

Estabilización De Arcillas Expansivas En Subrasante De Carreteras Con Cemento Tipo MH Y Con Otros Agentes Estabilizadores: Polvo Clinker Tipo I, Polvo Clinker, OPC Y Cal Viva

Stabilization Of Expansive Clays In Road Subgrade With MH Type Cement And With Other Stabilizing Agents: Type I Clinker Dust, Clinker Dust, OPC And Quicklime

Autores

Kevin Franco Mera¹ , Eduardo Ortiz Hernández²

¹Ingeniero Civil, Investigador Independiente, Portoviejo, Manabí, 130105, Ecuador, kevinfrancomera@hotmail.com UTM. Portoviejo, Ecuador. ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0000-4938-3020>. kfranco3569@utm.edu.ec

²Ingeniería Civil, Maestrante del Instituto de Posgrado de la Universidad Técnica de Manabí Departamento de Construcciones Civiles y Arquitectura, Facultad de Ciencias Matemáticas, Físicas y Químicas, Universidad Técnica de Manabí. Portoviejo, Ecuador. ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-1885-6005>. eduardo.ortiz@utm.edu.ec

RESUMEN

La falta de estabilización adecuada de las arcillas expansivas donde se construyen diferentes estructuras es una amenaza para las cimentaciones, ya que puede provocar asentamientos durante los períodos secos y expansión durante los períodos húmedos. Para abordar este tema se realizó un análisis comparativo de la ciudadela Fabián Palacios en la parroquia Andrés de Vera del Cantón Portoviejo. El objetivo de la investigación radica en mitigar la expansión de la arcilla estabilizando la subrasante utilizando cemento tipo MH y otros agentes estabilizadores. El análisis involucró varias mezclas que contenían cemento MH y agentes estabilizantes adicionales. Los resultados del estudio enfatizan el potencial del uso de una mezcla de 5% de cemento MH y 1% de cal viva para mejorar las características del suelo. Esta mezcla particular demuestra ser muy eficaz para reducir el límite líquido y la expansividad libre del suelo. Además, mejora la resistencia del suelo, como lo demuestra el índice de Soporte de California (CBR). Estos hallazgos indican que esta combinación ofrece una solución viable para estabilizar y mejorar la calidad del suelo en diversos proyectos de construcción e ingeniería civil.

Palabras claves: agentes estabilizadores, arcilla expansiva, cemento, cal viva.

ABSTRACT

The lack of adequate stabilization of expansive clays where different structures are built is a threat to foundations, as it can cause settlement during dry periods and expansion during wet periods. To address this issue, a comparative analysis of the Fabián Palacios Citadel in the Andrés de Vera Parish of the Portoviejo Canton was carried out. The objective is to mitigate clay expansion by stabilizing the road subgrade using Type MH Cement and other stabilizing agents. The analysis involved several mixtures containing MH Cement and additional stabilizing agents. The results of the study emphasize the potential of using a mixture of 5% MH Cement and 1% quicklime to improve soil characteristics. This particular mixture proves to be very effective in reducing the liquid limit and free expansiveness of the soil. Additionally, it improves soil resistance, as demonstrated by the California Bearing Index (CBR). These findings indicate that this combination offers a viable solution to stabilize and improve soil quality in various construction and civil engineering projects.

Keywords: stabilizing agents, expansive clay, cement, quicklime.

Nota Editorial: Recibido: Abril 2024 Aceptado: Agosto 2024

1. INTRODUCCIÓN

A escala nacional, se sabe que los suelos arcillosos sufren cambios volumétricos en condiciones de humedad, lo que produce un efecto de expansión y contracción cuando se secan, dando lugar a la formación de grietas. Este fenómeno recurrente se observa comúnmente en proyectos de construcción de carreteras [1].

Según Valle [2] el paisaje natural de Manabí está compuesto predominantemente por suelos residuales, específicamente arcillas plásticas y expansivas. Estos suelos poseen propiedades que los hacen altamente susceptibles a la movilización, perdiendo sus propiedades y parámetros en los que respecta a la textura del suelo, los niveles de pH, la disponibilidad de nutrientes, la materia orgánica y la salinidad poco después de la excavación. En consecuencia, la erosión se convierte en una preocupación importante, especialmente cuando se exponen a las fuerzas de las corrientes de agua. En la ciudad de Portoviejo se puede observar un ambiente aluvial, caracterizado por depósitos recientes formados por la erosión de terrenos de mayor elevación. Estos depósitos suelen consistir en limo, grava, arcilla y arena [2].

