



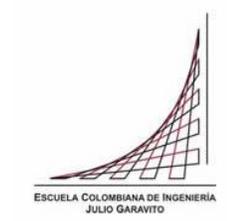
Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito

Programa de Ingeniería Civil

**EFFECTOS DE ESTABILIZACIÓN DE SUELOS BLANDOS
MODIFICADOS CON ADICIÓN DE CEMENTO Y CENIZA DE
BAGAZO DE CAÑA DE AZÚCAR EN VÍAS Terciarias.**

LUIS ARLEY CABALLERO TORRES

Bogotá, D.C., ENERO 18 2024





**EFFECTOS DE ESTABILIZACIÓN DE SUELOS BLANDOS
MODIFICADOS CON ADICIÓN DE CEMENTO Y CENIZA DE
BAGAZO DE CAÑA DE AZÚCAR EN VÍAS Terciarias.**

Para optar al título de ingeniero civil

PH.D. CARLOS JOSE SLEBI ACEVEDO

Director

Bogotá, D.C., enero 18 de 2024



Agradecimientos

Dedico este trabajo a todas las personas que componen mi familia por su apoyo incommensurable, en especial a mi madre y mi hermana, las dos mujeres más importantes en mi vida, quienes siempre han mantenido su fe en mí.

Deseo expresar mi sincero reconocimiento a las siguientes personas e instituciones cuyas contribuciones fueron fundamentales para el desarrollo de esta investigación:

El Ingeniero Carlos J. Slebi Acevedo, cuya orientación experta y generosa provisión de conocimientos técnicos fueron esenciales para el éxito de este trabajo.

El Centro de Estudios de Geotecnia de la Universidad Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, por brindar el apoyo necesario y facilitar el acceso a recursos y datos esenciales para la realización de esta tesis.

Tecnisuelos, por brindar el espacio y equipo para la finalización de los estudios realizados.

A los técnicos, cuya labor y conocimientos fueron de importancia en la ejecución de los ensayos y experimentos relevantes para este estudio.

Resumen

Este estudio integral se centró en la estabilización de suelos a través de la adición de Sugar Cane Bagasse Ash (SCBA), un subproducto de la quema de caña de azúcar en la producción de panela y azúcar. La investigación incluyó una detallada caracterización de los materiales empleados, como SCBA, Caolín y Cemento Argos (UG), mediante ensayos de hidrometría, gravedad específica, límites y Proctor. Los resultados de estos análisis proporcionaron información esencial sobre las propiedades físicas y mecánicas de los materiales, fundamentales para comprender su comportamiento en las mezclas estudiadas.

Además, se subrayó la importancia de la valorización de residuos, destacando el contexto colombiano donde la producción de panela genera grandes cantidades de SCBA. Según Fedepanela en un informe del 2016, Cundinamarca se destaca como la principal zona panelera en Colombia, con miles de pequeños productores. Esta concentración de producción resulta en acumulación significativa de SCBA, un residuo fino que puede generar problemas respiratorios si no se maneja adecuadamente. La valorización de este residuo no solo busca optimizar su disposición sino también aprovechar sus propiedades beneficiosas en el mejoramiento de suelos, contribuyendo así a la sostenibilidad ambiental y al desarrollo de soluciones ingenieriles eficaces en el ámbito de la estabilización de suelos.

Palabras claves: Evaluación de propiedades; *Estabilización de suelos*; SCBA; *Valorización de residuos*; *Sostenibilidad ambiental*;

Abstract

This comprehensive study was focused on soil stabilization through the addition of Sugar Cane Bagasse Ash (SCBA), a by-product of sugar cane burning in the production of panela and sugar. The **research** included a detailed characterization of the materials used, such as SCBA, Kaolin and Argos Cement (UG), by means of hydrometric, specific gravity, limit, and Proctor tests. The results of these analyses provided essential information on the physical and mechanical properties of the materials, fundamental for understanding their behavior in the mixtures studied.

In addition, the importance of waste valorization was underlined, highlighting the Colombian context where panela production generates large quantities of SCBA. According to Fedepanela in a 2016 report, Cundinamarca stands out as the main panelera area in Colombia, with thousands of small producers. This concentration of production results in significant accumulation of SCBA, a fine waste that can generate respiratory problems if not handled properly. The valorization of this waste not only seeks to optimize its disposal but also to take advantage of its beneficial properties in soil improvement, thus contributing to environmental sustainability and the development of effective engineering solutions in the field of soil stabilization.

Keywords: Property assessment; Soil stabilization; SCBA; Waste valorization; Environmental sustainability.

Índice general

Introducción.....	14
Objetivos	15
Objetivo General.....	15
Objetivos Específicos.....	15
Metodología Propuesta	16
Materiales, procedimientos de laboratorio y métodos de ensayo.....	20
Materiales	20
Ensayos experimentales.....	21
Resultados experimentales y análisis.	30
Resultados de ensayos de Caracterización	30
• Gravedad especifica	39
• Limites.....	41
• Proctor:	42
Resultados Propiedades físicas.....	45
• CBR:	46
• Metodología Marshall:.....	54



Tracción indirecta	63
Conclusiones y recomendaciones.....	65
Conclusiones	65
Recomendaciones	67
Referencias.....	68

Índice de tablas

Tabla 1 Diseño y ensayos a elaborados.	20
Tabla 2 Granulometría fuente: Propia	31
Tabla 3 Resultados Granulometría SCBA. fuente: Propia.....	31
Tabla 4 Clasificación SCBA. fuente: Propia	32
Tabla 5 Datos de Hidrometría. fuente: Propia	33
Tabla 6 Valores de K para el cálculo del diámetro de las partículas.	33
Tabla 7 Valores de profundidad efectiva, Hidrómetro 151H. fuente: Tomada de la Norma Invias E 123.....	35
Tabla 8 Resultados Hidrometría SCBA. fuente: Propia.....	35
Tabla 9 Continuación Resultados Hidrometría SCBA. fuente: Propia	36
Tabla 10 Resultados de Hidrometría Caolín. fuente: Propia	36
Tabla 11 Continuación Resultados Hidrometría Caolín. fuente: Propia	37
Tabla 12 Densidad de agua y Coeficiente de corrección por temperatura. fuente: Tomado de Norma Invias E 128.....	39
Tabla 13 Resultados Gravedad específica. fuente: Propia.....	40
Tabla 14 Gravedades teóricas de los diseños. fuente: Propia	41
Tabla 15 Resumen limites fuente: Propia.....	42
Tabla 16 Proctor de los diseños de mezclas. fuente: Propia.....	44

Tabla 17 Resumen densidades y peso específico al 18% humedad. fuente: Propia.	45
Tabla 18 Diseños de estudio. fuente: Propia.....	46
Tabla 19 Datos brutos CBR de los diseños. fuente: Propia.	47
Tabla 20 Resultados de expansión de CBR a 48 Hrs. fuente: Propia.	48
Tabla 21 Valores máximos. fuente: Propia.....	49
Tabla 22 Valores mínimos. fuente: Propia	49
Tabla 23 Valores medios. fuente: Propia	50
Tabla 24 Valores de CBR. fuente: Propia.	51
Tabla 25 Valores medios CBR. fuente: Propia.....	52
Tabla 26 Resultados CBR. fuente: Propia.....	53
Tabla 27 Resultados CBR. fuente: Propia.....	54
Tabla 28 Tabla de Dimensiones de las briquetas. fuente: Propia.	56
Tabla 29 Datos tracción indirecta. fuente: Propia.....	57
Tabla 30 Resultados de parámetros de fractura. fuente: Propia	59
Tabla 31 Resultados Flujo Marshall. fuente: Propia	59

Índice de Ilustraciones

Ilustración 1 Metodología propuesta	16
Ilustración 2 Gradación de SCBA.....	22
Ilustración 3 Hidrometría	23
Ilustración 4 Limites.....	25
Ilustración 5 Gravedad específica	26
Ilustración 6 Proctor	27
Ilustración 7 Fabricación de briquetas.....	30
Ilustración 8 Curva granulometría.	32
Ilustración 9 Densidad aparente vs Tiempo.	38
Ilustración 10 % Suelo en suspensión Vs Tiempo.....	38
Ilustración 11 #golpes Vs Contenido de humedad.	41
Ilustración 12 Densidad seca Vs % w de las mezclas.	45
Ilustración 13 Resultados sin corrección.	50
Ilustración 14 Corrección valores mínimos.....	51
Ilustración 15 Corrección valores medios.....	52
Ilustración 16 Corrección valores máximos.....	53
Ilustración 17 Corrección de las curvas CBR.	54

Ilustración 18 Parámetros de fractura	58
Ilustración 19 Parámetros de fractura.	58
Ilustración 20 Valores de CBR Mínimos a (2,54).....	60
Ilustración 21 Valores de CBR Mínimos a (5.08).....	60
Ilustración 22 Resultados Máximos de CBR (2,54)	61
Ilustración 23 Resultados Máximos de CBR (5.08)	61
Ilustración 24 Expansión de CBR.....	62
Ilustración 25. Tracción indirecta.....	63
Ilustración 26 Estabilidad Flujo Marshall	64

conocimiento científico y brindar soluciones prácticas que promuevan la sostenibilidad en proyectos de ingeniería civil.

Objetivos

Objetivo General

- Optimizar las propiedades geotécnicas de suelos arcillosos destinados a vías terciarias mediante la aplicación de mejoras que involucren la adición controlada de ceniza de bagazo de caña de azúcar (SCBA) y cemento, con el propósito de incrementar su estabilidad y resistencia.

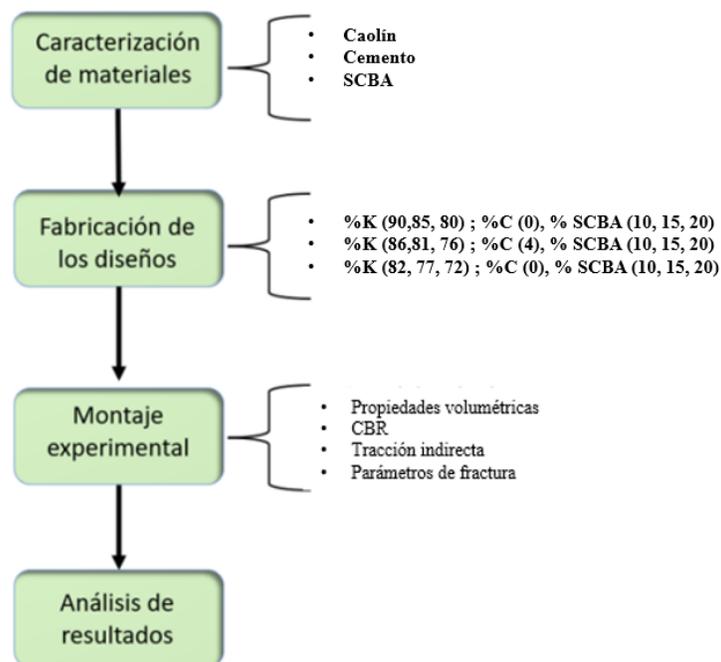
Objetivos Específicos

- **Evaluación del Comportamiento Mecánico:**
Realizar un análisis exhaustivo del comportamiento mecánico de suelos blandos modificados, considerando adiciones de cemento y SCBA. Con el fin de caracterizar la respuesta de la respuesta ante cargas, deformaciones y otros parámetros relevantes.
- **Análisis del Comportamiento de Diseños Mejorados:**
Evaluar detalladamente el comportamiento mecánico de los diseños mejorados de suelo, destacando la influencia específica de las proporciones óptimas de SCBA y cemento en la mejora de las propiedades geotécnicas.
- **Caracterización de SCBA para Estabilización:**
Realizar un análisis detallado de las características físicas, químicas y geotécnicas de la SCBA, centrándose en su idoneidad para la estabilización de suelos arcillosos. Esto incluye la determinación de su potencial cementante y su contribución a la mejora de las propiedades del suelo.

