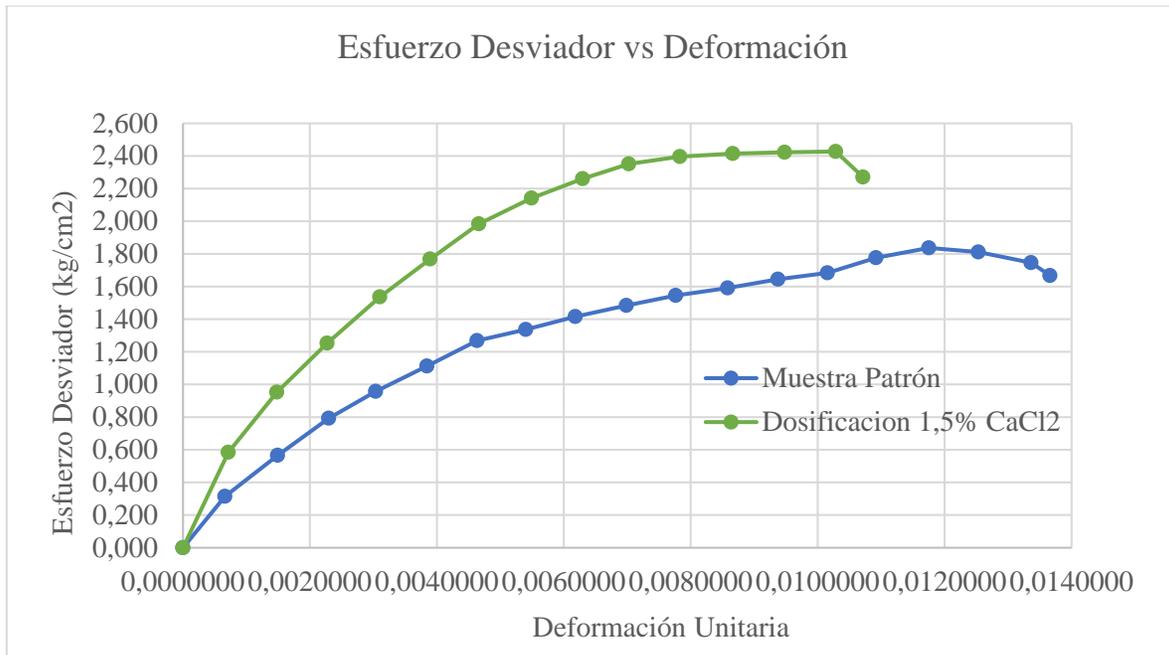
Se genera una variación de la resistencia de +32,06 % respecto a la muestra patrón, mientras que en la deformación unitaria la variación es de -12,48 % aproximadamente.

Interpretación:

La ganancia del 32 % en resistencia muestra que el cloruro de calcio mejora notablemente la cohesión interna del suelo. El Ca^{2+} , al tener mayor carga que los cationes naturales como Na^+ o K^+ , neutraliza las cargas negativas de las partículas de arcilla, promoviendo la floculación y agregación. Se mejora la capacidad portante sin alterar demasiado la deformación.

La reducción de deformación unitaria indica un suelo más rígido y menos plástico, esto puede ser deseable en aplicaciones estructurales, aunque se debe vigilar para no perder completamente la ductilidad.

Gráfico N°4.9: Esfuerzo Desviador vs. Deformación (1,5 % CaCl2)



	0,0046364	1,269
	0,0054026	1,336
	0,0061818	1,416
	0,0069870	1,483
	0,0077662	1,546
	0,0085844	1,591
	0,0093766	1,645
	0,0101558	1,684
	0,0109221	1,777
	0,0117532	1,836
	0,0125325	1,811
	0,0133636	1,746
	0,0136623	1,667

Fuente: Elaboración propia

Tabla N°4.15: Compresión inconfiada (3 % CaCl2)

Cloruro de Calcio

Muestra	Dosificación (%)	Compresión Inconfiada	
		Deformación unitaria	Esfuerzo desviador (kg/cm2)
Arcilla ligera CL	3	0,0000000	0,000
		0,0006364	0,532
		0,0014416	0,963
		0,0021948	1,320
		0,0029610	1,637
		0,0037403	1,863
		0,0045325	2,084
		0,0053506	2,282
		0,0061039	2,503
		0,0069221	2,571
		0,0076494	2,644
		0,0084675	2,689
		0,0109740	2,852
		0,0126494	2,812
		0,0131429	2,637

Fuente: elaboración propia

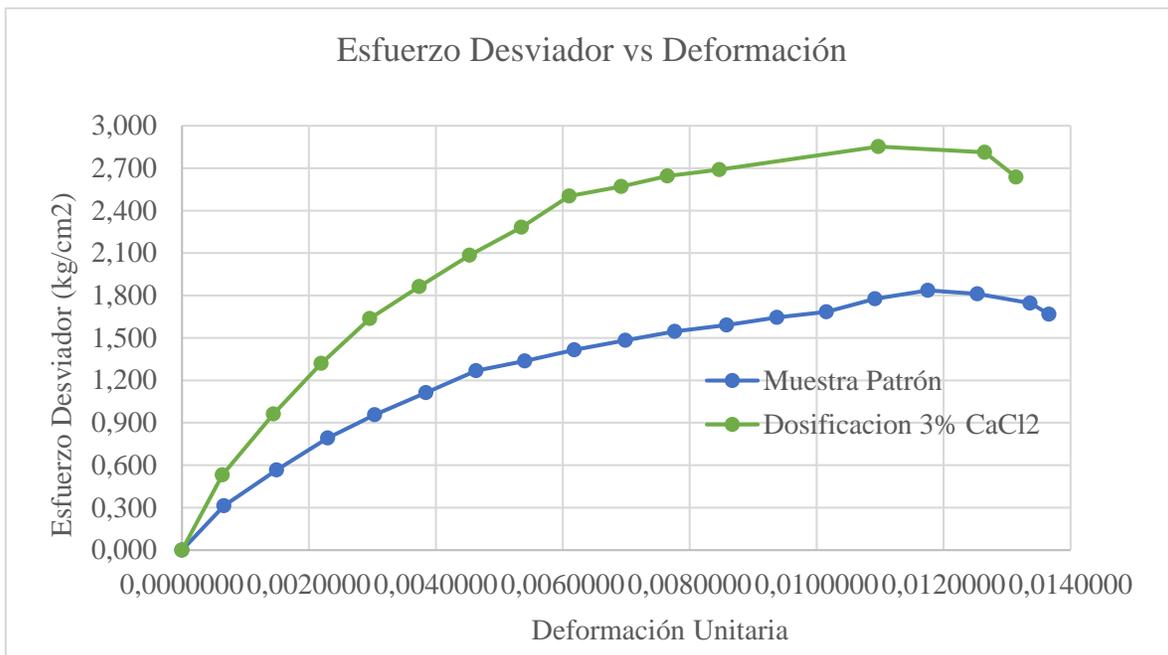
Se genera una variación de la resistencia de +55,37 % respecto a la muestra patrón, mientras que en la deformación unitaria la variación es de -6,63 % aproximadamente.

Interpretación:

La resistencia sube un 55 %, el mayor entre todas las dosificaciones, esto indica una óptima reacción del suelo con el CaCl_2 , mejor compactación micro estructural, más enlaces entre partículas, y una mayor capacidad de carga.

La deformación se mantiene cercana al patrón, bajando solo un 6,63 %, lo cual es deseable, más resistencia sin perder flexibilidad.

Gráfico N°4.10: Esfuerzo Desviador vs. Deformación (3 % CaCl_2)



Fuente: Elaboración propia

Conclusión:

La dosificación del 3 % de CaCl_2 es la más eficiente, logrando el mayor aumento de resistencia con una mínima pérdida de deformabilidad. Es ideal para suelo que requieren buena resistencia y cierta flexibilidad estructural.

