

Tratamiento Con Enzimas Orgánicas De Un Material Granular Para Uso En Pavimentos De Carreteras

Organic Enzyme Treatment Of Granular Material For Use In Road Pavements

Autores

Jonathan Rodrigo Garrido Lara¹, José Antonio Orlando Delgado², Eduardo Tejeda Plusseaut³

¹Estudiante de la carrera de Ingeniería Civil, Universidad Técnica de Manabí, Facultad de Ingeniería y Ciencias Aplicadas, Portoviejo, Manabí, Ecuador, jgarrido9343@utm.edu.ec

²Estudiante de la carrera de Ingeniería Civil, Universidad Técnica de Manabí, Facultad de Ingeniería y Ciencias Aplicadas, Portoviejo, Manabí, Ecuador, jorlando2150@utm.edu.ec

³Ingeniero Civil, Doctor en Ciencias, Docente en Universidad Técnica de Manabí, Facultad de Ingeniería y Ciencias Aplicadas, Portoviejo, Manabí, Ecuador, eduardo.tejeda@utm.edu.ec

RESUMEN

El tratamiento de materiales granulares con aditivos es una técnica utilizada para incrementar la capacidad portante de materiales que, al cumplir con las especificaciones necesarias para su uso en la construcción de bases o subbases de pavimentos viales, logran aumentar aún más su resistencia y, por lo tanto, permite reducir espesores de las capas estructurales. Pero, esta técnica también puede mejorar el desempeño de materiales que no cumplen con dichas especificaciones, haciéndolos aptos para su uso en estructuras viales. Tradicionalmente, se han empleado materiales como cemento, cal y otros aditivos. Sin embargo, con la evolución de las tecnologías, se ha introducido un nuevo componente: la enzima orgánica, disponible bajo diversas marcas a nivel mundial. Esta innovación busca mejorar la capacidad de soporte del suelo natural, reduciendo los costos asociados al transporte de materiales de cantera. En esta investigación, se aplicó un tratamiento a un material granular con una resistencia a CBR de 42,3 % en su estado natural, con un índice plástico superior al 12%. Se utilizó un aditivo enzimático, siguiendo las especificaciones técnicas del fabricante, aplicando 1 ml de aditivo por cada 6000 gramos de material suelto. Como resultado, la resistencia CBR del suelo mejoró significativamente, alcanzando el 68,8%. Para corroborar sus efectos, se realizó un segundo experimento, incrementando la cantidad de aditivo a 3 ml por cada 6000 gramos de material. Esta modificación llevó a un incremento aún mayor en la resistencia CBR, que alcanzó el 93,4 %, catalogando como material de muy buena capacidad de soporte.

Palabras claves: Enzimas orgánicas, tratamiento de materiales, capacidad portante, materiales granulares

ABSTRACT

The treatment of granular materials with additives is a technique used to increase the bearing capacity of materials that, by complying with the specifications required for their use in the construction of bases or subbases of road pavements, further increase their strength and, therefore, reduce the thickness of the structural layers. However, this technique can also improve the performance of materials that do not meet these specifications, making them suitable for use in road structures. Traditionally, materials such as cement, lime and other additives have been used. However, with the evolution of technologies, a new component has been introduced: the organic enzyme, available under various brand names worldwide. This innovation seeks to improve the bearing capacity of natural soil, reducing the costs associated with the transportation of quarry materials. In this research, a treatment was applied to a granular material with a CBR resistance of 42.3% in its natural state, with a plastic index higher than 12%. An enzymatic additive was used, following the manufacturer's technical specifications, applying 1 ml of additive per 6000 grams of loose material. As a result, the CBR resistance of the soil improved significantly, reaching 68.8%. To corroborate its effects, a second experiment was carried out, increasing the amount of additive to 3 ml per 6000 grams of material. This modification led to an even greater increase in the CBR resistance, which reached 93.4%, classifying the material as having a very good bearing capacity.

Keywords: Organic enzymes, material treatment, bearing capacity, granular materials

Nota Editorial: Recibido: Septiembre 2024 Aceptado: Octubre 2024

1. INTRODUCCIÓN

La estabilización de suelos es una técnica esencial para mejorar las propiedades ingenieriles de los suelos, ya sea a través de medios físicos o mecánicos. Aunque el término "estabilización" puede referirse a diversos métodos, generalmente se asocia con mejoras obtenidas mediante la adición de productos químicos. En particular, la estabilización química ha emergido como una alternativa eficaz para optimizar propiedades críticas del suelo, tales como la plasticidad, permeabilidad, compresibilidad, resistencia mecánica (incluyendo la resistencia al corte y a la compresión), deformabilidad, estabilidad volumétrica, asentamiento, contenido de partículas finas, módulo elástico, y durabilidad bajo condiciones ambientales adversas, así como su resistencia a la erosión y desgaste [1].

La estabilización química puede aplicarse a diversos tipos de suelos o materiales, con el fin de mejorar sus propiedades geotécnicas. Este proceso altera las características fisicoquímicas del material original, con el objetivo de mitigar problemas como la inestabilidad volumétrica y de mejorar sus propiedades, como la resistencia y durabilidad [2].

