



*Estabilización de la subrasante mediante cal y cemento para una obra vial,
ubicada en Rocafuerte-Tosagua sector El Junco*

*Stabilization of the subgrade using lime and cement for a road work, located in
Rocafuerte-Tosagua sector El Junco*

*Estabilização do subleito com cal e cimento para uma obra rodoviária, localizada
no setor Rocafuerte-Tosagua El Junco*

Carlos Iván Zamora Chávez ^I

czamora0785@utm.edu.ec

<https://orcid.org/0009-0005-1571-0608>

Eduardo Humberto Ortiz Hernández ^{II}

eduardo.ortiz@utm.edu.ec

<https://orcid.org/0000-0002-1885-6005>

Correspondencia: czamora0785@utm.edu.ec

Ciencias Técnicas y Aplicadas

Artículo de Investigación

* **Recibido:** 01 de octubre de 2023 * **Aceptado:** 30 octubre de 2023 * **Publicado:** 22 de noviembre de 2023

- I. Departamento de Construcciones Civiles. Facultad de Ciencias Matemáticas, Físicas y Químicas. Universidad Técnica de Manabí, Portoviejo, Manabí, Ecuador.
- II. Departamento de Construcciones Civiles. Facultad de Ciencias Matemáticas, Físicas y Químicas. Universidad Técnica de Manabí, Portoviejo, Manabí, Ecuador.

Resumen

La estabilización de las subrasante mediante la utilización de agentes cementantes (cal y cemento), genera cambios representativos en la oposición del suelo estudiado. El actual estudio fue ejecutado en dos fases, en la cual la primera buscaba caracterizar el suelo extraído de cada una de las calicatas objeto de estudio, del cual se pudo obtener una clasificación A-7-5. Dentro la segunda fase correspondiente a la estabilización como tal del suelo originario de la calicata número 3, con los agentes estabilizantes cal y cemento, mismo que hacen parte de la preparación, creación y curado de los cilindros, aplicando distintos porcentajes entre ellos el 2 y 4%, valorando como variable primordial el CBR tras su inserción y su densidad máxima. Dentro del procedimiento de estabilización se aplicó al suelo retirado o extraído del sector el Junco entre Rocafuerte y Tosagua, en donde se encontró que existía una mejora significativa a la hora de aplicar el 2% de ambos adictivos cementantes. El porcentaje de 4% logró mejorar significativamente la resistencia original del suelo, clasificando la subrasante como buena y muy buena, siendo este el valor porcentual más recomendable para la estabilidad con agentes cementantes.

Palabras Clave: Cemento; Cal; Subrasante; Resistencia; Estabilidad; Agentes cementantes.

Abstract

The stabilization of the subgrade through the use of cementing agents (lime and cement) generates representative changes in the opposition of the soil studied. The current study was carried out in two phases, in which the first sought to characterize the soil extracted from each of the pits under study, from which a classification A-7-5 could be obtained. Within the second phase corresponding to the stabilization as such of the soil originating from pit number 3, with the stabilizing agents lime and cement, which are part of the preparation, creation and curing of the cylinders, applying different percentages including 2 and 4%, assessing the CBR after insertion and its maximum density as the primary variable. Within the stabilization procedure, it was applied to the soil removed or extracted from the El Junco sector between Rocafuerte and Tosagua, where it was found that there was a significant improvement when applying 2% of both cementitious additives. The percentage of 4% managed to significantly improve the original resistance of the soil, classifying the subgrade as good and very good, this being the most recommended percentage value for stability with cementing agents..

Keywords: Cement; Lime; Subgrade; Endurance; Stability; Cementing agents.

Resumo

A estabilização do subleito através da utilização de agentes cimentícios (cal e cimento) gera alterações representativas na oposição do solo estudado. O presente estudo foi realizado em duas fases, em que a primeira procurou caracterizar o solo extraído de cada uma das covas em estudo, de onde se pôde obter a classificação A-7-5. Na segunda fase correspondente à estabilização propriamente dita do solo proveniente da cava número 3, com os agentes estabilizantes cal e cimento, que fazem parte da preparação, confecção e cura dos cilindros, aplicando diferentes percentagens incluindo 2 e 4%, avaliando o CBR após a inserção e sua densidade máxima como variável primária. Dentro do procedimento de estabilização foi aplicado ao solo retirado ou extraído do setor El Junco entre Rocafuerte e Tosagua, onde se constatou que houve uma melhoria significativa ao aplicar 2% de ambos os aditivos cimentícios. O percentual de 4% conseguiu melhorar significativamente a resistência original do solo, classificando o subleito como bom e muito bom, sendo este o valor percentual mais recomendado para estabilidade com agentes cimentícios.

Palavras-chave: Cimento; Lima; Subleito; Resistência; Estabilidade; Agentes cimentantes.

Introducción

En la actualidad en la provincia de Manabí los suelos tienden a ser expansivos lo que dificulta la estabilización de los suelos y las construcciones de obras civiles como por ejemplo en zonas residenciales y obras viales (Buitron & Enríquez, 2018). Con base a lo antes mencionado, se plantea la siguiente investigación la cual busca platear una alternativa para evitar incontinentes (inestabilidad y plasticidad), en este tipo de suelo del sector el Junco ubicado en Rocafuerte-Tosagua. Velásquez (2018) menciona que la Influencia del cemento Portland tipo I al estabilizar un suelo arcilloso mejora notablemente sus características del suelo, el cual se ve una reducción en el índice de plasticidad (IP) y un incremento en su CBR del 1.30% al 13.75% al 95% de su densidad máxima seca (95% DSM) adicionando proporciones entre 1,3 y 5% de cemento, para darle uso a una subrasante de regular a buena, logrando obtener un porcentaje óptimo de un 4% de su estabilizante. Según Gómez, Guillín & Gallardo (2016) consideran que, al añadir elementos químicos como cal y cemento, resulta un proceso práctico para el mejoramiento de suelos para emplear como elemento base de una infraestructura. No obstante, la estabilización de subrasante

es uno de los procesos en la construcción y la ingeniería civil que implica como tal la mejora y el fortalecimiento de la capa de suelo natural que se encuentra debajo de una carretera, pavimento u otra estructura.

