

Comparación en la variación de los parámetros de cohesión y ángulo de fricción interna de un suelo al ser estabilizado con cal o yeso

Comparison of the variation of the cohesion parameters and internal friction angle of a soil when it is stabilized with lime or gypsum

Ramírez, María^{1,2,3*}; Castillo, Lyna¹; Mercado, Milagro¹; Verjel, Victor⁴

¹Departamento de Vías, Escuela de Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería, Universidad de Los Andes. Mérida, Venezuela.

²Postgrado de Ingeniería Vial, Escuela de Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería, Universidad de Los Andes. Mérida, Venezuela.

³Laboratorio de Suelos y Pavimentos, Escuela de Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería, Universidad de Los Andes. Mérida, Venezuela.

⁴Programa de Ingeniería Civil, Universidad de Pamplona. Pamplona, Colombia.

* marialejandraramirez@gmail.com

Resumen

Los suelos son parte fundamental en la construcción de diferentes obras civiles; sin embargo, en muchas ocasiones sus características mecánicas, elásticas e hidráulicas presentan dificultades a la hora de la construcción. En algunos tipos de suelo sus parámetros de resistencia no son los adecuados para fundación, por sus características de plasticidad, deformación, baja capacidad de soporte, poca resistencia al corte, entre otros. Al analizar suelos con parámetros de resistencia desfavorables una de las alternativas más utilizadas es la estabilización. La estabilización química es una solución eficiente y en ocasiones de menor costo dependiendo del agente estabilizador, que permite mejorar las propiedades mecánicas y elásticas del suelo transformándolo en uno con mejor comportamiento geotécnico. Una alternativa económica en mayor o menor grado para la estabilización de suelos es el uso de cal, yeso, cemento, entre otros. La finalidad de la presente investigación es la comparación de los parámetros de resistencia de tres muestras de diferentes tipos de suelo en estado natural y al ser estabilizadas con cal o yeso. La muestra está representada por tres suelos arenos arcillosos estabilizados con un 5.0, 7.5 y 10.0% en peso de cal o yeso. Los resultados permiten concluir que los parámetros de resistencia mejoran al utilizar estos agentes estabilizadores en un rango entre el 5 y 6% en peso.

Palabras clave: Suelos estabilizados, Estabilización con cal, Estabilización con yeso, Parámetros de resistencia del suelo.

Abstract

Soils are a fundamental part in the construction of different civil works; however, on many occasions its mechanical, elastic and hydraulic characteristics present difficulties at the time of construction. In some types of soil, its resistance parameters are not suitable for foundations, due to its characteristics of plasticity, deformation, low bearing capacity, low shear resistance, among others. When analyzing soils with unfavorable resistance parameters, one of the most used alternatives is stabilization. Chemical stabilization is an efficient and sometimes lower cost solution depending on the stabilizing agent, which allows improving the mechanical and elastic properties of the soil, transforming it into one with better geotechnical behavior. An economical alternative to a greater or lesser degree for soil stabilization is the use of lime, plaster, cement, among others. The purpose of the present investigation is the comparison of the resistance parameters of three samples of different types of soil in their natural state and when stabilized with lime or plaster. The sample is represented by three sandy clayey soils stabilized with 5.0, 7.5 and 10.0% by weight of lime or gypsum. The results allow us to conclude that the resistance parameters improve when using these stabilizing agents in a range between 5 and 6% by weight.

Keywords: Stabilized soils, Lime stabilization, Plaster stabilization, Soil resistance parameters.

1 Introducción

Las propiedades mecánicas y elásticas del suelo son esenciales a la hora de diseñar una obra civil y durante su vida útil. En ocasiones estas propiedades no son favorables para satisfacer las necesidades de diseño. En estructuras como puentes, fundaciones de edificios, terrenos de fundación para estructuras de pavimento, entre otros; se debe tomar en cuenta especialmente la compresibilidad del material, los asentamientos y el tiempo en que se pueden generar, al igual que la capacidad de carga y soporte del suelo.

Comportamientos del material como la plasticidad, compresibilidad y parámetros de resistencia (cohesión (C) y ángulo de fricción interna (ϕ)), pueden ser modificados y adaptados a los requerimientos de diseño utilizando métodos de estabilización.

Los métodos de estabilización pueden ir desde sustitución parcial del material por otro de mejor comportamiento según lo deseado, utilizar algún aditivo o producto químico. Por lo general la estabilización química es más efectiva en suelos de grano fino.

