



DOI: <https://doi.org/10.46296/yc.v7i13.0357>

ESTABILIZACIÓN DE SUELO CON CAL Y CEMENTO PARA EL MEJORAMIENTO DE SUBRASANTE

STABILIZATION OF SOIL WITH LIME AND CEMENT FOR THE IMPROVEMENT OF SUBSANT

Zambrano-Bravo Tatiana Virginia ¹; Zambrano-Meza María Isabel ²

¹ Universidad Técnica de Manabí. Portoviejo, Ecuador.

Correo: tzambrano0458@utm.edu.ec. ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0009-0507-3253>

² Facultad de Ciencias Matemáticas Físicas y Químicas, Universidad Técnica de Manabí.

Portoviejo, Ecuador. Correo: maria.zambrano01@utm.edu.ec.

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-8432-8641>

Resumen

La estabilización es un proceso mediante el cual se someten los suelos naturales no aglomerados para obtener mejores propiedades y características mediante la incorporación de aditivos que darán como resultado estructuras viales estable, capaz de soportar los efectos del tránsito y las condiciones de clima más severas. Existen estabilizaciones físicas y químicas, dentro de las estabilizaciones químicas las más utilizadas en la actualidad son con cal, cemento, productos asfálticos entre otros. Las estabilizaciones con cemento aumentan la resistencia de los suelos y se usa principalmente para arenas o gravas finas. La investigación tiene como objetivo determinar el porcentaje óptimo de cal y cemento para la estabilización de la subrasante. El estudio de los diferentes tipos de estabilizaciones que se utilizan en la actualidad como las antes nombradas, en especial la propuesta en la investigación, estabilización con cal y cemento en tres porcentajes diferentes, donde se recomienda utilizar un 2 % mejorando las características y propiedades del suelo de subrasante en estudio; teniendo como resultado mejor resistencia y un bajo el índice de plasticidad, al compararlo con el índice de plasticidad del material en estado natural del 22.21 % al índice de plasticidad del material estabilizado del 8.16%.

Palabras claves: Estabilización de suelos, mejoramiento de subrasante, estudio de suelos.

Abstract

Stabilization is a process through which non-agglomerated natural soils are subjected to obtain better properties and characteristics by incorporating additives that will result in stable road structures, capable of withstanding the effects of traffic and the most severe weather conditions. There are physical and chemical stabilizations, within the chemical stabilizations the most used today are with lime, cement, asphalt products, among others. Cement stabilization increases the resistance of soils and is mainly used for sand or fine gravel. The objective of the investigation is to determine the optimal percentage of lime and cement for the stabilization of the subgrade. The study of the different types of stabilizations that are currently used, such as those mentioned above, especially the research proposal, stabilization with lime and cement in three different percentages, where it is recommended to use 2%, improving the characteristics and properties of the subgrade soil under study; resulting in better resistance and a low plasticity index, when compared with the plasticity index of the material in its natural state of 22.21% to the plasticity index of the stabilized material of 8.16%.

Keywords: Soil stabilization, subgrade improvement, soil study.

Información del manuscrito:

Fecha de recepción: 18 de abril de 2023.

Fecha de aceptación: 29 de junio de 2023.

Fecha de publicación: 10 de julio de 2023.



1. Introducción

La superficie del pavimento comúnmente se expone a factores que pueden mitigar la resistencia de los materiales que componen la estructura vial, por lo que se requiere la implementación de capas subrasantes que resistan, transmitan y distribuyan las cargas que el tránsito genera sobre la superficie de la obra. Esto conlleva a que las características y propiedades de la capa subrasante deban ser optimizadas en función de la estabilización del suelo antes de ejecutar la construcción de la obra, de manera que se han reportado varios materiales que tienen la capacidad de mejorar la resistencia del suelo, otorgándole durabilidad a la superficie (Firoozi et al., 2017).

Se han propuesto varias alternativas para la estabilización del suelo; siendo así que, existen materiales sintéticos y naturales disponibles para el mejoramiento de sus características. Por ejemplo, materiales como la cal, cemento, arena, asfalto han sido evaluados en investigaciones que han considerado la mejora en las propiedades de la capa subrasante

(Jahandari et al., 2021), concluyendo que la selección de los elementos empleados dependerá de factores como el índice de resistencia, condiciones climáticas de la zona, tipo de suelo y materiales disponibles para su utilización en la obra. Por consiguiente, la presente investigación se genera a raíz del siguiente problema: ¿Qué resistencia se alcanza en un suelo estabilizado, en la que se utilicen cal y cemento combinados como aditivos químicos?