La estabilización de suelos se utiliza ampliamente en muchas aplicaciones de ingeniería civil, como la construcción de subbases y subrasantes, la construcción de vías férreas y carreteras, la construcción de cimientos y terraplenes, el relleno para pilares de puentes y muros de contención, etc [3]. Técnicas bien establecidas de mejora y estabilización para suelos arcillosos mediante la adición de agentes cementantes como la cal viva y el cemento se utilizan a menudo para obtener materiales de ingeniería con propiedades/desempeños superiores [4, 5].

Vdovin et al., [6] en su estudio sobre estabilización de suelos, indica que la introducción de cemento Portland tipo I en suelos arcillosos produce comportamientos variables en términos de plasticidad. El límite líquido inicialmente disminuye y luego aumenta ligeramente, mientras que los valores límite plástico aumentan a medida que se añade cemento. En todas las combinaciones el índice de plasticidad disminuye, alcanzando su valor más bajo con un tratamiento del 7%, resultando un índice de plasticidad de 4,27%. Esta transformación cambia el suelo, de un suelo muy arcilloso (con un índice de plasticidad superior a 20) a un suelo con bajo contenido de arcilla (con un índice de plasticidad inferior a 7).

Del mismo modo, Arcata [7] determinó con éxito el impacto del cemento y la ceniza de quinua sobre la capacidad de soporte CBR en arcillas expansivas. Esta influencia tuvo un efecto positivo, resultando en un aumento en los valores de capacidad portante (CBR). Los resultados detallados son los siguientes: la muestra natural tuvo un valor de CBR de 4,15%, mientras que al utilizar combinaciones C-1, C-2, C-3, C-4, C-5, C-6 de materiales estabilizante con diferentes porcentajes de cemento y ceniza de quinua presento un incremento para C-1 de 7,75%, para C-2 alcanzó un 11,25%, para C-3 subió a 14,30%, para C-4 fue de 8,80%, para la combinación C-5 aumentó a 11,25%, y finalmente, para C-6 alcanzó un valor de 7,85%.

También, Espiritu Huaman [8] en su investigación utiliza la savia de aloe como medio de estabilización, con el objetivo de mejorar la capacidad de soporte CBR y minimizar la expansión de la subrasante a lo largo de la carretera Malconga - Matamarca. Los resultados indican que el suelo natural experimentó una tasa de expansión del 3,72%, mientras que la aplicación de un 25% de savia de aloe dio como resultado una tasa de expansión reducida del 2,61%. De manera similar, Sánchez [9] realizó un estudio utilizando diferentes porcentajes de cemento (3%, 5% y 7%) para mitigar la expansión. Se determinó que un contenido de cemento del 3% redujo el hinchamiento en un 57%, mientras que un contenido del 5% logró una reducción del 74%. Finalmente, con la adición de un 7% de cemento, la tasa de expansión se redujo en un impresionante 87%.

Castro y Navarro [10], realizaron un estudio sobre el uso de diferentes porcentajes de cemento Portland como agente estabilizante de suelos arcillosos de alta plasticidad. El objetivo era reducir o regular los cambios volumétricos en estos suelos. Luego de analizar el suelo natural se encontró que la expansión máxima fue del 10,14%. Sin embargo, al utilizar un contenido de cemento del 10%, la expansión disminuyó a 2,96%. De manera similar, un contenido de cemento del 15% resultó en una expansión mínima del 3,90%, y un contenido de cemento del 20% resultó en una expansión mínima del 3,18%; este fundamento coincide con trabajos presentados por Amakye y Abbey [11], Sosahab et al., [12] y Shahin y Putra [13].

Siguiendo un mismo enfoque, Kuswaya et al., [14] determinó que luego de realizar un análisis sobre el porcentaje de cemento Portland tipo I necesario para minimizar la expansión en suelos arcillosos con alta plasticidad, se puede concluir que una relación de suelo cemento con un contenido de cemento Portland tipo I del 3% es la óptima. Esta conclusión toma en consideración las normas señaladas en la técnica E-0,50 para suelos y cimentaciones. Implementando esta relación óptima, el potencial de expansión se puede reducir de medio a bajo, con una disminución del 10,58% al 7,47%. De manera similar, al medir el potencial de expansión en función del índice de plasticidad (IP), se puede lograr un potencial de expansión bajo al pasar de un índice de plasticidad medio del 33,60% a un potencial de expansión bajo con un valor de índice de plasticidad del 15,45%.

