

Addition of Portland Cement and Terrasil for Soil Stabilization in Peruvian Highways

Néstor Aldair Araujo Salirrosas¹ , Antony Edwin Zavala Morales¹ , Josualdo Carlos Villar Quiroz¹ ,
Karina Jacqueline Cardenas Rodriguez¹ 

¹Universidad Privada del Norte -UPN – Perú. N00167591@upn.pe, N00173748@upn.pe, josualdo.villar@upn.edu.pe,
Karina.cardenas@upn.edu.pe, flor.calvanapon@upn.pe

Abstract - The present stabilization study aims to analyze and recognize the addition of chemical stabilizers of road construction entities to improve soil properties. The additives that were evaluated are Portland Cement and Terrasil, these stabilizing materials are made of limestone rocks and organic enzymes, being their main properties to increase the support of the analyzed soil. The purpose of this study is to determine how these additives through their dosages influence the increase of the bearing capacity or (CBR) in the subgrade soil of Peruvian highways. Considering the different regulations and procedures of the respective tests, in order to evaluate the performance of the two additives and determine if there is an increase of parameters in the mechanical characteristics foreseen in this soil study. Therefore, having collected the necessary data and having carried out the development of the research, it was found that in the 9 test pits performed and analyzed, an A-4 type soil with low plasticity predominates, with a natural moisture < 25% and an optimum moisture content of 10.79% maximum in C- 01, in addition to a maximum CBR of 21.4% and 28.9% at 100% of the M.D.S. in natural samples. Likewise, having evaluated the samples with Terrasil and Portland Cement additives in the selected test pits, a different characterization to the natural sample was obtained, changing to an A-4 type soil [6], in addition with 3% cement and 0.5 lt/m³ of Terrasil a maximum CBR (0.2") of 69.30% was obtained in C- 03 and with 4% cement and 0.5 lt/m³ of Terrasil a maximum CBR (0.2") of 141.60% was obtained in C- 03 at 100% of the M.D. S, likewise, having compared the results obtained from the natural sample and with additives for each selected test pit, it is demonstrated that there was a considerable increase in the bearing capacity of the soil and a change in its physical and mechanical properties. Finally, it is shown that using these additives for stabilization in one kilometer is favorably profitable, provided that the type of soil initially found is replaced by borrow material.

Keywords: Soil stabilization, subgrade, Terrasil, additives.

Digital Object Identifier: (only for full papers, inserted by LACCEI).
ISSN, ISBN: (to be inserted by LACCEI).
DO NOT REMOVE

Adición de Cemento Portland y Terrasil en la Estabilización de Suelos en las Carreteras del Perú

Néstor Aldair Araujo Salirrosas¹, Antony Edwin Zavala Morales¹, Josualdo Carlos Villar Quiroz¹,
Karina Jacqueline Cardenas Rodriguez¹

¹Universidad Privada del Norte -UPN – Perú. N00167591@upn.pe, N00173748@upn.pe, josualdo.villar@upn.edu.pe,
Karina.cardenas@upn.edu.pe, flor.calvanapon@upn.pe

Resumen – El presente estudio de estabilización pretende analizar y reconocer la adición de estabilizadores químicos de las entidades de construcción vial para mejorar las propiedades del suelo. Los aditivos que se evaluaron son el Cemento Portland y Terrasil, estos materiales estabilizantes están hechos de rocas calizas y enzimas orgánicas, siendo sus principales propiedades para incrementar el soporte del suelo analizado. La finalidad de este estudio es determinar cómo estos aditivos mediante sus dosificaciones influyen en el incremento de la capacidad portante o (CBR) en el suelo de subrasante de las carreteras del Perú. Considerando las distintas normativas y procedimientos de los ensayos respectivos, para así evaluar el desempeño de los dos aditivos y determinar si existe el incremento de parámetros en las características mecánicas previstas en este estudio de suelo. Por lo que habiéndose recolectado los datos necesarios y habiendo llevado a cabo el desarrollo de la investigación se encontró que en las 9 calicatas realizadas y analizadas predomina un suelo de tipo A-4 con baja plasticidad, con una humedad natural < 25% y un óptimo contenido de humedad 10.79% máximo en la C- 01, además de un CBR máximo de 21.4% y 28.9 % al 100 % del M.D.S en muestras naturales. Asimismo, habiéndose evaluado las muestras con aditivos Terrasil y Cemento Portland en las calicatas seleccionadas, se obtuvo una caracterización distinta a la muestra natural, cambiando a un suelo de tipo A-4 [6], además con 3% de cemento y 0.5 lt/m³ de Terrasil se obtuvo un CBR (0.2") máximo de 69.30% en C- 03 y con 4% de cemento y 0.5 lt/m³ de Terrasil se obtuvo un CBR (0.2") máximo de 141.60% en C- 03 al 100% del M.D.S, de igual manera habiéndose comparado los resultados obtenidos de muestra natural y con aditivos para cada calicata seleccionada, se demuestra que hubo un incremento considerable en la capacidad de soporte de suelo y un cambio en sus propiedades físicas y mecánicas, finalmente se denota que al usar estos aditivos para la estabilización en un kilómetro es favorablemente rentable, siempre que el tipo de suelo encontrado inicialmente sea sustituido por material de préstamo.

Palabras clave: Estabilización de suelos, subrasante, Terrasil, aditivos.

I. INTRODUCCIÓN

El desarrollo de la vialidad y de los transportes es una importante necesidad nacional para deshacer el aislamiento de localidades y mejorar su accesibilidad entre ellos, en razón de las particulares características del terreno y climas regionales.[1] El Ministerio de Transportes y Comunicaciones de Perú, indica que es fundamental la realización de carreteras de buena calidad, pero como en toda obra vial a nivel de subrasante se manifiesta la presencia de suelos que están asociados con la disminución de la resistencia como consecuencia del cambio de humedad [2], estos suelos tienen

la caracterización de limo-arcillosos que representan en su estructura una solidez ineficiente, con baja resistencia al corte y alta compresibilidad subyacen a los humedales [3], volviéndose una problemática reiterativa en la construcción de carreteras, por lo que se opta la sustitución de materiales de préstamo, que resultan de manera más resistente, siendo una de las principales razones para la elevación de gastos, debido a la incorporación de maquinarias que son utilizadas con el objetivo de obtener material granular, además de lograr eliminar el excedente de manera efectiva [4], así como los programas de mantenimiento deficientes, lo que incrementa los costos de conservación de estas [5]. A raíz de los problemas presentados en la construcción de una carretera, es necesaria también la estabilización de la misma, teniendo como objetivo generar más estabilidad y al mismo tiempo durabilidad, además de compensar el efecto ambiental en la extracción de los materiales necesarios y aplicándolos en la estabilización de suelos para la infraestructura vial. [6]. Por ello es importante que las carreteras tengan una subrasante compuesta de materiales resistentes, que posean unas óptimas características como base de la estructura vial. Debido a tal exigencia tienden a presentarse desafíos en las carreteras no pavimentadas, como la necesidad de un mantenimiento frecuente e intensivo [27], el reemplazo de capas para compensar la pérdida de material y bajo este requerimiento es como se opta por tecnologías alternativas "aditivos" para su utilización en la construcción de carreteras, siendo una opción factible en la estabilización por motivos económicos, estéticos y operativos. [7], puesto que esta técnica viene siendo utilizada ampliamente en el mejoramiento mecánico de suelos.[8]. La estabilización del suelo de la subrasante es una fase primaria y significativa en la construcción de carreteras [9], además se aplica con distintos propósitos en la mejora de las propiedades del suelo que, mediante procesos mecánicos y una combinación de sustancias químicas [34], naturales y sintéticas, ayudan a mejorar un suelo insuficiente o pobre para obtener una capa de suelo con mejores propiedades.[10]. Combinaciones que logran impermeabilizar el terreno de manera efectiva, prevenir la aparición de humedad y regular