En esta investigación se evaluó la pertinencia de utilizar como agentes estabilizantes dos productos de uso común y de bajo costo. Estos estabilizantes fueron la cal y el yeso (Ferrero, 2023, Balarezo, 2023, Campos y col., 2023, Parra, 2018, Hernández y col., 2016, Fiallos, 2016, Bauzá, 2015, Pérez y col., 2015).

Entre los tipos de cal comúnmente utilizadas está la hidratada con alto contenido de calcio, la cal viva, la dolomítica monohidratada y la cal viva dolomítica; en dosificaciones que van desde el 5 a 10% en peso de material, produciendo una reacción química generando cambios de textura, especialmente en suelos arcillosos. Entre estos cambios aumenta el límite líquido (LL), el límite de contracción, la trabajabilidad, la resistencia mecánica y disminuye el índice de plasticidad (IP) y la deformación. Otra característica afectada con la adición de cal en suelos arcillosos es la compactación.

El uso de yeso tiene un efecto similar al de la cal, siendo un agente cementante, donde se debe tener mayor cuidado a la hora de mezclar con el suelo, esto asociado al contenido de humedad del mismo.

La finalidad de esta investigación fue utilizar unas muestras de suelo de distintas procedencias, hallar sus propiedades mecánicas y elásticas de interés para el estudio y establecerlas como patrón para comparación. Luego se sustituyó parte del material de suelo por estos estabilizantes (cal o yeso) en diferentes porcentajes, para determinar las propiedades de estas muestras estabilizadas.

Se compararon las propiedades mecánicas y elásticas de las muestras patrón y estabilizadas con diferentes porcentajes de estabilizante, para evaluar el comportamiento de las mismas y obtener conclusiones y establecer recomendaciones de uso.

2 Marco metodológico

En este estudio se aplicó como técnica de recolección y procesamiento de datos la observación a través de la cual se identificaron las zonas de estudio y los datos resultantes de los ensayos de laboratorio. El material utilizado se recolectó en el sector El Vallecito, Pie del Tiro y El Mirador, todos pertenecientes al municipio Libertador del estado Mérida Venezuela.

El desarrollo del esquema planteado para alcanzar los objetivos de este trabajo de investigación, se centra en: identificar y clasificar a través de métodos directos las muestras de suelo en estudio, determinar a través de ensayos de corte directo y compresión simple los parámetros de resistencia del suelo en condición natural, estabilizado con cal, estabilizado con yeso y comparar los parámetros de resistencia del suelo en condición natural y estabilizados.

2.1 Identificación y clasificación a través de métodos directos las muestras de suelo en estudio

Para la recolección de cada una de las muestras de suelo se utilizó una calicata, posteriormente las muestras se sometieron a análisis de laboratorio para conocer sus características y propiedades, permitiendo así su clasificación según el método de la American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) y el Sistema Unificado de Clasificación de Suelo (SUCS).

Entre los ensayos de laboratorio necesarios para la identificación y caracterización de los suelos estudiados en estado natural se realizaron: ensayo granulométrico por vía húmeda, límites de consistencia y peso específico relativo de los sólidos.

2.2 Determinación a través de ensayos en laboratorio de los parámetros de resistencia del suelo (C y ϕ) en condición natural, estabilizado con cal y estabilizado con yeso

Con las tres muestras de suelo recolectadas en los sitios ya identificados, se procedió a incorporar los agentes estabilizadores (cal o yeso) en los porcentajes en peso establecidos, tal como se muestra en la Tabla 1, manteniendo una muestra sin estabilizar (en estado natural) como muestra patrón. Para los suelos en estado natural y estabilizado se realizaron ensayos de Compresión simple y Corte directo.

Tabla 1. Muestras de suelo patrón y estabilizadas. (Standard and stabilized soil samples.)

Sector	Muestra	Descripción
El Vallecito	1	Patrón
	2	5,0% de cal
	3	7,5% de cal
	4	10,0% de cal
	5	5,0% de yeso
	6	7,5% de yeso
	7	10% de yeso
Pie del Tiro	1	Patrón
	2	5,0% de cal
	3	7,5% de cal
	4	10,0% de cal
	5	5,0% de yeso
	6	7,5% de yeso
	7	10,0% de yeso
El Mirador	1	Patrón
	2	5,0% de cal
	3	7,5% de cal
	4	10,0% de cal
	5	5,0% de yeso
	6	7,5% de yeso
	7	10,0% de yeso

2.3 Comparación de los parámetros de resistencia del suelo (C y ϕ) en condición natural y estabilizada

Una vez obtenidos los resultados de los parámetros de resistencia y plasticidad de las muestras estabilizadas con cal o yeso, se compararon con los valores correspondientes de la mezcla patrón.

