

USE OF RECYCLED RUBBER AS A SUSTAINABLE ALTERNATIVE FOR SUBGRADE IMPROVEMENT

Elmer Alex Fernandez Bustamante, Ing.¹; Sandy Lucero Chugnas Jambo, Bach.²; Lilian Rocío Villanueva Bazán, Ing.³

^{1,2,3} Universidad Privada del Norte (UPN), Cajamarca - Perú, N00278264@upn.pe, N00279389@upn.pe,
Lilian.villanueva@upn.edu.pe

Abstract– *This study explored the enhancement of silty soil strength through the incorporation of granular rubber derived from sports field waste. The methodology involved performing laboratory tests following ASTM and AASHTO standards. The soil analyzed, classified as A-76(38) under both the SUCS and AASHTO systems, consists of medium plasticity organic clays and low plasticity organic silty clays. Initially, the soil exhibited a low CBR (California Bearing Ratio) of 12.8%, making it unsuitable as subgrade or base material. However, the addition of granular rubber resulted in a progressive increase in CBR values: with 1% rubber, the CBR rose to 13.42%; with 2%, it reached 14.37%; with 3%, it improved to 15.66%; and with 4%, it increased to 16.94%. These results demonstrate that granular rubber significantly enhances the soil's strength, improving its suitability as a subgrade material. The study concludes that the incorporation of granular rubber is an effective and sustainable method for stabilizing silty soils, significantly boosting their bearing capacity. Furthermore, this approach offers an ecological benefit by contributing to the recycling of rubber waste, which would otherwise contribute to environmental pollution. In addition to its technical advantages, the use of recycled rubber promotes environmental sustainability, offering a cost-effective and eco-friendly solution for improving subgrade materials in construction projects. This research, therefore, presents an innovative method for enhancing soil performance while addressing waste management and sustainability challenges.*

Keywords– *Stabilized soils, Soil mechanics, Rubber, Sustainability, Pavements.*

USO DE CAUCHO RECICLADO COMO ALTERNATIVA SOSTENIBLE PARA LA MEJORA DE LA SUBRASANTE

Elmer Alex Fernandez Bustamante, Ing.¹; Sandy Lucero Chugnas Jambo, Bach.²; Lilian Rocío Villanueva Bazán, Ing.³

^{1,2,3} Universidad Privada del Norte (UPN), Cajamarca - Perú, N00278264@upn.pe, N00279389@upn.pe,
Lilian.villanueva@upn.edu.pe

Resumen– Este estudio exploró la mejora de la resistencia de suelos limosos mediante la incorporación de caucho granular derivado de residuos de campos deportivos. La metodología consistió en realizar ensayos de laboratorio siguiendo las normas ASTM y AASHTO. El suelo analizado, clasificado como A-76(38) según los sistemas SUCS y AASHTO, se compone de arcillas orgánicas de plasticidad media y arcillas limosas orgánicas de baja plasticidad. Inicialmente, el suelo presentaba un bajo CBR (Índice de Soporte de California) de 12,8 %, lo que lo hacía inadecuado como material de subrasante o base. Sin embargo, la adición de caucho granular resultó en un aumento progresivo de los valores de CBR: con un 1 % de caucho, el CBR aumentó a 13,42 %; con un 2 %, alcanzó 14,37 %; con un 3 %, mejoró a 15,66 %; y con un 4 %, aumentó a 16,94 %. Estos resultados demuestran que el caucho granular mejora significativamente la resistencia del suelo, lo que aumenta su idoneidad como material de subrasante. El estudio concluye que la incorporación de caucho granulado es un método eficaz y sostenible para estabilizar suelos limosos, aumentando significativamente su capacidad portante. Además, este enfoque ofrece un beneficio ecológico al contribuir al reciclaje de residuos de caucho, que de otro modo contribuirían a la contaminación ambiental. Sumado a sus ventajas técnicas, el uso de caucho reciclado promueve la sostenibilidad ambiental, ofreciendo una solución rentable y ecológica para mejorar los materiales de subrasante en proyectos de construcción. Por lo tanto, esta investigación presenta un método innovador para mejorar el rendimiento del suelo al tiempo que aborda los desafíos de la gestión de residuos y la sostenibilidad.