Digital Object Identifier: (only for full papers, inserted by LACCEI).
ISSN, ISBN: (to be inserted by LACCEI).
DO NOT REMOVE

sus procesos de adsorción y desorción, reduciendo el polvo y la prevención de resultado de suelos arcillosos.[7].

Al usar aditivos en el proceso de estabilización de diferentes proyectos viales, se toma en cuenta en algunos casos una aplicación sostenible de costo – beneficio en las capas libres de una carretera. [9]. Actualmente, existen métodos de mejoramiento cuando estos presentan características de un suelo expansivos o arcillosos, que poseen la tendencia de aumentar o disminuir en volumen en presencia de cambios en el contenido de humedad [11], por lo que se precisa en utilizar metodologías como la presaturación para obtener una representación adecuada de su comportamiento y optar por el tipo de aditivo a usar. [12].

Debido a esto, el uso de aditivos para mejorar estabilidad de terrenos es un método que se ha planteado por todo el mundo. En Colombia, donde por carretera que es su principal medio de comunicación, su necesidad de tener buenas carreteras va en crecimiento, requiriendo materiales de buena calidad, que son de difícil consecución. [13]. Ante esta situación se plantean opciones constructivas, y entre estas está el tratamiento de suelos susceptibles (arcillas) a través de la incorporación de agentes estabilizantes, y mediante una serie de ensayos de laboratorio se busca el mejoramiento CBR de sus características físicas, mecánicas y químicas.[14]

Además, según estudios en Ecuador se menciona al aditivo Terrasil como un agente estabilizante de suelo que posee excelentes ventajas como la impermeabilización, teniendo una arcilla más resistente, así también en limos y arenas, reduciendo la probabilidad de un terreno más húmedo, además de que este aditivo viene a ser biodegradable y no produce efectos en los índices físicos de un suelo [15].

Este aditivo también se menciona en Colombia, como un agente que, al comparar con otros aditivos, este tiene que una propiedad para aplicación en suelos de baja plasticidad o no cohesivos, además de que puede ser usado como adición en materiales granulares, luego en sus beneficios está una capacidad de soporte mayor CBR para los suelos evaluados [16]. Con respecto a Perú, se planteó que el aditivo Terrasil con su estabilización complementa al método de estabilización mecánica por estratos granulares, lo cual esto tiene varias finalidades que cumplen con los estándares de desempeños relacionados con dicha base, subbase, subrasante de la efectuación de Carretera [31], además que se consideran calificados para su realización en terrenos considerados sumamente sensibles ante el agua, que son reconocidos mayormente como expansivos y que presentan solidez ineficiente [17].

Asimismo, se concluye que el agente químico Terrasil elimina el índice de plasticidad [33], reduce los efectos de erosión y es compatible con el medio ambiente. [18], además, logra transformar significativamente los suelos permeables en suelos completamente impermeables en comparación con otros aditivos químicos. [11], así como reducir la cantidad de muestra rocosa, disminuyendo los espesores de las distintas

capas, y provocando la disminución de los costos en cuestión del sostenimiento que corresponde a la subrasante [28]. que busca una resistencia más eficiente, que el aditivo cumple con la propiedad de impermeabilizante en terrenos que contengan arcillas, limos y arenas; tal es el caso que la capacidad de soporte CBR después de siete días de hacer el ensayo aumenta [15]. De igual manera para la obtención de un suelo netamente estabilizado con excelentes propiedades se sabe que los estabilizantes que son de naturaleza puzolánica proporcionan mejoras significativas en la resistencia mecánica [19].

Es por ello que se precisa mencionar al aditivo que tomará un rol importante en esta investigación [33], además de que es un material bastante estudiado en el mundo, el Cemento Portland (del inglés, *ordinary Portland cement, OPC*), siendo el aglutinante más utilizado a nivel mundial porque posee la capacidad de estabilizar una amplia variedad de suelos, aunque es mucho más efectivo en suelos arenosos y en suelos arcillosos con índices de plasticidad entre mediano y bajo [20]. También se investiga la mejora de la resistencia al corte del suelo de subrasante débil del terraplén de una carretera después de la estabilización masiva del suelo de cemento Portland. [3]. Pero se debe tomar en cuenta que el cemento, y más concretamente su clínker, es responsable de más de la mitad de sus efectos de agotamiento de la capa de ozono, cambio climático, entre otros. [21]. En referencia a las tecnologías químicamente estabilizadas garantizan un correcto desempeño en términos de niveles de servicio, siempre y cuando se adicione al suelo el aditivo sólido como el cemento [22], son alternativas a las pavimentaciones, donde se pueden mejorar las características técnicas del suelo para conseguir prestaciones mecánicas constantes, desde la posición y el criterio de resistencia CBR y sostenibilidad ambiental [23].

Por ello es vital considerar los efectos del uso adecuado y específico de estas tecnologías para el tratamiento de suelos pensados para obras viales no pavimentadas, en el contexto de la protección del medio ambiente y la reutilización de algunos materiales [24], por ello unas pruebas realizadas confirmaron que los estabilizadores químicos generalmente evaluados no presentan ningún peligro ambiental. Por ejemplo, en términos de toxicidad, biodegradación y formación de sólidos. Se explica que, para tener un impacto mínimo o nulo en el medio ambiente, cada proyecto específico debe ser evaluado, desde características cambio climático, intrusión, presencia de vegetación, variabilidad de agua. [25]. Esto demuestra que la estabilización química con estos compuestos no cambia significativamente el sustrato del suelo desde un punto de vista ecológico. [26].

En vista de que existe una necesidad de fomentar la aplicación de nuevos métodos constructivos orientados al mejoramiento de suelos para carreteras, [29]. En la presente investigación se tiene como objetivo principal determinar la influencia del uso de Cemento Portland y Terrasil en la estabilización de suelos en las carreteras del Perú. Asimismo, se tiene como objetivos específicos efectuar pruebas de mecánica de suelos de la capa subrasante en estado natural [32], realizar la caracterización de suelo con Terrasil de 0.5 lt/m³ y Cemento Portland de 3 - 4 %, comparar resultados de los aditivos Terrasil

y Cemento Portland evaluados en laboratorio, realizar el análisis de precios unitarios de un kilómetro con aditivos Terrasil y CementoPortland.