Cabe recalcar que la "subrasante" se refiere a la capa de suelo natural ubicada debajo de la estructura de una carretera, pavimento o plataforma de construcción (Ospina, Chaves, & Jiménez, 2020). Uno de los estudios realizados por Sánchez (2014), demostró mediante un análisis a los suelos expansivos, que el uso de la cal y cemento permite reducir la plasticidad y el potencial expansivo del suelo. Es importante mencionar según lo expuesto por Sobrevila (2015), que la estabilización de subrasante es crucial para garantizar la longevidad y el rendimiento de las carreteras y otras estructuras, ya que, al mejorar la capacidad de carga y la resistencia del suelo subyacente, se reduce el riesgo de asentamientos y deformaciones, lo que a su vez contribuye a una infraestructura más segura y duradera. No obstante, la cal es utilizada como un agente estabilizador para aumentar la resistencia y la cohesión del suelo, lo que resulta en una subrasante más estable y capaz de soportar cargas y presiones; cabe recalcar que dentro del proceso de estabilización de subrasante con cal generalmente se implican diversos pasos, entre ellos: el respectivo análisis del suelo, la aplicación de la cal, el mezclado y la compactación que se pueda obtener de esta, y el curado (Mamani, Cruz, Vega, Yllescas, & Rea, 2023). Sanchez, et al (2019), en su estudio demostró que la estabilización de las subrasante ofrece diversos beneficios los cuales van desde la mejora de la resistencia y la capacidad de carga de los suelos, el incremento de la cohesión logrando con ello la reducción de la plasticidad de los suelos, de igual forma permite la reducción del potencial de asentamientos y deformaciones y finalmente permite el incremento de la durabilidad y la vida útil de las infraestructuras u obras viales. Otros estudios realizados por Realpe y Zamora (2020), establecen que dentro de la estabilización de las subrasante mediante cal y cemento es uno de los métodos más utilizados dentro del campo de la ingeniería civil. Cabe recalcar que dicho método permite mejorar las propiedades de los suelos. Dentro de este proceso, tanto de la cal como el cemento actúan como agentes estabilizadores para fortalecer y mejorar la capacidad de carga y resistencia de los suelos (Llano, Ríos, & Restrepo, Evaluación de tecnologías para la estabilización de suelos viales empleando intemperismo acelerado. Una estrategia de análisis de impactos sobre la biodiversidad, 2020). Bajo el criterio de López et al., (2017), destaca que dentro de su estudio demuestran la importancia de realizar el análisis de suelo, la adecuada mezcla de suelo cal y cemento, el curado del mismo y las respectivas pruebas y ajustes; en este sentido los beneficios

que se logran obtener de este método son de gran relevancia ya que se logra obtener una mejora adicional tanto en la resistencia como en la durabilidad del suelo. En vista del rol fundamental que tienen los estabilizantes en la construcción de carreteras, la finalidad de esta investigación es realizar una mezcla de cal y cemento de manera individual enfocada en mejorar la estabilidad de la subrasante. Con esto se pretende tener un mejor panorama constructivo con vías de buena calidad, con sus normas y estabilidades óptimas (Rufino, Machado, & Dias, 2013, pág. 75). La presente investigación permitirá estudiar si los materiales antes mencionados poseen las condiciones mecánicas adecuadas para mejorar los subrasante del suelo del sector El Junco del cantón Rocafuerte - Tosagua, si aporta de forma directa en una mayor estabilización.

Estabilización de subrasante

Jácome & Ortiz (2022), establecen que la estabilización de subrasante se encuentra enfocada a aumentar la capacidad de carga y la resistencia de los suelos, lo que contribuye a una base sólida y duradera para la construcción de infraestructuras; no obstante, dentro de su estudio mencionan diversas técnicas y métodos los cuales son utilizados para lograr la estabilización de subrasante, y la elección de la técnica dependerá de las características del suelo y de los requerimientos específicos del proyecto; de igual forma algunas de las técnicas más comunes para la estabilización de subrasante incluyen lo siguiente:

Mezcla de suelos: Consiste en mezclar el suelo existente con materiales estabilizadores, como cemento, cal o cenizas volantes. Estos materiales reaccionan químicamente con el suelo para mejorar su resistencia y cohesión.

Compactación: Este método implica la aplicación de fuerzas de compresión para densificar y compactar la subrasante, lo que aumenta su capacidad de soporte.

Geotextiles y geogrillas: Se colocan materiales geotextiles o geogrillas en la subrasante para mejorar su resistencia y distribuir las cargas de manera uniforme.

Inyección de resinas: Se inyectan resinas u otros materiales en el suelo para mejorar su resistencia y estabilidad.

Estabilización química: Implica la aplicación de productos químicos que modifican las propiedades del suelo y mejoran su cohesión y resistencia.

Columnas de grava o pilotes: Se instalan columnas de grava o pilotes en el suelo para mejorar su capacidad de carga y estabilidad. Al mejorar la capacidad de carga y la resistencia del suelo

subyacente, se reduce el riesgo de asentamientos y deformaciones, lo que a su vez contribuye a una infraestructura más segura y duradera.

Es importante mencionar que de acuerdo con la publicación realizada por el Ministerio de Transporte y Comunicaciones (2008), las subrasantes se clasifican en función de la relación de soporte de California (CBR), para lo cual se tomara en cuenta el manual de diseño de carreteras pavimentadas, en el cual se establecen las categorías que se presentan en la tabla 1.