Los fabricantes y proveedores de enzimas sostienen que, al utilizarse para la estabilización de un suelo, las enzimas pueden mejorar la capacidad de humectación y la cohesión entre sus partículas. Estas enzimas facilitan el trabajo del material tratado, permitiendo una mayor compactación. Además, refuerzan la unión química entre las partículas, lo que contribuye a formar una estructura más resistente y duradera, capaz de soportar mejor la intemperie, el tráfico y la infiltración de agua [3].

Dada la gran variabilidad de suelos y materiales que pueden ser mejorados con estos procedimientos, resulta crucial investigar y determinar los efectos de las enzimas en la resistencia de diferentes materiales antes de su aplicación. Es importante desarrollar formulaciones enzimáticas que sean de bajo costo, fácilmente aplicables, ecológicas y que utilicen materias primas disponibles localmente [4].

RoadZyme® es una formulación multienzimática concentrada y no bacteriana, diseñada específicamente para mejorar las propiedades del suelo, ofreciendo una de las soluciones más rentables para su densificación. Este producto reduce la tensión superficial del agua, facilitando su rápida penetración y dispersión uniforme en el suelo, lo que permite que las partículas de arcilla hidratada se compacten de manera más eficiente, creando un estrato denso y permanente. La mayor lubricidad de las partículas bajo la acción de RoadZyme® permite alcanzar la densidad deseada con menor esfuerzo de compactación.[5]

Cedeño y Tejeda [6]. llevaron a cabo un estudio en el que se aplicó el aditivo Eco-Zyme a un suelo de subrasante con un Índice de Plasticidad del 22,7% y un CBR tras inmersión del 1,7%. Este material, inicialmente clasificado como de baja calidad debido a su bajo CBR, fue sometido a un proceso de estabilización con Eco-Zyme con el objetivo de mejorar sus propiedades mecánicas. Tras la estabilización, se observó un incremento en el CBR, que alcanzó un 4,1%, lo que equivale a un aumento del 2,4% en la resistencia del suelo. A pesar de la mejora lograda, este incremento no fue lo suficientemente significativo como para elevar la subrasante a un nivel de alta calidad. El suelo pasó de ser considerado un material de mala calidad a uno de calidad regular, lo que sugiere que, aunque el aditivo contribuyó a mejorar las condiciones del suelo, su efectividad en este caso particular fue limitada. Estos resultados subrayan la importancia de considerar las características específicas del suelo y la adecuación del aditivo en cada contexto, ya que no todos los aditivos tienen el mismo impacto en diferentes tipos de suelos.

Bazurto y Ortiz [7]. analizan dos tipos de materiales con distintos índices de plasticidad con la finalidad de aumentar su resistencia con la incorporación de enzima orgánica, los materiales están denominados como material (A) con una plasticidad del 2.79% con un CBR en estado natural del 35.81%, y el material (B) con plasticidad del 9.16% y un CBR en estado natural del 4.18%. Se le aplica el aditivo a los materiales en estudio y se aprecia que se obtuvieron valores superiores, el material (A) con un CBR del 38.79% y el material (B) con un CBR del 7.46%. Por lo tanto, se concluye que el aditivo si produjo aumento en la resistencia a CBR, pero donde se aprecia mayor aumento es en el material (B) el cual es el material que presenta mayor plasticidad con un aumento del 79% en su resistencia a CBR.

Estos resultados ponen de manifiesto la efectividad del aditivo químico en la mejora de la resistencia del suelo, evidenciando cómo una adecuada dosificación del aditivo es crucial para maximizar los beneficios de la estabilización. Al ajustar correctamente la cantidad de aditivo, es posible transformar un material con una resistencia inicial baja en uno con propiedades mecánicas significativamente mejoradas, elevando así su desempeño y su capacidad de soportar cargas. Este enfoque no solo optimiza la estabilidad y durabilidad de las estructuras construidas sobre dichos suelos, sino que también ofrece una solución eficiente y rentable en proyectos de ingeniería vial.

El presente estudio experimental tiene como objetivo evaluar el efecto de la enzima orgánica RoadZyme® en un material granular, aplicando tanto la dosificación recomendada por el fabricante como una nueva dosis de prueba. El experimento se realizó en un suelo compuesto por grava limosa y arcillosa, procedente de una cantera en Portoviejo, provincia de Manabí, Ecuador. Se comparó la capacidad portante del suelo, medida mediante el Índice de Soporte de California (CBR), en su estado natural y tras su estabilización con el aditivo, para determinar en qué medida se incrementa su resistencia y evaluar su potencial uso como capa de coronación en un terraplén de carretera.

