

UNIVERSIDAD PERUANA UNIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
Escuela Profesional de Ingeniería Civil



**Efecto de la incorporación de cloruro de magnesio y cal
en las propiedades geotécnicas de suelos cohesivos a
nivel de subrasante**

Tesis para obtener el Título Profesional de Ingeniero Civil

Autores:

Alex Ricardo Yucra Hilachoque

Henry Grover Viamonte Mamani

Asesor:

Ing. Rina Luzmeri Yampara Ticona

Juliaca, diciembre de 2023

DECLARACIÓN JURADA DE ORIGINALIDAD DE TESIS

Yo Ing. Rina Luzmeri Yampara Ticona, docente de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Escuela Profesional de Ingeniería Civil, de la Universidad Peruana Unión.

DECLARO:

Que la presente investigación titulada: **“EFECTO DE LA INCORPORACION DE CLORURO DE MAGNESIO Y CAL EN LAS PROPIEDADES GEOTECNICAS DE SUELOS COHESIVOS A NIVEL DE SUBRASANTE”** de los autores **Alex Ricardo Yucra Hilachoque** y **Henry Grover Viamonte Mamani**, tiene un índice de similitud de 19% verificable en el informe del programa Turnitin, y fue realizada en la Universidad Peruana Unión bajo mi dirección.

En tal sentido asumo la responsabilidad que corresponde ante cualquier falsedad u omisión de los documentos como de la información aportada, firmo la presente declaración en la ciudad de Juliaca a los 29 días del mes de noviembre del año 2023.



Ing. Rina Luzmeri Yampara Ticona

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS



En Puno, Juliaca, Villa Chullunquiani, a 29 día(s) del mes de noviembre del año 2023, siendo las 17:00 horas, se reunieron los miembros del jurado en la Universidad Peruana Unión Campus Juliaca, bajo la dirección del (de la) presidente(a):

Ing. Nazam Quispe Pari Lusi, el (la) secretario(a): Mg. Edwin Corillo Escarona

y los demás miembros: Dr. Nestor Alejandro Lary Galapuja

y el (la) asesor(a) Ing. Rina Sugmeri

Yampara Bicono con el propósito de administrar el acto académico de sustentación de la tesis titulado:

Uso de la incorporación de cloruro de magnesio y sal en las propiedades geotécnicas de suelos cohesivos a nivel de subterráneo

del(los) bachiller(es): a) Alex Ricardo Yucra Hilachogus

b) Henry Erver Viámonte Mamani

c)

conducente a la obtención del título profesional de:

Ingeniero Civil

(Denominación del Título Profesional)

El Presidente inició el acto académico de sustentación invitando al (a la) / a (los) (las) candidato(a)s a hacer uso del tiempo determinado para su exposición. Concluida la exposición, el Presidente invitó a los demás miembros del jurado a efectuar las preguntas, y aclaraciones pertinentes, las cuales fueron absueltas por al (a la) / a (los) (las) candidato(a)s. Luego, se produjo un receso para las deliberaciones y la emisión del dictamen del jurado.

Posteriormente, el jurado procedió a dejar constancia escrita sobre la evaluación en la presente acta, con el dictamen siguiente:

Bachiller (a): Alex Ricardo Yucra Hilachogus

CALIFICACIÓN	ESCALAS			Mérito
	Vigesimal	Literal	Cualitativa	
Aprobado	15	B-	Bueno	Muy Bueno

Bachiller (b): Henry Erver Viámonte Mamani

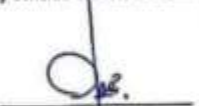
CALIFICACIÓN	ESCALAS			Mérito
	Vigesimal	Literal	Cualitativa	
Aprobado	16	B	Bueno	Muy Bueno

Bachiller (c):

CALIFICACIÓN	ESCALAS			Mérito
	Vigesimal	Literal	Cualitativa	

(*) Ver parte posterior

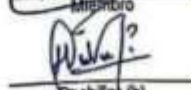
Finalmente, el Presidente del jurado invitó al (a la) / a (los) (las) candidato(a)s a ponerse de pie, para recibir la evaluación final y concluir el acto académico de sustentación procediéndose a registrar las firmas respectivas.

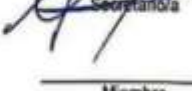

 Presidente/a

 Secretario/a

 Asesor(a)

 Bachiller (a)

 Miembro

 Bachiller (b)

 Secretario/a

 Miembro

 Bachiller (c)

INDICE GENERAL

INDICE DE TABLAS.....	v
INDICE DE FIGURAS	vii
INDICE DE ANEXOS	ix
RESUMEN	8
ABSTRACT	9
1. INTRODUCCIÓN	10
2. MATERIALES Y MÉTODOS	13
2.1. Materiales.....	16
2.2. Métodos	20
2.3. Estudio Experimental.....	21
3. RESULTADOS Y DISCUSION.....	22
4. CONCLUSIONES	54
REFERENCIAS	57
ANEXOS.....	59

INDICE DE TABLAS

Tabla 1 Ficha Técnica del cloruro de magnesio hexahidratado	18
Tabla 2 Ficha técnica de la CAL Hades (Ensayo por Difracción de Rayos X).....	19
Tabla 3 Ensayos de laboratorio.....	21
Tabla 4 Resultados obtenidos de % de humedad y densidad seca	22
Tabla 5 Resultados de límites de consistencia de la calicata N° 01	23
Tabla 6 Resultados de límites de consistencia de la calicata N° 02	24
Tabla 7 Resultados de límites de consistencia de la calicata N° 03	24
Tabla 8 Resultados de promedio de las 03 calicatas con adición de cloruro de magnesio.	25
Tabla 9 Resultados de límites de consistencia de la calicata N° 04	27
Tabla 10 Resultados de límites de consistencia de la calicata N° 05	28
Tabla 11 Resultados de límites de consistencia de la calicata N° 06	28
Tabla 12 Resultados de promedio de las 03 calicatas de SN + adición de óxido de calcio (CaO)	29
Tabla 13 Resultados de densidad seca máxima y promedio entre las calicatas N° 01, 02, 03 + adición de $MgCl_2$	32
Tabla 14 Resultados de humedad óptima y promedio entre las calicatas N° 01, 02, 03 + adición de $MgCl_2$	33
Tabla 15 Resultados de densidad seca máxima y promedio entre las calicatas N° 04, 05, 06 + adición de Cal.....	35
Tabla 16 Resultados de humedad óptima y promedio entre las calicatas N° 04, 05, 06 + adición de Cal	36
Tabla 17 Categorías de subrasante	52
Tabla 18 Resultados de % CBR al 95% y promedio entre las calicatas N° 01, 03 , 03 + adición de $MgCl_2$	52

Tabla 19 Resultados de % CBR al 95% y promedio entre las calicatas N° 04, 05, 06

Adición de Cal..... 53

INDICE DE FIGURAS

Figura 1 Extracción de muestras de suelo	13
Figura 2 Ensayo de densidad de campo	14
Figura 3 Ensayo de análisis granulométrico.....	14
Figura 4 Ensayo de peso volumétrico	15
Figura 5 Ensayo de Proctor modificado	16
Figura 6 Ensayo de CBR (California Bearing Ratio).....	16
Figura 7 Secado de muestra al aire libre	17
Figura 8 Ensayo de molido de muestras.....	17
Figura 9 Humedad Natural de las 06 calicatas	22
Figura 10 Densidad de campo de las 06 calicatas	23
Figura 11 Resultados de promedio límite líquido de SN + adición de $MgCl_2$	26
Figura 12 Resultados de promedio límite plástico de SN + adición de $MgCl_2$	26
Figura 13 Resultados de promedio índice de plasticidad de SN + adición de $MgCl_2$	26
Figura 14 Resultados de promedio límite líquido de SN + adición de Cal	29
Figura 15 Resultados de promedio límite plástico de SN + adición de Cal	30
Figura 16 Resultados de promedio índice de plasticidad de SN + adición de Cal.....	30
Figura 17 Resultados R-H de SN + adición de $MgCl_2$, C-01.....	31
Figura 18 Resultados R-H de SN + adición de $MgCl_2$, C-02	32
Figura 19 Resultados R-H de SN + adición de $MgCl_2$, C-03	32
Figura 20 Resultados de promedio densidad seca máxima – humedad óptima entre las calicatas N° 01, 02, 03 + adición de $MgCl_2$	33
Figura 21 Resultados R-H de SN + adición de Cal, C-04.....	34
Figura 22 Resultados R-H de SN +adición de Cal, C-05.....	35
Figura 23 Resultados R-H de SN + adición de Cal, C-06.....	35

Figura 24 Resultados de promedio densidad seca máxima – humedad óptima entre las calicatas N° 04, 05, 06 + adición de Cal.....	36
Figura 25 Resultados de SN de la C-01, CBR a 1 pulg.....	37
Figura 26 Resultados de SN + 1% MgCl ₂ de la C-01, % CBR a 1 pulg	38
Figura 27 Resultados de SN + 3% MgCl ₂ de la C-01, % CBR a 1 pulg	38
Figura 28 Resultados de SN + 5% MgCl ₂ , % CBR a 1 pulg	38
Figura 29 Resultados de % expansión (hinchamiento) de SN + adición de MgCl ₂ , C-01	39
Figura 30 Resultados de % CBR al 95% y 100% de SN + adición de MgCl ₂ , C-01	39
Figura 31 Resultados de SN de la C-02, % CBR a 1 pulg	40
Figura 32 Resultados de SN + 1% MgCl ₂ de la C-02, % CBR a 1 pulg	40
Figura 33 Resultados de SN + 3% MgCl ₂ de la C-02, % CBR a 1 pulg	41
Figura 34 Resultados de SN + 5% MgCl ₂ de la C-02, % CBR a 1 pulg	41
Figura 35 Resultados de % expansión (hinchamiento) de SN + adición de MgCl ₂ , C-02	41
Figura 36 Resultados de % CBR al 95% y 100% de SN + adición de MgCl ₂ , C-02	42
Figura 37 Resultados de SN + adición de la C-03, % CBR a 1 pulg	42
Figura 38 Resultados de SN + 1% MgCl ₂ de la C-03, % CBR a 1 pulg	43
Figura 39 Resultados de SN + 3% MgCl ₂ de la C-03, % CBR a 1 pulg	43
Figura 40 Resultados de SN + 5% MgCl ₂ de la C-03, % CBR a 1 pulg	43
Figura 41 Resultados de % expansión (hinchamiento) de SN + adición de MgCl ₂ , C-03	44
Figura 42 Resultados de % CBR al 95% y 100% de SN + adición de MgCl ₂ , C-03	44
Figura 43 Resultados de SN de la C-04, % CBR a 1 pulg	45
Figura 44 Resultados de SN + 1% CAL de la C-04, % CBR a 1 pulg.....	45
Figura 45 Resultados de SN + 3% CAL de la C-04, % CBR a 1 pulg.....	45
Figura 46 Resultados de SN + 5% CAL de la C-04, % CBR a 1 pulg.....	46
Figura 47 Resultados de % expansión (hinchamiento) de SN + adición de CAL, C-04....	46

Figura 48 Resultados de % CBR al 95% y 100% de SN + adición de CAL, C-04.....	46
Figura 49 Resultados de SN de la C-05, %CBR a 1 pulg	47
Figura 50 Resultados de SN + 1% CAL de la C-05. % CBR a 1 pulg.....	48
Figura 51 Resultados de SN + 3% CAL de la C-05, % CBR a 1 pulg.....	48
Figura 52 Resultados de SN + 5% CAL de la C-05, % CBR a 1 pulg.....	48
Figura 53 Resultados de % expansión (hinchamiento) de SN + adición de CAL, C-05....	49
Figura 54 Resultados de % CBR al 95% y 100% de SN+ adición de CAL, C-05.....	49
Figura 55 Resultados de SN de la C-06, % CBR a 1 pulg	50
Figura 56 Resultados de SN +1% CAL de la C-06, % CBR a 1 pulg.....	50
Figura 57 Resultados de SN + 3% CAL de la C-06, % CBR a 1 pulg.....	50
Figura 58 Resultados de SN + 5% CAL de la C-06, % CBR a 1 pulg.....	51
Figura 59 Resultados de % expansión (hinchamiento) de SN + adición de CAL, C-06....	51
Figura 60 Resultados de % CBR al 95% y 100% de SN + adición de CAL, C-06.....	51

INDICE DE ANEXOS

Anexo 1 Evidencia de sumisión del artículo de investigación.....	59
Anexo 2 Copia de la resolución de inscripción del perfil de proyecto de tesis en formato artículo aprobado por el consejo de facultad correspondiente	60

Efecto de la incorporación del cloruro de magnesio y cal en las propiedades geotécnicas de suelos cohesivos a nivel de subrasante

RESUMEN

Introducción: Los principales problemas que afronta en la actualidad el Perú es la carencia de trochas carrozables no afirmados con el fin de que la población pueda desplazarse de manera segura y continua. En la presente investigación: “Efecto de la incorporación de cloruro de magnesio y cal en las propiedades geotécnicas de suelos cohesivos a nivel de subrasante”; el objetivo de esta investigación es determinar el efecto que produce el cloruro de magnesio y cal en las propiedades geotécnicas en porcentajes de 1%, 3% y 5% en suelos arcillosos; para lo cual se realizó 06 calicatas en el tramo de la carretera Rosaspata – Huayrapata, departamento de Puno – Perú. Los resultados obtenidos fueron que el suelo de subrasante natural tiene un Índice de Plasticidad (IP) promedio de las calicatas C-01, C-02 y C-03 es de 23.69%, la capacidad de soporte (CBR) de 5.32% (subrasante pobre) y a medida que se va incorporando el cloruro de magnesio, redujo el IP a 20.20%, mientras que el CBR incrementó a 7.71% (subrasante regular). Así mismo el suelo natural de subrasante de las calicatas C-04, C-05 y C-06 su IP promedio es de 27.33%, CBR de 5.82% (subrasante pobre) y con la incorporación de cal, redujo el IP a 18.68% y CBR mejoró a 8.15% (subrasante regular). Por otro lado, se analizó que la expansión de las 06 calicatas disminuye a medida que se va incorporando los aditivos analizados. Se llegó a la conclusión de que el $MgCl_2$ y cal si mejoran en las propiedades físicas y mecánicas en suelos arcillosos a nivel de subrasante, indicando que el porcentaje óptimo de estabilizante químico es de 5%; redujeron el índice de plasticidad y aumentaron la capacidad de soporte del suelo. Finalmente, la cal resultó más económico respecto al costo de estabilización de suelos cohesivos de subrasante.

