

Estabilización De Suelos Arcillosos Con Enzima Orgánica Para Subrasante De Carreteras

Stabilization Of Clay Soils With Organic Enzyme For Road Subgrade

Autores

César Andrés Cedeño Tuárez¹, Eduardo Tejada Piusseaut²

¹ Ingeniero Civil, Estudiante de Posgrado, Maestría Profesional en Ingeniería Civil, Mención Vialidad. Universidad Técnica de Manabí, Av. José María Urbina y Che Guevara Portoviejo, Manabí, Ecuador, ccedeno8291@utm.edu.ec

² Ingeniero Civil, Doctor en Ciencias, Docente en Universidad Técnica de Manabí, Av. José María Urbina y Che Guevara Portoviejo, Manabí, Ecuador, eduardo.tejada@utm.edu.ec

RESUMEN

La subrasante es el cimiento de la estructura de un pavimento, la cual influye directamente en el dimensionamiento de cada una de las capas que la comprenden. La estabilización persigue mejorar su capacidad portante, y con ello reducir costos y espesores del pavimento. En la investigación se aborda la estabilización de un suelo limo-arcilloso mediante una enzima orgánica, la cual se le adicionan 3ml del aditivo en un volumen de 5 galones de material, para evaluar el efecto del tiempo de curado y de la densidad alcanzada mediante la variación de la energía de compactación aplicada. Como verificación de los resultados se incrementa la cantidad de aditivo hasta 9ml para el mismo volumen de suelo. Se comprobó que la variación del tiempo de curado no tuvo influencia significativa en el CBR del suelo estabilizado, mientras que la energía aplicada tuvo cierta influencia. El aditivo produjo incremento en la resistencia tras inmersión respecto al suelo no estabilizado, aunque este aumento no fue suficiente para una subrasante de carretera. El hinchamiento del suelo estabilizado por efecto de la inmersión si disminuyó apreciablemente con los días de curado.

Palabras claves: estabilización de suelos, subrasante de carretera, subrasante estabilizada con enzima orgánica.

ABSTRACT

The subgrade is the foundation of the pavement structure, which directly influences the dimensioning of each of the layers that comprise it. The stabilization seeks to improve its bearing capacity, and thereby reduce costs and thickness of the pavement. The research addresses the stabilization of a silt-clay soil by means of an organic enzyme, which is added 3ml of the additive in a volume of 5 gallons of material, to evaluate the effect of curing time and the density achieved by variation of the applied compaction energy. As a verification of the results, the amount of additive is increased up to 9 ml for the same volume of soil. It was verified that the variation of the curing time did not have a significant influence on the CBR of the stabilized soil, while the applied energy had some influence. The additive produced an increase in the resistance after immersion with respect to the unstabilized soil, although this increase was not sufficient for a road subgrade. The swelling of the soil stabilized by the effect of immersion did decrease appreciably with the days of curing.

Keywords: soil stabilization, highway subgrade, organic enzyme stabilized subgrade.

Nota Editorial: Recibido: Enero 2023 Aceptado: Mayo 2023

1. INTRODUCCIÓN

La subrasante es el suelo natural que sirve como cimiento a la estructura del pavimento, por consiguiente, los espesores de sus capas van estrechamente relacionadas a su capacidad de soporte.

Los suelos con baja capacidad de soporte y mala calidad generalmente no cumplen con los requerimientos necesarios para ser empleados en la construcción de pavimentos, por lo que al realizar un proyecto vial se opta, en el mayor de los casos, cambiar el suelo natural por otro de préstamo en las cercanías del proyecto [1].

Una solución más económica es la estabilización de suelos, en la que se modifican las propiedades físicas del material a través de procedimientos mecánicos o mediante la incorporación de productos químicos, naturales o sintéticos [2]. Las mejoras más comunes logradas a través de la estabilización de suelos incluyen una mejor granulometría, la reducción del índice de plasticidad o del potencial de hinchamiento, así como el aumento de la durabilidad y la resistencia [3].

