

*Estabilización De Suelos Finos Usando Ceniza De Cáscara De Coco Y De Bagazo De Caña De Azúcar*

*Stabilization Of Fine Soils Using Coconut Husk Ash And Sugarcane Bagasse Ash*

---

**Autores**

---

**Xavier Eduardo Loor Rosado**

Estudiante de Ingeniería Civil, Universidad Técnica de Manabí, Ecuador.

[xloor2330@utm.edu.ec](mailto:xloor2330@utm.edu.ec)

<https://orcid.org/0009-0008-8637-0024>

---

**Jair Alejandro Quiroz Alvarado**

Estudiante de Ingeniería Civil, Universidad Técnica de Manabí, Ecuador.

[jquiroz9426@utm.edu.ec](mailto:jquiroz9426@utm.edu.ec)

<https://orcid.org/0009-0003-2253-6631>

---

**Eduardo Ortiz-Hernández**

Dpto. Construcciones Civiles, Universidad Técnica de Manabí, Ecuador.

[eduardo.ortiz@utm.edu.ec](mailto:eduardo.ortiz@utm.edu.ec)

<https://orcid.org/0000-0002-1885-6005>

---

# Estabilización De Suelos Finos Usando Ceniza De Cáscara De Coco Y De Bagazo De Caña De Azúcar

6

## RESUMEN

En proyectos de ingeniería civil, se recurre frecuentemente a intervenciones para optimizar las características del suelo y adaptarlo a requerimientos constructivos. Los métodos tradicionales usando cemento y cal, aunque efectivos, tienen un alto impacto ambiental debido a las emisiones de dióxido de carbono. Este estudio evalúa el uso de ceniza de cáscara de coco y ceniza de bagazo de caña de azúcar como estabilizadores alternativos para suelos finos, teniendo como objetivo reducir el impacto ambiental mientras se mejoran las propiedades como la capacidad portante y la plasticidad. Los ensayos de laboratorio se llevaron a cabo con muestras de suelo estabilizadas con 5% de ceniza de cáscara de coco + 5% de ceniza de bagazo de caña de azúcar y 10% de ceniza de cáscara de coco + 10% de ceniza de bagazo de caña de azúcar, comparadas con el suelo natural. Los resultados indicaron que estos materiales redujeron el contenido de finos y la plasticidad mientras mejoraron la resistencia mecánica, particularmente con la mezcla de 10% de cada ceniza. Se concluyó que la ceniza de cáscara de coco y la ceniza de bagazo de caña de azúcar mejoraron significativamente el comportamiento del suelo, haciéndolos una alternativa viable para estabilizar suelos finos.

**Palabras clave:** capacidad portante, ceniza de bagazo de caña, ceniza de cáscara de coco, estabilización de suelos.

## ABSTRACT

In civil engineering projects, interventions are frequently used to optimize soil characteristics and adapt it to construction requirements. Traditional methods using cement and lime, although effective, have a high environmental impact due to carbon dioxide emissions. This study evaluates the use of coconut husk ash and sugarcane bagasse ash as alternative stabilizers for fine soils, aiming to reduce the environmental impact while improving properties such as bearing capacity and plasticity. Laboratory tests were conducted with soil samples stabilized with 5% coconut husk ash + 5% sugarcane bagasse ash, compared to natural soil. The results indicated that these materials reduced fines content and plasticity while improving mechanical strength, particularly with the 10% mixture of each ash. It was concluded that coconut husk ash and sugarcane bagasse ash significantly improved soil performance, making them a viable alternative for stabilizing fine soils.

**Keywords:** bearing capacity, bagasse ash, coconut husk ash, soil stabilization

## 1. INTRODUCCIÓN

La estabilización de suelos se emplea para mejorar las propiedades geotécnicas de los suelos naturales. Al aumentar atributos como la resistencia mecánica, la capacidad portante, la permeabilidad y la durabilidad, los suelos estabilizados resultan adecuados para una amplia gama de aplicaciones de ingeniería. Estas aplicaciones abarcan su uso como capas de subrasante y subbase en la construcción de carreteras y ferrocarriles, así como en cimentaciones, presas y terraplenes [1].

Las técnicas tradicionales de estabilización de suelos, como la aplicación de cemento y cal, son muy eficaces; sin embargo, plantean considerables problemas medioambientales debido a los procesos de producción que implican [2]. La estabilización de suelos con cal fue demostrada en una investigación realizada en Ecuador, en la ciudad de Portoviejo [3], donde se añadieron diferentes porcentajes de cal [4], comprobándose que un contenido no mayor al 6% permite controlar adecuadamente la expansividad del suelo, lo que garantiza una buena estabilización [5].

El cemento, ampliamente utilizado en la construcción, es uno de los principales responsables de las emisiones mundiales de CO<sub>2</sub>, ya que la industria cementera es responsable del 5% al 7% del total de las emisiones mundiales [6]. La producción de cemento está estrechamente relacionada con la producción de cal, ya que ésta es el precursor primario de la industria cementera. La cal, principal producto de la calcinación de la piedra caliza, es el óxido simple más demandado en todo el mundo [7].

En consecuencia, se ha intensificado la búsqueda de alternativas sostenibles desde el punto de vista medioambiental; diversas alternativas al cemento han sido estudiadas [8]. Si bien se reconoce el potencial de las cenizas evaluadas en esta investigación como estabilizantes, este estudio se centra en investigar sus efectos sobre las propiedades mecánicas del suelo, dejando la evaluación ambiental para investigaciones futuras.

Por otro lado, la investigación sobre diversos tipos de cenizas de biomasa ha arrojado diversos resultados respecto a su posible aplicación en la estabilización de suelos [9, 10, 11]. Las biomásas derivadas de residuos industriales pueden clasificarse en dos tipos: cenizas de fondo de biomasa y cenizas volantes de biomasa. Las cenizas volantes de biomasa, caracterizadas por su diversa composición, son un subproducto de la combustión de materiales vegetales [12].

En cambio, las cenizas de fondo presentan mayor resistencia y menor lixiviación de metales en comparación con las cenizas volantes, lo que las hace aptas para su uso en todas las capas de materiales de construcción de carreteras. Estas cenizas de residuos industriales son altamente reciclables, lo que ofrece ventajas tanto económicas como ambientales [13].

