

Influencia De Los Aditivos De Ceniza De Bagazo De Caña Y Escoria De Alto Horno En Suelo Granular

Influence Of Cane Bagasse Ash Additives And Blast-Furnace Slag On Granular Soil

Autores

Aldo Fernández Limés¹, Luis E. González Martínez ², Isaida Flores Berenguer³, Cecilia Gil Payne⁴, Jenny García Tristán⁵, Anadelys Alonso Aenlle⁶ Willian D. Cobelo Cristiá⁷

¹Ingeniero civil, Universidad Tecnológica de la Habana "José A. Echeverría", Facultad de Ingeniería Civil, Calle 114 #11901, e/ Rotonda y Ciclovía, Marianao La Habana Cuba, afernandezl@civil.cujae.edu.cu

²Ingeniero civil, Universidad Tecnológica de la Habana "José A. Echeverría", Facultad de Ingeniería Civil, Calle 114 #11901, e/ Rotonda y Ciclovía, Marianao La Habana Cuba, leglez@civil.cujae.edu.cu

³Ingeniera civil, Máster en ciencias técnicas, Universidad Tecnológica de la Habana "José A. Echeverría", Facultad de Ingeniería Civil, Calle 114 #11901, e/ Rotonda y Ciclovía, Marianao La Habana Cuba, isaidafb@civil.cujae.edu.cu

⁴Ingeniera civil, Máster en ciencias técnicas, Universidad Tecnológica de la Habana "José A. Echeverría", Facultad de Ingeniería Civil, Calle 114 #11901, e/ Rotonda y Ciclovía, Marianao La Habana Cuba, cgil@civil.cujae.edu.cu

⁵Ingeniera civil, Doctora en ciencias técnicas, Universidad Tecnológica de la Habana "José A. Echeverría", Facultad de Ingeniería Civil, Calle 114 #11901, e/ Rotonda y Ciclovía, Marianao La Habana Cuba, jenny@civil.cujae.edu.cu

⁶Ingeniera civil, Doctora en ciencias técnicas, Universidad Tecnológica de la Habana "José A. Echeverría", Facultad de Ingeniería Civil, Calle 114 #11901, e/ Rotonda y Ciclovía, Marianao La Habana Cuba, anadelys@civil.cujae.edu.cu

⁷Ingeniero civil, Doctor en ciencias técnicas, Universidad Tecnológica de la Habana "José A. Echeverría", Facultad de Ingeniería Civil, Calle 114 #11901, e/ Rotonda y Ciclovía, Marianao La Habana Cuba, wcobelo@civil.cujae.edu.cu

RESUMEN

En subrasantes, bases, subbases y vías no pavimentadas en muchas ocasiones los suelos locales no reúnen los requisitos de calidad necesarios y se debe recurrir a la utilización de materiales de lugares más lejanos para su construcción, una alternativa a este problema es recurrir a técnicas como la estabilización de suelos con aditivos de materiales u otros suelos. Entre las alternativas para la estabilización con aditivos están la ceniza de bagazo de caña y la escoria alto horno que se obtiene de las fundiciones de acero. Esta investigación tiene como objetivo evaluar cómo se modifican las propiedades de un suelo estabilizado con escorias de alto horno y cenizas de bagazo de caña. La escoria es añadida en valores de 25 y 35% del peso total de la muestra y la ceniza en 10 y 30%, los resultados de las combinaciones se comparan con las propiedades del material de suelo sin estabilizar. Los resultados demuestran que el empleo de cenizas en la estabilización de suelos no es beneficioso para incrementar la capacidad portante de los suelos y lo hace vulnerable a la permeabilidad, mientras que la escoria si resulta beneficiosa incrementado los valores de peso específico seco máximo, de CBR y brindándole mayor estabilidad ante la ascensión capilar.

Palabras claves: Escoria de alto horno, ceniza de bagazo de caña, estabilización de suelos, peso específico seco máximo, valores de CBR

ABSTRACT

In subgrade, bases, subbases and unpaved roads, on many occasions the local soils do not meet the necessary quality requirements and materials from more distant places must be used for their construction. An alternative to this problem is to resort to techniques such as soil stabilization with additives of other materials or soils. Among the alternatives for stabilization with additives are cane bagasse ash and blast furnace slag obtained from steel foundries. This research objective is to evaluate the properties of soil stabilized with blast furnace slag and cane bagasse ashes. The slag is added in 25 and 35% values and the ash in 10 and 30%, combinations results of are compared with the properties of the unstabilized soil material. The results show that the use of ash in soil stabilization is not beneficial to increase the bearing capacity of the soil and makes it vulnerable to permeability, while the slag is beneficial by increasing the values of maximum dry specific weight of CBR. and providing greater stability against capillary ascension.

Keywords: Blast furnace slag, cane bagasse ash, soil stabilization, maximum dry unit weight, CBR values..

Nota Editorial: Recibido: Septiembre 2022 Aceptado: Septiembre 2022

1. INTRODUCCIÓN

El funcionamiento a largo plazo de cualquier proyecto de construcción depende de la calidad de los suelos subyacentes. Los suelos inestables pueden crear problemas significativos en las estructuras y pavimentos. Con el diseño y técnicas de construcción apropiados, el tratamiento con determinado aditivo transforma químicamente los suelos inestables en materiales utilizables. Se le llama estabilización de un suelo al proceso mediante el cual se someten los suelos naturales a cierta manipulación o tratamiento de modo que se pueda aprovechar sus mejores cualidades, obteniéndose uno firme y estable, capaz de soportar los efectos del tránsito y las condiciones de clima más graves [1].