Metodología Propuesta

La metodología se inició con la caracterización del suelo arcilloso de estudio, seguido de la caracterización volumétrica de los aditivos a implementar, entre ellos, la Ceniza de Bagazo de Caña de Azúcar (SCBA), caolín y cemento (Arbeláez Pérez O, 2022) (Yang Li Jiaqi Chai Ruijun Wang Xu Zhang, 2022). Para evaluar el comportamiento de estos materiales, se realizaron ensayos de hidrometría y Proctor, centrándose específicamente en el caolín y la SCBA. Cabe destacar que SCBA, el cual es el termino para referir a la Ceniza de Bagazo de Caña de Azúcar, es un aditivo de interés reconocido por su potencial impacto en las propiedades de las mezclas.

Ilustración 1 Metodología propuesta



fuentes propia.

Posteriormente, se determinaron las combinaciones de aditivos para las cuales se llevaría a cabo un estudio de Diseño de Experimentos (DOE) Full Factorial (Antony, 2014), está conformada por la siguiente secuencia de pasos.

- **Identificación de Factores:**

Enumera todos los factores que podrían afectar la respuesta en tu experimento. Cada factor tiene diferentes niveles, que son los valores o condiciones que pueden tomar.

- **Definición de Niveles:**

Determina los niveles específicos para cada factor. Por ejemplo, si estás investigando la influencia de la temperatura y la concentración en una reacción química, los niveles de temperatura podrían ser baja, media y alta, mientras que los niveles de concentración podrían ser baja y alta.

- **Construcción de Matriz de Diseño:**

Crea una matriz que representa todas las combinaciones posibles de los niveles de los factores. En un diseño factorial completo, cada combinación única se prueba al menos una vez.

- **Realización de Experimentos:**

Lleva a cabo los experimentos de acuerdo con la matriz de diseño. Cada corrida del experimento corresponde a una combinación única de niveles de factores.

- **Recopilación de Datos:**

Registra los datos resultantes de cada corrida del experimento, incluida la respuesta o variable de interés que estás midiendo.

- **Análisis Estadístico:**

Utiliza técnicas estadísticas para analizar los datos recopilados y determinar la influencia relativa de cada factor y su interacción en la respuesta.

- **Interpretación de Resultados:**

Con base en el análisis estadístico, identifica los factores más significativos y comprende cómo sus niveles afectan la respuesta. Esto proporciona información valiosa para optimizar y entender el proceso o sistema estudiado.

El DOE Full Factorial es poderoso porque permite explorar de manera sistemática y eficiente el impacto de múltiples factores y sus interacciones, proporcionando una comprensión más completa y detallada de la relación entre los factores y la respuesta en un experimento.

La producción de probetas, siguiendo la metodología descrita previamente, se llevó a cabo mediante la ejecución de dos corridas, correspondientes a experimentos o ensayos para diversas mezclas. Dadas las variaciones en la cantidad o concentración de las sustancias a incorporar, se segmentaron en tres niveles de concentración de (SCBA): 10%, 15% y 20%. Según investigadores como (Arbeláez Pérez O, 2022) y (Yang Li Jiaqi Chai Ruijun Wang Xu Zhang, 2022) indican que las composiciones óptimas de adición se encuentran en un rango de 5% a 25% de SCBA.

En cuanto al cemento, se consideraron niveles de 0%, 4% y 8%, complementados con caolín. Como parte de la gestión de errores y el seguimiento de datos, se generaron muestras replicadas en tres ocasiones. En resumen, se han producido un total de 54 probetas, resultado de la combinación de las dos corridas, tres niveles de SCBA, tres niveles de cemento y tres réplicas, siguiendo la metodología de diseño experimental empleada.

Para evaluar la resistencia, se llevó a cabo un ensayo de CBR (California Bearing Ratio) con 5 capas y un total de 56 golpes por capa, dejando las muestras en condiciones húmedas reguladas por temperatura durante 48 horas. Además, se aplicó la metodología Marshall para evaluar la estabilidad y flujo de las mezclas. Se fabricaron muestras en moldes de diámetro de 100 mm y altura de 60 mm, con tres capas y 25 golpes por capa. El curado de estas muestras se realizó a temperatura ambiente.

Diseños	Caolín (%)	Cemento (%)	SCBA (%)	CBR muestras	ITS muestras
	90%		10%	3	3
1	85%	0%	15%	3	3
	80%		20%	3	3
	86%		10%	3	3
2	81%	4%	15%	3	3
	76%		20%	3	3
	82%		10%	3	3
3		8%			
	77%		15%	3	3

72%

20%

3

3

Tabla 1 Diseño y ensayos a elaborados.

fuelle: Propia

Secuencia de pasos desarrollada en la elaboración de la investigación

1. Caracterización del suelo arcilloso de estudio.
2. Caracterización volumétrica de los de los aditivos a implementar: SCBA y Cemento.
3. Ensayo de hidrometría para el caolín y la SCBA.
4. Ensayo Proctor para el caolín y la SCBA.
5. Determinación de las combinaciones de los aditivos.
6. Fabricación de probetas.
7. Ensayo de CBR.
8. Ensayos Tracción indirecta.
9. Análisis de datos y conclusiones del estudio.

Materiales, procedimientos de laboratorio y métodos de ensayo

Materiales

Se implementaron 3 materiales para la elaboración de este documento:

1) Caolín.

- El Caolín es un mineral arcilloso compuesto principalmente de caolinita, es un aluminosilicatos hidratado, Esta caracterizado por su estructura de capas y se extrae en de depósitos sedimentarios
- Presenta propiedades físicas como: Color generalmente blanco, pero puede variar según las impurezas presentes. Dureza Relativamente baja. Textura fina suave al tacto.

2) Cemento Argos (UG).

- Es un cemento de uso general, es un tipo de cemento Portland un aglomerante hidráulico producido mediante la molienda de Clinker, yeso y se encuentra compuesto generalmente por silicato de calcio.
- Presenta propiedades físicas como: Color gris. Resistencia los cuales cumple con los estándares de resistencia a la compresión especificados para cementos Portland.
- Es ampliamente utilizado en la construcción para la elaboración de concreto, mortero, y lechada.

3) SCBA.

- Es un subproducto de la producción de panela y azúcar mediante la combustión controlada del bagazo de caña de azúcar, ya que es implementada como fuente de energía de las calderas. Es una ceniza mayormente compuesta por sílice (SiO_2), alúmina (Al_2O_3).
- Presenta propiedades físicas como: Color varia de gris claro a blanco. Textura similar a una arena de grano fino.

Ensayos experimentales

Se requirió determinar las condiciones de los materiales de estudio por lo cual se siguieron las normativas dispuestas en la norma INV E- Sección 100.

- **INVE-123 Determinación de los tamaños de las partículas de los suelos.**
Se determinó mediante esta norma, la distribución del tamaño de las partículas que componen la muestra de suelo, que se usará en las diferentes capas del pavimento. Se debe tener en cuenta que las partículas de tamaños mayores a 75 μm se tamizan y las menores a esto se calculan por hidrometría, la principal razón de terminar los tamaños es establecer cuan buenas o malas son los granos que componen el suelo para ser usados como material en el diseño de la estructura del pavimento.

Ilustración 2 Gradación de SCBA



Fuente: Propia

Ilustración 3 Hidrometría



Fuente: Propia

- **INVE-125: Determinación del límite líquido de los suelos**

El Límite Líquido, representado como el porcentaje de contenido de agua en el suelo cuando este se encuentra en un estado entre los estados líquido y plástico, se determinó mediante el método de los tanteos. Este procedimiento implica la dispersión de una muestra de suelo sobre una cazuela de bronce, comúnmente conocida como cazuela de Casagrande. La muestra se divide con un ranurador en la mitad, y se procede a aplicar golpes repetidos hasta que la ranura se cierre. Posteriormente, el Límite Líquido se calcula a través de la relación entre el número de golpes y el contenido de agua (humedad) específica del suelo.

La relevancia de esta medida radica en su capacidad para caracterizar suelos finos, especialmente aquellos de naturaleza arcillosa. Propiedades como la permeabilidad, compresibilidad, expansividad y cohesión, entre otras, están intrínsecamente vinculadas al Límite Líquido. Este parámetro se erige como un indicador crucial en la evaluación de la calidad ingenieril del suelo, permitiendo estimar su comportamiento y propiedades fundamentales en el contexto de aplicaciones geotécnicas y constructivas.

INVE-126: Límite plástico e índice de plasticidad de los suelos

El Límite Plástico, expresado como el porcentaje de contenido de agua en una muestra de suelo cuando esta se encuentra en un estado intermedio entre plástico y semisólido, se determina mediante la aplicación de presión repetida sobre una porción de suelo húmedo con el objetivo de formar rollos de 3,2 mm de diámetro. Este proceso continúa hasta que se observa la formación de grietas, indicando el agotamiento del contenido de humedad. En otras palabras, el Límite Plástico representa la cantidad de humedad necesaria para la formación de rollos sin que se produzca su ruptura.

La importancia de esta medición radica en las propiedades inherentes de los suelos finos, especialmente los de naturaleza arcillosa. Propiedades como la permeabilidad, compresibilidad, expansividad y cohesión están directamente relacionadas con el Límite Plástico. Este parámetro proporciona una caracterización fundamental para evaluar la calidad ingenieril del suelo, permitiendo estimar su comportamiento y propiedades clave en aplicaciones geotécnicas y constructivas.

Ilustración 4 Limites



Fuente: Propia

- **INVE-128: Determinación de la gravedad específica de las partículas sólidas de los suelos y de la llenante mineral, empleando un picómetro con agua**

Se usa para determinar la gravedad específica de los suelos (relación entre masa volumétrica a cierta temperatura y la masa de agua a una misma temperatura) que pasan por el tamiz número 4 (4.75 mm) es decir, material tipo gravas, esto se obtiene con base a que las partículas que componen las capas de pavimento no deben contener un número alto de sustancias ajenas a su composición requerida, es decir, partículas minerales, piedras calizas, etc.

Ilustración 5 Gravedad específica



Fuente: Propia.

- **INVE-142: Relaciones de Humedad-Peso unitario seco en los suelos (Proctor modificado)**

En este paso se procede a determinar la relación entre la humedad y el peso unitario seco de los suelos mediante la elaboración de la curva de compactación. El método consiste en la colocación de 5 capas sucesivas en un molde, con la aplicación de entre 25 y 56 golpes por cada capa, utilizando un martillo de aproximadamente 44,8 N desde una altura de aproximadamente 457,2 mm. La ejecución de este ensayo responde a la necesidad crítica de evaluar las propiedades geotécnicas de las capas de pavimentos, las cuales deben exhibir la resistencia, compresibilidad y permeabilidad necesarias para soportar las cargas de tránsito aplicadas. La realización de este ensayo no solo es esencial para asegurar la estabilidad de las capas, sino también para garantizar la vida útil y desempeño adecuado de la infraestructura vial.

Ilustración 6 Proctor



Fuente: Propia.

Se desea analizar propiedades físicas y de resistencia para los cuales se realizarán los ensayos de:

- **INVE-148: CBR de suelos compactados en el laboratorio y sobre muestra inalterada.**

A través de este ensayo se procede a la determinación de los índices de resistencia de los suelos correspondientes a distintas capas de pavimento, específicamente la subrasante, la sub-base y la base granular. En términos generales, el Ensayo de Razón de Soporte California (CBR) cuantifica la relación entre los esfuerzos requeridos para penetrar una muestra (con diámetro de 2.54 mm o 5.08 mm) en un molde de compactación de 152.4 mm de diámetro, y los esfuerzos necesarios para penetrar, a la misma profundidad, una muestra de suelo granular bien graduado. Bajo estos criterios, el análisis se orienta a verificar que los materiales empleados en el diseño de pavimentos flexibles cumplan con los estándares de calidad establecidos. Este proceso es esencial para asegurar la capacidad estructural y la respuesta adecuada de las capas de pavimento ante las cargas de tránsito, garantizando así la durabilidad y desempeño óptimo de la infraestructura vial.

- **INVE-748: Estabilidad y flujo de mezclas asfálticas en caliente empleando el equipo Marshall**

Se utiliza con el propósito de determinar la resistencia a la deformación en el estado plástico de los especímenes de mezclas asfálticas. Estos especímenes presentan un diámetro de 103 mm y una altura aproximada de 63.5 mm. La relevancia de este ensayo reside en la evaluación de la estabilidad mecánica de las capas asfálticas que conforman la carpeta de rodadura del pavimento. La información obtenida a través de este procedimiento proporciona datos cruciales para la caracterización y diseño de pavimentos, contribuyendo a la mejora de la calidad y durabilidad de la infraestructura vial.