Tomando como consideración que la subrasante es el cimiento de la vía y que en el trazado se suelen encontrar diferentes tipos de suelos, el uso de los aditivos cal y cemento puede mejorar sus condiciones estructurales, debido a que la cal aporta mayor capacidad de soporte, contribuye a reducir la humedad natural y a reducir plasticidad, lo que permite reducir los costos generados por mantenimiento (Banzibaganye et al., 2018), mientras que con el cemento se puede incrementar aún más la resistencia del suelo.

Además, en países como Ecuador se ha detectado una extensión importante de suelos arcillosos que se caracterizan por una alta



plasticidad y baja resistencia (Sánchez, 2015), por lo que la estabilización con cal y cemento puede solventar esta problemática.

Otro aspecto importante desde la perspectiva económica, estriba en que con el mejoramiento de la resistencia de la subrasante se reducen los espesores en el pavimento y, por consiguiente, se disminuye el costo de la obra de construcción (Asgari et al., 2015). Por lo tanto, el uso combinado de cal y cemento puede aportar ventajas sociales, técnicas y económicas en la estabilización y optimización de las propiedades del suelo.

Marco Teórico

Estabilización química de suelos

La estabilización química es una categoría importante de estabilización de suelos que involucra el uso de agentes químicos para iniciar reacciones dentro del suelo para modificar sus propiedades geotécnicas (Ponduri & Rama, 2020). La modificación del suelo, la estabilización o ambas se pueden clasificar en el grupo de mejora del suelo. La modificación del suelo es una adición de aditivos

activos como la cal y el cemento para que el suelo cambie sus propiedades de índice, mientras que la estabilización del suelo es el tratamiento de los suelos para mejorar la textura, aumentar la resistencia, aumentar el valor de CBR y reducir las características de contracción-hinchamiento de manera que volverse totalmente apto para la construcción a largo plazo (Firoozi et al., 2017).

Una serie de opciones de construcción que se pueden aplicar a suelos orgánicos y de turba, a saber, excavación-desplazamiento y refuerzo para mejorar la resistencia y rigidez del suelo, como la construcción por etapas y precarga, columnas de piedra, pilotes, precompresión térmica y pilares de precarga, o por reduciendo las fuerzas motrices mediante relleno liviano y mezclas químicas como cemento y cal. Estas mezclas químicas se pueden aplicar como método de mezcla profunda in situ (columnas de cal-cemento) o como estabilizador de superficie (Jahandari et al., 2021).

Estabilización de suelos mediante adición de Cal

Los suelos son parte de la construcción de presas, terraplenes y otras estructuras de tierra. La estabilización o tratamiento del suelo en su estado natural o de materiales clasificados aumentan las características y propiedades (Manoharan et al., 2020).

Los suelos blandos poseen un alto contenido de agua superando lo normado el límite líquido, baja trabajabilidad, baja resistencia y alta compresibilidad. Suelen tener una estructura inestable y son susceptibles a problemas por cambios en el contenido de humedad; estas características aumentan el costo y el tiempo de construcción de los proyectos. (Sánchez et al., 2014). (Banzibaganye et al., 2018).

El suelo de turba es un material representativo de los suelos blandos y está clasificado como altamente orgánico. La turba se deforma mucho bajo la carga aplicada debido a su contenido de agua excepcionalmente alto y su naturaleza orgánica. La turba también tiene una resistencia

notablemente alta en comparación con los suelos minerales con un contenido de agua similar. Con el fin de construir una carretera segura, estable y funcional, los ingenieros de carreteras deben superar estos problemas de ingeniería y encontrar soluciones adecuadas para construir carreteras en suelos de turba. La turba está sujeta a problemas de inestabilidad tales como hundimiento local y desarrollo de fallas por deslizamiento (Malik & Mishra, 2021).

También está sujeto a asentamientos primarios muy grandes y a largo plazo bajo un aumento de carga incluso moderado (Asgari et al., 2015).