La estabilización se fundamenta en el mejoramiento de las propiedades del suelo, como son la estabilidad volumétrica, resistencia, permeabilidad, compresibilidad y durabilidad siendo éstas las más relevantes al momento de realizar algún tipo de estabilización a través de procedimientos mecánicos e incorporación de productos químicos, naturales o sintéticos. Al elegir algún tipo de producto para mejorar las características del suelo los estudios se concentran en verificar si mejora alguna de estas propiedades, esto significa no solo llegar a un estado del suelo con suficiente resistencia a la acción destructora y deformante de las cargas, sino también asegurar la permanencia de ese estado a través del tiempo [2], [3]. Si un suelo tiene buena capacidad de soporte, resistente a los esfuerzos de corte, y si su comportamiento estructural no cambia significativamente frente a variaciones de humedad, se dice que es un suelo estable.

Para lograr una estabilización exitosa deben realizarse ensayos de laboratorio tales como: granulometría, límites de plasticidad, peso específico, compactación, CBR (*California bearing ratio*: índice de soporte de California), absorción capilar y consolidación; sobre las muestras más representativas del suelo natural para poder determinar las propiedades ingenieriles tanto del material natural como del material estabilizado. Estos ensayos incluyen el estudio del material con diferente proporción de material estabilizador para determinar una composición adecuada de la mezcla y poder evaluar la efectividad de la estabilización.

Se ha desarrollado muchos trabajos [4-11] con la utilización del bagazo de caña como estabilizador de suelos, obteniéndose diversos resultados, ya que funciona bien para retener agua, pero no tanto para incrementar la resistencia. En el trabajo de Anupam, et al. [12] quienes compararon la estabilización de suelos arcillosos utilizando diversos desechos agrícolas como cenizas volantes (FA), cenizas de cáscara de arroz (RHA), cenizas de bagazo (BA) y cenizas de paja de arroz (RSA) sin ningún otro tipo de aglomerante para mejorar la capacidad de carga del suelo. Las propiedades que se probaron fueron el límite de contracción, las características de compactación y el CBR. Se observaron mejoras marcadas en los límites de contracción para el suelo mezclado con FA, BA, RHA y RSA, ésta fue más pronunciada para un 30% de mezcla de RHA. Además, llegaron a la conclusión de que los cuatro desechos industriales provocaban un aumento en el contenido óptimo de humedad y una disminución de la densidad seca máxima del suelo estabilizado y del valor de CBR.

La adición de escoria de siderurgia incrementa el peso específico seco máximo y el CBR y mejora el resto de las propiedades, principalmente las resistentes [13-18]. Esto se debe a la buena adherencia entre los dos materiales. La composición química de la escoria empleada, está formada por dióxido de silicio (SiO_2), y óxido de calcio (CaO), que son materiales estabilizantes. Estos elementos reaccionan ante la presencia de agua, generando una reacción expansiva debido a la hidratación, lo que ocasiona la mejora del suelo [19].

Con esta investigación se persigue obtener un uso práctico a los residuos sólidos que no se pueden biodegradar rápidamente provenientes de la industria del acero y de la producción azucarera, que constituyen un problema medioambiental. Para ello se lleva a cabo un estudio experimental donde las variables independientes son la mezcla de suelo natural-escoria (75% y 25% respectivamente) y la mezcla de suelo natural-escoria (65% y 35% respectivamente). También se evalúan las propiedades del suelo estabilizado con cenizas de paja de la caña, la ceniza es añadida en porciones del 10% y 30% de la masa total. Estos porcentajes de dosificación se obtuvieron del trabajo de Abdila, et al. [14] donde realizaron un estudio similar empleando los mismos aditivos con un número mayor de dosificaciones. Los resultados de las combinaciones fueron comparados con las propiedades del material sin estabilizar. Fueron analizadas las siguientes variables: la humedad natural, el peso específico, la distribución granulométrica, el peso específico máximo, la capilaridad y el valor de relación de soporte de California (CBR).

2. DESCRIPCIÓN DE MATERIALES

Caracterización del suelo natural

El suelo fue analizado en condiciones remoldeadas, la humedad del suelo natural [20] fue de 1,18% y se garantizó una diferencia entre las dos muestras analizadas menor del 2%. El límite líquido del suelo natural es de 31,90%, el límite plástico que se obtiene para la muestra de suelo natural analizado fue de 27,62% y el índice de plasticidad es de 4,29%, por tanto el suelo posee poca plasticidad [21]. Un índice de plasticidad bajo, significa que un pequeño incremento en el contenido de humedad del suelo, lo transforma de semisólido a la condición de líquido, es decir resulta muy sensible a los cambios de humedad. El peso específico relativo a las partículas sólidas del suelo (G_s) natural fue determinado por la NC-19 [22] y dio como resultado que $G_s = 2,69$. La granulometría se hizo siguiendo el procedimiento de la NC-20 [23]. En la figura 1 se muestra el promedio del porcentaje pasado por cada tamiz de tres muestras estudiadas para determinar la granulometría promedio del suelo natural.