La ceniza de cáscara de coco (CCC) y la ceniza de bagazo de caña de azúcar (CBCA) son cenizas de biomasa derivadas de subproductos agroindustriales que tiene el potencial de favorecer el mejoramiento de suelos. La CBCA está compuesta predominantemente de sílice con cantidades menores de alúmina, óxido de hierro, óxido de calcio y otros óxidos menores que contribuyen a su actividad puzolánica [14]. La CCC está compuesto por varios elementos químicos, incluyendo SiO<sub>2</sub>, CaO, K<sub>2</sub>O, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, SO<sub>3</sub>, y P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, junto con otros elementos traza. Aunque su contenido de sílice es significativamente menor al de otras cenizas de subproductos agrícolas, la CCC puede contribuir a mejorar las propiedades del suelo [15].

Esta investigación tiene como objetivo evaluar la eficacia de las cenizas de cáscara de coco (CCC) y de bagazo de caña de azúcar (CBCA) como agentes estabilizadores de suelos finos, dadas las preocupaciones medioambientales asociadas a los métodos estabilizadores convencionales como el cemento y la cal. El estudio explora el potencial de estas cenizas de biomasa como alternativas sostenibles. Específicamente, examina el impacto de CCC y CBCA en las propiedades clave del suelo, incluyendo la capacidad portante y la expansividad.

Para alcanzar este objetivo, se realizaron ensayos de laboratorio en muestras de suelo fino tratadas con proporciones variables de CCC y CBCA (5% CCC + 5% CBCA y 10% CCC + 10% CBCA). Estas muestras tratadas se compararon con suelo fino no tratado utilizando límites de Atterberg y pruebas de *California Bearing Ratio* (CBR). El estudio busca determinar si la incorporación de CCC y CBCA mejora la resistencia del suelo y reduce la expansividad, ofreciendo así una alternativa viable para la estabilización del suelo en proyectos de construcción.

La elección de los porcentajes a adicionar (5% y 10% de cada uno de los aditivos) se fundamentó de antecedentes experimentales previamente reportados de artículos científicos. En particular, se consideró ensayos que evaluaron mezclas similares, y observaron mejoras significativas en estabilidad y resistencia de suelos arcillosos. Investigadores reportaron mejoras significativas en propiedades geotécnicas al utilizar estos niveles de dosificación, demostrando su eficacia y viabilidad [16]. A partir de esta base experimental, el presente estudio adopta dichos porcentajes con el fin de evaluar su impacto en la estabilización del suelo utilizando ceniza de cáscara de coco y de bagazo de caña de azúcar.

# 1. MATERIALES Y MÉTODOS

## 2.1. Toma Y Preparación De Muestras

Las muestras de suelo fueron recolectadas mediante la excavación de una calicata en La Pila, Parroquia Montecristi, Ecuador (Zona 17S, 546122 m E, 9878043 m S). Este sitio fue seleccionado en base al conocimiento previo de un suelo fino. La calicata midió 1,00 m x 1,00 m con una profundidad de 1,50 m.

Se extrajeron muestras de suelo en tres intervalos de profundidad (0 – 0,50, 0,50 – 1,00 y 1,00 – 1,50 m), de cada capa se tomaron muestras para realizar ensayos de humedad natural, límites de consistencia y granulometría, sin embargo, solo la capa de 0-0,50 m se utilizó para ensayos de estabilización de suelos, puesto que esta capa es la más afectada por la carga superficial y condiciones ambientales, por lo que es la más pertinente para las aplicaciones prácticas.

Las muestras se dividieron para diferentes ensayos y se prepararon para según los métodos establecidos en cada norma técnica.

## 2.2. Preparación De Estabilizantes

Las cáscaras de coco y el bagazo de caña de azúcar se obtuvieron de diferentes lugares. Las cáscaras de coco se recolectaron en un sitio de la carretera Tosagua-Chone, donde se habían acumulado estos residuos, mientras que el bagazo de caña se obtuvo en Junín, región conocida por la producción de panela y aguardiente, entre otros productos.

Ambos materiales pasaron por el mismo proceso de combustión para garantizar la homogeneidad. Las cáscaras y el bagazo se quemaron por separado en un tanque de cemento con ventilación controlada para permitir una combustión eficiente; no se utilizó combustible externo, porque los materiales estaban lo suficientemente secos como para mantener la autocombustión. Si bien el proceso de combustión de los residuos genera ciertas emisiones, no se utilizaron combustibles fósiles ni aditivos, y al tratarse de materiales de desecho agrícola, su aprovechamiento representa una forma de valorización que reduce su impacto como residuo.

El procedimiento continuó hasta que la mayor parte de la materia orgánica había sido incinerada y la combustión sólo se consideró finalizada cuando ya no había llamas visibles, sin embargo, quedaron algunos residuos parcialmente carbonizados, que se eliminaron tamizándolos con malla No. 4 (4,75 mm) una vez enfriadas las cenizas de manera natural, posteriormente se almacenaron en recipientes para evitar su contaminación.

Aunque en este estudio se empleó una metodología artesanal a pequeña escala, se reconoce que la implementación de este proceso a nivel industrial requerirá evaluar la sostenibilidad de la producción de cenizas, incluyendo su impacto ambiental, consumo energético y logística de recolección y procesamiento de residuos. Por ello, se recomienda que estudios futuros analicen la viabilidad técnica y ambiental del escalamiento del proceso.

No se registraron la temperatura ni el tiempo de combustión porque el proceso se llevó a cabo en una estructura artesanal abierta donde no fue posible realizar mediciones directas; sin embargo, durante la incineración se mantuvo un flujo de aire adecuado para garantizar una combustión uniforme y minimizar los residuos no quemados.

Esta decisión metodológica se adoptó considerando que el enfoque del estudio estuvo orientado a evaluar el efecto de las cenizas sobre el comportamiento del suelo bajo condiciones prácticas y reproducibles. Aunque parámetros como la temperatura o el tiempo de combustión no se controlaron, se priorizó la caracterización del impacto de las cenizas en propiedades clave del suelo. Se reconoce, sin embargo, que la calcinación controlada puede influir en la calidad del material, especialmente en relación con su potencial puzolánico, ya que temperaturas inadecuadas podrían limitar la formación de fases como la sílice amorfa.