II. METODOLOGÍA

Para la presente investigación se utilizó un enfoque cuantitativo, que se define como un procedimiento donde se desarrollan secuencias, además la recolección de datos; con el propósito de obtener los resultados de las hipótesis comprobadas. Por lo que se desarrolla el estudio por medio de valores numéricos que corresponden al análisis que se utilizó para comprobar las teorías [34]. Conforme lo establecido, sobre lo que implica realizar el proceso de esta investigación, se decidió optar por el desarrollo de investigación de tipo experimental puro, ya que se efectuarán estudios de causa – efecto conforme las variables estudiadas, cumpliendo lo establecido con respecto al diseño experimental que plantea como un proceso experimental, lo que conlleva una recolección de datos necesarios, de los cuales serán sometido a métodos que se resolverán y contengan valides y cumplan con el objetivo. Especificando que existe una acción manipulada sobre las variables independientes con el objetivo de alterar las propiedades que presenta la variable dependiente de este estudio realizado en la localidad de Laredo. Tal como se muestra en la Fig. 1.

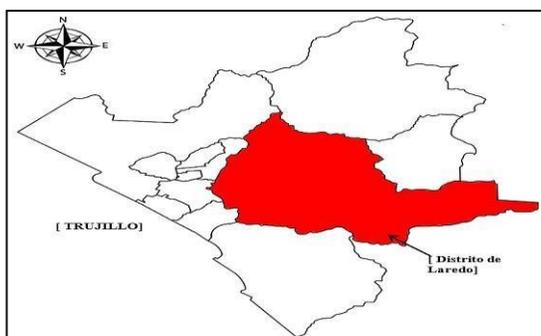


Fig. 1. Ubicación de la investigación.

En la presente investigación se considera como población al suelo adyacente que no cuenta con pavimentación del km 12 de la carretera Trujillo – Laredo. Asimismo, para poder determinar la muestra que fue estudiada en este trabajo de investigación, se desarrolló un muestreo de tipo no

probabilístico, conforme a los criterios técnicos, con la selección de la muestra conforme a la influencia de los conocimiento y estudios de los investigadores, lo cual para esta investigación se propuso como población al suelo adyacente que no cuenta con pavimentación, y en el realizar un total de 9 calicatas de manera progresiva en el tramo antes mencionado. La elección se hizo de acuerdo al criterio profesional, basándose en el Manual de Carreteras. Sección Suelos y Pavimentos [31].

Asimismo, en esta investigación se considera la técnica de observación de tipo directa, a fin de conocer las características y situaciones en que se encuentra el suelo del tramo en estudio en primera instancia. Además, los instrumentos que se emplearon para la recolección de datos iniciales fueron guías de inspección individual, las cuales nos sirvieron como sustento de cada referencia o información que se empleará en la investigación para una correcta obtención de resultados.

De igual manera, para la recolección de datos de los diferentes ensayos a realizar, tanto para muestras de suelo natural y también a muestras de suelo modificadas, se utilizaron cuadros, tablas y formatos de laboratorio, referentes a las normativas de cada ensayo “Granulometría (ASTM D - 421 & 422), Límites de Atterberg (ASTM D – 4318), Contenido de humedad (ASTM D – 2216), Proctor modificado (ASTM D - 1557 / MTC E 115) y CBR (ASTM D - 1883 / NTP 339.143 / MTC E 132)” respectivamente, además de fichas de caracterización de material, guías y programas para el análisis de costos totales en la estabilización de un kilómetro de carretera, tal como se especifica en el desarrollo de la presente investigación. Tal como se muestra en la Fig. 2.



Fig. 2. Muestras CBR sometidas al equipo de carga.

III.RESULTADOS

La presente investigación se basa en el análisis de suelo en el tramo adyacente de la carretera Trujillo – Laredo, específicamente considerando al Km 12 como punto de estudio. Para ello, se realizaron un total de 9 calicatas de manera alternada considerando parámetros como orografía y clase que demanda la normativa técnica,[31]. Habiendo realizado extracción de material de estudio, se procedió al respectivo análisis donde se siguieron los pasos correspondientes a las normativas considerada en cada uno de los ensayos, por lo que los resultados obtenidos se detallan en tablas y gráficos considerando los hallazgos con mayor impacto.

Análisis granulométrico

Resultados obtenidos en laboratorio cuando se analizó la estructura del suelo desde el punto de vista del tamaño de las partículas que lo forman considerando una muestra no mayor a 2 kilos por cada calicata y teniendo en cuenta lo que establece la normativa ASTM D-422. Tal como se muestra en la Fig. 3.

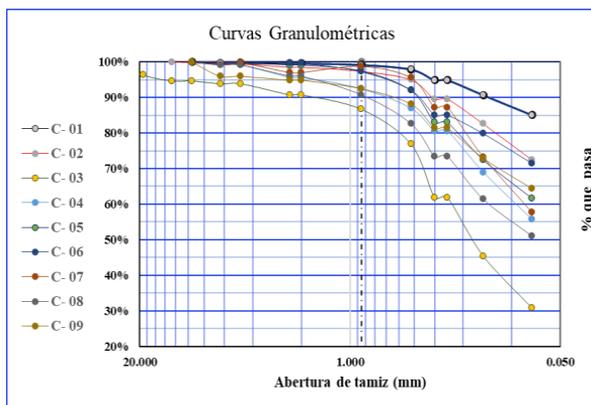


Fig. 3. Granulometría por muestras naturales.

Contenido de humedad

Resultados obtenidos mediante el ensayo de humedad para muestras naturales de las 9 calicatas excavadas, considerando la normativa ASTM D-2216. Tal como se muestra en la Fig. 4.

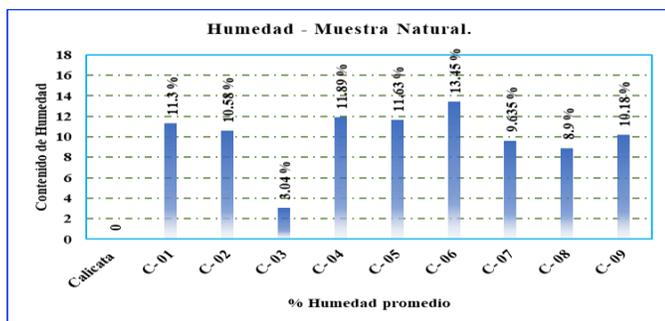


Fig. 4. Contenido de humedad en muestras naturales.

Resultados obtenidos mediante el ensayo de humedad para las muestras modificadas con 4% de Cemento portland T1 & 0.5 lt/m³ de Terrasil, de las calicatas clasificadas y la normativa referente. Tal como se muestra en la Fig. 5.