3 Análisis de resultados

A continuación, en las Tablas 2 y 3, se presentan los resultados de límites de consistencia, compresión simple y los parámetros de resistencia (C y ϕ) hallados con el ensayo de corte directo, tanto para el suelo en condición natural (patrón) y estabilizados con cal o yeso.

Tabla 2. Límites de Atterberg en estado natural y con estabilización con cal o yeso. (Atterberg limits in natural state and with stabilization with lime or gypsum.)

Muestra	Límite Líquido (LL) (%)	Límite Plástico (LP) (%)	Índice Plástico (IP) (%)
El Vallecito			
1	28,430	17,760	10,670
Estabilizadas con cal			
2	24,830	NP	NP
3	26,070	NP	NP
4	26,540	NP	NP
Estabilizadas con yeso			
5	29,380	18,530	10,850
6	27,700	19,390	8,310
7	27,750	19,770	7,980
Pie del Tiro			
1	29,690	16,880	12,810
Estabilizadas con cal			
2	34,450	23,080	11,370
3	38,150	29,630	8,520
4	37,200	NP	NP
Estabilizadas con yeso			
5	40,840	26,320	14,520
6	30,350	23,730	6,620
7	39,410	26,040	13,370
El Mirador			
1	36,300	20,650	15,650
Estabilizadas con cal			
2	17,450	12,350	5,110
3	33,760	31,430	2,330
4	33,500	26,390	7,110
Estabilizadas con yeso			
5	34,500	16,870	17,630
6	31,140	21,720	9,420
7	34,090	24,160	9,930

*NP, representa la denominación de no plasticidad. (*NP, represents the designation of non-plasticity.)

Tabla 3. Parámetros de resistencia y Compresión Simple o inconfiada, en estado natural y con estabilización con cal o yeso. (Resistance parameters and Simple or unconfined Compression, in natural state and with stabilization with lime or gypsum.)

Muestra	ϵ (%)	q_{ult} (Kg/cm ²)	C (Kg/cm ²)	ϕ (°)
El Vallecito				
1	40,600	3,015	0,050	25,716
Estatizadas con cal				
2	14,800	3,891	0,005	35,550
3	21,000	7,052	0,005	37,693
4	20,200	7,289	0,140	31,004
Estatizadas con yeso				
5	25,500	8,418	0,200	31,595
6	28,900	11,052	0,040	34,117
7	25,800	4,890	0,010	30,843
Pie del Tiro				
1	29,100	6,047	0,260	8,000
Estatizadas con cal				
2	25,900	14,819	0,200	26,783
3	24,600	12,351	0,190	28,547
4	29,600	7,747	0,160	27,426
Estatizadas con yeso				
5	31,100	11,676	0,240	26,454
6	30,300	7,139	0,320	24,266
7	40,400	9,335	0,210	26,428
El Mirador				
1	23,000	7,263	0,005	26,552
Estatizadas con cal				
2	26,500	7,467	0,120	35,073
3	20,918	7,355	0,120	35,605
4	22,700	6,410	0,290	30,756
Estatizadas con yeso				
5	32,100	9,842	0,290	29,596
6	28,300	14,693	0,005	37,773
7	29,300	16,516	0,010	40,022

* ϵ , representa la deformación unitaria, q_{ult} , es el valor de la compresión máxima, C, define la cohesión, ϕ , es el ángulo de fricción interna. (* ϵ , represents the unit strain, q_{ult} , is the value of the maximum compression, C, defines the cohesion, ϕ , is the angle of internal friction.)

En cuanto a la clasificación del suelo utilizando los métodos AASHTO y el método del Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS), la muestra del sector El Vallecito clasifica como una A-2-6₍₀₎, el cual posee gran variedad de material granular y arcilla plástica. De igual forma la

muestra del sector El Mirador posee características similares a la muestra de El Vallecito perteneciendo al grupo A-2-6₍₁₎ y la muestra del sector Pie del Tiro pertenece al grupo A-6₍₂₎ que es un suelo arcilloso. Según el SUCS las tres muestras se clasifican como SC (arena arcillosa).