Los métodos de estabilización de suelos pueden clasificarse en: a) mecánicas, que consisten en compactar el suelo de manera estática o dinámica, para obtener un aumento en su densidad y resistencia, disminuyendo la porosidad y permeabilidad o mediante el mezclado con otro material, para mejorar la granulometría y reducir la plasticidad; b) físicas, que consisten en modificar las propiedades de los suelos mediante geosintéticos tales como geotextiles, geomallas, geomembranas, geocompuesto o geoceldas; c) químicas, donde se le añaden al suelo productos químicos o aditivos que modifican sus propiedades, tales como cemento portland, cal, cenizas volantes, escorias siderúrgicas de alto horno, sales, emulsiones asfálticas, polímeros, etc.; d) biológicas, mediante la utilización de enzimas orgánicas que actúan aumentando el grado de aglutinamiento y compactación de las partículas del suelo [4].

La estabilización de suelos limosos o arcillosos con enzimas orgánicas consiste en la aplicación de un compuesto orgánico líquido diluido en agua que actúa sobre el suelo para reducir los vacíos entre las partículas, minimizando el agua absorbida para una compactación máxima. Las enzimas reaccionan con la materia orgánica del suelo para formar un material cementoso. Esto disminuye la capacidad de hinchamiento de las partículas del suelo y reduce la permeabilidad [5]

En la literatura sobre el tema se mencionan diferentes productos orgánicos [5-6], dentro de los cuales se encuentra el Eco-Zyme, que es un material atóxico fabricado mediante un proceso de fermentación natural utilizando azúcar y verduras. También se mezcla con un surfactante biodegradable que disminuye la tensión superficial, acercando las enzimas a las partículas del suelo y acelera las reacciones enzimáticas. Cuando se mezcla con agua y se aplica durante la compactación, Eco-Zyme actúa sobre los finos orgánicos del suelo a través de un proceso de unión catalítica actuando como un agente cementante [6].

El aditivo de enzima orgánica a utilizar, es un líquido natural de color marrón y de olor agradable, que no es tóxico, corrosivo e inflamable, perfectamente soluble en agua. Al ser un líquido seguro, no se necesitan equipos o dispositivos especiales para su manipulación.

En este estudio, se analiza la resistencia de un suelo arcilloso que no presenta condiciones aceptables como subrasante, procedente de un sector de Portoviejo, provincia de Manabí-Ecuador, al cual se le aplica un producto orgánico como estabilizante, con el objetivo de evaluar su efectividad en la reducción del hinchamiento por inmersión en agua de las probetas y en el aumento de su resistencia.

2. DESARROLLO

Para el presente trabajo experimental se toma en consideración las normas técnicas de Ecuador (MOP-001-F 2002) [7] y experiencias en la bibliografía sobre la estabilización de suelo con la aplicación de enzimas orgánicas, donde se recomienda la utilización de este material como aditivo en suelos de granulometría fina (limos o arcillas). Con estos lineamientos, se procedió a obtener la muestra de suelo natural en un sector por medio de una calicata, donde por experiencia existe gran presencia de suelos arcillosos.

2.1. Caracterización Del Suelo En Su Estado Natural

Para la caracterización del suelo en su estado natural se prepararon muestras para realizar los siguientes ensayos:

- Ensayos de Granulometría por lavado, ASSHTO T.88_ASTM D-422.
- Límites de Atterberg, AASHTO T.89_ASTM D-4318.
- Proctor Modificado, AASHTO T-180_ASTM D -1557.
- California Bearing Ratio (CBR), AASHTO T-193_ASTM D-1883.

Los resultados de los Límites de Consistencia y clasificación del suelo natural se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1: Caracterización del suelo natural

CARACTERÍSTICAS	MUESTRA 1	MUESTRA 2	MUESTRA 3	PROMEDIO
LÍMITE LÍQUIDO (%)	52,88	56,01	59,43	56,1
LÍMITE PLÁSTICO (%)	33,85	32,89	-	33,4
ÍNDICE PLÁSTICO (%)	22,7			
CLASIFICACIÓN	ASTM	MH (Limo de alta plasticidad)		
	AASHTO	A-7-5		

De acuerdo a los resultados de ensayos, el suelo tiene un porcentaje pasado por el tamiz 200 de 87,3% y su Índice Plástico es de 22,70%, por tanto, es un suelo fino, limo-arcilloso. Mediante el método SUCS se clasifica como *MH* (Limo de alta plasticidad) y según método AASHTO es un suelo A-7-5. Según la bibliografía consultada [6], las enzimas orgánicas actúan directamente sobre las partículas finas como limos o arcillas, recomendándose un Índice Plástico mayor de 10%.