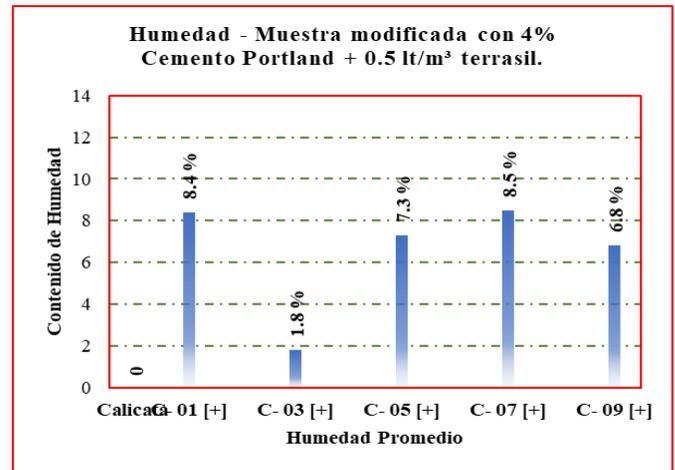


Fig. 5. Contenido de humedad en muestras modificadas.

Límites de Atterberg

Resultados del ensayo de límites de consistencia de muestra natural por cada calicata, bajo la norma ASTM D-4318, además en la tabla 1 referencia a los índices de plasticidad encontrados. Tal como se muestra en la Fig. 6.

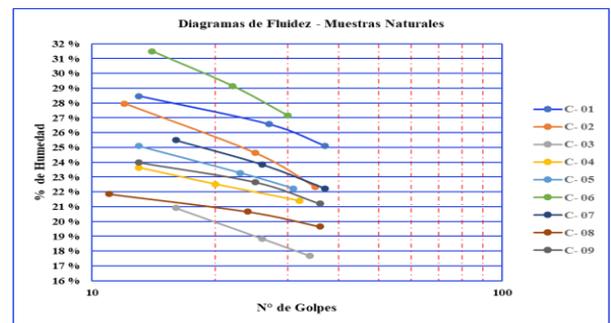


Fig. 6. Diagrama de fluidez en muestras naturales.

TABLA I
RELACION DE ÍNDICES Y LÍMITES

| Calicata | LL (%) | LP (%) | IP (%) |
|----------|--------|--------|--------|
| C- 01 | 26.72 | 16.80 | 9.92 |
| C- 02 | 24.98 | 16.03 | 8.96 |
| C- 03 | 19.14 | 16.32 | 2.82 |
| C- 04 | 22.51 | 13.46 | 9.05 |
| C- 05 | 23.54 | 15.45 | 8.09 |
| C- 06 | 29.27 | 17.96 | 11.31 |
| C- 07 | 23.86 | 15.21 | 8.65 |
| C- 08 | 20.72 | 15.07 | 5.65 |
| C- 09 | 22.62 | 16.21 | 6.40 |

Nota: índices de plasticidad en muestras naturales.

Resultados del ensayo de límites de consistencia de muestras modificadas con 4% de Cemento portland T1 & 0.5 lt/m³ de Terrasil, de las calicatas clasificadas y la normativa referente, además en la tabla X referencia a los índices de plasticidad obtenidos. Tal como se muestra en la Fig. 7.

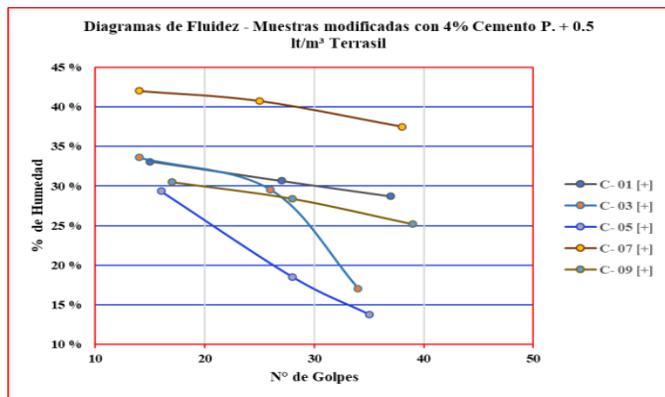


Fig. 7. Diagrama de fluidez en muestras modificadas

TABLA II
RELACIÓN DE ÍNDICES Y LÍMITES

| Calicata | LL (%) | LP (%) | IP (%) |
|-----------|--------|--------|--------|
| C- 01 (+) | 30.82 | 23.18 | 7.65 |
| C- 03 (+) | 26.76 | 19.23 | 7.53 |
| C- 05 (+) | 20.56 | 12.40 | 8.17 |
| C- 07 (+) | 40.09 | 12.40 | 7.14 |
| C- 09 (+) | 28.04 | 21.42 | 6.62 |

Nota: Índices de plasticidad en muestras modificadas.

Proctor Modificado

Resultados del ensayo de Proctor modificado considerando el método de prueba "A", lo cual se aplicó a muestras seleccionadas C-01, C-03, C-05, C-07 y C-09 respectivamente, bajo la normativa ASTM D-1557. Tal como se muestra en la Fig. 8.

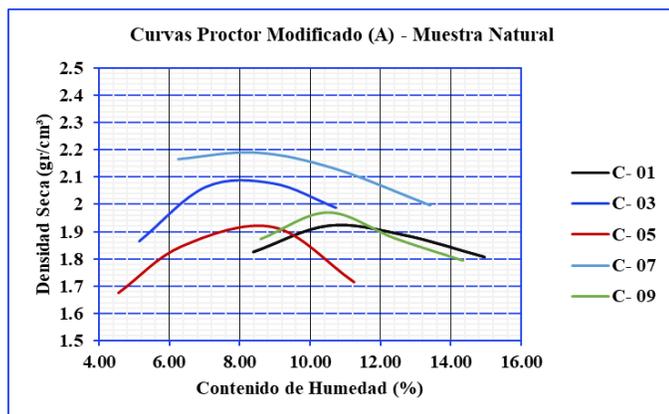


Fig. 8. Curvas de compactación en muestras naturales.

Resultados de los valores de máxima densidad seca y óptimo contenido de humedad, tomando en cuenta para este ensayo solo la muestra de suelo natural, sin alteraciones por aditivos.

TABLA III
RELACIÓN DE VALORES PROCTOR ENCONTRADOS

| Calicata | M.D.S | O.P.H |
|----------|-------------------------|---------|
| C- 01 | 1.92 gr/cm ³ | 10.79 % |
| C- 03 | 2.09 gr/cm ³ | 7.15 % |
| C- 05 | 1.93 gr/cm ³ | 8.37 % |
| C- 07 | 2.19 gr/cm ³ | 7.88 % |
| C- 09 | 1.97 gr/cm ³ | 10.18 % |

Nota: M.D.S & O.P.H en muestras naturales.

California Bearing Ratio

Resultados de los valores de CBR, lo cual se aplicó a muestras naturales seleccionadas según el método "A" a un 95y 100% del M.D.S, bajo la normativa ASTM D-1883.