Sobre la base de los fundamentos presentados anteriormente, el objetivo de esta investigación es determinar alternativas de porcentajes con aglutinantes para estabilizar las arcillas con expansión y determinar un beneficio económico, comparando las diferentes proporciones de cemento MH¹ y mezclas de cemento MH con: Polvo Clinker Tipo I, Polvo Clinker, OPC y Cal Viva para reducir el hinchamiento de la arcilla. Por lo que se planteó realizar ensayos de laboratorios para determinar las expansiones ya sean libres o controladas obteniendo valores para cada una de las muestras de cemento MH como mezclas de cemento MH con otros tipos de agentes estabilizadores ya indicados.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

En la etapa de investigación se realizaron los ensayos de laboratorio para determinar las propiedades físicas de expansión del suelo arcilloso de la Ciudadela Fabián Palacios del Cantón Portoviejo, tomando en cuenta las especificaciones técnicas de la norma de la Sociedad Estadounidense para Pruebas y Materiales por sus siglas en inglés (*American Society for Testing and Materials*) ASTM [16]. El ensayo de granulométrica, evidencia los granos que forman la mezcla como se muestra en la tabla 1 y la figura 1:

Tabla 1: Resultados de Ensayo de Granulometría a suelo natural

Tamiz		Retenido Parcial (gr)	Retenido Parcial (%)	Retenido Acumulado (%)	Pasante Acumulado (%)
AST M	mm				
4"	100,00	00,00	00,00	00,00	100,00
3"	75,00	00,00	00,00	00,00	100,00
2"	50,80	00,00	00,00	00,00	100,00
1 ½"	38,10	00,00	00,00	00,00	100,00
1"	25,40	00,00	00,00	00,00	100,00
¾"	19,05	00,00	00,00	00,00	100,00
3/8"	9,53	00,00	00,00	00,00	100,00
N° 4	4,75	00,00	00,00	00,60	99,40
N° 10	2,00	00,00	00,00	00,60	99,40
N°40	0,43	00,00	00,00	00,60	99,40
N°200	0,08	77,30	05,60	06,20	93,80
Total de muestra		1381,10			

¹ Tipo de cemento obtenido mediante la molienda de clinker Tipo I, yeso y puzolana, que posee un calor de hidratación moderado. Se utiliza con frecuencia en la estabilización de suelos [15].

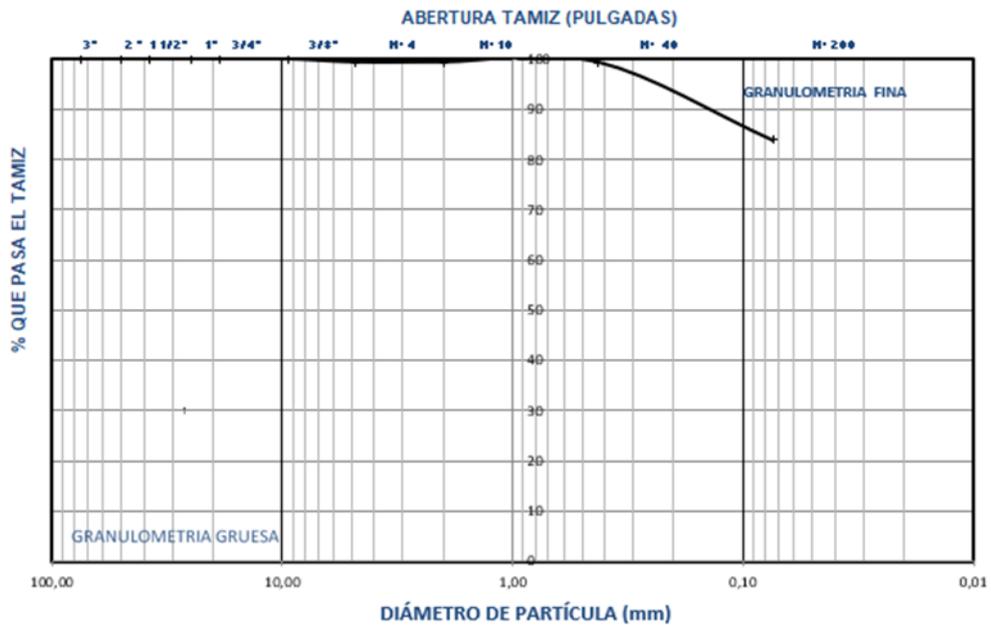


Figura 1: Curva Granulométrica del suelo natural

Asimismo, se realizaron los ensayos para obtener los límites de Atterberg que son parámetros únicos de las partículas finas de los suelos. El índice de plasticidad (IP) es la diferencia entre el límite líquido (LL) y el límite plástico (LP) como se observa los valores en la Tabla 2, siendo un parámetro que refleja las características del material para presentar deformaciones a medida que pierde o gana humedad desde el estado sólido.