Tabla 1. Categorías de subrasante, según el CBR. (Ministerio de transportes y Comunicaciones, 2008)

Clasificación	CBRdiseño
S0: Subrasante muy pobre	< 3%
S1: Subrasante pobre	3% - 5%
S2: Subrasante regular	6 - 10%
S3: Subrasante buena	11 - 19%
S4: Subrasante muy buena	> 20%

Estabilización de la subrasante mediante cal y cemento

Llanos, et al., (2020), afirman que la estabilización realizada mediante la cal y cemento es uno de los métodos más utilizados en el campo de la ingeniería civil, ya que este permite mejorar las propiedades del suelo natural el cual se encuentra debajo de las obras viales u estructura; cabe recalcar que, en este proceso, tanto la cal como el cemento actúan como agentes estabilizadores los cuales permiten fortalecer y mejorar la capacidad de carga y la resistencia del suelo como tal. Sin embargo, para que dicho método sea ejecutado de manera eficiente, es necesario realizar los siguientes procedimientos (Rivera, Aguirre, Mejía de Gutiérrez, & Orobio, 2020).

Análisis de suelo: Al igual que con otros métodos de estabilización, el suelo existente se analiza minuciosamente para determinar sus propiedades y características, esto ayuda a determinar las proporciones correctas de cal y cemento que se usarán en la mezcla (Rivera, Aguirre, Mejía de Gutiérrez, & Orobio, 2020).

Mezcla de cal y cemento: La cal y el cemento se mezclan con tierra en una proporción determinada, con el objetivo de aprovechar las ventajas de ambos estabilizantes para mejorar de forma más significativa las propiedades del suelo (Rivera, Aguirre, Mejía de Gutiérrez, & Orobio, 2020).

Mezclado y compactación: Se mezcla una mezcla de tierra, cal y cemento hasta que quede suave y luego se compacta con un equipo especial, cabe recalcar que la compactación ayuda a compactar la mezcla y mejorar la durabilidad del suelo (Rivera, Aguirre, Mejía de Gutiérrez, & Orobio, 2020).

Curado: Después de la compactación, se deja curar la mezcla durante un período de tiempo determinado, durante este endurecimiento se produce una reacción química entre la cal, el cemento y el suelo, lo que contribuye a mejorar las propiedades del suelo (Llano, Ríos, & Restrepo, 2020).

Pruebas y ajustes: Se realizan pruebas de laboratorio y de campo para evaluar la efectividad de la estabilización y garantizar que se cumplan los requisitos de resistencia y capacidad de carga (Rivera, Aguirre, Mejía de Gutiérrez, & Orobio, 2020).

Es importante recordar que la elección de la proporción adecuada de cal y cemento y el correcto uso de la tecnología depende de las características del suelo y de las necesidades del proyecto. Sin embargo, según lo expuesto por Elizondo & Sibajo (2008), los agentes estabilizadores de suelo mas recomendados se encuentran plasmados en la tabla 2 que se presenta a continuación:

Tabla 2. Aditivos para la estabilización de suelos. (Elizondo & Sibajo, 2008)

Área	Suelo	Aditivo recomendado	Restricciones en LL ó IP del suelo	Restricciones del % pasa tamiz 200	Observaciones
1A	SW, SP	Asfalto	IP<=25		
		Cemento			
		Cal-cemento-ceniza			
1B	SW-SM	Asfalto	IP<=10		
	SP-SM	Cemento	IP<=30		
	SW-SC	Cal	IP<=12		La cal sola no suele conducir a estabilizaciones

					aptas para capas de base (1)
	SP-SC	Cal-cemento-ceniza	IP<=25		
1C	SM, SC	Asfalto	IP<=10	<=30%	
	SM, SC	Cemento	IP<=20+(50-PASA N° 200)/4		
		Cal	IP<=12		Ver (1)
		Cal-cemento-ceniza	IP<=25		
2A	GW,GP	Asfalto			Solo material bien gradado (2)
		Cemento			El material debe tener 45% o más pasa No.4 (3)
		Cal-cemento-ceniza	IP<=25		
2B	GW-GM	Asfalto	IP<=10		Ver (2)
	GP-GM	Cemento			Ver (3)
	GW-GC	Cal	IP<=12		Ver (1)
	GP-GC	Cal-cemento-ceniza	IP<=25		
2C	GM, GC GM, GC	Asfalto	IP<=10	<=30%	Ver (2)
		Cemento	IP<=20+(50-PASA 200)/4		Ver (3)
		Cal	IP<=12		Ver (1)
		Cal-cemento-ceniza	IP<=25		

3	CH,CL, MH,ML CL-ML CH-MH OL-OH	Cemento	LL <40, IP<20		Suelos orgánicos y muy ácidos no son estabilizables por medios convencionales
		Cal	IP>=12		Ver (1)

Influencia de la cal y cemento en las características de la subrasante

La influencia de la cal y el cemento en las características de la subrasante es significativa y tiene un impacto positivo en diversas propiedades del suelo, ya que ambos componentes funcionan como agentes estabilizadores de suelos, mejorando con ello la resistencia y la cohesión del mismo y suministrando a su vez una base sólida para la construcción de carreteras u otras infraestructuras viales (Zavala, y otros, 2022). A continuación, bajo el criterio de Gongora (2019), se refieren algunas de las formas en la que estos agentes afectan las características de la subrasante:

Mejora de la resistencia: Tanto la cal como el cemento ayudan a aumentar la resistividad del suelo, ya que la cal reacciona químicamente con las partículas del suelo para formar compuestos que aumentan la cohesión y la resistencia al corte, mientras que el cemento, forma un gel que recubre las partículas del suelo y se endurece con el tiempo, aumentando la resistencia general de la mezcla (Gongora, 2019).