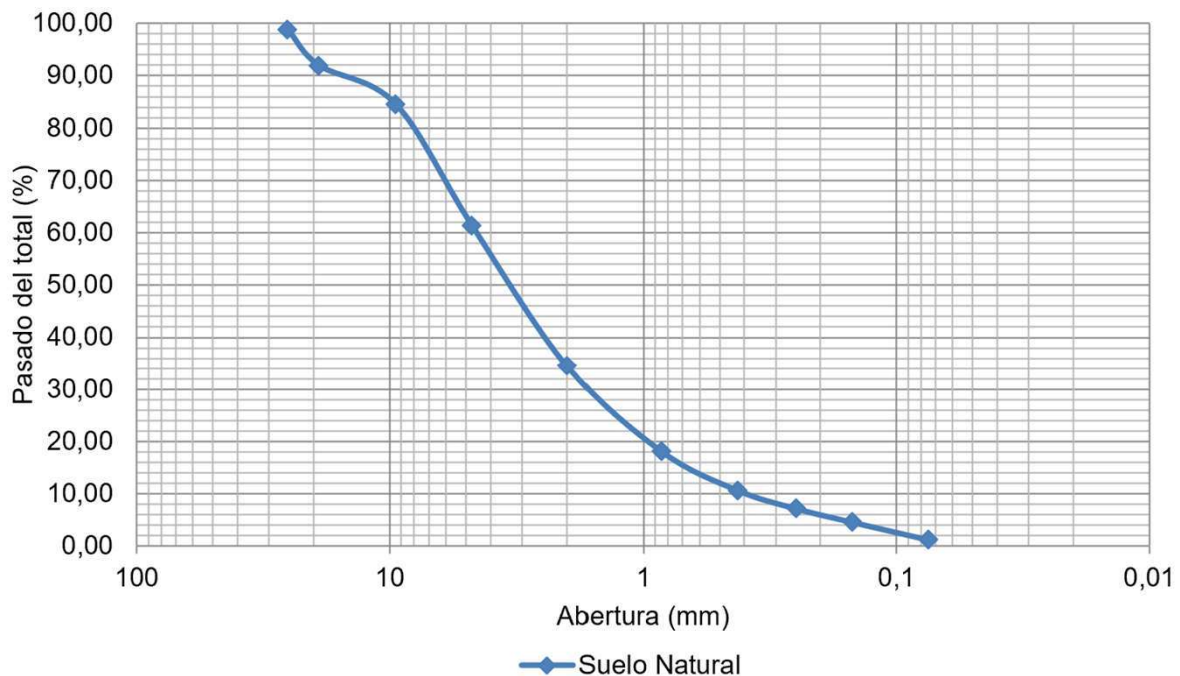


Figura 1: Distribución granulométrica del suelo natural

Del análisis granulométrico mostrado en la figura 1 se observa que hay un 37,5% de grava, 61,2% de arena y 1,3% de finos por lo que se considera que el suelo es arenoso con presencia de grava

A partir de los ensayos realizados se puede clasificar al suelo siguiendo la metodología de la NC-59 [24] Los resultados obtenidos para dicho suelo se reflejan a continuación:

Al analizar la clasificación del suelo natural mediante el método de Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS), lo primero que se analiza es la determinación del porcentaje pasado por el tamiz 200, al ser este menor que el 50%, se trata de un suelo de grano grueso. El porcentaje pasado por el tamiz No 4 (arena) es mayor que el porcentaje retenido en el tamiz No 4 (grava), el suelo es tipo arenoso. Al presentar un porcentaje de grava superior al 35%, ser el coeficiente de curvatura de 1,18 y el coeficiente de uniformidad de 11, el suelo se clasifica según sus especificaciones como una arena bien graduada con grava. Para la clasificación del suelo mediante el método ASHTOO [25] se divide el suelo en dos categorías, materiales granulares y materiales de tipo arcilla y limo, el suelo natural estudiado al tener un porcentaje de material pasado por el tamiz N° 200 menor del 35% se encuentra en la categoría de material granular. Al ser el porcentaje pasado por el tamiz N° 10 menor de 50%, el pasado por el N° 40 menor de 30%, el pasado por el tamiz N° 200 menor del 15% y tener un índice de plasticidad inferior a 6, el suelo se clasifica en su nomenclatura como A-2-4(5) (grava y arena limosa)

Para determinar la humedad óptima del suelo se realizó un ensayo de Proctor Modificado [26] con 5 puntos de humedad aumentando en cada uno un 4% de agua con respecto al peso de la muestra inicial que era de 11,224 kg. Los resultados de este ensayo se muestran en la figura 2 y los valores de peso específico seco máximo y humedad óptima aparecen en la tabla 2.

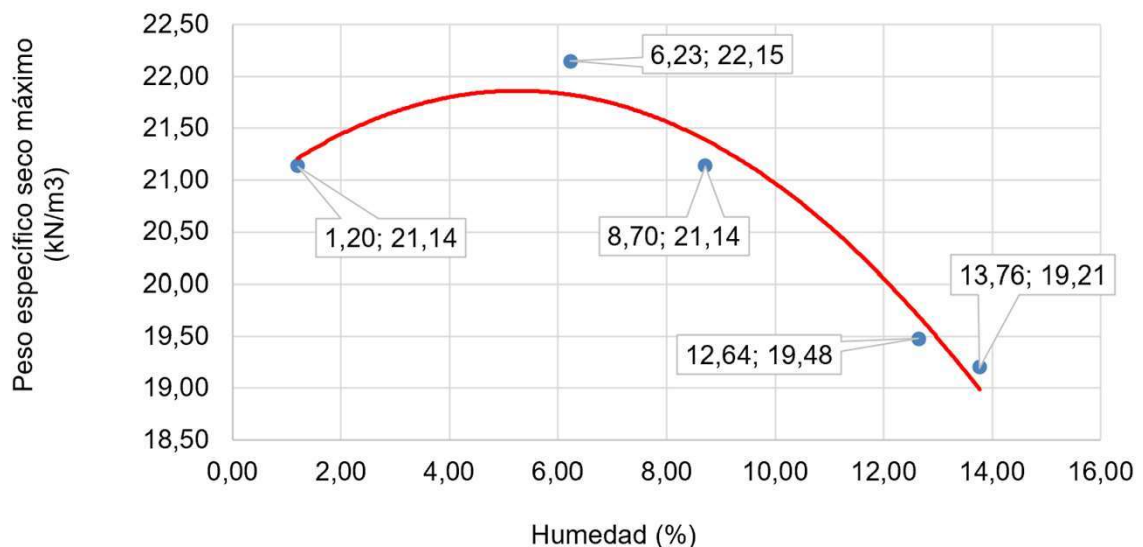


Figura 2: Curva de compactación por método Proctor Modificado para el suelo natural

Caracterización de la escoria

La escoria de acería de horno de arco eléctrico se obtuvo de la siderúrgica “José Martí” (Antillana de Acero), por sus características la escoria debe ser ensayada como árido. En la figura 3 se muestran los valores de peso específico para 9 muestras de escoria.