Tabla 2: Resultados de los límites del suelo natural

Parámetros	Método	Resultados
Límite Líquido	ASTM D-4318	80%
Límite Plástico	ASTM D-4318	40%
Índice de Plasticidad	ASTM D-4318	41%

Sobre la base de los resultados de los ensayos de granulometría y límites de Atterberg, se determinó que el suelo posee un contenido de fino (Fc) del 93,80 % y un índice de plasticidad del 41 %. En consecuencia, según el Sistema Único de Clasificación de Suelos (SUCS), la muestra se puede clasificar como suelo MH (Limo de alta plasticidad), mientras que, de acuerdo con los estándares AASHTO, se incluye en la clasificación de suelo A-7-5, que denota específicamente un suelo arcilloso de regular a pobre, a continuación, en la tabla 3 se ilustra su clasificación:

Tabla 3: Clasificación de suelo natural

Parámetros	SUCS	AASHTO
Límite Líquido	Mayor 50%	Mínimo 41%
Índice de Plasticidad	Mínimo 55%	Mínimo 11%
Pasa Tamiz N°200	Mayor 50%	Mínimo 36%
Caracterización	MH Limo de Alta Plasticidad	A-7-5 (IP<LL-30) Suelo Arcilloso (regular a pobre)

Siguiendo los lineamientos establecidos en la norma ASTM D-1557 [8], fue realizada la prueba Proctor modificado para determinar la densidad seca máxima alcanzable al compactar el suelo. Los resultados revelaron una densidad máxima seca de 1496,20 Kg/m³ y un contenido de humedad óptimo de 25,20%. Utilizando estos parámetros específicos de densidad y humedad, posteriormente se realizó la prueba CBR, arrojando un valor del 2%. Además, después de sumergir las probetas en agua durante cuatro días, se observó que el hinchamiento promedio de las tres muestras ascendió a 17,05%.

En el ensayo de expansión libre enmarcado con la norma ASTM D-4829 para determinar el cambio volumétrico del material para lo cual se sumergió en agua, considerando los valores de densidad máxima seca y su humedad óptima del ensayo Proctor Modificado y aplicando una carga vertical sobre la muestra. Posteriormente, se le incorporó agua en las dos probetas que se trataron en un tiempo de 24 horas con los que reflejó un valor de 17% de expansión libre bajo la norma ASTM D-4546. Se procedió a cortar las muestras para ser colocadas en un anillo de confinamiento y con un edómetro obteniendo la lectura inicial sin la incorporación de agua y la lectura posterior añadiendo agua cuando el suelo se expande. Luego, se añade peso al edómetro hasta que el esfuerzo transmitido equilibre el comportamiento expansivo de la muestra sin provocar que esta se expanda dando valor de 22000 Kg/m² de esfuerzo de expansión.

Para la estabilización del suelo como subrasante vial, es esencial reducir los esfuerzos de expansión y aumentar los valores de CBR, dado que existen varios agentes estabilizadores en el mercado y es crucial identificar el más adecuado. Según el ACI 230.1R-09, para la clasificación de suelo AASHTO (A-7), se especifica un rango de contenido de cemento requerido entre el 10% y el 16%.

Entre los criterios para la estabilización de suelos se incluyen los utilizados por la Fuerza Aérea de los Estados Unidos. Al seleccionar un agente estabilizador, se consideran parámetros del suelo como granulometría, índice de plasticidad y textura. Además, se tiene en cuenta la clasificación de suelos expansivos según la NSR 2010 Título H-Estudios Geotécnicos en la tabla H.9.1-1, donde su potencial de expansión es clasificado como Muy Alto.

La granulometría del suelo, que se clasifica como suelo fino, es una consideración ideal al momento de mezclar cemento y sus componentes adicionales, como se muestra en la Tabla 4 de esta investigación:

Tabla 4: Porcentaje de mezclas de cemento MH y de los agentes estabilizadores

Parámetros	Mezcla 1	Mezcla 2	Mezcla 3	Mezcla 4	Mezcla 5	Mezcla 6	Mezcla 7	Mezcla 8
Suelo natural	X	X	X	X	X	X	X	X
Cemento MH	5%	10%	15%	20%	5%	5%	5%	5%
Clinker EU					1%			
Clinker Prensado						1%		
OPC Tipo I							1%	
Cal Viva								1%

Tal como se observa en la tabla 4, la composición de cada mezcla comprende varios elementos, como suelo natural, cemento MH, clinker EU, clinker prensado, OPC Tipo I y cal viva. La proporción específica de cada elemento difiere según la mezcla particular. A modo de ejemplo, ciertas mezclas consisten únicamente en proporciones variables de suelo natural y cemento MH, mientras que otras incorporan cantidades adicionales de clinker EU, clinker prensado, OPC Tipo I y cal viva en porcentajes variables.

