UNIVERSIDAD CATÓLICA SANTO TORIBIO DE MOGROVEJO

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL

Estabilización de suelos arcillosos para subrasantes adicionando ceniza de bagazo de caña de azúcar y ceniza de eucalipto

TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE

INGENIERO CIVIL

AUTOR

Lee Franklin Mego Ruiz

ASESOR

Lucas Ludeña Gutierrez

https://orcid.org/0000-0001-7903-3646

Chiclayo 2026

Estabilización de suelos arcillosos para subrasantes adicionando ceniza de bagazo de caña de azúcar y ceniza de eucalipto

PRESENTADA POR

Lee Franklin Mego Ruiz

A la Facultad de Ingeniería de la
Universidad Católica Santo Toribio de Mogrovejo
para optar el título de

INGENIERO CIVIL

APROBADA POR

Segundo Guillermo Carranza Cieza
PRESIDENTE

Luis Quiroz Quiñonez
SECRETARIO

Lucas Ludeña Gutierrez
VOCAL

Dedicatoria

A mi familia, cuya paciencia, amor y apoyo incondicional me han impulsado siempre a seguir adelante. A mi hermana Vanessa, que guía mi camino y me cuida desde el cielo. También a Wilmer, Axel, Cristian, Jonathan, Douglas, Luisa, Luis y Kiara quienes con su apoyo y ánimo hicieron este camino más llevadero.

Agradecimientos

A Dios por estar siempre conmigo. Al ingeniero civil, Lucas Ludeña Gutiérrez, cuyo conocimiento y dedicación fueron fundamentales para el desarrollo de esta tesis. A mi familia, por su apoyo incondicional y su motivación para seguir adelante. A mis amigos, por todas las risas y valiosas aportaciones a lo largo de esta etapa. También, a todas las personas que, de alguna manera, contribuyeron a este logro, les expreso mi más sincera gratitud.

Estabilización de suelos arcillosos para subrasantes adicionando ceniza de bagazo de caña de azúcar y ceniza de eucalipto

INFORME DE ORIGINALIDAD

19%	18%	7%	7%
INDICE DE SIMILITUD	FUENTES DE INTERNET	PUBLICACIONES	TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1	tesis.usat.edu.pe Fuente de Internet	5%
2	hdl.handle.net Fuente de Internet	4%
3	Submitted to Universidad Cesar Vallejo Trabajo del estudiante	1%
4	repositorio.ucv.edu.pe Fuente de Internet	1%
5	repositorio.utea.edu.pe Fuente de Internet	<1%
6	repositorio.continental.edu.pe Fuente de Internet	<1%
7	Submitted to Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas Trabajo del estudiante	<1%
8	Submitted to Universidad Tecnica De Ambato-Direccion de Investigacion y Desarrollo , DIDE Trabajo del estudiante	<1%
9	laccei.org Fuente de Internet	<1%
10	revistadigital.uce.edu.ec Fuente de Internet	<1%
11	www.researchgate.net	

ÍNDICE

Resumen **11**

Abstract **12**

Introducción **13**

Revisión de la literatura **16**

Bases teóricas **18**

Materiales y métodos **30**

Diseño de investigación **30**

Tipo de investigación **30**

Hipótesis **30**

Unidad de Estudio **30**

Variables y operacionalización **30**

Población, muestra y muestreo **31**

Técnicas e instrumentos de recolección de datos **35**

Criterios de selección **36**

Resultados y discusiones **41**

Conclusiones **74**

Recomendaciones **75**

Referencias **76**

Anexos **79**

LISTA DE TABLAS

Tabla 1: Clases de suelos según las distintas normativas 18
Tabla 2: Suelos finos y granulares 19
Tabla 3: Grado de expansión 20
Tabla 4: Diferencias entre Limos y Arcillas 20
Tabla 5: Categorías de Subrasante 21
Tabla 6: Resultados de FRX de la ceniza de bagazo 22
Tabla 7: Resultados de FRX de la ceniza de Eucalipto 23
Tabla 8. Tamaño de Partícula 24
Tabla 9. Tamices para granulometría según MTC 24
Tabla 10. Clasificación según Indice de Plasticidad 28
Tabla 11. Categorías de Subrasantes según MTC 29
Tabla 12: Operacionalización de Variables 31
Tabla 13: Puntos mínimos de investigación 32
Tabla 14: Muestras para ensayo de Contenido de Humedad 32
Tabla 15: Muestras para ensayo de granulometría por tamizado 33
Tabla 16: Muestras para ensayo de Gravedad específica 33
Tabla 17: Muestras para ensayo de granulometría por sedimentación 33
Tabla 18: Muestras para ensayo de límites de consistencia 33
Tabla 19: Muestras para ensayo de Proctor 34
Tabla 20: Muestras para ensayo de CBR 35
Tabla 21: Metodología, técnica e instrumentos 35
Tabla 22: Coordenadas de las calicastas 37
Tabla 23: Matriz de consistencia 40
Tabla 24: Composición química de ceniza de bagazo de caña de azúcar 41
Tabla 25: Composición Química de Ceniza de Eucalipto 42
Tabla 26. Contenido de humedad 42

Tabla 27. Granulometría por tamizado de C-01 44
Tabla 28. Granulometría por Tamizado de C-02 44
Tabla 29. Granulometría por Tamizado de C-03 45
Tabla 30. Gravedad específica calicata 1 46
Tabla 31. Gravedad específica calicata 2 47
Tabla 32. Gravedad específica calicata 3 48
Tabla 33. Tabla de límites de atterberg calicata 01 52
Tabla 34. Tabla de límites de atterberg calicata 02 53
Tabla 35. Tabla de límites de atterberg calicata 03 54
Tabla 36. Clasificación según AASHTO Y SUCS 55
Tabla 37. Proctor modificado C-01 56
Tabla 38. Proctor modificado C-02 58
Tabla 39. Proctor modificado C-03 60
Tabla 40. Valores de CBR de C-01 61
Tabla 41. Valores de CBR de C-02 62
Tabla 42. Valores de CBR de C-03 63
Tabla 43. Determinación óptima de adición de CBCE 64
Tabla 44. Peso de agente estabilizador 64
Tabla 45. APU- Estabilización de suelos con el 3% de Cal 65
Tabla 46. APU- Estabilización de suelos con el 10% de CBCE 66
Tabla 47. Datos de densidad de campo 68
Tabla 48. Resultados de CBR por DCP para el suelo natural 69
Tabla 49. Resultados de CBR por DCP para el suelo natural + 10% CBCE 69

LISTA DE FIGURAS

Ilustración 1: Fases del suelo 18
Ilustración 2: Curva de la distribución del tamaño de la partícula 19
Ilustración 3: Métodos para estabilizar suelos 21
Ilustración 4. Granulometría por Hidrómetro o por Sedimentación 26
Ilustración 5. Fórmula para una muestra de población infinita 34
Ilustración 6: Membrete de ensayos 35
Ilustración 7: Localización de calicatas en Urb. Santa Isabel 37
Ilustración 8: Extracción de muestra, calicata C-1 38
Ilustración 9: Extracción de muestra, calicata C-2 38
Ilustración 10: Extracción de muestra, calicata C-3 38
Ilustración 11: Recolección de la ceniza de bagazo de caña de azúcar 39
Ilustración 12: Almacenamiento de ceniza de eucalipto 39
Ilustración 13: Recolección de la ceniza de eucalipto 39
Ilustración 14. Densidad de campo de tramo de prueba 67
Ilustración 15. Calcinación de muestra 79
Ilustración 16: Contenido de humedad 79
Ilustración 17: Granulometría por tamizado 79
Ilustración 18: Limites de consistencia 80
Ilustración 19: Gravedad específica 80
Ilustración 20: Proctor modificado 80
Ilustración 21: Granulometría por sedimentación 81
Ilustración 22. Tramo de prueba 82
Ilustración 23. PDC 82
Ilustración 24. Validación de ensayos 83
Ilustración 25. Reporte de FRX 85
Ilustración 26. Gravedad especifica de ceniza de bagazo de caña de azucar 86

Ilustración 27. Gravedad especifica de ceniza de eucalipto 87
Ilustración 28. Ensayo de DPC a SN+10%CBCE..... 88
Ilustración 29. Ensayo de DPC a SN+10%CBCE..... 89
Ilustración 30. Ensayo de DPC a SN+10%CBCE..... 90
Ilustración 31.Ensayo de DPC a SN..... 91
Ilustración 32.Ensayo de DPC a SN..... 92
Ilustración 33.Ensayo de DPC a SN..... 93
Ilustración 34. Recibo de ensayo de FRX 94
Ilustración 35.Guia de remisión de ceniza de bagazo de caña de azúcar 95
Ilustración 36. Informe de densidad de campo 96
Ilustración 37. Certificado de calibración de balanza 97
Ilustración 38. Certificado de calibración de repetibilidad de Balanza..... 98
Ilustración 39. Certificado de Calibración de excentricidad y pesaje de Balanza 99