3.1 Estabilización con cal (Plasticidad)

Se observó una disminución del LL de las muestras modificadas del sector El Vallecito en comparación con el estado natural, el valor más bajo obtenido del LL se presenta en la muestra 2 de un 3,6%, esto disminuye la compresibilidad del suelo. En cuanto al IP al ser estabilizada estas muestras no presentan dicho índice. Al no obtener LP ni IP, se observa una disminución en la plasticidad.

Para el sector Pie del Tiro se observa un incremento en el LL, el valor de menor aumento es la muestra número 2, obteniendo un valor del 4,76% con respecto al estado natural, esto aumenta la compresibilidad del suelo. El IP tuvo una disminución con respecto al estado natural, perdiendo plasticidad con la estabilización con cal.

Para el sector El Mirador, el valor del LL que más disminuye con respecto al estado natural es la muestra 2 en un 18,85%, esto disminuye la compresibilidad del suelo. El IP disminuye en todas las muestras con respecto al estado natural. Con la estabilización con cal el suelo perdió plasticidad.

3.2 Estabilización con yeso (Plasticidad)

Al agregar los diferentes porcentajes de yeso a la muestra del sector El Vallecito se obtuvo una mejora en el LL, al adicionar 7,5% y 10% de yeso se observó en una disminución del 0,73% y 0,68% respectivamente, con respecto al estado natural, lo que disminuye la compresibilidad. El IP, por otra parte, se puede observar que la menor disminución con respecto al estado natural es 7,98% y este resulta al adicionar 10% de yeso. Con la adición de yeso la plasticidad del suelo baja.

Para el caso del sector de Pie del Tiro, presenta incremento en el LL con la adición de yeso, lo que aumenta la compresibilidad del suelo. El IP con respecto al estado natural, de la muestra 6 disminuye en un 6,19%, en las otras dos muestras presenta un incremento con respecto al estado natural. Por lo que se debería aumentar el número de ensayos para tener un comportamiento más claro con respecto a la plasticidad.

Al agregar los diferentes porcentajes de yeso en la muestra del sector El Mirador se observa que el

LL disminuye con respecto al estado natural, siendo la muestra 6 la que más disminuye en un 5,16%, esto disminuye la compresibilidad del suelo. El IP disminuye en la muestra 6 y 7 lo que baja la plasticidad del suelo.

3.3 Estabilización con cal (Compresión simple)

Se realizó el ensayo utilizando briquetas en estado natural y con suelo estabilizado en sus diferentes porcentajes (5%, 7,5% y 10%), para determinar el valor óptimo de estabilizante a agregar, con el cual el suelo mejore sus parámetros de resistencia.

Para el sector El Vallecito se obtuvo mejores resultados con la muestra 4 en comparación con el estado natural, disminuyendo la deformación en un 20,4% y obteniendo un aumento de 4,274 kg/cm² en el esfuerzo último a compresión. La Figura 1 muestra los resultados del esfuerzo alcanzado en el ensayo de compresión simple.

El suelo estabilizado presenta menor deformación que en el estado natural, a medida que aumenta los porcentajes de cal hay un incremento en la resistencia a la compresión simple.

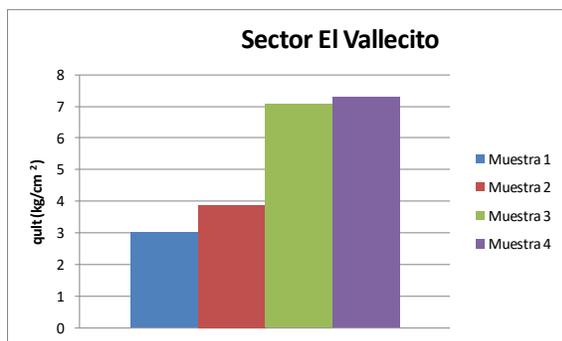


Fig. 1. Compresión simple con adición de cal sector El Vallecito. (Simple compression with the addition of lime in the El Vallecito sector.)

Para la muestra 2 del sector Pie del Tiro se obtuvo mejor resultado al añadir el porcentaje de cal, con una disminución de deformación de 3,2% y aumento de 8,772 kg/cm² el esfuerzo último. Tal como lo muestra la Figura 2.

Se observa mejoras en el esfuerzo último obteniendo mayor resistencia que en el estado natural, por otro lado, los resultados que redujeron la deformación con respecto al estado natural fueron en la muestra 2 y 3.