2. DISEÑO DE LA EXPERIMENTACIÓN

El objetivo del experimento realizado es demostrar la efectividad del aditivo en incrementar la resistencia CBR de un material granular, lo cual es fundamental para su posible utilización en proyectos de pavimentación. En primer lugar, se llevó a cabo un análisis de las características del material granular, denominado en adelante como "material natural". Para este análisis, se determinaron parámetros como la granulometría y los límites de consistencia, lo que permitió clasificar el material según los métodos establecidos por la AASHTO y ASTM. Esta clasificación preliminar proporciona una primera evaluación de las posibles aplicaciones del material en la construcción de carreteras.

Posteriormente, se procedió a realizar el ensayo Proctor Modificado, con el objetivo de determinar la densidad máxima seca y la humedad óptima del material para la energía de compactación del Modificado. Estos parámetros son esenciales, ya que todas las pruebas de resistencia CBR se llevaron a cabo utilizando el contenido de humedad óptimo obtenido a partir del Proctor Modificado, garantizando así la comparabilidad de los resultados.

El experimento incluyó un estudio detallado de la relación entre el CBR y la densidad seca del material, para lo cual se emplearon tres niveles de energía de compactación distintos. Estas energías se lograron variando el número de golpes por capa en la compactación, correspondientes a 11, 25, y 56 golpes, lo que representa las energías de compactación estándar, intermedia y modificada, respectivamente. Este enfoque permitió analizar cómo la variación en la densidad afecta la resistencia del material, tanto en condiciones secas como saturadas.

Una vez que se caracterizaron las propiedades del material natural, se procedió a la aplicación del aditivo RoadZyme®, cuyo efecto en la resistencia del material fue el propósito principal del estudio. Para evaluar este efecto, se diseñó un experimento en el cual el material fue tratado con diferentes dosificaciones del aditivo. La dosificación estándar recomendada por las especificaciones técnicas es de 0,05 litros/m³, la cual equivale a 1 ml por muestra las cuales se aplicó en los primeros ensayos. Luego, se incrementó la dosificación a 3 ml por muestra, con el fin de explorar el impacto de una mayor concentración del aditivo en la resistencia del material.

Para asegurar la efectividad del tratamiento, las muestras tratadas se sometieron a un proceso de curado de siete días en condiciones secas. Este período de curado es crucial, ya que permite que el aditivo desarrolle su efecto en el material. Después del curado, se dividieron las muestras en dos grupos: el primero fue sometido al ensayo de CBR inmediato, mientras que el segundo grupo fue mantenido en inmersión durante cuatro días antes de ser ensayado para determinar su resistencia CBR en condiciones saturadas.

Para evaluar la efectividad del aditivo, se introdujo el concepto de "resistencia conservada", que se define como la relación entre la resistencia del material en condiciones saturadas y su resistencia en seco. Este parámetro es una medida clave de la eficacia del aditivo, ya que refleja cuánto se conserva la resistencia del material después de la exposición a condiciones de inmersión. A través de este análisis, se busca determinar no solo si el aditivo mejora la resistencia inicial del material, sino también cómo contribuye a mantener esa resistencia bajo condiciones ambientales desfavorables, lo cual es definitivo para su aplicación en pavimentos.

3. CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL GRANULAR

La caracterización del material en su estado natural se realizó mediante una serie de ensayos específicos, diseñados para evaluar tanto sus propiedades físicas como su comportamiento mecánico. Entre los ensayos llevados a cabo se incluyen: el Ensayo de Granulometría por Tamizado, siguiendo los procedimientos establecidos en AASHTO T-88 [8] y ASTM D-422 [9]; la determinación de los Límites de Atterberg conforme a AASHTO T-89 [10] y ASTM D-4318 [11]; el Proctor Modificado, según las normativas AASHTO T-180 [12] y ASTM D-1557 [13]; el Ensayo de California Bearing Ratio (CBR), de acuerdo a AASHTO T-193 [14] y ASTM D-1883 [15]; y la Clasificación del Suelo utilizando los procedimientos de la Asociación Americana de Funcionarios Estatales de Carreteras y Transporte AASHTO M-145 [16] y el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos SUCS, ASTM D-2487 [17].

La Figura 1 presenta el análisis granulométrico del material granular. En el gráfico se han incluido las especificaciones granulométricas para un material de base Clase 1-a, considerado el de mejores características según la normativa del Ministerio de Transporte y Obras Públicas (MTOP).