Palabras Claves-- Suelos estabilizados, Mecánica de suelos, Caucho, Sostenibilidad, Pavimentos.

I. INTRODUCTION

La relevancia de promover un desarrollo sostenible en el siglo XXI se ha vuelto más urgente ante los retos que representan las alteraciones climáticas y el incremento de las temperaturas a nivel global. La fabricación de materiales de construcción naturales demanda un considerable gasto energético, especialmente proveniente de combustibles fósiles, lo cual genera una alta emisión de dióxido de carbono y otros gases que contribuyen al efecto invernadero [1]. Paralelamente, los residuos de caucho generan problemas ecológicos y de contaminación, ya que los neumáticos desechados pueden tardar siglos en descomponerse y, mientras tanto, liberan sustancias tóxicas en el medio ambiente [2]. En

respuesta a estos desafíos, en los últimos años se ha incrementado el uso de residuos de caucho en la construcción de carreteras, reduciendo así el impacto ambiental [3].

En este proyecto, hemos decidido utilizar residuos de caucho provenientes de una cancha deportiva para investigar su potencial en la estabilización de suelos limosos. Las preguntas que guían esta investigación son: ¿Es viable utilizar residuos de material de caucho para mejorar la estabilidad de un suelo? Y, de ser así, ¿Cómo afecta el uso de caucho a la máxima densidad seca y a la resistencia de un suelo limoso?

Investigaciones previas han indicado que la incorporación de caucho puede mejorar las características estructurales del suelo. Por ejemplo, el estudio de Ref. [4] evaluó las propiedades de mezclas de suelo y caucho triturado, encontrando que un 5% de caucho granulado optimiza los índices de CBR y la resistencia a la compresión no confinada. En su investigación, los valores de CBR aumentaron aproximadamente un 18% y un 25% para condiciones empapadas y no empapadas, respectivamente, y la capacidad para soportar esfuerzos de compresión sin confinamiento mostró un incremento significativo con el mismo nivel de aditivo.

A nivel nacional, el estudio de Ref. [5] demostró que la utilización de polvo de caucho reciclado representa una opción factible para optimizar las características mecánicas de suelos arcillosos. Sus resultados indicaron mejoras en la resistencia al esfuerzo de corte y una densificación significativa del suelo con el uso de caucho, transformando subrasantes inadecuadas en materiales más adecuados para su uso en infraestructuras viales.

Basándonos en estos antecedentes, nuestra investigación pretende analizar el efecto de la incorporación de caucho en un suelo limoso, con el objetivo de optimizar la capacidad de resistencia de la subrasante en proyectos de construcción y contribuir a la sostenibilidad mediante el uso de materiales reciclados. Esta investigación no solo busca comprobar la viabilidad técnica de esta mezcla, sino también proporcionar una solución sostenible y económica para la gestión de residuos de caucho, promoviendo prácticas de construcción más ecológicas y eficientes.

II. METHODOLOGY

A. Tipo de Investigación

La presente investigación es de naturaleza aplicada, ya que pretende utilizar los conocimientos de investigaciones básicas para validar los experimentos propuestos [6]. Según Ref. [7] el propósito de una investigación aplicada es desarrollar conocimiento práctico que pueda implementarse directamente en la comunidad o en el ámbito productivo, ya sea a corto o mediano plazo. El propósito de esta investigación es analizar de forma exhaustiva las propiedades mecánicas de mezclas compuestas por suelo limoso y diversos porcentajes de caucho, con el fin de entender cómo la incorporación de este material influye en la compactación, el contenido ideal de humedad y las características de compactación de una subrasante.

B. Muestra

La calicata de exploración para realizar el estudio se localiza en la región de Cajamarca, específicamente en la provincia y el distrito que comparten el mismo nombre.

Coordenadas: Zona 17M:
Este: 776833.78
Sur: 9208047.64
Cota: 2677 m.s.n.m



Fig. 1 Vista satelital - Ubicación de la calicata.

