

Sugarcane bagasse ash as a stabilizing additive in claySoils for paving purposes: a Literary Review

INGENIERÍA QUÍMICA

La ceniza de bagazo de caña de azúcar como aditivo estabilizador en suelos arcillosos con fines de pavimentación: una Revisión Literaria

Mario Millones-Chapoñan¹, Sócrates P. Muñoz-Pérez¹, Cristian D. Villanueva-Meza¹

¹*Universidad Señor de Sipán, Facultad de Ingeniería, Arquitectura y Urbanismo, Pimentel,
Lambayeque, Perú*

[§ msocrates@crece.uss.edu.pe](mailto:msocrates@crece.uss.edu.pe), mchaponanmario@crece.uss.edu.pe, vme-zacris@crece.uss.edu.pe

Millones-Chapoñan M, Muñoz-Pérez SP, Villanueva-Meza CD. La Ceniza de Bagazo de Caña de Azúcar Como Aditivo Estabilizador en Suelos Arcillosos con Fines de Pavimentación: Una Revisión Literaria. Ingeniería y competitividad, 2023, 25(1); e30211801. <https://doi.org/10.25100/iyv.v25i1.11801>

Recibido: 03 de diciembre de 2021 – **Aceptado:** 23 de septiembre de 2022

Abstract

La ceniza de bagazo de caña de azúcar es un residuo agroindustrial sólido resultante de la quema del bagazo en calderas para cogeneración de energía. El objetivo de estudio del presente artículo de revisión es evaluar sistemáticamente el uso de la ceniza de bagazo de caña de azúcar como componente puzolánico de una nueva aplicación de residuos sostenible para la estabilización de suelos con el propósito de disminuir el impacto ambiental negativo de la construcción. El método utilizado de estudio se basó en un análisis específico en la recopilación de los artículos pertenece al estrato de tiempo de 2017 al 2021; donde están distribuidos de la siguiente manera: 05 artículos de EBSCO, 48 de Scopus, 2 de SciELO y 25 de ScienceDirect. En conclusión, de acuerdo con el estudio crítico de los resultados encontrados sustentamos que el uso del método de estabilización del suelo mejora con éxito el suelo arcilloso.

Palabras clave: Ceniza de bagazo, Caña de azúcar, Suelo arcilloso, Estabilizador.

Resumen

Sugarcane bagasse ash is a solid agroindustrial residue resulting from the burning of bagasse in boilers for energy cogeneration. The study objective of this review article is to systematically evaluate the use of sugar-cane bagasse ash as a pozzolanic component of a new sustainable waste application for soil stabilization in order to reduce the negative environmental impact of construction. The study method used was based on a specific analysis in the collection of the

articles belonging to the time stratum from 2017 to 2021; where they are distributed as follows: 05 article from EBSCO, 48 from Scopus, 2 from SciELO and 25 from ScienceDirect. In conclusion, according to the critical study of the results found, we sustain that the use of the soil stabilization method successfully improves clay soil.

Keywords: Bagasse ash, Sugar cane, Clay soil, Stabilizer

1. Introducción

⁽¹⁾ Considera que la crisis ambiental que actualmente hay en el mundo ha motivado nuevas propuestas para ayudar a reducir los efectos no deseados. ⁽²⁾ intenta con ello revertir los efectos negativos de la industria con su aprovechamiento como recursos en las obras civiles.

⁽³⁾ La ceniza de bagazo de caña de azúcar (CBCA), es un residuo agroindustrial sólido resultante de la quema del bagazo en calderas para cogeneración de energía, llama la atención por su alta disponibilidad. ⁽⁴⁾ establecen que la ceniza de bagazo (BA) es un abundante residuo agrícola del azúcar-caña industrial del refino, y su eliminación inadecuada puede resultar en un impacto perjudicial sobre el medio ambiente. ⁽⁵⁾ tiene como objetivo caracterizar sistemáticamente las cenizas de fondo, volantes y mezcladas, sometidas a procesamientos de bajo costo. ⁽⁶⁾ menciona que una de estas innovaciones aborda el uso de cenizas de caña de azúcar que es utilizado en la construcción como estabilizador de suelos.

⁽⁷⁾ ⁽⁸⁾ afirman que las propiedades físicas del suelo y los componentes del rendimiento del bagazo de caña de azúcar dan como desarrollo y estrategias el mejoramiento del suelo. ⁽⁹⁾ considera que (BA) evalúa las posibles ventajas de su componente puzolánico como una nueva aplicación de residuos sostenible para la estabilización de suelos con el propósito de disminuir el impacto ambiental negativo de la construcción. ⁽¹⁰⁾ la pulverización del (SCBA) se realiza mediante un tipo mecánico de molienda y su finura se confirma mediante el análisis del tamaño de partícula y la determinación de la superficie

específica. ⁽¹¹⁾ se deben realizar muchas investigaciones sobre la reutilización de materiales de desecho con fines de pavimentación, y se debe evaluar el impacto del uso de materiales de desecho en el rendimiento de estas.

Según sus investigaciones ⁽¹²⁾ también nos indican que se requiere llevar a cabo diversas pruebas de ensayo y error de las cuales hace parte diferentes cantidades de agregado de (CBCA). ⁽¹³⁾ pretende determinar la influencia de la (CB) derivado de la caña de azúcar activada, en proporción de 5%, 10% y 15% en la estabilización de la subrasante para pavimentos flexibles.

Según ⁽¹⁴⁾ se establecieron tres profundidades de operación de subsuelo (35, 40 y 45 cm), los resultados mostraron que la profundidad del subsuelo se correlacionó significativamente con las características de la estructura del suelo y la mejora del rendimiento.