$$C_U = \frac{D_{60}}{D_{10}} = \frac{12.5}{0.25} = 50.8$$

$$C_C = \frac{D_{20}^2}{D_{60} \cdot D_{10}} = 7.14$$

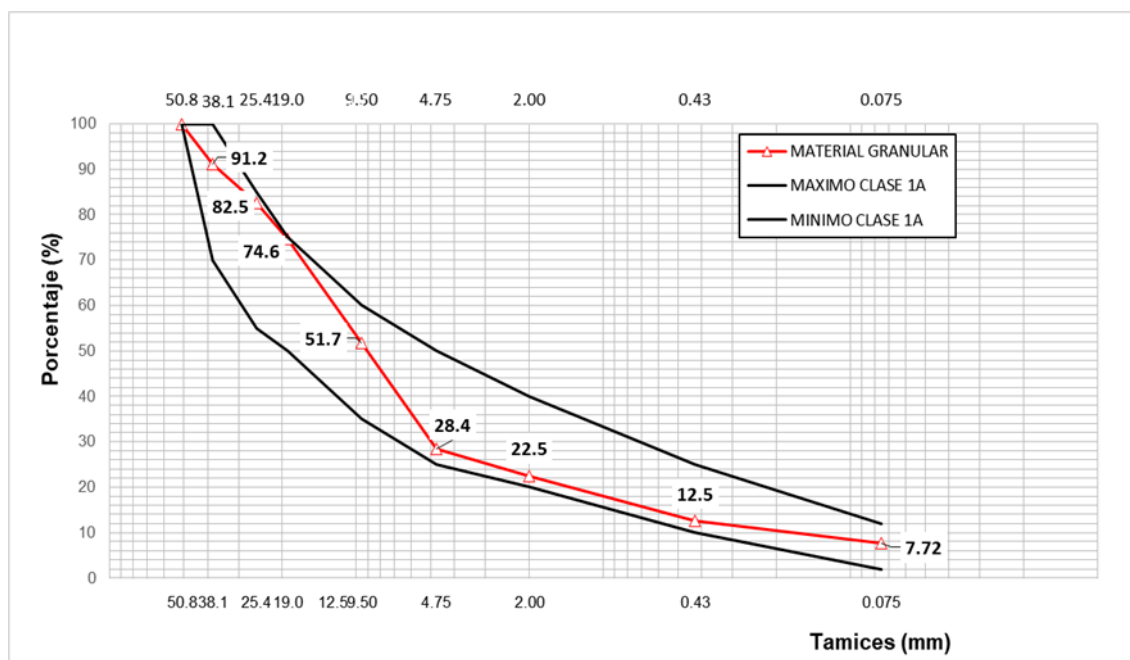


Figura 1. Análisis granulométrico del material granular. Comparación con las especificaciones granulométricas del material de Base Clase 1-a

Se observa en la figura 1 que la curva se encuentra dentro de las especificaciones, no exhibe una forma ideal. Un valor de C_u superior a 4 o 6 sugiere que el material tiene una buena graduación; sin embargo, el coeficiente de uniformidad calculado es de 50.8, lo que indica una granulometría continua. Sin embargo, el coeficiente de curvatura (C_c) es de 7.14, cuando los valores deberían estar entre 1 y 3 para que el material se considere adecuadamente curvado.

Las propiedades y características del material natural investigado se resumen en la Tabla 1, donde se detalla su clasificación según los métodos reconocidos de AASHTO y SUCS. Este material presenta un 7,7 % de partículas que pasan por el tamiz 200, y un índice de plasticidad del 12,0 %, lo que, según la clasificación AASHTO, lo ubica en el grupo A-2-6 (0). Bajo la clasificación ASTM, el material se clasifica en el grupo GC-GM, caracterizado por la presencia de grava con un pequeño porcentaje de limo o arcilla. El ensayo de Proctor Modificado reveló que la densidad seca máxima del material es de 2048,3 kg/m³, mientras que su contenido de humedad óptimo es del 9,8 %.

Tabla 1. Caracterización del material en estado natural

ENSAYOS		MUESTRA 1	MUESTRA 2	MUESTRA 3	PROMEDIO
LÍMITE LÍQUIDO		33.5	34.06	34.65	34.07
LÍMITE PLÁSTICO		21.72	21.82	----	21.77
ÍNDICE PLÁSTICO		11.78	12.24	----	12.01
Densidad seca (kg/m³)		2048.3			
Humedad Óptima (%)		9.8			
Ensayo de CBR (%)	ENERGÍA	ESTÁNDAR	INTERMEDIA	MODIFICADO	
	En seco	16.3	81.3	92.3	
	Tras inmersión	15.6	33.6	42.3	
CLASIFICACIÓN	ASTM	GC - GM (Grava limosa y arcillosa)			
	AASHTO	A -2-6 (Arenas y gravas limosas y arcillosas)			

Para evaluar la relación entre el CBR y la densidad seca del material, se aplicaron tres energías de compactación diferentes, variando el número de golpes por capa: 11, 25 y 56, correspondientes a las energías estándar, intermedia y modificada, respectivamente. Las muestras fueron compactadas a la humedad óptima determinada por el Proctor Modificado (9,8 %). La Figura 2 ilustra gráficamente los resultados de estos ensayos, mostrando los valores de CBR tanto en estado seco como tras una inmersión de 4 días, en función del incremento de la densidad derivado del aumento en la energía de compactación aplicada.