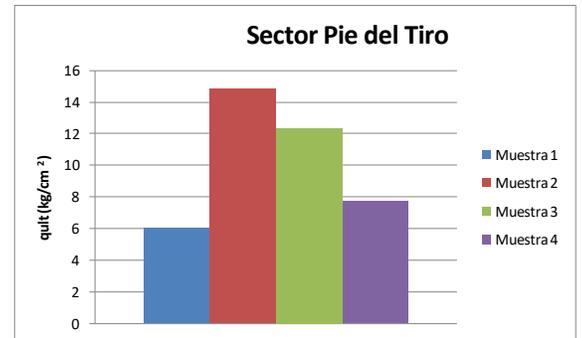


Fig. 2. Compresión simple con adición de cal sector Pie del Tiro. (Simple compression with the addition of lime in the Pie del Tiro sector.)

Para la muestra El Mirador se obtuvo resultados favorables con respecto a la deformación en las muestras 3 y 4, disminuyendo 2,082% y 0,3% con respecto al estado natural. En el caso del esfuerzo último, este aumenta su valor con adiciones de cal de 5% y 7,5%, siendo 0,204 kg/cm² y 0,092 kg/cm² el incremento respectivamente. Esto se muestra en la Figura 3.

Se obtuvo mejor resultado al añadir 7,5% de cal, ya que presenta disminución en la deformación y aumento en el esfuerzo último. Con 5% se obtuvo aumento en el esfuerzo último y en la deformación, y con 10% se presenta disminución, pero también disminuye el esfuerzo último.



Fig. 3. Compresión simple con adición de cal sector El Mirador. (Simple compression with the addition of lime in the El Mirador sector.)

3.4 Estabilización con yeso (Compresión simple)

Para la muestra del sector El Vallecito se presentan resultados favorables en cuanto a la disminución de la deformación y el incremento del esfuerzo último con los tres porcentajes agregados de estabilizante.

En la Figura 4 se observa como aumenta el esfuerzo último con respecto al estado natural, disminuyendo la deformación, al agregar los diferentes porcentajes de yeso. Siendo la muestra 6

la que se considera con mejores resultados al presentar el mayor incremento del esfuerzo último y considerables valores de disminución de deformación.

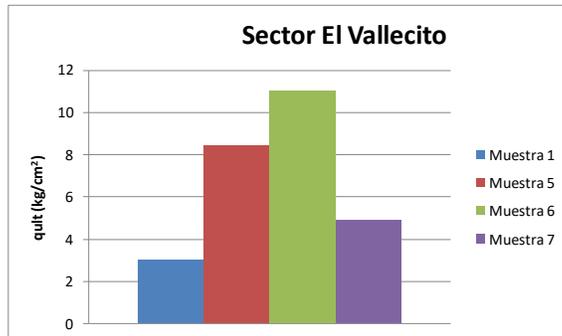


Fig. 4. Compresión simple con adición de yeso sector El Vallecito. (Simple compression with the addition of gypsum in the El Vallecito sector.)

En el sector Pie del Tiro se obtuvo aumento en la deformación y en el esfuerzo último con todos los porcentajes de yeso. En la Figura 5 se aprecia el incremento del esfuerzo último, cabe destacar que el mayor valor en la compresión se obtuvo en la muestra 5.

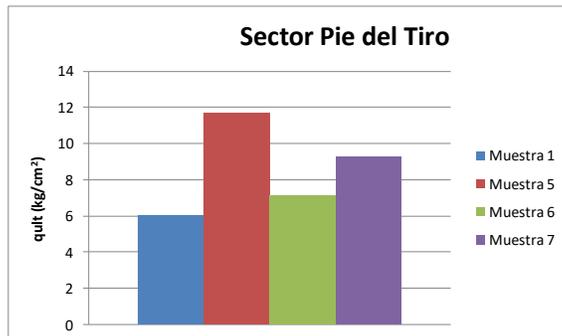


Fig. 5. Compresión simple con adición de yeso sector Pie del Tiro. (Simple compression with the addition of gypsum in the Pie del Tiro sector.)

En la muestra del sector El Mirador, para los diferentes porcentajes de yeso se presentó aumento de sus valores con respecto al estado natural, tanto de la deformación como del esfuerzo último. Este comportamiento del esfuerzo último se muestra en la Figura 6. Se puede destacar que a mayor porcentaje de yeso mayor es la resistencia a la compresión simple.