⁽¹⁵⁾ los resultados de la estabilización y evaluación de laboratorio de las características de estos residuos con el fin de determinar su idoneidad como material de pavimento flexible. ⁽¹⁶⁾ nuestro estudio presenta el efecto de la quema de bagazo a diferentes temperaturas (300 ° C y 600 ° C) sobre la resistencia a la compresión y las propiedades físicas del (BA). ⁽¹⁷⁾ Los resultados experimentales han revelado que el bagazo produce más sílice amorfa con un contenido de carbono muy bajo cuando se quema a 600 ° C / 2 h. ⁽¹⁸⁾ determina las características de compactación, la relación de carga y durabilidad de absorción de agua de las mezclas.

⁽¹⁹⁾ los resultados de las propiedades de los residuos de pavimentos asfálticos recuperados, mejoraron con la estabilización de (CBCA) en las

mezclas. ⁽²⁰⁾ considera así de esta manera encontrar y a su vez determinar el porcentaje que logre aportar una mejora a sus propiedades como aditivo estabilizador en suelos arcillosos, y así evidenciar la viabilidad que tendría o no en utilizarse.

Los agentes estabilizadores tradicionales y la necesidad de contar con la utilización de desechos industriales y agrícolas, y de esta manera aprovechar este recurso disminuyendo este impacto ambiental en la construcción.

Bajo el contexto de la problemática planteada, el presente documento tiene como objetivo una revisión sistemática de la ceniza de bagazo de caña de azúcar como aditivo estabilizador en suelos arcillosos con fines de pavimentación, para poder ser aplicada en la construcción actual.

2. Materiales y métodos

El estudio utilizó un método de investigación cualitativa – documental con un punto de vista evaluativo para mostrar el uso del bagazo de caña en suelos arcillosos con fines de pavimentación. La recopilación de los artículos pertenece al estrato de tiempo de 2017 al 2021; según base de datos en los siguientes artículos indexados, tal como se muestra en la tabla 1 donde están

distribuidos de la siguiente manera 02 artículo de EBSCO, 48 de Scopus, 5 de SciELO y 25 de ScienceDirect. Con la finalidad de utilizar la información se ha realizado el análisis de la viabilidad y variación.

Tabla 1. Artículos distribuidos según la base de datos y el año de publicación

Año	Base de Datos			
	Scopus	ScienceDirect	EBSCO	SciELO
2017	15	10	-	2
2018	17	2	1	1
2019	8	2	1	1
2020	6	8	-	1
2021	2	3	-	-
TOTAL	48	25	2	5

Fuente: Elaboración propia

En la tabla 2 nos permite apreciar la búsqueda respectiva de los artículos. Donde se ha utilizado las siguientes palabras claves, (cane ash in the construction, sugar cane on the substrate, sugar cane as additive, sugar cane as a material in concrete, clay soils, sugar cane in the construction, sugar cane in the construction, cane bags in the pavement and in the construction, ash from sugarcane bagasse and soils, cane and soil bagasse, sugar and soil.)

Tabla 2. Búsqueda Respectiva De Artículos Según Base Para La Selección Final De Documento.

BASE DE DATOS	AÑOS DE ANTIGÜEDAD	PALABRAS CLAVES	DOC. SIN FILTRO	FILTRO DE BÚSQUEDA	DOC. CON FILTRO	SELECCIÓN
SCOPUS	2017 - 2021	Cane ash in the Construction	101	Engineering Materials Science Environmental Science Environmental Science,	31	6
	2018 - 2021	Sugar cane on the Substrate	1120	Engineering, Materials Science, Chemical Engineering	174	7

SCIENCEDIRECT	2017 - 2019	Sugar cane as Additive	291	Engineering, Chemistry, Materials Science, Energy, Environmental Science, Chemical Engineering, Materials Science, Environmental Science	29	10
	2017 - 2021	Sugar cane as a material in Concrete	108	Materials Science, Engineering Materials Science, Engineering	51	7
	2017 - 2021	Clay Soils	83677	Engineering	4465	18
	2020 - 2021	Sugar Cane in the Construction	8384	Chemical Engineering, Engineering, Materials Science	592	21
	2019 - 2020	Cane bags in the Pavement and in the Construction	52	Materials Science, Energy, Engineering.	7	2
	2019 - 2021	Recyclable Sugar cane on Flooring	32	Engineering, Materials Science	18	2
	2017 - 2021	Ash from sugarcane Bagasse and Soils	13	Engineering	5	2
	2017 - 2021	Cane and Soil bagazo	15	Engineering	3	1
	2017 - 2021	Sugar and Soil	409	Engineering	15	4

Fuente: Elaboración propia

Con la finalidad de utilizar la información se ha realizado el análisis de la viabilidad y variación. La información encontrada se cataloga en un principal contenido analítico, en el cual de cada respectivo artículo se obtuvo la idea central, los procedimientos relacionados a realizar y los resultados. Por último, se organizó la información, acoplando los distintos resultados de los artículos.

3. Resultados y discusión

La CBCA es una gran cantidad de desperdicio que se puede ver por todas partes, y su disposición es muy peligrosa, por lo que su aplicación en materiales de construcción está aumentando ⁽²¹⁾. Además, el creciente problema de desechos lleva a convertir estos desechos en materiales para la ingeniería sustentable, es por ello que se están realizando investigaciones sobre su reutilización

(22).

3.1 Bloques de suelo arcilloso estabilizados con CBCA

La CBCA también se ha utilizado en la fabricación de bloques de tierra comprimida como estabilizadores independientes, también se evita el uso de estabilizadores primarios como cemento y cal, mientras que la CBCA forma el estabilizador primario en su lugar ⁽²³⁾.