Palabras clave: Estabilización, propiedades geotécnicas, suelos cohesivos, cloruro de magnesio, cal, subrasante y dosificación.

Effect of temperature in a tubular anaerobic digester, conditioned in a low-cost greenhouse in the Peruvian highlands

ABSTRACT

Introduction: The main problems currently facing Peru are the lack of unconfirmed cowable tracks in order to enable the population to move safely and continuously. In the present research: “Effect of the incorporation of magnesium chloride and lime on the geotechnical properties of cohesive soils at sub-grade level”; the objective of this research is to determine the effect of magnesium chloride and lime on geotechnical properties in percentages of 1%, 3% and 5% in clay soils; for which 06 calicatas were made in the section of the Rosaspata – Huayrapata highway, department of Puno – Peru. The results obtained were that the soil of natural subrasant has an average Plasticity Index (IP) of the C-01, C-02 and C-03 calicates is 23.69%, the support capacity (CBR) of 5.32% (poor subrasant) and as the magnesium chloride is incorporated, it has a low subgrade. it reduced IP to 20.20%, while CBR increased to 7.71% (regular sub-grade). Likewise, the natural subgrade soil of calicates C-04, C-05 and C-06 its average IP is 27.33%, CBR of 5.82% (poor subgrade) and with the incorporation of lime, reduced the IP to 18.68% and CBR improved to 8.15% (regular subgrade). On the other hand, it was analyzed that the expansion of the 06 calicatas decreases as the additives analyzed are incorporated. It was concluded that $MgCl_2$ and lime do improve in the physical and mechanical properties in clay soils at the sub-grade level, indicating that the optimal percentage of chemical stabilizer is 5%; they reduced the plasticity index and increased the capacity of soil support. Finally, lime was cheaper than the cost of stabilizing cohesive subgrade soils.

Keywords: Stabilization, geotechnical properties, cohesive soils, magnesium chloride, lime, subgrade and dosage.

INTRODUCCIÓN

La estabilización de suelos, es un proceso que tiene por objeto principal aumentar su capacidad de soporte (CBR). Entre los métodos para mejorar el suelo sobre el cual se asienta una carretera tenemos: métodos físicos, mecánicos y químicos. Según (Radhakrishnan et al., 2017), tuvieron como objetivo estudiar la eficacia de tres compuestos químicos de cloruro, cloruro de amonio (NH_4Cl), cloruro de magnesio (MgCl_2) y cloruro de aluminio (AlCl_3) en las propiedades geotécnicas de un suelo expansivo. Llegaron a la conclusión de que los compuestos químicos de cloruro mejoran las propiedades geotécnicas del suelo expansivo, sin embargo, entre los tres productos químicos utilizados, el cloruro de aluminio resultó ser eficaz para reducir la naturaleza expansiva y para estabilizar el suelo expansivo. Según (Chavarry Vallejos et al., 2020), tuvo como objetivo evaluar el mejoramiento de las propiedades mecánicas de suelo y adición del cloruro de calcio para contrarrestar la exposición de polvo al ser una trocha carrozable. Las conclusiones que se pudo verificar es que la adición del cloruro de calcio aumento en 64.52% de CBR. Siendo muy efectivo para el mejoramiento en suelos arenosos y gravosos. Asimismo, el aditivo reduce la humedad y contrarrestando la exposición del polvo.

Asimismo, según (Taylor & Francis, 2022), analizaron que el Cloruro de Magnesio en combinación con GGBS es aceptable para los requisitos de capacidad portante que nos especifica en la norma para subrasante de carreteras. Asimismo, se determinó la dosificación de ClMg_2 como el 5% y 10% pudo mejorar las características mecánicas del suelo. Según (Amit & D. K., 2019), el objetivo de su investigación fue la influencia de la utilización y aprovechamiento de los residuos enriquecidos como el polvo de cascara de huevo con cal como un estabilizador de suelos, en el año 2019. Los resultados nos indican

que se realizaron dosificaciones en porcentajes de 3%, 6%, 9% de polvo de cascara de huevo, de igual manera con un porcentaje de 2%, 4%, 6% de cloruro de sodio y finalmente con un porcentaje 0.05%, 0.1%, 0.15% de fibra de polipropileno, mediante la adición de los mismos influyeron significativamente en el pH, asimismo la resistencia a la compresión no confinada del suelo. En conclusión, el estudio realizado pudo demostrar que la inclusión de los aditivos presenta una mejora en las propiedades físico-mecánicas de suelo y de igual manera en resistencia reforzado con la fibra. De la misma manera nos indica que a mayor presencia de arcilla mayor es el Ph.

Según (Noman et al., 2023), en su investigación exploraron el potencial de la ceniza de cáscara de arroz (RHA) local y la cal como estabilizadores en suelos arcillosos de alta plasticidad que influyen en sus propiedades físicas y mecánicas. En su estudio usó diferentes proporciones de mezcla de RHA de 5%, 10%, 20% y 30% y cal 10% y 20% para tratar el suelo natural. Concluyó que el porcentaje óptimo de dosificación es de 10% de RHA y 20% de cal, cuyos efectos fue la mejora positivamente del índice de plasticidad y propiedades mecánicas del suelo tratado. (Abdallah et al., 2023), evaluaron la estabilización expansiva de suelos arcillosos usando diferentes aditivos, con proporciones de 10%, 20%, 25% y 30% de toba zeolítica (ZT) y con 2%, 4% y 6% de cal para mejorar las propiedades físicas y mecánicas de los suelos y como resultados obtuvieron que en las pruebas de laboratorio al añadir ZT aumenta la densidad seca máxima, CBR, UCS, módulo resiliente, disminuye el índice de plasticidad (IP) y la deformación. También indican que el ZT puede mejorar las propiedades geotécnicas del suelo estabilizado con cal para capas de subrasante y subbase de un pavimento.

(Ghanizadeh et al., 2023), estudió que la estabilización de suelos arcillosos de alta plasticidad (CH) con cal es muy eficiente, sin embargo, en su investigación determinó los beneficios de prolongación de la vida útil de la fatiga del pavimento y los surcos de la

estabilización con cal hidratada en suelos arcillosos de subrasante. Para lo cual empleó el método empírico – mecanicista no lineal (NonPAS) con diferentes proporciones de cal de 3%, 6% y 9% con profundidades de 15cm, 30cm, y 45cm y temperaturas climáticas de 0 °C, 25 °C y 45 °C. Concluyeron que el porcentaje óptimo de estabilización con cal es de 6%, también indica que la estabilización de un suelo de subrasante en climas más cálidos es más beneficiosa, también confirma para que una estabilización sea efectiva con cal, la profundidad de estabilizar el suelo debe ser mayor a 30cm.

(Bustamante Salazar et al., 2022), determinaron la estabilización de suelos cohesivos con la incorporación de vinaza de *Saccharum officinarum*, sus resultados indicaron que con la aplicación de vinaza *Saccharum officinarum* en 10%, 15%, 20% y 25%, la densidad seca máxima aumenta con los diferentes porcentajes utilizados, de igual forma indican que en el ensayo de resistencia mecánica de suelo estabilizado logró incrementar la resistencia respecto al suelo natural, siendo el porcentaje óptimo de 25% de vinaza *Saccharum officinarum* del cual resultó valores óptimos. Concluyen que la aplicación del aditivo en mención incrementa favorablemente en las propiedades mecánicas del suelo cohesivo.

(De La Cruz Vega et al., 2022), evaluaron la aplicación del agua de mar en la subrasante afirmada, con el fin de mejorar la capacidad de soporte (CBR) del suelo arcilloso, utilizando diferentes proporciones de cantidad de agua de mar. Llegaron a la conclusión que la capacidad de soporte (CBR) incrementa significativamente en un 34.90% de la subrasante afirmada.

A la fecha en la provincia de Moho, ubicado en el departamento de Puno a una altura de 3928 msnm, las carreteras no pavimentadas (trochas carrozables), en su mayoría ya se puede apreciar las diferentes fallas o baches debido a un inadecuado proceso constructivo, mala compactación; el cual se deberá mejorar mediante estabilización o

tratamiento con aditivos que pueden mejorar la condición de dichas carreteras. Por consiguiente, existen mejoramientos mecánicos, físicos y químicos que tienen la función de estabilizar el suelo; por el que se propone dar a conocer mediante un análisis comparativo (ventajas y desventajas técnicas y económicas) entre el cloruro de magnesio y cal con fines de estabilización en las propiedades de la subrasante en el tramo de la carretera Rosaspata – Huayrapata.

MATERIALES Y MÉTODOS

La investigación tiene como primera etapa que fue el trabajo en campo, con el fin de la extracción de las muestras de suelo (suelos arcillosos), para ello la población de estudio está ubicada en el tramo de la carretera Rosaspata – Huayrapata perteneciente al departamento de Puno - Perú. Así mismo se excavaron 06 calicatas con una profundidad de 0.80m – 1.00m, posteriormente de las calicatas se extrajeron muestras inalteradas para la ejecución de los ensayos de Densidad Natural y Humedad Natural.

Figura 1

Extracción de muestras de suelo



Fuente: Elaboración Propia

Figura 2

Ensayo de densidad de campo



Fuente: Elaboración Propia

Asimismo, como segunda etapa fue la ejecución de las pruebas de laboratorio de mecánica de suelos en los que se determinen las características físicas mediante ensayos como: Análisis Granulométrico y Límites de Consistencia. Por otro lado, los ensayos físicos ya mencionados se les añadió 1%, 3% y 5% de cloruro de magnesio y cal con el fin de ser comparados con la muestra natural, posteriormente fueron revisados y aprobados por un encargado de laboratorio de suelos.

Figura 3

Ensayo de análisis granulométrico



Fuente: Elaboración Propia

Figura 4

Ensayo de peso volumétrico



Fuente: Elaboración Propia

Como tercera etapa fue la ejecución de los ensayos mecánicos en laboratorio de mecánica de suelos con el fin de determinar las propiedades mecánicas a través de ensayos como: Proctor Modificado y C.B.R. (California Bearing Ratio). De igual forma se les añadió 1%, 3% y 5% de cloruro de magnesio y cal a los ensayos mecánicos ya mencionados, con la finalidad de ser comparados con la muestra natural (Patrón).

Figura 5

Ensayo de Proctor modificado



Fuente: Elaboración Propia

Figura 6

Ensayo de CBR (California Bearing Ratio)



Fuente: Elaboración Propia

2.1. Materiales

En esta investigación se utilizaron 06 muestras de suelos arcillosos inspeccionados visualmente para posteriormente ser analizados en laboratorio. Los suelos fueron de color ámbar, plomo oscuro y claro cómo se muestran en la figura 07. Las muestras de suelo

fueron secados al aire libre por lo menos 24 horas, seguidamente fueron pulverizados con un mazo de madera para tener pequeñas partículas de suelos. Luego las muestras de suelo fueron colocadas en el molino para ser triturados con villas de acero en un lapso de 15 minutos tal como se muestra en la figura 08, esto fue realizado con el fin de que las muestras deben ser muy finas pasantes al Tamiz N° 20 para las pruebas de laboratorio de acuerdo a la norma técnica peruana y ASTM.