Para la determinación de la densidad máxima seca del suelo natural, se empleó el ensayo de Proctor Modificado, AASHTO T-180_ASTM D -1557, cuyos resultados se muestran en la tabla 2.

Tabla 2: Densidad máxima seca y porcentaje de humedad del suelo natural

DENSIDAD MÁXIMA SECA	1531 kg/m ³
% DE HUMEDAD ÓPTIMA	23,50 %

Para la determinación de la resistencia de diseño, se ejecutó el ensayo *California Bearing Ratio* (CBR), AASHTO T-193_ASTM D-1883, preparando tres muestras con el porcentaje de humedad óptima del suelo (23,50%), y compactadas con tres energías diferentes (56, 25 y 11 golpes), para ser ensayadas a CBR después de la inmersión por 4 días, cuyos resultados se muestran en la Figura 1.

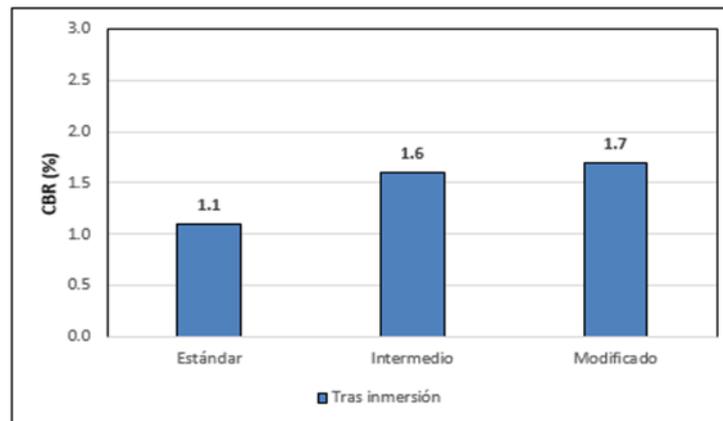


Figura 1: CBR del suelo natural, tras inmersión

La figura 1 muestra la variación con la energía aplicada en el CBR después de la inmersión por 4 días. En general, se observa muy poca influencia de la energía aplicada en el valor de CBR, como consecuencia de la poca variación observada en la densidad del suelo. Entre la densidad obtenida con la energía Estándar y la Intermedia, el incremento es solo de 0,5%, pero en la medida en que se incrementa aún más la densidad por efecto de la energía aplicada, esta variación resulta menor, incluso produciéndose un incremento similar de densidad entre la energía Intermedia y la del Modificado, de manera que no existe una variación significativa en el incremento de resistencia, porque estas variaciones son menores que la propia dispersión que se produce en el ensayo de CBR. Se puede establecer en este caso un valor de CBR de 1,7.

Según el SATCC (Draft Code of Practice for the Design of Road Pavements Prepared by the Division of Roads and Transport Technology) [9], las subrasantes se clasifican en base al CBR en S1, S2, S3, S4, S5 y S6, siendo S la denominación de subrasante y el número su nivel (ver tabla 3). Este código indica que las subrasantes más pobres son las que tienen valores de CBR menores del 5%, los cuales deben ser mejorados. El suelo en estudio se clasifica como S1, según dicho código, por tanto, debe ser estabilizado para su empleo como subrasante de carreteras.