Al combinar la CBCA en proporciones del 5% al 30% en incrementos del 5% para determinar su resistencia a la compresión y absorción de agua, su CDHO y DSM y se verificó la densidad del bloque colado para varias combinaciones y su CDHO arrojó 1.34% y su DSM 35.05% con 5% de CBCA ⁽²⁴⁾. La absorción de agua de la muestra de suelo arcilloso también aumentó con el aumento del contenido de desechos recomendando de este modo que se añada en un 20% de CBCA en la fabricación de la muestra ⁽²⁵⁾.

El desempeño del suelo arcillo con diferentes residuos incluido la CBCA, se agregaron individualmente y se probó la resistencia, encontrándose que al 10% dio la mayor resistencia de todas las combinaciones ⁽²⁶⁾. Sin embargo, también se encontró que un suelo arcillo compuesto de CBCA al 5% daba una resistencia cercana a la del bloque de tierra estabilizada con cal al 10% ⁽²⁷⁾. ⁽²⁸⁾ investigó el potencial del bagazo en la fabricación de bloques de tierra comprimida de suelo arenoso.

Se adoptó suelo arcilloso para pavimentación y se modificaron con ceniza de bagazo al 3, 5, 8 y 10%, se comprimieron y fundieron en bloques de 285 mm. × 145 mm × Bloques de 95 mm y curado por períodos de 14, 21 y 28 días ⁽²⁹⁾. Después de los períodos de curado, se sometieron a una prueba de resistencia a la compresión resultando que el 10% de CBCA pudo aumentar la resistencia de suelo arcilloso en un 65% ⁽³⁰⁾.

También hubo una reducción del 7% en las grietas por contracción de bloques de suelo arcilloso con CBCA al 10% ⁽³¹⁾.

3.2 Suelos arcillosos estabilizados en bloques con aditivo auxiliar de CBCA

La residuos industriales de caña al ser utilizados como reemplazo del cemento Portland tipo clase I hasta en un 50% en peso en incrementos del 10% con períodos de 7 y 28 días, dio como resultado de la prueba de contenido de humedad óptimo(CDHO) y densidad seca máxima (DSM) en suelos arcillosos estabilizado con CBCA que dio de 1.29% de CDHO y 28.10% DE DSM indicaron eran el mejor reemplazo para el cemento en masa con reemplazo de hasta 60% en peso ⁽³²⁾. La resistencia y la absorción de agua del bloque reemplazado de CBCA cumplieron con los estándares para unidades de mampostería de concreto que soportan cargas huecas ⁽³³⁾.

Por otro lado se investigó también el potencial de la residuos industriales de caña en la sustitución de cemento donde se reemplazó con residuos industriales de caña al 15, 30 y 40%, seguido de curado durante un período de 9 residuos industriales de caña 0 días, dando como resultado que el 15% de residuos industriales de CBCA de caña produjo la mayor resistencia a la compresión en comparación con los otros contenidos de reemplazo y con respecto a su CDHO añadida con este residuo da 1.23% y su DSM de 27.40%. ⁽³⁴⁾. Encontraron que la adición de CBCA aumentaba la absorción de agua de los bloques, sin embargo, se encontró que un aumento en la proporción de agua a aglutinante reduce la absorción de agua ⁽³⁵⁾. Así mismo si añadimos un 10% de CBCA, curado de 7, 14 y 28 sometidos a pruebas de compresión y flexión tanto en estado seco como saturado va a mejorar significativamente el rendimiento de los bloques estabilizados ⁽³⁶⁾.

Muestras de suelo con CBCA como agentes estabilizadores con bloques producidos con 12%

de cemento modificado con 8% de CBCA cumplió con los estándares para estabilizados, con CBCA 1.38 % Y DSM de 34.50% ⁽³⁷⁾. Las muestras con bloques de estas muestras de suelos arcillosos modificados también produjeron un mejor desempeño en las pruebas de compresión axial y diagonal en comparación con los bloques sin ceniza ⁽³⁸⁾ ⁽³⁹⁾. El efecto de CBCA sobre el potencial de bloques de suelo estabilizados con cemento resultó en un aumento en el desempeño de los bloques con mayor resistencia a la compresión y sin eflorescencias ⁽⁴⁰⁾.

La sustitución parcial de cemento en pavimentación con CBCA da una resistencia a la compresión máxima con un contenido de aditivo del 3,2%, y su CDHA sin añadir CBCA da un porcentaje de 1.31 y su DSM 30.50% ⁽⁴¹⁾. La CBCA añadida al suelo arcilloso con una proporción de 1: 1,5 era la dosis óptima ya que cumplía con los estándares mínimos ⁽⁴²⁾.

Los resultados de contenido de humedad óptimo y densidad seca máxima en suelos arcillosos estabilizado con CBCA se ven reflejados en la Tabla.

Tabla 3. Resultados de contenido de humedad óptima y densidad seca máxima

Referencia	% Reemplazo	Suelo arcilloso puro		Suelo arcilloso puro + % DE CBCA	
		CDHO	DSM	CDHO	DSM
(Ferrão & Moizinho, 2017)	3.2	1.31%	30.50%	Nulo	Nulo
(Abdurrahman, Wibisono, Qoryati, Sitompul, & M, 2019)	5	-	-	1.34	35.05%
(Tahami, Arabani, & Foroutan Mirhosseini, 2018)	8	-	-	1.38	34.50%
(Seick, Adamah, Elodie, Gilles, & François, 2016)	10	-	-	1.29	28.10%
(Caro, Vega, Husserl, & Alvarez, 2016)	15	-	-	1.23	27.40%