4.5.6 **Cloruro de Calcio (4,5 % de dosificación)**

Tabla N°4.16: Compresión inconfiada (muestra patrón)

Muestra Patrón

Muestra	Dosificación (%)	Compresión Inconfiada	
		Deformación unitaria	Esfuerzo desviador (kg/cm ²)
Arcilla ligera CL	0	0,0000000	0,000
		0,0006623	0,314
		0,0014935	0,566
		0,0022987	0,793
		0,0030390	0,957
		0,0038442	1,113
		0,0046364	1,269
		0,0054026	1,336
		0,0061818	1,416
		0,0069870	1,483
		0,0077662	1,546
		0,0085844	1,591
		0,0093766	1,645
		0,0101558	1,684
		0,0109221	1,777
		0,0117532	1,836
0,0125325	1,811		
0,0133636	1,746		
0,0136623	1,667		

Fuente: Elaboración propia

Tabla N°4.17: Compresión inconfiada (4,5 % CaCl₂)

Cloruro de Calcio

Muestra	Dosificación (%)	Compresión Inconfiada	
		Deformación unitaria	Esfuerzo desviador (kg/cm ²)
Arcilla ligera CL	4,5	0,0000000	0,000
		0,0006364	0,476
		0,0014545	0,833

	0,0022468	1,156
	0,0030260	1,457
	0,0038052	1,712
	0,0045584	1,949
	0,0053247	2,154
	0,0061558	2,358
	0,0069481	2,528
	0,0077403	2,738
	0,0085325	2,789
	0,0093636	2,842
	0,0101818	2,857
	0,0109481	2,894
	0,0117143	2,787
	0,0125195	2,677
	0,0130519	2,418

Fuente: Elaboración propia

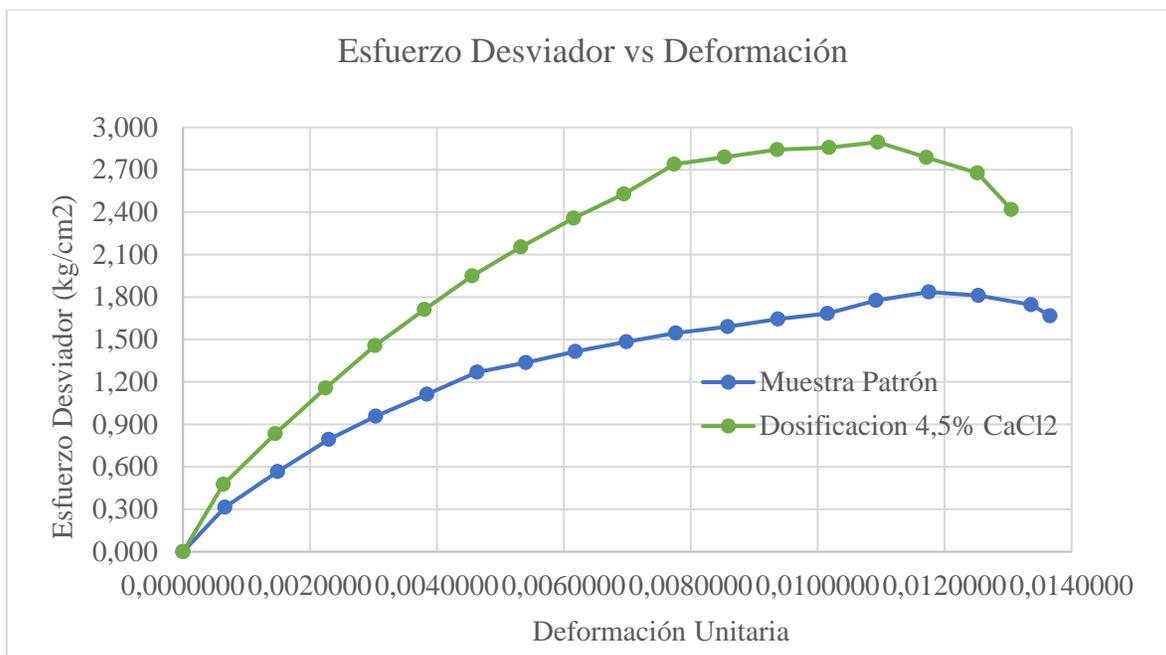
Se genera una variación de la resistencia de +57,37 % respecto a la muestra patrón, mientras que en la deformación unitaria la variación es de -6,85 % aproximadamente.

Interpretación:

El incremento más alto de todos, casi +58 % de resistencia, el CaCl₂ parece seguir mejorando el comportamiento mecánico hasta este punto, pero no muy alejado de la dosificación a 3 %.

La rigidez se mantiene con una leve reducción en la deformación (similar al 3 %), esto demuestra que el suelo se mantiene estable y reforzado, sin llegar a ser frágil.

Gráfico N°4.11: Esfuerzo Desviador vs. Deformación (4,5 % CaCl₂)



Fuente: Elaboración propia

Conclusión:

La dosificación del 4,5 % da los mayores valores de resistencia y deformación (similares al 3 %). Aunque se debe verificar los efectos secundarios de una alta dosis de este aditivo, los cuales pueden generar salinización excesiva del suelo, costos muy altos y difícil manipulación.

Recomendación final basada en los tres análisis:

Tabla N°4.18: Resumen dosificación CaCl₂

1,5 % MgCl ₂	3 % MgCl ₂	4,5 % MgCl ₂
Mejoría clara, pero con mayor rigidez	Excelente balance entre fuerza y ductilidad	Mayor resistencia, pero sin gran ganancia extra frente al 3 %

Fuente: Elaboración propia

El 3 % de dosificación de CaCl₂ es el punto óptimo considerando resistencia y comportamiento plástico. El 4,5 % solo es recomendable si se prioriza la resistencia y se controla bien el entorno o los posibles efectos secundarios.

4.5.7 Cloruro de Magnesio vs. Cloruro de Calcio (1,5 % de dosificación)

Tabla N°4.19: Compresión inconfiada (1,5 % dosificación MgCl₂)

Cloruro de Magnesio			
Muestra	Dosificación (%)	Compresión Inconfiada	
		Deformación unitaria	Esfuerzo desviador (kg/cm ²)
Arcilla ligera CL	1,5	0,0000000	0,000
		0,0006104	0,476
		0,0014675	0,845
		0,0022468	1,145
		0,0030000	1,343
		0,0038182	1,558
		0,0045974	1,717
		0,0053506	1,864
		0,0061558	1,926
		0,0069740	2,000
		0,0077273	2,050
		0,0085065	2,107
		0,0093247	2,122
		0,0100909	2,027
		0,0109481	2,004
0,0117532	1,972		
0,0121299	1,862		

Fuente: Elaboración propia

Tabla N°4.20: Compresión inconfiada (1,5 % dosificación CaCl2)

Cloruro de Calcio

Muestra	Dosificación (%)	Compresión Inconfiada	
		Deformación unitaria	Esfuerzo desviador (kg/cm2)
Arcilla ligera CL	1,5	0,000000	0,000
		0,0007143	0,584
		0,0014805	0,952
		0,0022727	1,253
		0,0031039	1,536
		0,0038961	1,768
		0,0046623	1,983
		0,0054935	2,142
		0,0062987	2,260
		0,0070260	2,351
		0,0078312	2,396
		0,0086623	2,415
		0,0094805	2,422
		0,0102857	2,427
0,0107143	2,270		

