

Influencia de la inclusión de ceniza de bagazo de caña de azúcar sobre la compactación, CBR y resistencia a la compresión simple de un material granular tipo subrasante

O. Ojeda-Farías¹ , J. M. Mendoza-Rangel^{1*} , M. A. Baltazar-Zamora² 

*Autor de Contacto: jose.mendozarn@uanl.edu.mx

DOI: <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v8i2.282>

Recepción: 11/12/2017 | Aceptación: 26/03/2018 | Publicación: 30/04/2018

RESUMEN

El objetivo del presente trabajo fue estudiar la influencia de la ceniza de bagazo de caña de azúcar (CBCA) como sustituto parcial del Cemento Portland Compuesto (CPC) para mejorar las propiedades de un suelo granular arenoso. Se llevaron a cabo ensayos de compactación AASHTO estándar, resistencia a la compresión simple y CBR, comparándose el comportamiento del suelo natural en estudio y mezclado con porcentajes de 3%, 5% y 7% de cemento portland como porcentajes de control, realizándose sustituciones parciales del mismo por CBCA en porcentajes de 0%, 25%, 50% y 100% con respecto al peso del suelo en estado seco. Los resultados mostraron mejoras en el suelo en las características de compactación, resistencia a la compresión y CBR, reduciéndose hasta un 25% el consumo del CPC.

Palabras clave: ceniza de bagazo de caña de azúcar; compactación, CBR, suelos; subrasante.

Citar como: O. Ojeda-Farías, J.M. Mendoza-Rangel, M. A. Baltazar-Zamora (2018), “Influencia de la inclusión de ceniza de bagazo de caña de azúcar sobre la compactación, CBR y resistencia a la compresión simple de un material granular tipo subrasante”, Revista ALCONPAT, 8 (2), pp. 194 - 208, DOI: <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v8i2.282>

¹ Universidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de Ingeniería Civil, San Nicolás de los Garza, N.L, México.

² Universidad Veracruzana, Facultad de Ingeniería Civil, Xalapa, Veracruz, México.

Información Legal

Revista ALCONPAT es una publicación cuatrimestral de la Asociación Latinoamericana de Control de Calidad, Patología y Recuperación de la Construcción, Internacional, A. C., Km. 6, antigua carretera a Progreso, Mérida, Yucatán, C.P. 97310, Tel.5219997385893, alconpat.int@gmail.com, Página Web: www.alconpat.org

Editor responsable: Dr. Pedro Castro Borges. Reserva de derechos al uso exclusivo No.04-2013-011717330300-203, eISSN 2007-6835, ambos otorgados por el Instituto Nacional de Derecho de Autor. Responsable de la última actualización de este número, Unidad de Informática ALCONPAT, Ing. Elizabeth Sabido Maldonado, Km. 6, antigua carretera a Progreso, Mérida, Yucatán, C.P. 97310.

Las opiniones expresadas por los autores no necesariamente reflejan la postura del editor.

Queda totalmente prohibida la reproducción total o parcial de los contenidos e imágenes de la publicación sin previa autorización de la ALCONPAT Internacional A.C.

Cualquier discusión, incluyendo la réplica de los autores, se publicará en el primer número del año 2019 siempre y cuando la información se reciba antes del cierre del tercer número del año 2018.

Influence of sugar cane bagasse ash inclusion on compacting, CBR and unconfined compressive strength of a subgrade granular material

ABSTRACT

The aim of the present work was study the influence of sugar cane bagasse ash (SCBA) as a partial substitution of Compound Portland Cement (PCC) in order to enhance the properties of a granular sand soil. AASHTO standard compaction test, unconfined compressive strength test, and CBR test were made, has been compared the behavior of natural soil in study and mix with percentages of 3%, 5% and 7% of PCC as a control percentage, being carried out partial substitutions of PCC by SCBA in 0%, 25%, 50% and 100% percentages with respect to dry soil weight. The results showed enhances in the compacting, CBR and unconfined compressive strength features, reducing up to 25% the consumption of PCC.

Keywords: sugar cane bagasse ash; compaction; CBR; soil; subgrade.

Influência da inclusão de cinzas do bagaço de cana-de-açúcar sobre compactação, CBR e resistência à compressão não confinada de um material granulado de sub-esmagamento

RESUMO

O objetivo do presente trabalho foi estudar a influência da cinza de bagaço de cana-de-açúcar (CBCA) como uma substituição parcial do Cimento Portland Composto (CPC), a fim de melhorar as propriedades de um solo de areia granular. O teste de compactação padrão AASHTO, a resistência à compressão não confinada e a CBR foram feitas, foi comparado o comportamento do solo natural em estudo e mistura com porcentagens de 3%, 5% e 7% de CPC como porcentagem de controle, sendo realizadas substituições parciais de CPC por CBCA em porcentagens de 0%, 25%, 50% e 100% em relação ao peso do solo seco. Os resultados mostram aprimoramentos nos recursos de compactação, CBR e resistência à compressão não confinada, reduzindo até 25% o consumo de CPC.

Palavras chave: cenoura de bagaço de cana de açúcar; compactação; CBR; solo; subtração.

1. INTRODUCCIÓN

En obras de infraestructura vial, los suelos encontrados en la zona de proyecto son los materiales principalmente empleados para la construcción de terraplenes, por lo tanto, su desempeño es de vital importancia para una adecuada vida de servicio en cualquier estructura en función. Estos suelos al ser empleados en obras de ingeniería deben cumplir requisitos de calidad establecidos en normativas internacionales, y de no cumplir dichos requerimientos se debe recurrir a métodos de mejoramiento, principalmente en sus características de estabilidad volumétrica y resistencia (Fernández Loaiza, 1982; Jofre et al., 2008; Juárez & Inzunza, 2011).

El mejoramiento de un suelo está fuertemente relacionado con el proceso de compactación y la adición de agentes estabilizadores e influyen directamente en el control de calidad de las capas conformadas, buscando obtener estructuras de suelo resistentes, económicas y con aportes a la sustentabilidad (Rico-Rodriguez & Del Castillo, 2006).

De lo anterior la adición de agentes que actúan mediante principios físico-químicos ha sido una de las técnicas mayormente empleadas en el tratamiento de suelos, sustancias como la cal, cemento portland, asfalto, ceniza volante, escoria de alto horno, ceniza de cascarilla de arroz entre otras, han sido objeto de investigación y análisis sobre su influencia en suelos de diversas clasificaciones (Behak & Perez Nuñez, 2008; Cristelo, Glendinning, Miranda, & Oliveira, 2012; Sargent, Hughes,

Influencia de la inclusión de ceniza de bagazo de caña de azúcar sobre la compactación, CBR y resistencia a la compresión simple de un material granular tipo subrasante

Rouainia, & Glendinning, 2012; S. Correia & Graca Rasteiro, 2016) observándose incrementos en resistencia y durabilidad debido a los procesos físico-químicos que ocurren en las mezclas y que además en el caso de las puzolanas se han empleado con el objetivo de reducir el consumo de cemento portland, cal y asfalto debido a la alta demanda energética y generación de CO₂ durante su procesamiento.