El suelo de turba es un suelo problemático que se volverá más complejo para el proceso de construcción, como la construcción de edificios y carreteras. La base de pilotes se recomienda a menudo para los edificios sobre turba. Sin embargo, el suelo aún puede asentarse alrededor del edificio. Además, a veces la línea de construcción, como el terraplén de la carretera, no solo está sujeta a un hundimiento localizado y al desarrollo de la falla por



deslizamiento, sino también a una gran magnitud de asentamiento primario y a largo plazo (Haqmal et al., 2019).

Para el suelo, la relación carga-deformación suele ser compleja, variando ampliamente con diferentes suelos y particularmente en el rango plástico de suelos cohesivos, donde el tiempo juega un papel importante (Zambri & Md Ghazaly, 2018).

2. Metodología

Se tomó una muestra representativa de suelo de subrasante, a la que se le agregaron diferentes porcentajes de cal para reducir su plasticidad. Posteriormente se mezcló con cemento, para aumentar su resistencia.

La investigación se enmarcó en un enfoque cuantitativo, debido a que en ella se reportan datos numéricos de la proporción de cal y cemento como estabilizantes del suelo de la capa subrasante.

En ese sentido, se tomaron muestras representativas de suelo, que fueron llevadas al laboratorio para realizar los respectivos análisis antes y

después de la adición de los estabilizantes cal y cemento.

Según Sánchez (2014) se han utilizado los siguientes porcentajes de cal y cemento: 3%, 5%, 7% y 10% en pruebas para aumentar la resistencia del suelo. Por lo tanto, en la presente investigación se evaluarán combinaciones de los tratamientos con dichas concentraciones, para determinar la composición óptima que permita aumentar la resistencia del suelo tratado. Todas las técnicas analíticas se realizarán por triplicado, de manera que se analizarán 3 muestras de suelo subrasante en seco y 3 muestras de subrasante tras inmersión para cada uno de los porcentajes de aditivos considerados.

Métodos, técnicas e instrumentos de investigación.

A fin de desarrollar la presente investigación, utilizando un enfoque experimental, el método seleccionado fue el hipotético-deductivo, puesto que se plantea una hipótesis que se analizará deductiva y/o inductivamente, con su correspondiente comprobación experimental, de esta manera, se

trata de relacionar la parte teórica con la realidad.

Las técnicas experimentales consistieron en caracterizar las muestras de suelo antes y después de la adición de los aditivos, a partir de parámetros como contenido de humedad, gravedad de sólidos, granulometría, índice de plasticidad, índice de resistencia.

a. Contenido de humedad: se procedió a pesar una determinada muestra del suelo y se secará en una estufa, manteniendo una temperatura y tiempo adecuado para la evaporación total del agua. Posteriormente, se obtuvo el contenido de agua por diferencia del peso de la muestra inicial y la muestra final (después del secado) (Norma ASTM D2216-10).

b. Gravedad de sólidos: Se obtuvo midiendo el volumen que ocupa una muestra de sólidos de peso conocido, secos y disgregados previamente por un mortero. Se midió el desplazamiento del volumen de líquido (agua) en un recipiente gravimétrico, posterior a la adición de la muestra del sólido. La diferencia entre el volumen desplazado y el volumen del líquido,

corresponde al volumen del sólido. La gravedad del sólido se reporta como la relación entre el peso del suelo y el peso de agua desplazada (Norma ASTM D854-10).

c. Granulometría: El tamaño de partícula se determinó mediante tamices que van desde 10,16 cm (Tamiz N° 4) hasta 0,074 mm (Tamiz N° 200). Posteriormente, se determinó el tipo de partícula en función de los siguientes criterios, partículas gruesas >10,16 cm; arenas >0,074 mm y <10,16 cm; suelos de grano fino, limos (>0,002 mm) y arcillas (<0,002 mm) (Norma ASTM D421-85).

d. Índice de plasticidad: Se obtuvo a partir de la diferencia entre el límite líquido (LL) y límite plástico (LP). El LL se determinó al amasar el suelo seco previamente disgregado con una determinada cantidad de agua y se lo extiende sobre un molde, con la ayuda de un acanalador se realizó un canal de unos 2mm de ancho en su parte baja, definiéndose el LL como la humedad de la muestra cuando con 25 golpes de la cuchara de Casagrande se logró cerrar el surco. El LP se determinó amasando el suelo seco con poca agua y



formando rollitos una superficie lisa hasta alcanzar un diámetro de 3mm y una longitud de 25-30 mm; cuando se forman fisuras en fracciones de aproximadamente 6mm, la humedad corresponde al LP (Norma ASTM D4318-10).

e. Resistencia (CBR): Se basa en determinar la carga que se requiere aplicar a un pistón circular de 19,35 cm² para introducirlo en la muestra de suelo a una velocidad de 1,27 mm.min⁻¹, hasta obtener una penetración de 2,54 mm. El índice de resistencia se reporta como la relación entre la carga determinada y obtenida para una muestra de roca triturada (ASTM 1883).