TABLA IV
RELACIÓN DE VALORES CBR NATURALES ENCONTRADOS.

| M.D. S | CBR al 95 % | | CBR al 100 % | |
|----------|-------------|---------|--------------|---------|
| Calicata | (0.1") | (0.2") | (0.1") | (0.2") |
| C- 01 | 2.20 % | 3.00 % | 2.70 % | 3.60 % |
| C- 03 | 11.60 % | 16.30 % | 15.40 % | 22.00 % |
| C- 05 | 3.90 % | 5.60 % | 4.20 % | 6.00 % |
| C- 07 | 18.40 % | 24.60 % | 21.40 % | 28.90 % |
| C- 09 | 5.40 % | 6.00 % | 7.00 % | 7.20 % |

Nota: CBR al 95 - 100% en muestras naturales.

En la figura 9 se detalla la muestra natural de la calicata con mayor incidencia de CBR entre las demás calicatas seleccionadas, C- 07. Tal como se muestra en la Fig. 9.

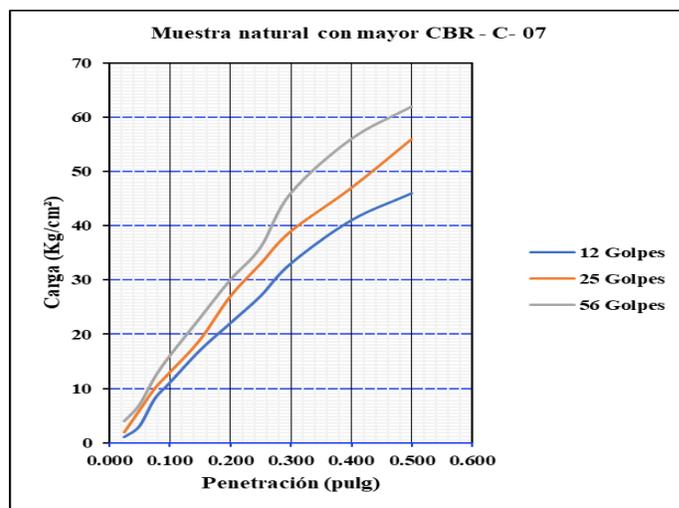


Fig. 9. CBR predominante en muestras naturales.

Resultados de los valores de CBR al 95 y 100% del M.D.S, aplicado a muestras de suelo modificadas con 3% de Cemento portland T1 & 0.5 lt/m³, de las calicatas clasificadas y referente a la normativa ASTM D-1883.

TABLA V
RELACIÓN DE VALORES CBR CON 3% CEMENTO

| M.D. S | CBR al 95 % | | CBR al 100 % | |
|-----------|-------------|---------|--------------|---------|
| | (0.1") | (0.2") | (0.1") | (0.2") |
| Calicata | | | | |
| C- 01 [+] | 31.40 % | 41.50 % | 40.40 % | 50.40 % |
| C- 03 [+] | 38.90 % | 53.20 % | 48.50 % | 69.30 % |
| C- 05 [+] | 31.60 % | 42.50 % | 37.20 % | 51.30 % |
| C- 07 [+] | 18.40 % | 24.60 % | 21.40 % | 28.90 % |
| C- 09 [+] | 19.00 % | 27.90 % | 23.00 % | 31.60 % |

Nota: CBR al 95 – 100% en muestras modificadas de calicatas.

Resultados de la muestra modificada de la calicata con mayor incidencia de CBR entre las demás calicatas seleccionadas, C-03. Tal como se muestra en la fig. 10.

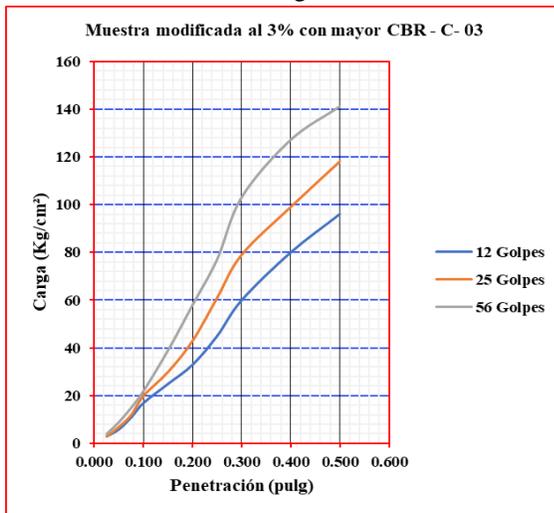


Fig. 10. CBR predominante en muestras modificadas.

Resultados de los valores de CBR al 95 y 100% del M.D.S, aplicado a muestras de suelo modificadas con 4% de Cemento portland T1 & 0.5 lt/m³, de las calicatas clasificadas y referente a la normativa ASTM D-1883.

TABLA VI
RELACIÓN DE VALORES CBR CON 4% CEMENTO

| M.D. S | CBR al 95 % | | CBR al 100 % | |
|-----------|-------------|----------|--------------|----------|
| | (0.1") | (0.2") | (0.1") | (0.2") |
| Calicata | | | | |
| C- 01 [+] | 48.50 % | 57.10 % | 58.50 % | 68.40 % |
| C- 03 [+] | 83.90 % | 113.10 % | 106.90 % | 141.60 % |
| C- 05 [+] | 43.30 % | 64.80 % | 53.90 % | 81.30 % |
| C- 07 [+] | 18.40 % | 24.60 % | 21.40 % | 28.90 % |
| C- 09 [+] | 23.60 % | 29.90 % | 27.10 % | 35.10 % |

Nota: CBR al 95 – 100% en muestras modificadas.

Resultados de la muestra modificada de la calicata con mayor incidencia de CBR entre las demás calicatas seleccionadas, C-03. Tal como se muestra en la Fig. 11.

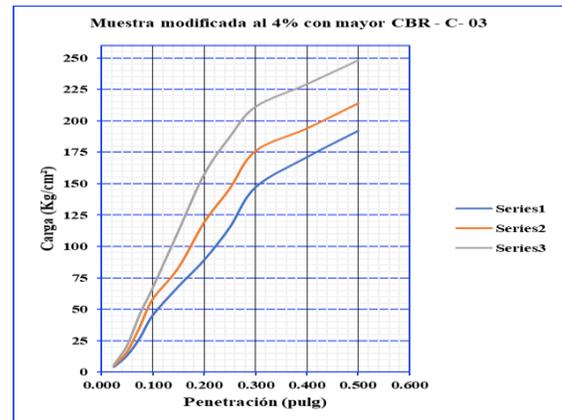


Fig. 11. CBR predominante en muestras modificadas de calicatas

Caracterización de muestras

Resultados de la clasificación inicial de tipos de suelo natural para las respectivas calicatas, considerando fichas de caracterización SUCS & AASHTO respectivamente.

TABLA VII.
CARACTERIZACIÓN DE MUESTRAS NATURALES

| Calicatas | Clasificación Muestras Naturales | |
|-----------|----------------------------------|-----------|
| | SUCS | AASHTO |
| C- 01 | CL | A-7-6 |
| C- 02 | CL | A-4 [6] |
| C- 03 | SM | A-2-4 [0] |
| C- 04 | SC | A-4 [3] |
| C- 05 | CL | A-4 [4] |
| C- 06 | CL | A-6-7 |
| C- 07 | SC | A-4 [3] |
| C- 08 | SM - SC | A-4 [2] |
| C- 09 | CL - ML | A-4 [5] |

Nota: Clasificación de muestras naturales.