Tabla 3: Clasificación de la subrasante, SATCC. Draft Code of Practice for the Design of Road Pavements Prepared by the Division of Roads and Transport Technology

Designación de clase de subrasante						
Grado de CBR en Subrasante (%)	S1	S2	S3	S4	S5	S6
		2	3 - 4	5 - 7	8 - 14	15 - 29

Como resultado de la prueba de CBR se determinó también el porcentaje de hinchamiento de cada muestra, por cada día de inmersión (4 días). La tabla 4 contiene los resultados del hinchamiento del suelo en la medida en que aumenta el tiempo en inmersión y para cada energía de compactación aplicada y en la figura 2 se pueden apreciar los cambios producidos en el hinchamiento. Nótese la influencia del incremento de humedad hasta la saturación y como la densidad de las muestras obtenidas mediante la energía aplicada también genera reducción del hinchamiento por la disminución de los vacíos. Aun con la energía del Modificado, el hinchamiento después de 4 días en inmersión es excesivo (7%), muy superior al 2% especificado para las subrasantes viales, según PG-3 [8].

Tabla 4: Porcentaje de hinchamiento para suelo natural con días de inmersión (4 días) para diferentes energías de compactación

LECTURA DEL HINCHAMIENTO (%)			
Días de inmersión	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3
	(11 golpes)	(25 golpes)	(56 golpes)
1	0	0	0
2	7,23	5,25	4,36
3	8,02	6,53	6,44
4	8,14	7,50	6,93

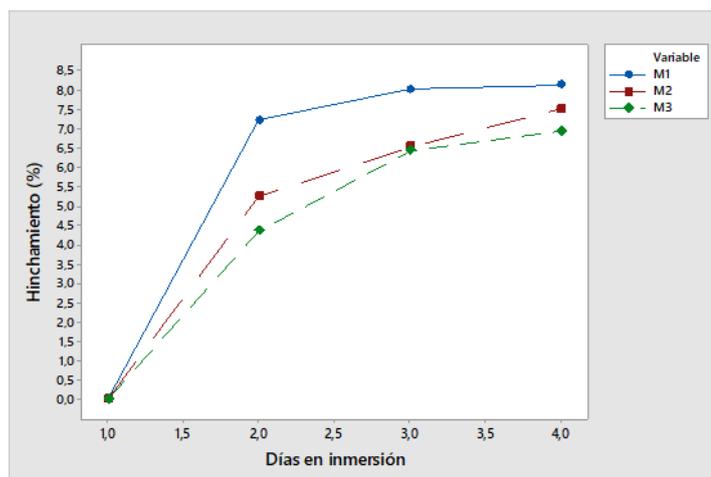


Figura 2: Variación del porcentaje de hinchamiento por cada día de inmersión (4 días) para diferentes energías de compactación para suelo natural. M1 (energía Estándar); M2 (energía Intermedia); M3 (energía Modificado).

2. 2. Suelo Estabilizado Con La Enzima Orgánica

Para el trabajo experimental se concibieron dos dosificaciones del aditivo estabilizante para un volumen de suelo determinado, que se añadieron al suelo natural, además de los ensayos al suelo natural para comprobar el efecto de la aplicación del aditivo.

La cantidad de la enzima orgánica fue añadida en porciones de 3 y 9 ml por cada 5 galones de suelo seco, teniendo en cuenta que el aditivo es utilizado en cantidades muy pequeñas en relación al volumen de suelo a estabilizar. El suelo, luego de secado se pesó para determinar la cantidad de agua que debe añadirse respecto a la humedad óptima, considerando el 1% menos. Se añade la cantidad de aditivo al volumen de agua correspondiente a la óptima, mezclando hasta su correcta homogenización.

Se coloca la mezcla de suelo más el agua con el aditivo en el molde y se realiza la compactación especificada en el ensayo de CBR, utilizando 3 moldes para el ensayo en seco y 3 moldes para el ensayo tras inmersión.

Luego de preparadas las muestras con 3ml del aditivo, para el ensayo a CBR, se esperó que el aditivo actuara por varios días (7, 14 y 21 días), dejando secar las muestras a temperatura ambiente del laboratorio para su curado, para luego ensayar de forma inmediata las tres muestras en seco y sumergir en agua las otras tres muestras por cuatro días, ensayadas posteriormente tras inmersión. También se consideró para el suelo estabilizado con 3ml de enzima orgánica, la influencia de la energía de compactación, ensayando las muestras con 3 energías diferentes (56, 25 y 11 golpes por capa). En las cantidades de aditivo de 9ml se optó solo por un curado de 14 días, aplicando también energías diferentes.