Figura 7

Secado de muestra al aire libre



Fuente: Elaboración Propia

Figura 8

Ensayo de molido de muestras



Fuente: Elaboración propia (Perrigault et al., 2012)

Los estabilizantes químicos utilizados para la presente investigación fueron el Cloruro de Magnesio Hexahidratado (ClMg_2) y Cal; el primer aditivo químico fue obtenido de una Empresa Privada, del cual obtuvimos su ficha técnica tal y como se detalla en la tabla 01. Para el segundo aditivo químico fue obtenido del mercado local de la zona, de igual forma nos brinda su ficha técnica (Ensayo por Difracción de Rayos X) tal y como se muestra en la tabla 02, para este caso la Cal fue tamizado por el Tamiz N° 20 con el fin de tener un producto más fino y para tener resultados positivos.

Tabla 1

Ficha Técnica del cloruro de magnesio hexahidratado

Descripción	Fórmula
Nombre químico	Cloruro de Magnesio Hexahidratado
Fórmula química	$\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$
Peso molecular	203.303

Contenido de	11.8gr en 100gr de
magnesio	MgCl ₂ .6H ₂ O
Caducidad	3 años
Condiciones de almacenamiento	Almacenar en lugares frescos, secos y bien ventilados, almacenar en envases bien cerrados a temperatura -5° -45°C
Humedad relativa	5%-9%
Aspecto	Cristalino incoloro
Densidad	1.57 kg/dm ³
Solubilidad en agua a 20°C	3043.05gr/1000gr
Punto de fusión	117°C
Temperatura de deshidratación	500°C

Fuente: Macco Organiques s.r.o. (Oregon Chem Group)

Tabla 2

Ficha técnica de la CAL Hades (Ensayo por Difracción de Rayos X)

Descripción	Fórmula	Resultado Aproximado (%)
Calcita	CaCO ₃	29
Plagioclasa (Oligoclasa)	(Ca,Na) (Al,Si) ₄ O ₈	22
Feldepasto – K (Ortoclasa)	KAIS ₃ O ₈	12

Dolomita	$\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$	9
Cuarzo	SiO_2	8
Clorita (Clinocloro)	$(\text{Mg,Fe})_5 \text{Al}(\text{Si}_3\text{Al})\text{O}_{10}(\text{OH})_8$	4
Barita	BaSO_4	4
Anfibol (Actinolita)	$\text{Ca}_2(\text{Mg,Fe})_5 \text{Si}_8 \text{O}_{22}(\text{OH})_2$	3
Talco	$\text{Mg}_3 \text{Si}_4 \text{O}_{10}(\text{OH})_2$	2
Caolinita	$\text{Al}_2 \text{Si}_2 \text{O}_5(\text{OH})_4$	2
Yeso	$\text{CaSO}_4 \cdot 2(\text{H}_2\text{O})$	<L. D.
Mica (Muscovit)	$\text{KAl}_2(\text{Si}_3 \text{Al})\text{O}_{10}(\text{OH,F})_2$	<L. D.

Fuente: (Varas Bermudez, 2018)

2.2. Métodos

En este caso la dosificación de las muestras de suelo fue en seco según los requisitos de cada ensayo de laboratorio. La cantidad necesaria de materiales fueron pesados en función a los porcentajes propuestos.

Para esta investigación los resultados fueron obtenidos básicamente de las pruebas de laboratorio, el suelo y los aditivos químicos fueron dosificados en condiciones secas antes de realizar cada ensayo, con el fin de determinar toda la información cuantitativa sobre el suelo tratado con los 02 diferentes aditivos, se dosificó el suelo arcilloso y el aditivo en proporciones crecientes en 1%, 3% y 5% en función al peso seco para ser analizados y comparados los efectos en sus propiedades físicas y mecánicas. Además, se preparó una muestra natural con 0% de aditivos. En total se prepararon 03 muestras de suelos arcillosos tratados con Cloruro de Magnesio Hexahidratado (ClMg_2) y 03 muestras de suelos arcillosos tratados con Cal.

2.3. Estudio Experimental

En este punto básicamente fueron la ejecución de las pruebas de laboratorio, las 03 primeras muestras de suelos arcillosos fueron dosificadas con Cloruro de Magnesio Hexahidratado (ClMg2) con proporciones de 1%, 3% y 5%, de igual forma se dosificaron 03 suelos arcillosos tratados con Cal en las mismas proporciones del anterior aditivo químico. Los resultados de los ensayos incorporando dichos aditivos fueron comparados con los resultados de los suelos naturales con 0% de aditivos para posteriormente analizar los efectos que producen el ClMg2 y Cal en las propiedades físicas y mecánicas. Los ensayos realizados en laboratorio fueron:

Tabla 3

Ensayos de laboratorio

Ensayo	Normas	
	NTP	ASTM
Humedad Natural	MTC-E108	ASTM D-2216
Densidad Natural	MTC-E117	ASTM D-4531
Granulometría	MTC-E107	ASTM D-422
Límite Líquido	MTC-E110	ASTM D-4318
Límite Plástico	MTC-E111	ASTM D-4318
Proctor Modificado	MTC-E115	ASTM D-1557
C.B.R.	MTC-E132	ASTM D-1883

Fuente: Manual de Ensayo de Materiales (2016)

RESULTADOS Y DISCUSION

En la investigación se obtuvieron resultados de muestras de calicatas de la subrasante que son un total de 6, denominadas C1, C2, C3, C4, C5 y C6 una vez extraída del suelo natural se realizó el ensayo de contenido de humedad y densidad de campo que a continuación se muestra los resultados obtenidos de los ensayos antes mencionados en la tabla 04.

Tabla 4

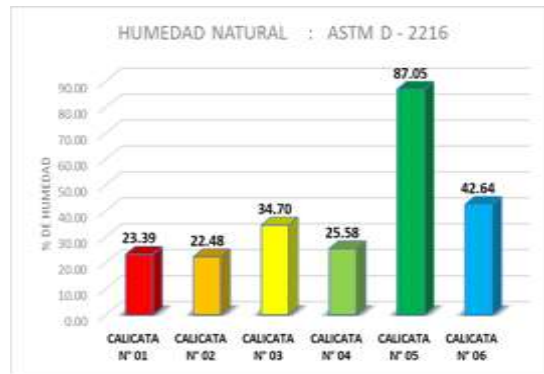
Resultados obtenidos de % de humedad y densidad seca

Muestra	Humedad (%)	Densidad seca (gr/cm³)
Calicata N° 01	23.39	1.64
Calicata N° 02	22.48	1.68
Calicata N° 03	34.70	1.43
Calicata N° 04	25.58	1.57
Calicata N° 05	87.05	0.83
Calicata N° 06	42.64	1.25

Fuente: Elaboración Propia

Figura 9

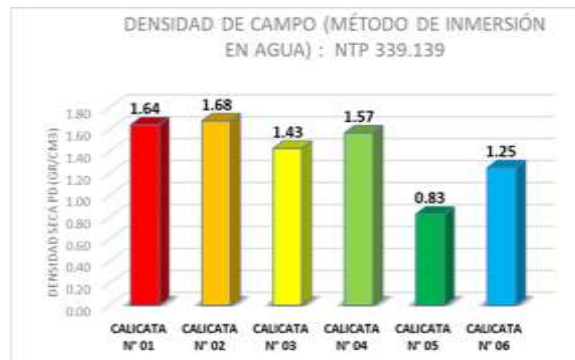
Humedad Natural de las 06 calicatas



Fuente: Elaboración propia

Figura 10

Densidad de campo de las 06 calicatas



Fuente: Elaboración propia

Como se puede apreciar en la tabla 04, los resultados de las calicatas varían en relación a contenido de humedad y densidad seca. La calicata N°02 es el que menor porcentaje de humedad tiene por tanto presenta mayor densidad seca como nos indica la figura 10, de la misma manera tenemos que la calicata N°05 presenta un alto porcentaje de humedad por tanto tiene la menor densidad seca. Ver figura 10.

Tabla 5

Resultados de límites de consistencia de la calicata N° 01

Límites de Consistencia	C-1	C-1	C-1	C-1
-------------------------	-----	-----	-----	-----

	NAT	1%MgCl₂	3%MgCl₂	5%MgCl₂
Límite Líquido (%)	28.51	27.55	25.77	24.12
Límite Plástico (%)	11.03	10.54	9.35	8.15
Índice de Plasticidad (%)	17.48	17.01	16.43	15.98
Clasificación SUCS	CL	CL	CL	CL
Clasificación AASHTO	A-6(10)	A-6(9)	A-6(8)	A-6(8)

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 6

Resultados de límites de consistencia de la calicata N° 02

Límites de	C-2	C-2	C-2	C-2
Consistencia	NAT	1%MgCl₂	3%MgCl₂	5%MgCl₂
Límite Líquido (%)	28.92	28.13	27.48	26.68
Límite Plástico (%)	10.61	10.38	10.26	9.70
Índice de Plasticidad (%)	18.31	17.75	17.22	16.98
Clasificación SUCS	CL	CL	CL	CL
Clasificación AASHTO	A-6(9)	A-6(9)	A-6(9)	A-6(9)

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 7

Resultados de límites de consistencia de la calicata N° 03

Límites de Consistencia	C-3	C-3	C-3	C-3
	NAT	1%MgCl₂	3%MgCl₂	5%MgCl₂
Límite Líquido (%)	56.42	49.38	47.37	46.33
Límite Plástico (%)	21.13	20.98	19.12	18.69
Índice de Plasticidad (%)	35.29	28.40	28.26	27.64

Clasificación SUCS	CH	CL	CL	CL
Clasificación AASHTO	A-7-6(25)	A-7-6(20)	A-7-6(20)	A-7-6(19)

Fuente: Elaboración Propia

Como se puede apreciar en la tabla 05, los resultados de la calicata N° 01 nos indica que según clasificación SUCS es de un suelo de arcilla de baja plasticidad aun con la adición del cloruro de magnesio y según clasificación AASHTO un suelo de arcilla de baja plasticidad con arena de igual manera con la adición de cloruro de magnesio.

En caso de la tabla 06, los resultados de la calicata N° 02 nos indica que según clasificación SUCS es de un suelo de arcilla de baja plasticidad aun con la adición del cloruro de magnesio y según clasificación AASHTO un suelo de arcilla de baja plasticidad con arena de igual manera con la adición de cloruro de magnesio.

En caso de la tabla 07, los resultados de la calicata N° 03 nos indica que según clasificación SUCS es de un suelo de arcilla de alta plasticidad, pero con la adición del cloruro de magnesio como nos indica la tabla 07, bajo a una arcilla de baja plasticidad y según clasificación AASHTO un suelo de arcilla de alta plasticidad con arena, pero la adición de cloruro de magnesio cambio a una arcilla de mediana plasticidad con arena.

Tabla 8

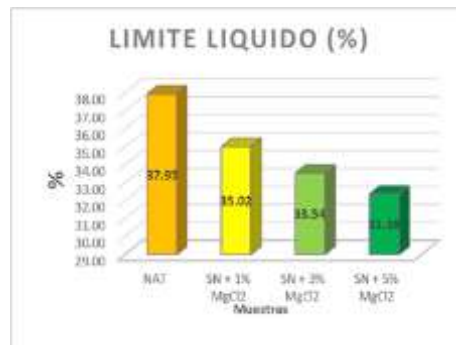
Resultados de promedio de las 03 calicatas con adición de cloruro de magnesio

Límites de Consistencia	Promedio	Suelo	SN	SN	SN
		Natural	1%MgCl₂	3%MgCl₂	5%MgCl₂
Límite Líquido (%)	C1 – C2 – C3	37.95	35.02	33.54	32.38
Límite Plástico (%)	C1 – C2 – C3	14.26	13.97	12.91	12.18
Índice de Plasticidad (%)	C1 – C2 – C3	23.69	21.05	20.63	20.20

Fuente: Elaboración Propia

Figura 11

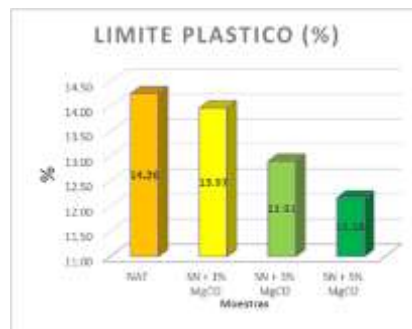
Resultados de promedio límite líquido de SN + adición de $MgCl_2$



Fuente: Elaboración propia

Figura 12

Resultados de promedio límite plástico de SN + adición de $MgCl_2$



Fuente: Elaboración propia

Figura 13

Resultados de promedio índice de plasticidad de SN + adición de $MgCl_2$



Fuente: Elaboración propia

Según la tabla 08 y figura 11, podemos apreciar que el promedio de la calicata N°01,02,03 en el límite líquido en suelo natural es de 37.95%, a medida que agregamos el aditivo de cloruro de magnesio como tal es el caso de la investigación de 1%,3%,5% para tener mayor confiabilidad en los resultados, los resultados nos indican que con la adición del 5% de $MgCl_2$ disminuye a 32.38% esto nos indica que con relación al suelo natural influye en la disminución de un 15%.