Cohesión y plasticidad: La adición de cal y cemento reduce la plasticidad del suelo en la construcción de obras civiles, lo que ayuda a reducir la expansión y contracción debido a los cambios de humedad, de esta forma, la superficie de la carretera se vuelve más estable y menos deformada (Gongora, 2019).

Durabilidad y vida útil: La combinación de estos agentes permiten mejorar la durabilidad del suelo, lo que extiende la vida útil de la infraestructura construida sobre él; sin embargo, la reacción química entre la cal, el cemento y el suelo ayuda a crear una base más resistente a los elementos ambientales y al tráfico (Zavala, y otros, 2022).

Capacidad de carga: Este tipo de estabilización incrementa la capacidad de carga de la subrasante, lo que permite que la estructura sobre ella pueda soportar cargas más pesadas sin sufrir deformaciones excesivas (Gongora, 2019).

Reducción de asentamientos: Una mayor resistencia y cohesión del suelo reduce el potencial de asentamiento diferencial, que es fundamental para mantener la integridad de un pavimento u otra infraestructura (Gongora, 2019).

Reducción de erosión: La estabilización con cal y cemento puede reducir la erosión del suelo, debido a que los estabilizadores ayudan a mantener juntas las partículas del suelo y evitan que sean arrastradas durante las fuertes lluvias (Gongora, 2019).

Facilitación de la construcción: La base estabilizada con cal y cemento permite una construcción más eficiente, proporcionando una base más fuerte y uniforme para el trabajo (Zavala, y otros, 2022).

La adición de cal y cemento para estabilizar la base mejora las propiedades del suelo, lo que da como resultado una base de construcción de carreteras más fuerte, resistente y duradera; Sin embargo, es necesario un análisis detallado del suelo para una estabilización exitosa y el logro de los objetivos del proyecto (Gongora, 2019).

Materiales y métodos

Métodos para la estabilización de la subrasante mediante cal y cemento.

Según lo expuesto por Arrieta, Navas, & Sibaja (2010), existen varios métodos para llevar a cabo la estabilización de la subrasante mediante cal y cemento en proyectos de construcción, especialmente en obras viales; A continuación, se establecen los métodos más comunes utilizados para lograr una adecuada estabilización de la subrasante:

Mezclado en sitio: En este método, la cal, el cemento y el suelo existente se mezclan en el sitio, generalmente utilizando equipos especializados como fresadoras o estabilizadores de suelo; la mezcla in situ garantiza una distribución uniforme del material y una mejor proporción de mezcla y control de calidad (Arrieta, Navas, & Sibaja, 2010).

Mezclado Centralizado: En este método, la cal, el cemento y la tierra se mezclan en una planta central y luego se transportan al lugar de trabajo; esto es especialmente útil para proyectos más grandes donde la consistencia de la mezcla es fundamental (Arrieta, Navas, & Sibaja, 2010).

Sistema de procesamiento en frío: este método implica eliminar la capa de suelo existente y luego mezclar cal, cemento y tierra en una planta de procesamiento en frío. Luego la mezcla se llena y compacta a nivel del suelo; este enfoque es eficaz para mejorar la calidad del suelo existente y reciclar materiales in situ (Arrieta, Navas, & Sibaja, 2010).

Inyección de cal y cemento: En este método, la cal y el cemento se inyectan en el suelo a través de perforaciones realizadas en la subrasante. Los estabilizadores reaccionan con el suelo circundante y mejoran sus propiedades; el mismo es particularmente útil en terrenos con acceso limitado o en áreas ambientalmente sensibles (Arrieta, Navas, & Sibaja, 2010).

Estabilidad profunda: para proyectos donde la superficie de la carretera es particularmente débil o requiere una alta capacidad de carga, se pueden colocar bajo tierra columnas de cemento-suelo o pilotes de cal-cemento. Estos pilares aumentan la fuerza y la coherencia del suelo profundo (Arrieta, Navas, & Sibaja, 2010).

Independientemente del método utilizado, es importante realizar pruebas de laboratorio y de campo para ajustar la cantidad de cal y cemento para garantizar que se cumplan los requisitos de diseño y calidad (Arrieta, Navas, & Sibaja, 2010). También se deben seguir procedimientos de construcción adecuados para garantizar una estabilización eficaz y a largo plazo del subsuelo.

Diseño experimental

La extracción de la muestra para el estudio (suelo arcilloso) se la realizó en vía Rocafuerte -Tosagua sitio el Junco de la provincia de Manabí, para lo cual fue necesario realizar 3 calicatas, teniendo en cuenta que estas tuvieron una distancia de 800 metros una de la otra; las mismas tuvieron 1,5 metros de profundidad referenciado al suelo de la subrasante del sitio, seguido, las propiedades del suelo natural se identifica por varias pruebas de laboratorio como granulometría, límites de Atterberg (Límite Líquido y Límite Plástico), humedad natural, ensayo de Proctor y ensayo de C.B.R.

No obstante, dentro de la determinación del C.B.R., se tomaron en cuenta tres estratos de diseño, en donde el primer estrato hace referencia a una muestra patrón, para lo cual se elegirá el más crítico. No obstante, se instauraron dos niveles los cuales incluyeron en ambos cementantes, con el 2% y el 4% sobre el peso seco del adherido suelo de subrasante.

Por otra parte, las variables dependiente fue el C.B.R., en condición de inmersión y el índice de plasticidad en el suelo estabilizado. Los cilíndricos se compactaron a la humedad óptima del suelo, dentro de ello con diversas energías y con su respectivo curado antepuesto a 7 días, este proceso con la finalidad de obtener un índice de C.B.R., luego de 4 días de su inmersión.

Seguido, se presentan los resultados logrados en los ensayos ejecutados (tabla 3), en primera instancia para el suelo patrón en condición más crítica y luego con la integración de los dos adictivos cementantes en proporciones (2% y 4%).