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1. Contenido de Humedad 43
Gráfico 2. Curva granulométrica de C-01, C-02 y C-03 46
Gráfico 3. Variación en G.S. de C-01 46
Gráfico 4. Variación en G.S. de C-02 47
Gráfico 5. Variación G.S. de C-03 48
Gráfico 6. Curva granulométrica por sedimentación para C-01 49
Gráfico 7. Curva granulométrica por sedimentación para C-02 50
Gráfico 8. Curva granulométrica por sedimentación para C-03 50
Gráfico 9. Curva granulométrica unida para C-01 51
Gráfico 10. Curva granulométrica unida para C-02 51
Gráfico 11. Curva granulométrica unida para C-03 52
Gráfico 12. Gráfico de Límites de Atterberg de C-01 52
Gráfico 13. Gráfico de Límites de Atterberg de C-02 53
Gráfico 14. Gráfico de Límites de Atterberg de C-03 54
Gráfico 15. Curvas de compactación C-01 56
Gráfico 16. Variación de M.D.S. C-01 57
Gráfico 17. Curva de compactación C-02 58
Gráfico 18. Variación de M.D.S. C-02 59
Gráfico 19. Curva de compactación C-03 60
Gráfico 20. Variación de M.D.S. C-03 61
Gráfico 21. Variación de CBR en C-01 61
Gráfico 22. Variación de CBR en C-02 62
Gráfico 23. Variación de CBR en C-03 63
Gráfico 24. Variación de CBR por DCP 69
Gráfico 25. CBR 81

Resumen

En la construcción, el cemento y la cal se empleaban como agentes estabilizadores de subrasantes en suelos arcillosos. No obstante, la producción de estos insumos generaba contaminación ambiental y elevados costos. Por ello, la presente investigación tuvo como objetivo evaluar la influencia de la adición de ceniza de bagazo de caña de azúcar y ceniza de eucalipto como estabilizadores de suelos arcillosos para subrasantes. Se trabajó con adiciones de 7%, 10% y 13%. La composición química de las cenizas se determinó mediante espectroscopía de fluorescencia de rayos X (FRX), y se aplicaron ensayos de granulometría, gravedad específica, límites de Atterberg, Proctor y CBR en un suelo clasificado como CL. Los ensayos se realizaron tanto en el suelo natural como en el suelo estabilizado con CBCE. Los resultados evidenciaron que los límites líquido y plástico tendieron a incrementarse con el aumento de CBCE, mientras que el valor del CBR mostró un crecimiento progresivo hasta alcanzar el 10%. Se concluyó que el porcentaje óptimo de adición fue 10% de CBCE, dado que el CBR aumentó en 210.34%, 168.02% y 137.25% en las calicatas 01, 02 y 03, respectivamente. Asimismo, el análisis económico del uso de CBCE como agente estabilizador demostró que resultaba más rentable en comparación con la estabilización mediante cemento y cal.

Palabras clave*:* *Estabilización de suelos arcillosos; subrasantes; ceniza de bagazo de caña de azúcar; ceniza de eucalipto; CBR.*

Abstract

In construction, cement and lime were used as stabilizing agents for subgrades in clay soils. However, the production of these inputs generated environmental pollution and high costs. Therefore, the objective of this research was to evaluate the influence of adding sugarcane bagasse ash and eucalyptus ash as stabilizers for clay soils for subgrades. Additions of 7%, 10%, and 13% were used. The chemical composition of the ashes was determined by X-ray fluorescence spectroscopy (XRF), and tests of particle size, specific gravity, Atterberg limits, Proctor, and CBR were applied to a soil classified as CL. The tests were performed on both natural soil and soil stabilized with CBCE. The results showed that the liquid and plastic limits tended to increase with increasing CBCE, while the CBR value showed a progressive increase up to 10%. It was concluded that the optimal addition percentage was 10% CBCE, given that the CBR increased by 210.34%, 168.02%, and 137.25% in test pits 01, 02, and 03, respectively. Likewise, the economic analysis of the use of CBCE as a stabilizing agent showed that it was more cost-effective compared to stabilization using cement and lime.

Keywords: Stabilization of clay soils; subgrades; sugarcane bagasse ash; eucalyptus ash; CBR.

Introducción

En la economía mundial, la infraestructura vial constituía un elemento esencial para el desarrollo de los países, pues a través de las carreteras se facilitaba el transporte de bienes y personas. En consecuencia, la deficiencia en la calidad de dichas infraestructuras limitaba el crecimiento económico y social de las naciones. El territorio peruano se caracterizaba por su compleja geología y su topografía accidentada.

Dentro de este contexto, predominaban los suelos sedimentarios de naturaleza arcillosa, los cuales, en la provincia de Chiclayo, representaban una condición recurrente. Estas arcillas, por sus propiedades físico-mecánicas, generaban dificultades en la ejecución de proyectos de ingeniería civil, comprometiendo la estabilidad y durabilidad de las obras construidas sobre ellas.[1]

De acuerdo con los reportes del INDECI, los distritos de La Victoria, Chiclayo y José Leonardo Ortiz (JLO) presentaban condiciones geotécnicas particularmente desfavorables, ya que en estas zonas predominaban arcillas con rangos de plasticidad que variaban de baja a alta. Dichos suelos se caracterizaban por su limitada capacidad portante y por un comportamiento de expansión y contracción cíclica. La expansión ocurría principalmente en los suelos finos de tipo arcilloso, los cuales tendían a hincharse debido a la absorción de agua de infiltración, generando un incremento significativo en su volumen. [2] En consecuencia, los suelos arcillosos no reunían las propiedades físico-mecánicas necesarias para constituir una subrasante adecuada, pues presentaban baja resistencia, además de experimentar expansiones y variaciones volumétricas asociadas a la humedad. Este comportamiento generaba la formación de grietas, fallas estructurales y deformaciones, lo cual resultaba altamente perjudicial para pavimentos, cimentaciones y otras obras de ingeniería civil ejecutadas sobre este tipo de terreno.

Cuando los suelos empleados como subrasantes en los proyectos no alcanzaban la capacidad de soporte mínima establecida (CBR), se recurría a diferentes métodos o aditivos con el fin de modificar sus características y mejorar su resistencia. Según lo establecido en el *Manual de Carreteras*, si el CBR era inferior al 6%, el suelo se consideraba inadecuado para su utilización en proyectos viales, al evidenciar condiciones de blandura, insuficiencia, inestabilidad y compresibilidad.[3]

Por lo tanto, los suelos arcillosos requerían procesos de estabilización, ya fueran de carácter físico o químico, con el propósito de optimizar sus propiedades. En el ámbito de la construcción, se empleaban con frecuencia el cemento y la cal como agentes químicos de

estabilización. No obstante, el uso de estos materiales presentaba importantes desventajas, entre ellas la generación de contaminación ambiental durante su producción y los elevados costos asociados a su adquisición.

La investigación [4], evaluó la eficacia de la ceniza de eucalipto como material estabilizador de subrasantes en una zona turística del departamento de Junín. Se trabajó con adiciones de 5%, 10% y 15%, aplicadas en intervalos de 5%. Los resultados indicaron que el porcentaje óptimo correspondía al 10%, ya que en este nivel se registró una reducción del 55% en los límites de Atterberg, así como un incremento del 10.5% en la máxima densidad seca (M.D.S.) y un aumento del 385.1% en el valor del CBR.

En la indagación [5], se analizaron las propiedades mecánicas de un suelo arcilloso utilizando ceniza de bagazo de caña de azúcar (CBCA) como material estabilizante. Las adiciones se aplicaron en porcentajes que variaron entre 2.5% y 10%, con incrementos de 2.5%. Los resultados obtenidos en los ensayos Proctor y CBR evidenciaron que el porcentaje óptimo correspondía al 7.5%, ya que en este nivel se registró una disminución del 4.6% en la máxima densidad seca (M.D.S.) y un incremento del 17.1% en el valor del CBR.

En este contexto, se planteó la utilización de dos subproductos de origen vegetal. El primero correspondía a la ceniza de bagazo de caña de azúcar, generada en plantas agroindustriales que empleaban dicho residuo en calderas para la producción de energía eléctrica. [6] Esta ceniza es una puzolana que se caracteriza por ser un material con un alto contenido de dióxido de silicio (material cementante) [7].

El segundo subproducto para utilizar es la ceniza de eucalipto (CE), la cual es un material que contiene óxido de calcio (CaO) [8], otorgándole propiedades beneficiosas en la estabilización de suelos.

De acuerdo con lo establecido por el ACI, una reacción puzolánica se definía como el proceso en el cual un material silíceo, que por sí mismo presentaba escaso o nulo poder cementante, reaccionaba químicamente con la cal hidratada [$Ca(OH)_2$] a temperaturas ordinarias, generando compuestos con propiedades cementantes. En este sentido, el óxido de calcio (CaO), al entrar en contacto con el agua, formaba hidróxido de calcio [$Ca(OH)_2$], sustancia que incrementaba la alcalinidad del medio y liberaba iones de calcio, facilitando la formación de silicatos de calcio hidratados (CSH) y aluminatos de calcio hidratados (CAH).[9]

La sílice contenida en la ceniza de bagazo, junto con los aluminatos presentes en las arcillas, reaccionaba con la cal hidratada, lo que daba lugar a la formación de compuestos cementantes tales como los silicatos de calcio hidratados (CSH) y los aluminatos de calcio

hidratados (CAH). La presencia de estos compuestos favorecía la mejora de las propiedades mecánicas del suelo y contribuía a incrementar su estabilidad. [10]

Si bien estudios previos habían demostrado que tanto la ceniza de bagazo de caña de azúcar como la ceniza de eucalipto, aplicadas de manera individual, mejoraban las propiedades físico-mecánicas del suelo, no se identificaron investigaciones que evaluaran su efecto combinado. La presente investigación tuvo como propósito cubrir esa brecha, analizando la acción conjunta de ambas cenizas en proporciones equitativas. Considerando que sus componentes químicos principales (SiO_2 y CaO) se complementaban, se esperaba que la reacción puzolánica generara una mayor formación de compuestos cementantes, específicamente silicatos de calcio hidratados (CSH) y aluminatos de calcio hidratados (CAH). La producción de estos compuestos favorecía el incremento de la cohesión y rigidez del suelo, lo cual representaba una alternativa eficiente y sostenible para la estabilización de subrasantes en obras de infraestructura vial, optimizando su capacidad de soporte frente a condiciones adversas.