El método Marshall se incorpora en el proceso de estabilización de suelos, especialmente en el contexto de suelos cemento, por razones de relevancia ingenieril:

Diseño y Control de Calidad:

El método Marshall, originalmente concebido para el diseño y control de calidad de mezclas asfálticas, se adapta con éxito al ámbito de suelos cemento. Su aplicación permite la evaluación sistemática de la estabilidad y resistencia mecánica de las capas de suelo estabilizadas, factores críticos en proyectos de construcción de carreteras y pavimentos.

Optimización de la Mezcla:

La metodología Marshall facilita la optimización de la mezcla suelo-cemento mediante el ajuste de proporciones y condiciones de compactación. Este

proceso proporciona información valiosa sobre la densidad y características mecánicas de la mezcla, contribuyendo a la eficacia global del proceso de estabilización.

Evaluación de Propiedades Mecánicas:

El ensayo Marshall, al brindar información detallada sobre la estabilidad y resistencia a la deformación de la mezcla, se revela como un elemento crucial en suelos estabilizados con cemento. Garantiza que la mezcla resultante cumpla con los requisitos de resistencia y estabilidad esenciales para soportar cargas de tráfico y condiciones ambientales adversas.

Control de Deformación Permanente:

La evaluación de la deformación permanente de la mezcla mediante el método Marshall es especialmente significativa en suelos estabilizados con cemento. Este aspecto asegura que la estructura final pueda resistir cargas repetidas sin experimentar deformaciones excesivas a lo largo del tiempo.

Ajuste del Proceso de Construcción:

Los datos recopilados mediante el método Marshall permiten realizar ajustes precisos en el proceso de construcción, incluyendo aspectos como la compactación y la aplicación de la mezcla suelo-cemento. Estos ajustes son esenciales para garantizar que la estructura final alcance las propiedades mecánicas deseadas.

En conclusión, la aplicación del método Marshall en la estabilización de suelos como suelo-cemento se revela como una herramienta ingenieril efectiva, puesto que facilita el diseño, control de calidad y evaluación precisa

de las propiedades mecánicas de las mezclas, asegurando la durabilidad y rendimiento óptimo de las capas estabilizadas en proyectos de ingeniería civil.

Ilustración 7 Fabricación de briquetas



Fuente: Propia.

Resultados experimentales y análisis.

Resultados de ensayos de Caracterización

- **Hidrometría**

La clasificación de la SCBA se realizó con la granulometría de la cual se determinó que es un material tipo una Arena arcillosa de grano medio fino, con una conformación de arenas (94.5%), Finos (5.5%).

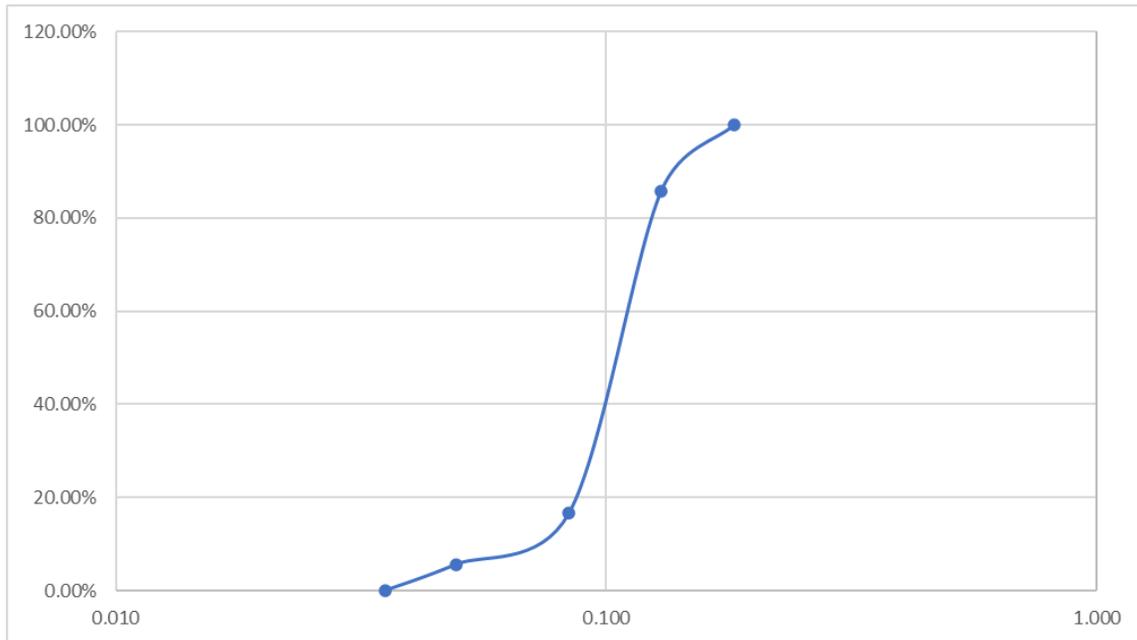
Tamiz		Peso (g)	% RET	% PASA
In	Mm			
N° 4	4.76	0.00	0.00%	100.00%
N° 10	2	130.8	14.14%	85.86%
N° 40	0.42	640.8	69.27%	16.59%
N° 200	0.07	102.2	11.05%	5.55%
FONDO		51.3	5.55%	0.00%
PESO TOTAL		925.1		

*Tabla 2 Granulometría
fuente: Propia*

RESULTADOS	
Gravas	0.00%
Arenas	94.5%
Finos	5.55%

*Tabla 3 Resultados Granulometría SCBA.
fuente: Propia*

Ilustración 8 Curva granulométrica.



fuentes: Propia

CLASIFICACIÓN	
AASHTO	A-2-6
SUSC	SC

*Tabla 4 Clasificación SCBA.
fuente: Propia*

El ensayo de hidrometría permitió obtener los siguientes resultados.

T (min)	G	Temperatura °C	T ₀
1	1015.5	18	1004
2	1014	18	
5	1011.5	18	
15	1010	18	
30	1008	18	
60	1007	18	
120	1006	19	
425	1005.5	18	
1440	1005	17	

*Tabla 5 Datos de Hidrometría.
fuente: Propia*

Se procedió al cálculo de las partículas del suelo para lo cual se requirió de las tablas 6 y 7.

Temperatura °C	Gravedad específica de las partículas de suelo							
	2.45	2.50	2.55	2.60	2.65	2.70	2.75	2.80
16	0.0151	0.01505	0.01481	0.01457	0.01435	0.01414	0.01394	0.01374
17	0.01501	0.01486	0.01462	0.01439	0.01417	0.01396	0.01376	0.01356
18	0.01492	0.01467	0.01443	0.01421	0.01399	0.01378	0.01359	0.01339
19	0.01474	0.01449	0.01425	0.01403	0.01382	0.01361	0.01342	0.01323
20	0.01456	0.01431	0.01408	0.01386	0.01365	0.01344	0.01325	0.01307
21	0.01438	0.01414	0.01391	0.01369	0.01348	0.01328	0.01309	0.01291

Tabla 6 Valores de K para el cálculo del diámetro de las partículas.

fuente: Tomada de la Norma Invias E 123.



Hidrometría 151H

Lectura real del hidrómetro	Profundidad efectiva L, cm
1	16.3
1.001	16
1.002	15.8
1.003	15.5
1.004	15.2
1.005	15
1.006	14.7
1.007	14.4
1.008	14.2
1.009	13.9
1.01	13.7
1.011	13.4
1.012	13.1
1.013	12.9
1.014	12.6
1.015	12.3
1.016	12.1
1.017	11.8
1.018	11.5
1.019	11.3
1.02	11
1.021	10.7
1.022	10.5
1.023	10.2
1.024	10
1.025	9.7
1.026	9.4
1.027	9.2
1.028	8.9
1.029	8.6
1.03	8.4

*Tabla 7 Valores de profundidad efectiva, Hidrómetro 151H.
fuente: Tomada de la Norma Invias E 123*

Al remplazar en la ecuación

$$D = k \sqrt{\frac{L}{T}}$$

El porcentaje de suelo que permanece en suspensión al nivel al cual el hidrómetro mide la densidad de la suspensión.

$$P = \left[\left(\frac{100000}{w} \right) \times \frac{G}{G - G_1} \right] * (R - G_1)$$

En consecuente se realizó la corrección por temperatura, los valores se representan en la tabla 8.

T (min)	G	L	K	D
1	1015.5	12.45	0.01632	0.182
2	1014	12.6	0.01632	0.130
5	1011.5	13.25	0.01632	0.084
15	1010	13.7	0.01632	0.049
30	1008	14.2	0.01632	0.036
60	1007	14.4	0.01632	0.025
120	1006	14.7	0.01614	0.018
425	1005.5	14.85	0.01632	0.010
1440	1005	15	0.01585	0.005

*Tabla 8 Resultados Hidrometría SCBA.
fuente: Propia*

T (min)	G	Temperatura °C	T ₀	R	P
1	1015.5	18	1004	11.5	39.02%
2	1014	18		10	33.45%
5	1011.5	18		7.5	24.16%
15	1010	18		6	18.58%
30	1008	18		4	11.15%
60	1007	18		3	7.43%
120	1006	19		2	3.72%
425	1005.5	18		1.5	1.86%
1440	1005	17		1	0.00%

Tabla 9 Continuación Resultados Hidrometría SCBA.
fuente: Propia

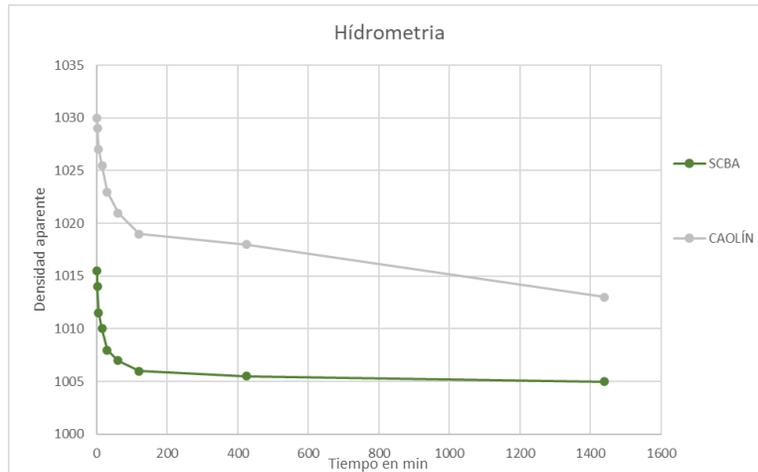
T (min)	G	L	K	D
1	1030	8.4	0.0141	0.04086568
2	1029	8.6	0.0141	0.029
5	1027	9.2	0.0141	0.019
15	1025.5	9.55	0.013242	0.011
30	1023	10.2	0.013242	0.008
60	1021	10.7	0.013242	0.006
120	1019	11.3	0.013402	0.004
425	1018	11.5	0.013242	0.002
1440	1013	12.9	0.013242	0.001

Tabla 10 Resultados de Hidrometría Caolín.
fuente: Propia

T (min)	G	Temperatura °C	T0	R	P
1	1030	17.7	1005	25	0.76056159
2	1029	18		24	72.89%
5	1027	18		22	66.55%
15	1025.5	21		20.5	61.80%
30	1023	21		18	53.87%
60	1021	21		16	47.54%
120	1019	20		14	41.20%
425	1018	21		13	38.03%
1440	1013	21		8	22.18%

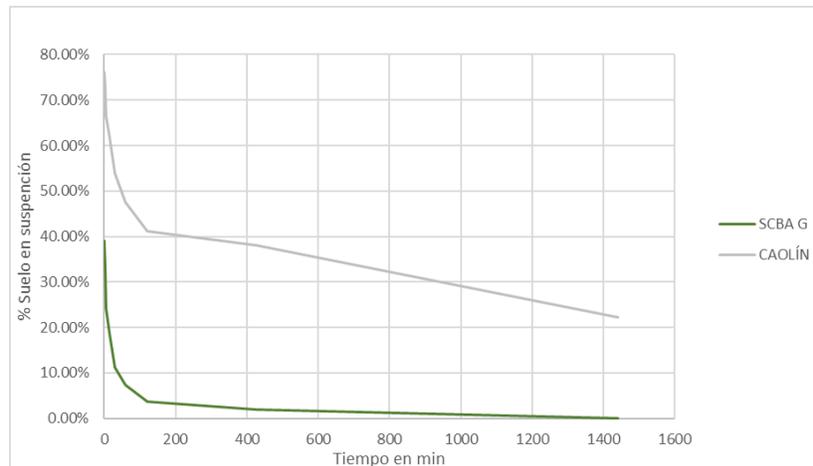
*Tabla 11 Continuación Resultados Hidrometría Caolín.
fuente: Propia*

Ilustración 9 Densidad aparente vs Tiempo.



fuelle: Propia

Ilustración 10 % Suelo en suspensión Vs Tiempo.



fuelle: Propia

- **Gravedad específica**

Se llevó a cabo mediante la implementación del Método A específico para mezclas húmedas. En este proceso, se utilizaron los valores densidad y coeficiente K de la Tabla 12 como referencia de la norma invias E 128, de la cual se extrajeron los valores críticos de densidad y el coeficiente de corrección "k" en función de la temperatura. Este enfoque metodológico garantiza una evaluación precisa y adecuada de las propiedades relevantes de las mezclas en estado húmedo, aprovechando la información detallada proporcionada por la tabla para ajustar los parámetros clave según las variaciones térmicas observadas.