No obstante, los resultados obtenidos en términos de mejoramiento mecánico sugieren que, aún con un proceso de quema no controlado, las cenizas generadas presentan un efecto estabilizante, esto permite plantear que podrían alcanzar cierto nivel de actividad puzolánica, aunque sin una caracterización química específica no puede afirmarse con certeza. Por ello, se propone que futuras investigaciones profundicen en el estudio de la mineralogía y reactividad de estas cenizas bajo diferentes condiciones de calcinación.

## 2.3. Análisis Granulométrico

El análisis granulométrico se realizó para determinar la distribución del tamaño de las partículas del suelo natural y evaluar los efectos de los agentes estabilizantes. El procedimiento siguió la norma ASTM D6913/D6913M-17 [16], empleando el tamizado en húmedo para asegurar la correcta separación de partículas finas. Debido al alto contenido de arcilla en el suelo, se utilizaron los tamices No. 10 (2,00 mm), No. 40 (0,425 mm), y No. 200 (0,075 mm).

Cada muestra se secó en horno a 110°C durante 24 horas antes de los ensayos, y se utilizó una masa seca de 200 g para cada análisis. Esto incluyó muestras de suelo natural de cada capa de la calicata, una mezcla que contenía 5% de CCC + 5% de CBCA y una mezcla de 10% de CCC + 10% de CBCA.

El tamizado en húmedo se ejecutó manualmente lavando meticulosamente las muestras con agua corriente, agitando las muestras hasta que no pasó más material por los tamices y asegurándose de que el agua que pasaba era completamente transparente. El material retenido en cada tamiz se secó a la temperatura y durante el tiempo antes mencionados y luego se pesó para determinar la masa retenida en cada tamaño de malla y el porcentaje que pasó a través del tamiz n.º 200.

#### 2.4. Ensayo De Consistencia: Límites De Atterberg

El límite líquido (LL) y el límite plástico (LP) de las muestras de suelo se determinaron siguiendo la norma ASTM D4318 [17] para evaluar la plasticidad y la variación con los estabilizantes. Las muestras fueron preparadas usando el método seco, donde las muestras fueron secadas en horno a una temperatura no superior a 60°C, luego se pulverizó usando un mortero y se tamizó usando una malla No. 40 (0,425 mm).

El LL se determinó usando el método multipunto con la copa Casagrande y el LP se obtuvo manualmente enrollando hilos de suelo hasta que alcanzaron un diámetro de 3,2 mm. Los ensayos se realizaron con muestras de suelo natural y con suelo mezclado con un contenido de cada estabilizante del 5% y 10%.

#### 2.5. Ensayo Proctor Modificado

El ensayo Proctor modificado se realizó siguiendo la norma ASTM D1557 [18] para determinar la densidad máxima seca y el contenido de humedad óptimo tanto del suelo natural como las mezclas estabilizadas. El ensayo se realizó sobre tres materiales: suelo natural (de la capa 0 – 0,50 m de profundidad), suelo mezclado con 5% de CCC + 5% de CBCA, y suelo mezclado con 10% de CCC + 10% de CBCA.

El proceso de compactación siguió el método A de ASTM D1557, usando un molde de 101,60 mm y un martillo operado manualmente de 4,536 kg. El suelo se tamizó a través de la malla No. 4 (4,75 mm) y se añadió agua de forma manual en incrementos de 5%, lo que excede el rango recomendado por ASTM D1557, sin embargo, se optó por este enfoque para reducir el número de puntos de prueba y capturar eficazmente la curva de compactación.

Tras mezclar el suelo con agua, las muestras se dejaron reposar durante aproximadamente 16 horas para garantizar una distribución uniforme de la humedad antes de la compactación. Cada espécimen se compactó en 5 capas, aplicando 25 golpes por capa. Los puntos de humedad variaron en función del material: se utilizaron cuatro puntos para el suelo natural y la mezcla 10% de CCC + 10% de CBCA, mientras que se utilizaron cinco puntos para la mezcla de 5% de CCC + 5% de CBCA. Esta diferencia se debió a que en cada caso se detuvo el ensayo al observar una disminución de la densidad seca, siguiendo el criterio de haber alcanzado el punto de máxima compactación.

#### 2.6. Ensayo CBR (California Bearing Ratio)

Los ensayos CBR fueron realizados para evaluar la capacidad portante del suelo natural y del suelo estabilizado con 5% de CCC + 5% de CBCA y 10% de CCC y 10% CBCA, siguiendo la norma ASTM D1883-21 [19]. Las probetas se compactaron usando el método de Proctor Modificado (ASTM D1557, Método C) a su contenido de humedad óptimo.

Para evaluar la influencia de la energía de compactación en la resistencia del suelo, se aplicaron tres niveles de compactación en 5 capas: baja (11 golpes por capa), intermedia (27 golpes por capa) y alta (61 golpes por capa). Este enfoque sigue la metodología descrita en ASTM D1833-21, en la que se utilizan diferentes esfuerzos de compactación para analizar las variaciones del CBR en un rango de densidades secas.

Las probetas compactas se sumergieron en agua por 96 horas bajo una sobrecarga estándar, con mediciones de expansividad diarias, tras el remojo, se sometieron a ensayos de penetración a una velocidad constante de 1,27 mm/min utilizando un pistón de diámetro de 49,60 mm ± 0,20 mm.

### 3. RESULTADOS

#### 3.1. Humedad Natural

La humedad natural varía con la profundidad, mostrando una tendencia creciente desde la superficie hacia capas más profundas. Los resultados se muestran en la Tabla 1.