Actualmente la CBCA es uno de los materiales suplementarios con mayor número de investigaciones como material suplementario al cemento portland en mezclas de concretos y morteros (Moraes et al., 2015), siendo una alternativa reciente en el mejoramiento de los suelos en sus características físicas como el confinamiento, densificación y estabilidad volumétrica, y químicas a través de las reacciones del agente estabilizador (cemento o cal) con el agua y en casos excepcionales con los constituyentes del suelo (arcillas principalmente), donde su empleo como material de construcción contribuiría a resolver la problemática de generación y disposición de residuos agroindustriales, que tan solo en México sus 57 ingenios azucareros en la zafra 2016-2017 molieron 53,308,643 toneladas de caña de las 777,078 hectáreas cosechadas, obteniéndose 15,222,471 toneladas de bagazo (CONADESUCA, 2017) que una vez calcinado se convierte en ceniza cuya disposición final no está determinada. En diversos estudios se ha reportado que la combustión del bagazo de caña en las calderas de los ingenios genera un subproducto denominado ceniza de bagazo de caña de azúcar (CBCA), con elevados contenidos de sílice y alúmina como óxidos principales, que en condiciones adecuadas reacciona con el hidróxido de calcio, generándose una actividad puzolánica (Cordeiro & Kurtis, 2017). Esta actividad puzolánica está en función del tamaño de las partículas, contenido de material amorfo (aluminosilicatos), hidróxido de calcio presente y contenido adecuado de humedad, haciendo mención algunos investigadores, que la ceniza no consumida durante la reacción puede servir como material de relleno, ocupando los espacios vacíos presentes en el material compuesto (Sing, Singh, & Rai, 2000; Cordeiro, Toledo Filho, Tavares, & Fairbairn, 2008; Cordeiro, Toledo, & Fairbairn, 2009; Morales, Villar Cociña, Frias, Santos, & Savastano, 2009; Arenas Piedrahita et al., 2016; Joshaghani & Amin, 2017;) y donde en un suelo dinámicamente compactado ofrecería una alternativa para incrementar su estabilidad por efecto del sellado de poros en el suelo compactado y una posible reacción puzolánica a edades tardías.

El presente trabajo tiene como objetivo determinar la influencia de la sustitución parcial de CPC por CBCA en las propiedades de compactación, resistencia a la compresión y CBR de un suelo granular arenoso, con el fin de mejorar sus características mecánicas y ser empleado en una capa estructural de pavimento, aprovechando un material de desecho agroindustrial y reduciendo los porcentajes de cemento empleados en estabilización de suelos, que a pesar de ser porcentajes pequeños de adición, terminan generando un impacto económico y ambiental por la creciente construcción de kilómetros de carreteras a lo largo del mundo.

1. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

1.1 Materiales

Los materiales empleados en este estudio fueron cemento portland compuesto, clasificado como tipo III o CPC 30R de acuerdo con la normativa vigente (ASTM C150, 2017; NMX C414, 2004) con una densidad de 3.11 g/cm³. Ceniza de bagazo de caña obtenida en el ingenio Mahuixtlan municipio de Coatepec, Veracruz, México. La ceniza fue muestreada de una de las calderas donde la temperatura de combustión fue alrededor de los 700 °C. Una vez recolectada y enfriada fue sometida a un proceso de molienda a 1500 rpm durante 1 hora, recuperando el material pasante por el tamiz No 200 y cuya densidad fue de 2.1 g/cm³. El tratamiento de molienda se aplicó con el objetivo de reducir las partículas a un tamaño menor de 75 micras y así incrementar su área superficial específica, la cual está correlacionada con el incremento de la reactividad puzolánica de

la CBCA como lo han descrito diversos autores (Cordeiro G. C., Toledo Filho, Tavares, & Rego Fairbairn, 2009; Cordeiro & Kurtis, 2017).

El suelo empleado en este estudio fue obtenido del banco de materiales del Castillo, municipio de la ciudad de Xalapa, Veracruz México. El muestreo, identificación, preparación de las muestras y ensayos de calidad fueron efectuados como lo establecen los procedimientos de análisis y evaluación de materiales empleados en la conformación de terraplenes (ASTM D 2217, 1998; ASTM D 421, 2007; ASTM D 2216, 2010; ASTM D 698, 2012; ASTM D 4318, 2017).

1.2 Caracterización de materiales.

Se ha obtenido la composición química en óxidos de la CBCA en estudio mediante análisis de fluorescencia de rayos X (FRX), además se han determinado las fases presentes en la ceniza mediante difracción de rayos X (DRX), la morfología y características superficiales han sido observadas mediante microscopía electrónica de barrido (MEB) determinándose también la distribución de tamaño de partículas (DTP) de la CBCA empleada mediante análisis granulométrico por difracción laser, con el fin de conocer el tamaño promedio de las partículas de ceniza.

1.3 Diseño de mezclas de suelo

Para el diseño de las mezclas se emplearon tres porcentajes de adición de cemento portland de acuerdo con la clasificación del material, y que para suelos granulares como el caso de la arena empleada en este estudio los porcentajes de adición deben estar por debajo del 10%, con el fin de evitar agrietamientos debido a un exceso de rigidez, tal como lo establecen diversas prescripciones técnicas (Jofre et al., 2008; Juarez Gutierrez & Inzunza Ortiz, 2011). Los porcentajes utilizados fueron 3%, 5% y 7% con respecto al peso del suelo seco. Se establecieron las sustituciones parciales de CPC por CBCA en cada porcentaje anteriormente seleccionado, empleando 0%, 25%, 50% y 100%, haciendo un total de 12 mezclas.

1.4 Características de compactación.

La compactación es un proceso mecánico que mejora las características de resistencia de los materiales que constituyen secciones estructurales en carreteras, para ello se transfiere una energía de impacto por volumen unitario de suelo obteniendo una curva de compactación de la cual se extraen los parámetros de masa volumétrica seca máxima y humedad óptima del material. Para este trabajo la relación entre la densidad seca máxima y la humedad óptima fue determinada en cada mezcla, esto con el fin de analizar la variación en sus valores como consecuencia de las adiciones y como datos para la posterior elaboración de especímenes suelo-cemento. Las pruebas fueron efectuadas como lo establece el procedimiento para materiales granulares en moldes de 944 cm³, empleando la compactación dinámica con pisón de 2.5 kg de peso y 30.48 cm de altura de caída (ASTM D558, 2011).

1.5 Ensayos CBR

El CBR es una prueba de resistencia a la penetración que compara la capacidad de soporte de un material en estudio con uno de piedra triturada bien graduada como referencia (100% de CBR), para ello se aplica carga a un pistón con una deformación de 1.3 mm por minuto registrando las cargas desde 0.64 mm a 7.62 mm; En este trabajo se determinó el valor de soporte california (CBR) en cada una de las mezclas descritas anteriormente, para ello, por cada mezcla fueron compactados dinámicamente en moldes de acero tres especímenes por prueba a contenido óptimo de agua, para posteriormente colocarles las sobrecargas que establece la normativa y sumergirlos en agua durante 24 h simulando las condiciones más críticas, seguido de su ensayo en la prensa de carga a la velocidad de deformación anteriormente descrita (ASTM D1883, 2016).

1.6 Resistencia a la compresión simple

Para evaluar la resistencia a la compresión de cada mezcla, se elaboraron especímenes suelo-cemento, suelo-cemento-ceniza a un grado de compactación de cien por ciento. Estos especímenes fueron fabricados como lo indica el procedimiento de prueba para suelos estabilizados con cemento (ASTM D558, 2011), empleando los valores de las características de compactación obtenidas previamente. Las dimensiones de los especímenes fueron de 101.6 mm de diámetro por 116.4 mm de altura, con una relación diámetro altura de 1.15, extraídos del molde con ayuda de un extractor mecánico, para un posterior curado de 7 días sin contacto directo con el agua. El ensaye de los especímenes fue efectuado siguiendo el procedimiento de prueba de resistencia a la compresión en especímenes suelo-cemento (ASTM D1633, 2017), para ello previo al ensaye los especímenes fueron sumergidos en agua por un periodo de 4 h obteniendo así las condiciones más críticas, para después aplicar axialmente la carga mediante una prensa automática.

2. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

2.1 Caracterización físico-química de materiales.

En la Tabla 1 se presenta la caracterización realizada al suelo en estudio, en ella se muestran los parámetros geotécnicos de este material, se puede observar que el material predominante es la arena con 89.5% pasando la malla No 4 y un 20.7% pasando la No 200, y que de acuerdo a los resultados de plasticidad, no existe intervalo entre el límite líquido y límite plástico concluyéndose que los finos presentes en el suelo son no plásticos, es decir se tiene un material con características completamente granulares con una gravedad específica de 2.0, que de acuerdo al sistema unificado de clasificación de suelos corresponde a un SM con finos no plásticos (ASTM D 2487, 2011). En cuanto a las características de compactación se tiene que con una humedad del 21.7% se obtiene una densidad seca máxima de 1311 kg/m³, y que a esa densidad el valor de soporte california se encuentra en 24% con 0 % de expansión, cumpliendo con las características para ser empleado en capa subrasante como lo establecen las normas mexicanas (Rico Rodríguez, Orozco y Orozco, Telles Gutierrez, & Perez García, 1990)

Tabla 1 Características geotécnicas del suelo granular arenoso en estudio.

Propiedades	Resultados
Humedad Natural (%)	22.38
Pasa la malla 3" (%)	100
Pasa la malla No 4 (%)	89.50
Pasa la malla No 200 (%)	20.70
Límite líquido (%)	31.2
Límite Plástico (%)	N/P
Índice Plástico (%)	N/P
Densidad seca máxima (kg/m ³)	1311
Humedad Óptima (%)	21.7
Densidad	2.0
Valor Relativo de Soporte (%)	24.5
Expansión (%)	0

La Tabla 2 presenta la composición química en óxidos de la CBCA, en ella se observa que la suma de óxidos principales (SiO₂+Al₂O₃+Fe₂O₃) da un total de 73.069%, ubicándose por arriba del 70% como lo establece la norma para puzolanas, y que además se tiene un valor de pérdida por ignición de 1.5% clasificándola como puzolana clase N (ASTM C 618, 2017).

Estos resultados han sido contrastados con los de diferentes investigaciones que han empleado CBCA como material suplementario del cemento portland, obteniéndose consistencia con diversos autores (Frias, Villar, & Savastano, 2011; Ganesan, Rajagopal, & Thangavel, 2007).

Tabla 2 Composición química de la ceniza de bagazo de caña de azúcar en estudio.

Componente	Concentración
SiO ₂	62.66
Al ₂ O ₃	5.20
Fe ₂ O ₃	5.19
TiO ₂	0.64
CaO	4.87
MgO	2.19
SO ₃	0.30
K ₂ O	13.93
Na ₂ O	0.56
P ₂ O ₅	3.36
Densidad (g/cm ³)	2.1
P. Ignición (%)	1.5

La Figura 1 muestra las fases presentes en la CBCA mediante el patrón de difracción, en él se observa presencia de partículas amorfas en el halo localizado en la región 2θ de 10 - 40°, también se observa que la ceniza está compuesta principalmente por tridimita, cianita, óxido de potasio, óxido de hierro y óxido de silicio y aluminio, encontrándose como materiales cristalinos. Difractogramas similares han sido obtenidos por diversos autores, coincidiendo en señalar la región anteriormente descrita (Jagadesh, Ramachandramurthy, Murugesan, & Sarayu, 2015; Torres Rivas, Gaitan Arevalo, Espinoza Perez, & Escalante Garcia, 2014).

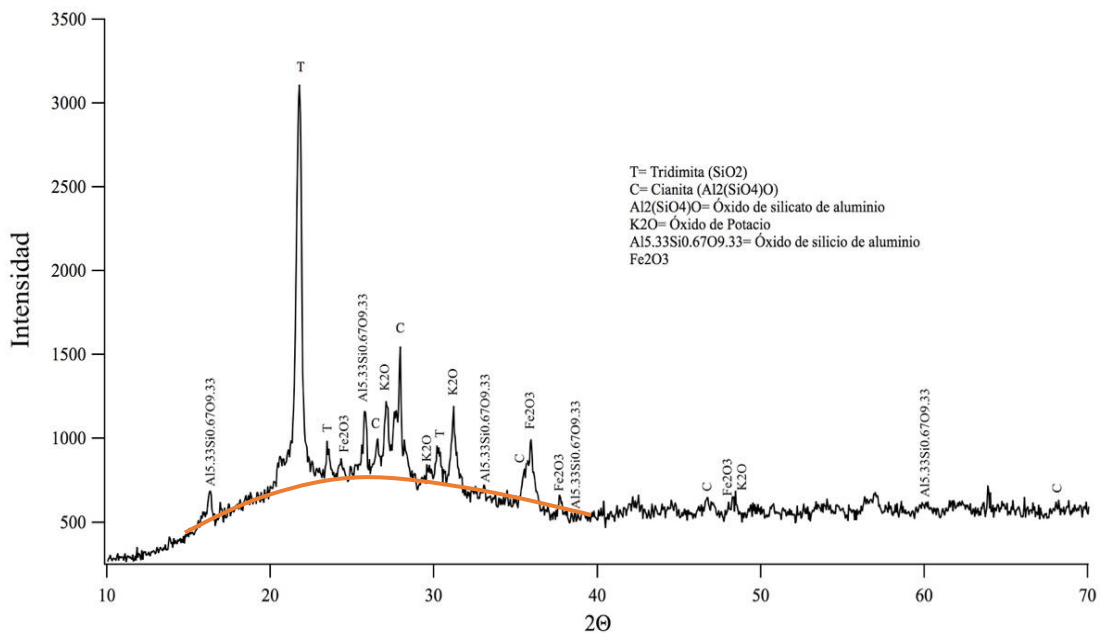


Figura 1 Resultados de DRX de la ceniza de bagazo de caña de azúcar en estudio.

La Figura 2 muestra el análisis efectuado mediante MEB en la ceniza de bagazo de caña de azúcar, en ella se aprecian formas alargadas e irregulares en sus partículas que la componen, pertenecientes a una mezcla de tridimita (SiO_2) y partículas porosas de ceniza como se aprecia en el enfoque a 500x, también se pueden observar los diversos tamaños de las partículas tomando como referencia la escala de 50 μm en la micrografía. Por otro lado, y con un enfoque de 800x se aprecian partículas que corresponden a la tridimita, con apreciables granos de menor tamaño sobre ellas observando tamaños que oscilan entre los 20 μm y 40 μm . La morfología encontrada es asociada al proceso y temperatura de quemado del bagazo, como lo han reportado diversos investigadores. Adicionalmente en la misma figura se muestra la distribución de tamaño de partículas de la CBCA, apreciando la distribución uniforme de tamaños con la que cuenta la CBCA, es decir, la ceniza está compuesta de partículas de tamaños desde 10 μm hasta 200 μm , teniendo un tamaño promedio de 86.62 μm de acuerdo al análisis granulométrico por difracción láser. La adecuada simetría mostrada por los porcentajes entre tamaños refleja la distribución uniforme en la CBCA. La morfología y composición de las partículas coinciden con diversas imágenes obtenidas en investigaciones realizadas por otros autores (Alavez Ramirez, Montes Garcia, Martinez Reyes, Altamirano Juarez, & Gochi Ponce, 2012; Jimenez Quero, Leon Martinez, Montes Garcia, Gaona Tiburcio, & Chacon Nava, 2013).