Para evaluar el efecto de los aditivos sobre la plasticidad y resistencia del suelo, se prepararon mezclas del suelo con cal y posteriormente se adicionó cemento a diferentes concentraciones, en aras de determinar la proporción óptima de la combinación cal-cemento para mejorar las características del suelo.

3. Resultados y discusión

De acuerdo a la clasificación granulométrica, del suelo en estado natural tiene las siguientes características.

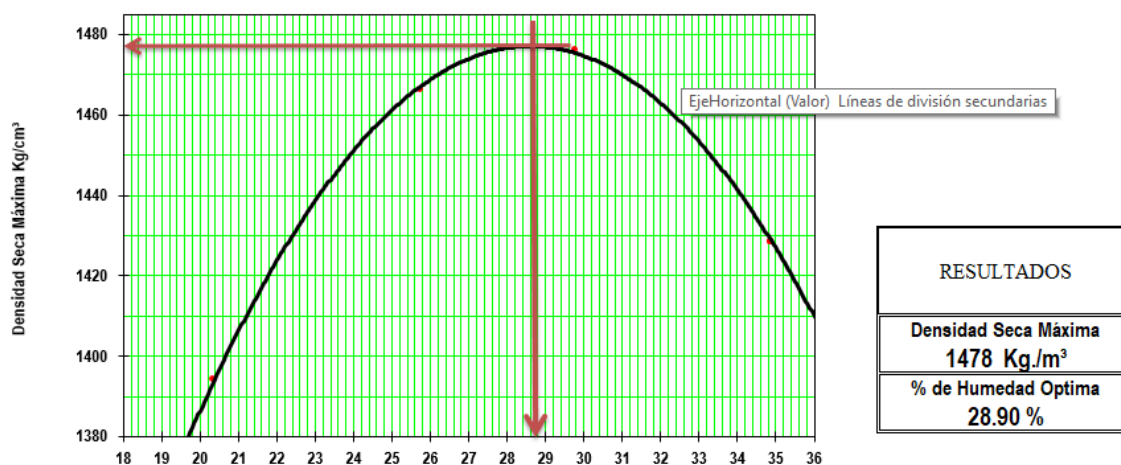
Tabla 1: Clasificación y humedad natural

CLASIFICACION:		HUMEDAD NATURAL:	23.69	%
		LIMITE LIQUIDO:	60.84	%
SUCS	MH	INDICE PLASTICO:	22.21	
AASTHO	A-7-5	INDICE DE GRUPO:	17	

Elaborado por autor.

La tabla 1 muestra la clasificación en función de la humedad natural, el límite líquido, el índice plástico y el índice de grupo. En principio, la humedad natural tiende al 23,69% mientras que el límite líquido se sitúa con un 60,84%. Por otro lado, el

índice plástico 22,21% y en último lugar, el índice de grupo con el 17% para las instancias SUCS, MH, AASTHO y A-7-5.

Ilustración 1: Proctor se obtienen los siguientes resultados del suelo en estado natural

El ensayo consiste en compactar una porción de suelo en un cilindro con volumen conocido, haciéndose variar la humedad para obtener la curva que relaciona la humedad y la densidad seca máxima a

determinada energía de compactación. Para este caso puntual, se obtuvo una densidad seca máxima de 1478Kg/ m³ y un porcentaje de humedad óptima del 28,90%.

Tabla 2: CBR: suelo en estado natural

CBR DEL MATERIAL DE SUB-RASANTE									
NO INMERSIÓN					INMERSIÓN				
SUELO NATURAL	MOLDE VALORES CBR			CBR AL 90% DE SU MÁXIMA DENSIDAD SECA	SUELO NATURAL	MOLDE VALORES CBR			CBR AL 90% DE SU MÁXIMA DENSIDAD SECA.
	1	2	3			1	2	3	
0					0	13	1	0,6	1,00

Una vez concluidos los ensayos de suelo en estado natural se procede con la adición de cal en los

porcentajes de 1-2-3 %. Obteniendo los siguientes resultados en el ensayo de límite de atterberg.