En este contexto se planteó la pregunta de investigación ¿Cómo influye la ceniza de bagazo de caña de azúcar y ceniza de Eucalipto como estabilizadores de suelos arcillosos para subrasantes? La hipótesis de la investigación es la adición de las cenizas de bagazo de caña de azúcar y de Eucalipto mejora los suelos arcillosos para subrasante.

El objetivo general de esta investigación es evaluar la influencia de la adición de ceniza de bagazo de caña de azúcar y ceniza de Eucalipto como estabilizador de suelos arcillosos para subrasantes. Los objetivos específicos son determinar la composición química de la ceniza de bagazo de caña de azúcar y ceniza de Eucalipto mediante Espectroscopía de Fluorescencia de Rayos X. Luego clasificar el suelo conforme a lo establecido por las normas SUCS y AASHTO, una vez clasificado, evaluar las propiedades físico-mecánicas del suelo natural y con las adiciones de ceniza de bagazo de caña de azúcar y ceniza de eucalipto para los porcentajes 7%, 10% y 13%, adicionalmente calcular los costos por unidad de área de estabilización de subrasante adicionando ceniza de bagazo de caña de azúcar y ceniza de eucalipto respecto a otros métodos y finalmente evaluar un tramo de prueba con el porcentaje óptimo de adición de ceniza de bagazo de caña de azúcar y ceniza de Eucalipto mediante el ensayo PDC.

Para el desarrollo de este estudio se llevó a cabo una revisión de antecedentes, fundamentos teóricos y normativa técnica que permitieron ampliar el conocimiento relacionado con la temática investigada. Posteriormente, se procedió a la recolección de las

cenizas y del suelo objeto de análisis mediante la apertura de calicatas. A las cenizas se les aplicaron ensayos con el fin de determinar su composición química. De igual manera, se efectuaron pruebas de contenido de humedad, granulometría, límites de Atterberg, gravedad específica, así como los ensayos Proctor y CBR considerando los diferentes porcentajes planteados en la investigación. Con los resultados obtenidos se realizó un análisis comparativo para identificar el porcentaje óptimo de adición. Finalmente, se elaboró un estudio de costos unitarios con fines de comparación.

La investigación aportó beneficios tanto a los profesionales de la construcción como a futuros investigadores interesados en explorar nuevas alternativas de estabilización de suelos finos para subrasantes. Desde el punto de vista económico, las cenizas, al ser un subproducto residual, presentaban un costo de adquisición considerablemente menor en comparación con el cemento o la cal. En el aspecto ambiental, se les otorgó un uso alternativo que evitaba su disposición directa en el entorno, reduciendo así los impactos negativos asociados.

Revisión de la literatura

Antecedentes nacionales

Cristóbal & Quinte "*Estabilización de subrasante con cenizas de eucalipto, paraje turístico Piedra Parada, Concepción"*, 2022

La presente investigación [4] analizó la efectividad de la ceniza de eucalipto como agente estabilizador de subrasante en zona turística ubicado en el departamento de Junín. Los porcentajes de adición con los que se trabajó fue de 5% y 15%, con incrementos de 5%. El porcentaje óptimo de adición fue de 10% debido a que se tuvo una disminución de 55% en los límites de atterberg; un aumento en la M.D.S. y CBR de 10.5% y 385.1%, respectivamente.

Prada *"Estabilización del suelo usando ceniza de bagazo de caña de azúcar para caminos no pavimentados",* 2023

[5] En su estudio, analizó las propiedades mecánicas de un suelo arcilloso usando como material estabilizante la ceniza de bagazo. Los porcentajes de adición fueron de 2.5% a 10% con incrementos de 2.5% de CBCA. Los resultados obtenidos de Proctor y CBR, indicaron que el óptimo porcentaje fue de 7.5%, debido a que, se obtuvo una disminución de 4.6% en la M.D.S. y aumento de 17.1% en el CBR.

Cruz *"Mejoramiento de las propiedades mecánicas para suelos arcillosos en subrasantes adicionando ceniza de pajilla de arroz y madera proveniente de ladrilleras artesanales de la provincia de Chachapoyas, 2022",* 2024

[11] Baso su investigación en examinar el comportamiento del suelo usando ceniza de pajilla de arroz y madera (CDL) como agente estabilizante de los suelos arcillosos de la provincia de chachapoyas. Se adicionó 5% a 30% con incrementos de 5% de CDL. Concluyó que la adición óptima fue de 20% porque se obtuvo una disminución de 9.1% en la M.D.S. y aumento de 460% en el CBR.

Antecedentes internacionales

Nath et al. *"Geotechnical Properties of Wood Ash-Based Composite Fine-Grained Soil",* 2018

Es la investigación [12] se utilizó la ceniza de madera (CM) como agente estabilizador de suelos arcillosos. Se trabajó con porcentajes de 5 a 12.5%, con incrementos de 2.5%. Los investigadores concluyeron que la plasticidad del suelo y la M.D.S disminuye con la adición. Asimismo, la óptima adición fue de 10% en donde su obtuvo un aumento de 85% en el ángulo de fricción interna del suelo.

Abdulwahab et al. "*The Effects of Wood ash on the Geotechnical Properties of Lateritic Soil",* 2018 [13]

En [13] se adicionó la ceniza de madera en porcentajes de 2 a 10%, con incrementos de 2% Los resultados concluyeron que la M.D.S. máxima disminuyó con la adición de la ceniza de madera. Asimismo, los autores concluyeron que la óptima adición fue 10% debido a un aumento de 46.7% del CBR.

Ahalya & Prasad *"Stabilization of black cotton soil with waste plastic and admixtures",* 2023 [14]

En la investigación se trabajó con porcentajes de 2% a 8%, con incrementos de 2% de ceniza de bagazo de caña de azúcar. Los autores concluyeron que el porcentaje óptimo fue de 6% puesto que se obtuvo el mayor aumento de CBR dando un valor de 9.5%.

Talekar & Joshi *"Soil Stabilization Using Waste Material Sugarcane Baggash Ash*", 2022 [7]

En la investigación se trabajó con porcentajes de 5% a 8%, con incrementos de 05% de bagazo de caña de azúcar. Los autores concluyeron que la óptima adición fue de 6%, donde se obtuvo un aumento de 5.7%, 68.6% y 63.8% en la M.D.S., CBR y resistencia a la comprensión, respectivamente.

Bases teóricas

Suelo

Se le denomina suelo a la aglomeración de materia orgánica y/o minerales que contienen proporciones variables de agua y aire que pueden separarse mediante una acción mecánica sencilla. [15]

El suelo se compone de 3 fases:

- Solida: Compuesto por los elementos minerales del suelo.
- Líquida: Compuesto por agua atrapada en los vacíos.
- Gaseosa: Compuesto por el aire atrapado en los vacíos.

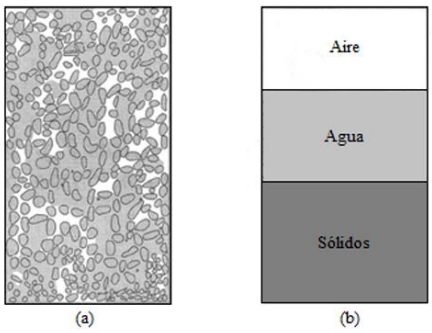


Ilustración 1: Fases del suelo

Nota: a) Suelo natural y b) Modelo trifásico del suelo [15]

Tabla 1: Clases de suelos según las distintas normativas

	Tamaño de grano (mm)			
Norma	Grava	Arena	Limo	Arcilla
Instituto Tecnologico de Masachsets (MIT)	>2	2 a 0.06	0.06 a 0.002	<0.002
Departamento de Agricultura de E.U. (USDA)	>2	2 . 0.05	0.05 a 0.002	<0.002
Asociación americana de carreteras estatales y oficiales del transporte (AASHTO)	76.2 a 2	2 s 0.075	0.075 a 0.002	<0.002
Sistema Unificado de Clasificación de Suelos SUCS	76.2 a 4.75	4.75 a 0.075	<0.075	

Nota: [15]

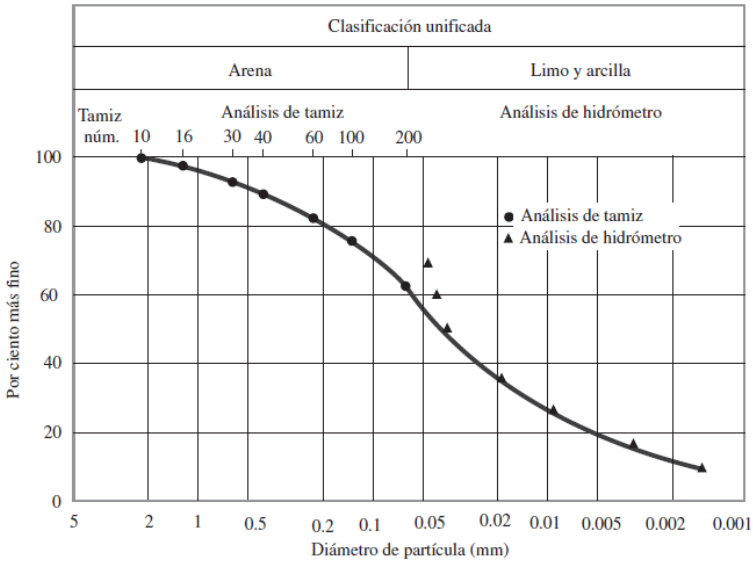


Ilustración 2: Curva de la distribución del tamaño de la partícula

Nota:[15]

Los suelos se pueden clasificar según el diámetro de partícula en dos: Gruesos y Finos.