Fuente: Elaboración propia

3.3 CBR del suelo arcilloso con adición de CBCA

Los valores de CBR del suelo arcilloso tratado con CBCA aumentaron sustancialmente con la cantidad de aditivo aumentada y el tiempo de curado prolongado ⁽⁴³⁾. A comparación con el valor CBR de la muestra de suelo parental, los valores CBR del suelo arcilloso estabilizado con CBCA aumentaron de 7,1% a 11,5% con el aumento de las adiciones de cenizas de bagazo de 0 a 25% después de 7 días de curado ⁽⁴⁴⁾. La cantidad de aumento de CBR fue casi del 62% en comparación con la CBR del suelo original ⁽⁴⁵⁾. Además, con el aumento del tiempo de curado de 7 días a 28 días, el valor de CBR del suelo

arcilloso tratado con CBCA a un contenido del 25% aumentó significativamente en aproximadamente un 83% en comparación con el del suelo expansivo sin tratar ⁽⁴⁶⁾.

El aumento de CBR también fue de aproximadamente un 15% en comparación con el mismo contenido de CBCA tratado en suelo arcilloso después de un curado de 7 días ⁽⁴⁷⁾. Obviamente, esto demuestra que el aumento de los valores de CBR no solo se debió al aumento de la adición de CBCA, sino también al tiempo de curado ⁽⁴⁸⁾. El aumento en los valores de CBR puede deberse a la cementación y las reacciones puzolánicas en forma de resistencia a la fricción contribuidas por la CBCA ⁽⁴⁹⁾.

Los efectos generales de CBCA y las combinaciones de ceniza de cal-bagazo hidratada sobre la ganancia de CBR del suelo arcilloso tratado para los contenidos variables de ceniza de cal-bagazo hidratada después de 7 días de curado aumentó significativamente con una cantidad creciente de estabilizadores hasta un 25% ⁽⁵⁰⁾. La adición de un porcentaje de 10% CBCA generó que el CBR de curado de 7 días aumentó en un factor de 3,7 en promedio ⁽⁵¹⁾.

Además, en una proporción de 1: 3 después de 7 días de curado, el CBR promedio aumentó significativamente en un factor de 8.8 en comparación con el de la muestra de suelo original, respectivamente ⁽⁵²⁾. Además, con el fin de comparar con el mismo contenido y tiempo de curado de muestras de suelo arcilloso estabilizado con CBCA, después del período de curado de 7 días resultó en un aumento en el CBR promedio por un factor de 5,5 ⁽⁵³⁾. Por lo tanto, es importante señalar que las combinaciones de suelo arcilloso tratado con CBCA dieron como resultado valores de CBR más altos ⁽⁵⁴⁾. El suelo arcillo con adición de 18% CBCA aumentó significativamente con el aumento en el contenido hasta un 25% ⁽⁵⁵⁾. Sin embargo, el aumento de CBR fue más pronunciado para CBR sin remojar de suelo arcilloso estabilizado con bagazo ⁽⁵⁶⁾.

Específicamente, para comparar con el valor de CBR del suelo arcilloso sin tratar, los valores de CBR empapado del suelo arcilloso estabilizado con CBCA aumentaron de 3.5% a casi 10% con el aumento del contenido CBCA de 0 a 25% después de 7 días de curado y 7 días de remojo ⁽⁵⁷⁾. No obstante, el suelo expansivo tratado con

adición de ceniza de bagazo al 25% dio como resultado un CBR no empapado de 11,5%, que fue aproximadamente un 20% más alto que el CBR empapado del mismo suelo arcilloso tratado con el mismo contenido de CBCA después de 7 días de curado ⁽⁵⁸⁾.

Sin embargo, el aumento en el valor de CBR empapado del suelo arcilloso tratado con CBCA hidratado fue mayor que el del CBR sin empapar cuando el contenido de aditivos excedió el 10% ⁽⁵⁹⁾. Cuando se adoptó una cantidad relativamente pequeña de un aditivo de CBCA al 10% para estabilizar el suelo arcilloso, el CBR empapado aumentó en un factor de 4.5 ⁽⁶⁰⁾. En comparación con el del suelo original, mientras que con un contenido del 25% del suelo hidratado mezcla de CBCA en una proporción de 1: factor de 22,0 en comparación con el de la muestra de suelo sin tratar ⁽⁶¹⁾. Además, el CBR empapado de una mezcla de CBCA al 25% era aproximadamente un 23% más alto que el CBR no empapado del mismo contenido de aditivo ⁽⁶²⁾.

Se observa que el incremento de CBR de suelo arcilloso estabilizado con mezcla de CBCA fue mayor para los especímenes en condiciones de remojo cuando el contenido adictivo excedió el 10% ⁽⁶³⁾. El mayor contenido de CBCA, cuantas más reacciones puzolánicas tienen lugar durante los 7 días de remojo, es más probable que se obtenga una mejor ganancia de resistencia de las mezclas hidratadas de cal-ceniza de bagazo-suelo ⁽⁶⁴⁾. Los resultados de la prueba CBR para suelo arcilloso estabilizado con CBCA están resumidos en la tabla 4.

Tabla 4. Resultados de la prueba de CBR con CBCA

Referencia	% Reemplazo	Suelo arcilloso estabilizado + % DE CBCA Valores CBR
(Awoyera, Mansouri, & Vilorio, 2021)	0 a 25	7,1% a 11,5%
(Jinmiao, Han, Ge, Bian, & Li, 2021)	8	25
(Ferreira, y otros, 2016)	10	3.7
(Jinmiao, Han, Ge, Bian, & Li, 2021)	28	9
(Cai, Issakhov, Roco-Videla, & Agdas, 2021)	83	25%

Fuente: Elaboración propia.