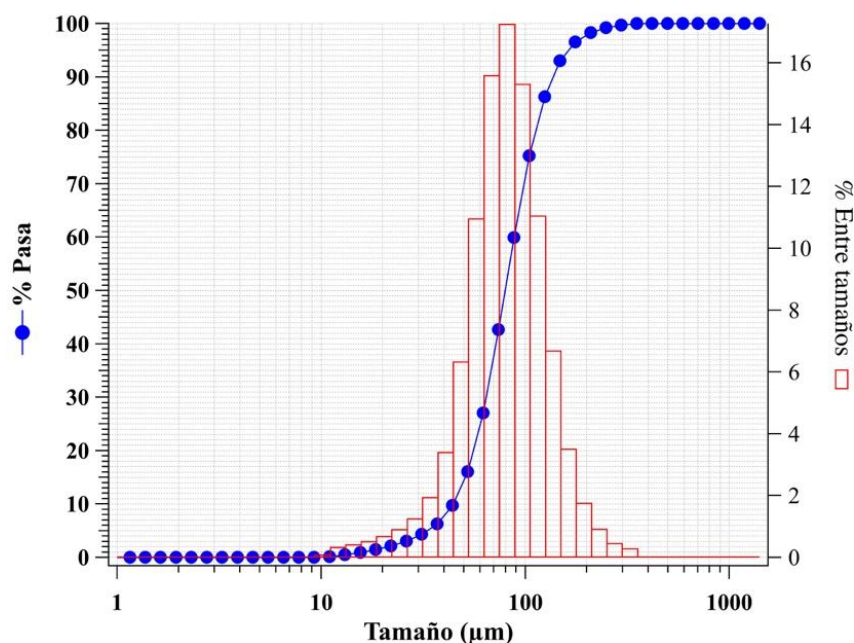
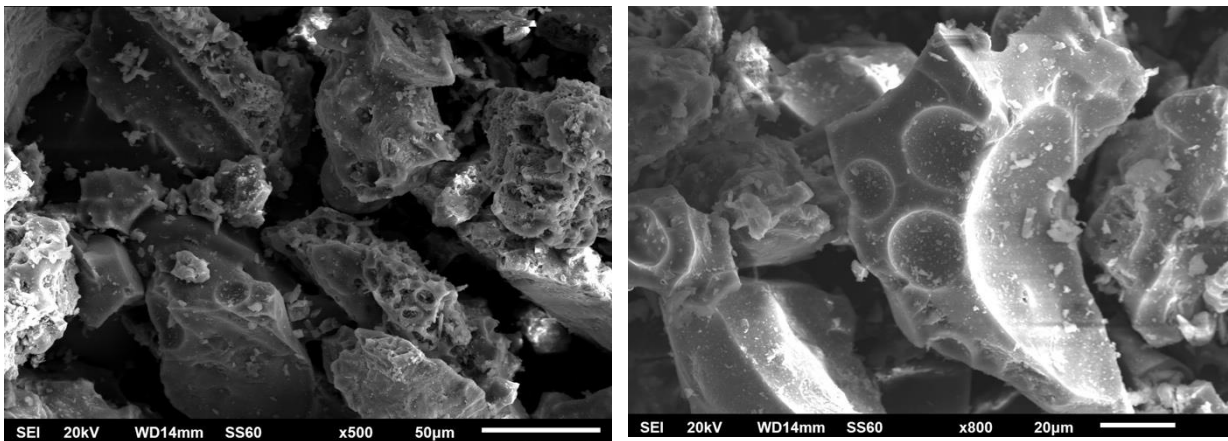


Figura 2 Microfotografías MEB y curvas de distribución de tamaño de partículas de la CBCA.

2.2 Efectos en las características de compactación

En la Figura 3 se observa el efecto en la masa volumétrica seca máxima (MVSM) debido a la adición del CPC y CBCA en 3%, 5% y 7% al suelo en estudio, así también se reporta el efecto por la adición de la combinación CPC-CBCA en esos mismos porcentajes (3%, 5%, 7%) pero en combinaciones de 75% CPC – 25% CBCA y 50% CPC-50% CBCA. Se aprecia que con adiciones de cemento la MVSM no presenta variación significativa, teniendo un valor de -0.84% con una adición de 3% de CPC, de 0.07% con 5% de CPC y sin variación alguna con 7% de adición de CPC, presentando la misma MVSM del suelo sin adición con valor de 1311 kg/m^3 , estos resultados coinciden con lo indicado en la literatura (imcyc, 2017), en donde se menciona que en suelos estabilizados con cemento portland, salvo casos excepcionales, la MVSM y la humedad óptima de compactación no presentan amplia variación con respecto al suelo sin adición de cemento, siendo esto una característica valiosa en la estabilización de suelos, dado que el efecto del cemento será únicamente el mejorar la durabilidad y la resistencia del suelo. Para el caso del suelo con adición de la combinación 75% CPC-25% CBCA presenta los mayores incrementos en la MVSM, cuando el suelo se le agrego un 3% de dicha combinación CPC-CBCA teniendo el mayor incremento de todas las mezclas de suelo de estudio con un 2.8% llegando a una MVSM de 1348 kg/m^3 ; Para el suelo con un 5% de combinación 75% CPC-25% CBCA presentó un incremento en su MVSM de 1.22% y para el suelo con un 7% de 75% CPC-25% CBCA una MVSM de 1345 kg/m^3 lo que representa un incremento de 2.6 %. El incremento en las MVSM puede asociar a tres mecanismos: 1) Una mayor compactación debido a la buena distribución de las partículas y tamaño de la CBCA, 2) Debido a tensión por la succión del agua en los poros, lo que produce un fenómeno de adherencia entre partículas por presión negativa o fuerzas capilares, llamada cohesión aparente (Suarez, 2009) , y 3) A una probable reacción puzolánica de Ca(OH)_2 producto de la hidratación del CPC con los componentes amorfos de la CBCA a edades tempranas debido al cambio en la cinética de reacción generada por la presencia de ceniza (Cordeiro & Kurtis, 2017). Para los suelos con adición de la combinación 50% CPC – 50% CBCA, se presentó que con el 3% de dicha combinación su MVSM tuvo un incremento de 2.6% asociado a una buena compactación debido a las características de la CBCA, cuando el suelo se le adicionó un 5% de la combinación 50% CPC- 50% CBCA su MVSM disminuyó en un 1.6%, y para el suelo con un 7% de dicha combinación se presentó la menor MVSM de todos los suelos en estudio, disminuyendo un 3.66%, esta disminución de MVSM se puede asociar al requerimiento de menor energía de compactación para alcanzar su MVSM, ya que como se ha demostrado en diversos estudios para el caso de las arenas sin contenido de arcillas la permeabilidad es lo suficientemente alta para no desarrollarse presiones de poro en el interior durante el proceso de compactación, y en donde a contenidos de agua bajos se desarrollan fuerzas capilares que dificultan el acomodo de las partículas de suelo obteniéndose una ineficiencia no permanente en la compactación, y que con un incremento en el contenido de agua tales fuerzas desaparecen eficientando el proceso (Rico-Rodriguez & Del Castillo, 2006). De lo anterior se observa ineficiencia en compactación en los contenidos de 50% de CBCA ocasionado por las fuerzas capilares, pero al incrementar el contenido de CBCA a 100% la cantidad de agua requerida por la absorción de la ceniza produce la desaparición de las fuerzas que permiten eficientar la compactación, lo que impactaría en menores costos de construcción de las carreteras como se ha demostrado en recientes investigaciones (Muntohar & Hantoro, 2016). Los suelos con 100% de CBCA también presentaron incrementos en sus MVSM, teniendo valores de 1.3% el suelo con una adición de 3% de CBCA, 0.4% para el suelo con un adición del 5% de CBCA, por último el suelo con una adición de 7% de CBCA presentó una pequeña disminución de 0.6% en su MVSM, este buen desempeño en las MVSM de los suelos con adición solamente de CBCA se asocia a una eficiente compactación y llenado de vacíos debido a la distribución uniforme de partículas de la CBCA, efecto de relleno, el cual se confirma con los resultados de CBR y su análisis correspondiente.