En cada mezcla existe una inclusión al suelo natural de cemento MH, lo que indica su papel como componente fundamental como se puede observar en la Tabla 4, destaca su importancia como aglutinante en la mayoría de las formulaciones.

El uso de clinker EU, clinker prensado, OPC Tipo I y cal viva en diversas proporciones dentro de diferentes mezclas indica que se combinan estratégicamente para dar cualidades específicas a cada mezcla, incluida resistencia, durabilidad y otros atributos deseados como reducción de cambio volumétrico, reducción de plasticidad, características de compactación que son esenciales para fines de construcción.

3. RESULTADOS

Los resultados de los ensayos de límite líquido, límite plástico y de índice de plasticidad se muestran en la tabla 5 donde se refleja los resultados para las muestras estudiadas. Se observaron incrementos en el LL en las mezclas 1, 5, 6 y 7 respecto a los valores iniciales del suelo natural, tan solo en la mezcla 8 que es la proporción con 5% de cemento MH y 1% de cal viva se redujo el valor del límite líquido del suelo natural.

Tabla 5: Resultados de los límites Atterberg de los porcentajes de cemento MH y de las diferentes Mezclas

Parámetros	Mezcla 1	Mezcla 2	Mezcla 3	Mezcla 4	Mezcla 5	Mezcla 6	Mezcla 7	Mezcla 8
Límite Líquido	87%				104%	102%	104%	79%
Límite Plástico	47%				68%	47%	70%	55%
Índice de Plasticidad	40%				35%	55%	34%	24%

Al examinar la Tabla 5, se evidencia que la mezcla 1, compuesta por el suelo natural y 5% de cemento MH, arrojó un límite líquido de 87%, un límite plástico de 47% y un índice de plasticidad de 40%. En consecuencia, la adición de cemento MH al suelo natural resultó en un aumento de contenido de humedad del suelo, por lo que no es viable realizar los ensayos de límites de Atterberg en las mezclas 2, 3 y 4.

En las mezclas 5, 6 y 7 que son la composición de suelo natural con cemento MH y (Clinker EU, Clinker Prensado, OPC Tipo I) se presentaron valores de límites líquidos más alto que en el suelo natural por su composición química como el silicato de calcio al reaccionar y mantener el agua.

Al mezclar cemento MH, cal viva y el suelo natural (mezcla 8), se obtuvo un límite líquido del 79%, un límite plástico del 47% y un índice de plasticidad del 24% como se muestra la Figura 2 del proceso del ensayo. Esto resultó en la ventajosa activación de la cal viva al entrar en contacto con el agua, lo que provocó una reacción exotérmica que redujo el contenido de humedad en el suelo natural.



Figura 2: Secado de las muestras para obtención de los Límites Atterberg

El esfuerzo de expansión que provoca la variación de volumen del material, en la mezcla 8 que contiene la adición al suelo natural de un 5% de cemento MH y 1% de Cal Viva presentó un mejor desempeño para disminuir el esfuerzo de expansión con un valor de 2500 Kg/m², lo que representa una disminución del 89% del esfuerzo de expansión del suelo natural.