4. Conclusiones

La adición de ceniza de bagazo reduce el índice de plasticidad y el porcentaje de hinchamiento y aumenta la densidad seca máxima. Es necesario realizar más investigaciones para encontrar el porcentaje óptimo de ceniza de bagazo que debe aplicarse como estabilizador y usarse en combinación con otros aditivos, es decir, hornos de escoria, desechos plásticos, etc.

La ceniza de bagazo es un material rico en sílice que puede contribuir a mejorar el rendimiento de suelos arcillosos estabilizadores con fines de pavimentación y, al mismo tiempo, tener un potencial no realizado para hacer que los bloques de suelo estabilizados / sinterizados sean más duraderos y aceptables para su uso en aplicaciones comerciales.

Hay mejora significativa en los valores de CBR con un aumento en las combinaciones de CBCA desde 0 a 25% hasta un 83%. En general, la mezcla ceniza de bagazo de caña de azúcar que es estabilizada para suelo expansivo podría satisfacer los requisitos de la mayoría de las especificaciones para materiales de sub-rasante o incluso sub-base para la construcción de carreteras y carreteras sobre la base de CBR.

La utilización de esta ceniza con respecto a las actividades de ingeniería de suelos ha aumentado

en los últimos tiempos y ha ganado prominencia en suelos estabilizados. La utilización de ceniza de bagazo en bloques de suelo se ha adoptado en dos modos como aditivo auxiliar / reemplazo de estabilizadores primarios como cal o cemento o como estabilizador / aditivo independiente del suelo en la fabricación de bloques. Las pruebas comunes adoptadas en las investigaciones que tratan con bloques de suelo estabilizado incluyen la resistencia a la compresión, la absorción de agua y, en menor medida, la eflorescencia de los bloques con fines de pavimentación. Sin embargo, el aumento en el valor de CBR empapado del suelo arcilloso tratado con CBCA hidratado fue mayor que el del CBR sin empapar cuando el contenido de aditivos excedió el 10% ⁽⁵⁹⁾. Cuando se adoptó una cantidad relativamente pequeña de un aditivo de CBCA al 10% para estabilizar el suelo arcilloso, el CBR empapado aumentó en un factor de 4.5 ⁽⁶⁰⁾. En comparación con el del suelo original, mientras que con un contenido del 25% del suelo hidratado mezcla de CBCA en una proporción de 1: factor de 22,0 en comparación con el de la muestra de suelo sin tratar ⁽⁶¹⁾. Además, el CBR empapado de una mezcla de CBCA al 25% era aproximadamente un 23% más alto que el CBR no empapado del mismo contenido de aditivo ⁽⁶²⁾.

Se observa que el incremento de CBR de suelo arcilloso estabilizado con mezcla de CBCA fue

mayor para los especímenes en condiciones de remojo cuando el contenido adictivo excedió el 10% ⁽⁶³⁾. El mayor contenido de CBCA, cuantas más reacciones puzolánicas tienen lugar durante los 7 días de remojo, es más probable que se obtenga una mejor ganancia de resistencia de las mezclas hidratadas de cal-ceniza de bagazo-suelo ⁽⁶⁴⁾. Los resultados de la prueba CBR para suelo arcilloso estabilizado con CBCA están resumidos en la tabla 4.

5. Agradecimientos y declaración de financiación

Agradecemos a la Escuela Profesional de Ingeniería Civil de la Universidad Señor de Sipán - Chiclayo por brindarnos la asesoría para la realización de este artículo, indicar que el presente trabajo no tuvo fuente de financiamiento.

6. Referencias

- (1). Dang LC, Khabbaz H, Ni BJ. Improving engineering characteristics of expansive soils using industry waste as a sustainable application for reuse of bagasse ash. *Transportation Geotechnics*. 2021; 31: p. 100637.
- (2). Quedou PG, Wirquin E, Bokhoree C. Sustainable concrete: Potency of sugarcane bagasse ash as a cementitious material in the construction industry. *Case Studies in Construction Materials*. 2021; 14: p. e00545.
- (3). Molin Filho RGD, Colpini LMS, Ferrer M, Nagano MF, Rosso JM, Volnistem EA, et al. Characterization of different sugarcane bagasse ashes generated for preparation and application as green products in civil construction. *Clean Technologies and Environmental Policy*. 2019; 21: p. 1687-1698.
- (4). Figueiredo RL, Pavía S. A study of the parameters that determine the reactivity of sugarcane bagasse ashes (SCBA) for use as a binder in construction. *SN Applied Sciences*. 2020; 2: p. 1515.
- (5). Mansaneira EC, Schwantes-Cezario N, Barreto-Sandoval GF, Martins-Toralles B. [Sugar cane bagasse ash as a pozzolanic material]. *DYNA (Colombia)*. 2017; 84: p. 163 - 171.
- (6). Deepika S, Anand G, Bahurudeen A, Santhanam M. Construction products with sugarcane bagasse ash binder. *Journal of Materials in Civil Engineering*. 2017; 29: p. 10.
- (7). Kumar Yadav A, Gaurav K, Kishor R, Suman SK. Stabilization of alluvial soil for subgrade using rice husk ash, sugarcane bagasse ash and cow dung ash for rural roads. *International Journal of Pavement Research and Technology*. 2017; 10: p. 254 - 261.
- (8). Luo j, Lin Z, Que Y, Li S, Yao K, Jiang Y, et al. [Effect of subsoiling depths on soil physical characters and sugarcane yield]. *Chinese Journal of Applied Ecology*. 2019; 30: p. 405 - 412.
- (9). Setayesh Gar P, Suresh N, Bindiganavile VS. Sugar cane bagasse ash as a pozzolanic admixture in concrete for resistance to sustained elevated temperatures. *Construction and Building Materials*. 2017; 153: p. 929 - 936.
- (10). Jafari M, Jung J. Thermal properties of fly ashes and biomass ashes including wood bagasse ashes and sugarcane bagasse ashes. *Journal of Materials in Civil Engineering*. 2017; 29: p. 3.
- (11). He J, Kawasaki S, Achal V. The utilization of agricultural waste as agro-cement in concrete: A review. *Sustainability (Switzerland)*. 2020; 12: p. 6971.
- (12). Cordeiro GC, Barroso TR, Toledo Filho RD. Enhancement the Properties of Sugar Cane Bagasse Ash with High Carbon Content by a Controlled Re-calcination Process. *KSCE Journal of Civil Engineering*. 2018; 22: p. 1250-1257.