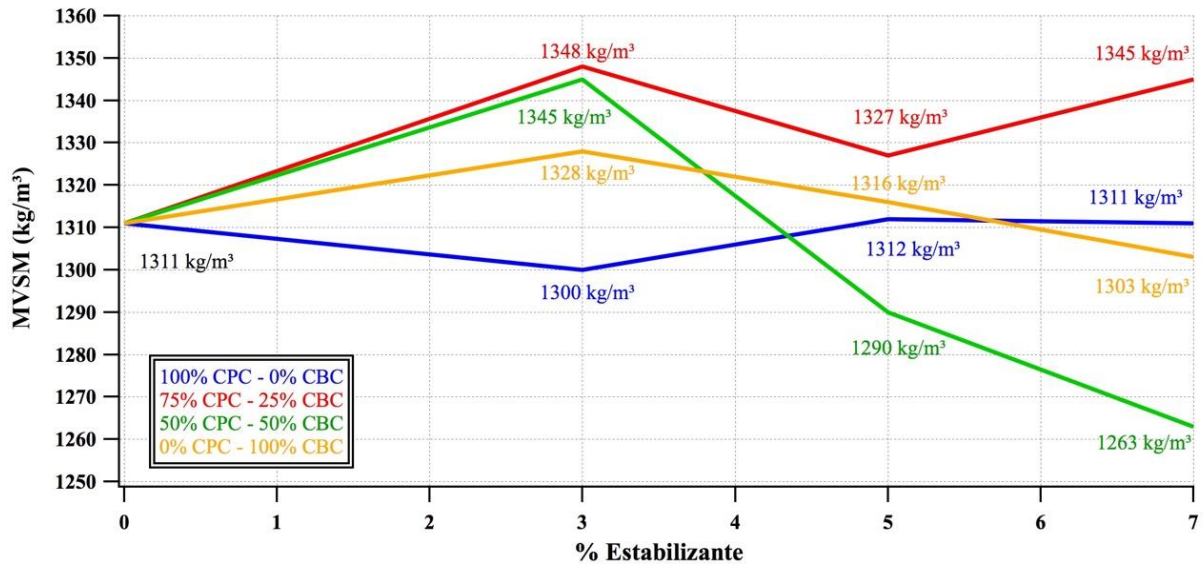


Figura 3 Efectos de la sustitución parcial de CPC por CBCA sobre la densidad seca máxima del suelo en estudio.

Con respecto a las humedades de compactación la Figura 4 muestra la influencia de la adición de CPC y su sustitución por CBCA. En términos generales las humedades en las mezclas que contenían CBCA incrementaron como consecuencia de una mayor absorción de agua por sus partículas, observándose el mayor incremento en la mezcla con 50% de sustitución de CPC de hasta un 2%, lo cual puede asociarse a la reducción de la masa volumétrica seca máxima al contar con la cantidad de agua suficiente para generar las fuerzas capilares entre partículas que impiden su compactación como se observa en la Figura 3. En las mezclas con sustituciones de 25% y 100% el incremento de humedad se encontró dentro del rango de agua que permitió un adecuado proceso de compactación, la variabilidad en los resultados de la humedad óptima es similares a los reportados por otras investigaciones (Onyelowe, 2012)

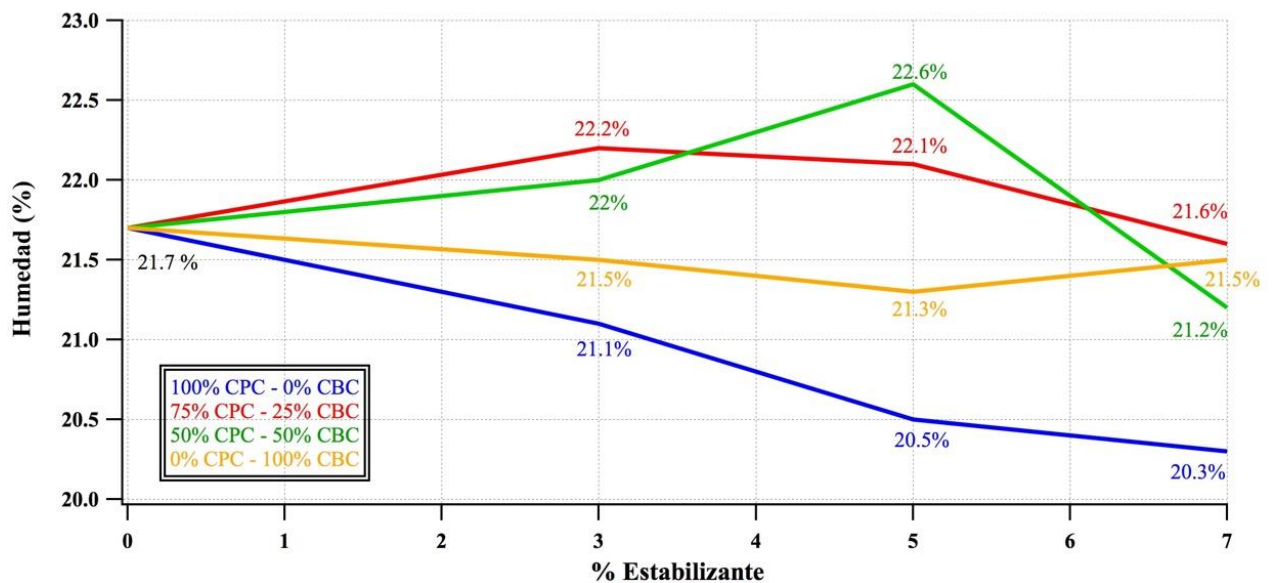


Figura 4 Efectos de la sustitución parcial de CPC por CBCA sobre la humedad óptima de compactación del suelo en estudio