Los resultados del ensayo de CBR de cada una de las muestras se representan en las figuras 3, 4 y 5, donde se relaciona en cada caso la densidad seca con el valor de Índice Soporte de California, CBR por sus siglas en inglés (AASHTO T-193_ASTM D-1883), en seco y tras inmersión. Las figuras 3 y 4 muestran los resultados del CBR con tiempos de curado para la mezcla de 7 y 14 días respectivamente, utilizando en ambos casos 3 ml de la enzima orgánica.

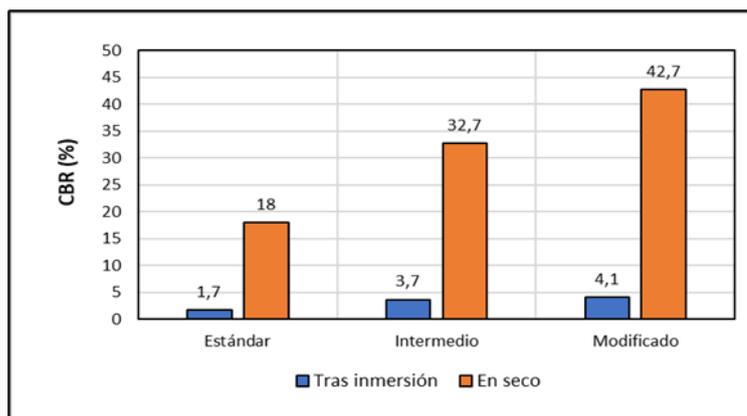


Figura 3: Resultados del CBR del suelo estabilizado con 3ml de aditivo y 7 días de curado, para diferentes energías aplicadas, ensayados en seco y tras inmersión.

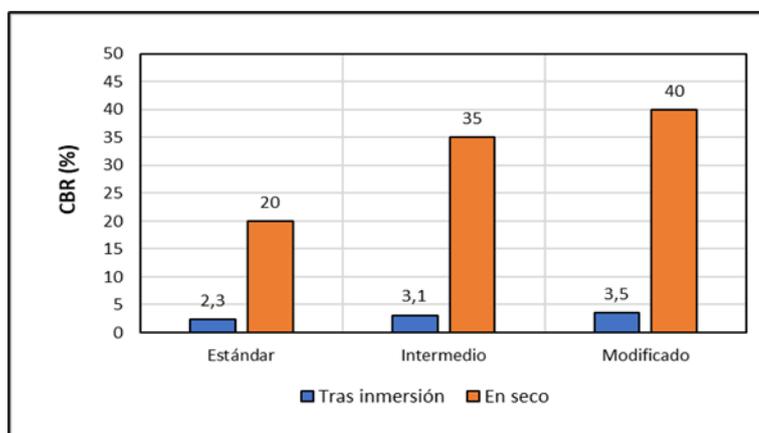


Figura 4: Resultados del CBR del suelo estabilizado con 3ml de aditivo y 14 días de curado, para diferentes energías aplicadas, ensayados en seco y tras inmersión.

Los resultados demostraron que, en el ensayo en seco, tanto para 7 como para 14 días de curado los valores de CBR alcanzados fueron elevados. En las figuras 3 y 4 se observa que el CBR en seco aumenta con la energía aplicada, como consecuencia del incremento de la densidad de la mezcla. En ambas figuras, se observa disminución en la variación del CBR seco entre las energías Intermedia y Modificado, respecto a la variación producida entre las energías Estándar e Intermedia, lo que se debe a que el suelo experimenta cada vez menor reducción de vacíos con el incremento de energía.

Tras inmersión se observan valores muy reducidos, para cualquier valor de densidad alcanzada, no obstante, el suelo ha experimentado un incremento en su resistencia producto de la aplicación del aditivo, de manera que el CBR se incrementó desde un valor de 1,7% en su estado natural, a la mayor densidad, hasta un CBR entre 3,5 - 4,1% una vez estabilizado, lo que demuestra que el aditivo tuvo alguna influencia, aunque la calidad de la subrasante solo ha pasado desde un tipo S1 a S2 (Tabla 3).