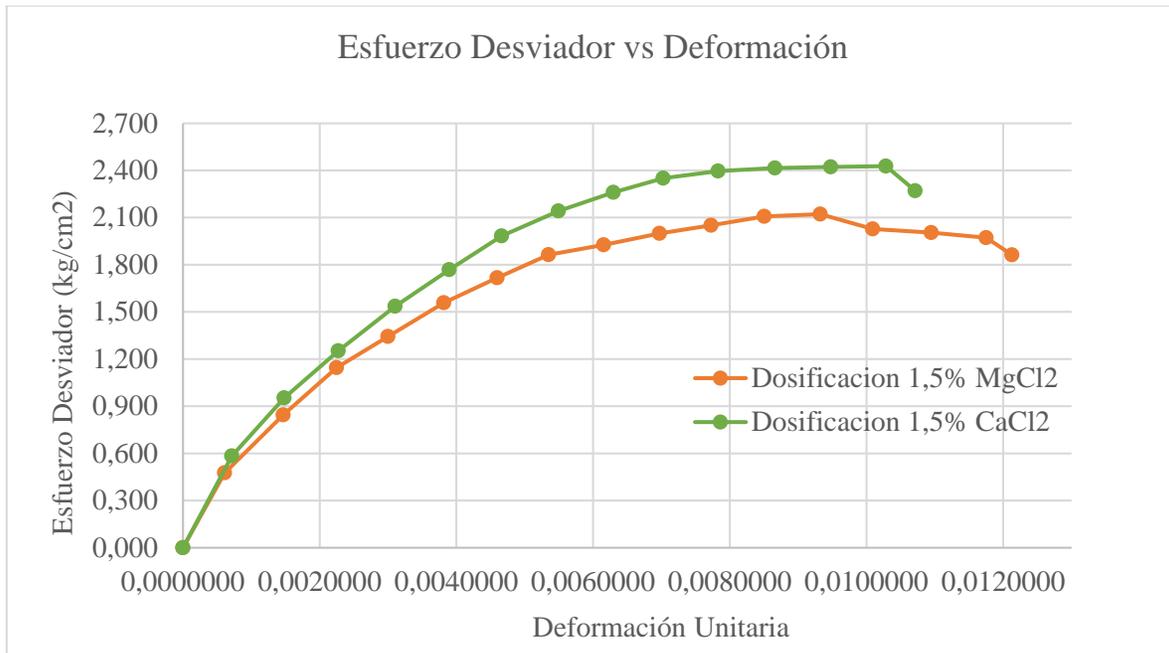
Fuente: Elaboración propia

Existe una variación de la resistencia de +14,45 % del CaCl2 respecto a la muestra tratada con MgCl2, mientras que en la deformación unitaria la variación es de +10,30 % (CaCl2 mayor).

Interpretación:

El CaCl2 supera al MgCl2 tanto en resistencia como en deformabilidad, aunque ambos cationes mejoran la estructura del suelo, el calcio (Ca²⁺) tiene mayor capacidad de desplazamiento de cationes monovalentes en la arcilla, esto favorece una floculación más efectiva y una mejor formación de enlaces entre partículas.

Gráfico N°4.12: Esfuerzo Desviador vs. Deformación (1,5 % MgCl₂, 1,5 % CaCl₂)



Fuente: Elaboración propia

Conclusión:

La dosificación de 1,5 % de CaCl₂ ofrece mejores resultados globales, lo que lo convierte en una opción preferible frente al MgCl₂ en esta concentración.

4.5.8 Cloruro de Magnesio vs. Cloruro de Calcio (3 % de dosificación)

Tabla N°4.21: Compresión inconfiada (3 % dosificación MgCl₂)

Cloruro de Magnesio		Compresión Inconfiada	
Muestra	Dosificación (%)	Deformación unitaria	Esfuerzo desviador (kg/cm ²)
Arcilla ligera CL	3	0,0000000	0,000
		0,0005974	0,515
		0,0014416	0,940
		0,0021948	1,263
		0,0029870	1,484
		0,0037662	1,687
		0,0045455	1,801
		0,0053636	1,919

		0,0060909	2,049
		0,0068571	2,180
		0,0077143	2,332
		0,0084675	2,383
		0,0093117	2,445
		0,0100909	2,479
		0,0109351	2,512
		0,0117662	2,314
		0,0124286	2,082

Fuente: Elaboración propia

Tabla N°4.22: Compresión inconfiada (3 % dosificación CaCl₂)

Cloruro de Calcio

Muestra	Dosificación (%)	Compresión Inconfiada	
		Deformación unitaria	Esfuerzo desviador (kg/cm ²)
Arcilla ligera CL	3	0,0000000	0,000
		0,0006364	0,532
		0,0014416	0,963
		0,0021948	1,320
		0,0029610	1,637
		0,0037403	1,863
		0,0045325	2,084
		0,0053506	2,282
		0,0061039	2,503
		0,0069221	2,571
		0,0076494	2,644
		0,0084675	2,689
		0,0109740	2,852
		0,0126494	2,812
0,0131429	2,637		

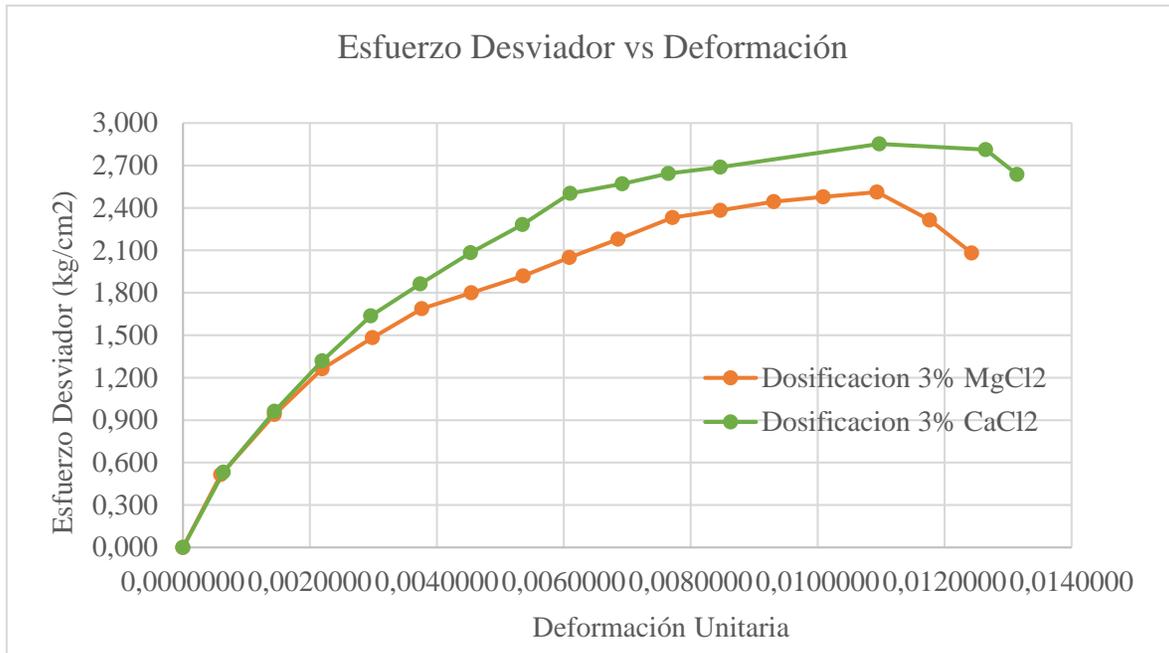
Fuente: Elaboración propia

Existe una variación de la resistencia de +13,80 % del CaCl₂ respecto a la muestra tratada con MgCl₂, mientras que en la deformación unitaria la variación es de +0,36 % (CaCl₂ mayor pero casi similares).

Interpretación:

El CaCl₂ nuevamente proporciona mayor resistencia, la diferencia en la deformación es prácticamente despreciable, lo que indica que ambos aditivos logran similar rigidez, pero el calcio mejora de mejor manera los enlaces estructurales. El efecto estabilizante del Ca²⁺ se mantiene más eficiente, posiblemente por su menor hidratación en comparación con el Mg²⁺.

Gráfico N°4.13: Esfuerzo Desviador vs. Deformación (3 % MgCl₂, 3 % CaCl₂)



Fuente: Elaboración propia

Conclusión:

El 3 % de CaCl₂ es más eficiente, ya que ofrece mejor resistencia sin sacrificar deformabilidad. El MgCl₂ también mejora, pero no iguala los resultados del CaCl₂.