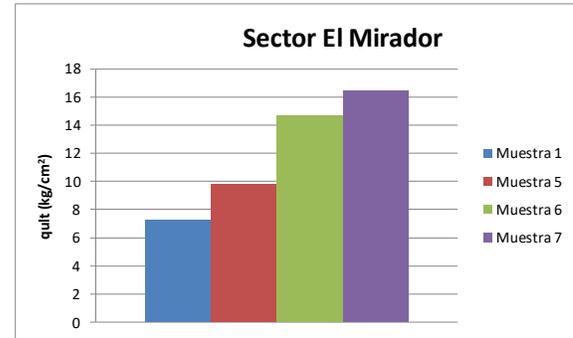


Fig. 6. Compresión simple con adición de yeso sector El Mirador. (Simple compression with the addition of gypsum in the El Mirador sector.)

3.5 Estabilización con cal (Parámetros de resistencia (C y ϕ)). Corte directo

Con este ensayo se determinó los parámetros de cohesión (C) y ángulo de fricción interna (ϕ) de cada muestra de suelo en estado natural y con los diferentes porcentajes de estabilizante.

Para el sector El Vallecito, se observa el incremento en el ángulo de fricción interna el cual aumento de $25,716^\circ$ (estado natural) a $37,963^\circ$ con 7,5% de cal, por otro lado, la cohesión sólo aumento significativamente al agregar 10% de cal. La Figura 7 muestra los resultados de la cohesión.

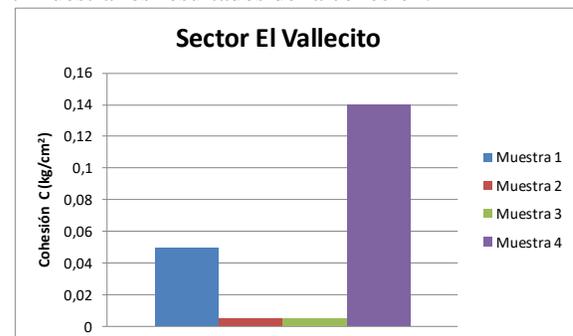


Fig. 7. Cohesión con adición de cal sector El Vallecito. (Cohesion with the addition of lime in the El Vallecito sector.)

Al agregar los diferentes porcentajes de cal a la muestra del sector Pie del Tiro, se produjo un incremento en el ángulo de fricción interna de las muestras con respecto al estado natural, por otra parte, se observa en la Figura 8 que en la cohesión todas las muestras disminuyen con respecto al estado natural.



Fig. 8. Cohesión con adición de cal sector Pie del Tiro. (Cohesion with the addition of lime Pie del Tiro sector.)

En la Figura 9 de la muestra del sector El Mirador se obtuvo un incremento en ambos valores, en la cohesión, aumentó de 0,005 kg/cm² en estado natural a 0,29 kg/cm² al añadir 10% de cal. Para el ángulo de fricción interna de 26,552° estado natural a 35,605° con 7,5% de estabilizante. Al comparar los resultados de las muestras de suelo que contienen los diferentes porcentajes de cal se observa que hubo incremento en la cohesión y ángulo de fricción interna con respecto al estado natural.



Fig. 9. Cohesión con adición de cal sector El Mirador. (Cohesion with the addition of lime in the El Mirador sector.)

3.6 Estabilización con yeso (Parámetros de resistencia (C y Ø). Corte directo)

En la muestra del sector El Vallecito, Figura 10, hubo un incremento en la cohesión al agregar 5% de yeso, con respecto al estado natural los porcentajes restantes disminuyeron. Se observa que para la muestra 5 se produjo un incremento en la cohesión de 0,05 kg/cm² (muestra en estado natural) a 0,2 kg/cm². Con respecto al ángulo de fricción interna incrementaron todos los porcentajes, siendo el más alto la muestra 6 con un valor de 34,117°.

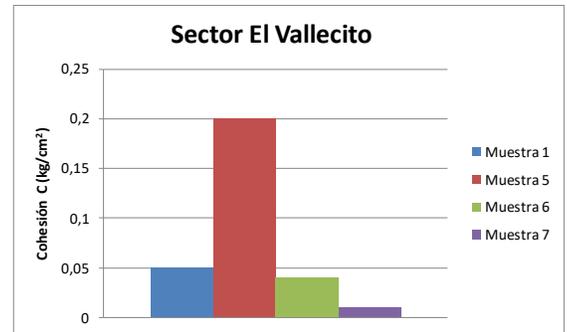


Fig. 10. Cohesión con adición de yeso sector El Vallecito. (Cohesion with the addition of gypsum in the El Vallecito sector.)

En la muestra del sector Pie del Tiro, presentada en la Figura 11, aumenta la cohesión al agregar 7,5% de yeso, de 0,26 kg/cm² en estado natural a 0,32 kg/cm². Para el ángulo de fricción interna hay incremento en todos los porcentajes, siendo el de 5% en alcanzar el valor más alto (26,454°).