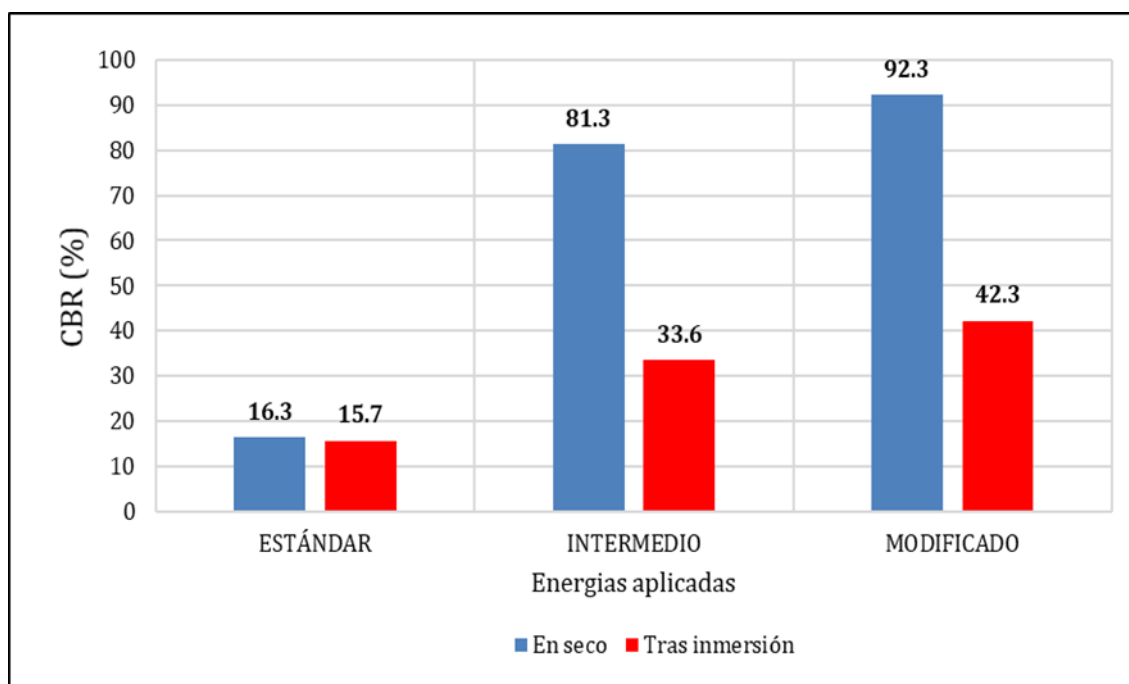


Figura 2. Variación del CBR con la energía aplicada para el material natural

Como se observa en la Figura 2, la aplicación de la energía de compactación estándar no produce cambios notables entre el CBR en estado seco y el CBR en estado saturado, probablemente debido al elevado porcentaje de vacíos que resulta en una baja densidad seca, lo cual impide que el agua afecte considerablemente la cohesión de las muestras compactadas. En contraste, cuando se aplican energías de compactación intermedia y modificada, el CBR en estado seco aumenta considerablemente, alcanzando valores del 81,3 % y 92,3 %, respectivamente, debido al incremento en la densidad seca. Sin embargo, tras la inmersión durante 4 días, la resistencia del CBR disminuye notablemente, registrando valores del 33,6 % con la energía intermedia y 42,3 % con la energía modificada.

Con base en las características granulométricas y de plasticidad del material, se concluye que este no cumple con las especificaciones para ser utilizado como material de base en pavimentos, ya que su CBR es inferior al 80 % requerido. Asimismo, no es adecuado como subbase, a pesar de que su CBR supera el 30 %, debido a que su Índice de Plasticidad excede el límite permitido de 6 %. Además, el material tampoco cumple con las especificaciones para ser utilizado como material de mejoramiento, ya que su Índice de Plasticidad supera el 9 % exigido. Según las especificaciones del aditivo RoadZyme® debe aplicarse en materiales que contengan al menos un 30 % de finos cohesivos para garantizar su efectividad en la estabilización del suelo.

4. RESULTADOS DEL TRATAMIENTO DEL MATERIAL GRANULAR CON EL ADITIVO RoadZyme®

Con el objetivo de evaluar el efecto del aditivo RoadZyme® sobre la resistencia del material, se diseñó un experimento en el que se aplicaron distintas dosificaciones del aditivo. Partiendo como dosificación base la relación que se detalla en las especificaciones las cuales indica que se añade 0,05 litros por m³ de material lo cual equivale a 1 ml de aditivo por cada 6000 gramos de suelo natural. En las muestras tratadas con 3 ml (1 ml por muestra) de aditivo, se redujo el contenido de agua en un 1%, reemplazándolo por el aditivo para asegurar una adecuada hidratación y compactación con las diferentes energías aplicadas (11, 25 y 56 golpes/capa).

Las muestras fueron preparadas en moldes para el ensayo de CBR y se dejaron curar durante 7 días en estado seco para permitir que el aditivo actuará. Al final del período de curado, se realizó el ensayo de resistencia en seco. Posteriormente, las muestras fueron sometidas a un proceso de inmersión durante 4 días para evaluar su resistencia de diseño bajo condiciones saturadas.