**Tabla 1-** Contenido de humedad natural a diferentes profundidades

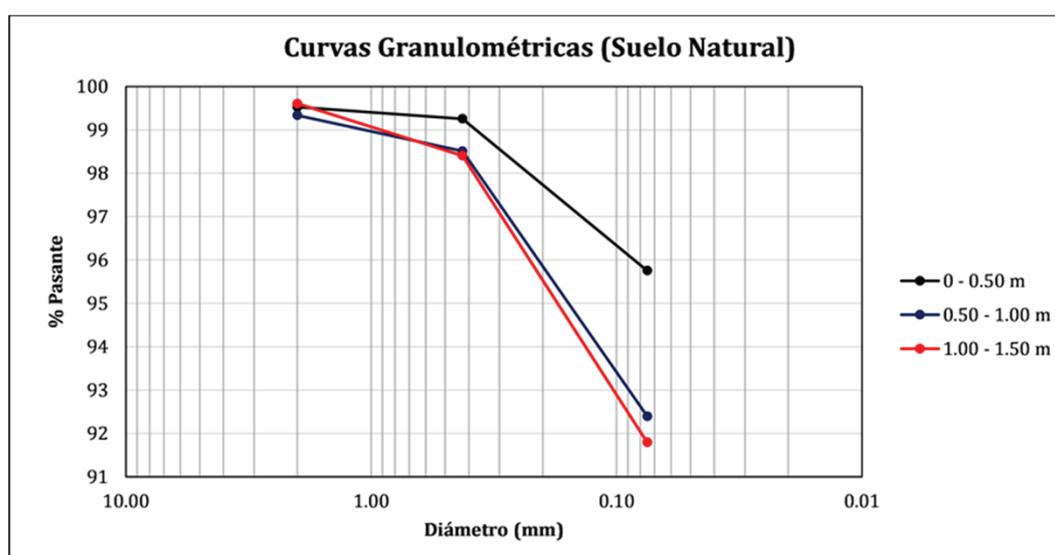
Profundidad (m)	Humedad (%)
0,00 – 0,50	20,41
0,50 – 1,00	25,57
1,00 – 1,50	28,95

### 3.2. Granulometría

Los resultados de la granulometría del suelo natural y el suelo estabilizado se muestran en la Tabla 2. Las curvas granulométricas del suelo natural se muestran en la Fig. 1, mientras que las curvas granulométricas del suelo estabilizado con 5% de CCC + 5% de CBCA y del suelo estabilizado con 10% de CCC + 10% de CBCA con la del suelo natural de la capa 0 – 0,50 m se muestran en la Fig. 2.

**Tabla 2-** Comparación granulométrica entre suelo natural y suelo tratado con aditivo

Muestra de suelo	% pasante No. 10 (2.00 mm)	% pasante No. 40 (0.425 mm)	% pasante No. 200 (0.075 mm)
Suelo natural (0 – 0,50 m)	99,53	99,26	95,76
Suelo natural (0,50 – 1,00 m)	99,34	98,51	92,40
Suelo natural (1,00 – 1,50 m)	99,61	98,41	91,80
Suelo Natural + 5% de ceniza de cáscara de coco + 5% de ceniza de bagazo de caña de azúcar	99,60	98,51	92,01
Suelo natural + 10% de ceniza de cáscara de coco + 10% de ceniza de bagazo de caña de azúcar	99,28	96,60	82,36



**Fig. 1-** Curvas granulométricas del suelo natural

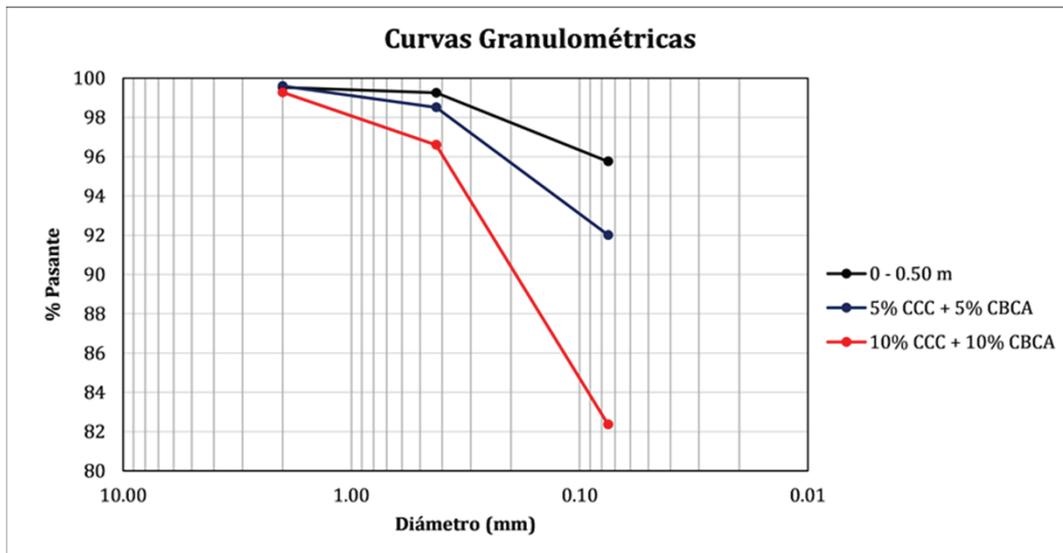


Fig. 2- Curvas granulométricas de suelo estabilizado y suelo natural de la capa 0 – 0,50 m

Estos resultados indican que el suelo natural presenta un alto contenido de de partículas finas en todos los estratos, confirmando que se trata de un suelo arcilloso/limoso. La estabilización con 5% de CCC + 5% de CBCA reduce el porcentaje de finos de 95,76% a 92,01%, por otro lado, la estabilización con 10% de CCC y 10% de CBCA reduce el porcentaje de finos de 95,76% a 82,36%, posiblemente por la formación de agregados.

### 3.3. Límites De Consistencia

Los límites de Atterberg indican que el suelo natural aumenta su plasticidad con la profundidad, al estabilizar la primera capa con cenizas, el comportamiento varía: con 5% de cada ceniza el índice de plasticidad (IP) aumenta, sugiriendo una interacción inicial que aumenta la cohesión, mientras que con 10% de cada ceniza, el IP disminuye por debajo del estado natural sugiriendo una alteración estructural más drástica. La Tabla 3 se muestra los resultados de los límites de consistencia del suelo natural y el suelo estabilizado. En la Fig. 3 se presenta la carta de plasticidad del suelo natural en todas sus capas y en la Fig. 4 se muestra la carta de plasticidad del suelo natural de la capa 0 – 0,50 m y del suelo estabilizado.