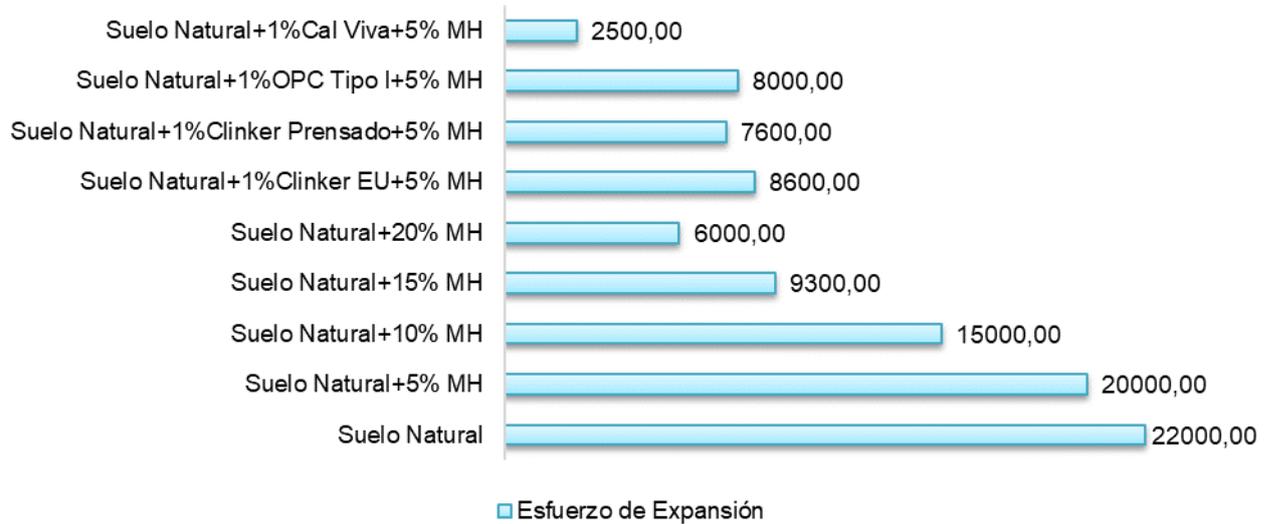


Figura 3: Esfuerzo de expansión (Kg/m²)

La muestra que presenta mejores resultados, como se muestra en la Figura 4, en cuanto a la reducción de la expansividad es la mezcla 8 con 5% de cemento MH más 1% de Cal Viva, para la que se obtiene un valor de expansión libre de 3% con un potencial expansivo bajo de acuerdo el NSR 2010 Titulo H-Estudios Geotécnicos, este valor representa una reducción de la expansividad del 82% con respecto a la muestra de suelo natural. Cabe destacar que la muestra con mayor adición de cemento MH, es decir con 20%, solo alcanza un resultado de 9% de expansión y un potencial expansivo bajo, por lo cual no representa una alternativa aceptable por temas de costos.

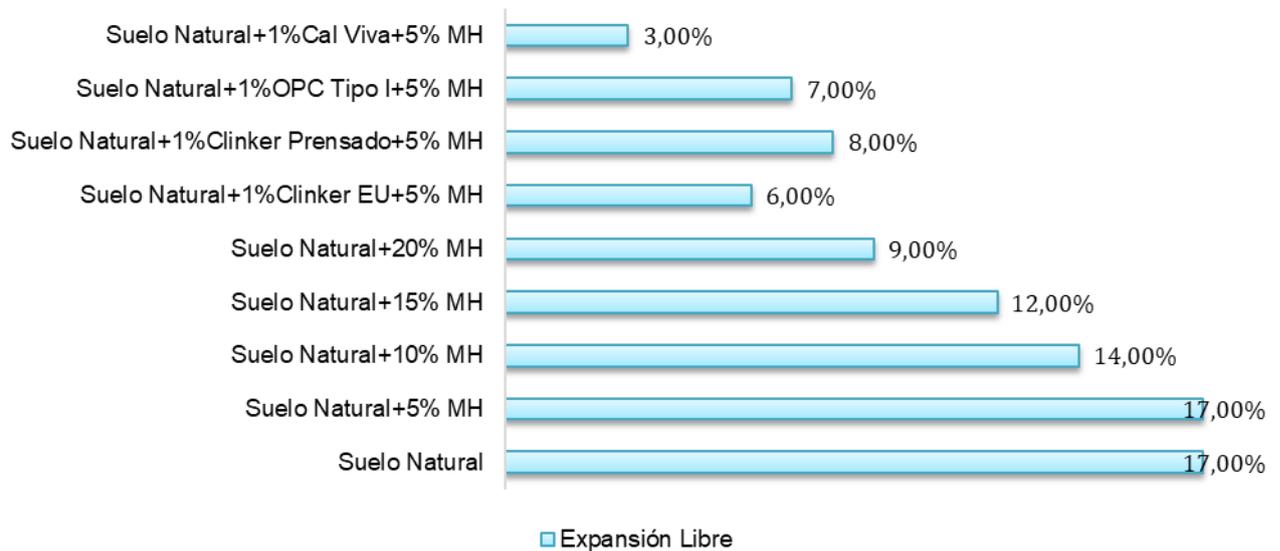


Figura 4: Esfuerzo de expansión libre

Los resultados de los ensayos de CBR mostrados en la figura 5 indican que la muestra que presenta mejores resultados es la que tiene adición de 20% de cemento MH con un valor de 47% de CBR, seguido de la muestra con 15% de cemento MH con un valor de 31% de CBR y la muestra con 5% de MH y 1% de cal viva, con un valor de 29% de CBR, convirtiéndola en la opción con mejores resultados dentro del grupo de muestras con la adición al suelo natural de 5% de cemento MH más 1% de cal viva.