Los resultados mostrados en la figura 3 evidencian un aumento significativo del CBR en el material tratado con la enzima, en comparación a lo que se presenta en la figura 2 con el material en su estado natural. Se observa que el CBR en seco se incrementa con el aumento de la densidad seca, a medida que se ha incrementado la energía de compactación, superando los valores obtenidos antes del tratamiento con la enzima. El CBR en seco alcanza un valor de 50,2 %, en contraste con el 16,3 % del material sin aditivo; para la energía intermedia, el CBR es de 91,3 %, mientras que el material sin aditivo presenta una resistencia de 81,3 %; y para la energía de compactación modificada, el CBR es de 110,3 % frente al 92,3 % del material sin tratar.

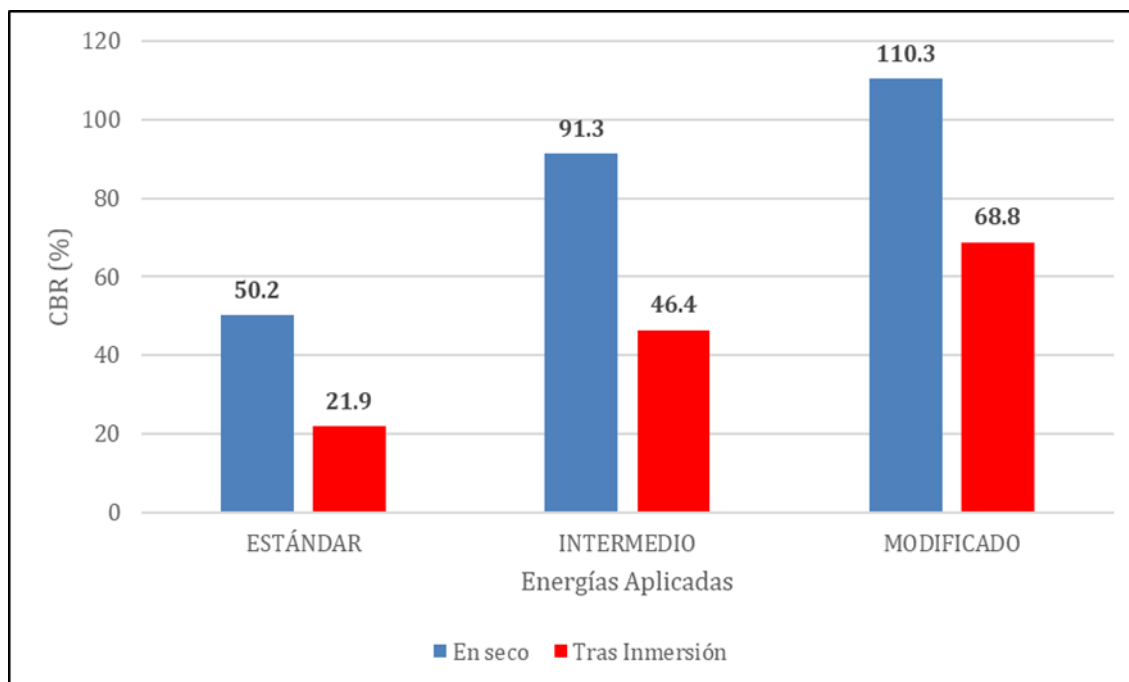


Figura 3. Variación del CBR con la energía aplicada para el material estabilizado

De manera similar, la resistencia tras inmersión también muestra un incremento significativo con las diferentes energías aplicadas en los ensayos. En la figura 3 se observa el aumento del CBR saturado en el material tratado con la enzima, en comparación con el material en su estado natural. Con la menor energía de compactación, el CBR tras inmersión varió de 15.7 % a 21.9 %; con la energía intermedia, aumentó de 33.6 % a 46.4 %; y con la mayor energía aplicada, se elevó de 42.3 % a 68.8 %.

Estos incrementos en la resistencia CBR evidencian la efectividad del aditivo aplicado. Una forma de verificar esta efectividad es mediante la resistencia conservada, que es la relación, expresada en porcentaje, entre la resistencia saturada (tras inmersión) y la resistencia inicial en seco del material. La resistencia conservada calculada para el rango de densidad mínimo exigido, comprendido entre la energía intermedia y la energía modificada, muestra un incremento del 41.3 % al 50.8 % para la energía intermedia, y del 45.8 % al 62.4 % para la energía modificada. Este aumento en la resistencia conservada confirma la efectividad del aditivo, ya que permite que el material mantenga en mayor medida su resistencia inicial.

Los resultados también destacan la importancia de la compactación. Es esencial que el material granular tratado con enzimas sea compactado con la máxima energía posible, ya que se ha demostrado que, tanto en su estado natural como combinado con el producto enzimático, el material alcanza sus mejores propiedades mecánicas bajo condiciones de alta compactación. Esto coincide con las especificaciones del Ministerio de Transporte y Obras Públicas (MTO) para las capas de base y subbase de pavimentos, donde se exige que la densidad mínima alcanzada sea del 100% de la densidad máxima obtenida en el ensayo Proctor Modificado, para obtener los mejores resultados en términos de resistencia tras inmersión y resistencia conservada.