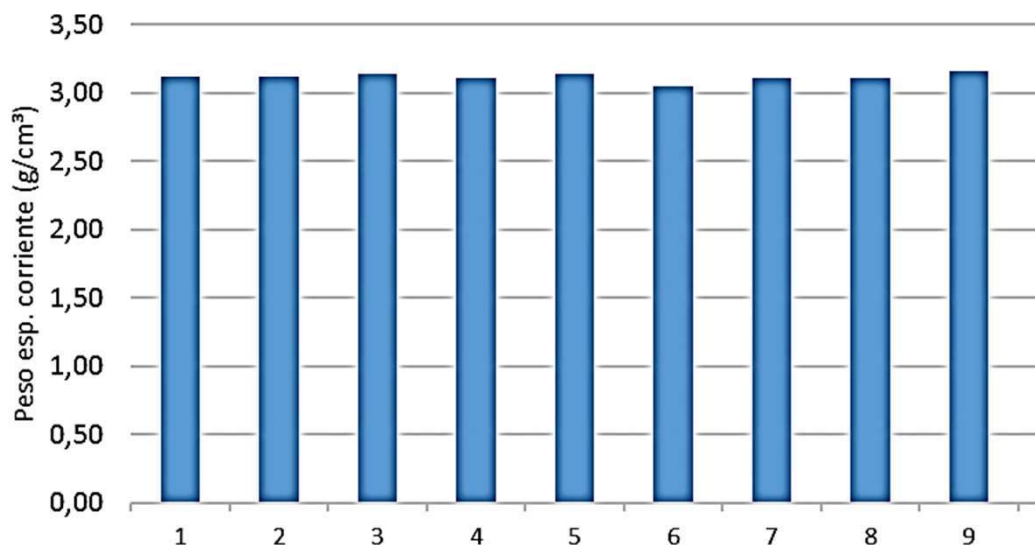


Figura 3: Peso específico corriente de la escoria

Son evidentes los altos valores de peso específico que posee la escoria debido a sus altos valores de densidad. Estos datos dan indicios de que las estabilizaciones de suelo natural en combinación con escorias presentarán una mejor compactación debido a que existirá mayor masa en el mismo valor de volumen de suelo.

En la figura 4 se presentan los valores de por ciento pasado por el tamiz 200.

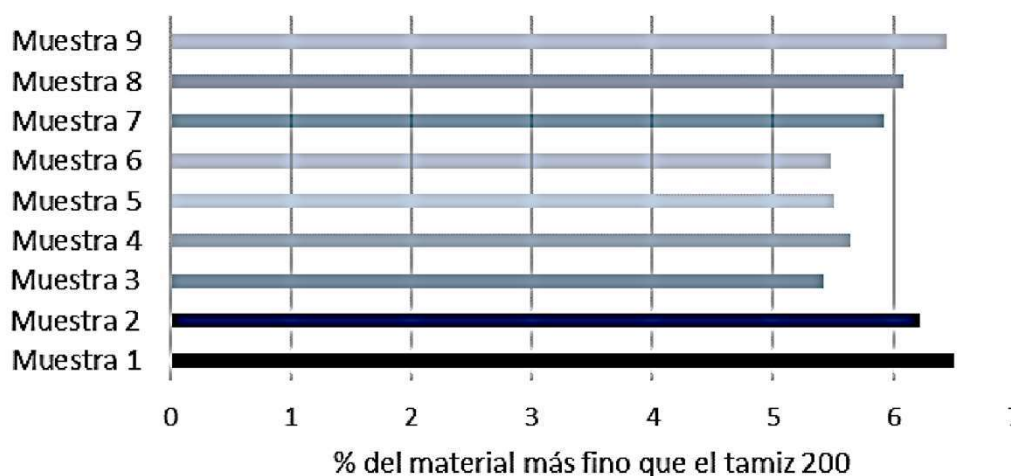


Figura 4: Porcentaje de escoria que pasa el tamiz No. 200

Como se puede observar en la figura 4 hay una baja presencia de material fino, lo que demuestra que la escoria presenta características adecuadas para ser utilizada como árido en estabilizaciones de suelo, aun siendo estos mayores que los áridos naturales.

Caracterización de la ceniza.

Para caracterizar la ceniza se efectuaron los ensayos de humedad, granulometría y el peso específico relativo a las partículas sólidas. Como resultado se obtuvo que la humedad de la ceniza es de 3%, con un peso específico relativo a las partículas sólidas de 2,53. En la figura 5 se muestra la distribución granulométrica de la ceniza.

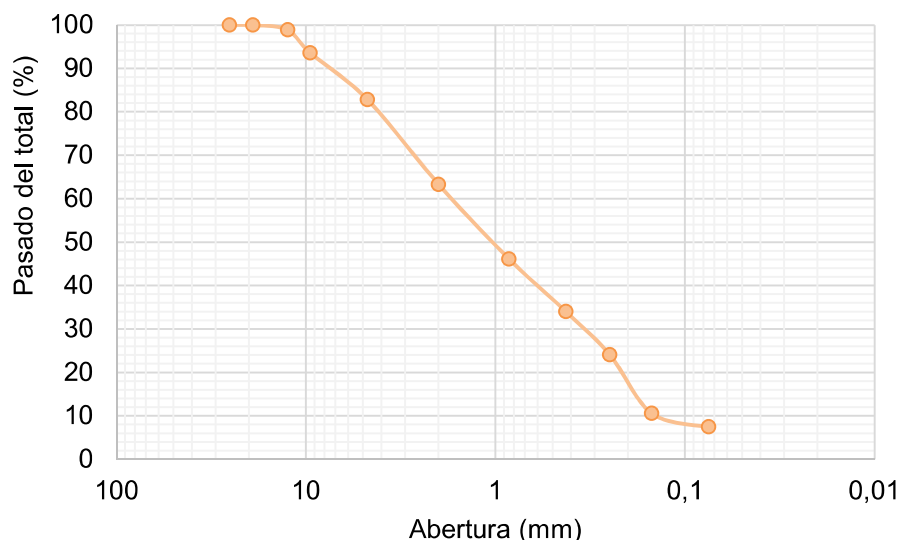


Figura 5: Distribución granulométrica de la ceniza

Del gráfico de la figura 5 se observa que la ceniza es un material fino ya que el 83% de las partículas pasan por el tamiz No. 4 (4,75mm). Es de esperar que la combinación de ambos materiales propicie un equilibrio en la distribución del tamaño de las partículas.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Luego de analizados los materiales se procede a realizar el ensayo con las mezclas de suelo-ceniza y suelo-escoria, con el objetivo de determinar cuál dosificación resulta más favorable para estabilizar e incrementar la capacidad portante del suelo, se emplearon las siguientes combinaciones:

- 90% suelo natural y 10% de ceniza.
- 70% suelo natural y 30% de ceniza.
- 75% suelo natural y 25% de escoria.
- 65% suelo natural y 35% de escoria.

Inicialmente se evaluó el peso específico relativo a las partículas sólidas de todas las mezclas de suelo-aditivo, los resultados se muestran en la figura 6.

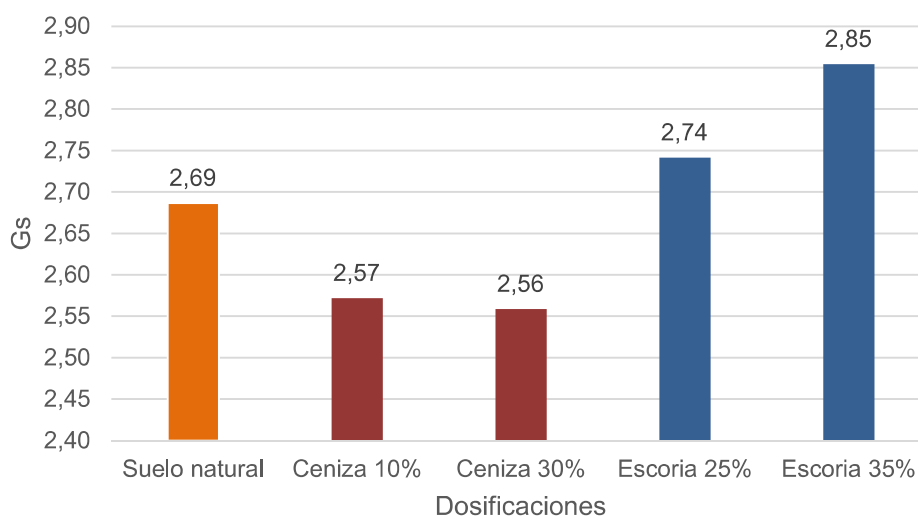


Figura 6: Peso específico relativo a las partículas sólidas

En la figura 6 se aprecia como la incorporación de ceniza disminuye en un 5% el peso específico relativo a los sólidos, mientras que la incorporación de la escoria lo incrementa en 1 y 6% para las muestras con 25 y 35% de escoria respectivamente. Apparently, the effect of the incorporation of additives to the soil does not have a considerable effect on the relative specific weight to the solids, but it is necessary to consider that these oscillate normally in values of 2,6 to 2,9, so its addition does have a considerable implication for both types of additives.

En la figura 7 se muestran las curvas de distribución granulométrica de las muestras de suelo y suelo-aditivo.

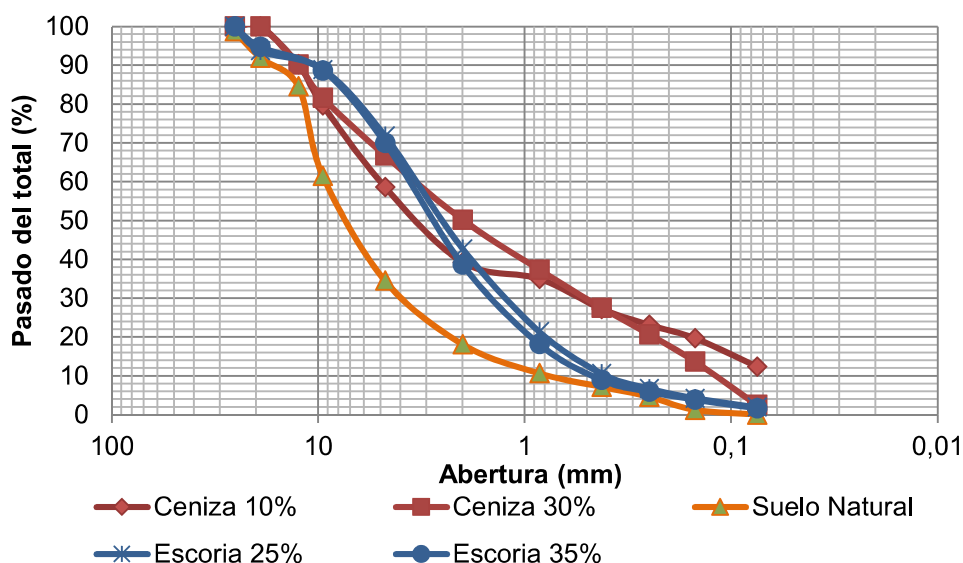


Figura 7: Distribución granulométrica de las dosificaciones

La uniformidad que se alcanza con las dosificaciones fue medida a través del coeficiente de uniformidad (C_u) que está definido por (1)

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad (1)$$

Donde D_{60} , diámetro de la curva correspondiente al 60% de finos y D_{10} diámetro de la curva correspondiente al 10% de finos. En la tabla 1 se resumen los valores de C_u obtenidos

Tabla 1: Coeficiente de uniformidad

Tipo de suelo	D_{10}	D_{60}	C_u (kPa)
Suelo natural	0,85	9	11
Ceniza 10%	0,08	5	63
Ceniza 30%	0,15	3,5	23
Escoria 25%	3,5	3,5	1
Escoria 35%	3,5	0,5	0,14

La incorporación de ceniza le brinda al suelo una mejor graduación al suelo ($C_u > 6$), principalmente en la mezcla con 10% de ceniza, esto se debe a que la ceniza es un material mucho más fino que el suelo natural que es granular y es capaz de llenar los vacíos. La incorporación de escoria, incrementa la cantidad de granos gruesos, dándole al suelo una granulometría más uniforme ($C_u < 4$).