En la tabla 8 se aprecia la clasificación de muestras modificadas de las calicatas seleccionadas, considerando fichas de caracterización SUCS & AASHTO respectivamente.

TABLA VIII
CARACTERIZACIÓN DE MUESTRAS MODIFICADAS

| Calicatas | Clasificación Muestras Modificadas | |
|-----------|------------------------------------|-----------|
| | SUCS | AASHTO |
| C- 01 [+] | SM | A - 4 [3] |
| C- 03 [+] | SP | A - 2 -6 |
| C- 05 [+] | ML | A - 6 |
| C- 07 [+] | SM | A - 5 [6] |
| C- 09 [+] | SM | A - 5 [6] |

Nota: Clasificación de muestras modificadas.

Caracterización de datos - laboratorio

Datos de la comparación de resultados obtenidos en laboratorio donde el CBR de la C- 03 resultó siendo el más óptimo entre las demás calicatas seleccionadas. Tal como se muestra en la Fig. 12.

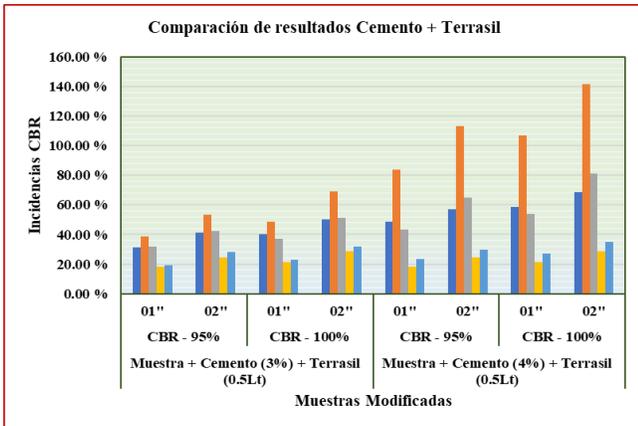


Fig. 12. Comparación de resultados en muestras modificadas.

Evaluación de Costos en un Kilómetro con aditivos

Resultados de la estimación de costos sin el uso de aditivos y con el uso aditivos. Tal como se muestra en la Tabla IX

TABLA IX
COSTOS ESTIMADOS EN UN KILÓMETRO

| LA LIBERTAD - TRUJILLO - LAREDO | | Costo al 0/06/2023 | | |
|---|----------------|--------------------|------------|--------------|
| Descripción | Und. | Metrado | Precio \$/ | Parcial \$/ |
| ANÁLISIS DE PRECIOS UNITARIOS DE PRINCIPALES PARTIDAS SIN ADITIVO | | | | 672,276.00 |
| PERFILADO Y COMPACTACIÓN EN ZONA DE CORTE | m ² | 6,600.00 | 3.31 | 21,846.00 |
| SUB BASE GRANULAR E=0.25M | m ² | 6,600.00 | 15.94 | 105,204.00 |
| BASE GRANULAR E=0.20M COMPACTADA | m ² | 6,600.00 | 14.81 | 97,746.00 |
| CARPETA ASFÁLTICA EN CALIENTE E=3" | m ² | 6,600.00 | 61.71 | 407,286.00 |
| IMPREGNACIÓN ASFÁLTICA CON MC-30 | m ² | 6,600.00 | 6.09 | 40,194.00 |
| ANÁLISIS DE PRECIOS UNITARIOS DE PRINCIPALES PARTIDAS CON ADITIVO | | | | 629,574.00 |
| MEJORAMIENTO DE SUBRASANTE (0.28KG/M3 DE ADITIVO TERRASIL + 45 KG/M3 DE CEMENTO PORTLAND) | m ³ | 1,320.00 | 61.90 | 81,540.00 |
| BASE GRANULAR E=0.20M COMPACTADA | m ² | 6,600.00 | 14.81 | 97,746.00 |
| CARPETA ASFÁLTICA EN CALIENTE E=3" | m ² | 6,600.00 | 61.71 | 407,286.00 |
| IMPREGNACIÓN ASFÁLTICA CON MC-30 | m ² | 6,600.00 | 6.09 | 40,194.00 |
| Costo Directo | | | | 1,301,850.00 |

IV. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

La presente investigación tiene como objetivo general determinar cómo influyen los aditivos en la estabilización de una subrasante, y mediante el ensayo de mecánica de suelos, caracterización y comparación de resultados analizados y la estimación de costo en la estabilización de un kilómetro con estos aditivos. Al ser una investigación de tipo experimental se presentaron ciertas limitaciones como, los permisos a la jurisdicción del tramo de vía en estudio, accesibilidad al aditivo Terrasil y accesibilidad a los laboratorios del campus. En efecto se desarrolló la investigación considerando que, se obtuvo unas muestras predominantes de suelo tipo A-4 (arena arcillosa). Los valores de índice de plasticidad para las muestras evaluadas van desde el rango de $2.4 < IP < 10.3$, lo que indica que el material tiene una plasticidad media, siendo un suelo arcilloso [3]. En las pruebas de contenido de

humedad se obtuvo como mínimo 3.0 % en la calicata C- 03 y 13.5 % en la calicata C- 06 de contenido máximo. En la prueba de Proctor modificado se obtuvo un valor mínimo de la máxima densidad seca 1.923 gr/cm^3 para la calicata C- 01 y un máximo de 2.194 gr/cm^3 para la calicata C- 07, y con respecto al óptimo contenido de humedad se obtuvo valores que están entre 7.88% para la calicata C- 03 a 10.79% para la calicata C-01 para la muestra obtenida a 1.5 m para el estudio de subrasante de la carretera. En la prueba de CBR se obtuvo valores mínimos de 2.7 para el 100% y 3.6 para 100% del

M.D.S (0.1") y valores de 2.2 para el 95 % y 3 para el 95 % del M.D.S (0.2"), para la calicata C- 0.1. [9]. Además, se obtuvo valores máximos de 21.4 para el 100% y 28.9 para 100% del M.D.S (0.1") y valores de 18.5 para el 95 % y 24.6 para el 95 % del M.D.S (0.2"), para la calicata C- 0.7 respectivamente [4], [5], [8]. Además, según los valores de humedad se deduce que el porcentaje más bajo tiene la C- 03. El grado de humedad de este suelo es bajo por ser menor al 25%. En la prueba Proctor relacionamos a la calicata C-03 siendo la de menor contenido de humedad natural de un 3.0% y en el ensayo de compactación el óptimo es de 7.15%, lo que explica que este esta muestra de suelo en estado natural si llegará a una máxima densidad seca, puesto que el contenido de humedad natural es menor que el óptimo.