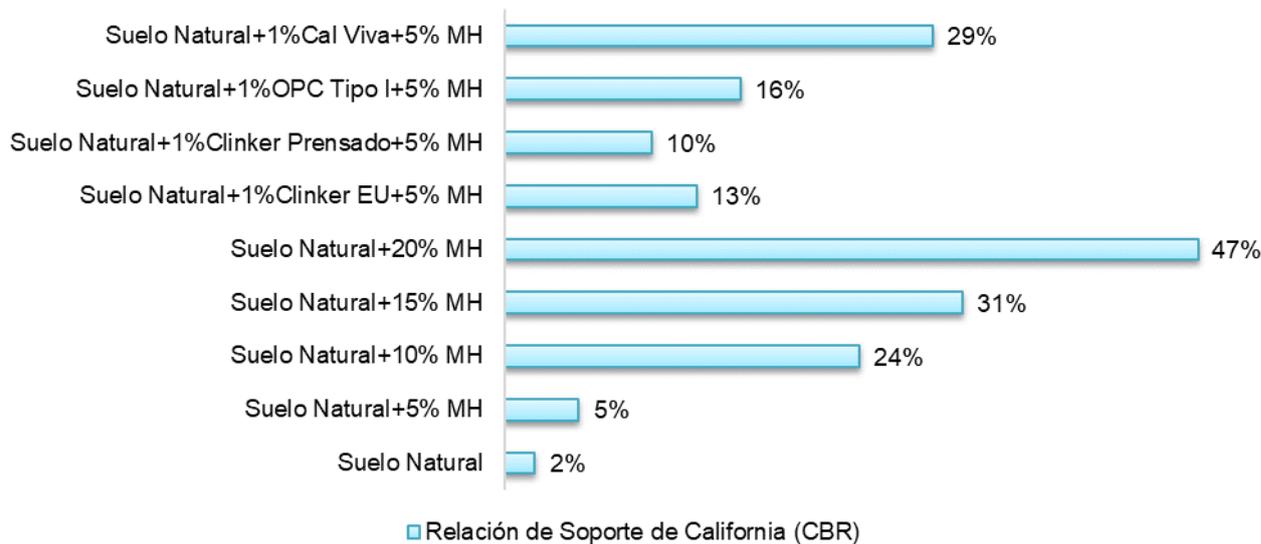


Figura 5: Relación de Soporte de California (CBR)

Al utilizar una combinación de 5% de cemento MH y 1% de cal viva, el esfuerzo de expansión de la arcilla se redujo efectivamente a 2500 Kg/m^2 , lo que llevó a una reducción del 88,63% respecto al suelo natural. Además, la capacidad de resistencia del suelo CBR experimentó un incremento, alcanzando un notable incremento del 29% con relación a la capacidad del suelo natural.

4. CONCLUSIONES

Las propiedades del suelo están muy influenciadas por la composición de las diversas mezclas, como lo demuestran los resultados de las pruebas de límite plástico, límite líquido, índice de plasticidad y expansión. Cabe destacar que la introducción de cemento MH y otros materiales cementosos conduce a un aumento del límite líquido para la mayoría de las mezclas. Sin embargo, en el caso de la mezcla 8, que incorpora un 5% de cemento MH y un 1% de Cal Viva, el límite líquido en realidad disminuye.

Entre las diversas mezclas probadas, la combinación que contenía 5 % de cemento MH y 1 % de cal viva produjo los resultados más favorables en términos de minimizar el esfuerzo de expansión. Esta mezcla en particular mostró una impresionante disminución del 89 % de esfuerzo de expansión en comparación con el suelo natural. Además, exhibió una reducción sustancial del 82 % en la expansividad libre, demostrando un potencial expansivo bajo con respecto a la clasificación de la NSR 2010 en contraste con otras muestras.

Cuando se trata de resistencia del suelo, la combinación de 5% de cemento MH y 1% de cal viva, demostró una mejora significativa a las características del suelo, mostrando un aumento del 29% en el Índice de Soporte de California (CBR) en comparación con el suelo natural del 2%. Esta mezcla específica es muy prometedora para su implementación en proyectos de construcción viales e ingeniería civil, y presenta una alternativa práctica y rentable para mejorar la estabilidad y la longevidad de estructuras construidas en terrenos con alto porcentaje de expansión.