Temperatura (°C)	Densidad (g/cm ³)	Coeficiente (K)
19	0.99841	1.0002
22.6	0.99848	0.99943

*Tabla 12 Densidad de agua y Coeficiente de corrección por temperatura.
fuente: Tomado de Norma Invias E 128.*

Para las cuales se emplearon las ecuaciones descritas en la norma invias 128, Calculando la masa del picnómetro a temperatura de ensayo.

$$M_{pwt} = M_p + (V_p * \rho_{w,t})$$

Posteriormente se calculó la gravedad específica de las partículas sólidas del suelo a la temperatura de ensayo.

$$G_t = \frac{\rho_s}{\rho_{w,t}} = \frac{M_s}{[M_{pwt} - (M_{pws,t} - M_s)]}$$

Se realizó la corrección a temperatura estándar 20°C de la gravedad específica.

$$G_{20^{\circ}C} = K * G_t$$

Material	SCBA	CAOLÍN
picnómetro ml	500	500
M _{picnómetro}	150.9	160.14
M _{picnómetro+agua}	652.5	657
M _{picnómetro+agua + suelo}	702.56	720.42
N° platón	101	-
P _{platón}	111.5	115.5
P _{platón} + P _{muestra seca}	204.4	215.9
M _s	92.9	100.4
T°	19	22.6
V _p	502.4	497.6
G _t	2.169	2.715
K	1.0002	0.99943
(g/cm ³)	0.99841	0.99848
G _{20°C}	2.17	2.71

*Tabla 13 Resultados Gravedad específica.
fuente: Propia*

Una vez determinadas las gravedades se prosiguió a determinar las teóricas alcanzables con los diseños de estabilización a desarrollar.

Cemento	SCBA	Caolín	Gravedades combinadas Teóricas
0	10%	90%	2.65
	15%	85%	2.62
	20%	80%	2.59
4%	10%	86%	2.66
	15%	81%	2.64
	20%	76%	2.61

	10%	82%	2.68
8%	15%	77%	2.65
	20%	72%	2.63

Tabla 14 Gravedades teóricas de los diseños.
fuente: Propia

- **Limites**

Límite líquido

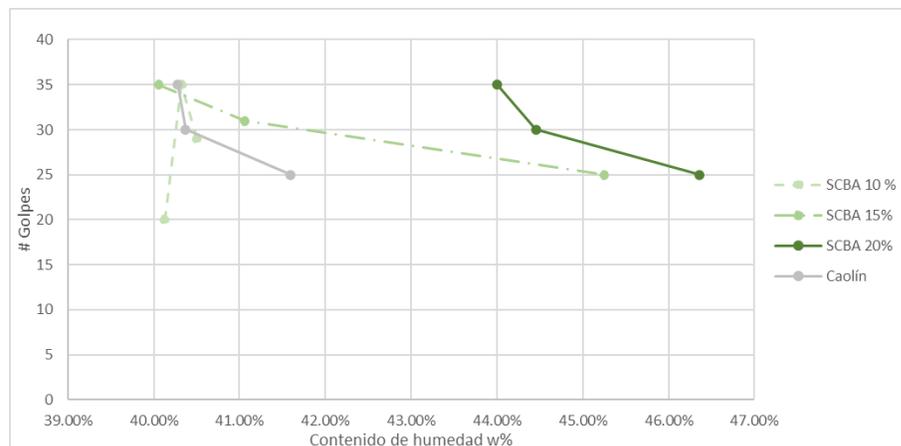
Se estimó el valor del límite líquido con la ecuación.

$$LL_N = W_N * \left[\frac{N}{25} \right]^{0.121}$$

Índice plástico

$$IP = LL - LP$$

Ilustración 11 #golpes Vs Contenido de humedad.



fuente: Propia

Se graficaron los resultados de %w y los golpes necesarios para cerrar los 13 mm .

Por último, se recopilaron en la tabla resumen.

SCBA			
% SCBA	LL	LP	IP
10%	41%	17%	24%
15%	43%	22%	21%
20%	46%	27%	19%
Caolín			
% Caolín	LL	LP	IP
100%	41%	16%	25%

*Tabla 15 Resumen límites
fuente: Propia*

- **Proctor:**

Se desarrolló implementando el método A, en 5 capas 25 golpes por capa.

Para lo cual se llevan rangos de humedad plausibles cercanos al límite plástico determinado en los ensayos de límites, se tomaron nota de los valores de la masa antes y después de compactar en el molde, además del contenido de humedad en la mezcla de suelo.

Se procedió a estimar la masa seca de la fracción de ensayo (M_{sfe}).

$$M_{SFE} = \frac{M_{HFE}}{1 + \frac{W_{EF}}{100}}$$

Seguido de la fracción gruesa.

$$P_{FG} = \frac{M_{SFC}}{M_{SFC} + M_{SFE}} * 100$$

Además, se calculó el porcentaje de la fracción de ensayo.

$$P_{FE} = 100 - P_{FG}$$

Seguido de la humedad de cada submuestra.

$$\rho_H = K * \frac{M_T - M_{MD}}{V}$$

Se determinó la densidad seca de cada submuestra.

$$\rho_d = \frac{\rho_H}{1 + \frac{w}{100}}$$

Finalmente se calculó el peso unitario seco de cada submuestra.

$$\gamma_d = K_1 * \rho_d$$

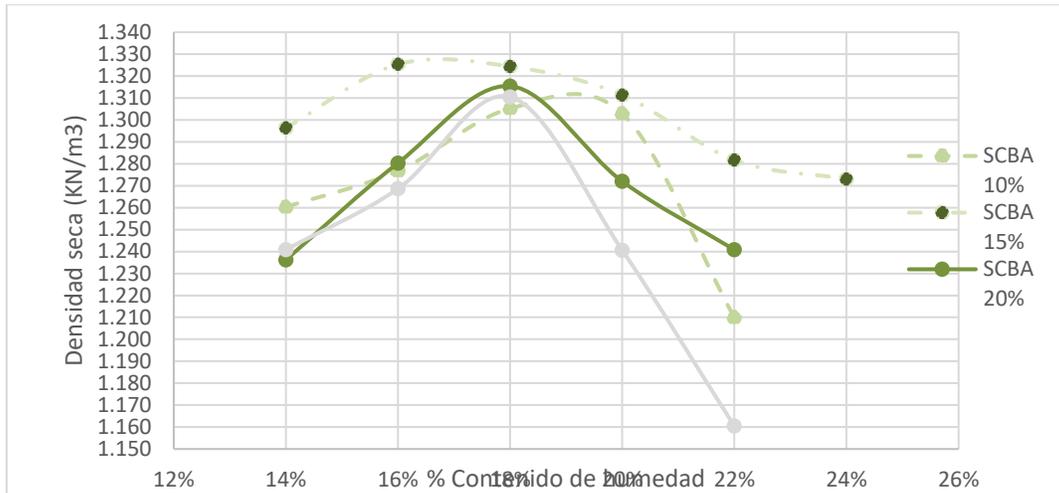
	SCBA		10%
Minicial	3718	w	14%
Mfinal	5455	Msfe	1523.684
Mf-Mi	1737	Pfg	54%
ρH	1.8381	Pfe	46%
Pd	1.2603	γd	12.359
		γd	0.0787
	SCBA		15%
Minicial	3718	w	14%
Mfinal	5515	Msfe	1576.316
Mf-Mi	1797	Pfg	53%
ρH	1.9016	Pfe	47%
Pd	1.2964	γd	12.713
		γd	0.0809

SCBA		20%	
Minicial	3718	w	14%
Mfinal	5415	Msfe	1488.596
Mf-Mi	1697	Pfg	55%
pH	1.7958	Pfe	45%
Pd	1.2362	Yd	12.123
		Yd	0.0772
CAOLÍN		100%	
Minicial	3718	w	14%
Mfinal	5386	Msfe	1463.158
Mf-Mi	1668	Pfg	58%
pH	1.7651	Pfe	42%
Pd	1.2408	Yd	12.168
		Yd	0.0775

*Tabla 16 Proctor de los diseños de mezclas.
fuente: Propia*

Se realizaron los Proctor a contenidos de humedad del (14, 16, 18, 20 y 22)% datos apreciables en el grafico donde es apreciable que el punto óptimo de contenido de humedad se presenta al 18%.

Ilustración 12 Densidad seca Vs % w de las mezclas.



fuelle: Propia.

A partir del gráfico anterior, se construyó la tabla de los resultados de compactación al 18% de contenido de humedad como se muestra a continuación:

W_{Optima}	γ_d (KN/m ³)	P_d (g/cm ³)
Caolín	12.852	1.310
SCBA		
10%	12.799	1.305
15%	12.988	1.324
20%	12.900	1.315

Tabla 17 Resumen densidades y peso específico al 18% humedad.
fuelle: Propia.

Resultados Propiedades físicas.

Utilizando los datos de clasificación, se procedió a la determinación de los diseños correspondientes de estudio, enfocados en sus propiedades físicas. Como resultado de este proceso, se generaron un total de 10 diseños, cada uno diseñado de manera específica para abordar y evaluar aspectos particulares de las

propiedades físicas consideradas relevantes en el contexto de la investigación. Este enfoque metodológico asegura una cobertura integral y detallada de las características físicas de interés en la investigación.

MUESTRA	SCBA	CEMENTO	CAOLÍN
1	0%	0%	100%
2	10%		90%
3	15%	0%	85%
4	20%		80%
5	10%		86%
6	15%	4%	81%
7	20%		76%
8	10%		82%
9	15%	8%	77%
10	20%		72%

*Tabla 18 Diseños de estudio.
fuente: Propia.*

- **CBR:**

Los datos adquiridos de cada ensayo fueron sometidos a un proceso de replicación, con la finalidad de corroborar los resultados obtenidos. Esta práctica de replicación se llevó a cabo para garantizar la confiabilidad y consistencia de los datos, contribuyendo así a la validez y precisión de los hallazgos derivados de la investigación. La aplicación sistemática de réplicas fortalece la robustez de los resultados y proporciona una base sólida para el análisis y la interpretación de los datos experimentales.