La resistencia conservada se determina como la relación expresada en porcentaje, entre la resistencia tras inmersión y la resistencia en seco; representa cuanto se reduce la resistencia de la mezcla por efecto de la saturación, como una forma de evaluar la efectividad del aditivo aplicado. En todas las pruebas la resistencia conservada se encuentra en valores muy bajos, solo entre el 9 y 12%. Al respecto es importante señalar que las condiciones a las cuales se someten las pruebas para el diseño, en la que las muestras son mantenidas por cuatro días en inmersión, provocan con ello la saturación del suelo, sin embargo, las subrasantes de carreteras se deben mantener en condiciones de semisaturación, con el correcto funcionamiento del sistema de drenaje superficial y subterráneo.

Aplicando a las muestras un curado por 14 días no experimentó un incremento significativo respecto a los 7 días, por lo que se decide, para corroborar dicho resultado, probar con el curado hasta 21 días, pero utilizando solo la condición tras inmersión, en vista de que es la más desfavorable, cuyo resultado se representa en la figura 5. En resumen, se comprobó que la variable tiempo de curado no tuvo influencia en los valores de CBR en seco, para 7 y 14 días y en el CBR tras inmersión, incluso con 21 días, no se observaron diferencias significativas, por consiguiente, con este aditivo a los 7 días de curado ya se ha alcanzado la resistencia final en la mezcla.

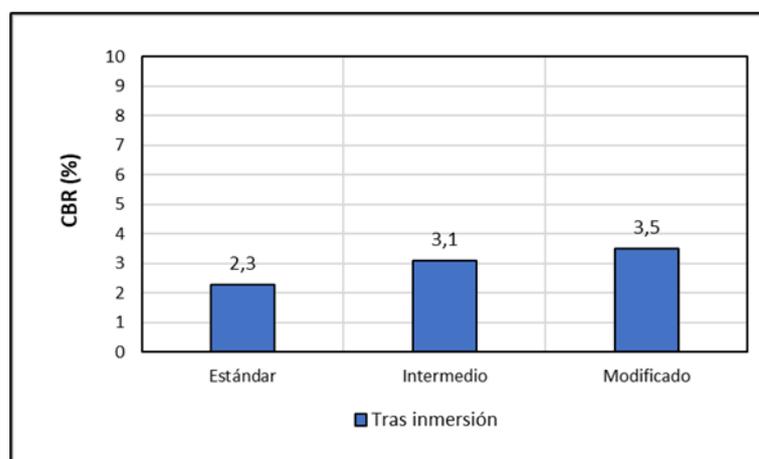


Figura 5: CBR del suelo estabilizado tras inmersión, con 3 ml de enzimas orgánicas y 21 días de curado

Se comprobó la influencia de la energía aplicada en el incremento del CBR, lo que se debe al aumento de la densidad. Se apreció también un efecto combinado de tiempo de curado con la densidad máxima alcanzada producto de dicha energía, es decir, a los 7 días de curado con la energía del modificado se alcanza una resistencia semejante a la que se logra con la energía estándar con 21 días de curado.

Los resultados del ensayo de hinchamiento medidos en el ensayo de CBR, se representan en la tabla 5, para el suelo estabilizado con 3 mililitros de la enzima orgánica, donde se puede observar la influencia de la energía aplicada y el tiempo de curado.

Tabla 5: Resumen de los resultados del hinchamiento del suelo estabilizado con 3 mililitros de enzimas orgánicas en sus diferentes tiempos de curado.

DÍAS DE CURADO	NÚMERO DE GOLPES POR CAPA		
	11	25	56
3	3,98 %	3,52 %	2,77 %
7	2,77 %	2,61 %	2,08 %
14	2,22 %	1,76 %	1,11 %
21	1,49 %	1,03 %	0,50 %

La figura 6 permite apreciar la variación que experimenta el hinchamiento del suelo estabilizado con los días de curado y las diferentes energías aplicadas en las muestras (número de golpes). Se puede observar que el hinchamiento disminuye para cada energía aplicada y según aumenten los días de curado de las mezclas, teniendo mayor influencia los días de curado que la energía aplicada. En la figura se ha incluido el hinchamiento del suelo natural, representado con el valor de 0 días de curado. Se observa que el hinchamiento del suelo por inmersión, aplicando la mayor energía, se ha reducido de 7% en el suelo natural hasta 2,8% a los 3 días de curado, y hasta el 0,5% con 21 días de curado. Igual variación se experimentó con las energías Estándar e Intermedia.