Tabla 2: Suelos finos y granulares

SUELOS GRUESOS (>1mm)	SUELOS FINOS (<1mm)
Sus partículas componentes son visibles a simple vista	Sus partículas componentes no son visibles a simple vista
La forma de las partículas puede ser angular o redondeada	La forma de las partículas puede ser laminar, angular o redondeada
No poseen minerales arcillosos	Pueden poseer minerales arcillosos
Suelos no cohesivos	Suelos cohesivos
Muy alta permeabilidad: $k > 10^{-2}$ *cm/seg*	Permeabilidad: Alta (arenas finas), media a baja (limos),muy baja o nula (arcillas)$k < 10^{-2}$ *cm/seg*
El tamaño de los vacíos es mayor, pero el volumen total de vacíos es menor: $e < 0,85$	El tamaño de los vacíos es menor, pero el volumen total de vacíos es mayor: arcilla blanda e > 1,2 ; montmorillonita e > 5
Si se aplica una sobrecarga importante, el asentamiento del suelo es instantáneo	Si se aplica una sobrecarga importante, se tienen asentamientos diferidos en el tiempo

Nota: [15]

Suelos finos

Arcillas

Se define como arcillas a cualquier sedimento formado por partículas cuyo diámetro de partícula es inferior a los 0.002mm. Las arcillas se encuentran compuestas generalmente de aluminatos hidratados. En condiciones húmedas son plásticas y en condiciones de más de 800°C presentan dureza y sonoridad.

Los suelos con característica expansiva son aquellos que aumentan su volumen cuando su contenido de humedad aumenta. El principal grupo de arcilla expansivas son las esmectitas. [15]

Tabla 3: Grado de expansión

Expansividad	Límite de retracción	Índice de plasticidad	Límite líquido	Contenido en finos	Hinchamiento en superficie [cm]	Presión de hinchamiento [KPa]
Baja	> 15	< 15	< 30	< 30	0 – 1	< 50
Media	11 – 15	15 – 30	30 – 45	30 – 60	1 – 2	50 – 12
Alta	< 11	> 30	> 45	> 60	2 – 3	> 12

Nota: [15]

Limos:

Son sedimentos clásticos no cohesivos que presentan una forma redondeada y cuyo diámetro de partícula se encuentra entre 0.06 y 0.002 mm. Suelen ser terrenos problemáticos para la edificación, por lo cual se debe elegir mejores un sistema de cimentación distinto. [15]

Tabla 4: Diferencias entre Limos y Arcillas

Limos (entre 0,002 y 0,060 mm.)	Arcillas (<0,002 mm.)
No suelen tener propiedades coloidales	Suelen tener propiedades coloidales
A partir de 0,002 mm y a medida que aumenta el tamaño de las partículas, se va haciendo cada vez mayor la proporción de minerales no arcillosos	Consisten en su mayor parte en minerales arcillosos
Partículas de forma redondeada	Partículas de forma laminar
Tacto áspero	Tacto suave
Mayor permeabilidad: $10^{-5} > k > 10^{-7}$ cm/seg	Menor permeabilidad: $k < 10^{-6}$ cm/seg
Predominan las características de masa	Predominan las características de superficie
Se secan con relativa rapidez y no se pegan a los dedos	Se secan lentamente y se pegan a los dedos
Pueden ser colapsables	No son colapsables
No son expansivos	Pueden ser expansivas

Nota: [15]

Estabilización de suelos

Estabilizar un suelo implica mejorar las propiedades físico-mecánicas de un terreno utilizando procesos mecánicos y/o la o incorporando agentes naturales, químicos o sintéticos. El objetivo principal de este proceso es proporcionar una mayor resistencia y permanencia mecánica al suelo. Por lo general, este proceso se lleva a cabo en subrasantes que presentan

suelos inadecuados. Entre las técnicas más comunes de estabilización de suelos se tiene adicionar otro suelo e incorporar agentes que estabilicen el suelo. [16]

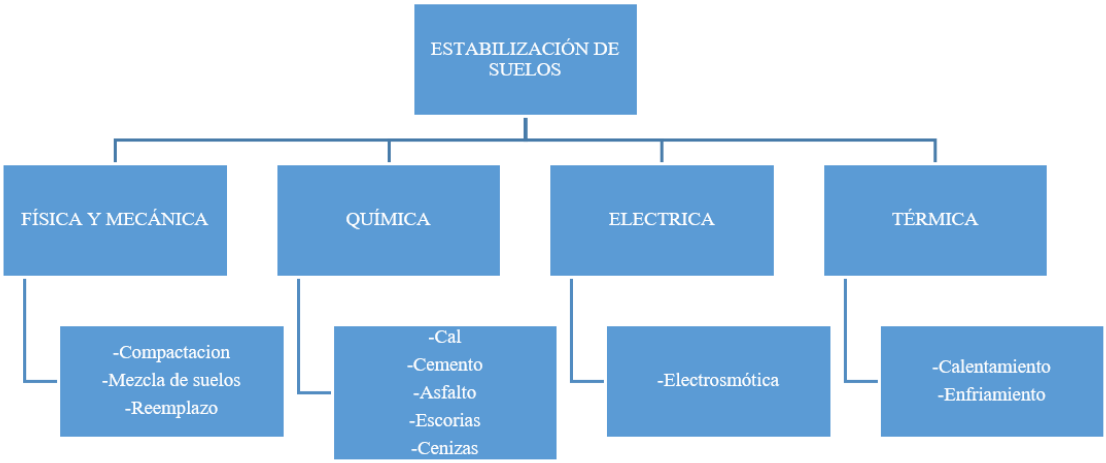


Ilustración 3: Métodos para estabilizar suelos

Nota:[17]

Subrasante

La subrasante, se define como la superficie resultante luego de la excavación del terreno. Debido a que el pavimento será apoyado sobre la subrasante, se debe contar con una subrasante con una regularidad y resistencia óptima.

La subrasante presenta una conformación variable, ya sea granular o cohesiva. En caso de que la subrasante presente deficiencias en resistencia y regularidad, se puede mejorar a través de material de reemplazo seleccionado o estabilizado por material estandarizado. La finalidad de mejorar y estabilizar las subrasantes de un suelo es asegurar que el suelo sea capaz de soportar cargas de tránsito.[18]

Tabla 5: Categorías de Subrasante

Categorías de Sub rasante	CBR
S_0 : Sub rasante Inadecuada	CBR < 3%
S_1 : Sub rasante insuficiente	De CBR ≥ 3% A CBR < 6%
S_2 : Sub rasante Regular	De CBR ≥ 6% A CBR < 10%
S_3 : Sub rasante Buena	De CBR ≥ 10% A CBR < 20%
S_4 : Sub rasante Muy Buena	De CBR ≥ 20% A CBR < 30%
S_5 : Sub rasante Excelente	CBR ≥ 30%

Nota: [19]

Fluorescencia de Rayos X (FRX)

Es una técnica analítica para encontrar la composición elemental de una muestra. Esta técnica es no destructiva permitiendo analizar las muestras sin dañarlas, permite obtener resultados en poco tiempo comparado a otros métodos analíticos, asimismo, esta técnica puede ensayar muestras en estado sólido, líquidos o en polvo, lo que lo hace un ensayo versátil. El principio del ensayo es la excitación de una muestra por medio de Rayos X, en la emisión de fluorescencia y la detección por medio de un detector que mide la intensidad y la energía de la radiación fluorescente; lo que permite identificar y cuantificar los compuestos presentes en la muestra. [20]

Ceniza de Bagazo de caña de azúcar

Perú, en la actualidad, cuenta con 160,000 hectáreas de cultivos destinados al cultivo de caña, ubicados en Piura, Lambayeque y la Libertad.

El bagazo es un residuo del proceso de trituración del tallo de la caña, usado por las agroindustriales como un reemplazo parcial de Diesel para generar energía eléctrica en las calderas.

Luego de la combustión en las calderas, se obtienen estas cenizas como residuo final. Las cenizas por lo general suelen ser usadas como abono, por su alto contenido en SiO2 está ceniza se clasifica como un material puzolánico (Tipo F según norma ASTM C618) [21], por lo cual, se puede presentar como una nueva opción como reemplazo parcial de cemento debido a que mejora la cohesión entre las partículas y aumentando el CBR del suelo. [6]

Tabla 6: Resultados de FRX de la ceniza de bagazo

COMPUESTO	Estudio (1)	Estudio (2)	Estudio (3)	Estudio (4)
Sílice (SiO_2)	70.870	78.340	76.550	75.670
Óxido de aluminio (Al_2O_3)	6.860	8.550	2.530	1.520
Óxido de hierro (Fe_2O_3)	4.870	3.610	2.590	2.290
Óxido de calcio (CaO)	3.410	2.150	1.200	6.620
Óxido de potasio (K_2O)	no especifica	3.460	1.320	9.590
Óxido de magnesio (MnO)	3.250	0.130	0.008	1.870
Otros	no especifica	3.760	15.802	2.440

Los valores en la tabla se establecen a partir de las siguientes referencias.
1. Kumar et al. (2017).
2. Srinivasan y Sathiya (2010).
3. Câmara et al. (2016).
4. Bahurudeen, Kanraj, Dev y Santhanam (2015)

Nota: [6]

Ceniza de Eucalipto

En el Perú, una de cada cinco familias peruanas usa leña como alternativa de combustible en sus hogares, según datos de Sociedad Peruana de Gas Licuado. Es de conocimiento general que las fuentes alternas del biocombustible solido son obtenidos de los desechos generados por agroindustriales o de industrias maderera, las cuales son obtenidas de procesos térmicos o químicos como la combustión. La ceniza es un producto obtenido de la quema troncos y hojas en hornos donde se fabrican ladrillos artesanales o en cocinas de leña presentes en viviendas rurales en el Perú. [22]

Esta ceniza tiene un elevado contenido de óxido de calcio, aumentando la resistencia y mejorando la estructura del suelo debido a las reacciones químicas que ocurren al momento de la combinación con las arcillas.