La capilaridad es el fenómeno debido a la tensión superficial que confiere a los fluidos la capacidad de ascender por pequeños canales o canículas capilares formadas por orificios intersticiales del suelo, permitiendo así comprobar la resistencia del suelo. En este trabajo se evaluaron 3 muestras de cada dosificación y luego se promediaron para obtener un valor preciso, en la figura 8 se muestran los resultados obtenidos para la muestra de suelo natural y para las muestras con aditivos.

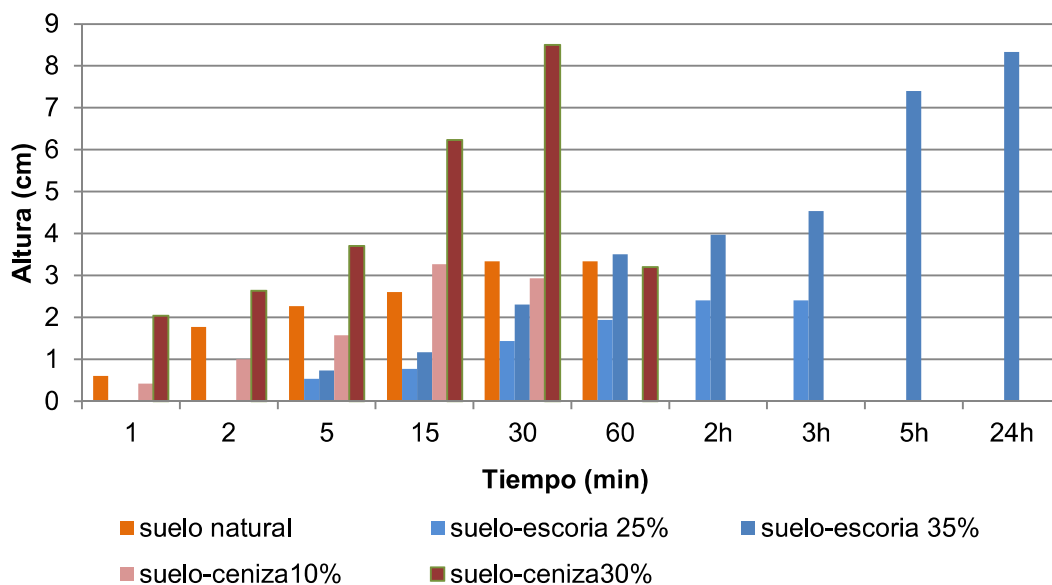


Figura 8: Absorción capilar de las dosificaciones

En la figura 8, es evidente que a mayor incorporación de ceniza aumenta la capilaridad del suelo. En el caso de la adición de 10% de cenizas ocurre que para los primeros 5 minutos la ascensión capilar es inferior a la del suelo natural, esto se debe a que durante ese tiempo el agua está cubriendo los espacios que existen entre el suelo y la ceniza y no incrementa la saturación. Este fenómeno se revierte a partir de 15 minutos, llegando a la saturación y a la pérdida de estabilidad del material; lo que se pone de manifiesto en la ausencia de valor de ascensión capilar para 60 minutos, debido a que la muestra se deshizo. En el caso de la adición del 30% de cenizas se observa desde un inicio que comienza a saturarse la combinación de suelo, con valores superiores a los otros ensayados, manteniendo incluso la estabilidad. Las muestras de suelo-ceniza estudiadas comenzaron a fallar a partir de los 45 minutos de iniciado el ensayo, observándose que la que más estable se mantuvo fue la mezcla suelo-ceniza con 30%, que incluso llegó a la altura de ascensión capilar máxima.

Mientras que la incorporación de la escoria, disminuye considerablemente la capilaridad en los primeros momentos y le da mayor estabilidad al suelo, llegando a no fallar incluso cuando se alcanzó la altura de ascensión capilar máxima de la muestra con 35% de escoria, esto demuestra que los enlaces que se forman con la adición de escoria son más fuertes. De los resultados obtenidos se puede decir que la incorporación de ceniza no es favorable para la estabilidad ante la ascensión capilar de los suelos, mientras que la escoria si lo es.

En la figura 9 se muestran las curvas de compactación para todas las muestras de suelo-aditivo estudiadas en este trabajo.