Tabla 3- Límite Líquido, Límite Plástico e Índice de plasticidad del suelo natural y el suelo tratado

Muestra	LL (%)	LP (%)	IP (%)
Suelo natural (0 – 0,50 m)	43,40	28,57	14,83
Suelo natural (0,50 – 1,00 m)	49,65	31,98	17,67
Suelo natural (1,00 – 1,50 m)	55,91	36,43	19,48
Suelo + 5% de CCC + 5% de CBCA	48,04	29,02	19,02
Suelo + 10% de CCC + 10% de CBCA	45,03	32,77	12,26

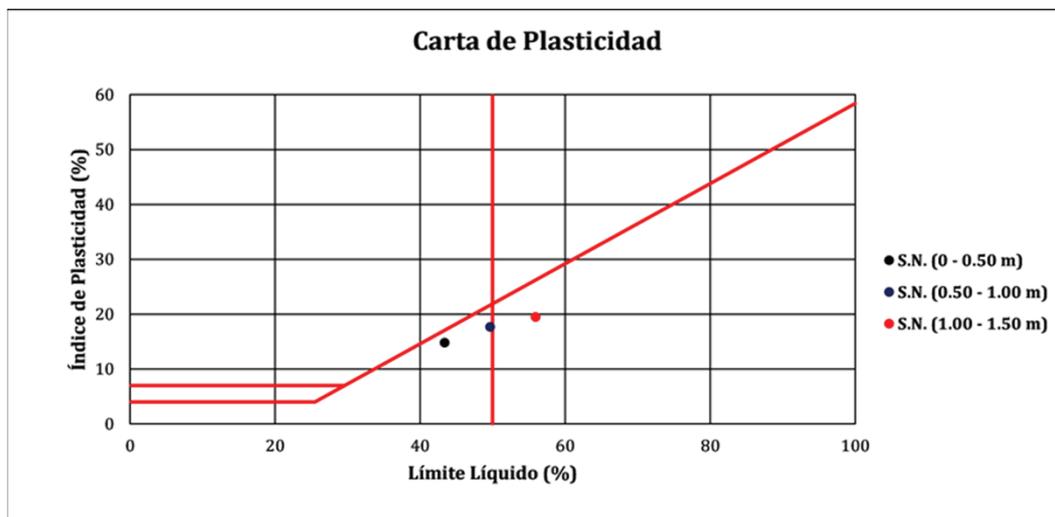


Fig. 3- Carta de plasticidad del suelo natural

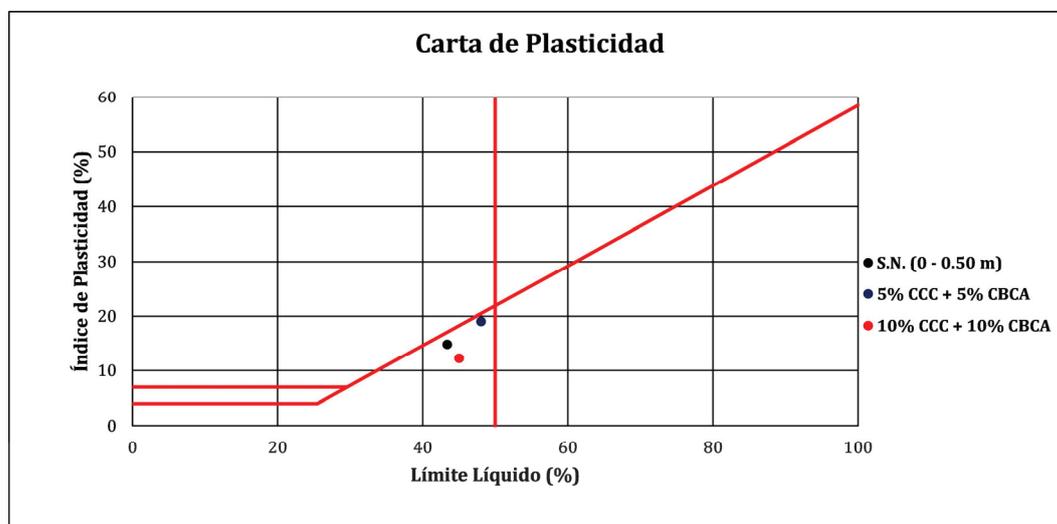


Fig. 4 - Carta de plasticidad de capa 0 – 0,50 m y suelo estabilizado

### 3.4. Clasificación Del Suelo

Las muestras de suelo se clasificaron usando la clasificación SUCS [20] y AASHTO [21]. A medida que se avanza de la capa superficial hacia la más profunda, se observa un aumento del índice de grupo, lo que refleja una mayor plasticidad y menor aptitud como subrasante, evidenciando así una progresiva pérdida de capacidad estructural del material natural.

Cuando se estabiliza la capa 0-0,50 m con las cenizas, se observan dos efectos distintos: con un 5% de CCC y 5% de CBCA, el índice de grupo se incrementa, lo que podría sugerir una estructura más cohesiva o una redistribución granulométrica que no reduce la plasticidad según los criterios de AASHTO, sin embargo, este resultado puede no ser concluyente para reflejar las mejoras en el comportamiento mecánico del suelo, lo que subraya la importancia de complementarla con otros ensayos que evalúen directamente la capacidad estructural. En cambio, con una dosificación del 10% de cada ceniza se produce una mejora evidente, el índice de grupo se reduce considerablemente y el suelo se clasifica en un grupo de mejor comportamiento, lo que sugiere una acción estabilizante efectiva sobre su plasticidad.

Este comportamiento puede atribuirse a una mayor presencia de óxidos reactivos, que a concentraciones más altas promueven reacciones puzolánicas más intensas, mejorando la estructura del suelo al reducir la plasticidad y aumentar su capacidad de soporte. Esta evolución se resume en la Tabla 4, donde se detallan las clasificaciones SUCS y AASHTO junto con sus respectivos índices de grupo.