M1				M2				M3				M4			
Molde	11	Molde	16	Molde	3	Molde	11	Molde	22	Molde	16	Molde	1	Molde	5
M _m	6844	M _m	8329	M _m	8576	M _m	6842	M _m	8258	M _m	8329	M _m	8579	M _m	8185
M _{mws}	11677	M _{mws}	13197	M _{mws}	13358	M _{mws}	11751	M _{mws}	12830	M _{mws}	12823	M _{mws}	13155	M _{mws}	12706
W _{ac}	18%														
V _m	2310	V _m	2307	V _m	2309	V _m	2310	V _m	2290	V _m	2307	V _m	2322	V _m	2315
M _{sac}	4095.76	M _{sac}	4125.42	M _{sac}	4052.54	M _{sac}	4160.17	M _{sac}	3874.58	M _{sac}	3808.47	M _{sac}	3877.97	M _{sac}	3831.36
Pd	1.77298	Pd	1.78841	Pd	1.75478	Pd	1.80086	Pd	1.69231	Pd	1.65101	Pd	1.67021	Pd	1.65495
Yd	17.38687	Yd	17.53820	Yd	17.20844	Yd	17.66028	Yd	16.59577	Yd	16.19077	Yd	16.37911	Yd	16.22945
M5				M6				M7				M8			
Molde	7	Molde	3	Molde	22	Molde	11	Molde	13	Molde	16	Molde	5	Molde	11
M _m	8451	M _m	8576	M _m	8269	M _m	6849	M _m	8537	M _m	8329	M _m	8183	M _m	6854
M _{mws}	13085	M _{mws}	12941	M _{mws}	12751	M _{mws}	12751	M _{mws}	12862	M _{mws}	12746	M _{mws}	12378	M _{mws}	11685
W _{ac}	18%														
V _m	2319	V _m	2309	V _m	2290	V _m	2310	V _m	2323	V _m	2307	V _m	2315	V _m	2310
M _{sac}	3927.12	M _{sac}	3699.15	M _{sac}	3798.31	M _{sac}	5001.69	M _{sac}	3665.25	M _{sac}	3743.22	M _{sac}	3555.08	M _{sac}	4094.07
Pd	1.69319	Pd	1.60176	Pd	1.65899	Pd	2.16514	Pd	1.57786	Pd	1.62272	Pd	1.53562	Pd	1.77224
Yd	16.60441	Yd	15.70783	Yd	16.26908	Yd	21.23263	Yd	15.47346	Yd	15.91336	Yd	15.05918	Yd	17.37967
M9				M10											
Molde	1	Molde	22	Molde	4	Molde	7								
M _m	8577	M _m	8264	M _m	8131	M _m	8454								
M _{mws}	12988	M _{mws}	12751	M _{mws}	12468	M _{mws}	13203								
W _{ac}	18%														
V _m	2322	V _m	2290	V _m	2319	V _m	2319								
M _{sac}	3738.14	M _{sac}	3802.97	M _{sac}	3675.42	M _{sac}	4024.58								
Pd	1.60999	Pd	1.66103	Pd	1.58481	Pd	1.73521								
Yd	15.78852	Yd	16.28905	Yd	15.54161	Yd	17.01647								

Tabla 19 Datos brutos CBR de los diseños.
fuente: Propia.

Expansión.

	M1		M2		M3		M4		M5	
# Molde	11	16	3	11	22	16	1	5	7	3
0 H	0.8	0.8	0.3	0.7	0.3	0.3	0	0.8	0.8	0.8
48 H (in)	0.922	0.913	0.389	0.792	0.378	0.361	0.05	0.86	0.812	0.856
48 H (mm)	3.0988	2.8702	2.2606	2.3368	1.9812	1.5494	1.27	1.524	0.3048	1.4224
% Expansión	2.66%	2.47%	1.94%	2.01%	1.70%	1.33%	1.09%	1.31%	0.262%	1.222%
% Expansión Promedio	2.56%		1.97%		1.52%		1.20%		0.742%	
	M6		M7		M8		M9		M10	
# Molde	22	11	13	16	5	11	1	22	4	7
0 H	0.9	0.8	0.7	0.7	0.8	0.9	0.7	0.3	0	0
48 H (in)	0.908	0.825	0.716	0.708	0.81	0.912	0.712	0.318	0.006	0.006
48 H (mm)	0.2032	0.635	0.4064	0.2032	0.254	0.3048	0.3048	0.4572	0.1524	0.1524

% Expansión	0.175%	0.545%	0.349%	0.175%	0.218%	0.262%	0.262%	0.393%	0.131%	0.131%
% Expansión	0.360%		0.262%		0.240%		0.327%		0.131%	

*Tabla 20 Resultados de expansión de CBR a 48 Hrs.
fuente: Propia.*

Datos recopilados luego de sumergencia a 48horas.

Posterior a saturación del suelo durante 48 horas se procedió a penetrar los moldes de los cuales se obtuvieron los datos de carga mencionando que se les aplico la sobrecarga de 4 kg durante los 2 días y durante la penetración, de manera que con los datos recopilados se realizó el grafico de penetración como un esfuerzo en función de la deformación unitaria en mm.

Para lo cual se midió el diámetro de penetración y se determinó su área correspondiente la cual divide la carga aplicada durante el ensayo.

$$Es = \frac{C}{A}$$

De esta forma se obtuvo la siguiente tabla de resultados.

Penetración (mm)	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.635	0.035	0.061	0.091	0.081	0.157	0.117	0.137	0.132	0.147	0.193
1.27	0.086	0.091	0.385	0.172	0.401	0.177	0.401	0.299	0.522	0.735
1.905	0.127	0.274	1.445	0.335	1.111	0.390	1.131	0.882	1.278	3.382
2.54	0.183	0.340	1.902	0.583	1.973	0.776	1.907	1.628	1.435	5.477
3.175	0.259	0.441	2.206	0.862	2.561	1.410	2.495	2.338	2.064	6.988
3.81	0.390	0.558	2.353	1.131	2.941	2.039	2.951	2.972	2.698	8.220
4.445	0.573	0.695	2.358	1.354	3.250	2.571	3.342	3.387	3.565	9.092

5.08	0.801	0.887	2.449	1.557	3.499	2.987	3.651	3.555	4.331	9.959
7.62	1.653	1.607	2.444	2.282	4.173	3.869	4.513	3.854	5.456	11.658
10.16	2.262	2.150	2.464	2.830	4.599	4.326	5.137	4.376	6.252	11.744
12.7	2.738	2.551	2.551	3.281	4.990	4.650	5.649	4.924	6.704	11.831

*Tabla 21 Valores máximos.
fuente: Propia*

Penetración (mm)	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.635	0.041	0.112	0.112	0.096	0.117	0.091	0.091	0.066	0.076	0.142
1.27	0.096	0.294	0.603	0.167	0.172	0.142	0.299	0.188	0.350	0.593
1.905	0.162	0.974	1.024	0.289	0.218	0.330	0.877	0.603	0.908	2.804
2.54	0.223	1.354	1.263	0.396	0.461	0.659	1.496	1.141	1.024	4.554
3.175	0.289	1.592	1.435	0.563	0.801	1.207	1.957	1.648	1.486	5.811
3.81	0.390	1.810	1.577	0.715	0.999	1.749	2.323	2.104	1.952	6.841
4.445	0.538	1.978	1.678	0.877	1.171	2.211	2.632	2.404	2.586	7.566
5.08	0.745	2.115	1.755	1.029	1.602	2.571	2.875	2.520	3.149	8.291
7.62	1.450	2.470	1.937	1.572	2.373	3.332	3.560	2.738	3.976	9.711
10.16	2.084	2.566	2.028	2.084	2.819	3.727	4.052	3.109	4.564	9.782
12.7	2.571	2.480	2.145	2.566	3.230	4.006	4.457	3.504	4.893	9.853

*Tabla 22 Valores mínimos.
fuente: Propia*

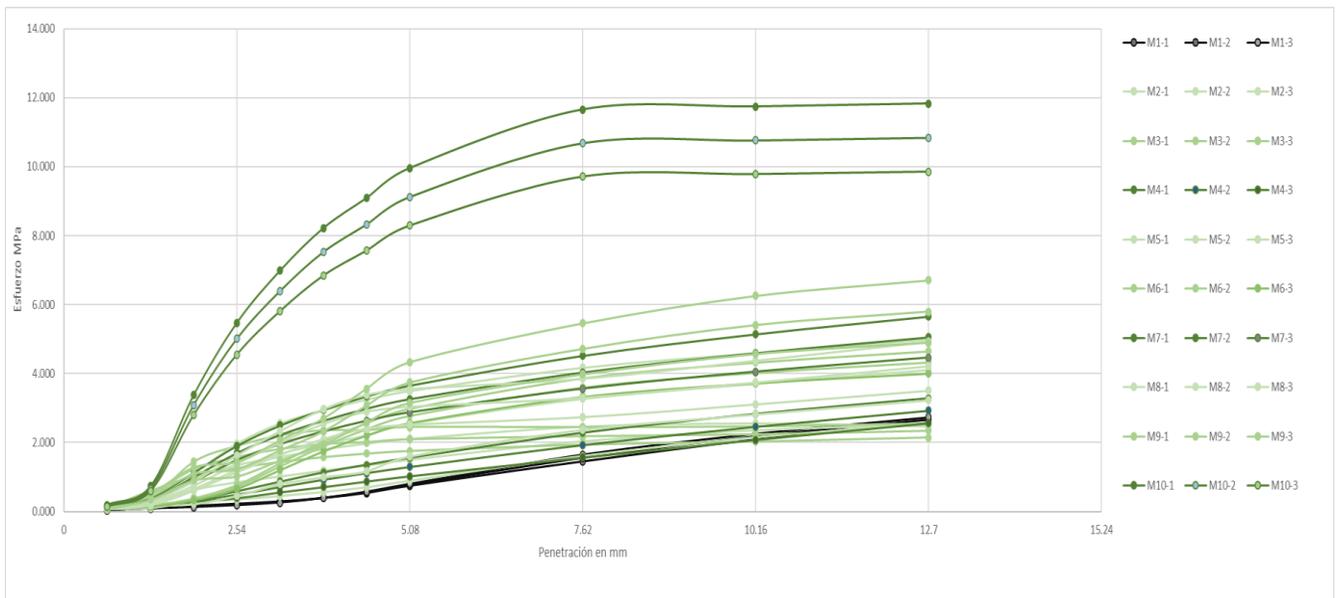
Penetración (mm)	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.635	0.038	0.086	0.101	0.089	0.137	0.104	0.114	0.099	0.112	0.167
1.27	0.091	0.193	0.494	0.170	0.287	0.160	0.350	0.243	0.436	0.664
1.905	0.145	0.624	1.235	0.312	0.664	0.360	1.004	0.743	1.093	3.093
2.54	0.203	0.847	1.582	0.489	1.217	0.718	1.701	1.384	1.230	5.015
3.175	0.274	1.017	1.820	0.712	1.681	1.308	2.226	1.993	1.775	6.400
3.81	0.390	1.184	1.965	0.923	1.970	1.894	2.637	2.538	2.325	7.530
4.445	0.555	1.336	2.018	1.116	2.211	2.391	2.987	2.896	3.076	8.329
5.08	0.773	1.501	2.102	1.293	2.551	2.779	3.263	3.038	3.740	9.125
7.62	1.552	2.039	2.191	1.927	3.273	3.600	4.036	3.296	4.716	10.685

10.16	2.173	2.358	2.246	2.457	3.709	4.026	4.594	3.742	5.408	10.763
12.7	2.655	2.515	2.348	2.923	4.110	4.328	5.053	4.214	5.799	10.842

*Tabla 23 Valores medios.
fuente: Propia*

Obteniendo su correspondiente gráfica.

Ilustración 13 Resultados sin corrección.