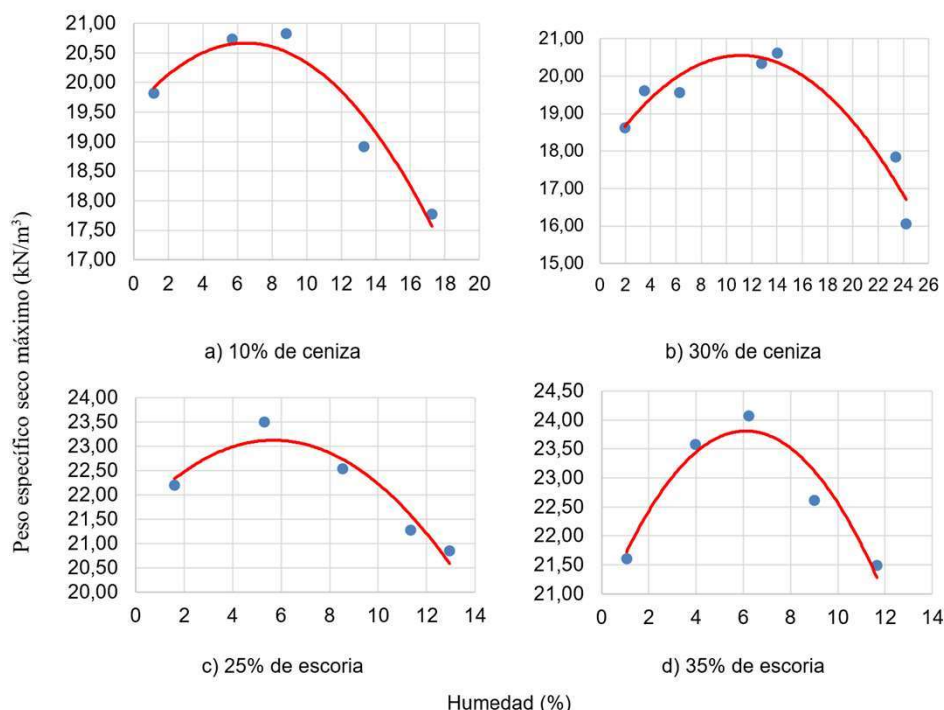


Figura 9: Curvas de compactación por método Proctor Modificado para las distintas dosificaciones

Tabla 2: Peso específico seco máximo de las mezclas suelo-aditivo

Tipo de suelo	$\gamma_{d\text{ máx}}$ (kN/m ³)	$\omega_{\text{ópt}}$ (%)	Diferencia (%)
Suelo Natural	21,8	5,5	-
10% de Ceniza	20,7	6,8	5,05
30% de Ceniza	20,5	11	5,96
25% de Escoria	23,1	5,8	5,63
35% de Escoria	23,7	6	8,02

Los resultados muestran que la incorporación de aditivos no modifica considerablemente la compactación máxima del suelo, destacándose que en el caso de la ceniza disminuye y necesita una cantidad de agua superior para alcanzarla porque tiene mayor contenido de finos.

Ante la imposibilidad de realizar el ensayo de CBR se utilizará una expresión empírica de las muchas que existen en la bibliografía [27-30]. De forma general estas expresiones parten de correlacionar los valores de plasticidad, granulometría y/o compactación de los suelos con el valor de CBR. La que más se adecua a este trabajo por emplear los parámetros de compactación solamente es la propuesta por Katte, et al. [30] que según su propio estudio tiene un error del 3% con respecto al CBR medido en laboratorio y un valor de $R^2=0,819$, esta expresión fue validada por Duque, et al. [31] en un trabajo similar, y es la que se muestra en (2).

$$CBR = -61.082 + 60.233 \cdot \gamma_{d\text{ máx}} - 2.462 \cdot \omega_{\text{ópt}} \quad (2)$$

Donde $\gamma_{d\text{ máx}}$ es el peso específico seco máximo en g/cm³ y $\omega_{\text{ópt}}$ es la humedad óptima en porcentaje (%), ambos parámetros obtenidos del ensayo de Próctor Modificado en este caso, los resultados obtenidos por la aplicación de esta expresión (2) y usando la información brindada en la tabla 2 se muestran en la tabla 3.

Tabla 3: Valores de CBR

Tipo de suelo	CBR
Suelo Natural	56,68
10% de Ceniza	46,86
30% de Ceniza	35,31
25% de Escoria	63,78
35% de Escoria	66,90

Los resultados muestran que el uso de la ceniza de bagazo de caña como aditivo no es favorable pues el valor de CBR decrece entre más ceniza se incorpore, llegando a decrecer en un 38% para la muestra con 30% de ceniza, esto se debe a que la ceniza posee peso un específico menor al del suelo natural. Mientras que la incorporación de escoria si es favorable, con incrementos del 11 y el 15% del valor de CBR para las muestras con 25% y 35% de escoria respectivamente. Desde un punto de vista económico resulta más favorable la muestra con 25% de escoria con respecto a la de 35%, debido a que en esta última el incremento no es tan considerable en términos relativos.

4. CONCLUSIONES

Los resultados de este trabajo confirman que la adición de aditivos a los suelos modifica sus propiedades físico-mecánicas. La adición de ceniza no resulta favorable de manera general para ninguna de las dos dosificaciones empleadas, debido a que aumenta la absorción capilar de los suelos y esto conlleva a un colapso más rápido de las muestras, disminuye el peso específico seco máximo y también el valor de CBR, por tanto, afecta la capacidad portante del suelo con respecto a las muestras de suelo natural sin mezclar con aditivos, sólo aportó al suelo natural una distribución granulométrica más graduada. En el caso de la adición de escoria los resultados mostraron un comportamiento completamente diferente, dotando al suelo de una considerable mayor resistencia a la capilaridad. También resultó beneficiado el valor de peso específico seco máximo, y de forma considerable el de CBR con incrementos de un 11 y 15% del valor de CBR para las muestras con 25% y 35% de escoria respectivamente, dotando al suelo de una mayor capacidad portante.