Nota: Vista satelital del área de estudio que muestra la ubicación de la calicata para la caracterización geotécnica del terreno.

C. Ensayos y Equipos

1) *Granulometría:* Este procedimiento se emplea para identificar la clasificación de los tamaños de partículas en un suelo. Este análisis es fundamental para entender las propiedades y el comportamiento del suelo, especialmente en el área de la ingeniería geotécnica y la construcción. Para llevar a cabo este ensayo, se sigue la NORMA ASTM D-422 y la NTP 339.128. Los equipos utilizados incluyen un conjunto de tamices, balanzas y un horno Ref. [8]

2) *Límite Líquido del Suelo:* Este procedimiento se emplea para identificar el porcentaje de humedad en el que un suelo transita de la condición plástica a la condición líquida. Este indicador es esencial para analizar las características de plasticidad y la capacidad de deformación del suelo. El procedimiento se lleva a cabo conforme a la norma ASTM D-4318 y la NTP 339.129. Los equipos necesarios incluyen un conjunto de tamices, balanzas, el aparato Casagrande, una copa de porcelana, un plato de vidrio y un horno [8].

3) *Límite Plástico del Suelo:* Se define cuando el suelo cambia de una fase semisólida a una plástica, y se establece según el nivel de humedad más adecuado. Para realizar este ensayo se hace uso de la NORMA ASTM D-4318 y la NTP 339.129. Los equipos que se utilizan son: Juego de tamices, Balanzas, Aparato Casagrande, Copa de porcelana, plato de vidrio y Horno [8].

4) *Clasificación del suelo:* La NTP 339.134 define un método para categorizar suelos destinados a proyectos de ingeniería, basándose en el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS). Este enfoque clasifica los suelos de acuerdo con sus características físicas y su comportamiento. Asimismo, se emplea el sistema de clasificación establecido por la AASHTO, que es ampliamente adoptado en proyectos de infraestructura vial para determinar la adecuación de los suelos como materiales de construcción [8].

5) *Proctor Modificado:* Conocido también como ensayo de compactación Proctor estándar o normal, es un método empleado para evaluar las características de compactación de un suelo. Este procedimiento, ampliamente utilizado en ingeniería, facilita la determinación de la densidad máxima y el contenido óptimo de humedad en un suelo compactado. Se realiza siguiendo los lineamientos de la norma ASTM D-1557 y la NTP 339.141. Los equipos requeridos incluyen un molde para el Proctor estándar, un pisón, un martillo de caída libre, una balanza y un horno [8].

California Bearing Ratio (CBR): Se emplea para analizar la resistencia al corte de un suelo y su capacidad de soportar cargas. Este ensayo ofrece una evaluación relativa de la calidad del suelo como material para subrasante o subbase en la construcción de pavimentos y carreteras. Se lleva a cabo conforme a la norma ASTM D-1883 y la NTP 339.145. Entre los equipos requeridos se encuentran un molde CBR, un pisón, un dial, un dispositivo de carga, una placa de soporte, una balanza y un horno.

D. Procedimiento

El procedimiento de investigación comenzó con la recolección de muestras representativas del suelo natural en el área de estudio, seguida de la preparación meticulosa de mezclas con diferentes concentraciones de caucho granular, proveniente de neumáticos reciclados, en porcentajes

escalonados del 1% al 4%. Estas mezclas se homogeneizaron minuciosamente para garantizar una distribución uniforme de las partículas de caucho en el suelo. Luego, se llevaron a cabo una serie de ensayos de laboratorio siguiendo las normativas ASTM, como los ensayos de plasticidad conforme a ASTM D4318 y los ensayos de Proctor Modificado de acuerdo con ASTM D1557-02. Estos ensayos permitieron evaluar diversos parámetros geotécnicos, como el Límite Líquido, el Límite Plástico, la densidad seca máxima y el contenido óptimo de humedad. Luego, se llevaron a cabo ensayos de California Bearing Ratio (CBR) según la norma ASTM D1883, considerando niveles de compactación del suelo al 95% y 100% de la densidad seca máxima. Los datos obtenidos fueron analizados en detalle y comparados utilizando gráficos para mostrar las relaciones entre el contenido de caucho y las propiedades geotécnicas del suelo. Este enfoque metodológico detallado permitió una evaluación integral del efecto del caucho granular en la resistencia de la subrasante de suelos limosos, ofreciendo conclusiones valiosas y recomendaciones para promover la sostenibilidad en proyectos de infraestructura vial mediante el uso de residuos reciclados.