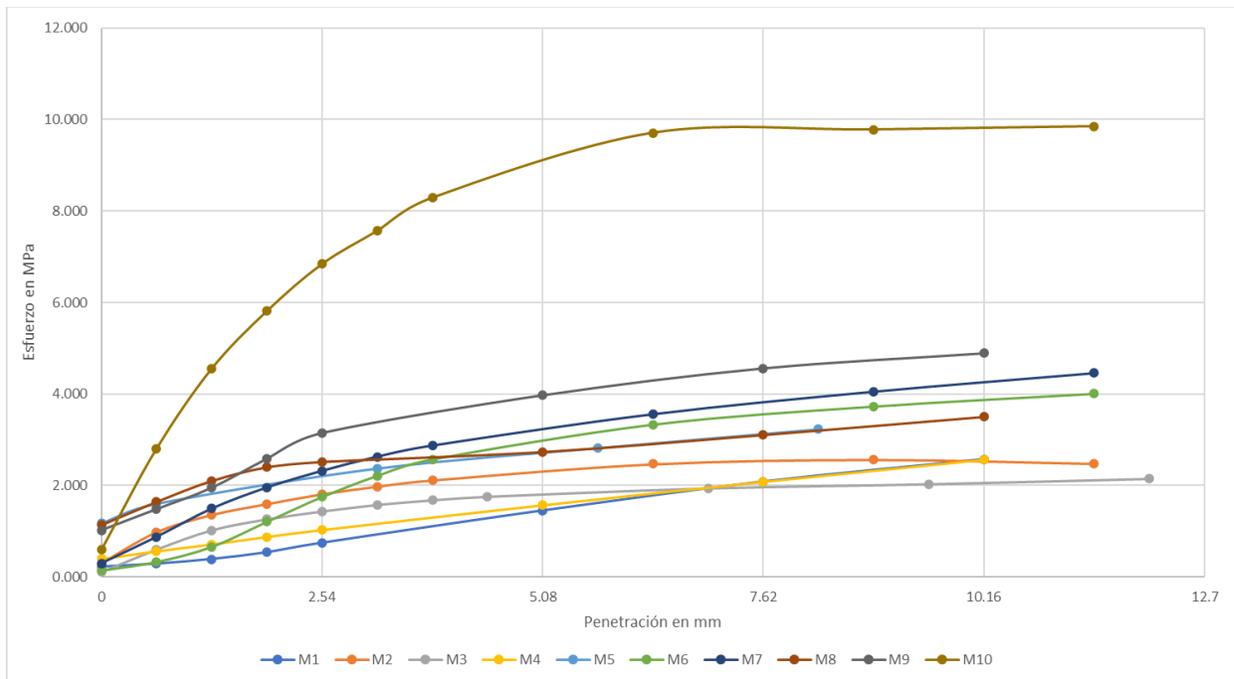
fuente: Propia

Por consiguiente, se procedió a realizar una corrección de las gráficas por norma.

De las cuales se pudo estimar el CBR.

Valores mínimos

Ilustración 14 Corrección valores mínimos.



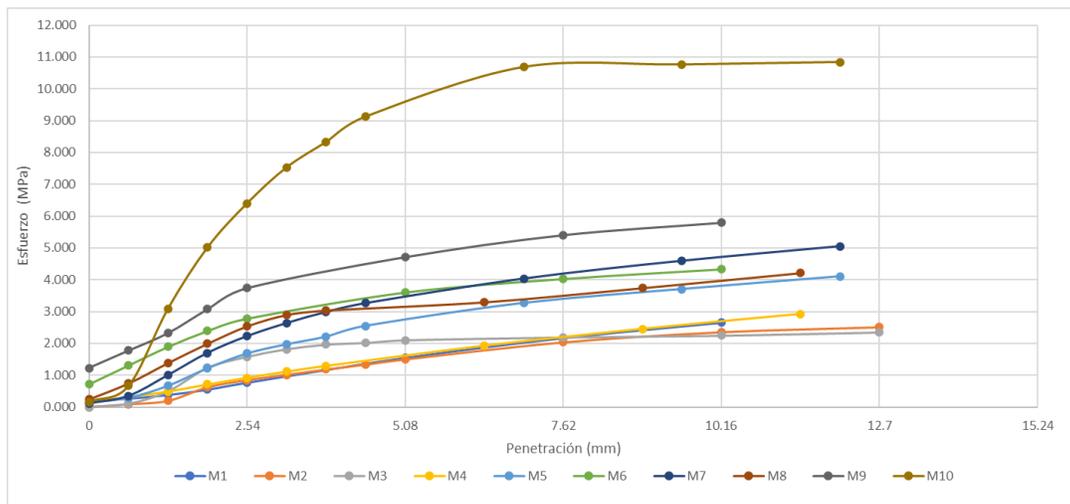
fuelle: Propia

	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10
CBR (2.54)	10%	20%	21%	15%	29%	25%	34%	37%	46%	99%
CBR (5.08)	13%	20%	19%	15%	17%	29%	34%	26%	38%	80%

Tabla 24 Valores de CBR.
fuelle: Propia.

Valores medios

Ilustración 15 Corrección valores medios



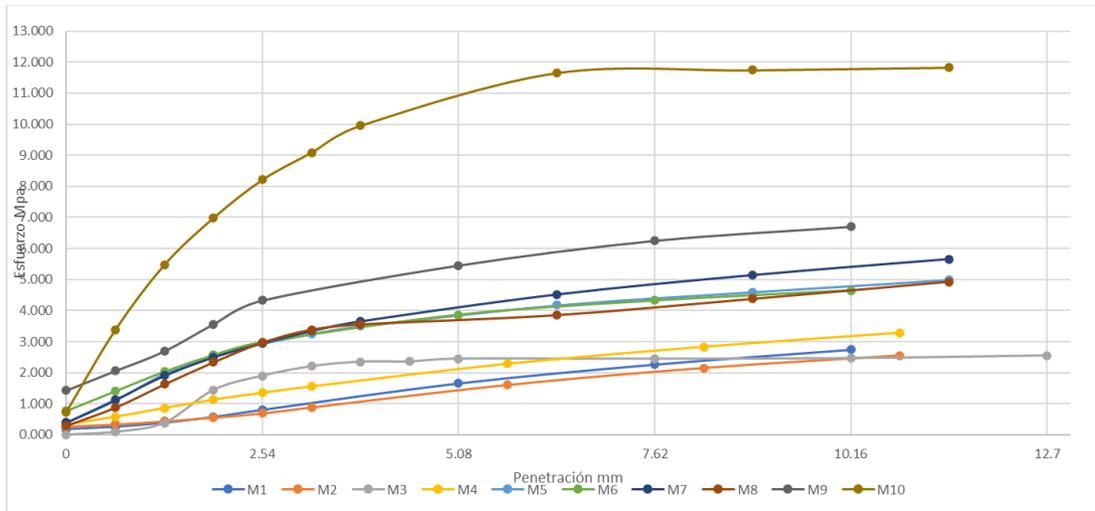
fuelle: Propia

	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10
CBR (2.54)	12%	13%	25%	14%	26%	43%	35%	40%	59%	100%
CBR (5.08)	15%	15%	20%	19%	27%	35%	34%	32%	46%	94%

Tabla 25 Valores medios CBR.
fuelle: Propia

Valores máximos.

Ilustración 16 Corrección valores máximos.



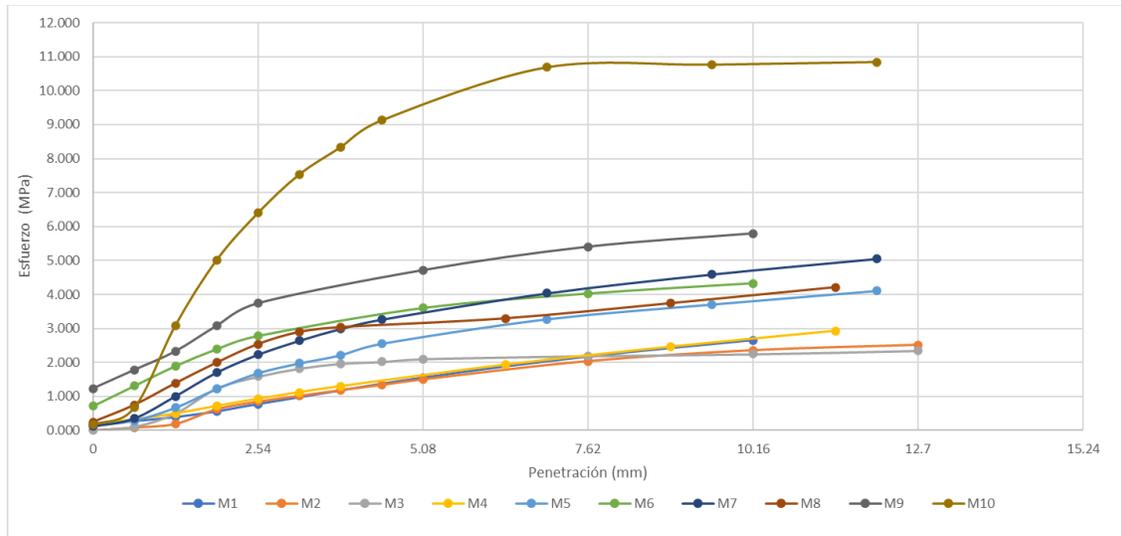
fuentes: Propia.

	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10
CBR (2.54)	12%	10%	28%	20%	43%	43%	43%	43%	63%	119%
CBR (5.08)	16%	16%	24%	22%	37%	37%	44%	37%	53%	105%

Tabla 26 Resultados CBR.
fuente: Propia.

Valores medios.

Ilustración 17 Corrección de las curvas CBR.



fuentes: Propia.

	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10
CBR (2.54)	12%	13%	25%	14%	26%	43%	35%	40%	59%	100%
CBR (5.08)	15%	15%	20%	19%	27%	35%	34%	32%	46%	94%

Tabla 27 Resultados CBR.

fuentes: Propia.

- **Metodología Marshall:**

Se realizó la respectiva toma de las dimensiones de las probetas, para posteriormente realizar los cálculos correspondientes de tal manera se obtuvieron los datos necesarios para la determinación de los parámetros de fractura para ello se utilizó una maquina universal la cual fallo las briquetas.

Dimensiones					
MEZCLAS	DIAMETRO	Promedio	ALTURA	Promedio	MASA (g)
	99.04		55.53		
M 1-1	98.43	98.61	56.55	56.12	817.00
	98.35		56.27		
	98.55		57.40		
M 1-2	98.69	98.66	57.60	57.43	816.00
	98.74		57.30		
	99.91		72.15		
M 2-1	99.43	99.73	72.17	72.17	1011.00
	99.86		72.20		
	99.90		69.42		
M 2-2	99.94	99.18	70.39	69.88	978.00
	97.70		69.84		
	100.55		49.57		
M 3-1	100.70	100.59	49.69	49.47	688.00
	100.53		49.15		
	100.75		43.49		
M 3-2	100.20	100.86	43.37	43.42	607.00
	101.64		43.40		
	99.93		58.05		
M 4-1	100.01	99.85	57.80	57.72	806.00
	99.61		57.30		
	100.24		58.74		
M 4-2	99.22	99.79	58.49	58.67	817.00
	99.90		58.78		
	100.93		58.40		
M 5-1	100.66	100.70	57.94	58.26	836.00
	100.50		58.43		
	100.42		58.39		
M 5-2	100.35	100.39	58.20	58.27	838.00
	100.40		58.23		
	100.30		60.66		
M 6-1	100.40	100.37	60.20	60.40	815.00
	100.40		60.34		
	100.37		62.93		
M 6-2	99.90	100.19	62.85	62.88	850.00
	100.29		62.87		

	100.52		61.55		
M 7-1	101.10	100.75	61.17	61.40	822.00
	100.63		61.48		
	101.80		69.68		
M 7-2	100.60	101.05	69.59	69.59	941.00
	100.75		69.49		
	100.53		61.81		
M 8-1	101.15	100.75	61.53	61.48	857.00
	100.56		61.10		
	100.70		62.72		
M 8-2	100.60	100.33	62.35	62.39	867.00
	99.70		62.10		
	100.35		63.49		
M 9-1	100.22	100.38	63.56	63.41	878.00
	100.58		63.17		
	100.46		64.03		
M 9-2	100.65	100.49	64.40	64.16	895.00
	100.35		64.05		
	99.78		66.48		
M 10-1	100.83	101.05	66.09	66.29	900.00
	102.53		66.31		
	101.55		63.11		
M 10-2	101.01	101.35	63.02	63.04	853.00
	101.49		63.00		