4.5.9 **Cloruro de Magnesio vs. Cloruro de Calcio (4,5 % de dosificación)**

Tabla N°4.23: Compresión inconfiada (4,5 % dosificación MgCl₂)

Cloruro de Magnesio

Muestra	Dosificación (%)	Compresión Inconfiada	
		Deformación unitaria	Esfuerzo desviador (kg/cm ²)
Arcilla ligera CL	4,5	0,0000000	0,000
		0,0006364	0,515
		0,0014545	0,991
		0,0022727	1,308
		0,0030519	1,580
		0,0038571	1,778
		0,0045974	1,880
		0,0053506	2,022
		0,0062208	2,123
		0,0069610	2,175
		0,0077922	2,191
		0,0085844	2,293
		0,0093377	2,315
		0,0101169	2,315
		0,0109481	2,360
		0,0115974	2,386
		0,0125065	2,291
0,0133117	2,235		
0,0136883	2,152		

Fuente: Elaboración propia

Tabla N°4.24: Compresión inconfiada (4,5 % dosificación CaCl₂)

Cloruro de Calcio

Muestra	Dosificación (%)	Compresión Inconfiada	
		Deformación unitaria	Esfuerzo desviador (kg/cm ²)
Arcilla ligera CL	4,5	0,0000000	0,000
		0,0006364	0,476
		0,0014545	0,833
		0,0022468	1,156
		0,0030260	1,457
		0,0038052	1,712
		0,0045584	1,949
		0,0053247	2,154
		0,0061558	2,358
		0,0069481	2,528
		0,0077403	2,738
		0,0085325	2,789
		0,0093636	2,842
		0,0101818	2,857
		0,0109481	2,894
0,0117143	2,787		
0,0125195	2,677		
0,0130519	2,418		

Fuente: Elaboración propia

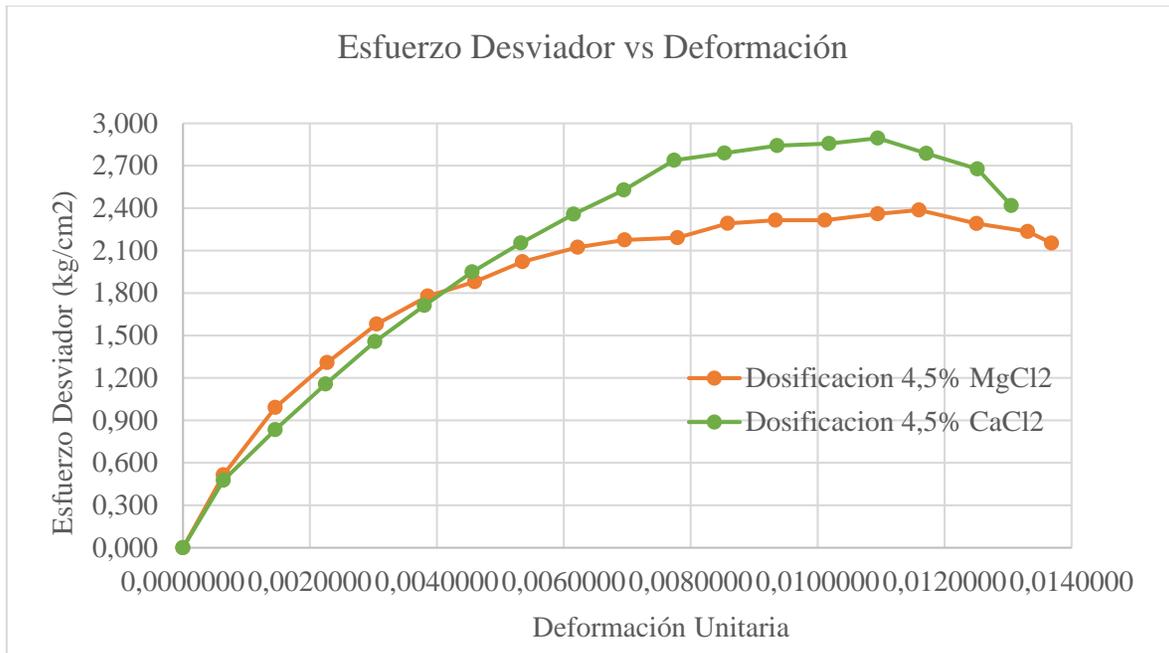
Existe una variación de la resistencia de +21,04 % del CaCl₂ respecto a la muestra tratada con MgCl₂, mientras que en la deformación unitaria la variación es de -5,6 % (MgCl₂ más deformable).

Interpretación:

En este punto la diferencia a favor del CaCl₂ es significativa en resistencia (+21 %), sin embargo, el MgCl₂ presenta mayor deformabilidad, lo que podría ser útil en situaciones donde se busca más ductilidad.

El CaCl₂ sigue mostrando mayor eficiencia en la estabilización, y no parece haber saturación de su efecto en esta dosis.

Gráfico N°4.14: Esfuerzo Desviador vs. Deformación (4,5 % MgCl₂, 4,5 % CaCl₂)



Fuente: Elaboración propia

Conclusión:

El CaCl₂ es superior en términos estructurales, pero el MgCl₂ ofrece un comportamiento ligeramente más flexible. Si se busca máxima resistencia, el CaCl₂ es la opción clara.

Comparación Global:

Tabla N°4.25: Comparación global (Resistencia y deformación)

Dosificación	Mejor aditivo (Resistencia)	(%) en Resistencia	Comentario
1,5%	CaCl ₂	14,45%	Mejor resistencia y mayor deformación
3%	CaCl ₂	13,08%	Mejor resistencia, deformación similar
4,5%	CaCl ₂	21,04%	Mucho mayor resistencia, algo más rígido

Fuente: Elaboración propia

Si el objetivo principal es aumentar la resistencia, el CaCl₂ es consistentemente superior en todas las dosificaciones. Si se necesita un comportamiento un poco más flexible, especialmente a 4,5 %, el MgCl₂ puede ser más útil.

El CaCl₂ al 3 % es probablemente la dosificación óptima, con el mejor balance entre resistencia y deformación.

Tabla N°4.26: Tabla resumen MgCl₂ resistencias (repeticiones y % de dosificaciones)

Dosificación de MgCl ₂				
Rep.	0%	1,5%	3%	4,5%
1	1,83	2,11	2,47	2,37
2	1,85	2,13	2,49	2,41
3	1,82	2,10	2,52	2,38
4	1,84	2,15	2,53	2,39
5	1,85	2,09	2,51	2,40
Prom.	1,84	2,12	2,50	2,39

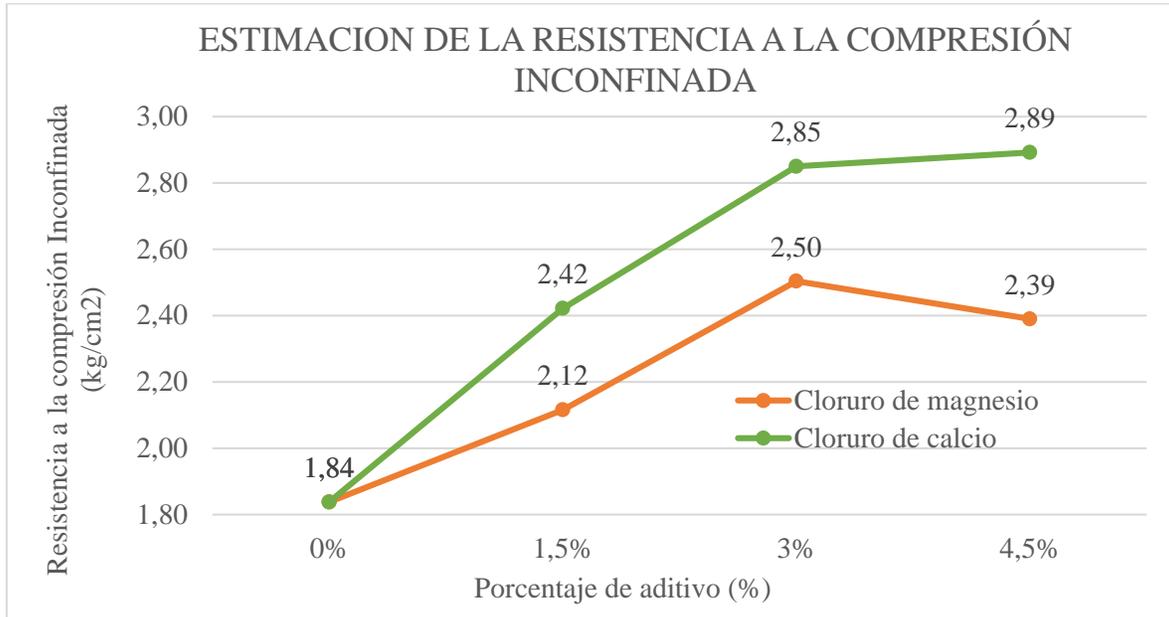
Fuente: Elaboración propia

Tabla N°4.27: Tabla resumen CaCl₂ resistencia (repeticiones y % de dosificaciones)

Dosificación de CaCl ₂				
Rep.	0%	1,5%	3%	4,5%
1	1,83	2,44	2,84	2,89
2	1,85	2,40	2,87	2,92
3	1,82	2,45	2,85	2,87
4	1,84	2,43	2,83	2,88
5	1,85	2,39	2,86	2,90
Prom.	1,84	2,42	2,85	2,89

Fuente: Elaboración propia

Gráfico N°4.15: Estimación de la resistencia a la compresión no confinada (MgCl₂ vs. CaCl₂)



Fuente: Elaboración propia

La grafica anterior muestra que el Cloruro de Calcio mejora la resistencia en los tres % de aditivo.