2.3 Efectos en la resistencia a la compresión simple

La Figura 5, presenta el comportamiento de la resistencia a compresión simple del suelo en estudio con adición en tres diferentes porcentajes de CPC, CBCA, combinación 75%CPC-25%CBCA, 50%CPC-50%CBCA, siendo estos porcentajes del 3%, 5% y 7% con respecto al peso del suelo. Se observa que el suelo con adición de CPC presenta un incremento en la resistencia a la compresión simple conforme se incrementa el porcentaje de CPC adicionado, presentando resistencias de 9.89 kg/cm², 12.78 kg/cm² y 30.85 kg/cm², para adiciones de 3%, 5% y 7% respectivamente, siendo el suelo con la adición de 7% de CPC el de mayor resistencia a la compresión, sin embargo el suelo con la adición de la combinación 75%CPC-25%CBCA fue el que presentó un mejor desempeño cuando se adicionó en un 3% y 5%, presentando resistencias a compresión de 10.29 kg/cm² y de 14.25 kg/cm² respectivamente, las cuales fueron mayores a las del suelo con CPC; Para el suelo con adición de 7% de la combinación 75%CPC-25%CBCA presentó una resistencia de 29.19 kg/cm², 1.66 kg/cm² menor a la del suelo con CPC. Para el caso del suelo con adición de la combinación de 50%CPC-50%CBCA presenta con un 3% de dicha mezcla una resistencia de 5.44 kg/cm², para la adición del 5% una resistencia de 13.26 kg/cm² y de 19.69 kg/cm² para una adición de 7%, estos suelos presentan un comportamiento de incremento lineal en resistencia a la compresión conforme se incrementa la adición de 3%, 5% y 7%, como se puede observar en la figura 5, por último los suelos con adición de 100% CBCA, presentaron resistencias a la compresión simple menores de todos los suelos en estudio, con 2.26 kg/cm² cuando se adicionó en un 3% de CBCA, y de 1.5 kg/cm² para un 5% de CBCA, presentando una muy baja resistencia en la adición de 7% de CBCA, observándose una disminución lineal conforme el aumento del contenido de CBCA, lo que indica que al aumentar el contenido de CBCA sin alguna cantidad de cemento la resistencia a la compresión simple decrece. Para los suelos estabilizados mediante cemento portland la resistencia a la compresión es función tanto de la adición de un porcentaje de cemento como de la energía específica que se entrega al suelo por unidad de volumen, observando que si no hay presencia de cemento la resistencia es de un par de unidades por centímetro cuadrado, y que a contenidos mayores de cemento se logran resistencias mayores por la red de productos de hidratación que forma una estructura, pero que la cantidad de cemento puede ser de toneladas debido que esta estructuración es del orden de kilómetros. De lo anterior de acuerdo a los resultados de resistencia que ofrece la combinación de 75%CPC-25%CBCA, se puede reducir hasta un 25% de consumo de cemento obteniendo resistencias similares, eficientando el proceso de compactación como se discutió en el apartado 3.2 al incorporar CBCA, además de aprovechar un residuo agroindustrial cuyo almacenamiento genera un problema de contaminación.

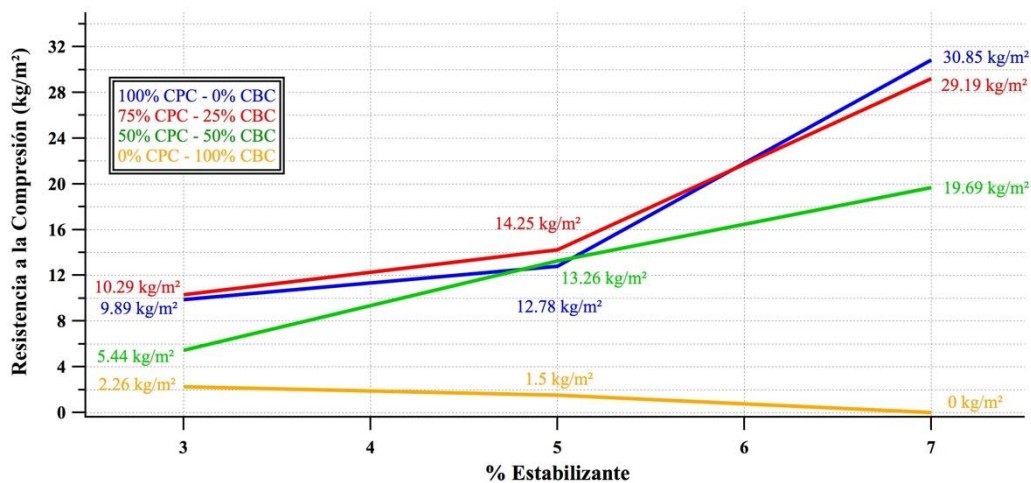


Figura 5 Efectos de la sustitución parcial de CPC por CBCA sobre la resistencia a la compresión simple del suelo en estudio.

2.4 Efectos en el CBR del suelo

La Figura 6 muestra el comportamiento del CBR en las distintas mezclas de suelos ensayados, se observa que las diferentes mezclas presentan un desempeño similar al presentado en el ensayo de resistencia a compresión simple, se tiene que el suelo con adición de CPC al 100% presentó incrementos significativos en los valores de CBR, incrementos de más de tres veces con respecto al suelo sin adición con un valor de CBR de 24.5% como referencia; El suelo con adición de 3% CPC presentó un CBR de 92.50%, para el suelo con 5% de CPC el CBR reportado fue de 110% y al adicionar un 7% de CPC el suelo de estudio alcanzó un CBR de 208%. Por otro lado los suelos con adición en 3%, 5%, y 7% de la combinación de 75% CPC-25% CBCA presentan también un excelente desempeño en el ensayo de CBR, presentando el suelo con 3% de dicha combinación un CBR de 95%, el suelo con la adición de 5% de la combinación 75% CPC-25% CBCA presento un CBR de 107%, estos valores de CBR son muy similares a los reportados por los suelos con adición de 3 y 5% de CPC, el suelo con un 7% de la combinación 75% CPC-25% CBCA tuvo un valor de CBR de 137% quedando por debajo del suelo con CPC en 71% pero por arriba del suelo sin adiciones en un 112.5%. Estos incrementos significativos en el CBR se asocian a la reacción de hidratación agua-cemento y la energía de compactación otorgada al suelo. Para el caso de los suelos con adiciones de la combinación 75% CPC-25% CBCA, el aumento de los valores de CBR se asocia al proceso de hidratación agua-cemento, más la cinética de reacción entre el $\text{Ca}(\text{OH})_2$ y la sílica amorfa presente en la CBCA que adopta cambios desde las primeras horas de mezclado como se ha reportado en investigaciones (Cordeiro & Kurtis, 2017), además de un efecto de relleno de las partículas de CBCA que no reaccionaron, comparando estas conjeturas con resultados de diversas investigaciones como la de Basha et. al, que evaluaron la estabilización de un suelo residual con cemento portland y ceniza de cascara de arroz (CCA), encontrando que el máximo aumento en el CBR fue con la adición de 4% de cemento portland (CP) y 5% CCA, y demostrando con los estudios de DRX y MEB un cambio en la estructura del suelo debido a la reacción puzolánica (Basha, Hashim, Mahmud, & Muntohar, 2005) en otro estudio se evaluó la estabilización de un suelo tipo CH (arcilla de alta plasticidad) con adición de CP y CCA, donde demostraron que la adición óptima de CCA fue de 10% con un 6% de CP para obtener los mayores incrementos en los valores de resistencia a compresión simple y CBR.

Para el suelo con combinación de 50% CPC-50% CBCA en un 3% presentó un CBR de 142% asociado este excelente desempeño al desarrollo de reacción de hidratación agua-cemento, una inicial y en menor grado reacción puzolánica y un muy importante aporte como relleno de poros de la CBCA, estos efectos van disminuyendo conforme se va incrementando los porcentajes de adición de la combinación 50% CPC-50% CBCA, lo que generó que el suelo con 5% presentara un CBR de 83%, y el suelo con 7% un CBR de 70%, lo anterior se asocia directamente a la discusión realizada en el apartado 3.2 referente al proceso de compactación que se presenta en la mezcla mencionada

Todos los valores de CBR de los suelos con adición de CPC, CPC-CBCA, en sus dos combinaciones cumplen perfectamente para que el material pueda ser utilizado como material de sub-base en la construcción de carreteras de acuerdo a lo estipulado en el manual de calidad de la secretaría de comunicaciones y transportes en México (SCT) mismo que indica un valor mínimo de CBR de 40%, y para los suelos que presentaron un CBR mayor a 100%, estos cumplen con el valor de CBR solicitado para ser utilizado como material de base, esto significa que los suelos con adición CPC-CBCA podrían ser utilizados en las capas de base y sub-base lo que significaría un ahorro sustancial y aporte ecológica en la construcción y reconstrucción de carreteras (Rico Rodriguez, Orozco y Orozco, Telles Gutierrez, & Perez Garcia, 1990).