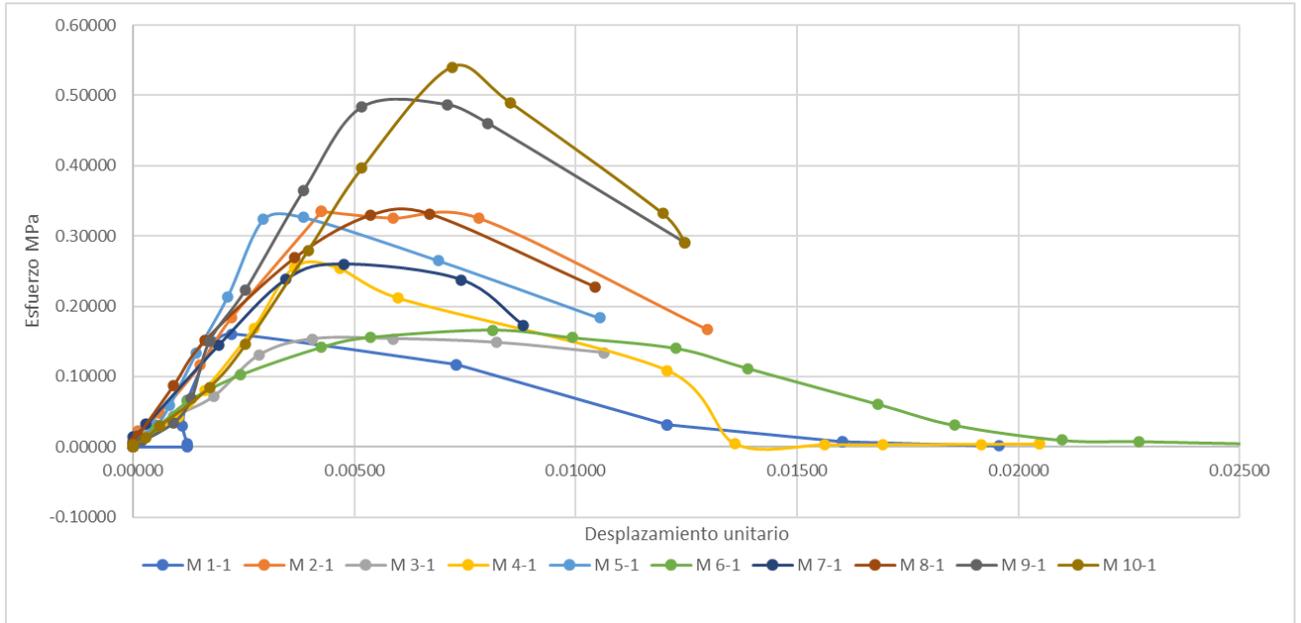
*Tabla 28 Tabla de Dimensiones de las briquetas.
fuente: Propia.*

De tal manera que se obtiene la siguiente tabla de resultados.

SCBA %	MEZCLAS	DIAMETRO	ALTURA	MASA (g)	Área mm ²	Volumen cm ³	DENSIDAD (g/cm ³)	Carga (N)	Mpa
0	M 1-1	98.61	56.12	817.00	7636.64	428.54	1.91	1.23	0.16
10	M 2-1	99.73	72.17	1011.00	7812.15	563.83	1.79	2.62	0.33
15	M 3-1	100.59	49.47	688.00	7947.46	393.16	1.75	1.61	0.20
20	M 4-1	99.85	57.72	806.00	7830.44	451.95	1.78	2.00	0.25
10	M 5-1	100.70	58.26	836.00	7963.79	463.94	1.80	2.55	0.32
15	M 6-1	100.37	60.40	815.00	7911.68	477.87	1.71	1.30	0.16
20	M 7-1	100.75	61.40	822.00	7972.23	489.50	1.68	2.03	0.25
10	M 8-1	100.75	61.48	857.00	7971.71	490.10	1.75	2.59	0.33
15	M 9-1	100.38	63.41	878.00	7914.31	501.82	1.75	3.80	0.48
20	M 10-1	101.05	66.29	900.00	8019.25	531.62	1.69	4.22	0.53

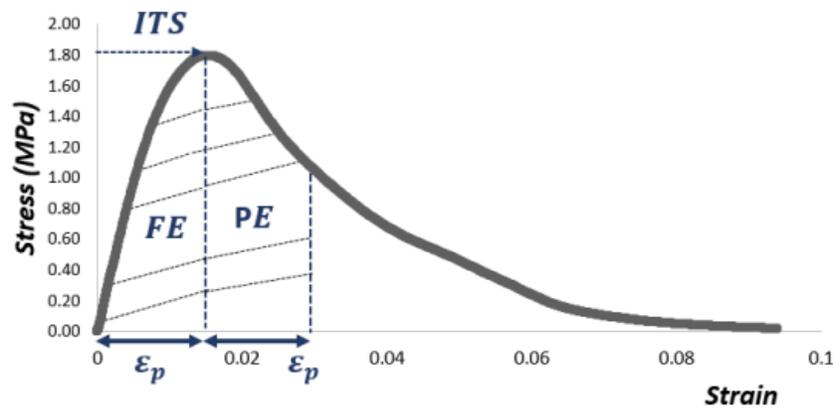
*Tabla 29 Datos tracción indirecta.
fuente: Propia.*

Ilustración 18 Parámetros de fractura



fuente: Propia.

Ilustración 19 Parámetros de fractura.



fuente: Tomado de Explorando los efectos de la adición de calamina en el desempeño de la mezcla asfáltica en caliente. Una solución sostenible en el campo de la ingeniería de pavimentos.

Muestra	ITS	ϵ	$2\epsilon_p$	FE	PE	Total
M 1-1	0.16	0.00223	0.00446	0.00013	0.00084	0.00097
M 2-1	0.33	0.00426	0.00852	0.00020	0.00316	0.00336
M 3-1	0.15	0.00406	0.00811	0.00035	0.00133	0.00169
M 4-1	0.26	0.00365	0.00730	0.00039	0.00204	0.00243
M 5-1	0.33	0.00294	0.00588	0.00042	0.00244	0.00286
M 6-1	0.17	0.00811	0.01623	0.00097	0.00207	0.00304
M 7-1	0.26	0.00477	0.00953	0.00077	0.00172	0.00249
M 8-1	0.33	0.00669	0.01339	0.00151	0.00256	0.00406
M 9-1	0.49	0.00710	0.01420	0.00212	0.00422	0.00634
M 10-1	0.54	0.00720	0.01440	0.00183	0.00408	0.00592

Tabla 30 Resultados de parámetros de fractura.
fuente: Propia

Flujo Marshall

SCBA %	MEZCLAS	DIAMETRO	ALTURA	MASA (g)	Área mm ²	Volumen cm ³	DENSIDAD (g/cm ³)	Carga (N)	Mpa
0	M 1-2	98.66	57.43	816.00	7644.91	439.07	1.86	4.09	0.54
10	M 2-2	99.18	69.88	978.00	7725.70	539.90	1.81	27.05	3.50
15	M 3-2	100.86	43.42	607.00	7990.18	346.93	1.75	14.07	1.76
20	M 4-2	99.79	58.67	817.00	7820.51	458.83	1.78	17.63	2.25
10	M 5-2	100.39	58.27	838.00	7915.36	461.25	1.82	27.17	3.43
15	M 6-2	100.19	62.88	850.00	7883.33	495.73	1.71	15.86	2.01
20	M 7-2	101.05	69.59	941.00	8019.78	558.07	1.69	22.27	2.78
10	M 8-2	100.33	62.39	867.00	7906.43	493.28	1.76	19.70	2.49
15	M 9-2	100.49	64.16	895.00	7930.61	508.83	1.76	30.73	3.88
20	M 10-2	101.35	63.04	853.00	8067.47	508.60	1.68	30.16	3.74

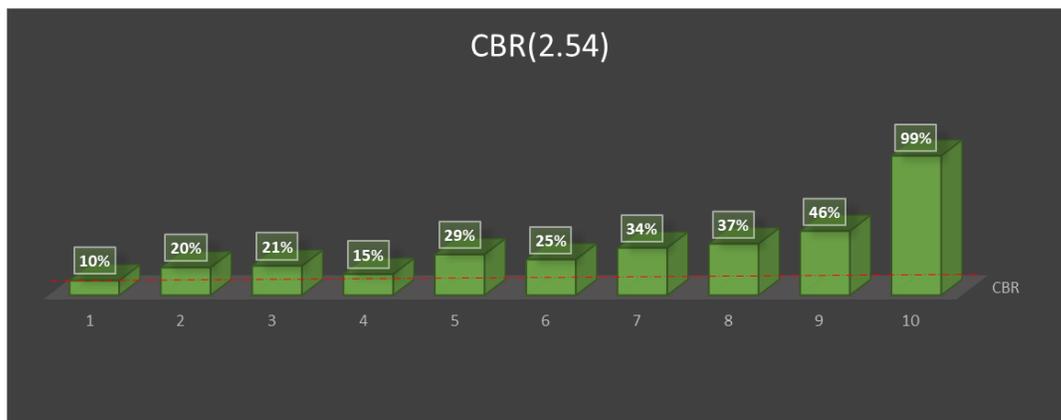
Tabla 31 Resultados Flujo Marshall.
fuente: Propia

Análisis de resultados.

CBR:

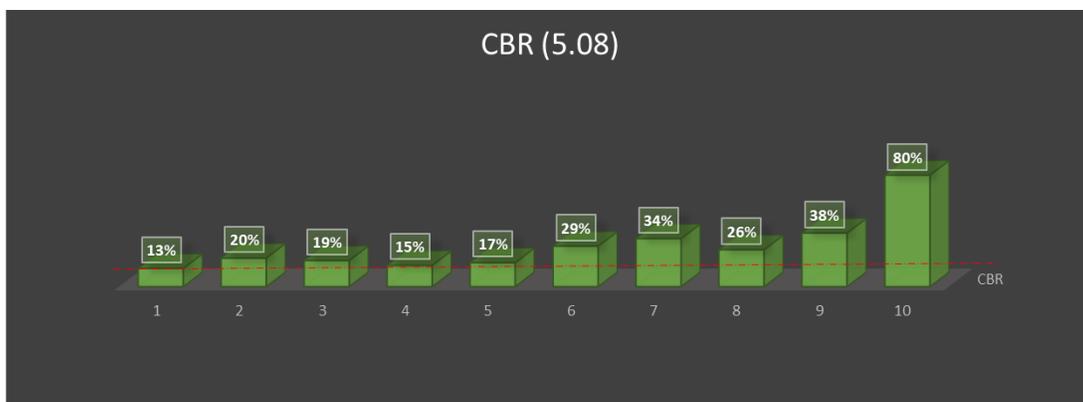
A partir de los ensayos efectuados, se ha logrado discernir que la muestra 1, la cual representa el suelo inalterado y sirve como punto de referencia, exhibe un comportamiento comparativo. Se evidencia que la incorporación de diversas adiciones ha generado mejoras significativas en las propiedades analizadas.

Ilustración 20 Valores de CBR Mínimos a (2,54).



fuelle: Propia

Ilustración 21 Valores de CBR Mínimos a (5.08).