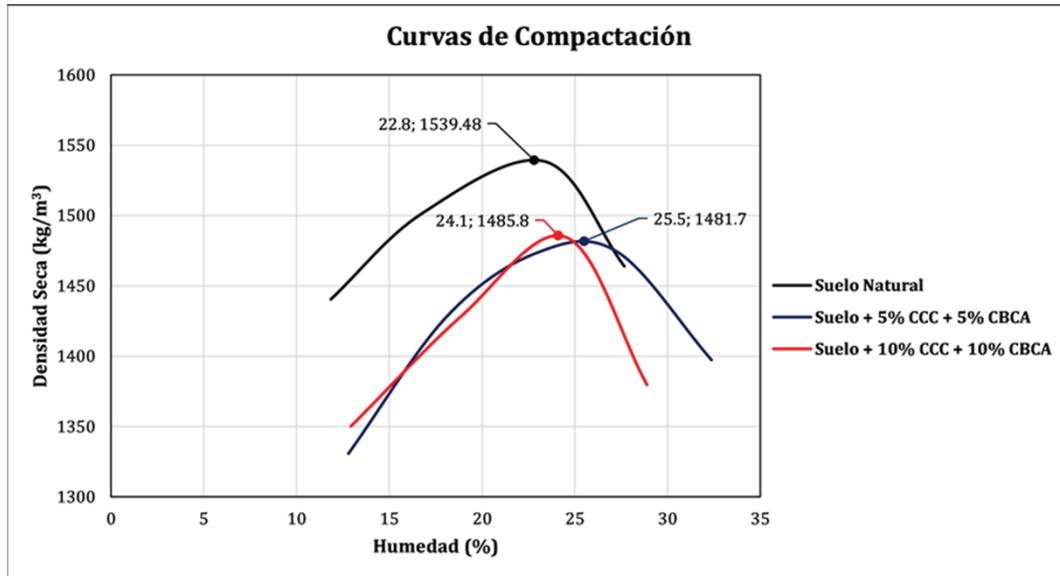
Tabla 4- Clasificación del suelo según SUCS y AASHTO

Muestra de suelo	Clasificación SUCS	Clasificación AASHTO	Índice de grupo
Suelo natural (0 – 0,50 m)	ML (Limo)	A-7-6	17
Suelo natural (0,50 – 1,00 m)	ML(Limo)	A-7-5	20
Suelo natural (1,00 – 1,50 m)	MH (Limo elástico)	A-7-5	23
Suelo + 5% CCC + 5% CBCA	ML (Limo)	A-7-6	21
Suelo + 10% CCC + 10% CBCA	ML (Limo)	A-7-5	12

### 3.5. Ensayos Proctor

La estabilización del suelo con las cenizas modificó sus características de compactación como se presenta en la Fig. 5. En comparación con el suelo natural, ambas dosificaciones de cenizas disminuyeron la densidad seca máxima y aumentaron el contenido de humedad óptimo, lo que se atribuye en general a la incorporación de partículas con menor densidad y posiblemente mayor capacidad de retención de agua.

Sin embargo, este comportamiento no fue lineal: con la adición del 5% de cada ceniza se registró una densidad seca menor y una humedad óptima mayor que con la dosificación del 10%, la cual mostró una ligera recuperación de la densidad y una reducción en la humedad con respecto a la mezcla al 5%. Este cambio podría interpretarse como una reorganización más eficiente de las partículas en la mezcla con 10% de adición, donde el mayor contenido de cenizas favorecería una mejor distribución entre los agregados del suelo, permitiendo una compactación más efectiva pese al incremento de material menos denso.



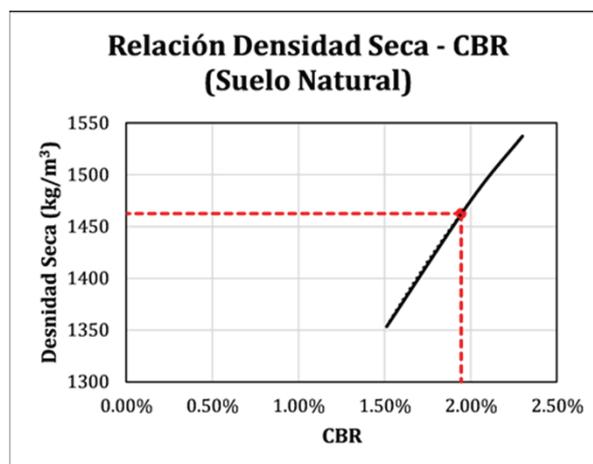
Estos resultados sugieren que, aunque la adición de cenizas reduce en general la densidad seca alcanzable, la dosificación más alta puede generar una estructura más densa y estable que con adiciones menores, siempre dentro del equilibrio entre tipo de material, humedad y energía de compactación.

### 3.5. Ensayos CBR

Los valores obtenidos de los ensayos CBR se resumen en la Tabla 5. Las Figs 6 a 8 muestran las curvas de relación entre la densidad seca y el CBR para cada muestra evaluada.

**Tabla 5-** CBR del suelo natural y suelo estabilizado

Muestra de suelo	CBR al 95% de compactación (%)
Suelo natural	1,94
Suelo + 5% CCC + 5% CBCA	31,19
Suelo + 10% CCC + 10% CBCA	47,09



**Fig. 6-** Curva densidad seca – CBR (suelo natural)

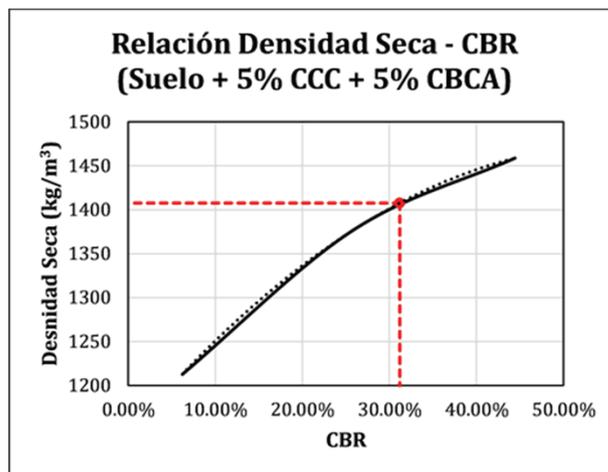


Fig. 7- Curva densidad seca – CBR (suelo + 5% CCC + 5% CBCA)

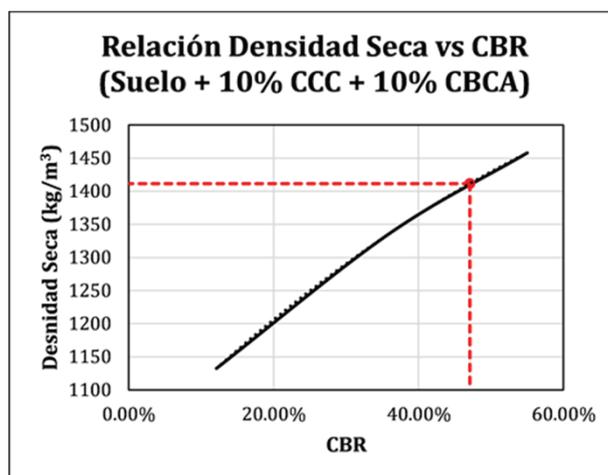


Fig. 8- Curva densidad seca – CBR (suelo + 10% CCC + 10% CBCA)

A partir de estos resultados se evidencia que el suelo natural presenta una capacidad de soporte extremadamente baja, algo esperable en suelos finos de alta plasticidad. La incorporación de 5% de CCC y 5% de CBCA genera un aumento significativo en la resistencia, este cambio sugiere una mejora sustancial en la estructura interna del suelo, probablemente debido a una mayor fricción interna y a una mejor distribución de los vacíos por efecto del material estabilizante.