1. J. C. Fano Descalzi y M. Chávez Céspedes, «Diseño estructural de un pavimento básico reciclado y mejorado con cemento portland para diferentes dosificaciones en el proyecto de conservación vial de Huancavelica». Tesis de masterado. 2017. <https://upc.aws.openrepository.com/handle/10757/622302>
2. E. Valle Gómez, «Diseño de la dosificación para hormigón compactado con rodillo y base estabilizada con cemento para su uso en las vías de Manabí. Trabajo final para la obtención del título: Ingeniero Civil.». Tesis de doctorado. ESPOL. FICT, 2009. <https://www.dspace.espol.edu.ec/handle/123456789/45463>
3. A. Behnood y E. M. Golafshani, «Predicting the compressive strength of silica fume concrete using hybrid artificial neural network with multi-objective grey wolves», *J Clean Prod*, vol. 202, pp. 54-64, 2018. https://www.researchgate.net/publication/326977569_Predicting_the_compressive_strength_of_silica_fume_concrete_using_hybrid_artificial_neural_network_with_multi-objective_grey_wolves
4. E. A. Basha, R. Hashim, H. B. Mahmud, y A. S. Muntohar, «Stabilization of residual soil with rice husk ash and cement», *Constr Build Mater*, vol. 19, n.o 6, pp. 448-453, 2005. https://www.researchgate.net/publication/229363540_Stabilization_of_residual_soil_with_rice_husk_ash_and_cement
5. S. K. E. L. A. J. Buitrón Landeta, «Estudio de la estabilización de arcillas expansivas de Manabí con ceniza del volcán Tungurahua». Tesis de doctorado. Escuela Politécnica Nacional. pp. 1-138, 2018. <https://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/19654>
6. Vdovin, E., Mavliev, L., & Stroganov, V. Interaction of clay soil components with portland cement and complex additive based on octyltriethoxysilane and sodium hydroxide. *n IOP conference series: Materials Science and Engineering(1)*, 890. 2020. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/890/1/012031>
7. Arcata, G. Aplicación de cemento y ceniza de quinua en la estabilización de arcillas expansivas en el camino vecinal Chijichaya – Siraya, Puno 2022. Tesis de master. Universidad Cesar Vallejo. 2020. <https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/98720>
8. Espiritu, A. Mejoramiento de la capacidad de soporte de la subrasante mediante la aplicación de savia de sabila en la carretera la esperanza-malcongá, km 5 matamarca-2018. Tesis de master. Universidad de Huanuco. 2019. <http://repositorio.udh.edu.pe/123456789/1819>
9. Sánchez, M. Estabilización de suelos expansivos con cal y cemento en el sector Cacical del cantón Tosagua provincia de Manabí. *Revista Científica UNTRM: Ciencias Naturales e Ingeniería*, 3(2), 33-40. 2020. <http://bibliotecavirtualoducal.uc.cl/vufind/Record/oai:localhost:123456789-1434135>
10. Castro, M., & Navarro, J. Propuesta de mejora de suelos arcillosos de alta plasticidad a nivel de subrasante mediante la adición de cemento 99 Portland para disminuir el cambio volumétrico provocado por las condiciones climáticas en la Av. Padre salas, Villa Rica, Oxapampa, Pasco. Tesis de doctorado. Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas. 2020. <https://repositorioacademico.upc.edu.pe/handle/10757/652573>
11. Amakye, S. Y., & Abbey, S. J. Understanding the performance of expansive subgrade materials treated with non-traditional stabilisers: A review. *Cleaner Engineering and Technology*, 4, 100159. 2021. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666790821001191>
12. Sosahab, J. S., Ardakani, A., & Hassanlourad, M. Resilient response and strength of highly expansive clay subgrade stabilized with recycled concrete aggregate and granulated blast furnace slag. *Construction and Building Materials*, 408, 133816. 2023. <https://ouci.dntb.gov.ua/en/works/ldwP6G04/>
13. Shahin, M., & Putra, A. 2019. Use of slag (with cement) for improving the performance of expansive soil of road pavement subgrade. In *International Conference on Advances in Civil and Environmental Engineering*. 2019. https://www.researchgate.net/publication/331777632_Use_of_slag_with_cement_for_improving_the_performance_of_expansive_soil_of_road_pavement_subgrade
14. Kuswaya, W., Marsiano, W., & Syafalni, S. Jambi and Palembang clay soil stabilization for pavement matrix in road construction by using Portland cement type I. In *MATEC Web of Conferences*. EDP Sciences, 276. https://www.researchgate.net/publication/331776283_Jambi_and_Palembang_clay_soil_stabilization_for_pavement_matrix_in_road_construction_by_using_Portland_cement_type_I
15. E. R. Dorsey et al., «Global, regional, and national burden of Parkinson's disease, 1990–2016: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2016», *Lancet Neurol*, vol. 17, n.o 11, pp. 939-953, 2018. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/30287051/>
16. D. ASTM, W. A. Test, C. S. Test, y A. R. Test, «American society for testing and materials (ASTM)», *American Association of State Highway and Transportation Officials-AASHTO Standards, United States*, 1950. <https://downloads.transportation.org/hm-33tableofcontents.pdf>