Tabla 3. Caracterización del suelo natural

Suelo natural	Norma	Calicata 1	Calicata 2	Calicata 3
Coordenadas UTM		0.8257926 80.3239403	0.8265168 80.3254629	0.8277837 80.3271081
Humedad natural (%)	(AASTHO T265, 2022)	12,65	8,39	11,07
Límite Líquido (LL%)	(AASTHO T89, 2022)	88,92	66,62	42,23
Límite Plástico (LP%)	(AASTHO T90, 2022)	45,95	37,79	28,97
Índice de Plasticidad %	(AASTHO T90, 2022)	42,97	28,83	13,26
Pasado Tamiz No. 200 (%)	(ASTM C117, 2020)	94,14	71,09	95,23
Densidad máxima (kg/m ³)	(ASTM D1557, 2021)	1232	1469	1200
Humedad óptima (%)	(ASTM D1557, 2021)	18,30	18,20	21,80
Clasificación	AASTHO	A-7-5	A-7-5	A-7-5
Ensayo de CBR (%) Tras inmersión de 4 días	(ASTM D1883, 2021)	2,55	3,60	1,4

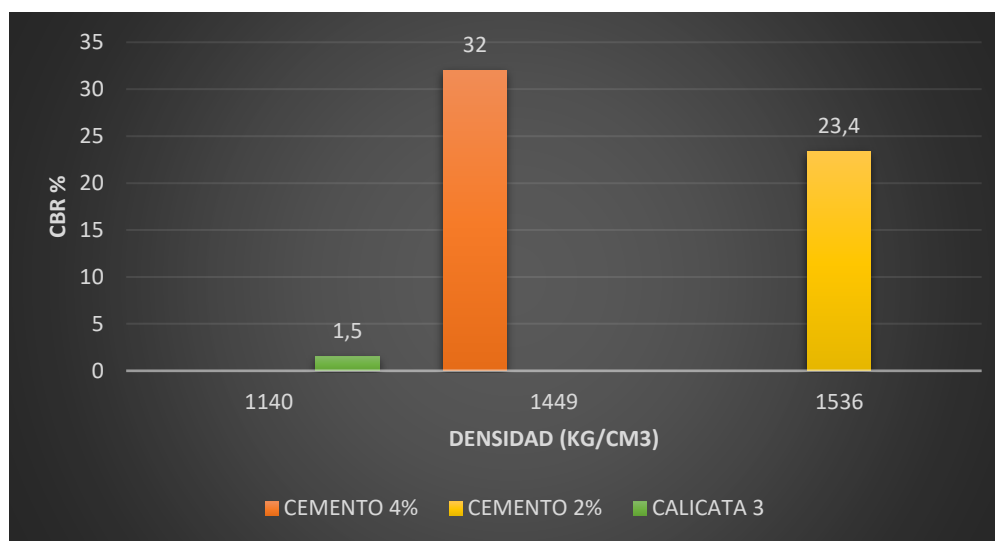
Resultados

Resultados de la estabilización del suelo con cemento

Finalmente, una vez ejecutado el respectivo procedimiento para la estabilización de la subrasante mediante cal y cemento para una obra vial en el sitio el Junco de la provincia de Manabí se

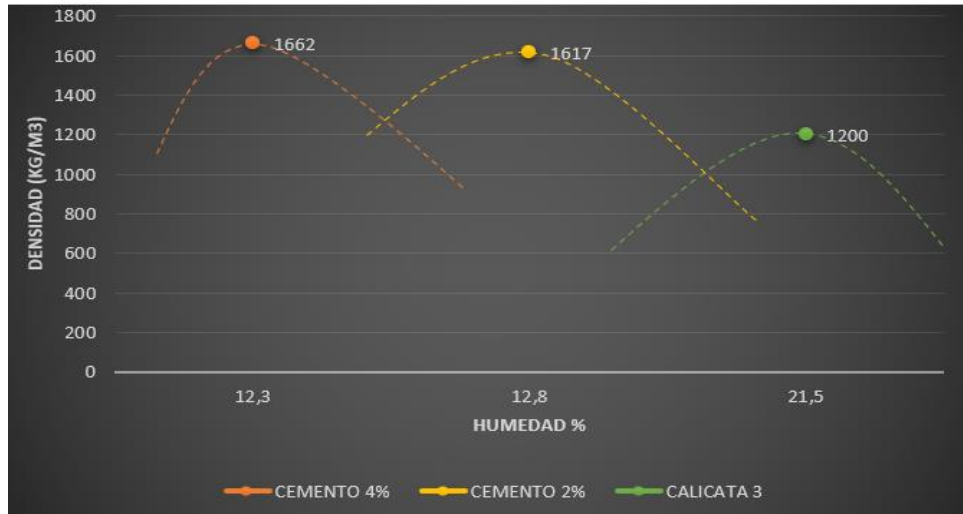
obtuvieron los siguientes resultados. En la figura 1 el cual corresponde al C.B.R., con la densidad del suelo seco, conseguida para las tres energías de compactación. Para la estabilización del suelo con el 2% de cemento en comparación con la calicata 3 la diferencia que se obtuvo fue del 15 veces más. Sin embargo, el suelo estabilizado con el 4% tubo un incremento de manera considerable, consiguiendo con ello una resistencia de más de 20 veces, para los diversos valores de energía aplicada.

Figura 1. Densidad del suelo vs CBR, para el suelo natural y el suelo estabilizado con el 2% y 4% de cemento.



Por otra parte, dentro de la figura 2 se encuentran los resultados obtenidos de las relaciones existentes entre la densidad seca y la húmeda, de lo cual se obtuvo una densidad máxima 1200 kg/m³ valor correspondiente al suelo natural. Sin embargo, para la estabilización del suelo con el 2% de cemento se logró obtener una densidad máxima de 1617 kg/m³, mientras que en la estabilización con el 4% de cemento fue de 1662 kg/m³. Con base a los resultados obtenidos, se puede visualizar una diferenciación significativa en las densidades máximas, de la misma manera en las humedades de suelo.