Para comprobar si aumentando más la cantidad de aditivo se mejora la resistencia, se realizó el ensayo de CBR en seco y tras inmersión, incrementando la cantidad hasta 9ml, utilizando en este caso, un tiempo de curado de 14 días. En la tabla 6 se muestra una comparación entre los resultados de ambas cantidades de aditivo. Estos resultados demostraron que el incremento de la cantidad de aditivo aplicado, hasta tres veces su contenido inicial, no representó un aumento significativo en la resistencia tras inmersión, por lo cual la causa del bajo incremento de la resistencia no radica en la cantidad de aditivo.

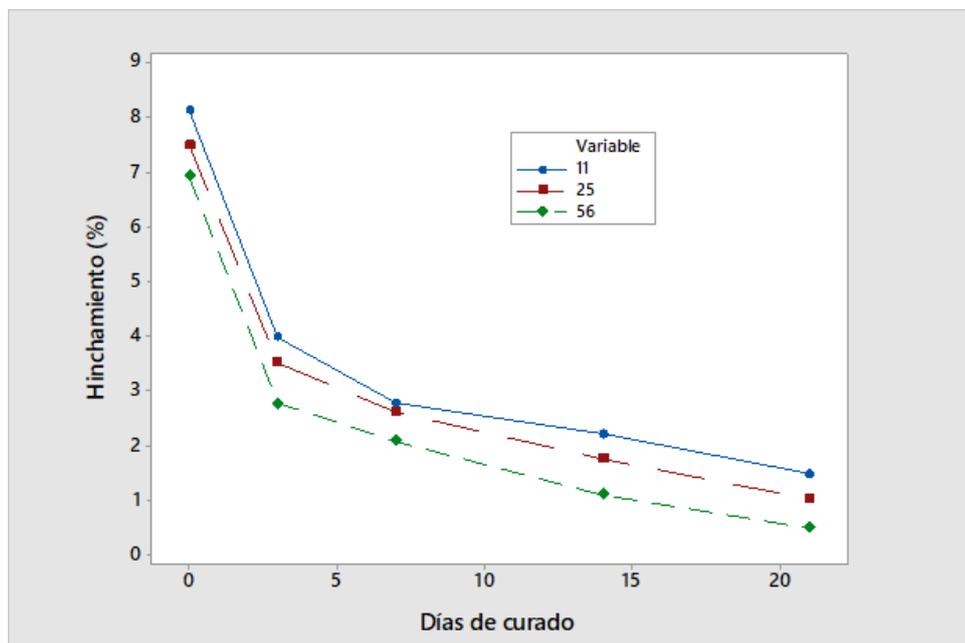


Figura 6: Variación del hinchamiento con los días de curado en el suelo estabilizado, para diferentes energías aplicadas en las muestras (número de golpes).

Tabla 6: Resumen de los resultados de CBR del suelo estabilizado con 3 y 9 mililitros de la enzima orgánica, con 14 días de curado.

CANTIDAD DE ADITIVO	CBR EN ESTADO SECO	CBR TRAS INMERSIÓN	HINCHAMIENTO (%)
3 mililitros	39,0 %	3,5 %	1,11
9 mililitros	40,0 %	3,3 %	2,02

3. CONCLUSIONES

En el trabajo se experimentó con una enzima orgánica aplicada sobre un suelo limo-arcilloso, que clasifica como A-7-5, con un valor de CBR de 1,7% y un hinchamiento del 7% después de cuatro días en inmersión, por lo cual se clasifica como una subrasante S1 de baja calidad. En las pruebas se hizo variar el tiempo de curado y la energía aplicada, así como se utilizaron dos cantidades de aditivo.

Los resultados demostraron que, aplicando la enzima orgánica, en el ensayo en seco, los valores de CBR alcanzados fueron elevados, sin embargo, se produce una reducción importante en la resistencia con el suelo saturado producto de la inmersión por cuatro días, obteniéndose una resistencia conservada con porcentajes entre el 9 y 12%.