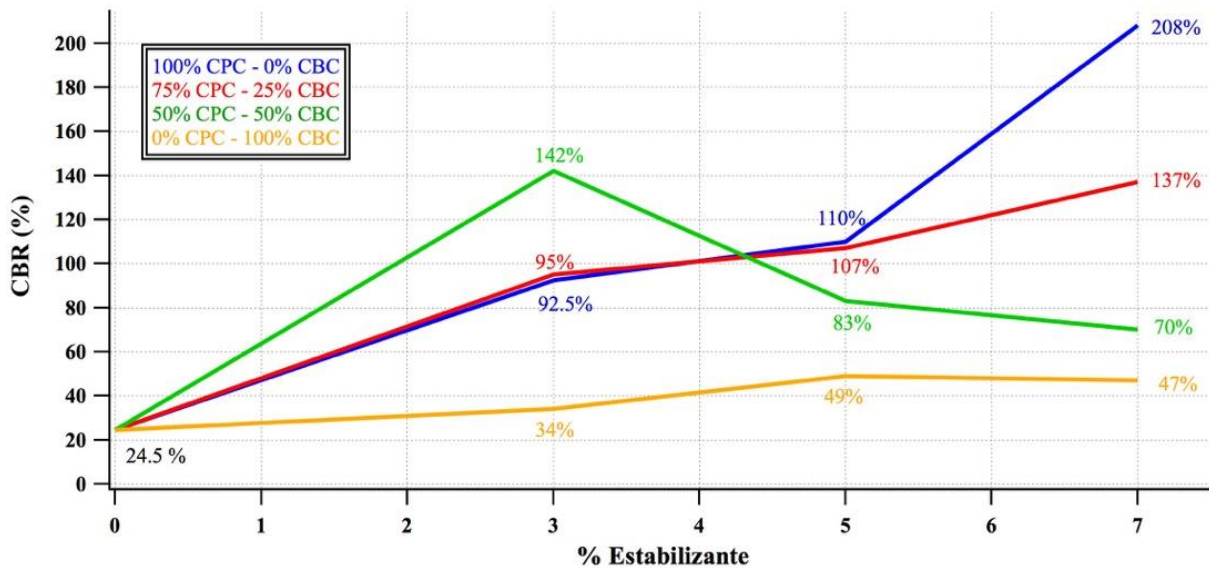


Figura 6. Efectos de la sustitución parcial de CPC por CBCA sobre el CBR del suelo en estudio.

Para los suelos con adiciones de CBCA en 3%, 5% y 7% se observa que los valores de CBR incrementaron en todos los casos con respecto a la referencia. De un CBR de 24% sin adiciones a un 34% con 3% de CBCA, 49% con 5% de CBCA y 47% con un 7% de CBCA. Este resultado complementa la discusión del apartado 3.2, que señala a la compactación como parte fundamental de un incremento mecánico en los suelos, y que aunque para este proyecto se tiene un suelo determinado y una sola forma de compactación los resultados varían de un caso a otro por las condiciones en que se conformó la mezcla, y que la CBCA adicionada al suelo o en sustitución de 25% por CPC en el caso específico de la prueba CBR, es una alternativa técnica, ambiental y económica para el conformado de terracerías.

3. CONCLUSIONES

La sustitución parcial de CPC por CBCA en los porcentajes establecidos y de acuerdo a los resultados obtenidos en las pruebas experimentales empleadas en este estudio, permiten concluir lo siguiente:

- El 25% de sustitución parcial de CPC por CBCA puede ser establecido como porcentaje óptimo en un suelo granular arenoso, ya que presentó un excelente desempeño en los ensayos de compactación, resistencia a la compresión simple y CBR, comportándose muy similar al suelo con adición de cemento portland al 100%, lo que implicaría que es viable el uso de la CBCA como sustituto parcial del cemento para el mejoramiento de las propiedades mecánicas de un suelo para la construcción de capas estructurales en carreteras.
- Las mezclas con sustitución parcial de cincuenta por ciento de CPC por CBCA, también ofrecen un mejoramiento en las propiedades del suelo, destacando principalmente en el ensayo de resistencia a la compresión simple y el ensayo de CBR, en donde los resultados muestran un mejoramiento significativo con respecto al suelo sin adición, logrando valores de CBR que cumplen con la normativa vigente incluso para material de base.
- El uso de CBCA como material único a ser empleado en el mejoramiento de suelos granulares muestra incrementos en la resistencia del suelo en condiciones de confinamiento, como lo es el ensayo de CBR, logrando para el caso de adición de 5 y 7 % valores de CBR que cumplen con la normativa vigente como material de base.

4. AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan su agradecimiento al consejo nacional de ciencia y tecnología (CONACYT) por el proyecto de ciencia básica No. 155363. Así mismo se agradece a la empresa ASPHALTPAVE S.A de C.V por su apoyo durante el proyecto.

5. REFERENCIAS

- Alavez Ramirez, R., Montes Garcia, P., Martinez Reyes, J., Altamirano Juarez, D., Gochi Ponce, Y. (2012). *The use of sugar cane bagasse ash and lime to improve the durability and mechanical properties of compacted soil blocks*. Construction and Building Materials , 296-305. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.02.072>
- Arenas Piedrahita, J. C., Montes Garcia, P., Mendoza Rangel, J. M., Lopez Calvo, H. Z., Mart, & Martinez Reyes, J. (2016). *Mechanical and durability properties of mortars prepared with untreated sugarcane bagasse ash and untreated fly ash* . Construction and building materials , 69-81. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.12.047>
- ASTM International. (2017). *ASTM C618-17a Standard specification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use in concrete*. Retrieved from <https://doi.org/10.1520/C0618-17A>
- ASTM International. (2017). *ASTM C150/C150M-17 Standard specification for portland cement*. Retrieved from https://doi.org/10.1520/C0150_C0150M-17
- ASTM International. (2010). *ASTM D2216-10 Standard test methods for laboratory determination of water (moisture) content of soil and rock by mass*. Retrieved from <https://doi.org/10.1520/D2216-10>
- ASTM International. (1998). *ASTM D2217-85 Standard practice for wet preparation of soil samples for particle-size analysis and determination of soil constants*. (Withdrawn 2007) Retrieved from <https://doi.org/10.1520/D2217-85R98>
- ASTM International. (2011). *ASTM D2487-11 Standard practice for classification of soils for engineering purposes (Unified soil classification system)*. Retrieved from <https://doi.org/10.1520/D2487-11>
- ASTM International. (1998). *ASTM D421-85 Standard practice for dry preparation of soil samples for particle-size analysis and determination of soil constants*. (Withdrawn 2016) Retrieved from <https://doi.org/10.1520/D2217-85R98>
- ASTM International. (2017). *ASTM D4318-17 Standard test methods for liquid limit, plastic limit, and plasticity index of soils*. Retrieved from <https://doi.org/10.1520/D4318-17>
- ASTM International. (2012). *ASTM D698-12 Standard test methods for laboratory compaction characteristics of soil using standard effort*. Retrieved from <https://doi.org/10.1520/D0698-12>
- ASTM International. (2017). *ASTM D1633-17 Standard test methods for compressive strength of molded soil-cement cylinders*. Retrieved from <https://doi.org/10.1520/D1633-17>
- ASTM International. (2016). *ASTM D1883-16 Standard test method for california bearing ratio (cbr) of laboratory-compacted soils*. Retrieved from <https://doi.org/10.1520/D1883-16>
- ASTM International. (2011). *ASTM D558-11 Standard test methods for moisture-density (unit weight) relations of soil-cement mixtures*. Retrieved from <https://doi.org/10.1520/D0558-11>
- Basha, E. A., Hashim, R., Mahmud, H. B., Muntohar, A. S. (2005). *Stabilization of residual soil with rice husk ash and cement*. Construction and building materials , 19 (6) pp: 448-453. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2004.08.001>
- Behak, L., Perez Nuñez, W. (2008). *Caracterización de un material compuesto por suelo arenoso, ceniza de cascara de arroz y cal potencialmente útil para su uso en pavimentación*. Revista Ingeniería de Construcción, 23 (1), pp: 34-41. <http://www.ricuc.cl/index.php/ric/article/view/BEHAK>