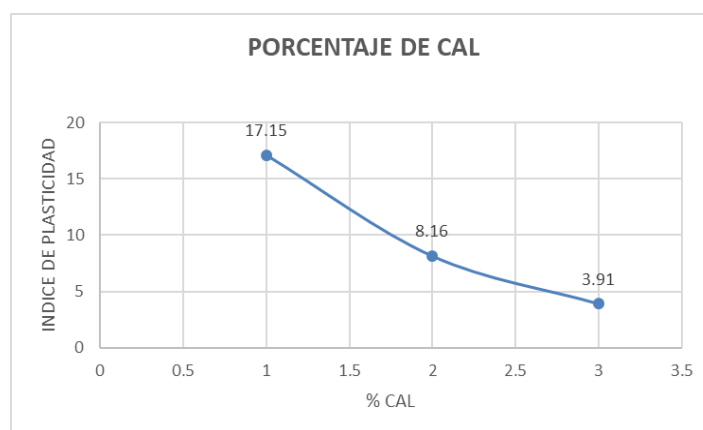
Tabla 3: Ensayo de límite de atterberg

PORCENTAJE DE CAL APLICADA		
PORCENTAJE DE CAL	LÍMITE LÍQUIDO %	ÍNDICE DE PLASTICIDAD %
1%	50.35	17.15
2%	34.46	8.16
3%	22.96	3.91

Los límites de Atterberg son ensayos de laboratorio normalizados que permiten obtener los límites del rango de humedad dentro del cual el suelo se mantiene en estado plástico. Con ellos, es posible clasificar el suelo en la Clasificación Unificada de Suelos (Unified Soil Classification System, USCS). Para los porcentajes de cal al 1% se

determinó un límite líquido equivalente al 50,35% y un índice de plasticidad de 17,15%. Por otro lado, Para el 2% de Cal se determinó un límite líquido del 34,46% y un índice de plasticidad de 8,16%. En última instancia para el 3% de Cal, se estableció un límite líquido del 22,96% y un índice de plasticidad del 3,91%.

Ilustración 2: Porcentaje de Cal



La gráfica muestra el porcentaje de cal añadido y el índice de plasticidad en función de dicho porcentaje. Tomando la media que sería el 2%, de acuerdo a estos resultados se toma el porcentaje de 2 %, que sería el punto óptimo o la media evidenciando que el índice de

plasticidad con la adición de 2 % de cal a disminuido en comparación al índice de plasticidad de la muestra en estado natural que era 22.21 %, se procede a realizar el ensayo de crb.. a la muestra más la adición de 2 % de cal para saber la resistencia.

Tabla 4: Porcentaje de cal en función del CBR

PORCENTAJE DE CAL	CBR SECO "CAL"	CBR INMERSIÓN "CAL"
2	20.15	5.60

La tabla 4 muestra el promedio de porcentaje de cal en función del CBR. En este ensayo se procede a añadir cemento a la mezcla de material, 2% de cal, en las siguientes

proporciones. 2-3-4%, para realizar el ensayo de resistencia: CBR

Obteniendo los siguientes resultados:

Tabla 5: Resultados tras adición de cemento

PORCENTAJE DE CEMENTO AGREGADO (%)	RESULTADOS DE ENSAYO DE CBR SECO "CEMENTO"	RESULTADOS DE ENSAYO DE CBR INMERSIÓN "CEMENTO"
2	26.82	6.20
3	29.54	6.90
4	34.54	8.80

Tras la adición del cemento, para el 2% el CBR seco arrojó un resultado de 26,82, mientras que el CBR de inmersión un 6,20. de forma similar, para el 3% de cemento, se estableció un CBR seco del 29,54 y un CBR de inmersión de 6,90.

En última instancia, para el 4% el CBR seco de cemento fue de 34,54 mientras que el CBR de inmersión correspondió al 8,80%.