4.6 Cohesión.

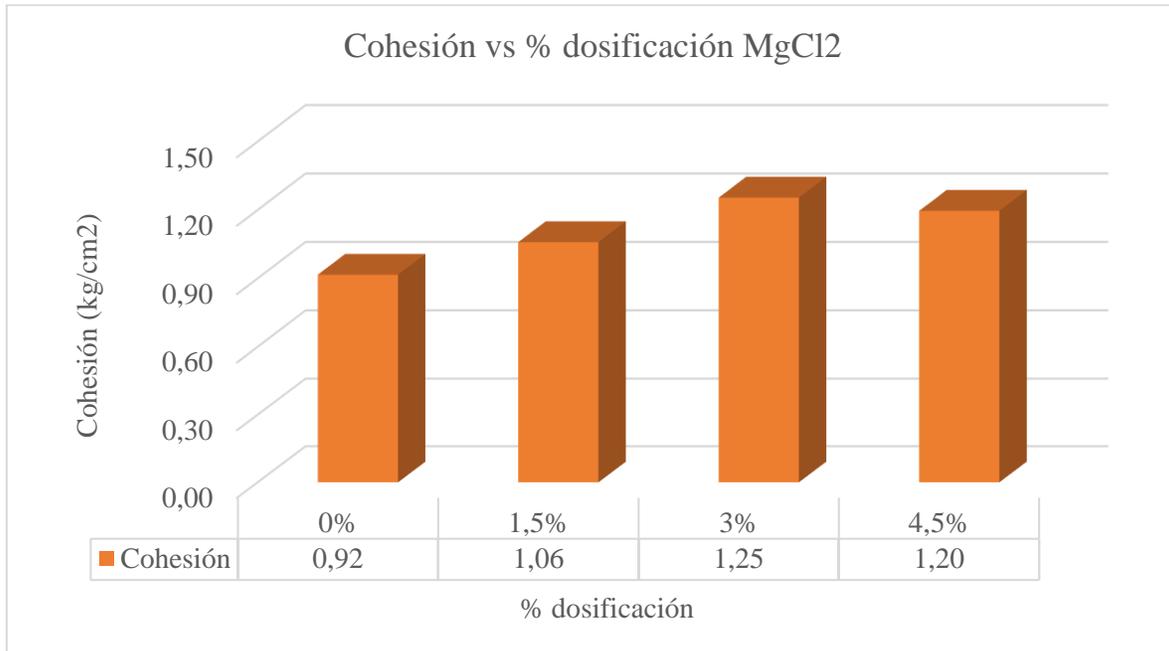
Se analizará el impacto del aditivo (MgCl₂ y CaCl₂) en la cohesión del suelo y la determinación de la dosis optima de aditivo.

Tabla N°4.28: Tabla resumen MgCl₂ cohesión (repeticiones y % de dosificaciones)

Muestra	Clasificación (SUCS)	Dosificación de MgCl ₂			
		0%	1,5%	3%	4,5%
		Cohesión (kg/cm ²)			
1	CL	0,91	1,06	1,26	1,19
2	CL	0,92	1,07	1,24	1,20
3	CL	0,91	1,05	1,25	1,21
4	CL	0,92	1,08	1,26	1,19
5	CL	0,92	1,05	1,26	1,19
Prom.		0,92	1,06	1,25	1,20

Fuente: Elaboración propia

Gráfico N°4.16: Cohesión vs. % dosificación MgCl2



Fuente: Elaboración propia

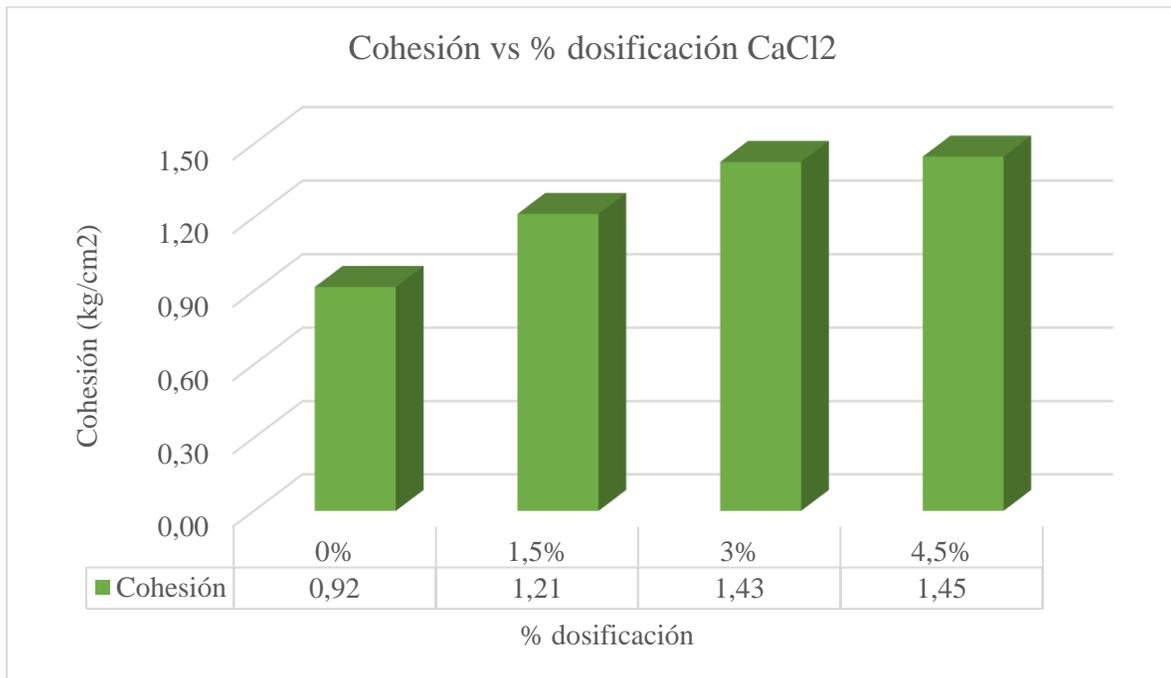
Se puede observar un incremento inicial de 0,92 kg/cm² a 1,06 Kg/cm² (15,2 %) con solo 1,5 %, después una mejora continua hasta el 3 %, lo que indica una dosificación optima en este punto. Finalmente sufre una ligera disminución al 4,5 %, baja a 1,20 kg/cm² (4% respecto al 3%), aunque sigue siendo mayor que el valor inicial.