Fig. 11. Cohesión con adición de yeso sector el Pie del Tiro. (Cohesion with the addition of gypsum in the Pie del Tiro sector.)

La Figura 12 presenta que la muestra del sector El Mirador incrementa la cohesión sólo al agregar 5% de yeso, alcanzó el valor de 0,29 kg/cm², con los demás porcentajes no presenta incremento con respecto al estado natural, por otra parte, el ángulo de fricción interna incrementa en todos los porcentajes siendo el más alto al agregar 10% de yeso con un valor de 40,022°.

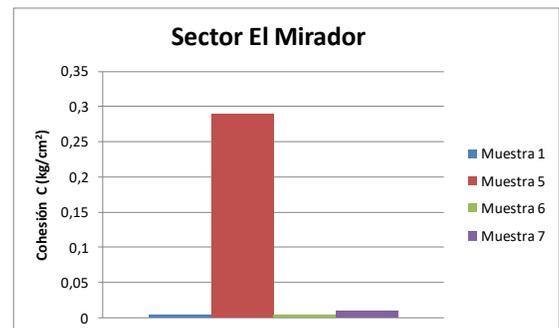


Fig. 12. Cohesión con adición de yeso sector El Mirador. (Cohesion with the addition of gypsum in the El Mirador sector.)

4 Conclusiones

En base a los resultados obtenidos se mencionan las siguientes conclusiones:

Al comparar los resultados de límites Atterberg de las muestras en estado natural (patrón) con las muestras estabilizadas con cal o yeso se pudo notar qué:

Para el límite líquido

En el sector El Vallecito disminuyó para todos los porcentajes donde el estabilizador es cal y en la mayoría de los casos estabilizados con yeso.

En el sector Pie del Tiro, el LL aumentó con respecto a la muestra patrón tanto para los casos con cal como con yeso.

En el sector El Mirado disminuyó con respecto a la muestra patrón para los dos tipos de estabilizantes.

Al aumentar el LL aumenta la compresibilidad del suelo, por tal razón para la mayoría de los casos en estudio la incorporación de la cal o del yeso como estabilizante mejoró esta condición al disminuir la compresibilidad del suelo, esto se ve reflejado en la magnitud de los asentamientos que se pudieran presentar en la puesta en funcionamiento de una obra civil fundada sobre estos suelos.

Para el índice de plasticidad

En el sector El Vallecito este índice disminuyó con respecto a la muestra patrón, tanto con la incorporación de la cal o como de yeso.

En el sector Pie del Tiro disminuyó el IP con la incorporación de cal, sin embargo, para el caso de incorporación de yeso este valor aumento con respecto al material natural (patrón).

En el sector El Mirador este índice disminuyó en líneas generales con respecto a la muestra patrón, para ambos estabilizantes.

Al aumentar el IP aumenta la plasticidad del suelo, para la mayoría de los casos de estudio es beneficioso incorporar estos estabilizantes, especialmente la cal, ya que reduce la magnitud de los asentamientos por reducirse la plasticidad.

Para la compresión simple

Se obtuvo un aumento significativo del esfuerzo último cuando se estabiliza con cal o con yeso con

respecto al suelo natural (patrón), esto para todas las muestras y porcentajes incorporados. Esto representa una mejora en la resistencia del suelo y su capacidad portante.

Para los parámetros de resistencia del suelo (C y ϕ)

La incorporación de cal como agente estabilizador tiene un comportamiento errático en la cohesión en los diferentes sectores de aplicación, ya que con algunos porcentajes de cal esta aumenta y para otros disminuye, esto sugiere que hay que aumentar los casos experimentales para este parámetro y así definir un comportamiento más preciso.

Al incorporar yeso al suelo en cualquiera de los porcentajes, se pudo notar que no hay cambio significativo en la cohesión.

Al incorporar ya sea cal o yeso como agente estabilizador se tienen un aumento importante del ángulo de fricción interna en todas las ubicaciones y para todos los porcentajes de incorporación. Esto representa un beneficio ya que al aumentar el ángulo de fricción aumenta la resistencia al corte del suelo.

Para finalizar, la incorporación tanto de cal como de yeso como agente estabilizante en los tipos de suelo estudiados, mejoran la mayoría de los parámetros mecánicos y elásticos. Esta estabilización se puede hacer en un rango de porcentajes en peso que va desde el 5% hasta el 6% máximo, con la prudencia y particularidades del caso.