En la prueba de CBR se analizó la calicata C- 03 cuyo porcentaje en estado natural al 100% del M.D.S es de 15.4% para (0.1"), por lo que según él [31] es una subrasante buena por ser $< 20\%$, pero al añadir 3% de cemento portland tipo I + 0.5 lt/m^3 de Terrasil, aumenta a 48.5%, además con un valor de 4% de cemento + 0.5 lt/m^3 de Terrasil, [11], [17], esta aumenta a 106.9%, lo que convierte al terreno en una subrasante muy buena. Esto se da ya que el cemento se tiende a adherir al suelo, ocasionando que la estructura trabaje de manera rígida, además por ser suelo de tipo arcilloso o limoso y por su alta cantidad de material fino [2], hay un cambio en sus características físicas, produciendo un aumento de consistencia [20]. Frente a lo descrito se acepta la hipótesis de investigación donde menciona que los aditivos Cemento portland y Terrasil si influyen de manera positiva en la estabilización de suelos en el Km 12 de la carretera Trujillo – Laredo, se observa que estos materiales si influyen en la estabilización de un terreno en la mejora de la resistencia y demás cambios que desarrolla como lo mencionan en las Ref. [2], [18], [32]. Además teniendo en cuenta las dosificaciones recomendadas para la estabilización de una subrasante en este caso para el aditivo Terrasil una dosificación de 0.5 Lt/m^3 añadido a 4% de cemento (83.24 kg/m^3) a la muestra de la calicata C -3 donde demuestra que el porcentaje mínimo para 95% de M.D.S tiene como resultado 113.1%, considerando esta muestra como una de la que tiene un porcentaje elevado con esa dosificación, distinto a las dosificaciones de 0.3 Lt/m^3 de Terrasil, con una cantidad de (50 kg/m^3) de cemento, evaluada al 95 % y obteniendo un porcentaje de 115.5% las cuales detalla en la investigación de la Ref.[5]. De igual modo con el cemento

REFERENCIAS

portland de 3%, teniendo una cantidad de 56.61 kg/m³ evaluado al 100% se obtuvo un aumento de 50.4%, respecto a lo evaluado al 95% lo cual se obtuvo 41.5 %. Por lo que se deduce que tal terreno se debería mezclar con otro material de cantera. En este estudio al realizar la caracterización de suelo con Terrasil de 0.5 Lt/m³ y Cemento Portland de 3 - 4% se encontró que al trabajar con los aditivos se tiene que tener en cuenta el tipo de suelo, ya que influye en la caracterización posterior a los ensayos, puesto que inicialmente se denotó como suelos arcillosos limosos con predominancia de tipo A-

(4) para la mayoría de muestras naturales de cada calicata, y al aplicarle los aditivos en sus respectivas proporciones se denota un cambio en la estructura granulométrica y por ende en su caracterización, obtenido suelos con Arenas limo arcillosas A - 4 (3), A - 5 (6), A - 6 respectivamente. En consecuencia, queda comprobado que las tecnologías aplicadas al mejoramiento del terreno cumplen con el objetivo que se prevé y desarrollan cambios en características físicas, [18], [32], de las muestras mezcladas con sus debidos porcentajes, por ejemplo, con tecnología Proes y cemento con mezcla a un 85 % y 15 % se obtuvo caracterizaciones de A-2-4(0) y A-7- 5(9) conforme el CBR de muestra natural y con aditivos según [22]. En esta investigación al comparar resultados de los aditivos Terrasil y Cemento Portland evaluados en laboratorio se observó que existe un incremento en la capacidad de soporte referente a la subrasante, puesto que habiendo efectuado los ensayos a la muestra natural se obtuvo como máximo CBR al 100 % (0.2") en la C- 07 un 28.90% y en las muestras modificadas con Cemento al 3% + 0.5 lt/m³ de Terrasil se obtuvo como máximo CBR al 100% (0.2") en la C-03 un 69.30%, además con Cemento al 4% + 0.5 lt/m³ de Terrasil se obtuvo como máximo CBR al 100% (0.2") en la C-03 un 141.60% respectivamente, denotando así una mejora positiva en el CBR de la subrasante. En este estudio al realizar el análisis de precios unitarios de un Kilómetro utilizando los aditivos Terrasil y Cemento Portland, considerando el espesor de suelo previamente medido se obtuvo el costo aproximado de \$/. 629,574.00, mientras que si aplicar estos aditivos a la estabilización de suelos el costo asciende a \$/. 672,276.00, lo que indica que hay una diferencia en el presupuesto. Es por ello que se demuestra que al usar estos aditivos es más factible tanto en la mejora de propiedades, como en los costos de estabilización. Se concluye que, en la presente investigación, se efectuó las pruebas de mecánica de suelos de la capa subrasante en estado natural, según la granulometría predomina un suelo de tipo A-4 de media plasticidad. Además, se realizó la caracterización de suelo con Terrasil de 0.5 lt/m³ y Cemento portland de 3 - 4%, donde según la clasificación de muestras post ensayo se obtuvo un suelo de tipo A- 6. De igual modo se comparó los resultados de los aditivos evaluados en laboratorio, denotando un incremento considerable en los CBR y así mejorando la capacidad de soporte. De igual manera se realizó el análisis de precios unitarios de un Kilómetro con aditivos Terrasil y Cemento portland, lo cual con el software S10 se demostró que es más rentable estabilizar la subrasante aplicando estos aditivos.