Tabla N°4.29: Tabla resumen CaCl2 cohesión (repeticiones y % de dosificaciones)

Muestra	Clasificación (SUCS)	Dosificación de CaCl2			
		0%	1,5%	3%	4,5%
		Cohesión (kg/cm2)			
1	CL	0,91	1,22	1,42	1,45
2	CL	0,92	1,20	1,44	1,46
3	CL	0,91	1,23	1,42	1,44
4	CL	0,92	1,22	1,42	1,44
5	CL	0,92	1,2	1,43	1,45
Prom.		0,92	1,21	1,43	1,45

Fuente: Elaboración propia

Gráfico N°4.17: Cohesión vs. % dosificación CaCl₂

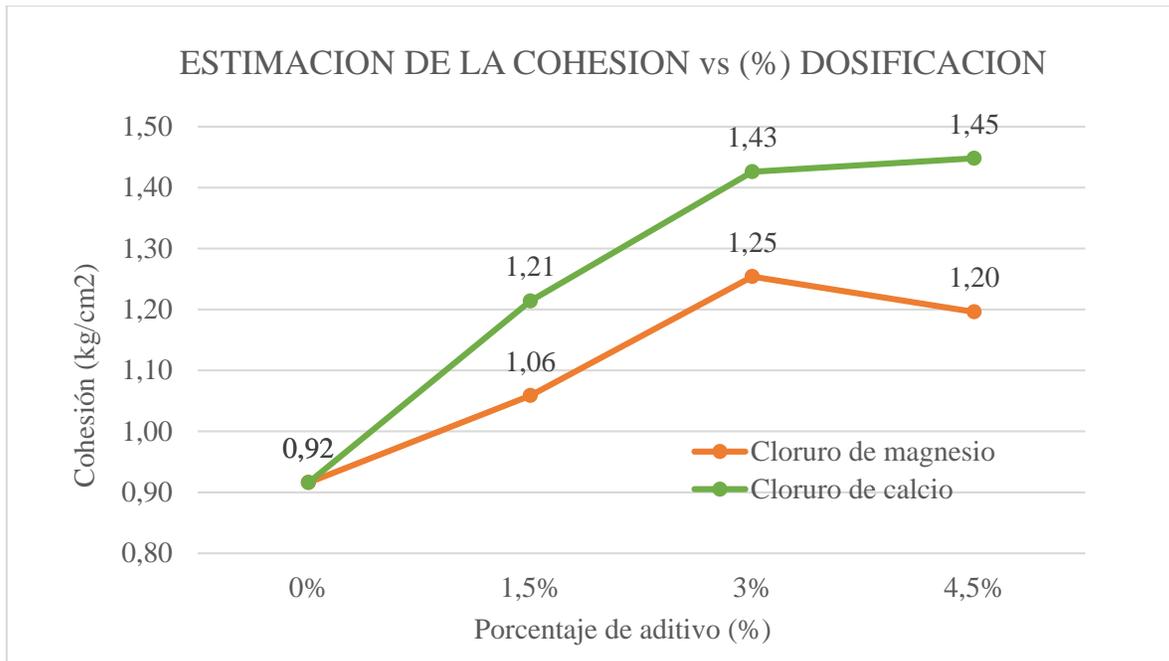


Fuente: Elaboración propia

Se puede observar un aumento progresivo de la cohesión, de 0,92 kg/cm² (0%) a 1,45 kg/cm² (4,5%). También una mejora continua con cada incremento de dosificación, de 1,21 kg/cm² a 1,43 kg/cm² a 1,45 kg/cm².

Esto indica una buena reacción del suelo con el cloruro de calcio, lo cual sugiere una mayor capacidad de floculación y cementación entre partículas.

Gráfico N°4.18: Estimación de la cohesión (MgCl₂ vs. CaCl₂)



Fuente: Elaboración propia

El incremento de la cohesión en el suelo se debe principalmente a los siguientes mecanismos:

1. Intercambio catiónico:

- El Ca²⁺ y Mg²⁺ reemplazan a cationes débiles (Na⁺, K⁺) presentes en la arcilla, reduciendo la repulsión entre partículas.
- Esto provoca una mayor atracción entre las láminas arcillosas, compactando la estructura del suelo.

2. Floculación – agregación:

- Los cationes divalentes inducen la floculación de las partículas finas, formando micro agregados más estables.
- Esta reorganización interna aumenta la cohesión y mejora la resistencia a la compresión.

3. Reducción de la sensibilidad al agua:

- Los cloruros disminuyen la expansión y dispersión de las arcillas frente a la humedad.

- Esto contribuye a que el suelo conserve una estructura más rígida y resistente.

Interpretación:

Los resultados obtenidos se ven reflejados en la gráfica anterior, la cual muestra un comportamiento diferenciado en función del tipo de sal y su porcentaje de dosificación.

En el caso del CaCl_2 la cohesión aumento de $0,92 \text{ kg/cm}^2$ (muestra patrón) a $1,45 \text{ kg/cm}^2$ con $4,5 \%$ de aditivo, lo que representa un incremento del $57,6 \%$ respecto al suelo natural. Se observa una mejora continua y casi lineal con cada incremento de dosificación, esto sugiere que el CaCl_2 tiene una alta eficiencia estabilizadora sobre este tipo de suelo, promoviendo la floculación y la cementación entre partículas arcillosas.

En el caso del MgCl_2 la cohesión aumento a un máximo de $1,25 \text{ kg/cm}^2$ (3%), lo que representa una mejora del $35,9 \%$ respecto al suelo natural. El comportamiento fue ascendente hasta el 3% , seguido de una ligera disminución a $1,20 \text{ kg/cm}^2$ con $4,5 \%$ de dosificación. Esto sugiere que el MgCl_2 mejora la cohesión hasta un punto óptimo, pero una sobre dosificación podría inducir efectos negativos, posiblemente por un exceso de sales que aumentan la retención de humedad.

El porcentaje óptimo de dosificación se encuentra en torno al 3% para ambos aditivos.

Dosis mayores ($4,5\%$) no generan beneficios adicionales en el caso del CaCl_2 y reducen la efectividad en el caso del MgCl_2 , lo cual debe considerarse para fines de diseño y economía del tratamiento.

Esto significa que, al mejorar la cohesión, el suelo tratado se vuelve menos propenso a deslizamientos, erosión y deformaciones, favoreciendo su aplicación en diferentes obras de Ingeniería.

Por lo tanto, para propósitos de estabilización, el cloruro de calcio representa una mejor alternativa, especialmente cuando se busca maximizar la resistencia sin comprometer la estabilidad del sistema suelo – aditivo.

4.7 Análisis técnico económico

Se realizará un breve análisis técnico económico comparativo entre el uso del Cloruro de Magnesio (MgCl₂) y el Cloruro de Calcio (CaCl₂) en la estabilización del suelo en estudio, considerando el costo por gramo de cada aditivo y su desempeño mecánico.

Tabla N°4.30: Costo por gramo de aditivo (MgCl₂, CaCl₂)

Aditivo	Precio	Cantidad	Costo por gramo (Bs/g)
MgCl ₂	Bs. 12	100 g	Bs. 0,12
CaCl ₂	Bs. 80	250 g	Bs. 0,32

Fuente: Elaboración propia

Usando 500 gramos de suelo seco por muestra, que es la cantidad que se usó en los diferentes de ensayos de compresión inconfiada.

Dosis de aditivo por muestra basado en 500 gramos de suelo:

Tabla N°4.31: Dosis de aditivo por muestra

Porcentaje de dosificación (%)	MgCl ₂ y CaCl ₂ por muestra (g)
1,5	7,5
3	15
4,5	22,5

Fuente: Elaboración propia

Costo por cada muestra:

- Dosificación al 1,5 %

Tabla N°4.32: Costo por muestra (1,5 % dosificación)

Aditivo	Dosis (g)	Costo por gramo	Costo total (Bs)
MgCl ₂	7,5	Bs. 0,12	0,90
CaCl ₂	7,5	Bs. 0,32	2,40

Fuente: Elaboración propia

- Dosificación al 3 %

Tabla N°4.33: Costo por muestra (3 % dosificación)

Aditivo	Dosis (g)	Costo por gramo	Costo total (Bs)
MgCl ₂	15	Bs. 0,12	1,80
CaCl ₂	15	Bs. 0,32	4,80

Fuente: Elaboración propia

- Dosificación al 4,5 %

Tabla N°4.34: Costo por muestra (4,5 % dosificación)

Aditivo	Dosis (g)	Costo por gramo	Costo total (Bs)
MgCl ₂	22,5	Bs. 0,12	2,70
CaCl ₂	22,5	Bs. 0,32	7,20

Fuente: Elaboración propia

Relación Costo/Beneficio

A continuación, se calculará el rendimiento de cada aditivo: resistencia obtenida (kg/cm²) dividida entre el costo (Bs).

- Dosificación al 1,5 %

Tabla N°4.35: Rendimiento (1,5 % dosificación)

Aditivo	Esfuerzo Desviador (kg/cm ²)	Costo (Bs)	Resistencia por Bs (kg/cm ² /Bs)
MgCl ₂	2,116	Bs. 0,90	2,35
CaCl ₂	2,422	Bs. 2,40	1,01

Fuente: Elaboración propia

Resultado: El MgCl₂ ofrece más del doble de rendimiento económico que el CaCl₂.