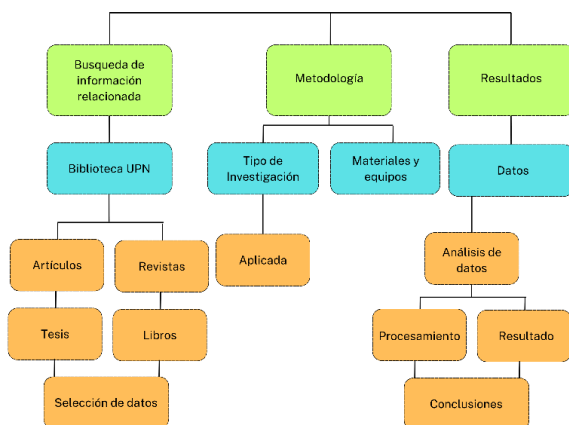


Fig. 2 Flujograma de trabajo.

Nota: La figura 2 muestra el esquema del proceso de investigación, donde se detallan las etapas principales del estudio, desde la planificación y recolección de datos hasta el análisis e interpretación de resultados.

III. RESULTS

Las mezclas con caucho se llevaron a cabo utilizando proporciones del 1%, 2%, 3% y 4% con respecto al volumen total del suelo analizado, la simbología empleada para representar estas composiciones se detalla en la Tabla 1.

TABLA 1
REPRESENTACIONES EMPLEADAS PARA IDENTIFICAR LAS COMBINACIONES DE SUELO CON CAUCHO.

Material	Suelo (%)	Caucho (%)	Simbología
Suelo Natural	100	0	C - 0%
Mezcla 1	100	1	C - 1%
Mezcla 2	100	2	C - 2%
Mezcla 3	100	3	C - 3%
Mezcla 4	100	4	C - 4%

Nota: Se considera la muestra de suelo natural al 0% de caucho incorporado.

Con el propósito de obtener una descripción física precisa del suelo y sus respectivas mezclas con caucho, se llevaron a cabo ensayos de plasticidad, estos resultados correspondientes al Límite de Liquidez (LL), Límite de Plasticidad (LP) e Índice de Consistencia Plástica (IP) se presentan detalladamente en la Tabla 2.

TABLA 2
LÍMITES DE ATTERBERG DEL SUELO NATURAL Y LAS MEZCLAS CON DIVERSAS PROPORCIONES DE CAUCHO INCORPORADO.

Mezclas	LL (%)	LP (%)	IP (%)
C - 0%	55.4	27.2	28.2
C - 1%	54.4	26.8	27.6
C - 2%	52.7	25.9	26.8
C - 3%	51.5	25.4	26.1
C - 4%	50.2	24.8	25.4

Nota: El índice plástico representa la diferente entre el límite de liquidez y el límite de plasticidad.

Se llevaron a cabo los ensayos de Proctor Modificado y CBR para analizar las propiedades mecánicas tanto del suelo como de las mezclas con caucho.

TABLA 3
HUMEDAD ÓPTIMA Y LA MÁXIMA DENSIDAD DEL SUELO NATURAL Y LAS COMPOSICIONES DE CAUCHO A DIFERENTES PORCENTAJES.

Mezclas	MDS (g/cm3)	W opt (%)
C - 0%	1.571	13.2
C - 1%	1.578	12.9
C - 2%	1.585	12.7
C - 3%	1.597	12.4
C - 4%	1.605	12.3

La Tabla 3 evidencia un incremento en la densidad seca máxima de las mezclas en relación con el suelo natural. Este aumento indica una reducción en el índice de poros entre las partículas conforme se eleva la proporción de caucho. De manera notable, el contenido óptimo de humedad disminuye proporcionalmente al mayor porcentaje de caucho, dado que este material carece de la capacidad de absorber agua.