1. E. A. C. Ñañez, E. D. R. Lafitte, and S. P. M. Pérez, "Métodos de estabilización de suelos arcillosos para mejorar el cbr con fines de pavimentación: Una revisión literaria," *Suelos Ecuatoriales*, vol. 51, no. 1y2, pp. 77-92, 2021.
2. C. H. H. Sandoval, J. C. G. Cristancho, and Ó. E. P. Naranjo, "Caracterización de un suelo arcilloso tratado con hidróxido de calcio," *Facultad de Ingeniería*, vol. 21, no. 32, pp. 21-40, 2012.
3. D. Angulo Roldan and H. F. Rojas Escajadillo, "Ensayo de fiabilidad con aditivo PROES para la estabilización del suelo en el AA. HH. El Milagro, 2016," 2016.
4. T. Athira and T. J. I. J. o. E. R. Sini, "Effect of bagasse ash on strength characteristics and index properties of kaolinite clay," *International Journal of Engineering Research Technology*, vol. 8, no. 6, pp. 1273-1275, 2019.
5. B. G. Buddhdev and M. Chauhan, "Experimental Studies on Utilization of Blast Furnace Slag for Cohesionless Soil," in *Proceedings of the Indian Geotechnical Conference 2019*, 2021, pp. 337-346: Springer.
6. M. Carlina, Y. Apriyanti, and F. Fahriani, "The Effect of Addition of Bagasse Ash and Eggshell Powder on CBR Value of Clay Soil," in *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2021, vol. 926, no. 1, p. 012102: IOP Publishing.
7. P. Meena, J. Sharma, and B. Acharya, "Effect of Ground Granulated Blast Furnace Slag and Fly Ash on Geotechnical Properties of Expansive Soil," in *Proceedings of the Indian Geotechnical Conference 2019*, 2021, pp. 217-227: Springer.
8. W. Sas et al., "Geotechnical and Environmental Assessment of Blast Furnace Slag for Engineering Applications," *Materials*, vol. 14, no. 20, p. 6029, 2021.
9. L. C. Dang, H. Khabbaz, and B.-J. Ni, "Improving engineering characteristics of expansive soils using industry waste as a sustainable application for reuse of bagasse ash," *Transportation Geotechnics*, vol. 31, p. 100637, 2021.
10. F. Hidalgo, J. Saavedra, C. Fernandez, and G. Duran, "Stabilization of clayey soil for subgrade using rice husk ash (RHA) and sugarcane bagasse ash (SCBA)," in *IOP Conference Series: Materials science and engineering*, 2020, vol. 758, no. 1, p. 012041: IOP Publishing.
11. L. Dang and H. Khabbaz, "Assessment of the geotechnical and microstructural characteristics of lime stabilised expansive soil with bagasse ash," *GeoEdmonton*, 2018.
12. A. K. Anupam, P. Kumar, and G. Ransinchung, "Use of various agricultural and industrial waste materials in road construction," *Procedia-Social Behavioral Sciences*, vol. 104, pp. 264-273, 2013.
13. V. A. Akinbinu, M. O. Tanimola, S. P. J. I. J. o. M. Akande, and Geo-Engineering, "Utilization of calcium rich mine wastes and bone ash for the improvement of California Bearing Ratio (CBR) of soft soil," *International Journal of Mining Geo-Engineering*, vol. 56, no. 2, pp. 115-123, 2022.
14. S. R. Abdila et al., "Potential of soil stabilization using ground granulated blast furnace slag (GGBFS) and fly ash via geopolymerization method: A Review," *Materials*, vol. 15, no. 1, p. 375, 2022.
15. T. Wattez, C. Patapy, L. Frouin, J. Waligora, and M. Cyr, "Interactions between alkali-activated ground granulated blastfurnace slag and organic matter in soil stabilization/solidification," *Transportation Geotechnics*, vol. 26, p. 100412, 2021.
16. A. Thomas, R. Tripathi, and L. Yadu, "A laboratory investigation of soil stabilization using enzyme and alkali-activated ground granulated blast-furnace slag," *Arabian Journal for Science Engineering*, vol. 43, no. 10, pp. 5193-5202, 2018.
17. J. He, X.-q. Wang, Y. Su, Z.-x. Li, and X.-k. Shi, "Shear strength of stabilized clay treated with soda residue and ground granulated blast furnace slag," *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 31, no. 3, p. 06018029, 2019.
18. J. He, X.-k. Shi, Z.-x. Li, L. Zhang, X.-y. Feng, and L.-r. Zhou, "Strength properties of dredged soil at high water content treated with soda residue, carbide slag, and ground granulated blast furnace slag," *ConstructionBuilding Materials*, vol. 242, p. 118126, 2020.
19. [19]M. Á. O. García, S. B. C. Pabón, and L. M. J. Sicachá, "Mejoramiento de subrasantes de tipo arcilloso mediante la adición de escoria de acero," *Revista de Investigación Desarrollo e Innovación: RIDI*, vol. 11, no. 1, pp. 185-196, 2020.
20. Geotecnia. Determinacion del contenido de humedad de los suelos y rocas en el laboratorio, 2000.
21. Geotecnia. Determinacion del limite liquido, limite plastico e indice de plasticidad de los suelos, 2000.
22. Geotecnia. Determinacion del peso especifico de los suelos, 1999.
23. Geotecnia. Determinacion de la granulometria de los suelos, 1999.
24. Geotecnia. Clasificacion geotecnica de los suelos, 2000.
25. B. M. Das and N. Sivakugan, T. Anderson, Ed. *Principles of Foundation Engineering*, 9th ed. (no. 01). 20 Channel Center Street, Boston, MA 02210, USA: Cengage Learning, Inc., 2019, p. 884.
26. Geotecnia. Método de ensayo para la determinación de las características de compactación del suelo en el laboratorio, 1998.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

27. I. Gratchev, S. Pitawala, N. Gurung, and E. Monteiro, "A chart to estimate CBR of plastic soils," *Aust. Geomech. J.*, vol. 53, no. 1, pp. 1-5, 2018.
28. J. Hassan, B. Alshameri, and F. Iqbal, "Prediction of California Bearing Ratio (CBR) Using Index Soil Properties and Compaction Parameters of Low Plastic Fine-Grained Soil," *Transportation Infrastructure Geotechnology*, pp. 1-13, 2021.
29. A. Bharath, M. Manjunatha, T. Reshma, and S. Preethi, "Influence and correlation of maximum dry density on soaked & unsoaked CBR of soil," *Materials Today: Proceedings*, vol. 47, pp. 3998-4002, 2021.
30. V. Y. Katte, S. M. Mfoyet, B. Manefouet, A. S. L. Wouatong, and L. A. Bezeng, "Correlation of California bearing ratio (CBR) value with soil properties of road subgrade soil," *Geotechnical Geological Engineering*, vol. 37, no. 1, pp. 217-234, 2019.
31. J. Duque, W. Fuentes, S. Rey, and E. Molina, "Effect of grain size distribution on california bearing ratio (CBR) and modified proctor parameters for granular materials," *Arabian Journal for Science Engineering*, vol. 45, no. 10, pp. 8231-8239, 2020.