- Dosificación al 3 %

Tabla N°4.36: Rendimiento (3 % dosificación)

Aditivo	Esfuerzo Desviador (kg/cm ²)	Costo (Bs)	Resistencia por Bs (kg/cm ² /Bs)
MgCl ₂	2,504	Bs. 1,80	1,39
CaCl ₂	2,850	Bs. 4,80	0,59

Fuente: Elaboración propia

Resultado: El MgCl₂ sigue siendo más rentable por cada boliviano invertido.

- Dosificación del 4,5 %

Tabla N°4.37: Rendimiento (4,5 % dosificación)

Aditivo	Esfuerzo Desviador (kg/cm ²)	Costo (Bs)	Resistencia por Bs (kg/cm ² /Bs)
MgCl ₂	2,39	Bs. 2,70	0,89
CaCl ₂	2,89	Bs. 7,20	0,40

Fuente: Elaboración propia

Resultado: El MgCl₂ tiene más del doble de eficiencia económica que el CaCl₂ incluso en la dosificación más alta.

Conclusión Económica:

El MgCl₂ sigue siendo significativamente más económico que el CaCl₂ en todas las dosificaciones, aunque el CaCl₂ produce mayores esfuerzos desviadores, el MgCl₂ genera más resistencia por cada boliviano invertido, es decir, tiene mayor eficiencia económica.

En proyectos donde se busca una optimización de costos sin perder mucha resistencia, el Cloruro de Magnesio es la mejor opción, ahora bien, en proyectos donde el principal objetivo es la mejora en la resistencia del suelo sin importar los costos de los aditivos, el CaCl₂ corre como la mejor opción.

4.8 Aplicación en taludes

1. Relación entre la cohesión y la Estabilidad de Taludes.

El ensayo de compresión inconfiada mide la resistencia al corte no drenada (c_u) del suelo, que es un parámetro fundamental en la estabilidad de taludes no drenados, especialmente en suelos arcillosos saturados.

Una mayor resistencia inconfiada se traduce en una mayor cohesión aparente, lo que mejora el factor de seguridad (FS) del talud frente al deslizamiento.

2. Efecto de los aditivos en la resistencia del suelo.

Los resultados muestran que ambos aditivos aumentan la resistencia del suelo, el CaCl_2 genera una mayor resistencia absoluta, mientras que el MgCl_2 resulta más económico y suficientemente efectivo.

3. Implicaciones geotécnicas en taludes.

Mejora de la Resistencia al corte:

Un aumento en la resistencia inconfiada implica un incremento de la cohesión no drenada (c_u), uno de los componentes claves en el criterio de Mohr-Coulomb.

$$\tau = c + \sigma * tg(\phi)$$

En suelos saturados y no drenados (como los arcillosos), se considera:

$$\tau = c_u$$

Por lo tanto, aumentar (c_u) implica que el talud puede resistir mayores tensiones cortantes sin fallar.

Al aumentar la cohesión con los aditivos, especialmente con CaCl_2 y MgCl_2 , se incrementa el factor de seguridad, reduciendo significativamente el riesgo de falla.

Tabla N°4.38: Efecto de cada aditivo en la aplicación a taludes

Aditivo	Cohesión mejorada	Costo	Aplicación practica
CaCl ₂	Mayor incremento (hasta 1,45 kg/cm ² a 4,5%)	Más costoso	Recomendado para zonas críticas donde se requiere máxima estabilidad
MgCl ₂	Mejora suficiente (hasta 1,25 kg/cm ² a 3%)	Más económico	Ideal para aplicaciones masivas, bajo presupuesto o estabilización preventiva

Fuente: Elaboración propia

Recomendaciones en la aplicación en Taludes.

- Taludes bajos o de relleno controlado: Se recomienda usar MgCl₂ al 3%, ya que ofrece buena resistencia y bajo costo.
- Taludes en zonas urbanas o donde el colapso es crítico: Se recomienda usar CaCl₂ al 3 o 4,5 %, pese a su costo, proporciona mayor seguridad.
- Condiciones climáticas: Tanto el MgCl₂ como el CaCl₂ son higroscópicos (absorben agua). Es fundamental considerar su comportamiento a largo plazo bajo exposición a lluvia o humedades altas (posibles efectos de pérdida de resistencia por lixiviación).

El aumento de cohesión significa que el suelo tratado tiene mayor resistencia al corte, en un talud, esa resistencia se traduce en mayor estabilidad global, menor riesgo de deslizamientos y menor erosión superficial.

Al aplicar los aditivos en la capa superficial (15 – 25 cm) y compactarlas, se logra una estructura más densa y con mayor capacidad de soportar esfuerzos. También se generan otros beneficios como:

- Disminución de la erosión superficial: la cohesión extra evita que las partículas finas de arcilla sean fácilmente arrastradas por lluvia o el viento.
- Control de agrietamientos: el tratamiento superficial reduce la contracción y expansión del suelo por cambios de humedad, lo que mitiga la aparición de grietas que podrían debilitar el talud.

- Incremento de la estabilidad local: el refuerzo de la cara expuesta del talud actúa como una “barrera mecánica” que protege el interior del macizo, retardando la progresión de procesos erosivos o deslizamientos superficiales.

4.8.1 **Presupuesto y lista de actividades**

Se elaboró un presupuesto y una lista de actividades para la aplicación planteada en la presente investigación (estabilización de taludes con MgCl₂ y CaCl₂) que incluyen la preparación del terreno, mezcla del aditivo con el suelo, compactación y control de calidad, asegurando tanto la viabilidad técnica como económica del proyecto. El análisis de precios unitarios y presupuesto se encuentran en el ANEXO C.

Lista de actividades (secuencia operativa y notas técnicas)

- Inspección y marcación del área (levantamiento simple y división en franjas)
- Desbroce y limpieza (retirar vegetación, raíces, piedras > 5 cm)
- Aflojamiento superficial/excavación hasta 0,15 m si es necesario homogeneizar)
- Preparación de la solución (si aplica aspersión) o preparación del aditivo en polvo (según el método elegido)
- Aplicación y mezcla in situ (aspersión más mezcla ligera)
- Ajuste de humedad y control (llevar al contenido óptimo para compactación)
- Compactación con plancha vibratoria/apisonador por pasadas hasta densidad objetivo
- Control de calidad: toma de muestras (humedad y densidad) y 1-2 ensayos de compresión no confinada por parcela
- Limpieza y desmovilización.

Profundidad de tratamiento = 15 cm.

Cuando hablamos de 15 cm de profundidad de tratamiento en estabilización, nos referimos al espesor de la capa de suelo que se va a mezclar con el aditivo y compactar.

Significa que no se trata de todo el talud en su espesor total (que puede tener varios metros), sino solamente de la capa superficial activa de 15 cm que se trabaja con maquinaria (escarificador, motoniveladora, excavadora, etc.).

En esta capa de 15 cm se dispersa el aditivo, se mezcla con el suelo, se ajusta la humedad y luego se compacta.

¿Por qué se eligió 15 cm en nuestro caso?

- Limitación práctica de la maquinaria, los escarificadores y equipos comunes trabajan entre 15 – 25 cm por pasada.
- Zona crítica de estabilidad y erosión, en taludes, los primeros 15 cm superficiales son los que más sufren erosión, meteorización y pérdida de cohesión.
- Economía: tratar toda la masa del talud (varios metros de espesor) sería carísimo e innecesario; con 15 cm superficiales ya se logra una capa “reforzada” que protege y estabiliza.
- Ensayos de laboratorio: las probetas estudiadas representan una mezcla homogénea en pequeña escala. Para simular eso en campo, se define una capa trabajable y representativa (15 cm).

El costo por m² de estabilización superficial con sales resultó en 1118,50 bs con MgCl₂ y 1424,11 bs con CaCl₂, valores que se sitúan por debajo de métodos tradicionales debido al menor consumo de material, maquinaria, mano de obra especializada.