- CONADESUCA. (2017). *4to. Informe estadístico del sector agroindustrial de la caña de azúcar en México*. Ciudad de México: SAGARPA.
- Cordeiro, G. C., Kurtis, K. E. (2017). *Effect of mechanical processing on sugar cane bagasse ash pozzolanicity*. *Cement and Concrete Research*, Volume 97, pp: 41-49. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.03.008>
- Cordeiro, G. C., Toledo Filho, R. D., Tavares, L. M., Fairbairn, E. M. (2008). *Pozzolan activity and filler effect of sugar cane bagasse ash in portland cement and lime mortars*. *Cement and Concrete Composites*, Volume 30, Issue 5, pp: 410-418. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2008.01.001>
- Cordeiro, G. C., Toledo Filho, R. D., Tavares, L. M., Rego Fairbairn, E. de M. (2009). *Ultrafine grinding of sugar cane bagasse ash for application as pozzolan admixture in concrete*. *Cement and Concrete Research*, 39 (2), pp: 110-115. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2008.11.005>
- Cordeiro, G. C., Toledo, R. D., Fairbairn, E. M. (2009). *Effect of calcination temperature on the pozzolan activity of sugar cane bagasse ash*. *Construction and Building Materials*, Volume 23, Issue 10, pp: 3301-3303. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.02.013>
- Cristelo, N., Glendinning, S., Miranda, T., Oliveira, D. (2012). *Soil stabilization using alkaline activation of fly ash self compacting rammed earth construction*. *Construction and building materials*, Volume 36, pp: 727-735. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.06.037>
- de Soares, M. M., Garcia, D. C., Figueiredo, R. B., P. Aguilar, M. T., & Cetlin, P. R. (2016). *Comparing the pozzolan behavior of sugar cane bagasse ash to amorphous and crystalline SiO₂*. *Cement and Concrete Composites*, Volume 71, pp: 20-25. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2016.04.005>
- Fernandez Loaiza, C. F. (1982). *Mejoramiento y estabilización de suelos*. D.F: LIMUSA.
- Frias, M., Villar, E., & Savastano, H. (2011). *Brazilian sugar cane bagasse ashes from the cogeneration industry as active pozzolans for cement manufacture*. *Cement and Concrete Composites*, Volume 33, Issue 4, pp: 490-499. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2011.02.003>
- Ganesan, K., Rajagopal, K., & Thangavel, K. (2007). *Evaluation of bagasse ash as supplementary cementitious material*. *Cement and Concrete Composites*, Volume 29, Issue 6, pp: 515-524. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2007.03.001>
- Imcyc (2017). *Estabilización de suelos con cemento portland*. Biblioteca digital . (IMCYC, Ed.) Ciudad de México, D.F, México.
- Jagadesh, P., Ramachandramurthy, A., Murugesan, R., Sarayu, K. (2015). *Micro-Analytical studies on sugar cane bagasse ash*. *Sadhana*, Volume 40, Issue 5, pp: 1629–1638. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12046-015-0390-6>
- Jimenez Quero, V. G., Leon Martinez, F. M., Montes Garcia, P., Gaona Tiburcio, C., Chacon Nava, J. G. (2013). *Influence of sugar-cane bagasse ash and fly ash on the rheological behavior of cement pastes and mortars*. *Construction and Building Materials*. Volume 40, pp: 691-701, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.11.023>
- Jofre, C., Kraemer, C., Sampedro, A., Lopez Bachiller, A., Atienza, M., Diaz, M., et. al. (2008). *Manual de estabilización de suelos con cemento o cal*. Madrid: Instituto Español del cemento y sus aplicaciones.
- Joshaghani, A., & Moeini, M. A. (2017). *Evaluating the effects of sugar cane bagasse ash (SCBA) and nanosilica on the mechanical and durability properties of mortar*. *Construction and building materials*, Volume 152, pp: 818-831. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.07.041>
- Juarez Gutierrez, O., & Inzunza Ortiz, M. A. (2011). *Guía practica de estabilización y recuperación de pavimentos con cemento portland en México*. Ciudad de México: AMIVTAC.
- Moraes, J. C., Akasaki, J. L., Melges, J. L., Monzo, J., Borrachero, M. V., Soriano, L., Payá, J., Tashima, M. M. (2015). *Assessment of sugar cane straw ash (SCSA) as pozzolan material in*

- blended portland cement: microstructural characterization of pastes and mechanical strength of mortars*. Construction and Building Materials, Volume 94, pp: 670-677. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.07.108>
- Morales, E. V., Villar Cociña, E., Frias, M., Santos, S. F., & Savastano, H. J. (2009). *Effects of calcining conditions on the microstructure of sugar cane waste ashes (SCWA): Influence in the pozzolanic activation*. Cement & Concrete Composites, Volume 31, Issue 1, pp: 22-28. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2008.10.004>
- Muntohar, A. S., & Hantoro, G. (2016). *Influence of the rice husk ash and lime on engineering properties of clayey sub-grade*. EJGE , 1-13.
- NMX C414. (2004). *Cementos hidráulicos especificaciones y métodos de prueba*. Ciudad de México : ONNCCE.
- Onyelowe, K. C. (2012). *Cement stabilized Akwete Lateritic soil and the use of bagasse ash as admixture*. Science and engineering investigations , 1, 16-20.
- Rico Rodriguez, A., Orozco y Orozco, J., Telles Gutierrez, J. M., Perez Garcia, A. (1990). *Manual de calidad de los materiales en secciones estructurales de pavimentos carreteros*. Sanfandilla.
- Rico-Rodriguez, A., Del Castillo, H. (2006). *La ingeniería de suelos en las vías terrestres carreteras, ferrocarriles y aeropistas (Vol. 1)*. (N. editores, Ed.) Ciudad de México: Limusa.
- Correia, A. A. S., Rasteiro, M. G. (2016). *Nanotechnology applied to chemical soil stabilization*. ProcediaEngineering, Volume 143, pp: 1252-1259. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.06.113>
- Sargent, P., Hughes, P. N., Rouainia, M., Glendinning, S. (2012). *Soil stabilization using sustainable industrial by-product binders and alkali activation*. GeoCongress, 948-957. DOI: <https://doi.org/10.1061/9780784412121.098>
- Sing, N. B., Singh, V. D., Rai, S. (2000). *Hydration of bagasse ash-blended portland cement*. Cement and Concrete Research, Volume 30, Issue 9, pp: 1485-1488. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(00\)00324-0](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(00)00324-0)
- Suarez, J. (2009). *Deslizamientos. Análisis geotécnicos (Vol. 1)*. Colombia: U. Industrial de Santander.
- Torres Rivas, B. J., Gaitan Arevalo, J. R., Espinoza Perez, L. J., Escalante Garcia, J. I. (2014). *Valoración de ceniza de bagazo de caña de la industria azucarera Nicaragüense como sustituto parcial al cemento portland* . Nexo Revista Científica, Vol. 27, Núm. 2, pp: 82-89. DOI: <http://dx.doi.org/10.5377/nexo.v27i2.1944>