Según la tabla 08 y figura 12, podemos apreciar que el promedio de la calicata N°01,02,03 en el límite plástico en suelo natural es de 14.26%, a medida que agregamos el aditivo de cloruro de magnesio como tal es el caso de la investigación de 1%,3%,5%, los resultados nos indican que con la adición del 5% de $MgCl_2$ disminuye a 12.18% esto nos indica que con relación al suelo natural influye en la disminución de un 15%.

Según la tabla 08 y figura 13, podemos apreciar que el promedio de la calicata N°01,02,03 el índice de plasticidad en suelo natural es de 23.69%, a medida que agregamos el aditivo de cloruro de magnesio como tal es el caso de la investigación de 1%,3%,5%, los resultados nos indican que con la adición del 5% de $MgCl_2$ disminuye a 20.20% esto nos indica que con relación al suelo natural influye en la disminución de un 15%.

Tabla 9

Resultados de límites de consistencia de la calicata N° 04

Límites de Consistencia	C-4	C-4	C-4	C-4
	NAT	1%MgCl₂	3%MgCl₂	5%MgCl₂
Límite Líquido (%)	32.69	28.91	25.77	28.64
Límite Plástico (%)	4.19	4.34	9.35	6.98
Índice de Plasticidad (%)	28.50	24.57	16.43	21.67
Clasificación SUCS	CL	CL	CL	CL

Clasificación AASHTO	A-6(14)	A-6(12)	A-6(17)	A-6(11)
----------------------	---------	---------	---------	---------

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 10

Resultados de límites de consistencia de la calicata N° 05

Límites de Consistencia	C-5	C-5	C-5	C-5
	NAT	1%MgCl₂	3%MgCl₂	5%MgCl₂
Límite Líquido (%)	46.10	44.86	44.65	44.28
Límite Plástico (%)	12.63	16.84	17.04	20.94
Índice de Plasticidad (%)	33.47	28.02	27.61	23.34
Clasificación SUCS	CL	CL	CL	CL
Clasificación AASHTO	A-7-6(28)	A-7-6(24)	A-7-6(17)	A-7-6(20)

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 11

Resultados de límites de consistencia de la calicata N° 06

Límites de Consistencia	C-6	C-1	C-1	C-1
	NAT	1%MgCl₂	3%MgCl₂	5%MgCl₂
Límite Líquido (%)	36.54	35.77	35.28	35.19
Límite Plástico (%)	16.54	20.67	21.54	24.16
Índice de Plasticidad (%)	20.00	15.10	13.75	11.03
Clasificación SUCS	CL	CL	CL	ML
Clasificación AASHTO	A-6(16)	A-6(12)	A-6(11)	A-6(9)

Fuente: Elaboración Propia

Como se puede apreciar en la tabla 09, los resultados de la calicata N° 04 nos indica que según clasificación SUCS es de un suelo de arcilla de baja plasticidad aun con la adición del cloruro de magnesio y según clasificación AASHTO un suelo de arcilla de

mediana plasticidad con arena, pero la adición de cloruro de magnesio cambio a una arcilla de baja plasticidad con arena.

En caso de la tabla 10, los resultados de la calicata N° 05 nos indica que según clasificación SUCS es de un suelo de arcilla de baja plasticidad aun con la adición del cloruro de magnesio y según clasificación AASHTO un suelo de arcilla de mediana plasticidad con arena de igual manera con la adición de cloruro de magnesio.

En caso de la tabla 11, los resultados de la calicata N° 06 nos indica que según clasificación SUCS es de un suelo de arcilla de baja plasticidad, pero con la adición del cloruro de magnesio como nos indica la tabla 8, bajo a un limo de baja plasticidad y según clasificación AASHTO un suelo de arcilla de mediana plasticidad con arena, pero la adición de cloruro de magnesio cambio a un limo de baja plasticidad con arena.

Tabla 12

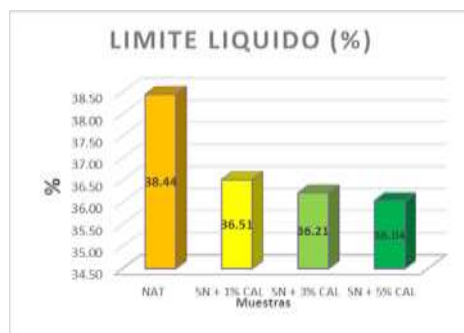
Resultados de promedio de las 03 calicatas de SN + adición de óxido de calcio (CaO)

Límites de Consistencia	Promedio	Suelo	SN	SN	SN
		Natural	1%MgCl ₂	3%MgCl ₂	5%MgCl ₂
Límite Líquido (%)	C4 – C5 – C6	38.44	36.51	36.21	36.04
Límite Plástico (%)	C4 – C5 – C6	11.12	13.95	14.60	17.36
Índice de Plasticidad (%)	C4 – C5 – C6	27.33	22.57	21.62	18.68

Fuente: Elaboración Propia

Figura 14

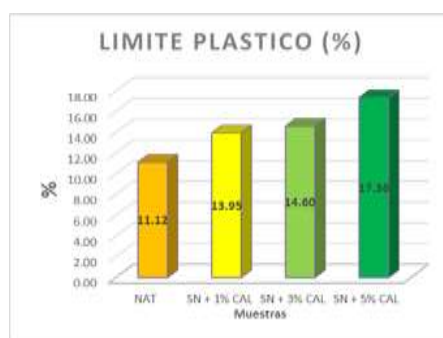
Resultados de promedio límite líquido de SN + adición de Cal



Fuente: Elaboración propia

Figura 15

Resultados de promedio límite plástico de SN + adición de Cal



Fuente: Elaboración propia

Figura 16

Resultados de promedio índice de plasticidad de SN + adición de Cal



Fuente: Elaboración propia

Según la tabla 12 y figura 14, podemos apreciar que el promedio de la calicata N°04,05,06 en el límite líquido en suelo natural es de 38.44%, a medida que agregamos el

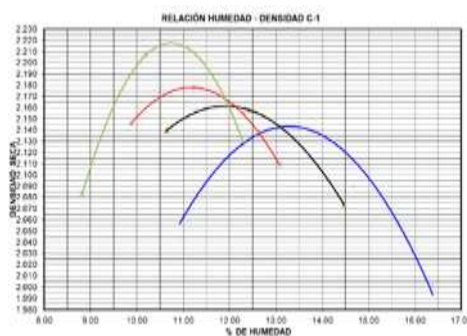
aditivo de óxido de calcio como tal es el caso de la investigación de 1%,3%,5%, los resultados nos indican que con la adición del 5% de Cao (cal) disminuye a 36.04% esto nos indica que con relación al suelo natural influye en la disminución de un 6%.

Según la tabla 12 y figura 15, podemos apreciar que el promedio de la calicata N°04,05,06 en el límite plástico en suelo natural es de 11.12%, a medida que agregamos el aditivo de óxido de calcio como tal es el caso de la investigación de 1%,3%,5%, los resultados nos indican que con la adición del 5% de Cao (cal) aumenta a 17.36% esto nos indica que con relación al suelo natural influye en la incrementación de un 56%.

Según la tabla 12 y figura 16, podemos apreciar que el promedio de la calicata N°04,05,06 el índice de plasticidad en suelo natural es de 27.33%, a medida que agregamos el aditivo de óxido de calcio como tal es el caso de la investigación de 1%,3%,5%, los resultados nos indican que con la adición del 5% de Cao (cal) disminuye a 18.68% esto nos indica que con relación al suelo natural influye en la disminución de un 32%.

Figura 17

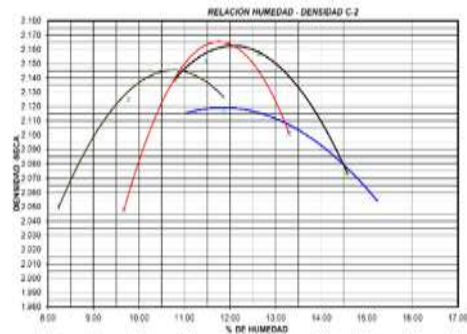
Resultados R-H de SN + adición de $MgCl_2$, C-01



Fuente: Elaboración propia

Figura 18

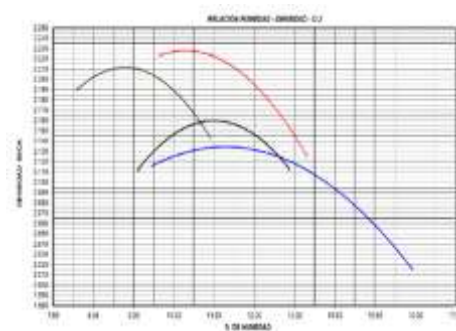
Resultados R-H de SN + adición de $MgCl_2$, C-02



Fuente: Elaboración propia

Figura 19

Resultados R-H de SN + adición de $MgCl_2$, C-03



Fuente: Elaboración propia

En la figura 17,18,19 de la calicata N°01,02,03 se puede observar un comportamiento diferente esto nos ratifica la variabilidad entre muestras teniendo diferentes ubicaciones debido a la adición del cloruro de magnesio de 1%, 3%, 5% en caso de las 3 calicatas, a continuación, los resultados de humedad óptima y densidad máxima:

Tabla 13

Resultados de densidad seca máxima y promedio entre las calicatas N° 01, 02, 03 + adición de $MgCl_2$

DENSIDAD SECA MÁXIMA	Modificado	Modificado	Modificado
----------------------	------------	------------	------------

CALICATA	Suelo Natural (Patron)	SN + 1%ClMg2	SN + 3%ClMg2	SN + 5%ClMg2
C-1	2.143	2.162	2.178	2.218
C-2	2.119	2.128	2.165	2.145
C-3	2.134	2.160	2.227	2.212
PROMEDIO	2.132	2.150	2.190	2.192

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 14

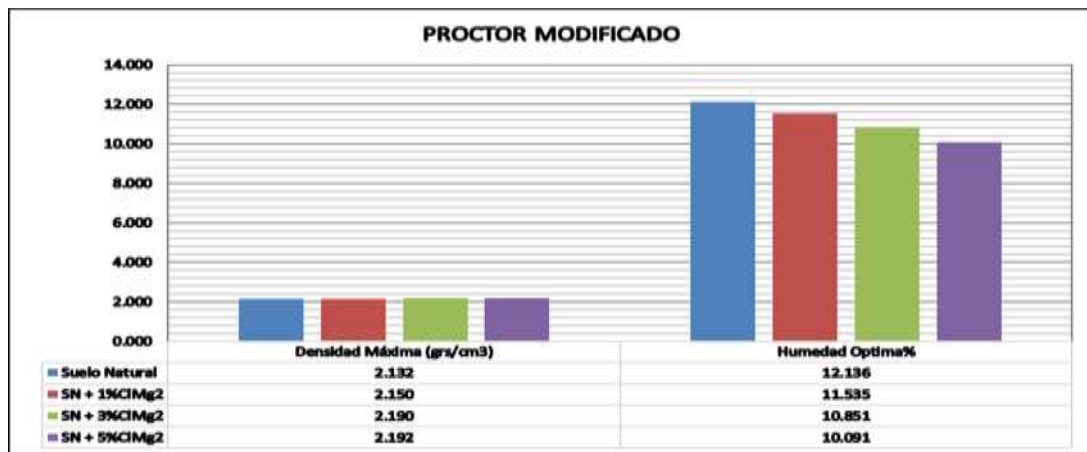
Resultados de humedad óptima y promedio entre las calicatas N° 01, 02, 03 + adición de MgCl₂

	HUMEDAD ÓPTIMA	Modificado	Modificado	Modificado
CALICATA	Suelo Natural (Patron)	SN + 1%ClMg2	SN + 3%ClMg2	SN + 5%ClMg2
C-1	13.282	11.915	11.175	10.738
C-2	11.844	11.694	11.757	10.750
C-3	11.283	10.995	9.620	8.785
PROMEDIO	12.136	11.535	10.851	10.091

Fuente: Elaboración Propia

Figura 20

Resultados de promedio densidad seca máxima – humedad óptima entre las calicatas N° 01, 02, 03 + adición de MgCl₂



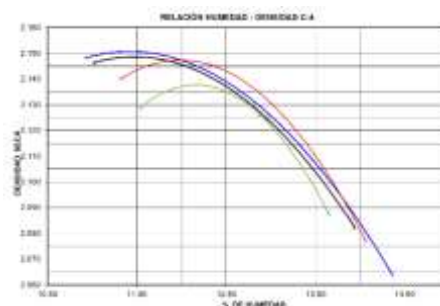
Fuente: Elaboración propia

En la tabla 13 y figura 20, se puede observar que el promedio de la calicata N°01,02,03 en densidad máxima seca de suelo natural es de 2.132gr/cm³, a medida que agregamos el aditivo de cloruro de magnesio como tal es el caso de la investigación de 1%,3%,5%, los resultados nos indican que con la adición del 5% de MgCl₂ incrementa a 2.192gr/cm³, esto nos indica que con relación al suelo natural influye en el incremento de un 3%.