Pero también resulta más elevado en comparación con otros métodos de protección como revegetación, geomantas o tratamientos bituminosos, los cuales generalmente presentan costos unitarios menores. Este mayor valor se explica principalmente por el precio de la materia prima. No obstante, a diferencia de los métodos mencionados que se limitan a brindar una protección superficial, la aplicación de sales modifica directamente las propiedades del suelo, aumentando su cohesión y resistencia, lo que conlleva una mejora efectiva en la estabilidad del talud y una mayor durabilidad de la intervención.

4.9 Análisis Estadístico

Se realizará el análisis estadístico descriptivo de los resultados de resistencia en los ensayos de compresión inconfiada, empleando ambos aditivos (MgCl₂ y CaCl₂), estos análisis permitirán evaluar el comportamiento general de las muestras tratadas, identificando tendencias, valores promedios, desviaciones estándar, y rangos de variación en la resistencia,

facilitando una interpretación más precisa del efecto de cada aditivo sobre las propiedades mecánicas del suelo. En el presente estudio se realizará únicamente el análisis de la resistencia, sin profundizar en el análisis de la cohesión, debido a que ambas propiedades son directamente proporcionales.

Tabla N°4.39: Estadística descriptiva Resistencia a la compresión no confinada, aditivo cloruro de magnesio

Resistencia a la Compresión inconfiada (kg/cm ²)				
Dosificación de MgCl ₂				
	0%	1,5%	3%	4,5%
Media (kg/cm ²)	1,838	2,116	2,504	2,390
Desviación Estándar	0,0130	0,0241	0,0241	0,0158
Varianza	0,00017	0,00058	0,00058	0,00025
CV (%)	0,710	1,140	0,960	0,660
Mediana	1,840	2,110	2,510	2,390
Rango	1,82 - 1,85	2,09 - 2,15	2,47 - 2,53	2,37 - 2,41

Fuente: Elaboración propia

Tabla N°4.40: Estadística descriptiva Resistencia a la compresión no confinada, aditivo cloruro de calcio

Resistencia a la Compresión inconfiada (kg/cm ²)				
Dosificación de CaCl ₂				
	0%	1,5%	3%	4,5%
Media (kg/cm ²)	1,838	2,422	2,850	2,892
Desviación Estándar	0,0130	0,0259	0,0158	0,0192
Varianza	0,00017	0,00067	0,00025	0,00037
CV (%)	0,710	1,070	0,550	0,670
Mediana	1,840	2,430	2,850	2,890
Rango	1,82 - 1,85	2,39 - 2,45	2,83 - 2,87	2,87 - 2,92

Fuente: Elaboración propia

Consistencia y análisis de resultados:

En general, ambos estabilizantes muestran buena repetitividad (C.V. < 2 %), lo cual indica alta consistencia en los resultados experimentales. El CaCl₂ presenta mayor consistencia especialmente en la dosificación del 3 %, con un C.V. de solo 0,55 %, lo que sugiere resultados más confiables en esa concentración.

Las desviaciones estándar son todas menores a 0,03 kg/cm², lo que refuerza la fiabilidad de los datos.

La mejor resistencia con MgCl₂ se logra con 3 %, con una ligera caída al 4,5 %. En el caso del CaCl₂ la resistencia sigue aumentando hasta 4,5 %, indicando mejor rendimiento a mayor concentración dentro del rango analizado.

El CaCl₂ es más efectivo que el MgCl₂ en mejorar la resistencia a la compresión no confinada, además mostro una mejor consistencia especialmente en las dosificaciones más altas (menor variabilidad).

Para un diseño optimizado, una dosificación de 3 % a 4,5 % de CaCl₂ sería recomendable (sin tener en cuenta el tema económico) según estos datos.

5 CAPÍTULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

La adición de cloruro de magnesio y cloruro de calcio produjo un aumento considerable en la cohesión y resistencia a la compresión inconfiada del suelo arcilloso. Este aumento sugiere una mejora en la estructura del suelo debido a la estabilización química inducida por los aditivos.

Para $MgCl_2$, la resistencia pasó de 1,84 kg/cm² (muestra patrón) a un máximo de 2,50 kg/cm² (3%), lo que representa un aumento del 35,87 %.

Para el $CaCl_2$, la resistencia alcanzo un máximo de 2,89 kg/cm² (4,5%), lo que equivale a un 56,52 % de mejora respecto al suelo sin tratar.

También se pudo observar un aumento en la cohesión de forma proporcional al de resistencia, ya que al tratarse de un ensayo de compresión inconfiada, la cohesión es igual al esfuerzo ultimo dividido entre dos. La cohesión tuvo un aumento desde 0,92 kg/cm² (muestra patrón) hasta 1,25 kg/cm² con $MgCl_2$ (3%) y 1,44 kg/cm² (4,5%) con $CaCl_2$. Esto confirma que ambos aditivos fortalecen la estructura del suelo y mejoran su resistencia al corte.

El cloruro de calcio mostro mayor eficacia técnica, ya que, aunque ambos aditivos mejoraron el comportamiento mecánico del suelo, el $CaCl_2$ supero al $MgCl_2$ en todos los porcentajes de adición, alcanzando la mayor resistencia a 4,5 %, sin evidencia de perdida de rendimiento.

El cloruro de magnesio presentó un comportamiento optimo a 3 %, ya que a 4,5 % de $MgCl_2$ se observó una leve reducción de la resistencia, lo cual sugiere un punto de saturación en la capacidad de mejora del suelo con este aditivo. Esto puede deberse a exceso de sal que afecta la micro estructura del suelo o retención excesiva de humedad.

Uno de los aspectos a tener en cuenta es el comportamiento térmico del $CaCl_2$ a dosis más altas de dosificación, lo cual dificulta su aplicación práctica, durante la disolución del $CaCl_2$ se observó un aumento excesivo de temperatura del agua, lo que dificulto la mezcla, la compactación y la manipulación del suelo. Este fenómeno puede comprometer la calidad de la muestra y la homogeneidad del tratamiento.

Aunque el CaCl_2 mostro mejores resultados técnicos, el costo del MgCl_2 fue significativamente menor, esta diferencia de precio hace que el cloruro de magnesio sea una opción más rentable si se considera la mejora por boliviano invertido.

El aumento de la cohesión implica una mejora en la resistencia al corte y, por lo tanto, en la capacidad portante y la estabilidad del talud. Este incremento en la resistencia al corte reduce el riesgo de deslizamientos y deformaciones, mejorando la seguridad de la obra y reduciendo los costos de mantenimiento a largo plazo.

5.2 Recomendaciones

Utilizar cloruro de magnesio a 3 % como alternativa eficiente y económica, aunque el CaCl_2 genera mayor resistencia, el MgCl_2 al 3 % ofrece una excelente mejora (35,87 %) con menor costo y sin problemas operativos. Esto lo convierte en una alternativa viable en proyectos de bajo presupuesto o donde se requiera facilidad de aplicación.

Evitar dosificaciones superiores al 3% de MgCl_2 , ya que se presenta una reducción ligera de la resistencia y por ende de la cohesión. Se recomienda no superar este porcentaje para evitar pérdida de eficiencia y posibles efectos negativos en la estructura del suelo.

Controlar la temperatura al usar CaCl_2 o considerar mezclas escalonadas, para mejorar la manejabilidad del cloruro de calcio se sugiere realizar la disolución de forma gradual, en etapas, o dejar que la solución repose hasta alcanzar una temperatura segura antes de aplicarla al suelo. Esto puede mejorar la homogeneidad de la mezcla y facilitar su compactación.

Realizar un análisis costo – beneficio según el tipo de obra, es obras de alta exigencia estructural donde se requiere la mayor resistencia posible, el CaCl_2 puede ser más conveniente a pesar de su mayor costo.

Para viviendas rurales, caminos secundarios o aplicaciones económicas, el MgCl_2 al 3 % es recomendable por su buena eficiencia técnica y bajo costo.

También se recomienda realizar ensayos complementarios de durabilidad y comportamiento en campo, para validar la estabilidad a largo plazo del suelo tratado.

Al realizar los ensayos de laboratorio, es recomendable seguir paso a paso la guía de los diferentes ensayos a realizar, para así poder obtener resultados más limpios y precisos.