Cuando se incrementa la dosificación a 10% de cada ceniza, la resistencia mejora aún más, lo que puede atribuirse a una intensificación de los procesos de estabilización, como la reacción puzolánica entre los óxidos presentes en las cenizas y las partículas arcillosas del suelo. Esta reacción puede haber generado productos cementantes que incrementan la rigidez y cohesión del sistema, reforzando la estructura del suelo y reduciendo su deformabilidad.

Aunque los resultados indicaron una mejora progresiva al aumentar la dosificación, no se consideraron proporciones superiores debido a que este estudio se planteó como una fase exploratoria. Por ello, se recomienda que futuras investigaciones amplíen el rango de contenidos evaluados para determinar si la tendencia positiva se mantiene o si existe un punto de saturación.

### 3.6. Expansividad

La expansividad de las muestras se evaluó durante un período de cuatro días, los valores registrados a las 96 horas para las probetas compactadas al 95% se resumen en la Tabla 6.

Tabla 6- Expansividad del suelo natural y estabilizado

Muestra de suelo	Expansividad (%)
Suelo natural	4,66
Suelo + 5% CCC + 5% CBCA	0,26
Suelo + 10% CCC + 10% CBCA	0,48

Los resultados muestran una reducción drástica en la expansividad al estabilizar el suelo con cenizas, evidenciado la eficacia del tratamiento para controlar el hinchamiento del material. La mezcla con 5% de CCC y 5% de CBCA alcanza el menor valor de expansividad, lo que sugiere un efecto combinado de reducción de finos y posibles interacciones químicas que limitan la capacidad de absorción de agua de los minerales expansivos.

En la mezcla con 10% de CCC y 10% de CBCA, aunque la expansión continúa siendo baja, se observa un ligero incremento en comparación con la dosificación menor, esta diferencia podría estar vinculada con características microestructurales o químicas no evaluadas en este estudio, por lo que se recomienda realizar estudios adicionales para identificar los mecanismos responsables de esta variación. A pesar de ello, ambos tratamientos se mantienen en niveles bajos de expansión, lo que confirma el potencial de las cenizas como agentes estabilizantes eficaces frente a suelos con comportamiento expansivo.

## 4. CONCLUSIONES

El análisis permitió la evaluación de la CCC y CBCA como aditivos para la optimización de suelos finos, logrando resultados significativos en cuanto a su resistencia mecánica. Mediante las pruebas efectuadas, se identificaron las características físicas y mecánicas del suelo fino natural, que se distingue por su elevada plasticidad, su baja capacidad portante y alta susceptibilidad a la humedad.

Los ensayos mecánicos evidenciaron que la adición de estas cenizas mejoró la capacidad de soporte del suelo. Se observó que, con la incorporación de diferentes porcentajes de estos aditivos, hubo un incremento en la resistencia mecánica. Especialmente, el mejor desempeño se obtuvo con la adición del 10% de CCC y 10% de CBCA, alcanzando un valor de 47,09%, frente al 1,94% del suelo natural. Aunque se observó una tendencia positiva con el aumento de la dosificación, no se evaluaron proporciones mayores, por lo que se sugiere que futuras investigaciones amplíen este rango para determinar si existe un punto de saturación.

En cuanto a la compactación, se registró un aumento en la humedad óptima y una disminución en la densidad seca máxima respecto al suelo natural, un comportamiento atribuible a la incorporación de materiales menos densos y potencialmente más porosos. La mezcla con 10% de cenizas mostró una ligera mejora en la densidad respecto a la dosificación del 5%, lo que sugiere una posible reorganización estructural más eficiente a mayores contenidos.

Posteriormente, una vez comparadas las propiedades del suelo natural con el suelo estabilizado, los resultados fueron los esperados, se evidenciaron mejoras en propiedades asociadas a la resistencia y estabilidad del suelo. Se evidenció que la CCC y CBCA operaron como agentes estabilizantes efectivos, reduciendo el índice de plasticidad de un 14,83% a un 12,26%, lo que significa que el suelo se ha vuelto menos expansivo, más estable y menos sensible a la humedad. Estos valores validan la capacidad de estos materiales en la estabilización de suelos finos, lo que puede representar una alternativa sostenible y de bajo costo para mejorar el desempeño de las infraestructuras.

Si bien no se evaluaron directamente los impactos ambientales del proceso, el uso de estos residuos agroindustriales representa un enfoque con potencial para valorizar subproductos orgánicos y reducir la dependencia de estabilizantes convencionales. No obstante, se recomienda que investigaciones futuras analicen la durabilidad y estabilidad de estas mezclas en diferentes condiciones climáticas y geográficas, así como la sostenibilidad ambiental del proceso a mayor escala.