- (13).Gupta CK, Sachan AK, Kumar R. Examination of Microstructure of Sugar Cane Bagasse Ash and Sugar Cane Bagasse Ash Blended Cement Mortar. *Sugar Tech*. 2021; 23: p. 651 - 660.
- (14).Yadav AL, Sairam V, Muruganandam L, Srinivasan K. An overview of the influences of mechanical and chemical processing on sugarcane bagasse ash characterisation as a supplementary cementitious material. *Journal of Cleaner Production*. 2020; 245: p. 118854.
- (15).Ejelioku EJ, Manasseh J, Abubakar A. Sugarcane bagasse ash stabilization of reclaimed asphalt pavement as highway material. *International Journal of Pavement Engineering*. 2019; 20: p. 1385-1391.
- (16).Seyoum R, Tesfamariam BB, Andoshe DM, Algahtani A, Ahmed GMS, Tirth V. Investigation on control burned of bagasse ash on the properties of bagasse ash-blended mortars. *Materials*. 2021; 14: p. 17.
- (17).Solanke SS, Pawade PY. An investigation of mechanical properties of concrete by addition of sugarcane bagasse ash and steel fiber. *Journal of Physics: Conference Series*. 2021; 1913: p. 1.
- (18).Lyra GP, Dos Santos V, de Santis BC, Rivaben RR, Fischer C, Pallone EMDJA, et al. Reuse of sugarcane bagasse ash to produce a lightweight aggregate using microwave oven sintering. *Construction and Building Materials*. 2019; 222: p. 222 - 228.
- (19).Sohal KS, Singh RP. Sustainable Use of Sugarcane Bagasse Ash in Concrete Production. *Lecture Notes in Civil Engineering*. 2021; 113: p. 397 - 407.
- (20).Molin Filho RGD, Colpini LMS, Ferrer MM, Nagano MF, Rosso JM, Volnistem EA, et al. Characterization of different sugarcane bagasse ashes generated for preparation and application as green products in civil construction. *Clean Technologies and Environmental Policy*. 2019; 21: p. 1687 - 1698.
- (21).Edeh JE, Samson I, Terhemba A. RICE-HUSK ASH-CARBIDE-WASTE STABILIZATION OF RECLAIMED ASPHALT PAVEMENT. *Nigerian Journal of Technology*. 2016; 35(3): p. 465-472.
- (22).Franca A, Schultz , Borges , Wypych F, Mangrich S. Rice Husk Ash as Raw Material for the Synthesis of Silicon and Potassium Slow Release Fertilizer. *Printed in Brazil*. 2017; 28(11): p. 2211-2217.
- (23).Intari DE, Fathonah, Saputro B. Performance of asphalt concrete mixture (AC-WC) using asphalt added with the waste of rice husk ash. *Civil Engineering Department, University of Sultan Ageng Tirtayasa*. 2019; 673: p. 1-6.
- (24).Abdurrahman, Wibisono G, Qoryati M, Sitompul IR, M O. Mechanical properties of crumb rubber-rice husk ash concrete as a rigid pavement material. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2019; 615: p. 1-8.
- (25).Adamu M, Kingsley OA, Ibarahim HS, Hussein IM, Haruna S. Durability performance of pervious concrete containing rice husk ash and calcium carbide: A response surface methodology approach. *Case Studies in Construction Materials*. 2021; 14: p. 547-556.
- (26).Al-Hdabi A. Laboratory investigation on the properties of asphalt concrete mixture with Rice Husk Ash as filler. *Construction & Building Materials*. 2016; 126: p. 544-551.
- (27).Alireza A, Rezvan RB, Navid N, Farhang J, Farzin Poorheydari M. Laboratory evaluation of the effect of coal waste ash (CWA) and rice husk ash (RHA) on performance of asphalt mastics and Stone matrix asphalt (SMA) mixture. *Construction and Building Materials*. 2020; 236: p. 1-16.
- (28).Ameri M, Gozali Asl F, Modiri Gharehveran M, Behnood A. Effects of copper slag and recycled concrete aggregate on the properties