En la tabla 14 y figura 20, se puede observar que el promedio de la calicata N°01,02,03 en humedad óptima de suelo natural es de 12.136%, a medida que agregamos el aditivo de cloruro de magnesio como tal es el caso de la investigación de 1%,3%,5%, los resultados nos indican que con la adición del 5% de MgCl₂ disminuye a 10.091%, esto nos indica que con relación al suelo natural influye en la disminución de un 17%.

Figura 21

Resultados R-H de SN + adición de Cal, C-04



Fuente: Elaboración propia

Figura 22

Resultados R-H de SN + adición de Cal, C-05



Fuente: Elaboración propia

Figura 23

Resultados R-H de SN + adición de Cal, C-06



Fuente: Elaboración propia

En la figura 9,10,11 de la calicata N°04,05,06 se puede observar un comportamiento casi igual al suelo natural con la adición del óxido de calcio (cal) de 1%, 3%, 5% en caso de las 3 calicatas, a continuación, los resultados de humedad óptima y densidad máxima:

Tabla 15

Resultados de densidad seca máxima y promedio entre las calicatas N° 04. 05, 06 + adición de Cal

DENSIDAD SECA MÁXIMA	Modificado	Modificado	Modificado
----------------------	------------	------------	------------

CALICATA	Suelo Natural (Patron)	SN + 1%CAL	SN + 3%CAL	SN + 5%CAL
C-4	2.151	2.149	2.147	2.138
C-5	1.914	1.912	1.909	1.886
C-6	1.816	1.812	1.808	1.803
PROMEDIO	1.960	1.958	1.955	1.942

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 16

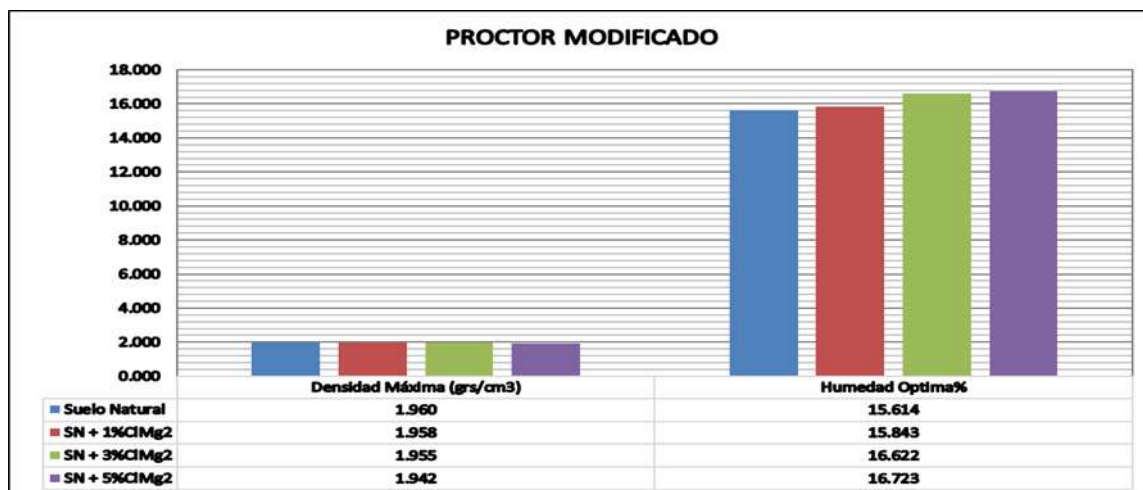
Resultados de humedad óptima y promedio entre las calicatas N° 04, 05, 06 + adición de Cal

	HUMEDAD ÓPTIMA	Modificado	Modificado	Modificado
CALICATA	Suelo Natural (Patron)	SN + 1%CAL	SN + 3%CAL	SN + 5%CAL
C-4	11.422	11.476	11.987	12.162
C-5	17.125	17.234	18.511	18.592
C-6	18.296	18.819	19.369	19.416
PROMEDIO	15.614	15.843	16.622	16.723

Fuente: Elaboración Propia

Figura 24

Resultados de promedio densidad seca máxima – humedad óptima entre las calicatas N° 04, 05, 06 + adición de Cal



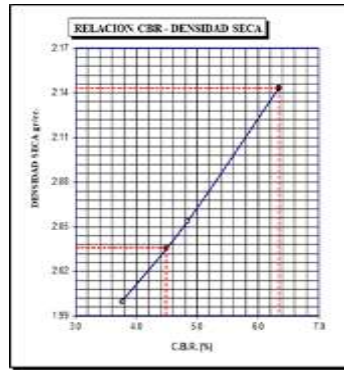
Fuente: Elaboración propia

En la tabla 15 y figura 24, se puede observar que el promedio de la calicata N°04,05,06 en densidad máxima seca de suelo natural es de 1.960gr/cm³, a medida que agregamos el aditivo de óxido de calcio (cal) como tal es el caso de la investigación de 1%,3%,5%, los resultados nos indican que con la adición del 5% de Cal disminuye a 1942gr/cm³, esto nos indica que con relación al suelo natural influye en la disminución de un 1%.

En la tabla 16 y figura 24, se puede observar que el promedio de la calicata N°04,05,06 en humedad óptima de suelo natural es de 15.614%, a medida que agregamos el aditivo de óxido de calcio (cal) como tal es el caso de la investigación de 1%,3%,5%, los resultados nos indican que con la adición del 5% de Cal incrementa a 16.723%, esto nos indica que con relación al suelo natural influye un 7%.

Figura 25

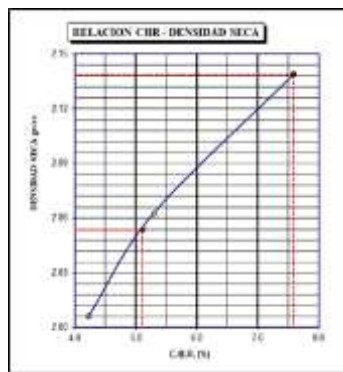
Resultados de SN de la C-01, CBR a 1 pulg



Fuente: Elaboración propia

Figura 26

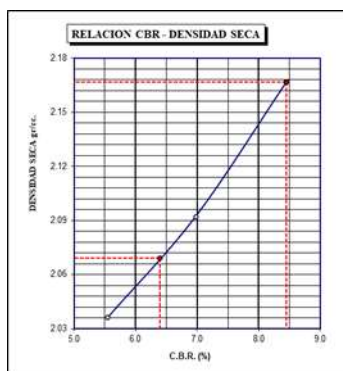
Resultados de SN + 1% MgCl₂ de la C-01, % CBR a 1 pulg



Fuente: Elaboración propia

Figura 27

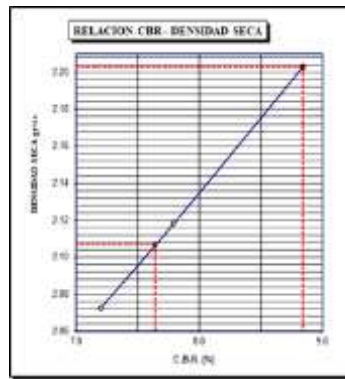
Resultados de SN + 3% MgCl₂ de la C-01, % CBR a 1 pulg



Fuente: Elaboración propia

Figura 28

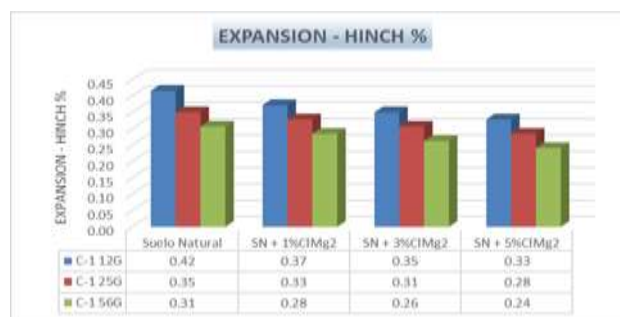
Resultados de SN + 5% MgCl₂, % CBR a 1 pulg



Fuente: Elaboración propia

Figura 29

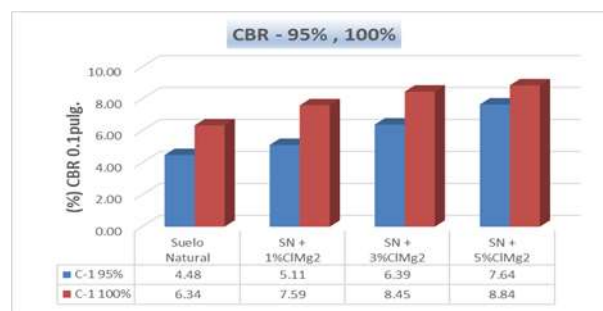
Resultados de % expansión (hinchamiento) de SN + adición de MgCl₂, C-01



Fuente: Elaboración propia

Figura 30

Resultados de % CBR al 95% y 100% de SN + adición de MgCl₂, C-01



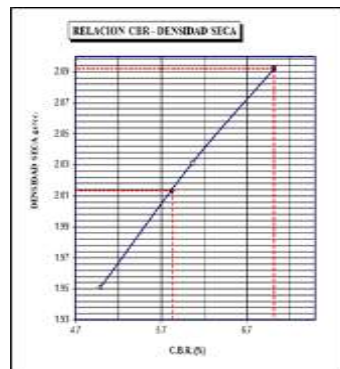
Fuente: Elaboración propia

En la figura 29, se puede observar las deformaciones (expansión) de la C-01 de suelo natural, de igual manera con la adición del aditivo de cloruro de magnesio (MgCl₂) como tal es el caso de la investigación de 1%,3%,5%, los resultados nos indican que con la

adición del 5% de $MgCl_2$ disminuye, esto nos indica que con relación al suelo natural influye en la disminución de un 21%. En la figura 30, nos indica el porcentaje de California Bearing Ratio (CBR) para el 100% y 95% de densidad seca (0.1 pulg), en el caso de suelo natural de la C-01 es de 4.48%, a medida que se adiciona los porcentajes del $MgCl_2$ incrementa el %CBR como nos muestra los resultados para 5% de $MgCl_2$ es de 7.64%, esto nos indica que con relación al suelo natural mejora en sus propiedades mecánicas.

Figura 31

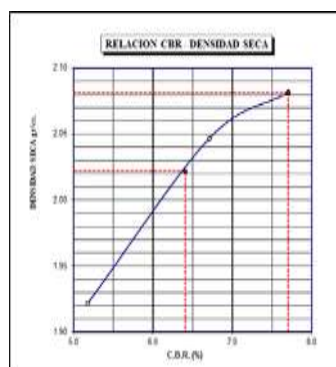
Resultados de SN de la C-02, % CBR a 1 pulg



Fuente: Elaboración propia

Figura 32

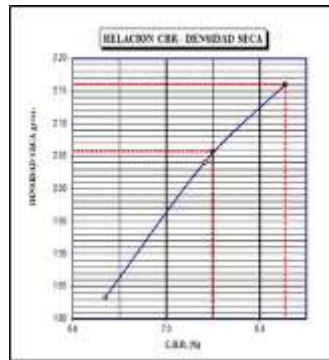
Resultados de SN + 1% $MgCl_2$ de la C-02, % CBR a 1 pulg



Fuente: Elaboración propia

Figura 33

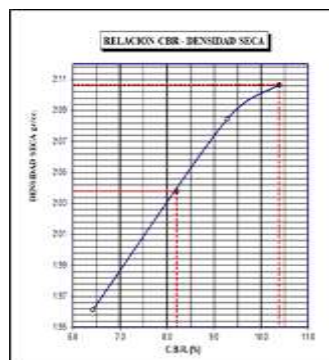
Resultados de SN + 3% MgCl₂ de la C-02, % CBR a 1 pulg



Fuente: Elaboración propia

Figura 34

Resultados de SN + 5% MgCl₂ de la C-02, % CBR a 1 pulg



Fuente: Elaboración propia

Figura 35

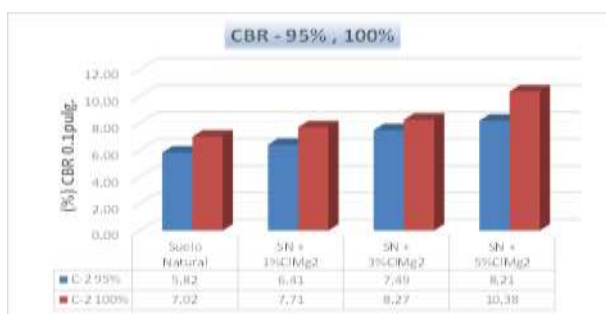
Resultados de % expansión (hinchamiento) de SN + adición de MgCl₂, C-02



Fuente: Elaboración propia

Figura 36

Resultados de % CBR al 95% y 100% de SN + adición de MgCl₂, C-02

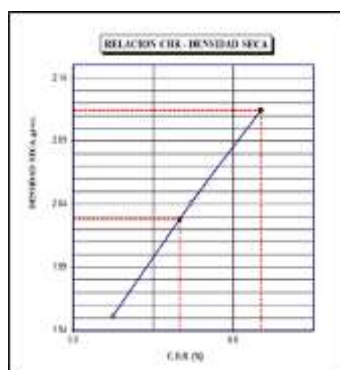


Fuente: Elaboración propia

En la figura 35, se puede observar las deformaciones (expansión) de la C-02 de suelo natural, de igual manera con la adición del aditivo de cloruro de magnesio (MgCl₂) como tal es el caso de la investigación de 1%,3%,5%, los resultados nos indican que con la adición del 5% de MgCl₂ disminuye, esto nos indica que con relación al suelo natural influye en la disminución de un 38%. En la figura 36, nos indica el porcentaje de California Bearing Ratio (CBR) para el 100% y 95% de densidad seca (0.1 pulg), en el caso de suelo natural de la C-02 es de 5.82%, a medida que se adiciona los porcentajes del MgCl₂ incrementa el %CBR como nos muestra los resultados para 5% de MgCl₂ es de 8.21%, esto nos indica que con relación al suelo natural mejora en sus propiedades mecánicas.