Recomendaciones

Luego de finalizado el presente estudio y en base a los resultados obtenidos, se plantean a continuación las siguientes recomendaciones:

-Estudiar otros porcentajes de incorporación de estabilizante, para determinar si sus resultados representan menor costo – efectividad.

-Utilizar la cal y el yeso como agente estabilizante, ya que mejora la mayoría de las propiedades del suelo a un bajo costo.

Referencias

Balarezo, J. (2023). Estabilización y control de asentamientos elásticos en arcillas de alta plasticidad, mediante el uso de cal y cemento. *Repositorio Institucional*. Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador. URI: <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/24953>.

- Bauzá, J. (2015). El tratamiento de los suelos arcillosos con cal. Comportamiento mecánico y evolución a largo plazo ante cambios de humedad. *Tesis Doctoral*. Universidad de Sevilla, Sevilla, España. <https://idus.us.es/handle/11441/32957>.
- Campos, J., & Pérez, E. (2023). Mejoramiento de un suelo blando de subrasante mediante las adiciones de piedra yesera triturada y yeso en un tramo de la carretera Cruce Caracucho – Monte Hermoso – Sequiones, distrito de Mórrope, provincia de Lambayeque, departamento de Lambayeque. *Repositorio Institucional*. Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo. Perú. URI: <https://hdl.handle.net/20.500.12893/10961>.
- Ferrero, M. (2023). Estudio in-situ de estabilización de suelo vial: aplicación en campo “La Toma” Ruta N.º 19. *Tesis de Grado*. Universidad Católica de Córdoba, Córdoba. Disponible en: URI: <http://pa.bibdigital.ucc.edu.ar/id/eprint/3641>.
- Fiallos, J. (2016). Análisis comparativo de la estabilización de un suelo cohesivo (arcilloso) por tres métodos químicos, cal, cloruro de calcio y sulfato de calcio (yeso). *Tesis de grado*. Universidad Técnica de Ambato, Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica, Ambato, Ecuador. <https://repositorio.uta.edu.ec/jspui/handle/123456789/24784>.
- Hernández, J., Mejías, D., & Zelaya, C. (2016). Propuesta de estabilización de suelos arcillosos para su aplicación en pavimentos rígidos en la facultad multidisciplinaria oriental de la Universidad de El Salvador. *Tesis de grado*. Universidad de El Salvador, Facultad Multidisciplinaria Oriental, San Miguel, El Salvador. <http://opac.fmoues.edu.sv/infolib/tesis/50108285.pdf>.
- Parra, M. (2018). Estabilización de un Suelo con cal y ceniza volante. <https://repository.ucatolica.edu.co/bitstream/10983/22856/1/TRABAJO%20DE%20GRADO%20MANUEL%20GERARDO%20PARRA%20GOMEZ%20505587.pdf>.
- Pérez, W., & Torres, J. (2015). Estudio de la cal y el cloruro de sodio como agentes estabilizadores de suelos arcillosos en propiedades como la resistencia y expansividad. *Tesis de grado*. Universidad de Santander, Bucaramanga, Colombia. <https://repositorio.udes.edu.co/handle/001/2938>

Recibido: 21 de agosto de 2023

Aceptado: 01 de noviembre de 2023

María Alejandra Ramírez Moreno: Magister en Ingeniería Vial, Ingeniero Civil, Profesora Asistente investigador de la Universidad de los Andes, Mérida-Venezuela, Departamento de Vías, Escuela de Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería, Universidad de los Andes. Mérida Venezuela. Correo electrónico: marialejandraramirez@gmail.com
 <https://orcid.org/0009-0009-8125-9121>

Lyna Josefina Castillo Pernia: Ingeniero Civil, Egresado de la Universidad de los Andes, Mérida-Venezuela. Correo electrónico: lyna.casper14@gmail.com
 <https://orcid.org/0009-0001-4789-9784>

Milagro Nathaly Mercado Marquez: Ingeniero Civil, Egresado de la Universidad de los Andes, Mérida-Venezuela. Correo electrónico: ing.milagromercado@gmail.com
 <https://orcid.org/0009-0002-3984-5361>

Víctor Hugo Verjel Tarazona: Ingeniero Civil, Magister en Gestión de Proyectos. Profesor programa de Ingeniería Civil, Universidad de Pamplona, República de Colombia. Correo electrónico: victor.verjel@unipamplona.edu.co
 <https://orcid.org/0009-0003-5301-8845>