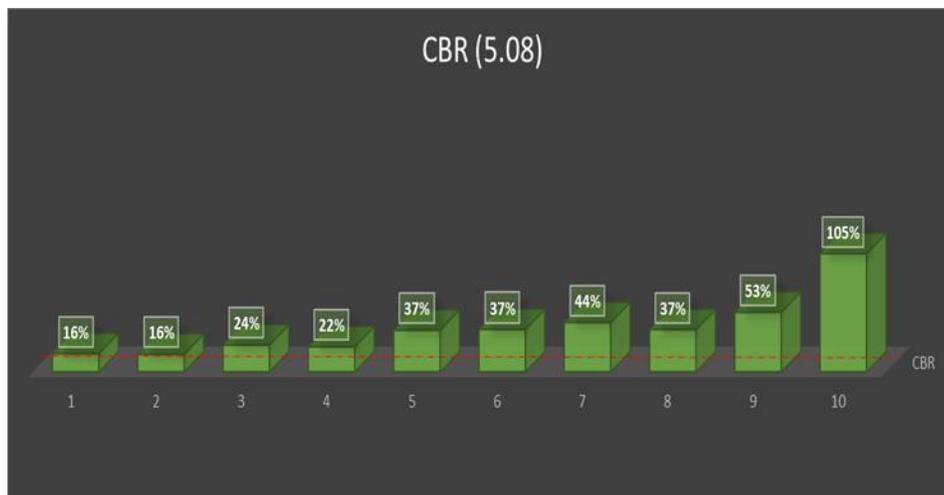
fuelle: Propia

Ilustración 22 Resultados Máximos de CBR (2,54)



fuelle: Propia

Ilustración 23 Resultados Máximos de CBR (5.08)

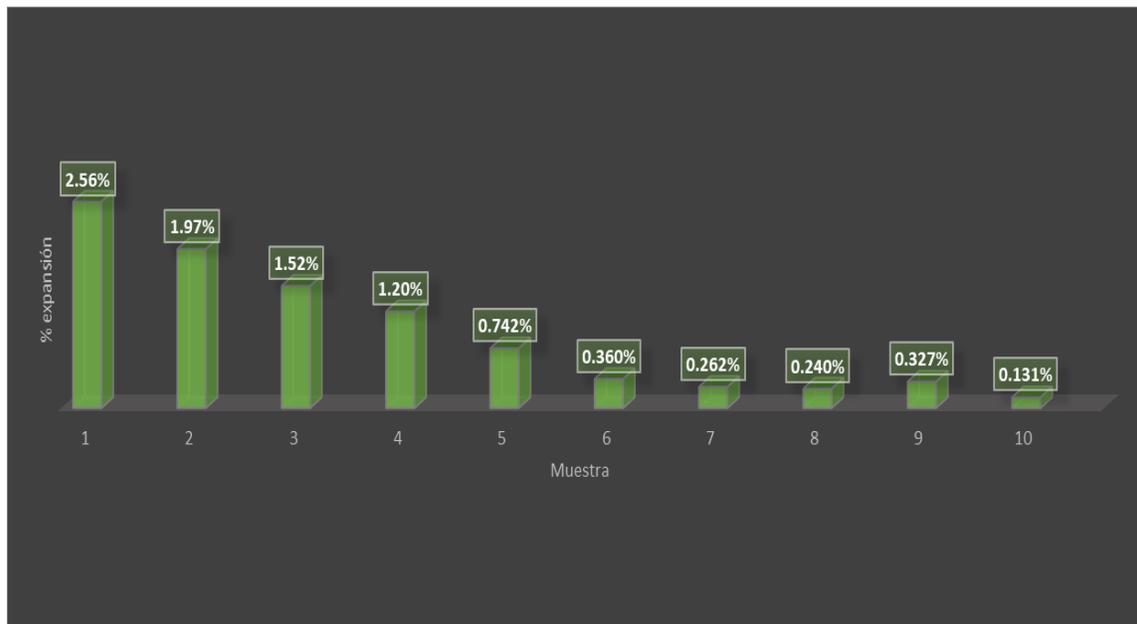


fuelle: Propia

La evaluación de los datos promedio resalta un comportamiento coherente con las variaciones observadas en los valores extremos, indicando una consistencia general en las mediciones realizadas. Este fenómeno refuerza la fiabilidad y representatividad de los resultados obtenidos a lo largo de las pruebas,

proporcionando una perspectiva más completa sobre las características y tendencias del sistema analizado.

Ilustración 24 Expansión de CBR.

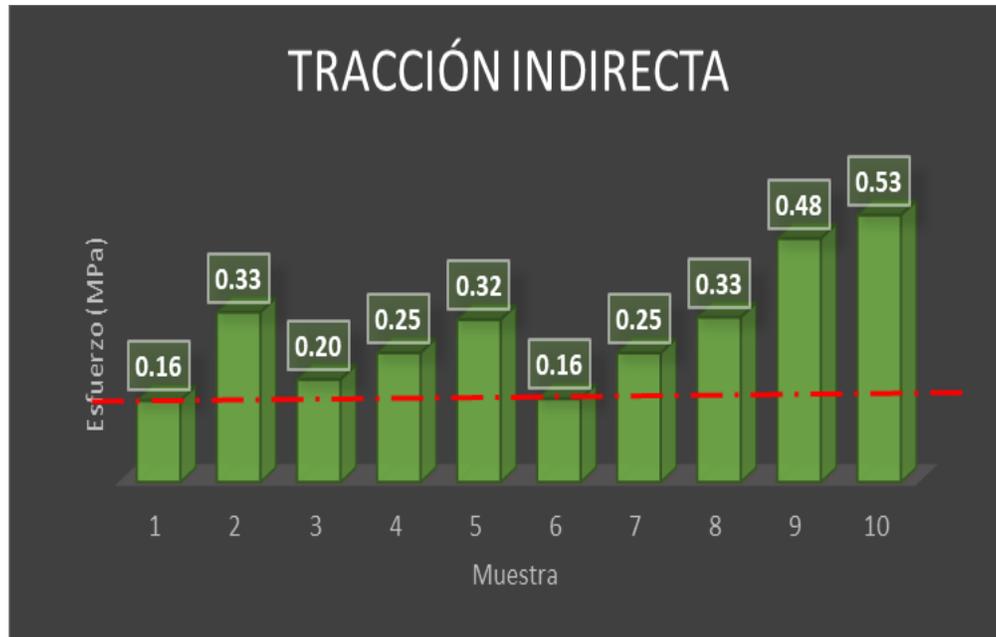


fuentes: Propia.

Los resultados más sobresalientes se evidencian en las muestras correspondientes a los números (5-10) del conjunto evaluado. Se observa un notable impacto en la reducción de la expansión del suelo en condiciones de saturación durante un periodo de 48 horas, como consecuencia directa de la adición de SCBA. Este fenómeno subraya la eficacia de la incorporación de SCBA en mitigar la expansión del suelo, un indicador clave en la evaluación de la estabilidad y comportamiento mecánico del material bajo condiciones específicas de saturación.

Tracción indirecta

Ilustración 25. Tracción indirecta



fuentes: Propia

El análisis de los resultados del ensayo de tracción indirecta subraya de manera significativa que las muestras bajo consideración, especialmente aquellas designadas como 2 a 5 y 7 a 10, exhiben un desempeño que supera ampliamente a la muestra de referencia, identificada como muestra 1. Este fenómeno evidencia una mejora sustancial en la resistencia a la tracción de las mezclas modificadas, indicando un fortalecimiento estructural atribuible a la introducción de SCBA. La capacidad superior de las muestras 2 a 5 y 7 a 10, para resistir fuerzas de tracción indirecta sugiere una mejora notable en la cohesión y capacidad de soporte, aspectos críticos en la evaluación de la estabilidad y resistencia mecánica de las mezclas bajo condiciones de carga específicas. Este hallazgo refuerza la idoneidad y eficacia de la adición de SCBA en la optimización de las propiedades mecánicas

de las mezclas evaluadas, consolidando la validez de este enfoque en el contexto de la ingeniería de suelos estabilizados.

Adicionalmente, se llevó a cabo el análisis de la estabilidad y flujo según la metodología Marshall.

Ilustración 26 Estabilidad Flujo Marshall



fuentes: Propia

La evaluación de los resultados obtenidos a través de los ensayos Marshall, específicamente en términos de estabilidad y flujo, orientados exclusivamente hacia la capacidad de resistencia a la deformación, revela de manera notoria que todas las incorporaciones de Sugar Cane Bagasse Ash (SCBA) superan significativamente a la muestra de referencia, evidenciándose valores incrementados en un rango de 3 a 7 veces. Este fenómeno indica una mejora sustancial en la capacidad de las mezclas modificadas para resistir deformaciones bajo condiciones de carga, lo que implica un fortalecimiento estructural derivado de

la adición de SCBA. Estos resultados refuerzan la eficacia de la inclusión de SCBA en la mejora de las propiedades mecánicas de las mezclas evaluadas, destacando su impacto positivo en la capacidad de resistencia a la deformación, aspecto crucial en la evaluación de la durabilidad y rendimiento de las estructuras sometidas a cargas repetitivas.

Conclusiones y recomendaciones.

Conclusiones

- La integración eficaz de SCBA en el proceso de estabilización del suelo cemento se traduce en una mejora sustancial de los resultados, optimizando las propiedades mecánicas y de durabilidad de la estructura. Las adiciones estratégicas de SCBA demuestran un impacto positivo en la matriz cementante, fortaleciendo la cohesión y la resistencia del suelo.
- La SCBA, al actuar como material cementante suplementario, revela su potencial latente cuando es aplicado en sinergia con el cemento. Este fenómeno se manifiesta mediante la optimización de las propiedades físicas y químicas de la mezcla, potenciando así la capacidad de carga y la resistencia a la tracción de la estructura.
- Al analizar las mezclas de los diseños desarrollados, se destaca que las combinaciones M9 y M10, con contenidos de cemento (C de 8%) y SCBA (del 15 y 20)% respectivamente, exhiben un comportamiento superior tanto en términos de CBR como de resistencia a la tracción indirecta. Estos resultados indican una sinergia eficaz entre el cemento y la SCBA, proporcionando una combinación óptima de propiedades mecánicas que

favorecen la estabilidad estructural.

- En el contexto de suelos blandos, la incorporación de SCBA manifiesta una reducción significativa en la expansión del suelo en presencia de agua. Esta disminución en la expansión, como resultado de la estabilización entre la SCBA y el suelo blando, sugiere un efecto estabilizador que mitiga los problemas asociados a la absorción de humedad, contribuyendo así a la sostenibilidad y durabilidad de las estructuras sobre este tipo de suelos.
- Este conjunto de la eficacia y relevancia de la incorporación de SCBA en la estabilización de suelo cemento, destacando su potencial para mejorar las propiedades mecánicas y durabilidad de las estructuras geotecnias.

Recomendaciones

- Como recomendación, se subraya la importancia de que en futuras investigaciones contemplen la ejecución de pruebas de compresión encofinada y la realización de ensayos de módulos resilientes. Estas evaluaciones adicionales proporcionarían una visión más completa y detallada de las propiedades mecánicas y el comportamiento estructural de las mezclas de suelo cemento estabilizadas con SCBA. La incorporación del estudio de compresión inconfined permitiría una compresión más profunda de la resistencia intrínsecas de las mezclas, mientras que la investigación de módulos resilientes ofrecerá información valiosa sobre la capacidad de deformación y la respuesta ante cargas cíclicas, aspectos cruciales para evaluar la durabilidad y la funcionalidad a largo plazo de las estructuras geotécnicas.

Referencias

- Antony, J. (2014). Full Factorial Designs. En J. Antony (Ed.), *Design of Experiments for Engineers and Scientists* (pp. 63–85). Elsevier. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/B9780080994178000067>
- Arbeláez Pérez, O. F., Delgado Varela, K. A., & Castañeda Mena, J. D. (2022). Efecto de la incorporación de ceniza de bagazo de caña en las propiedades mecánicas y las emisiones de dióxido de carbono del hormigón preparado con residuos de vidrio. *Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio*. <https://doi.org/10.1016/j.bsecv.2022.08.001>
- Li, Y., Chai, J., Wang, R., Zhang, X., & Si, Z. (2022). *Journal of Building Engineering*, 56(104774), 104774. <https://doi.org/10.1016/j.job.2022.104774>
- Smith, J. D., & Rodríguez, A. M. (2019). Environmental Challenges of Expansive Clays in Colombian Geology. *Journal of Geotechnical Engineering*, 45(2), 210-225.
- García, L. C., & Pérez, R. S. (2020). Sustainable Approaches to Soil Stabilization: Utilizing Waste Materials. *Environmental Engineering Review*, 28(3), 187-201.
- López, E. F., & Ramírez, G. A. (2018). Valorization of Sugarcane Bagasse Ash in Construction Applications: A Review. *Construction and Building Materials*, 172, 124-136.
- González, M. A., & Martínez, P. D. (2021). Utilization of Sugarcane Bagasse Ash for Soil Stabilization: Experimental Study on Expansive Clays. *Geotechnical Innovations*, 68(3), 412-428.
- Rodríguez, C. M., & Hernández, A. B. (2017). Potential Environmental Benefits of Incorporating Sugarcane Bagasse Ash in Construction Practices. *Journal of Sustainable Materials and Technologies*, 15(4), 325-340.
- Industria y comercio superintendencia. (2012). *Cadena productiva de la panela en Colombia: diagnóstico de libre competencia (2010-2012)* (Estudio elaborado por la Delegatura de Protección de la Competencia, Vol. 1).