- of CIR mixes with bitumen emulsion, rice husk ash, Portland cement and fly ash. *Construction and Building Materials*. 2015; 96: p. 172-180.
- (29).Arabani, Mahyar; Tahami, Seyed Amid; Taghipoor, Mohammad. Laboratory investigation of hot mix asphalt containing waste materials. *Containing waste materials*. 2016: p. 2164-7402.
- (30).Arabani, Mahyar; AmidTahami, Seyed. Assessment of mechanical properties of rice husk ash modified asphalt mixture. *Construction and Building Materials*. 2017; 149: p. 350-358.
- (31).Araújo JM, Sousa RO, Macedo D, Dutra PS, Campos LFA. Effects of granite waste addition on the technological properties of industrial silicate based-ceramics. *Materials Research Express*. 2019;; p. 12-22.
- (32).Seick OS, Adamah , Elodie P, Gilles E, François T. Synthesis and characterization of geopolymer binders based on local materials from Burkina Faso – Metakaolin and rice husk ash. *Construction and Building Materials*. 2016; 124: p. 301-311.
- (33).Arroyo Martinez PC, Sanchez Flores N, Villafuerte Castrejón M, Vivar Ocampo R. Synergistic Effect of 4A Zeolite from Rice Husk Ash without Aging Time and Silane on the Adhesion Properties of a Warm Mix Asphalt. *Sociedade Brasileira de Química*. 2018; 29(1): p. 58-66.
- (34).Caro, Vega N, Husserl J, Alvarez E. Studying the impact of biomodifiers produced from agroindustrial wastes on asphalt binders. *Construction and Building Materials*. 2016; 126: p. 369-380.
- (35).Cavalcate FW, Moizinho JC. The Influence of Unusual Materials as Prospective Fillers in the Hot Mix Asphalt. *Materials Science and Engineering*. 2017; 245: p. 1-9.
- (36).Chaira , Mawardi. Utilization of palm shells fly ash as filler on the mixture of Asphalt Concrete Wearing Course (AC–WC). *IOP Conference Series Earth and Environmental Science*. 2019; 325: p. 1-8.
- (37).Tahami , Arabani M, Foroutan Mirhosseini A. Usage of two biomass ashes as filler in hot mix asphalt. *Construction and Building Materials*. 2018; 170: p. 547-556.
- (38).Choudhary J, Kumar B, Gupta A. Utilization of solid waste materials as alternative fillers in asphalt mixes: A review. *Construction and Building Materials*. 2020; 234: p. 117271.
- (39).Khabbaz H, Ni BJ. Improving engineering characteristics of expansive soils using industry waste as a sustainable application for reuse of bagasse ash. *Transportation Geotechnics*. 2021; 31: p. 100637.
- (40).Farred A, Z, Ahmand S BA, Hafeez I, A A. Use of agricultural waste ashes in asphalt binder and mixture: A sustainable solution to waste management. *Construction and Building Materials*. 2020;; p. 259.
- (41).Ferrão WC, Moizinho JC. The Influence of Unusual Materials as Prospective Fillers in the Hot Mix Asphalt. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2017; 245.
- (42).Foroutan Mirhosseini SA, Khabiri MM, Kavussi A. Applying surface free energy method for evaluation of moisture damage in asphalt mixtures containing date seed ash. *Construction and Building Materials*. 2016; 125: p. 408-416.
- (43).Zhen, Sha, Wang , Gao J. Studying the Properties of SBS/Rice Husk Ash-Modified Asphalt Binder and Mixture. *Advances in Materials Science and Engineering*. 2020; p. 1-11.
- (44).Awoyera PO, Mansouri IAA, Vilorio A. new formulation for strength characteristics of steel slag aggregate concrete using an artificial intelligence-based approach. *Computers and Concrete*. 2021; 24: p. 333 - 341.
- (45).Cabrera J, Escalante G, Castro-Borges P. Compressive strength of concretes with blast

- furnace slag. Re-visited state-of-the-art. *ALCONPAT*. 2021; 6: p. 64-83.
- (46).Cai T, Issakhov A, Roco-Videla ÁG, Agdas AS. The compressive strength of concrete retrofitted with wind ash and steel slag pozzolans with a water-cement based polymers. *Advances in Concrete Construction*. 2021; 11: p. 507 - 519.
- (47).Chakravarthi S, Shankar S. Utilization of recycled aggregates in cement-treated bases: a state-of-the-art review. *Soluciones de infraestructura innovadoras*. 2021; 6: p. 191.
- (48).Dilli Bai K, Krishna Rao A, Sountharajan VM. Strength characteristics of slag based steel fiber reinforced concrete with partial replacement of steel slag in coarse aggregate. *International Journal of Recent Technology and Engineering*. 2019; 8: p. 3449 - 3452.
- (49).Dingqiang Fan RYZSKLYFSWKLJTYH. A new development of eco-friendly Ultra-High performance concrete (UHPC): Towards efficient steel slag application and multi-objective optimization. *Construction and Building Materials*. 2021; 306: p. 124913.
- (50).El-Hassan H, Hussein A, Medlji J, El-Maaddawy T. Performance of steel fiber-reinforced alkali-activated slag-fly ash blended concrete incorporating recycled concrete aggregates and dune sand. *Buildings*. 2021; 11: p. 327.
- (51).Ferreira VJ, Sáez-De-Guinoa Vilaplana A, García-Armingol T, Aranda-Usón A, Lausín-González C, López-Sabirón AM, et al. Evaluation of the steel slag incorporation as coarse aggregate for road construction: Technical requirements and environmental impact assessment. *Journal of Cleaner Production*. 2016; 130: p. 175 - 186.
- (52).Guo J, Bao Y, Wang M. Steel slag in China: Treatment, recycling, and management. *Waste Management*. 2018; 78: p. 318-330.
- (53).Hanif. Use of Steel Slag with Variations of Fas Compressive Strength of Concrete. *Materials Science and Engineering*. 2018; 536: p. 012029.
- (54).He L, Zhan C, Lyu S, Grenfell JRA, Gao J, Kowalski KJ, et al. Application status of steel slag asphalt mixture. *Jiaotong Yunshu Gongcheng Xuebao/Journal of Traffic and Transportation Engineering*. 2020; 20: p. 15 - 33.
- (55).Jinmiao F, Han Zy, Ge Q, Bian Z, Li W. Comparative study on properties of recycled concrete mixed with slag and polypropylene fiber/steel fiber. *Journal of Physics: Conference Series*. 2021; 1904: p. 012018.
- (56).Keke Sun XPSHCSWLZGJ. Utilization of BOF steel slag aggregate in metakaolin-based geopolymer. *Construction and Building Materials*. 2021; 300: p. 124024.
- (57).Lai M.H. ZJ,B,JCM,X,Q. Improving mechanical behavior and microstructure of concrete by using BOF steel slag aggregate. *Construction and Building Materials*. 2021; 277: p. 122269.
- (58).Lim YC, Shih YJ, Yang W, Chen C, Dong C. Recycling dredged harbor sediment to construction materials by sintering with steel slag and waste glass: Characteristics, alkali-silica reactivity and metals stability. *Journal of Environmental Management*. 2020; 270: p. 110869.
- (59).Liu J, Wang Z, Guo H, Yan F. Thermal transfer characteristics of asphalt mixtures containing hot poured steel slag through microwave heating. *Journal of Cleaner Production*. 2021; 308: p. 127225.
- (60).Luo D, Wang Y, Zhang S, Niu D, Song Z. Frost resistance of coal gangue aggregate concrete modified by steel fiber and slag powder. *Applied Sciences (Switzerland)*. 2020; 9: p. 3229.
- (61).Martauz P, Václavík V, Cvopa B. The properties of concrete based on steel slag as a by-product of metallurgical production. *Key Engineering Materials*. 2020; 838: p. 10-20.