La variable tiempo de curado, con 3ml de aditivo, no tuvo influencia en los valores de CBR en seco, para 7 y 14 días y en las pruebas tras inmersión, aún con 21 días, no se observaron diferencias significativas, por lo cual con este aditivo 7 días de curado en la mezcla parece suficiente para alcanzar su resistencia final. Se logró una reducción significativa en el hinchamiento de la mezcla producto de la inmersión, hasta porcentajes por debajo del 2%.

Los resultados demostraron que el aditivo produjo cierto incremento en la resistencia a CBR, lo que se comprobó con el aumento de la resistencia tras inmersión respecto al suelo no estabilizado, aunque con este aumento de resistencia la subrasante se clasifica como S2, para un CBR entre 3-4%.

Se pudo comprobar que el hinchamiento del suelo estabilizado producido en el ensayo de CBR disminuye para cada energía aplicada (Estándar, Intermedio y Modificado) y según aumenten los días de curado de las mezclas, teniendo mayor influencia los días de curado que la energía aplicada. El hinchamiento por inmersión del suelo, con la mayor energía, se redujo de 7% en el suelo natural hasta 2,8% a los 3 días de curado, y hasta el 0,5% a los 21 días de curado, variación que se experimentó también con otras energías aplicadas.

4. RECOMENDACIONES

Los resultados de la investigación evidencian el poco incremento de la resistencia a CBR de la enzima orgánica en el suelo ensayado. A partir de estos resultados se recomienda probar con otros suelos para evaluar la influencia del aditivo con suelos que presenten menos plasticidad, para determinar en qué tipos de suelos resulta más efectivo este tipo de estabilización. Puede verificarse también si las cantidades de aditivo que recomienda la bibliografía consultada se puede incrementar en función del tipo de suelo, así como los límites económicos de este tipo de estabilización.

1. O. Goñas Labajos, & J. Saldaña Núñez, "Estabilización de suelos con cenizas de carbón para uso como subrasante mejorada", *Revista Científica UNTRM: Ciencias Naturales e Ingeniería*, vol. 3, no. 1, pp. 30-35, 2020.
2. R. Linares Chavez, M. Aguilar Rojas, & E. Rojas De La Puente, "Estabilización de suelos arcillosos a nivel de subrasante con adición de bolsas de polietileno fundido", *Revista de Investigación Científica UNTRM: Ciencias Naturales e Ingeniería*, vol. 3, no. 2, pp. 33-40, 2020.
3. R. Gallardo Amaya, C. Martínez Ovallos, & A. Muñoz Quintero, "Caracterización de un suelo plástico para estabilización con cementantes", *Respuestas*, vol. 25, no. S2, pp. 6-13, 2020.
4. J. Rivera, A. Aguirre, R. Mejía de Gutiérrez, & A. Orobio, "Estabilización química de suelos-Materiales convencionales y activados alcalinamente (revisión)" *Informador Técnico*, vol. 84, no. 2, pp. 202-226, 2020.
5. P. Agarwal, & S. Kaur, "Effect of bio-enzyme stabilization on unconfined compressive strength of expansive soil", *International Journal of Research in Engineering and Technology*, vol. 3 (5), pp. 30-33, 2014.
6. S. Janaki Raman, P. D. Arumairaj, R. Tikson Sebastian, J. Jerushan, D. Jebaraj Samuel Dorai, & Nathaniel Joseph Thomos, "Analysis on the strength charecteristics of clayey soil with geopolymer enzyme (biochemical enzyme)". *Rasayan J. Chem.*, vol. 11, no. 4, pp. 1729-1733, 2018.
7. MOP-001-F 2002 Especificaciones técnicas. Capítulo 400 Estructuras del pavimento-sección 402-9. Estabilización de sub-rasante con Enzimas Orgánicas, 2002.
8. PG-3, Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes. España, 5ta edición, 2007.
9. SATCC. Draft Code of Practice for the Design of Road Pavements Prepared by the Division of Roads and Transport Technology, CSIR, 2001.