Para validar la efectividad del aditivo en este tipo de material, se prepararon muestras adicionales de CBR utilizando únicamente la energía de compactación del ensayo Proctor Modificado. Se fabricaron otros especímenes aplicando una dosificación de 9 ml (3 ml por muestra), basada en la experiencia de Cedeño y Tejeda [5]. Con esta dosificación, se obtuvo un CBR promedio en seco de 137.9 %, y después de la inmersión, de 93.6 %, lo que representa un incremento de más del 20 % respecto al resultado obtenido con la dosificación recomendada por el fabricante de la enzima. Esto resultó en una resistencia conservada del 67.9 %, evidenciando la influencia positiva del aditivo en el aumento de la resistencia del material.

En la Figura 4 se presenta una comparación entre la resistencia CBR obtenida con las dos dosificaciones del aditivo (1 ml y 3 ml) aplicadas para el tratamiento, en relación con el CBR inicial del material granular, en todos los casos compactado con la energía del Proctor Modificado. También se muestra la resistencia conservada en los tres casos. Se observa cómo la resistencia CBR del material, inicialmente considerado no apto para su uso en mejoramiento o como parte del pavimento, ha sido modificada significativamente. Con la dosificación propuesta por el fabricante, el material alcanzó una resistencia tras inmersión adecuada para su uso como subbase (CBR $\geq$ 30%), y cuando se triplicó la dosificación, alcanzó niveles de resistencia adecuados para su uso como base (CBR $\geq$ 80%).

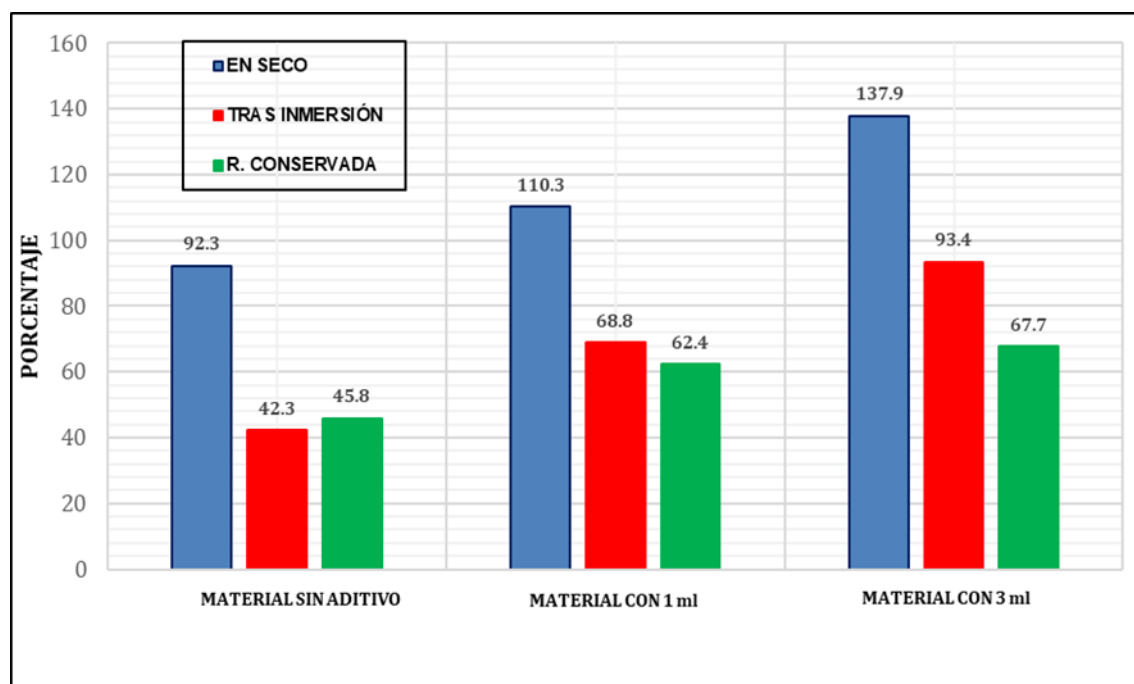


Figura 4. CBR del material en distintos estados, con la energía modificada

El análisis inicial del material granular evidenció que, en su estado natural, no cumple con las especificaciones necesarias para su empleo en pavimentos. Aunque el porcentaje de finos es relativamente bajo (7,7%), el índice de plasticidad, con un valor de 12,0%, supera el límite máximo establecido de 6%. Esto indica que, sin tratamiento, el material no es adecuado para su uso en las capas de la estructura vial.

Los ensayos realizados con el aditivo enzimático RoadZyme® mostraron un impacto positivo significativo en la resistencia CBR del material granular. Con la dosificación recomendada de 1 ml por muestra, el CBR en estado seco y tras inmersión se incrementó de manera notable, alcanzando valores que permiten su uso como subbase. Este efecto fue aún más pronunciado al triplicar la dosificación del aditivo, logrando mejorar la resistencia del material hasta niveles adecuados para su uso como capa de base. Este hallazgo es crucial, ya que demuestra que el tratamiento enzimático puede convertir un material previamente marginal en uno apto para aplicaciones más exigentes en pavimentación.