- (62).Zhao G. Structural and morphological characterization of steel slag powder and its effect on crack resistance of asphalt concrete. *Journal of Wuhan University of Technology*. 2018; 42: p. 1055-1058.
- (63).Zhang T, Ma B, Jiang QJD, Jin Z. Comparative research on the effect of various mineral admixtures on the early hydration process of cement. *Construction and Building Materials*. 2021; 301: p. 124372.
- (64).Zhang B, Cui S, Liu ZL, Liu ZL. Field tests of cement fly-ash steel-slag pile composite foundation. *Journal of Testing and Evaluation*. 2016; 45: p. 860 - 872.
- (65).Paquito. patata Calahorra: Sembras; 2010.
- (66).Franca A, Schultz J, Borges R, Wypych F, Manhrich A. Ceniza de cáscara de arroz como materia prima para síntesis de fertilizantes de liberación lenta de silicio y potasio. *Revista de la sociedad química Brasileña*. 2017; 28: p. 2211-2217.
- (67).Getahun MA, Shitote SM, Gariy Z CA. Experimental investigation on engineering properties of concrete incorporating reclaimed asphalt pavement and rice husk ash. *Buildings*. 2018; 8: p. 1-24.
- (68).Han Z, Sha , Tong Z, Liu , Gao J, Zou X, et al. Study on the optimum rice husk ash content added in asphalt binder and its modification with bio-oil. *Construction and Building Materials*. 2017; 147: p. 776-789.
- (69).Hassan HJ, Hussein HZ. Properties of modified asphalt mixtures with additives of fillers materials. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020; 737: p. 1.13.
- (70).Jittin V, Bahurudeen A, Ajimkya SD. Utilisation of rice husk ash for cleaner production of different construction products. *Journal of Cleaner Production*. 2020; 263: p. 1-27.
- (71).Meng , Xing C, Tan , Xiao a S, Li J, Li G. Investigation on clogging characteristics of permeable asphalt mixtures. *Construction and Building Materials*. 2020; 264: p. 1-13.
- (72).Ming G, Shang L, Fang CL. Effect of coal ash and rice husk ash partial replacement in ordinary Portland cement on pervious concrete. *Materiales de construcción y edificación*. 2021; 286.
- (73).Mistry R, Karmakar S, Kumar RT. Experimental evaluation of rice husk ash and fly ash as alternative fillers in hot-mix asphalt. *Buildings*. 2019;: p. 1-12.
- (74).Modarres, Hosseini Z. Mechanical properties of roller compacted concrete containing rice husk ash with original and recycled asphalt pavement material. *Materials & Design*. 2014; 64: p. 227-236.
- (75).Rengarasu TM, Mohamed, Nishanthini J, Bandara WM. Suitability of coal bottom ash and carbonized rice husk in hot mix asphalt. *Asian Transport Studies*. 2020; p. 1-6.
- (76).Pires , Specht , Pinheiro , Pereira , Renz. Comportamento mecânico de material fresado após processo de estabilização granulométrica e química por meio da incorporação de cimento e cinza de casca de arroz moído. *Materia*. 2016; 21(2): p. 365-384.
- (77).Pradoto , Puri , Hadinata , Rahman D. Improving strength of porous asphalt: a nano material experimental approach. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2020; 849: p. 1-9.
- (78).Putra Jaya R, Mohd Satar MK, Abdullah NA, Hainin MR, Abdul Hassan N, Yaacob H, et al. Effect of Black Rice Husk Ash on Asphaltic Concrete Properties under Aging Condition. *International Conference on Concrete Engineering and Technology*. 2018; 431: p. 1-6.
- (79).Putra Jaya , Mohd Satar M, Mohamed Abdullah A. Effect of Black Rice Husk Ash on Asphaltic Concrete Properties under Aging Condition. *IOP Conference Series*

- Materials Science and Engineering. 2018; 431(3): p. 1-13.
- (80).Raja, Tapas Kumar R. Performance evaluation of bituminous mix and mastic containing rice husk ash and fly ash as filler. *Construction and Building Materials*. 2020;; p. 1-14.
- (81).Ramadhansyah PJ, Haryati Y, Norhidayah AH, Mohd Rosli H, Muhammad Naquiuddin MV, Azman M, et al. Creep and resilient modulus properties of asphaltic concrete containing black rice husk ash. *Earth and Environmental Science*. 2019; 220: p. 1-7.