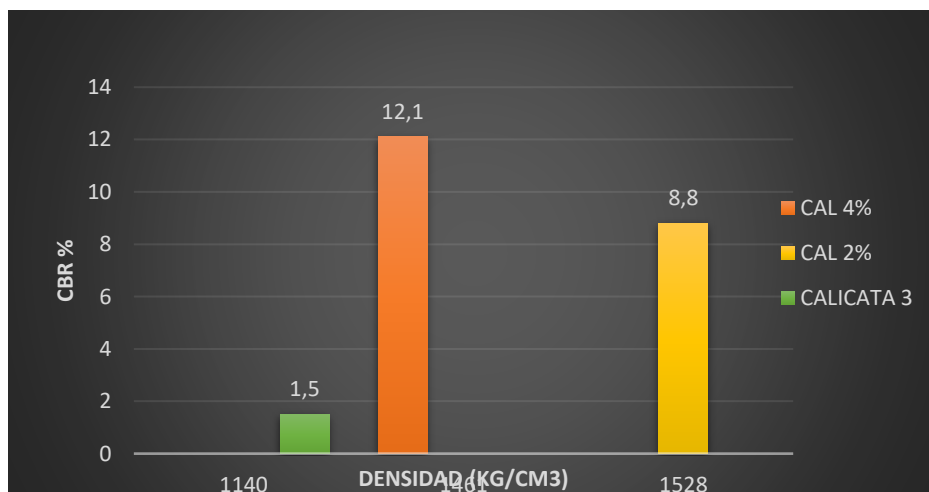
Figura 2. Gráficos de densidad y humedad para el suelo natural y las mezclas de suelo cemento con los contenidos de cemento de 2% y 4%.



Resultados de la estabilización del suelo con cal

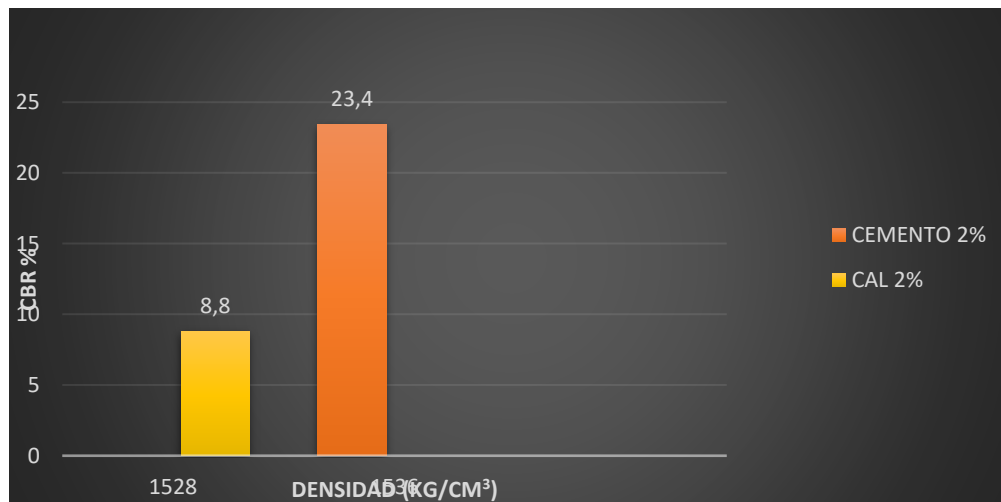
En cuanto a los resultados obtenidos en la estabilización del suelo con cal, en la figura 3 se puede apreciar la relación del C.B.R., con la densidad seca del suelo, conseguidas para las 3 energías de compactación. Para la estabilización del suelo con el 2% de cal en comparación con la calicata 3 la diferencia obtenida es un incremento de 5 veces más con el suelo natural. No obstante, el suelo estabilizado con el 4% tubo un aumento considerable, ya que su resistencia incremento más de 8 veces, para los diversos valores de energía aplicada.

Figura 3 Densidad del suelo vs CBR, para el suelo natural y el suelo estabilizado con el 2% y 4% de cal.



Finalmente, en la figura 4 se establecen las relaciones existentes entre la densidad húmeda y seca de compactación, de lo cual se obtuvo como resultado una densidad máxima de 1200 kg/m^3 para el suelo natural. Por otra parte, para el suelo estabilizado con el 2% de cal se logró conseguir una densidad máxima de 1558 kg/m^3 , mientras que en la estabilización con el 4% de cal fue del 1596 kg/m^3 .

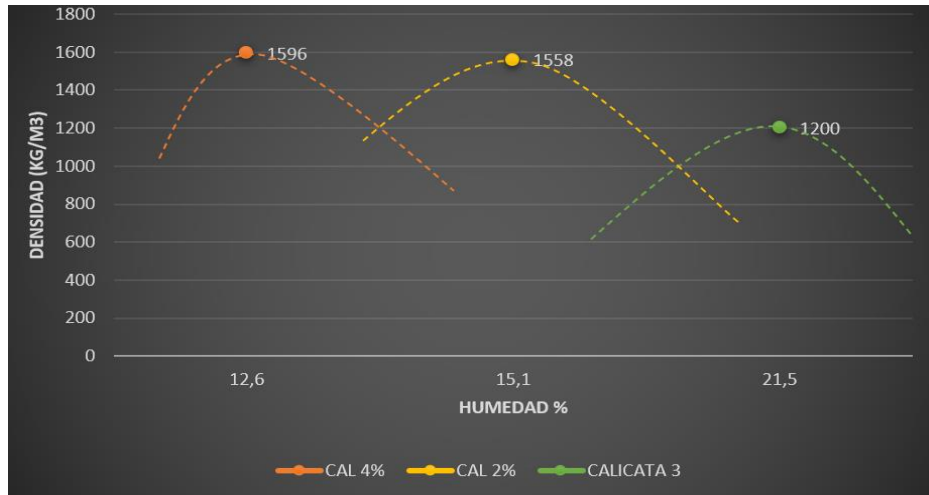
Figura 4. Densidad y humedad para el suelo natural y las mezclas de suelo cemento con los contenidos de cal de 2% y 4%.