Ilustración 3: Resultados de ensayos CBR

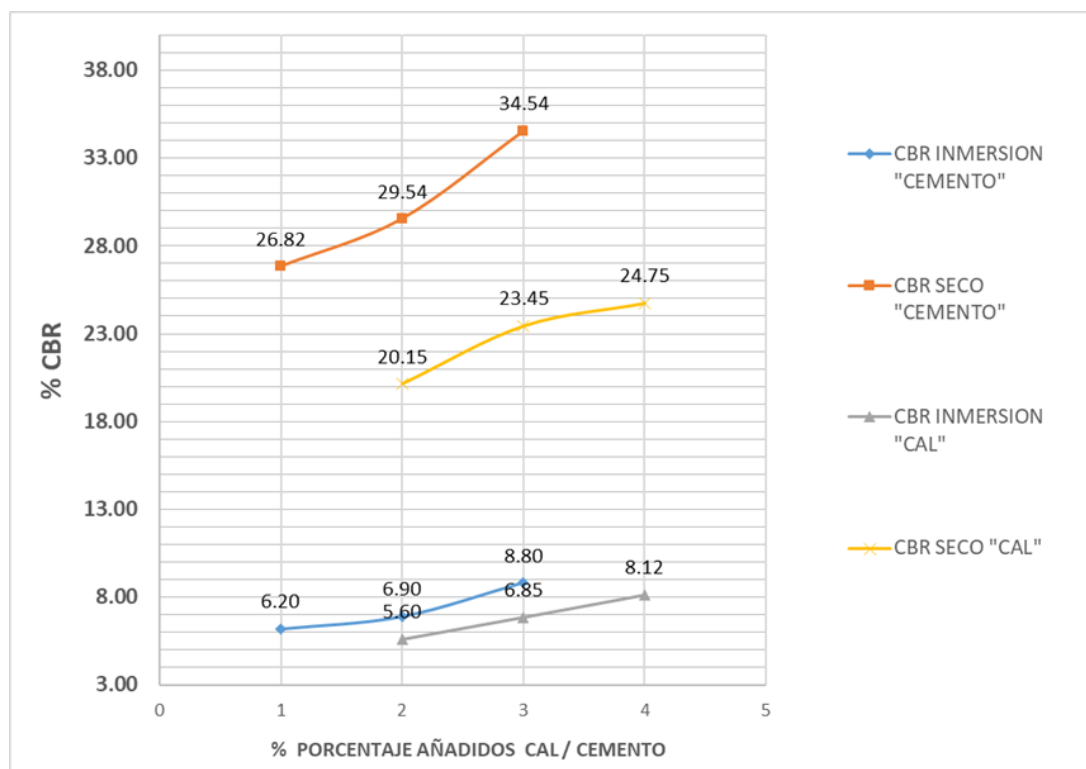


Tabla 6

CBR CON DIFERENTES PORCENTAJES DE CEMENTO (%)									
NO INMERSIÓN					IMERSIÓN				
PORCENTAJE DE CEMENTO	MOLDES VALORES DE CBR			CBR AL 90% DE SU MÁXIMA DENSIDAD SECA	PORCENTAJE DE CEMENTO	MOLDES VALORES DE CBR			CBR AL 90% DE SU MÁXIMA DENSIDAD SECA
	1	2	3			1	2	3	
2	35	26	15	26.82	2	9.8	7.5	5.9	6.20
3	38	28	19	29.54	3	10.5	7.9	6.9	6.90
4	42	31	24	34.54	4	14.1	11	8.7	8.80

Tabla 7

CBR CON DIFERENTES PORCENTAJES DE CAL (%)									
SIN INMERSIÓN					TRAS INMERSIÓN				
PORCENTAJE DE CAL	MOLDES VALORES DE CBR			CBR AL 90% DE SU MÁXIMA DENSIDAD SECA	PORCENTAJE DE CAL	MOLDES VALORES DE CBR			CBR AL 90% DE SU MÁXIMA DENSIDAD SECA
	1	2	3			1	2	3	
2	31	23	12	20.15	2	11.7	9.3	4.4	5.60
3	33	24	17	23.45	3	12.3	7.8	6.7	6.85
4	35	28	20	24.75	4	13.5	10.2	7.1	8.12