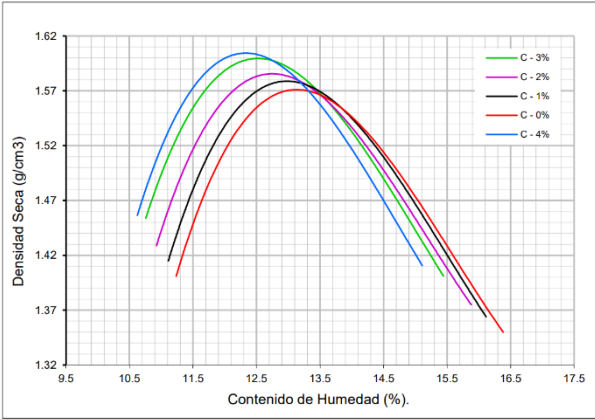


Fig. 3 Curvas de Compactación del suelo natural y las mezclas en estudio con diferentes porcentajes de caucho añadido.

La Figura 3 complementa los hallazgos presentando las curvas de compactación correspondientes a cada mezcla analizada, ofreciendo así una representación visual del impacto del caucho durante el procedimiento de compactación.

Se realizó el ensayo de CBR considerando el 95% y 100% de la densidad seca máxima de las muestras. En condiciones naturales, el suelo presenta un CBR del 12.80% a una densidad seca máxima del 100%. No obstante, conforme se incrementa el porcentaje de caucho añadido, estos valores experimentan un aumento directamente proporcional. Este fenómeno se atribuye a la interacción del caucho con los vacíos en las mezclas, lo que dificulta la entrada de agua y, por ende, confiere una mayor capacidad del suelo para resistir la penetración.

TABLA 4
CBR DEL SUELO ORIGINAL Y LAS COMPOSICIONES CON 100% Y 95% DE LA DSM A 1".

Mezclas	CBR - 100 (%)	CBR - 95 (%)
C - 0%	12.80	8.80
C - 1%	13.42	9.53
C - 2%	14.37	10.57
C - 3%	15.66	11.66
C - 4%	16.94	12.65

Nota: Se considera el CBR al 95% y 100%.

La Tabla 4 detalla estos incrementos sucesivos tanto para el 100% como para el 95% de la densidad seca óptima.

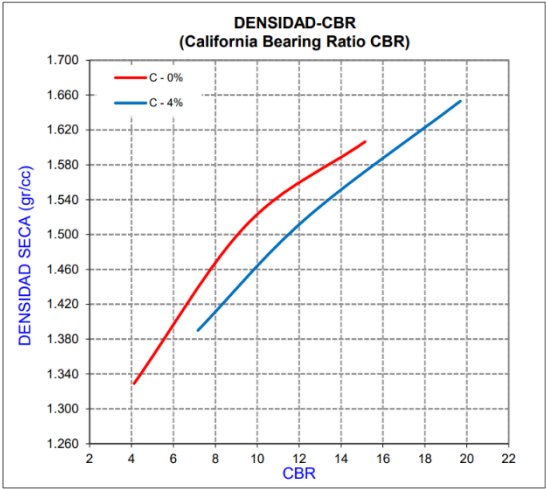


Fig. 4 CBR a 0.1" del Suelo natural (C-0%) VS Suelo al 4% de caucho (C-4%).

La Figura 4 muestra la comparación de la capacidad portante a 0.1" de la subrasante de un suelo natural versus un suelo con la incrementación de un 4% de caucho.