Resultados de la estabilización del suelo con cemento.

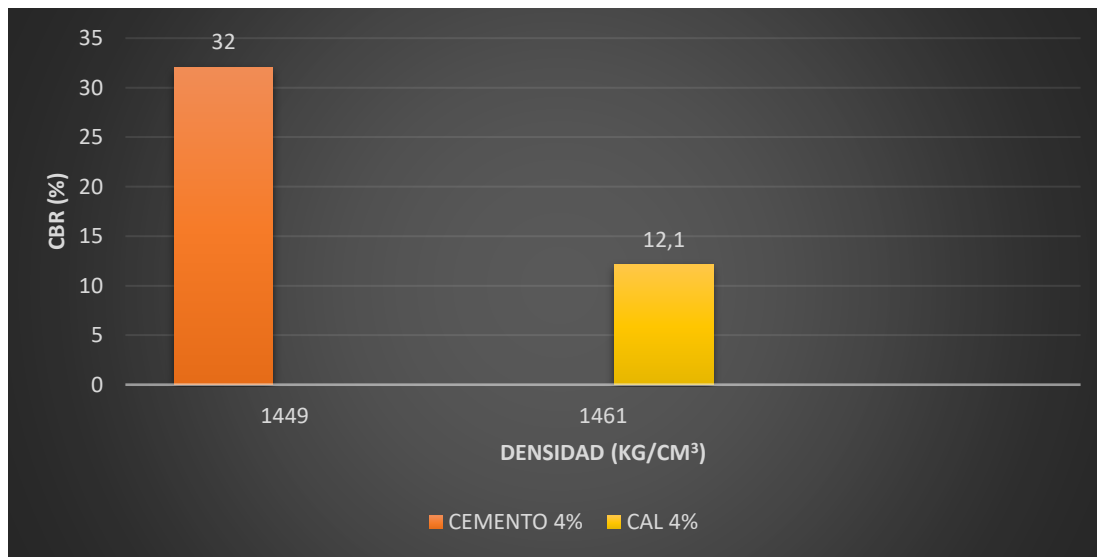
En la figura 5, se comprueba que entre el cemento y cal al 2%, donde obtenemos una mejor capacidad portante del suelo es con el cemento al 2% con un CBR de 23,4% a una densidad de 1536 Kg/cm^3 .

Figura 5. Comparativo de Densidad del suelo vs CBR, para el suelo natural y el suelo estabilizado con el 2% de cemento y 2% de cal.



En la figura 6, se comprueba que entre el cemento y cal al 4%, donde obtenemos una mejor capacidad portante del suelo es con el cemento al 4% con un CBR de 32 % a una densidad de 1461 Kg/cm³.

Figura 6. Comparativo de Densidad del suelo vs CBR, para el suelo natural y el suelo estabilizado con el 4% de cemento y 4% de cal.



Conclusión

- De las pruebas de caracterización ejecutados en las 3 calicatas, se clasifico al suelo natural según la norma AASHTO como un A-7-5, con un CBR inferior al 3%, por lo que se lo cataloga como una subrasante no recomendada según se encuentra establecido en el Manual de diseño de carreteras pavimentadas de bajo volumen de tránsito.
- Dentro del estudio realizado la muestra más crítica fue la calicata 3 por tener parámetros físicos - mecánicos más de favorables que se la cataloga como una arcilla de baja plasticidad (CL), la misma que presenta un Limite Liquido de 42,23% y un Índice Plástico de 13,26%, con base a dichos porcentajes el cemento sería el más recomendable, según los resultados presentados en la Tabla 2 para la estabilización de suelos, sin embargo, se determinó que ambos aditivos cementantes incrementan la resistencia del suelo.
- El suelo estabilizado con el 2% de cemento alcanzó un CBR de 25,6 %, en cambio el suelo estabilizado con el 2% de cal arrojó un porcentaje del 10,6 %, ambos resultados son mayores al 10 y 20% por lo cual permite clasificarla como una subrasante buena y muy buena respectivamente según los resultados establecidos en la categoría de subrasante como se establece en la tabla 1.
- El CBR para el suelo estabilizado con el 4% de cemento es de 39,6 %, mientras que el suelo estabilizado con cal es de 12,9 %, ambos resultados son superiores al 11 y 20% clasificando el suelo como una subrasante buena y muy buena respectivamente según la tabla 1.

Referencias

- Arrieta, F., Navas, A., & Sibaja, D. (2010). Efecto de la cal en la estabilización de subrasantes. *Ingeniería*, 20(1-2), 93-108. Obtenido de <https://www.redalyc.org/pdf/441/44170524007.pdf>
- Buitron, S., & Enríquez, A. (julio de 2018). Estudio de la estabilización de arcillas expansivas de Manabí con ceniza del volcán Tungurahua. Obtenido de <https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/19654/1/CD-9058.pdf>
- Elizondo, F., & Sibajo, D. (2008). Guía para la estabilización o mejoramiento de rutas no pavimentadas. Costa Rica: Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales. Obtenido de <https://www.lanamme.ucr.ac.cr/repositorio/bitstream/handle/50625112500/1468/UI-06->