- [1] MTC. "Manual de carreteras, mantenimiento o conservación vial (DG-2018). Lima". 2018 [En Línea]. Disponible: https://portal.mtc.gob.pe/transportes/caminos/normas_carreteras/MTC_%20NORMAS/ARCH_PDF/MAN_9%20MCV-2014_2016.pdf
- [2] Díez, L. & Montes, O. & Caicedo, Bernardo. "Estabilización de Subrasantes con Productos Químicos", 2022. [En línea]. Disponible: https://www.researchgate.net/publication/238782419_Estabilizacion_de_Subrasantes_con_Productos_Quimicos
- [3] Ifediniru, C., Ekeocha, N.E. "Performance of cement-stabilized weak subgrade for highway embankment construction in Southeast Nigeria", 2022. [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.1186/s40703-021-00166-z>
- [4] J. Ccoillo. "Comportamiento de la subrasante de suelos con adición de escoria en pavimentos flexibles de la Universidad Agraria La Molina-2016", 2017. [En línea]. <https://hdl.handle.net/20.500.12692/13342>
- [5] O. Huiza & M. Gustavo. "Mejoramiento de la capacidad de soporte en vías de bajo volumen de tránsito mediante estabilización química. Carretera Puquio - Coracora, Ayacucho", 2019. [En línea]. Disponible: <http://hdl.handle.net/20.500.14076/18754>
- [6] Jiménez, Yolanda A., Bastidas, Marlon J., & Consuegra, José L. "Obtaining of Coal Mining Waste Mixtures for the Soil Stabilization Through Multiobjective Evolutionary Algorithm", 2019. [En línea]. Disponible: <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642019000400249>
- [7] López, Gerardo & Ambrosini, Marcela. "Nanotechnology in Soil Stabilization: Economic Feasibility", 2013. [En línea]. Disponible: https://www.researchgate.net/publication/265642735_Nanotechnology_in_Soil_Stabilization_Economic_Feasibility
- [8] Quilambarqui R., & Xavier, A. "Evaluación del diseño vial urbano utilizando resinas orgánicas para aumentar la capacidad soportante de la estructura de la vía", 2017. [En línea]. Disponible: <http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/28359>
- [9] Ahmad, SA, Ahmad, MS. "Investigación experimental para estudiar el efecto del refuerzo en el comportamiento de resistencia de las cenizas volantes", 2022. [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.1186/s44147-022-00096-2>
- [10] Jácome-Macías, G. A., & Ortiz-Hernández, E. H. "Estabilización de un suelo de subrasante de carretera con el sistema Consolid", 2022. [En línea]. Disponible: <http://journalingeniar.org/index.php/ingeniar/article/view/88/121>
- [11] Karumanchi Meeravali, Nerella Ruben, Kodi Rangaswamy. "Stabilization of soft-clay using nanomaterial: Terrasil", 2020. [En línea]. Disponible: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214785320304855>
- [12] González-Rufino, José Luis, & Chávez-Alegria, Omar. "Evaluación de la expansión en suelos presaturados", 2021. [En línea]. Disponible: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=40471804008>
- [13] Alarcón, J., Jiménez, M., & Benítez, R. "Stabilization of soils through the use of oily sludge", 2020. [En línea]. Disponible: <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-50732020000100005>
- [14] Cristancho, C. & Sandoval, H. & Naranjo, E. "Caracterización de un suelo arcilloso tratado con hidróxido de calcio", 2012. [En línea]. Disponible: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=413940771003>
- [15] Rodríguez, D. "Análisis comparativo de la compactación y humedad de la subrasante natural y la subrasante utilizando productos químicos biodegradables (Terrasil), de la vía ecológica del Cantón Quevedo, provincia de Los Ríos. Ecuador.", 2016. [En línea]. Disponible: <http://repositorio.uta.edu.ec/jspui/handle/123456789/23558>
- [16] Álvarez, M. "Estabilización química de suelos en proyectos de infraestructura vial en Antioquia", 2015. [En línea]. Disponible: https://repository.eia.edu.co/bitstream/handle/11190/1772/AlvarezSantia%202015_EstabilizacionQuimicaSuelos.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- [17] Cristóbal, M. "Estabilización iónica de los suelos con Terrasil en los contratos de mantenimiento y conservación vial, Lima", 2015. [En línea]. Disponible: <https://repositorio.upn.edu.pe>
- [18] Brem Environmental Solutions. "TerraSil", 2019. [En línea]. Disponible: <http://brem.com.pe/productos.html>
- [19] Gloria Restrepo; Diana Río, & Eliana Llano. "Evaluación de tecnologías para la estabilización de suelos viales empleando

- intemperismo acelerado. Una estrategia de análisis de impactos sobre la biodiversidad”, 2020. [En línea]. Disponible: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=344264140012>
- [20] J. F. Rivera, A. Aguirre-Guerrero, R. Mejía de Gutiérrez, y A. Orobio, “Estabilización química de suelos - Materiales convencionales y activados alcalinamente (revisión).”, 2020. [En línea]. Disponible: DOI: [10.23850/22565035.2530](https://doi.org/10.23850/22565035.2530)
- [21] Roux, Salvador, & Mujica, José, & García, Manuel. “Los materiales alternativos estabilizados y su impacto ambiental”, 2014. [En línea]. Disponible: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=203332667014>
- [22] Angulo Roldan, Diego y Rojas Escajadillo, Hember. “Ensayo de fiabilidad con aditivo PROES para la estabilización del suelo en el AA. HH El Milagro”, 2016. [En línea]. Disponible: <http://repositorio.ucp.edu.pe/handle/UCP/142>
- [23] Tabora, D. L. V., Vásquez, G. M. R., & Cardona, E. P. L. “Evaluación ambiental del efecto del uso de aditivos químicos en la estabilización de suelos viales”, 2022. [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.54020/seasv3n2-014>
- [24] Bustamante, F., Marín, N., & Benites, J. “Uso de Vinaza de Saccharum Officinarum para Estabilización de Suelos Cohesivos”, 2021. [En línea]. Disponible: https://www.scielo.sa.cr/scielo.php?pid=S221537052022000100046&script=sci_arttext
- [25] Peña S, C., Arévalo V, C., & Ramón A, J. “Análisis de las propiedades físico mecánicas de suelo existentes como subrasante en la ciudad de Cúcuta, municipio de los patios y villa del rosario”, 2016. [En línea]. Disponible: https://revistas.unipamplona.edu.co/ojs_viceinves/index.php/RA/article/view/3270/1903
- [26] Bojorque, J. (2017). Evaluación del diseño vial urbano utilizando resinas orgánicas para aumentar la capacidad de soporte de la estructura de la vía. Cuenca [En línea]. Disponible: <http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/28359>
- [27] Menéndez, J. “). Ingeniería de Pavimentos. Materiales, Diseño y Conservación. Departamento de Imprenta de ICG. Lima, Perú.”, 2021. [En línea]. Disponible: <https://www.construccion.org/index.php?e=cursos/0428-Pun-DisPavNR/material.htm>
- [28] Ministerio de Transportes “Manual de Carreteras Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos. Lima.”, 2014. [En línea]. Disponible: https://portal.mtc.gob.pe/transportes/caminos/normas_carreteras/MTC%20NORMAS/ARCH_PDF/MAN_7%20SGGP-2014.pdf
- [29] Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento. “Norma E.050: Suelos y Cimentaciones. Perú”, 2013. [En línea]. Disponible: <https://www.jorgealvahurtado.com/files/N.T.E.%20E%20050%20-%20Suelos%20y%20Cimentaciones.pdf>
- [30] MTC. “Manual de Carreteras. En Diseño Geométrico (DG-2014). Lima.”, 2014. [En línea]. Disponible: http://transparencia.mtc.gob.pe/idm_docs/normas_legales/1_0_3580.pdf
- [31] Ministerio de Transportes y Comunicaciones. “Manual de Ensayo de Materiales”, 2016. [En línea]. Disponible: https://portal.mtc.gob.pe/transportes/caminos/normas_carreteras/documentos/manuales/Manual%20Ensayo%20de%20Materiales.pdf
- [32] Optimasoil Nanotechnology. “Optimasoil Nanotechnology”, 2022. [En línea]. Disponible: <https://www.optimasoil.com/en/terrasil/>
- [33] Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C., & Pilar Baptista, Lucio. “Metodología de la Investigación”, 2016. [En línea]. Disponible: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/libro?codigo=775008>
- [34] Ramos Vásquez, E & Zúñiga Dávila, D. “Efecto de la humedad, temperatura y pH del suelo en la actividad microbiana a nivel de laboratorio”, 2008. [En línea]. Disponible: http://www.scielo.org.pe/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S1726-22162008000100015