1. J. F. Rivera, A. Orobio, R. Mejía de Gutiérrez y N. Cristelo, «Clayey soil stabilization using alkali-activated cementitious materials,» *Materiales de Construcción*, vol. 70, nº 337, 2020. doi: <https://doi.org/10.3989/mc.2020.07519>
2. Cevallos, J. E. B., & Hernández, E. O., «Material de préstamo estabilizado con enzimas orgánicas como alternativa para mejorar su capacidad portante,» *Revista Ciencia y Construcción*, vol. 5, nº 2, pp. 31-38, 2024. Available: <https://rcc.cujae.edu.cu/index.php/rcc/article/view/231>
3. Ortiz-Hernández, E., Chunga, K., Pastor, J. L., & Toulkeridis, T., «Assessing susceptibility to soil liquefaction using the standard penetration test (SPT)—a case study from the city of Portoviejo, Coastal Ecuador,» *Land*, vol. 11, nº 4, p. 463, 2022. doi: <https://doi.org/10.3390/land11040463>
4. Ponce, J. P., & Hernández, E. O., «Estabilización de suelos arcillosos con el empleo de cal» *Dominio de las Ciencias*, vol. 10, nº 1, pp. 771-789, 2024. doi: <https://doi.org/10.23857/dc.v10i1.3741>
5. E. H. O. M. E. H. O. S. L. K. M. & d. C. R. P. Hernández, Behavior of clayey soil existing in the Portoviejo canton and its neutralization characteristics, vol. 2454, *Journal of College and University*, 2017, p. 2261. Available: [https://www.researchgate.net/publication/320787540\\_Behavior\\_of\\_Clayey\\_Soil\\_Existing\\_in\\_the\\_Portoviejo\\_Canton\\_and\\_Its\\_Neutralization\\_Characteristics](https://www.researchgate.net/publication/320787540_Behavior_of_Clayey_Soil_Existing_in_the_Portoviejo_Canton_and_Its_Neutralization_Characteristics)
6. S. Liao, D. Wang, C. Xia y J. Tang, «China's provincial process CO2 emissions from cement production during 1993–2019,» *Scientific Data*, vol. 9, nº 165, 2022. doi: <https://doi.org/10.1038/s41597-022-01270-0>
7. M. Simoni, M. D. Wilkes, S. Brown, J. L. Provis, H. Kinoshita y T. Hanein, «Decarbonising the lime industry: State-of-the-art,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 168, 2022. doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112765>
8. P. Ghadir, M. Zamanian, N. Mahbubi-Motlagh, M. Saberian, J. Li y N. Ranjbar, «Shear strength and life cycle assessment of volcanic ash-based geopolymer and cement stabilized soil: A comparative study,» *Transportation Geotechnics*, vol. 31, 2021. doi: <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2021.100639>
9. K. Raja, S. Venkatachalam, K. Vishnuvardhan, R. Siva Rama Krishnan, V. Tamil Selvan y N. Vetrivelan, «A review on soil stabilization using rice husk ash and lime sludge,» *Materials Today: Proceedings*, vol. 65, pp. 1205-1212, 2022. doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.04.178>
10. M. Adnan, S. Kumar, N. Garg, K. Kumar Gupta y S. Kumar Das, «Soil stabilization using waste “Bagasse ash and lime”: A review» *Materials Today: Proceedings*, 2023. doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.05.018>
11. A. P. Galvín, A. López-Uceda, M. Cabrera, J. Rosales y J. Ayuso, «Stabilization of expansive soils with biomass bottom ashes for an eco-efficient construction» *Environmental Science and Pollution Research*, vol. 28, pp. 24441-24454, 2021. doi: <https://doi.org/10.1007/s11356-020-08768-3>
12. M. Fastelli, C. Cambi, A. Zucchini, P. Sassi, E. Pandolfi Balbi, L. Pioppi, F. Cotana, G. Cavalaglio y P. Comodi, «Use of Biomass Ash in Reinforced Clayey Soil: A Multiscale Analysis of Solid-State Reactions,» *Recycling*, vol. 8, nº 1, 2023. doi: <https://doi.org/10.3390/recycling8010005>
13. A. Iyaruk, P. Promputthangkoon y A. Lukjan, «Evaluating the Performance of Lateritic Soil Stabilized with Cement and Biomass Bottom Ash for Use as Pavement Materials,» *Infrastructures*, vol. 7, nº 5, 2022. doi: <https://doi.org/10.3390/infrastructures7050066>
14. S. A. Khawaja, U. Javed, T. Zafar, M. Riaz, M. Saeed Zafar y M. K. Khan, «Eco-friendly incorporation of sugarcane bagasse ash as partial replacement of sand in foam concrete,» *Cleaner Engineering and Technology*, vol. 4, 2021. doi: <https://doi.org/10.1016/j.clet.2021.100164>
15. M. F. Anuar, Y. W. Fen, M. . H. M. Zaid, K. A. Matori y R. E. M. Khaidir, «The Physical and Optical Studies of Crystalline Silica Derived from the Green Synthesis of Coconut Husk Ash,» *Applied Sciences*, vol. 10, nº 6, 2020. doi: <https://doi.org/10.3390/app10062128>
16. G. Mammani Gonzale, S. De La Cruz Vega, C. S. Vega Neyra, P. M. Yllescas Rodríguez y W. M. Rea Olivares, «Estabilización de la subrasante con ceniza de quinua y cal en la Carretera Lago Sagrado, Puno, Perú,» *Infraestructura Vial*, vol. 25, nº 44, pp. 1-10, 2023. Available: [https://www.scielo.sa.cr/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S2215-37052023000100085&lang=es](https://www.scielo.sa.cr/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2215-37052023000100085&lang=es)

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

17. A. International, «ASTM D6913/D6913M-17: Standard Test Methods for Particle-Size Distribution (Gradation) of Soils Using Sieve Analysis,» ASTM International, West Conshohocken, PA, 2017. doi: [http://doi.org/10.1520/D6913\\_D6913M-17](http://doi.org/10.1520/D6913_D6913M-17)
18. ASTM International, «ASTM D4318-17e1: Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils,» ASTM International, West Conshohocken, PA, 2017. doi: <http://doi.org/10.1520/D4318-17E01>
19. ASTM International, «ASTM D1557-12(2021): Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Modified Effort (56,000 ft-lbf/ft<sup>3</sup> (2,700 kN-m/m<sup>3</sup>)),» ASTM International, West Conshohocken, PA, 2021. doi: <https://doi.org/10.1520/D1557-12R21>
20. ASTM International, «ASTM D1883-21: Standard Test Method for California Bearing Ratio (CBR) of Laboratory-Compacted Soils,» ASTM International, West Conshohocken, PA, 2021. doi: <http://doi.org/10.1520/D1883-21>
21. ASTM International, «ASTM D2487-17: Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System),» ASTM International, West Conshohocken, PA, 2017. doi: <http://doi.org/10.1520/D2487-17>
22. American Association of State Highway and Transportation Officials, «AASHTO M 145-91: Standard Specification for Classification of Soils and Soil-Aggregate Mixtures for Highway Construction Purposes,» American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D.C., 2021. Available: <https://www.normsplash.com/Samples/AASHTO/147286968/AASHTO-M-145-91-%282021%29-en.pdf>