- 07%20Gu%c3%ada%20para%20la%20estabilizaci%c3%b3n%20o%20mejoramiento%20de%20rutas%20no%20pavimentadas.pdf?sequence=2&isAllowed=y
- Gómez Pérez, L. E., Guillín Acosta, W. F., & Gallardo Amaya, R. (2016). Variability of mechanical properties for compressible clayey soils stabilized with cementitious material. *Revista Tecnura*, 95-107.
- Gongora, C. (2019). Influencia de la cal y el cemento portland tipo I en la subrasante de la trocha del distrito de Chillia, provincia de Patas - 2019. Obtenido de Universidad Privada del Norte: <https://hdl.handle.net/11537/21168>
- Jácome, G., & Ortiz, E. (2022). Estabilización de un suelo de subrasante de carretera con el sistema consolid. *INGENIAR*, 5(10). doi:<https://doi.org/10.46296/ig.v5i10edespag.0061>
- Llano, E., Ríos, D., & Restrepo, G. (2020). Evaluación de tecnologías para la estabilización de suelos viales empleando intemperismo acelerado. Una estrategia de análisis de impactos sobre la biodiversidad. *TecnoLógicas*, 49, 185-199. doi:<https://doi.org/10.22430/22565337.1624>
- Llano, E., Ríos, D., & Restrepo, G. (2020). Evaluación de tecnologías para la estabilización de suelos viales empleando intemperismo acelerado. Una estrategia de análisis de impactos sobre la biodiversidad. *TecnoLógicas*, 23(49), 185-198. doi:<http://orcid.org/https://doi.org/10.22430/22565337.1624>
- López Sumarriva, J. J., & Ortiz Pinares, G. (2018). Estabilización de suelos arcillosos con cal para el tratamiento de la subrasante en las calles de la urbanización San Luis de la ciudad de Abancay. Apurímac, Perú: Tesis para obtener el título profesional de Ingeniero Civil.
- Mamani, G., Cruz, S. D., Vega, C., Yllescas, P., & Rea, W. (2023). Estabilización de la subrasante con ceniza de quinua y cal en la Carretera Lago Sagrado, Puno, Perú. *Infraestructura Vial*, 25(44). doi:<http://dx.doi.org/10.15517/iv.v25i44.53569>
- Ospina, M. Á., Chaves, S. B., & Jiménez, L. M. (26 de febrero de 2020). Mejoramiento de subrasantes de tipo arcilloso mediante la adición de escoria de acero. *Rev.investig.desarro.innov*, 11(1), 185-196. Obtenido de <http://www.scielo.org.co/pdf/ridi/v11n1/2389-9417-ridi-11-01-185.pdf>
- Rivera, J., Aguirre, Mejía de Gutiérrez, R., & Orobio, A. (2020). Estabilización química de suelos - Materiales convencionales y activados alcalinamente. *Informador Técnico*, 84(2), 202-226. doi: [doi:http://doi.org/10.23850/22565035.2530](http://doi.org/10.23850/22565035.2530)

- Rufino, J., Machado, I., & Dias, Y. (2013). Determinación de mezclas de suelo estabilizado a partir de recursos de biomasa locales para mejorar la calidad de las viviendas construidas por la población del territorio de Uige, Angola. *Revista ingeniería de construcción*, 28(1), 63-80. doi:<http://dx.doi.org/10.4067/S0718-50732013000100004>
- Sánchez Albán, M. A. (2014). Estabilización de suelos expansivos con cal y cemento en el sector Calcical del cantón Tosagua provincia de Manabí. Quito: Tesis para obtener el título profesional de Ingeniero Civil.
- Sobrevila, M. A. (2015). *Ingeniería Civil*. Lámpsakos, 13.
- Toraic Corral, J. (2017). Cal-Cemento como material de construcción. *Redalyc*, 521-523.
- Velásquez Pereyra, C. (2018). Influencia del cemento portland tipo I en la estabilización del suelo arcilloso de la subrasante de la avenida Dinamarca, sector La Molina. Cajamarca: Tesis para obtener el título profesional de Ingeniero Civil.
- Hernández, E. H. O., Moncayo, E. H. O., Sánchez, L. K. M., & de Calderero, R. P. (2017). Behavior of clayey soil existing in the portoviejo cantón and its neutralization characteristics. *International research journal of engineering, IT & scientific research*, 3(6), 1-10.
- Vera, C. A. M., Delgado, J. R. G., Hernández, E. H. O., & Vínces, J. J. G. (2019). Análisis comparativo de suelo de campo y laboratorio para la medición de su capacidad portante con ensayos de Valor de Soporte de California (CBR) y Cono Dinámico de Penetración (DCP) en la Universidad Técnica de Manabí. *Revista de Investigaciones en Energía, Medio Ambiente y Tecnología: RIEMAT ISSN: 2588-0721*, 4(2), 79-82.
- Ortiz-Hernández, E., Chunga, K., Toulkeridis, T., & Pastor, J. L. (2022). Soil liquefaction and other seismic-associated phenomena in the city of Chone during the 2016 Earthquake of Coastal Ecuador. *Applied Sciences*, 12(15), 7867.
- Ortiz Hernández, E. H., & Macías Sánchez, L. K. (2018). Análisis de las características y propiedades del asfalto convencional producido en la refinería de Esmeraldas, para proponer alternativas de mejoramiento de las propiedades con polímeros. *Caribeña de Ciencias Sociales*, (septiembre).
- Zavala, A., Araujo, N., Rivera, M., Valderrama, M., Llaque, G., & Calvinapon, F. (2022). Nuevas tecnologías en la estabilización de suelos para carreteras en el mundo. Una revisión sistemática durante los años 2012-2022. *Tecnologías exponenciales y desafíos globales*:

Avanzando hacia una nueva cultura de emprendimiento e innovación para el desarrollo
sostenible. Virtual Edition. doi:<http://dx.doi.org/10.18687/LEIRD2022.1.1.147>

© 2023 por los autores. Este artículo es de acceso abierto y distribuido según los términos y condiciones de la licencia Creative
Commons Atribución-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional (CC BY-NC-SA 4.0)
(<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>).