Reacción de la combinación de SiO2 y CaO

Tabla 7: Resultados de FRX de la ceniza de Eucalipto

COMPUESTO	Estudio (1) Eucalipto ash	Estudio (2) Eucalipto ash	Estudio (3) Eucalipto ash	Estudio (4) eucalipto ash
CaO	64.66	25.10	25.53	67.26
SiO2	15.92	37.40	23.99	17.32
SO3	9.98	-	-	-
MgO	5.35	4.50	-	0.06
MnO	1.78	0.90	-	-
Al2O3	1.31	9.50	-	2
Fe2O3	0.62	2.60	-	1.65
K2O	-	6.30	-	11.43
Otros	0.57	13.70	-	0.28

Los valores en la tabla se establecen a partir de las siguientes referencias:
1. Pérez Mantilla (2017) - Perú
2. Barbosa Viel & Michael Bernardin (2014) - España
3. Maldonado Pomasoncco (2023) - Perú
4. Villanueva Manrrique (2017) -Perú

Ensayos de Laboratorio

- **Contenido de Humedad NTP 339.127**

Es la relación en porcentaje del peso del agua en una masa de suelo.[23]

Materiales:

- Balanza con precisión de dos decimales (0.01)
- Bandeja metálica
- Horno con capacidad calorífica de 110° ± 5°

Procedimiento:

Definimos la muestra (masa) con una exactitud porcentual de 0.1. Luego, colocamos la muestra al horno estufa a 110°C. Volvemos a pesar la masa seca y calculamos el contenido de humedad.

$$C.Humedad = \frac{W.Humedo - W.Seco}{W.Seco} * 100$$

- **Granulometría por tamizado MTC E 107**

El objetivo es determinar la gradación de una muestra usando tamices entre 3" y el tamiz N° 200. [3]

Tabla 8. Tamaño de Partícula

TIPO DE MATERIAL	TAMAÑO DE LAS PARTICULAS
Grava	Entre 75mm y 2mm
Arena	A. Gruesa: Entre 2mm y 0.2mm
	A. Fina: 0.2mm y 0.05mm
Limo	Entre 0.05mm y 0.005 mm
Arcilla	> a 0.005mm

Materiales:

- Balanza con precisión de dos decimales (0.01)
- Bandeja metálica
- Horno con capacidad calorífica de 110° ± 5°
- Brocha de limpieza
- Tamices

Tabla 9. Tamices para granulometría según MTC

TAMICES	ABERTURA (mm)
3"	75,000
2"	50,800
1 1/2"	38,100
1"	25,400
3/4"	19,000
3/8"	9,500
N° 4	4,760
N° 10	2,000
N° 20	0,840
N° 40	0,425
N° 60	0,260
N° 140	0,106
N° 200	0,075

Procedimiento:

Secar 300 gramos de muestra como mínimo por 24 horas en el horno. Luego, lavamos la muestra seca por el tamiz N° 200 y juntamos todo lo retenido en el tamiz. Secamos la muestra retenida en el tamiz N°200 por 24 horas en el horno. Tamizamos la muestra seca retenida por los tamices N° 4, N° 10, N° 20, N° 40, N°50, N°100 Y N° 200, anotamos los retenido y realizamos la curva granulométrica teniendo en cuento lo retenido en cada tamiz.

- **Gravedad específica MTC E 113**

La gravedad específica mide la densidad de una muestra comparando con la densidad del agua. [3]

Materiales:

- Balanza con precisión de dos decimales (0.01)
- Picnómetro con capacidad de 250ml
- Válvula o bomba de vacíos
- Agua destilada
- Termómetro

Procedimiento:

Pesar 40gr de muestra de muestra seca y tamizada por la N° 4. Luego, debemos pesar el picnómetro de 250ml. Posterior a eso, debemos adicionar agua destilada hasta la línea del picnómetro y pesamos el picnómetro lleno de agua. Luego retiramos un poco de agua para poder adicionar la muestra de suelo. Una vez colocado la muestra de suelo volvemos a llenar con agua destilada hasta la línea del picnómetro y volvemos a pesar. Una vez tengamos el picnómetro con suelo y agua destilada llevamos a la bomba de vacíos para poder eliminar los vacíos. Por último, pesamos nuevamente el picnómetro con suelo y agua destilada sin vacíos y realizamos el cálculo de la gravedad específica.

$$Datos:$$

$$Peso\ de\ muestra\ suelo\ seca = Ps$$

$$Peso\ de\ fiola + agua = Pa$$

$$Peso\ de\ fiola + agua + muestra\ de\ suelo = Pas$$

$$Gravedad\ especifica = \frac{Ps}{((Ps) + (Pa) - (Pas)} * 100$$

- **Granulometría por hidrómetro o por sedimentación MTC E 109**

Basado en la ley de Stokes, este ensayo relaciona el tamaño de una partícula y su velocidad de sedimentación en un fluido. La finalidad de realizar este ensayo es para determinar el porcentaje pasante del tamiz N° 200. La muestra utilizada para este ensayo será aquella que pase por el tamiz N° 10. [3]

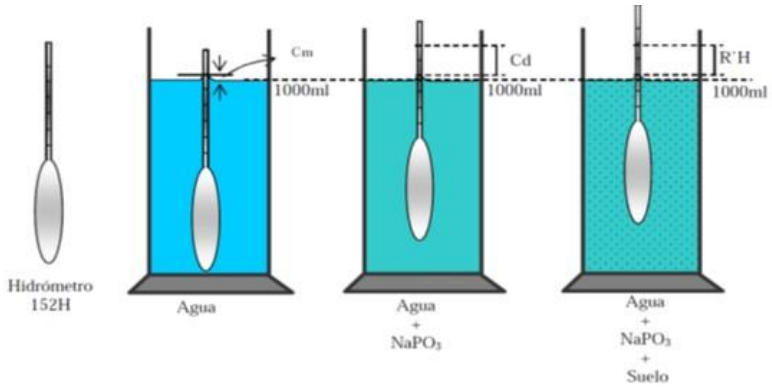


Ilustración 4. Granulometría por Hidrómetro o por Sedimentación

Materiales:

- Balanza con precisión de dos decimales (0.01)
- Probeta graduada de vidrio de 1L
- Agua destilada
- Hexametafosfato de sodio
- Tamiz N° 10 y N°200
- Hidrómetro
- Horno con capacidad calorífica de 110° ± 5°
- Frasco de vidrio

Procedimiento:

Obtener una muestra de suelo seca de 50gr tamizada por la malla N° 10. Luego añadimos 5gr de hexametafosfato de sodio a la muestra de suelo, y disolvemos en agua 250ml de agua en un frasco de vidrio y agitamos por 5 minutos. Esperamos 24hrs para que el reactivo disperse las partículas del suelo. Pasado el tiempo, vaciamos el contenido del frasco a la probeta de vidrio, y completamos con agua destilada hasta 1L. Tomamos las lecturas con ayuda del hidrómetro y un cronometro en los siguientes tiempos: 1min, 2min, 4min, 8min, 15min, 30min, 1hr, 2hr, 4hrs, 6hrs, 12hrs y 24hrs. Una vez tomada la última medida de 24hrs, lavamos la muestra contenida en la jarra de vidrio por el tamiz N° 200, vaciamos en un recipiente metálico y lo introducimos en el horno para que seque. Una vez seco, pesamos el contenido que nos quedó y procesamos los datos obtenidos.

- **Límites de atterberg NTP 339.129**

  - **Límite líquido**

Es la cantidad de agua en porcentaje que necesita un suelo para encontrarse entre un estado plástico y líquido. [24]

Materiales:

- Balanza con precisión de dos decimales (0.01)
- Recipientes metálicos pequeños
- Horno con capacidad calorífica de 110° ± 5°
- Copa de Casagrande
- Ranurador
- Agua destilada

Procedimiento:

Obtener una muestra seca de 150 - 200 gramos tamizado por la N°40; luego, con el uso de una espátula, mezclamos el suelo con agua desmineralizada o destilada en un recipiente plástico y tapamos con una bolsa plástica evitando perder humedad. Dejamos reposar por 24 horas para que la muestra se sature por completo. Una vez saturado por completo, utilizamos una copa de Casagrande para realizar el método multipunto.

  - **Límite plástico**

Es la cantidad de agua en porcentaje que necesita un suelo para encontrarse entre un estado plástico y semisólido.

Materiales:

- Balanza con precisión de dos decimales (0.01)
- Recipientes metálicos pequeños
- Horno con capacidad calorífica de 110° ± 5°

Proceso: Con la muestra saturada y utilizada en el límite líquido realizamos bastoncitos del grosor de 3mm, tomaremos como muestra valida de bastones para este ensayo aquellos que presenten fisuración y puedan mantenerse firmes si son sostenidos con las yemas de los dedos a una distancia de 1/3 del cuerpo del bastón.