La ilustración 3 muestra los resultados de los ensayos de CBR correspondientes a CBR inmersión del cemento, CBR seco del cemento y los resultados obtenidos del CBR de la Cal sumergida y CBR de la cal seca. Una vez realizada la estabilización combinada de cal y cemento en suelo de subrasante, utilizando los porcentajes de cal 1-2-3 se ha evidenciado una disminución de la plasticidad, que al compararlo con el índice de plasticidad del material en estado natural donde se obtuvo como resultado 22.21 %, he

optado por tomar la media de estos tres porcentajes que sería el valor del 2 % obteniendo un índice de plasticidad de 8.16 %. Luego se procedió a evaluar la capacidad portante del suelo añadiendo cemento en porcentajes de 2-3-4, obteniendo como resultado al 2% de cemento un CBR de 6.20%, con 3 % de cemento CBR de 6.90 % y con la adición del 4 % de cemento un CBR de 8.80 %, obteniendo un aumento significativo en comparación con el CBR en estado natural que es de 1 %.

4. Conclusiones

La utilización de diferentes porcentajes de adiciones de cal y cemento para mejorar la resistencia de la capa subrasante.

La aplicación del 2 % de cal, mejoró las características y propiedades del suelo de subrasante, teniendo como resultado directo un incremento en la resistencia 5.60% un bajo el índice de plasticidad de 8.16%, esto a comparación con el índice de plasticidad del material en estado natural del 22.21 % al índice de plasticidad del material estabilizado del 8.16%.

Se concluye que, estabilizando el material para capa de subrasante con características y propiedades determinadas, adicionando un 2 % de cal y 4 % de cemento reduce la plasticidad al 8.16 % y aumenta la resistencia al 8.80%.

Bibliografía

Asgari, M. R., Dezfuli, A. B., & Bayat, M. (2015). Experimental study on stabilization of a low plasticity clayey soil with cement/lime. *Arabian Journal of Geosciences*, 8(3), 1439-1452.

<https://doi.org/10.1007/s12517-013-1173-1>

Banzibaganye, G., Twagirimana, E., & Kumaran, G. S. (2018). Strength enhancement of silty sand soil subgrade of highway pavement using lime and fines from demolished concrete wastes. In *International Journal of Engineering Research in Africa* (Vol. 36, pp. 74-84). Trans Tech Publications Ltd. <https://www.scientific.net/JER A.36.74>

Firoozi, A. A., Olgun, C. G., Firoozi, A. A., & Baghini, M. S. (2017). Fundamentals of soil stabilization. *International Journal of Geo-Engineering*, 8(1), 1-16. <https://doi.org/10.1186/s40703-017-0064-9>

Haqmal, Obaidurrahman & Nasir, Humaib & Multani, Mandeep. (2019). Soil stabilization using lime and industrial wastes. *Ecology, Environment and Conservation*. 25. 49-53.

Jahandari, S., Tao, Z., Saberian, M., Shariati, M., Li, J., Abolhasani, M., ... & Rashidi, M. (2021). Geotechnical properties of lime-geogrid improved clayey subgrade under various moisture conditions. *Road Materials and Pavement Design*, 1-19. <https://doi.org/10.1080/14680629.2021.1950816>



Malik, Prateek & Mishra, Sudipta. (2021). Geosynthetics Stabilizers and Fly Ash for Soil Subgrade Improvement – A State of the Art Review. International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering. 10. 97-104.
10.35940/ijitee.C8393.0110321.

<http://repositorio.puce.edu.ec/handle/22000/11180>

Zambri, Nadhirah & Md Ghazaly, Zuhayr. (2018). Peat Soil Stabilization using Lime and Cement. E3S Web of Conferences. 34. 01034. 10.1051/e3sconf/20183401034.

Manoharan, Arun Kumar & Kulanthaivel, P. & Selvapraveen, S & Vinodhkumar, S & Naveenraj, V. (2020). Strength Behaviour of Clay Soil Stabilized With Lime. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 961. 012003. 10.1088/1757-899X/961/1/012003.

Ponduri, Samatha & Rama, M. (2020). MACRO AND MICRO INVESTIGATION OF CHANGE IN CURING PERIOD ON SOIL STABILIZED WITH LIME AND CEMENT USING STONE DUST AND RHA AS ADDITIVES. Journal of Engineering and Applied Sciences. 14. 2020-2028.

Sánchez, M. (2014). Estabilización de suelos expansivos con cal y cemento en el sector Calcical del cantón Tosagua provincia de Manabí. Tesis. Ingeniería Civil. Pontificia Universidad Católica del Ecuador.