Figura 37

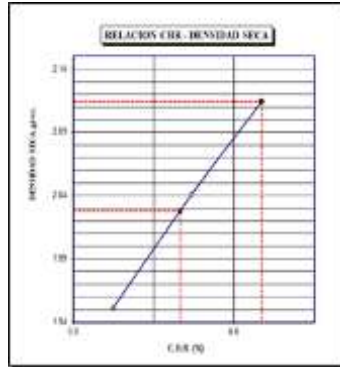
Resultados de SN + adición de la C-03, % CBR a 1 pulg



Fuente: Elaboración propia

Figura 38

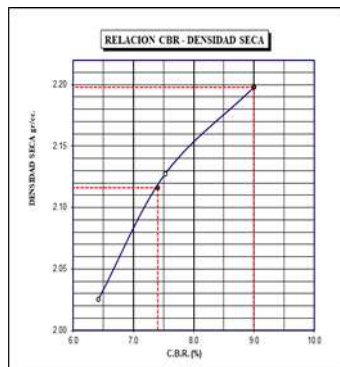
Resultados de SN + 1% MgCl₂ de la C-03, % CBR a 1 pulg



Fuente: Elaboración propia

Figura 39

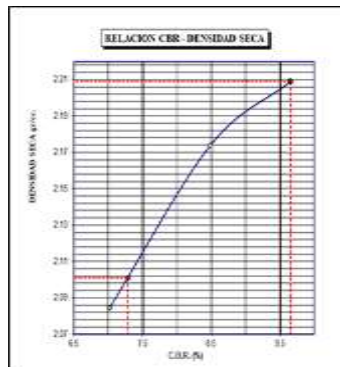
Resultados de SN + 3% MgCl₂ de la C-03, % CBR a 1 pulg



Fuente: Elaboración propia

Figura 40

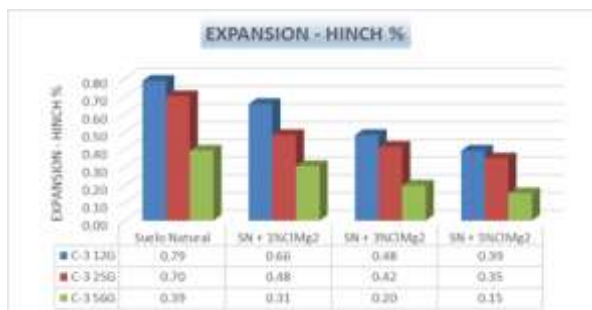
Resultados de SN + 5% MgCl₂ de la C-03, % CBR a 1 pulg



Fuente: Elaboración propia

Figura 41

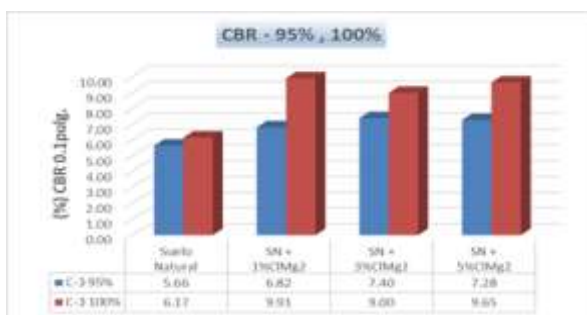
Resultados de % expansión (hinchamiento) de SN + adición de MgCl₂, C-03



Fuente: Elaboración propia

Figura 42

Resultados de % CBR al 95% y 100% de SN + adición de MgCl₂, C-03



Fuente: Elaboración propia

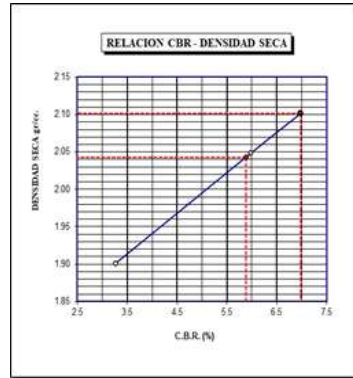
En la figura 41, se puede observar las deformaciones (expansión) de la C-03 de suelo natural, de igual manera con la adición del aditivo de cloruro de magnesio (MgCl₂) como tal es el caso de la investigación de 1%,3%,5%, los resultados nos indican que con la adición del 5% de MgCl₂ disminuye, esto nos indica que con relación al suelo natural influye en la disminución de un 61%.

En la figura 42, nos indica el porcentaje de California Bearing Ratio (CBR) para el 100% y 95% de densidad seca (0.1 pulg), en el caso de suelo natural de la C-03 es de 5.66%, a medida que se adiciona los porcentajes del MgCl₂ incrementa el %CBR como

nos muestra los resultados para 5% de $MgCl_2$ es de 7.28%, esto nos indica que con relación al suelo natural mejora en sus propiedades mecánicas.

Figura 43

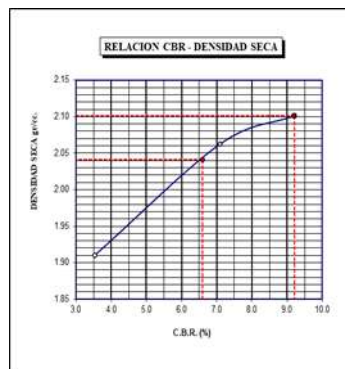
Resultados de SN de la C-04, % CBR a 1 pulg



Fuente: Elaboración propia

Figura 44

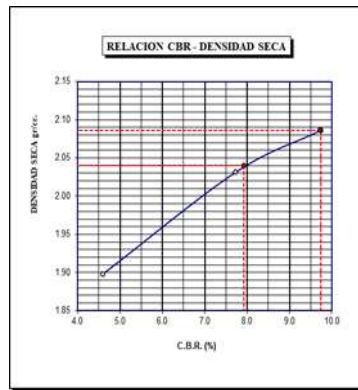
Resultados de SN + 1% CAL de la C-04, % CBR a 1 pulg



Fuente: Elaboración propia

Figura 45

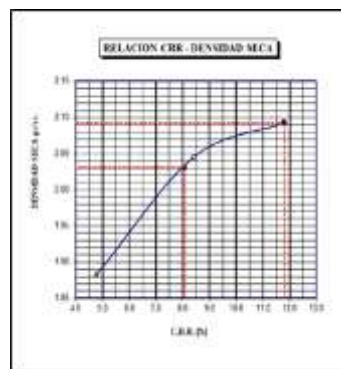
Resultados de SN + 3% CAL de la C-04, % CBR a 1 pulg



Fuente: Elaboración propia

Figura 46

Resultados de SN + 5% CAL de la C-04, % CBR a 1 pulg



Fuente: Elaboración propia

Figura 47

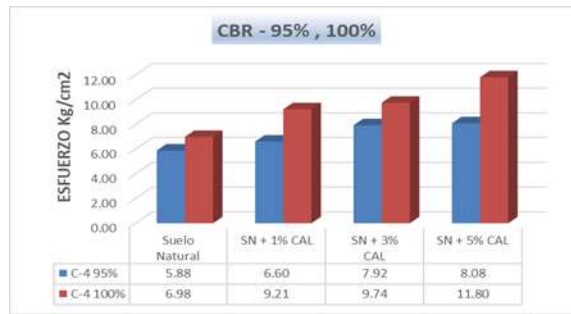
Resultados de % expansión (hinchamiento) de SN + adición de CAL, C-04



Fuente: Elaboración propia

Figura 48

Resultados de % CBR al 95% y 100% de SN + adición de CAL, C-04



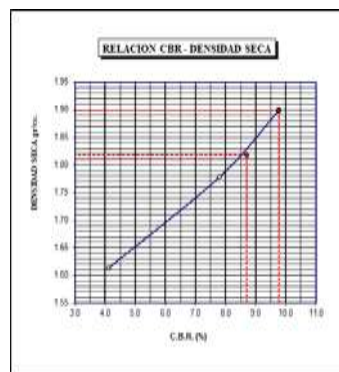
Fuente: Elaboración propia

En la figura 47, se puede observar las deformaciones (expansión) de la C-04 de suelo natural, de igual manera con la adición del aditivo de óxido de calcio (CAL) como tal es el caso de la investigación de 1%,3%,5%, los resultados nos indican que con la adición del 5% de Cal disminuye, esto nos indica que con relación al suelo natural influye en la disminución de un 58%.

En la figura 48, nos indica el porcentaje de California Bearing Ratio (CBR) para el 100% y 95% de densidad seca (0.1 pulg), en el caso de suelo natural de la C-04 es de 5.88%, a medida que se adiciona los porcentajes del Cal incrementa el %CBR como nos muestra los resultados para 5% de Cal es de 8.08%, esto nos indica que con relación al suelo natural mejora en sus propiedades mecánicas.

Figura 49

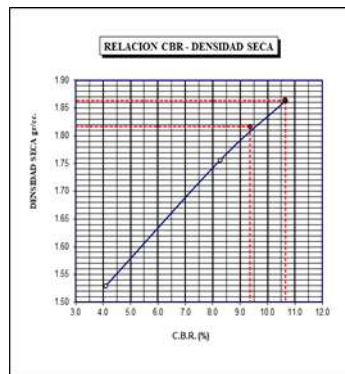
Resultados de SN de la C-05, %CBR a 1 pulg



Fuente: Elaboración propia

Figura 50

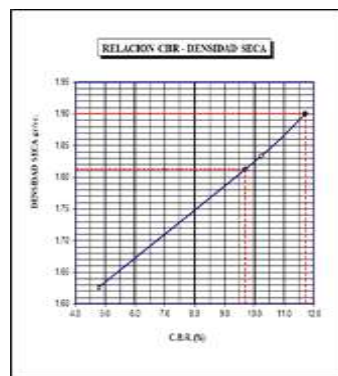
Resultados de SN + 1% CAL de la C-05. % CBR a 1 pulg



Fuente: Elaboración propia

Figura 51

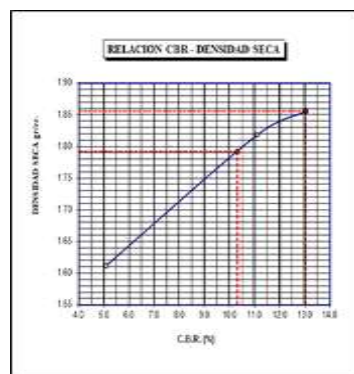
Resultados de SN + 3% CAL de la C-05. % CBR a 1 pulg



Fuente: Elaboración propia

Figura 52

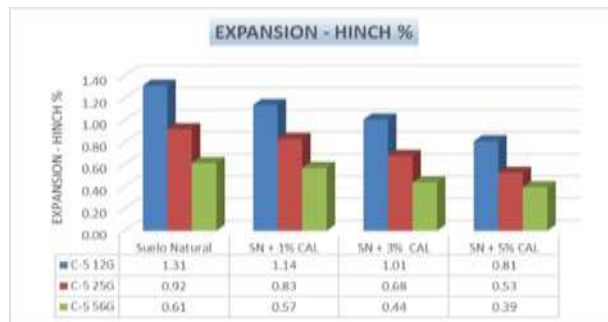
Resultados de SN + 5% CAL de la C-05. % CBR a 1 pulg



Fuente: Elaboración propia

Figura 53

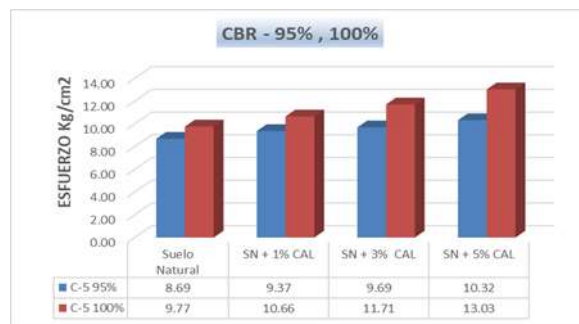
Resultados de % expansión (hinchamiento) de SN + adición de CAL, C-05



Fuente: Elaboración propia

Figura 54

Resultados de % CBR al 95% y 100% de SN+ adición de CAL, C-05



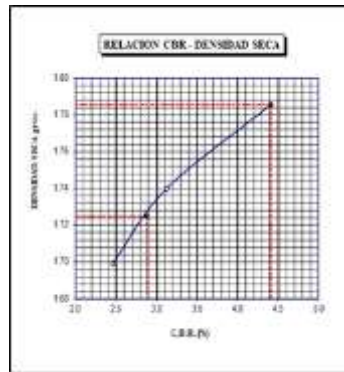
Fuente: Elaboración propia

En la figura 53, se puede observar las deformaciones (expansión) de la C-05 de suelo natural, de igual manera con la adición del aditivo de óxido de calcio (CAL) como tal es el caso de la investigación de 1%,3%,5%, los resultados nos indican que con la adición del 5% de Cal disminuye, esto nos indica que con relación al suelo natural influye en la disminución de un 36%.