Los resultados subrayan la relevancia de aplicar una energía de compactación adecuada, ya que esta influye directamente en la densidad seca del material y su resistencia a CBR. Se observó que el incremento de la energía de compactación mejora significativamente la resistencia, tanto en condiciones secas como después de la inmersión, especialmente en las muestras tratadas con el aditivo. Estos hallazgos sugieren que una adecuada aplicación de la energía de compactación, combinada con el uso del aditivo, puede optimizar el desempeño del material en aplicaciones de pavimentación.

La evaluación de la resistencia conservada después de la inmersión también demostró que el aditivo RoadZyme® es eficaz para mantener una mayor proporción de la resistencia inicial del material. La resistencia conservada aumentó considerablemente con la dosificación incrementada, alcanzando hasta un 67,9 %, lo que confirma la efectividad del aditivo para mejorar la durabilidad del material bajo condiciones de saturación. Este hallazgo es especialmente relevante para aplicaciones en zonas húmedas o con alta exposición al agua, donde la pérdida de resistencia tras la saturación es una preocupación crítica.

Finalmente, gracias a la mejora significativa en la resistencia CBR del material tratado con el aditivo enzimático, un material que originalmente se consideraba no apto ahora cumple con los requisitos necesarios para su uso en capas de subbase y base en pavimentos. Esto sugiere que el tratamiento enzimático no solo mejora las propiedades mecánicas del material, sino que también ofrece una solución viable y sostenible para la reutilización de materiales marginales en proyectos de pavimentación. La aplicación de esta tecnología podría resultar en importantes beneficios económicos y ambientales, al permitir la reutilización de materiales locales y reducir la necesidad de extraer nuevos recursos. Sin embargo, para maximizar el potencial de esta técnica, es esencial llevar a cabo un análisis económico que permita comparar su viabilidad con los métodos tradicionales. Esto no solo ayudará a identificar la eficiencia técnica del uso de aditivos, sino también a establecer los límites económicos de su aplicación. De esta manera, se asegurará que el uso de estos aditivos en el mejoramiento de materiales granulares sea no solo efectivo desde el punto de vista técnico, sino también rentable en términos de costos.

1. E. Llano, D. Ríos & G. Restrepo, "Evaluación de tecnologías para la estabilización de suelos viales empleando intemperismo acelerado. Una estrategia de análisis de impactos sobre la biodiversidad", *TecnoLógicas*, vol.23, n°49, pp. 185-199, 2020.
2. J.Rivera, A.Guerrero, R. Mejía de Gutiérrez & A. Orobio, "Estabilización química de suelos - Materiales Convencionales y activados alcalinamente", *Informador Técnico*, vol.84, n°2, pp. 202-226, 2020.
3. T. Khan and M. Taha, "Effect of Three Bioenzymes on Compaction, Consistency Limits, and Strength Characteristics of a Sedimentary Residual Soil", *Hindawi Publishing Corporation*, vol.2015, n°1, pp.1-9, 2015.
4. E. Mekonnen, A. Kebede, T. Tafesse and M. Tafesse. "Application of Microbial Bioenzymes in Soil Stabilization", *Hindawi Publishing Corporation*, vol.2020, n°1, pp.1-8, 2020.
5. A. Carrasco de Oliveira, "Estabilização de Solos Através das Bioenzimas", Master's tesis, Departamento De Engenharia Civil, Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2022. Disponible desde: <https://repositorio-aberto.up.pt/bitstream/10216/144844/2/589187.pdf>
6. C. Tuárez. E. Piusseaut. "Estabilización de materiales arcillosos con enzima orgánica para subrasante de carreteras", *Revista ciencia y construcción*, vol.4, n°2, pp. 82-90,2023.
7. J. Cevallos, E. Hernández., "Material De Préstamo Estabilizado Con Enzimas Orgánicas Como Alternativa Para Mejorar Su Capacidad Portante", *Revista ciencia y construcción*, vol.5, n°2, pp. 31-38,2024.
8. AASHTO T88, "Standard Method of Test for116178", 2022.
9. ASTM - D422-63, "Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils", 2007.
10. AASHTO T89, "Standard Method of Test for Determining the Liquid Limit of soils", 2010.
11. ASTM D4318-10, "Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils", 2010.
12. AASHTO T180-01, "Standard Method of Test Investigation in Engineering", for Moisture-Density Relations of Soils", 2022.
13. ASTM D1557, "Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soils", 2009.
14. AASHTO T 193 -99, "Standard Method of Test for The California Bearing Ratio", 2019.
15. ASTM D1883-21, "Standard Test Method for California Bearing Ratio (CBR) of Laboratory-Compacted Soils", 2016.
16. AASHTO M-145-91, "Clasificación de suelos", 2000.
17. SUCS. ASTM D-2487. "Sistema Unificado de Clasificación de Suelos", 2010.