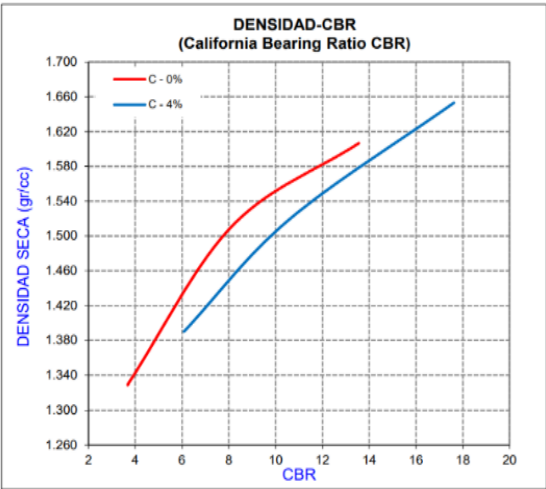


Fig. 5 CBR a 0.2" del Suelo natural (C-0%) VS Suelo al 4% de caucho (C-4%).

La Figura 5 muestra la comparación de la capacidad portante a 0.2" entre la subrasante de un suelo natural y la subrasante modificada con un 4% de caucho reciclado.

Los resultados clave de nuestra investigación se basan en el análisis del CBR. Este ensayo ha sido fundamental para comprender la capacidad de carga del suelo y evaluar cómo

varía con la adición de diferentes porcentajes de caucho. Se obtuvo un notable aumento del 32.34% en la resistencia de la subrasante al agregar un 4% de caucho en relación con el suelo original. Específicamente, se observa un aumento sustancial en el CBR, pasando de 12.80% a 16.94%. Estos resultados resaltan la eficacia de la incorporación de caucho para optimizar de manera considerable la capacidad de carga de la subrasante en proyectos viales, ofreciendo perspectivas valiosas para un diseño más duradero.

IV. DISCUSSION

Los resultados obtenidos evidencian que la incorporación de caucho granular en un suelo limoso produce mejoras sustanciales en su comportamiento mecánico y físico, reflejadas principalmente en el incremento del California Bearing Ratio (CBR). A un nivel de compactación del 100% de la densidad seca máxima, el CBR se incrementó de 12.80% a 16.94%, mientras que al 95% de la densidad seca máxima aumentó de 8.80% a 12.65%. Este comportamiento confirma que el efecto beneficioso del caucho se mantiene incluso en condiciones de menor compactación. Asimismo, se observa una tendencia creciente del CBR con el aumento del contenido de caucho, alcanzando su valor óptimo en la mezcla con 4% (C-4%), lo que indica que esta proporción proporciona la mayor capacidad portante dentro del rango evaluado.

La mejora en la resistencia del suelo puede atribuirse a la interacción entre las partículas de caucho y la matriz del suelo. El caucho, debido a su naturaleza elástica, actúa como un material flexible que absorbe y redistribuye esfuerzos, reduciendo las deformaciones permanentes bajo cargas repetidas. A su vez, su incorporación modifica la estructura interna del suelo, optimizando la distribución granulométrica, reduciendo vacíos y generando una matriz más densa y estable. Este efecto se refleja en el incremento de la densidad seca máxima (de 1.571 g/cm³ a 1.605 g/cm³) y en la disminución del contenido óptimo de humedad, lo que indica una mejora en las condiciones de compactación.

Desde el punto de vista de la plasticidad, la adición de caucho contribuye a un comportamiento más estable del suelo frente a variaciones de humedad. El índice de plasticidad disminuye progresivamente de 28.2% en el suelo natural a 25.4% en la mezcla C-4%, evidenciando una menor susceptibilidad a cambios volumétricos y deformaciones. Además, la presencia de partículas de caucho reduce la conectividad de los poros y la permeabilidad del suelo, limitando la entrada de agua y evitando la saturación. Esta característica, sumada a la baja absorción de agua del caucho, favorece la estabilidad estructural del material, especialmente en condiciones húmedas.

En conjunto, la mejora granulométrica, la reducción de la plasticidad y la capacidad del caucho para disipar esfuerzos

explican el incremento sostenido del CBR y la optimización del comportamiento geotécnico del suelo. Estos resultados confirman que la mezcla con 4% de caucho constituye la alternativa más eficiente dentro de los porcentajes evaluados, al presentar el mejor equilibrio entre resistencia, estabilidad y trabajabilidad.