  - **Índice de plasticidad**

Es la resta entre límite líquido y plástico.

Tabla 10. Clasificación según Indice de Plasticidad

INDICE DE PLASTICIDAD	Indicador	Caracteristica
>20	Alta	Suelos muy arcillosos
7<IP≤20	Media	Suelos arcillosos
<7	Baja	Suelos poco arcilosos
0	No Plástico (NP)	Suelos sin presencia de arcilla

- **Proctor Modificado**

Es la eliminación de vacíos de un suelo mediante la inducción de una energía de compactación inducida. [25]

Materiales:

- Balanza con precisión de dos decimales (0.01)
- Balanza para kg.
- Recipientes metálicos pequeños
- Horno con capacidad calorífica de 110° ± 5°
- Molde para Proctor de 4”
- Enrasador o regla metálica

Procedimiento:

Seleccionamos 4 bolsas de 2.5kg de muestra tamizada por la N° 4; luego, saturamos en distintos porcentajes de humedad teniendo en cuenta el Índice Plástico del suelo de estudio, estos porcentajes de humedad deben ser incrementos consecutivos entre 2% y 4%; es decir, empezamos con 6% para una muestra, luego un 8% para la segunda muestra y así hasta llegar a 12% para la última muestra. A continuación, escogemos un molde de 3’’ en donde se compactará cada muestra, calculamos el volumen y peso del molde. Cuarteamos la muestra en 5 partes iguales para poder tener una muestra homogénea en cada capa, asimismo, debemos de extraer una pequeña muestra representativa para obtener el contenido de humedad de la muestra saturada; después, colocamos la primera capa en el molde y compactamos con 25 golpes por capa hasta llenar las 5 capas que se ocupan en el molde. Enrasamos lo excedente y pesamos la muestra de tierra sumado el peso del molde

$$W.Suelo\ Humedo\ Compactado = (W.Suelo + W.Molde) - W.Molde$$

$$Máxima\ Densidad\ Húmeda = W.Suelo\ Humedo\ \frac{Compactado}{Volumen\ de\ Molde}$$

$$C.Humedad = \frac{W.Humedo - W.Seco}{W.Seco} * 100$$

$$Máxima\ Densidad\ Seca = \frac{Máxima\ Densidad\ Húmeda}{C.Humedad}$$

- **California Bearing Ratio (CBR)**

Es la resistencia de un suelo a un 95% de M.D.S. a un penetración de carga. [26]

Tabla 11. Categorías de Subrasantes según MTC

Categoría de Subrasante	CBR
Inadecuada	<3%
Insuficiente	3%<CBR<6%
Regular	6%<CBR<10%
Buena	10%<CBR<20%
Muy Buena	20%<CBR<30%
Excelente	>30%

Materiales:

- Balanza con precisión de dos decimales (0.01)
- Balanza para kg.
- Recipientes metálicos pequeños
- Horno con capacidad calorífica de 110° ± 5°
- Molde para CBR
- Enrasador o regla metálica
- Disco espaciador metálico
- Pisón de compactación
- Pesas metálicas para CBR
- Medidor de expansión

Procedimiento:

El proceso es similar al del Proctor Modificado, con la diferencia que esta vez realizaremos 3 moldes para obtener un solo resultado de CBR, cada uno de estos moldes serán compactados en 56 golpes o 55 golpes, 25 golpes y 15 golpes o 12 golpes respectivamente y según la norma, se usará un papel filtro cada extremo del molde antes de compactar para evitar la pérdida de finos. Una vez compactamos serán sumergidos en una poza de curado y estarán ahí por 4 días como mínimo, cada 24hrs se deberá tomar la medida de la expansión del suelo, si el suelo sigue expandiéndose se deberá extender el proceso de curado. Luego de pasar por el

proceso de curado, se ensayará los moldes con un pistón de penetración y se anotaremos las lecturas de la penetración del pistón con respecto al tiempo

Materiales y métodos

Diseño de investigación

Tipo de investigación

El diseño es de tipo experimental, porque las variables dependientes e independientes fueron ensayadas en un laboratorio para determinar cómo afecta el añadir ceniza de bagazo de caña de azúcar y de eucalipto al suelo para mejorar sus propiedades físicas mecánicas. Adicionalmente, se usaron métodos y técnicas para los ensayos y proceso de elaboración y así responder a los objetivos definidos. En cuanto a su finalidad es aplicada debido a que contribuye a un conocimiento a la ingeniería.

Hipótesis

La adición de las cenizas de bagazo de caña de azúcar y de eucalipto mejora los suelos arcillosos para subrasantes

Unidad de Estudio

Fue el mejoramiento de las propiedades mecánicas de los suelos arcillosos para subrasantes

Variables y operacionalización

Variable independiente

- Ceniza de Bagazo de Caña de Azúcar
- Ceniza de Eucalipto

Variable dependiente

- Propiedades físicas del suelo
- Propiedades mecánicas del suelo

Tabla 12: Operacionalización de Variables

Variables				Indicadores - Ensayos
Tipo	Descripción	Dimensiones		
INDEPENDIENTE	Ceniza de bagazo de caña de azucar Ceniza de eucalipto	Propiedades		Espectroscopia de Fluorescencia de Rayos X
DEPENDIENTE	Propiedades físicas del suelo	Limites de consistencia	Limite Líquido	NTP 339.129
			Limite Plástico	
		Granulometría	Granulometría por tamizado	MTC E 107
			Granulometría por sedimentación	MTC E 109
		Contenido de humedad		NTP 339.127
		Gravedad especifica		MTC E 113
	Propiedades mecanicas	Proctor		NTP 339.141
		CBR		ASTM D1883

Población, muestra y muestreo

Población

Fueron los suelos arcillosos a nivel de subrasantes, a los cuales se les añadió ceniza de bagazo de caña de azúcar y de eucalipto.

Muestra

Fueron los suelos de la Urbanización Santa Isabel, José Leonardo Ortiz, Chiclayo, departamento de Lambayeque. A los cuales se le realizó ensayos de laboratorio, con la finalidad de entender el comportamiento de los suelos arcillosos adicionando ceniza de bagazo de caña de azúcar y eucalipto.

Asimismo, la muestra también se conformó por las cenizas generadas por la combustión de leña de Eucalipto de las viviendas rurales de la ciudad Llangoden Bajo, Chugur, Cajamarca y de las cenizas de bagazo de caña de azúcar generadas por SUCROALCOLERA DEL CHIRA S.A, ubicada en Av. los Tallanes Mza. e Lote. 3, Piura, Piura.

Muestreo

El muestreo es tipo no probabilístico por conveniencia, basado en la CE.010 de Pavimentos Urbanos, en donde se considera la profundidad mínima de exploración es de 1.50 metros y el número mínimo de puntos de exploración (3)

Para fines prácticos de la investigación se tuvo en cuenta usar abreviaturas tanto para el suelo natural al cual nos referiremos como SN en adelante y para la ceniza de Ceniza de Bagazo de caña de Azúcar y Ceniza de Eucalipto nos referiremos como CBCE en adelante

Tabla 13: Puntos mínimos de investigación

TIPO DE VÍA	NÚMERO MÍNIMO DE PUNTOS DE INVESTIGACIÓN	ÁREA (m^2)
Expresas	1 cada	2000
Arteriales	1 cada	2400
Colectoras	1 cada	3000
Locales	1 cada	3600

En la investigación se trabajó con un tipo de vía local porque es una zona urbana. El área del estudio tenía un aproximado de 13 054,03 m², correspondiéndole 4 calicatas. No obstante, por conveniencia, se realizó el mínimo de calicatas (03) a las cuales se les realizó los ensayos descritos más adelante para evaluar su comportamiento cuando se agregó Ceniza de Bagazo de caña de Azúcar y Ceniza de Eucalipto. Se consideró los siguientes porcentajes de adición: 7%, 10% y 13%, los cuales estaban conformados en una combinación de 50/50 de cenizas, es decir, 3.5% de Ceniza de Bagazo de caña de Azúcar y 3.5% Ceniza de Eucalipto. De igual manera, para las 2 adiciones siguientes.

Asimismo, el presente estudio solo es experimental sin aplicación en proyectos viales.

El muestreo estuvo conformado por 267 especímenes realizados; las cuales son: 69 especímenes para el grupo de la muestra patrón y 198 especímenes para el grupo experimental (combinaciones).

- **Contenido de Humedad (CH):**

Para las muestras de CH se usaron 3 muestras por cada calicata.

Tabla 14: Muestras para ensayo de Contenido de Humedad

Ensayo	Suelo Natural
Contenido de humedad	9
Total	9

- **Granulometría por tamizado:**

Para las muestras de granulometría por tamizado se emplearon 3 muestras por cada adición (0%, 7%, 10% y 13%) y por cada calicata.

Tabla 15: Muestras para ensayo de granulometría por tamizado

Ensayo	Suelo Natural
Granulometría por tamizado	9
Total	9

- **Gravedad Específica:**

Para las muestras de Gravedad Específica se usó 3 muestras por cada calicata.

Tabla 16: Muestras para ensayo de Gravedad específica

Ensayo	Suelo Natural	Combinaciones					
		7%		10%		13%	
		3.5% de ceniza de eucalipto	3.5% de ceniza de bagazo de caña de azucar	5% de ceniza de eucalipto	5% de ceniza de bagazo de caña de azucar	6.5% de ceniza de eucalipto	6.5% de ceniza de bagazo de caña de azucar
Gravedad específica	9	9		9		9	
Total	36						

- **Granulometría por sedimentación:**

Para las muestras de granulometría por sedimentación se emplearon 3 muestras por cada adición (0%, 7%, 10% y 13%) y por cada calicata.