En la figura 54, nos indica el porcentaje de California Bearing Ratio (CBR) para el 100% y 95% de densidad seca (0.1 pulg), en el caso de suelo natural de la C-05 es de 8.69%, a medida que se adiciona los porcentajes del Cal incrementa el %CBR como nos muestra los resultados para 5% de Cal es de 10.32%, esto nos indica que con relación al suelo natural mejora en sus propiedades mecánicas.

Figura 55

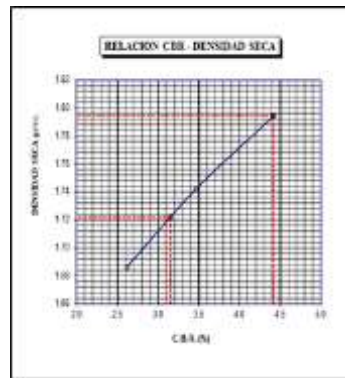
Resultados de SN de la C-06, % CBR a 1 pulg



Fuente: Elaboración propia

Figura 56

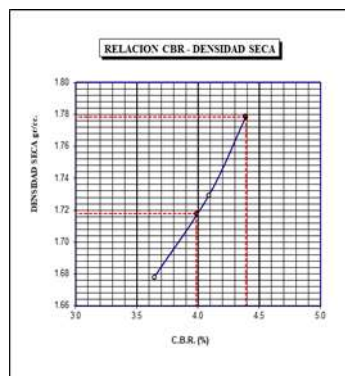
Resultados de SN +1% CAL de la C-06, % CBR a 1 pulg



Fuente: Elaboración propia

Figura 57

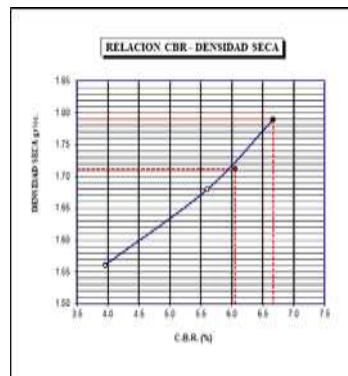
Resultados de SN + 3% CAL de la C-06, % CBR a 1 pulg



Fuente: Elaboración propia

Figura 58

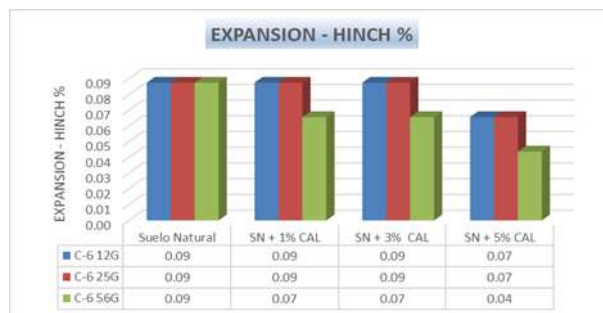
Resultados de SN + 5% CAL de la C-06, % CBR a 1 pulg



Fuente: Elaboración propia

Figura 59

Resultados de % expansión (hinchamiento) de SN + adición de CAL, C-06



Fuente: Elaboración propia

Figura 60

Resultados de % CBR al 95% y 100% de SN + adición de CAL, C-06



Fuente: Elaboración propia

En la figura 59, se puede observar las deformaciones (expansión) de la C-06 de suelo natural, de igual manera con la adición del aditivo de óxido de calcio (CAL) como tal es el caso de la investigación de 1%,3%,5%, los resultados nos indican que con la adición del 5% de Cal disminuye, esto nos indica que con relación al suelo natural influye en la disminución de un 50%. En la figura 60, nos indica el porcentaje de California Bearing Ratio (CBR) para el 100% y 95% de densidad seca (0.1 pulg), en el caso de suelo natural de la C-06 es de 2.88%, a medida que se adiciona los porcentajes del Cal incrementa el %CBR como nos muestra los resultados para 5% de Cal es de 6.06%, esto nos indica que con relación al suelo natural mejora en sus propiedades mecánicas.

Por otro lado, según el Manual de Carreteras Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos (2013), nos indica la categoría de subrasante con respecto al porcentaje CBR; tal y como se detalla en la siguiente tabla:

Tabla 17

Categorías de subrasante

Categoría de Subrasante	CBR
S0: Subrasante Inadecuada	CBR<3%
S1: Subrasante Pobre	De CBR $\geq$ 3% a CBR<6%
S2: Subrasante Regular	De CBR $\geq$ 6% a CBR<10%
S3: Subrasante Buena	De CBR $\geq$ 10% a CBR<20%
S4: Subrasante Muy Buena	De CBR $\geq$ 20% a CBR<30%
S5: Subrasante Excelente	CBR $\geq$ 30%

Fuente: Manual de Carreteras Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos (2013)

Tabla 18

Resultados de % CBR al 95% y promedio entre las calicatas N° 01, 03 , 03 + adición de MgCl₂

% CBR (0.1 pulg)		Modificado	Modificado	Modificado	Condición de
CALICATA	Suelo Natural	SN +	SN +	SN +	Subrasante
	(patrón)	1%ClMg2	3%ClMg2	5%ClMg2	
C-01 95%	4.48	5.11	6.39	7.64	Subrasante Regular
C-02 95%	5.82	6.41	7.49	8.21	Subrasante Regular
C-03 95%	5.66	6.82	7.40	7.28	Subrasante Regular
PROMEDIO	5.323	6.114	7.096	7.711	Subrasante Regular

Fuente: Elaboración Propia

En la Tabla 18, nos muestra que el porcentaje promedio de las calicatas C-01, C-02 y C-03 de CBR del suelo natural es 5.32% de categoría subrasante pobre, en consecuencia, a medida que se va incrementando el Cloruro de Magnesio (ClMg2) al suelo natural incrementa el porcentaje de CBR promedio de las calicatas C-01, C-02 y C-03 a 7.71%, el cual nos indica que es de categoría subrasante Regular.

Tabla 19

Resultados de % CBR al 95% y promedio entre las calicatas N° 04, 05, 06 ´adición de Cal

% CBR (0.1 pulg)		Modificado	Modificado	Modificado	Condición de
CALICATA	Suelo Natural	SN + 1%	SN + 3%	SN + 5%	Subrasante
	(patrón)	CAL	CAL	CAL	
C-04 95%	5.88	6.60	7.92	8.08	Subrasante Regular
C-05 95%	8.69	9.37	9.69	10.32	Subrasante Buena
C-06 95%	2.88	3.16	3.99	6.06	Subrasante Regular
PROMEDIO	5.817	6.377	7.200	8.153	Subrasante Regular

Fuente: Elaboración Propia

Asimismo, la Tabla 19, nos indica que el porcentaje promedio de las calicatas C-04, C-05 y C-06 de CBR del suelo natural es 5.82% de categoría subrasante pobre, en

consecuencia, a medida que se va incrementando el Óxido de Calcio (cal) al suelo natural incrementa el porcentaje de CBR promedio de las calicatas C-04, C-05 y C-06 a 8.15%, el cual nos indica que es de categoría subrasante Regular.

CONCLUSIONES

Se logro determinar el efecto que produce el cloruro de magnesio y cal en las propiedades geotécnicas en suelos cohesivos a nivel de subrasante con proporciones de 1%, 3% y 5%, se analizaron los efectos en las propiedades geotécnicas del suelo natural y modificado, con los cuales se concluye que:

Según los resultados de laboratorio se determinaron el tipo de suelo natural (Patrón) de las calicatas C-01, C-02 y C-03 según el Sistema de Clasificación SUCS y AASTHO son: CL, CL, CL y A-6(9), A-6(10), A-7-6(20).

Se determinaron en función a los resultados de laboratorio el tipo de suelo natural (Patrón) de las calicatas C-04, C-05 y C-06 según el Sistema de Clasificación SUCS y AASTHO son: CL, CL, CL y A-6(14), A-6-7(28), A-6(16).

La adición de cloruro de magnesio ($MgCl_2$) y la cal (óxido de calcio) si producen efectos en las propiedades geotécnicas en suelos cohesivos a nivel de subrasante de la carretera Rosaspata – Huayrapata, departamento de Puno – Perú. Esto fue a razón de que ambos productos químicos redujeron el índice de plasticidad (IP) e incrementaron la capacidad de soporte del suelo (CBR).

Las propiedades geotécnicas de las calicatas C-01, C-02 y C-03 de suelos arcillosos naturales se determinó que posee un índice de plasticidad promedio (IP) de 23.69% y la capacidad de soporte del suelo promedio (CBR) de 5.32%, por lo tanto, estos resultados nos indica que la subrasante es de categoría “pobre”, según el Manual de Carreteras Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos (2013).

La incorporación de cloruro de magnesio ($MgCl_2$) mejora las capacidades físicas y mecánicas de las calicatas C-01, C-02 y C-03 de suelos arcillosos de subrasante, resaltando el 5% de dosificación de cloruro de magnesio respecto al peso del suelo, debido a que redujo el índice de plasticidad de 23.69% a 20.20% e incrementó la capacidad de soporte del suelo (CBR) de 5.32% a 7.71%. Por lo tanto, se determinó que el suelo modificado de la subrasante es de categoría “regular”.

Las características geotécnicas de las calicatas C-04, C-05 y C-06 de suelos arcillosos naturales de determinó que posee un índice de plasticidad promedio (IP) de 27.33% y la capacidad de soporte del suelo promedio (CBR) de 5.82%, por lo tanto, estos resultados nos indica que la subrasante es de categoría “pobre”, según el Manual de Carreteras Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos (2013).

La aplicación de óxido de calcio (cal) mejora las capacidades geotécnicas de las calicatas C-04, C-05, y C-06 de suelos arcillosos de subrasante, resaltando el 5% de dosificación de óxido de calcio respecto al peso del suelo, debido a que redujo el índice de plasticidad (IP) de 27.33% a 18.68% e incrementó la capacidad de soporte del suelo (CBR) de 5.82% a 8.15%. Por lo tanto, concluimos que el suelo modificado de subrasante es de categoría “regular”.

El porcentaje óptimo de cloruro de magnesio ($MgCl_2$) que mejora las características geotécnicas en suelos cohesivos es de 5% de adición al suelo natural.

También concluimos que el porcentaje bueno de óxido de calcio (cal) para mejorar las capacidades geotécnicas en suelos cohesivos es de 5% de incorporación al suelo natural.

Respecto al costo se calculó en función a la máxima densidad seca obtenida de las calicatas C-01, C-02 y C-03 del ensayo de Proctor Modificado que es 2.192 gr/cm³, para el

cloruro de magnesio asciende a S/ 2,740.00 por metro cúbico de estabilización de suelo de subrasante.

También se calculó el costo de mejoramiento de suelo natural de subrasante para el óxido de calcio asciende a S/ 78.00 por metro cúbico, este costo es en relación a la máxima densidad seca obtenida de las calicatas C-04, C-05 y C-06 del ensayo Proctor Modificado que es 1.960 gr/cm³.