Además, los incrementos en el CBR tienen implicaciones directas en el desempeño de las subrasantes en condiciones reales, ya que una mayor capacidad de soporte permite resistir de manera más eficiente las cargas vehiculares, incrementando la durabilidad de las estructuras viales y reduciendo la necesidad de mantenimiento. Adicionalmente, el uso de caucho reciclado aporta un valor ambiental significativo, al promover la reutilización de neumáticos desechados y disminuir la dependencia de materiales naturales. En este contexto, la incorporación de caucho no solo representa una solución técnica eficaz para la estabilización de suelos, sino también una alternativa sostenible en el desarrollo de infraestructura vial.

IV. CONCLUSIONS

Los resultados experimentales permiten concluir que la incorporación de caucho granular mejora significativamente las propiedades geotécnicas del suelo limoso analizado. En particular, se identificó que la combinación óptima corresponde a la mezcla con 4% de caucho (C-4%), la cual alcanzó el mayor valor de CBR (16.94%), representando un incremento considerable respecto al suelo natural.

Desde el punto de vista de la plasticidad, esta misma combinación presentó el menor índice de plasticidad (25.4%), evidenciando una reducción en la capacidad de deformación del suelo y, por tanto, una mejora en su estabilidad frente a cambios de humedad. Esto confirma que el porcentaje óptimo no solo debe evaluarse en función de la resistencia, sino también del comportamiento plástico del material.

La mejora observada está directamente relacionada con la modificación de la granulometría del suelo. La incorporación de partículas de caucho actúa como un material granular que optimiza la distribución interna de partículas, reduce los vacíos y mejora la compactación, lo cual se refleja en el aumento de la densidad seca máxima y la disminución del contenido óptimo de humedad.

La mezcla C-4% representa la mejor alternativa dentro de los porcentajes evaluados, al ofrecer el mayor rendimiento mecánico, menor plasticidad y una estructura granulométrica más eficiente. Por lo tanto, se recomienda su uso como material estabilizador en subrasantes de suelos limosos.

El uso de caucho reciclado no solo mejora las propiedades del suelo, sino que también constituye una solución sostenible,

contribuyendo a la reutilización de residuos y a la reducción del impacto ambiental en proyectos de infraestructura vial.

REFERENCES

- [1] M. Kianimehr, M. M. M. Ali, and M. R. Taha, "Utilization of rubber aggregates for light stabilization of clay soils," *Construction and Building Materials*, Vol. 27.
- [2] S. Sukprasert, N. Likitlersuang, and T. Horpibulsuk, "Fly ash based geopolymer stabilisation of silty clay/blast furnace slag for subgrade applications," *Road Materials and Pavement Design*, Vol. 22, pp. 357-371.
- [3] A. Cabalar, O. Zardikawi, and M. Abdulnafa, "Utilisation of construction and demolition materials with clay for road pavement subgrade," *Road Materials and Pavement Design*, vol. 20, no. 3, pp. 702-714, 2019.
- [4] S., Topçu and E., Seyrek, "Evaluation of geotechnical behavior of clay soil with crumb rubber addition," *ResearchGate*, 2022. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/366723267_EVALUATION_of_GEOTECHNICAL_BEHAVIOR_of_CLAY_SOIL_with_CRUMB RUBBER_ADDITION
- [5] N. Álvarez and J. Gutiérrez, "Estudio experimental del efecto mecánico de un suelo arcilloso al adicionar polvo de caucho para aplicaciones geotécnicas," *Repositorio Académico UPC*, 2019. [Online]. Available: <http://hdl.handle.net/10757/648723>
- [6] J. Valderrama and J. Jaime, "Investigación aplicada," *Duoc UC*, 2019. [Online]. Available: <https://bibliotecas.duoc.cl/investigacion-aplicada/definicion-proposito-investigacion-aplicada>
- [7] A. Losada, "Definición, Propiedad Intelectual e Industria," *Dialnet*, 2014. [Online]. Available: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6163749>
- [8] ASTM International, *ASTM C33-03: Especificación para Agregados de Concreto*, 2003, revisado en 2018.