Tabla 17: Muestras para ensayo de granulometría por sedimentación

Ensayo	Suelo Natural	Combinaciones					
		7%		10%		13%	
		3.5% de ceniza de eucalipto	3.5% de ceniza de bagazo de caña de azucar	5% de ceniza de eucalipto	5% de ceniza de bagazo de caña de azucar	6.5% de ceniza de eucalipto	6.5% de ceniza de bagazo de caña de azucar
Granulometría por sedimentación	9	9		9		9	
Total	36						

- **Límites de consistencia:**

Se usaron 3 muestras por cada adición (0%, 7%, 10% y 13%) y por cada calicata.

Tabla 18: Muestras para ensayo de límites de consistencia

Ensayo	Suelo Natural	Combinaciones					
		7%		10%		13%	
		3.5% de ceniza de eucalipto	3.5% de ceniza de bagazo de caña de azucar	5% de ceniza de eucalipto	5% de ceniza de bagazo de caña de azucar	6.5% de ceniza de eucalipto	6.5% de ceniza de bagazo de caña de azucar
Limites de consistencia	9	9		9		9	
Total	36						

- **Proctor:**

Para las muestras del ensayo de Proctor se usaron 3 muestras por cada adición (0%, 7%, 10% y 13%) y por cada calicata.

Tabla 19: Muestras para ensayo de Proctor

Ensayo	Suelo Natural	Combinaciones					
		7%		10%		13%	
		3.5% de ceniza de eucalipto	3.5% de ceniza de bagazo de caña de azucar	5% de ceniza de eucalipto	5% de ceniza de bagazo de caña de azucar	6.5% de ceniza de eucalipto	6.5% de ceniza de bagazo de caña de azucar
Proctor	9	9		9		9	
Total	36						

- **CBR:**

Debido a que el ensayo de CBR es el ensayo determinante para poder concluir la efectividad de la adición de las cenizas como estabilizador de suelos arcillosos. Se usó una fórmula estadística para determinar las muestras que necesitaremos.[27]

$$n = \frac{Z^2 pq}{e^2}$$

Donde:
p: Proporción poblacional que presenta cierta característica.
q: Proporción poblacional que no presenta la característica.
e: Máximo error de estimación de p.
Z: Valor relacionado al nivel de confianza.

Ilustración 5. Fórmula para una muestra de población infinita

En la investigación usó un nivel de fiabilidad de 95%, por lo cual el valor de Z es de 1.96, para p y q el valor es de 0.5 y el error que asumido es de 18%. Por lo cual, la población fue de:

$$n = \frac{Z^2 * p * q}{e^2}$$

$$n = \frac{1.96^2 * 0.5 * 0.5}{0.18^2}$$

$$n = 30.2$$

Se obtuvo un total de 30 muestras por porcentaje (0%,7%,10% y 13%), las cuales fueron repartidas en 10 muestras de CBR para calicata. Pero debido a que solo nos concierne comprobar la efectividad de la adición de las cenizas, solo se realizó 5 muestras de CBR en las muestras de suelo natural.

Tabla 20: Muestras para ensayo de CBR

Ensayo	Suelo Natural	Combinaciones					
		7%		10%		13%	
		3.5% de ceniza de eucalipto	3.5% de ceniza de bagazo de caña de azucar	5% de ceniza de eucalipto	5% de ceniza de bagazo de caña de azucar	6.5% de ceniza de eucalipto	6.5% de ceniza de bagazo de caña de azucar
CBR	15	30		30		30	
Total	105						

Técnicas e instrumentos de recolección de datos

Se llevó a cabo mediante:

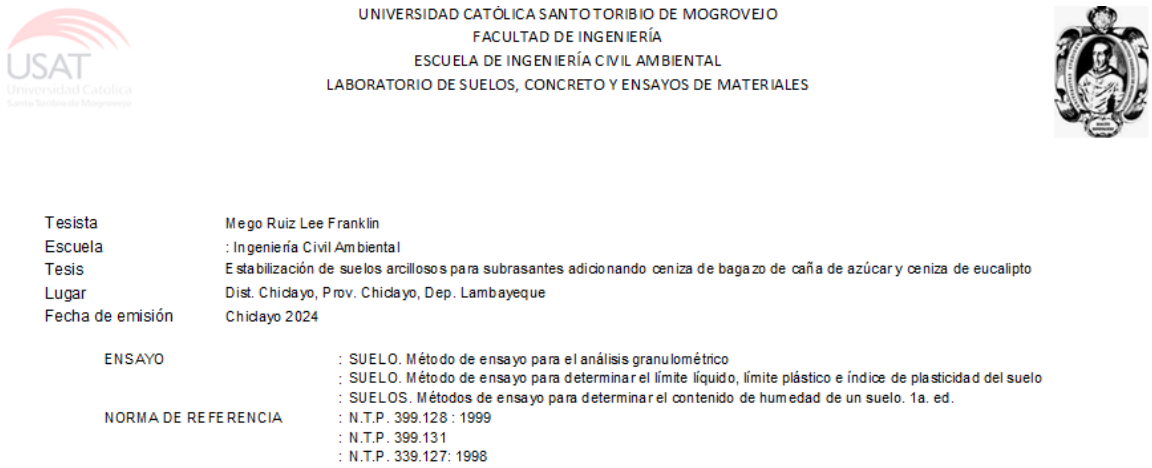
- **Análisis de documentos:** Se analizaron normativas peruanas, tesis, artículos científicos relacionados al tema para obtener datos que respalden la investigación

Tabla 21: Metodología, técnica e instrumentos

Método	Técnica	Instrumento
Síntesis de información	Análisis de documentos	Normas Tesis Artículos de investigación

Después de los ensayos, se siguió los procedimiento técnicos y normativos establecidos. Por lo cual, se escribió en los formatos respectivos. Asimismo, nos basamos en el cronograma establecido del proyecto de tesis; así como las fechas de los respectivos ensayos.

- **Registro de datos y resultados**: Se registraron los datos obtenidos en los ensayos de laboratorio con el siguiente formato.


UNIVERSIDAD CATÓLICA SANTO TORIBIO DE MOGROVEJO
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL AMBIENTAL
LABORATORIO DE SUELOS, CONCRETO Y ENSAYOS DE MATERIALES

Tesista: Mego Ruiz Lee Franklin
Escuela: : Ingeniería Civil Ambiental
Tesis: Estabilización de suelos arcillosos para subrasantes adicionando ceniza de bagazo de caña de azúcar y ceniza de eucalipto
Lugar: Dist. Chiclayo, Prov. Chiclayo, Dep. Lambayeque
Fecha de emisión: Chiclayo 2024

ENSAYO: : SUELO. Método de ensayo para el análisis granulométrico
: SUELO. Método de ensayo para determinar el límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad del suelo
: SUELOS. Métodos de ensayo para determinar el contenido de humedad de un suelo. 1a. ed.
NORMA DE REFERENCIA: : N.T.P. 399.128 : 1999
: N.T.P. 399.131
: N.T.P. 339.127: 1998

Ilustración 6: Membrete de ensayos

Criterios de selección

Se tomó en cuenta el criterio del investigador para la distribución de las calicatas en el área de estudio.

Para determinar la zona en dónde se realizó las calicatas, nos basamos de lo informado por INDECI, donde refiere que las zonas que se ubican en los distritos de José Leonardo Ortiz (JLO) y La Victoria presentan suelo arcilloso. Por lo cual, se eligió la Urbanización Santa Isabel ubicado en JLO.[2]

Asimismo, se empleó CBCE como agente estabilizante del suelo arcilloso de la Urb. Santa Isabel por su composición química.

Dado que la ceniza de eucalipto presenta un alto contenido de óxido de calcio (CaO), compuesto presente en un material muy utilizado como agente estabilizante, por ejemplo: la cal. Por otro lado, la ceniza de bagazo de caña de azúcar presenta un alto contenido de dióxido de silicio (SiO2), compuesto presente en otro material muy utilizado como agente estabilizante, el cemento. Al tener estar cenizas propiedades puzolánicas pueden aumentar la resistencia del suelo.

Las dosificaciones de ceniza usados fueron de 7%, 10% y 13% en peso seco del suelo, y en granulometrías de < 0.075mm (N° 200), basadas en los antecedentes de investigaciones mencionadas. En donde se evidenció que el porcentaje óptimo promedio en términos de CBR es 10% de adición en peso seco del suelo.

Procedimiento

Los materiales usados en este proyecto fueron suelos arcillosos extraído de la Urb.; y las cenizas de eucalipto y de bagazo de caña de azúcar.

El suelo arcilloso se obtuvo mediante trabajo de campo. Primero, se hizo reconocimiento de la zona de estudio para definir, según criterio del investigador, la ubicación exacta del área de trabajo. Luego, se realizó excavación de las tres calicatas para tomar las muestras de suelo. Después, dichas muestras se llevaron al laboratorio en bolsas herméticas.

Por otro lado, la ceniza de eucalipto se obtuvo de los residuos de leña usados en las cocinas artesanales de los pobladores de la ciudad Llangoden Bajo, ubicado en Chugur (Departamento de Cajamarca). Asimismo, la ceniza de bagazo de caña de azúcar fue donación de Sucroalcolera Del Chira S.A. perteneciente a Caña Brava del grupo empresarial Romero.

Después dichas cenizas obtenidas fueron trasladados al laboratorio para comenzar con el estudio.