REFERENCIAS

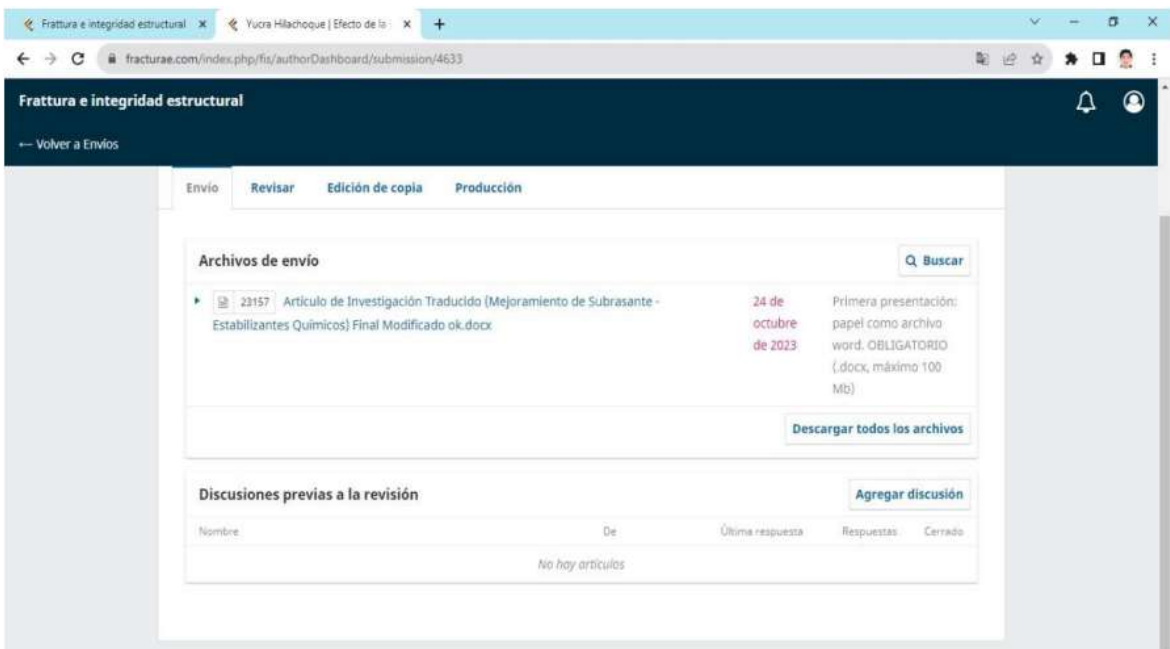
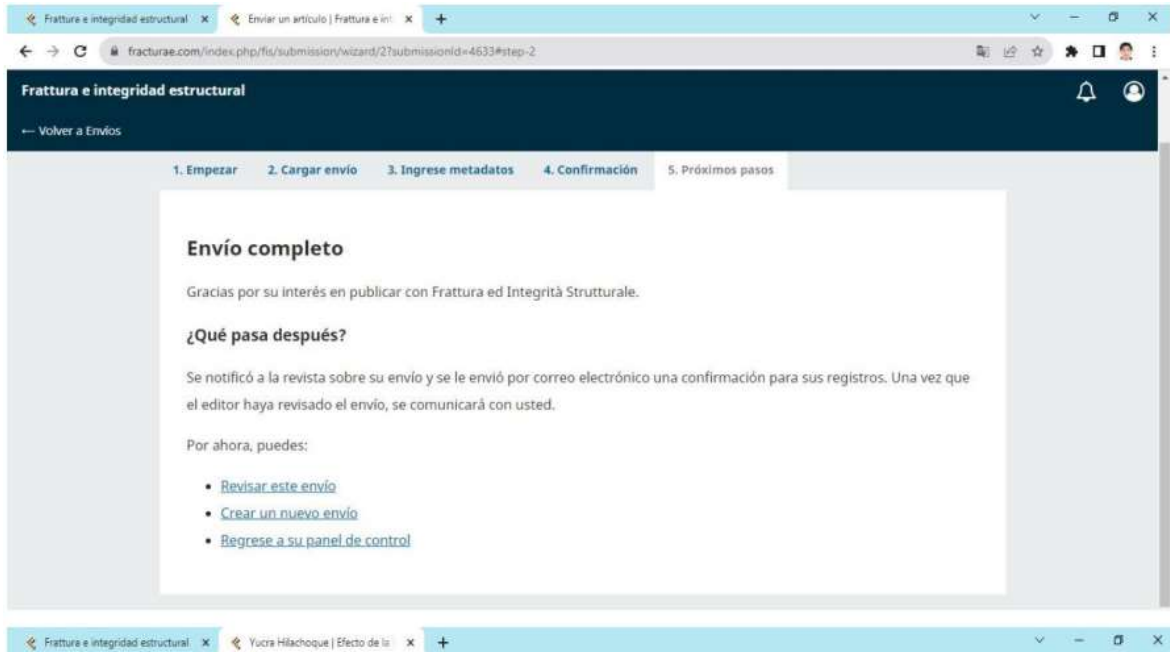
- Abdallah, H. M., Rabab'ah, S. R., Taamneh, M. M., Taamneh, M. O., & Hanandeh, S. (2023). Effect of Zeolitic Tuff on Strength, Resilient Modulus, and Permanent Strain of Lime-Stabilized Expansive Subgrade Soil. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 35(5). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0004710](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0004710)
- Amit, K., & D. K., S. (2019). Efectos de los residuos enriquecidos con calcio en las propiedades físicoquímicas del suelo de subrasante estabilizado. *International Conference on Civil, Structural and Transportation Engineering*. <https://doi.org/10.11159/iccste19.196>
- Bilgen, G., & Altuntas, O. F. (2023). Sustainable re-use of waste glass, cement and lime treated dredged material as pavement material. *Case Studies in Construction Materials*, 18. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01815>
- Bustamante Salazar, F. L., Benites Chero, J. C., & Marín Bardales, N. H. (2022). Uso de Vinaza de *Saccharum Officinarum* para Estabilización de Suelos Cohesivos. *Infraestructura Vial*, 24(43), 1–9. <https://doi.org/10.15517/iv.v24i43.47995>
- Chavarry Vallejos, C. M., Figueroa Merino, R. A., & Reynaga Tejada, R. E. (2020). Estabilización química de capas granulares con cloruro de calcio para vías no pavimentadas. *Polo Del Conocimiento: Revista Científico - Profesional*, ISSN-e 2550-682X, Vol. 5, No. 6, 2020, Págs. 40-69, 5(6).
- De La Cruz Vega, S. A., Pezo Morales, P. A., Noel Cornelio, E. N., & Mendoza Flores, C. M. (2022). Evaluation of the application of seawater to improve the CBR of the affirmed subgrade. *Universidad Ciencia y Tecnología*, 26(112), 84–92. <https://doi.org/10.47460/uct.v26i112.548>
- Elizondo Arrieta, F., Navas Carro, A., & Sibaja Obando Deina. (2010). Efectos de la CAL en la estabilización de Subrasantes. 20, 93–108. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=44170524007>
- Ghanizadeh, A. R., Salehi, M., & Jalali, F. (2023). Investigating the Effect of Lime Stabilization of Subgrade on the Fatigue & Rutting Lives of Flexible Pavements Using the Nonlinear Mechanistic-Empirical Analysis. *Geotechnical and Geological Engineering*, 41(2), 1287–1307. <https://doi.org/10.1007/s10706-022-02336-x>
- Hernán, S. T., Echeverría G., G., & Thenoux Z., G. (1989). Estabilización química de suelos: aplicaciones en la construcción de estructuras de pavimentos. *Revista de Ingeniería de Construcción*, 6.

- Junco del Pino, J. M. (2010). Estabilización de suelos mediante el empleo de sales cuaternarias. *Revista de Arquitectura e Ingeniería*, 4(3).
- Kowalska, M., Grzesik, B., Adamczyk, Z., Nowak, J., & Konsek, A. (2023). Swelling of sulfate-bearing soil: A case study of A1 highway pavement failure. *Case Studies in Construction Materials*, 18. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02081>
- Muhammad, N., & Siddiqua, S. (2017). Investigación del desarrollo de la resistencia mediante alcalinización con magnesio para el subsuelo. <https://www.researchgate.net/publication/320677377>
- Noman, A. A., Raton, M., & Rahman, K. (2023). The Application of Rice Husk Ash and Lime as a Stabilizer for Constriction Purposes. *Geotechnical Engineering*, 54(1), 41–45.
- Orobio, A. (2011). Consideraciones para el diseño y construcción de vías en afirmado estabilizadas con cloruro de calcio. In *Año* (Vol. 78).
- Orobio, A., Portocarrero, L. M., & Serna, L. (2007). Evaluación del cloruro de calcio como agente mitigador de polvo en vías en afirmado. *Dyna*, 74(153).
- Radhakrishnan, G., Anjan Kumar, M., & Prasada Raju, G. V. R. (2017). Evaluación en laboratorio de los efectos de los compuestos de 3 cloruros en las propiedades geotécnicas de un suelos de subrasante expansivo. *Journal of The Institution of Engineers (India): Series A*, 98(4), 477–482. <https://doi.org/10.1007/s40030-017-0233-z>
- Rivera, J. F., Aguirre-Guerrero, A., Mejía de Gutiérrez, R., & Orobio, A. (2020). Estabilización química de suelos - Materiales convencionales y activados alcalinamente (revisión). *Informador Técnico*, 84(2). <https://doi.org/10.23850/22565035.2530>
- Taylor, & Francis. (2022). Estabilización de suelos sulfatados con ligantes de Magnesio para la construcción de subrasantes de carreteras. *International Journal of Pavement Engineering*, 23(6), 1840–1850. <https://doi.org/10.1080/10298436.2020.1825711>
- Thenoux Z., G., & Vera A., S. (2002). Evaluación de la efectividad del cloruro de magnesio hexahidratado (Bischofita) como estabilizador químico de capas de rodadura granulares. *Materiales de Construcción*, 2002(265), 5–22. <https://doi.org/10.3989/mc.2002.v52.i265.341>
- Muhammad, N., Siddiqua, S., & Latifi, N. (2018). Solidificación de materiales del subsuelo mediante alcalinización con magnesio: Un aditivo sostenible para la construcción. *Civ. Eng. J. Mater. Civ. Eng*, 30(10), 4018260. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE))

ANEXOS

Anexo 1

Evidencia de sumisión del artículo de investigación



Anexo 2

Copia de la resolución de inscripción del perfil de proyecto de tesis en formato artículo aprobado por el consejo de facultad correspondiente



"AÑO DE LA UNIDAD, LA PAZ Y EL DESARROLLO"

RESOLUCIÓN N° 0164-2023/UPeU-FIA-CF-T

Lima, Naña 18 de abril de 2023

VISTO:

El expediente de **Alex Ricardo Yucra Hilachoque**, identificado(a) con Código Universitario N° 201712308 y **Henry Grover Viamonte Mamani** identificado(a) con Código Universitario N° 201712312, de la Escuela Profesional de Ingeniería Civil de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad Peruana Unión;

CONSIDERANDO

Que la Universidad Peruana Unión tiene autonomía académica, administrativa y normativa, dentro del ámbito establecido por la Ley Universitaria N° 30220 y el Estatuto de la Universidad;

Que la Facultad de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad Peruana Unión, mediante sus reglamentos académicos y administrativos, ha establecido las formas y procedimientos para la aprobación e inscripción del perfil de proyecto de tesis en formato artículo y la designación o nombramiento del asesor para la obtención del título profesional;

Que **Alex Ricardo Yucra Hilachoque** y **Henry Grover Viamonte Mamani**, han solicitado: la inscripción del perfil de proyecto de tesis titulado "Análisis comparativo entre el cloruro de magnesio y cloruro de calcio en la estabilización de suelos de subrasantes conformadas por suelos cohesivos" y la designación del Asesor, encargado de orientar y asesorar la ejecución del perfil de proyecto de tesis en formato artículo;

Estando a lo acordado en la sesión del Consejo de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad Peruana Unión, celebrada el 18 de abril de 2023, y en aplicación del Estatuto y el Reglamento General de Investigación de la Universidad;

SE RESUELVE:

Aprobar el perfil de proyecto de tesis en formato artículo titulado "Análisis comparativo entre el cloruro de magnesio y cloruro de calcio en la estabilización de suelos de subrasantes conformadas por suelos cohesivos" y disponer su inscripción en el registro correspondiente, designar a **Ing. Rina Luzmeri Yampura Ticona** como ASESOR para que oriente y asesore la ejecución del perfil de proyecto de tesis en formato artículo el cual fue dictaminado por: **Mg. Edwin Parillo Escarsena**, y **Dr. Nestor Alejandro Cruz Calapuja**, otorgándoles un plazo máximo de doce (12) meses para la ejecución.

Regístrese, comuníquese y archívese.



Dra. Erika Inés Acuña Salinas
DECANA



Dr. Santiago Ramírez López
SECRETARIO ACADÉMICO

cc:
-Interesado
-Asesor
-Dirección General de Investigación
-Archivo