La investigación comenzó con la caracterización mediante ensayos de laboratorio del material suelo arcilloso. Luego, se hicieron los mismos ensayos para el suelo con adición CBCE en %, 10% y 13% en peso seco del suelo.

Seguidamente, se describe el detalle de los materiales y las pruebas de laboratorio usados en el programa experimental del suelo natural y suelo + CBCE.

1. Material en estado natural

1.1.Suelo arcilloso

Se usó un suelo cohesivo proveniente de la Urbanización Santa Isabel, José Leonardo Ortiz, Chiclayo; entre las coordenadas 6°43'58.3"S -79°50'44.3"W. Las muestras de suelo obtenidas estaban formadas por un material de color marrón oscuro, con textura suave y de mediana plasticidad. Obtenidas mediante la excavación de tres (03) calicatas de 1.50 metros de profundidad, retirándose los 0.20 metros de la parte superior se retiró una capa de 20cm para evitar contaminantes. Las muestras extraídas de las calicatas fueron a 0.6m de profundidad, ya que se encontró nivel freático a 1.30-1.50m.

Ilustración 7: Localización de calicatas en Urb. Santa Isabel

Tabla 22: Coordenadas de las calicastas

CUADRO DE UBICACIÓN DE CALICATAS	
Calicata	COORDENADAS
C-01	6°43'57"S 79°50'43"W
C-02	6°43'56"S 79°50'43"W
C-03	6°43'55"S 79°50'43"W

A continuación, en las ilustraciones N° 7, 8 y 9 se observa el lugar exacto donde se realizó las calicatas, el cual fue una zona descampada, donde no se encontró: ninguna tubería de desagüe o de dotación de agua potable.

Ilustración 8: Extracción de muestra, calicata C-1

Ilustración 9: Extracción de muestra, calicata C-2

Ilustración 10: Extracción de muestra, calicata C-3

2. Ceniza de bagazo de caña de azúcar

La recolección de ceniza de bagazo de caña de azúcar en la Sucroalcolera Del Chira S.A, ubicada en Av. los Tallanes Mza. e Lote. 3, Piura, Piura. El cual se recicló de desechos obtenidos de la calcinación de bagazo de caña de azúcar, usado en calderas para obtener energía. Esta agroindustria genera alrededor de 100kg de ceniza de forma mensual.

Posteriormente, lo sobrante fueron llevados a botaderos zonales porque no puede ser reutilizados Se escogió dicho material como agente estabilizador debido a su composición rico en sílice, un componente importante en la estabilización de suelos.

Ilustración 11: Recolección de la ceniza de bagazo de caña de azúcar

3. Ceniza de Eucalipto (CE)

La recolección de ceniza de eucalipto se recolectó de viviendas rurales de la ciudad Llangoden Bajo. Este material reciclado se compone de desechos obtenidos de la calcinación de leña de eucalipto, material utilizado en cocinas artesanales de uso doméstico. Estas viviendas rurales generan 50kg mensualmente de este tipo de residuos, los cuales son desechados al medio ambiente, puesto que no pueden ser reciclados.

Ilustración 12: Almacenamiento de ceniza de eucalipto

Ilustración 13: Recolección de la ceniza de eucalipto

Consideraciones éticas

- La presente investigación es autentica debido a que no se ha encontrado estudios que usen la misma combinación de material usados en el proyecto.
- Se ha presentado los resultados obtenidos en los ensayos de laboratorio de forma honesta sin realizar alteraciones a conveniencia del investigador. Además, no se realizó plagios.
- Asimismo, los antecedentes que fueron tomados como referencia para la presente investigación están citados.
- Además, se han tomado las consideraciones éticas del Código Deontológico del CIP. [36].

Tabla 23: Matriz de consistencia

<table>
<tr><th colspan="9">Estabilización de suelos arcillosos para subrasantes adicionando ceniza de bagazo de caña de azúcar y ceniza de eucalipto</th></tr>
<tr><th rowspan="2">Planteamiento del problema</th><th rowspan="2">Objetivos</th><th rowspan="2">Hipótesis</th><th colspan="3">Variables</th><th rowspan="2">Indicadores - Ensayos</th><th rowspan="2">Metodología</th></tr>
<tr><th>Tipo</th><th>Descripción</th><th>Dimensiones</th></tr>
<tr><td rowspan="11">¿Cómo influye la ceniza de bagazo de caña de azúcar y ceniza de Eucalipto como estabilizadores de suelos arcillosos para subrasantes?</td><td rowspan="11">Objetivo General:
Eevaluar la influencia de la adición de ceniza de bagazo de caña de azúcar y ceniza de Eucalipto como estabilizador de suelos arcillosos para subrasantes

Objetivos Especificos:
Determinar la composición química de la ceniza de bagazo de caña de azúcar y ceniza de Eucalipto mediante Espectroscopía de Fluorescencia de Rayos X

Clasificar el suelo conforme a lo establecido por las normas SUCS y AASHTO

Evaluar las propiedades físico-mecánicas del suelo natural y con las adiciones de ceniza de bagazo de caña de azúcar y ceniza de eucalipto para los porcentajes 7%, 10% y 13%

Calcular los costos por unidad de área de estabilización de subrasante adicionando ceniza de bagazo de caña de azúcar y ceniza de eucalipto respecto a otros métodos

Evaluar un tramo de prueba con el porcentaje óptimo de adición de ceniza de bagazo de caña de azúcar y ceniza de Eucalipto mediante el ensayo PDC.</td><td rowspan="11">La adición de la ceniza de bagazo de caña de azúcar y ceniza de Eucalipto mejora los suelos arcillosos para subrasante</td><td>Independiente</td><td>Ceniza de Eucalipto y Ceniza de Bagazo de Caña de Azúcar</td><td>Propiedades</td><td>Espectroscopia de Fluorescencia de Rayos X</td><td rowspan="11">Tipo de Investigación:
Experimental y Aplicada</td></tr>
<tr><td rowspan="10">Dependiente</td><td rowspan="6">Propiedades físicas del suelo</td><td>Límite Líquido</td><td rowspan="2">NTP 339.129</td></tr>
<tr><td>Límite Plástico</td></tr>
<tr><td>Granulometría por tamizado</td><td>MTC E 107</td></tr>
<tr><td>Granulometría por sedimentación</td><td>MTC E 109</td></tr>
<tr><td>Contenido de Humedad</td><td>NTP 339.127</td></tr>
<tr><td>Gravedad específica</td><td>MTC E 113</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Propiedades mecánicas del suelo</td><td>Proctor</td><td>NTP 339.141</td></tr>
<tr><td>CBR</td><td>ASTM D-1883</td></tr>
</table>

Resultados y discusiones

Procesamiento de datos

Se empleó el software Microsoft Excel. Para lo cual, se desarrolló los formatos para cada ensayo propuesto en la presente investigación. Posteriormente, se elaboró y analizó gráficos que describen los resultados obtenidos en cada ensayo.

Resultados

- **Espectroscopia de FRX**

Mediante este método se encontró que la composición química de la ceniza de bagazo de caña de azúcar (Tabla 24) presenta 72.37% de óxido de sílice, con una pérdida de quemado de 9.04%. A diferencia de la composición química de la ceniza de eucalipto (Tabla 25), donde por el mismo método, se encontró un 63.56% de óxido de calcio y una pérdida de quemado de 7.68%.

Tabla 24: Composición química de ceniza de bagazo de caña de azúcar

COMPOSICIÓN	CENIZA DE BAGAZO DE CAÑA DE AZÚCAR (%)
Óxido de Aluminio	1.61
Óxido de Boro	0.54
Óxido de Calcio	3.81
Óxido de Cromo	1.44
Óxido de Hierro	7.46
Óxido de Potasio	1.21
Óxido de Magnesio	1.29
Óxido de Sodio	0.91
Óxido de Fósforo	1.92
Óxido de Silicio	72.37
Perdidad por quemado	9.04

Tabla 25: Composición Química de Ceniza de Eucalipto

COMPOSICIÓN	CENIZA DE EUCALIPTO (%)
Óxido de Aluminio	5.28
Óxido de Boro	0.22
Óxido de Calcio	63.56
Óxido de Hierro	1.13
Óxido de Potasio	9.72
Óxido de Magnesio	2.45
Óxido de Sodio	3.14
Óxido de Fósforo	3.16
Óxido de Silicio	3.65
Perdidad por quemado	7.68

Clasificación mediante ASTM C 618-19

Teniendo en cuenta los criterios de clasificación ASTM C 618-19, la ceniza de bagazo de caña de azúcar pertenece al tipo F. Por lo cual, presenta propiedades puzolánicas y cementicias siendo adecuado como material estabilizador de suelos arcillosos.

Por otro lado, la ceniza de eucalipto contiene un alto contenido de óxido de calcio, componente principal de la cal. Lo cual le otorga la propiedad similar al de la cal viva. Por ende, es apto para ser utilizado como material estabilizador de suelos arcillosos.

- **Ensayos físicos**

1. Contenido de Humedad

Se tuvo en cuenta la NTP 339.129. Asimismo, es importante resaltar que el presente ensayo no se realizó a las combinaciones de SN+%CBCE.

El promedio de la humedad natural obtenidas en las 3 calicatas fue: 20.41% (DE: 1.04%); 23.20% (DE 1.75%) y 23.38% (DE 0.8%) para C-01, C-02 y C-03, respectivamente. A continuación, se detalla los resultados:

Tabla 26. Contenido de humedad

	C-01	C-02	C-03
M-01	20.19%	23.42%	23.43%
M-02	19.49%	24.83%	24.15%
M-03	21.54%	21.36%	22.55%
Promedio	20.41%	23.20%	23.38%

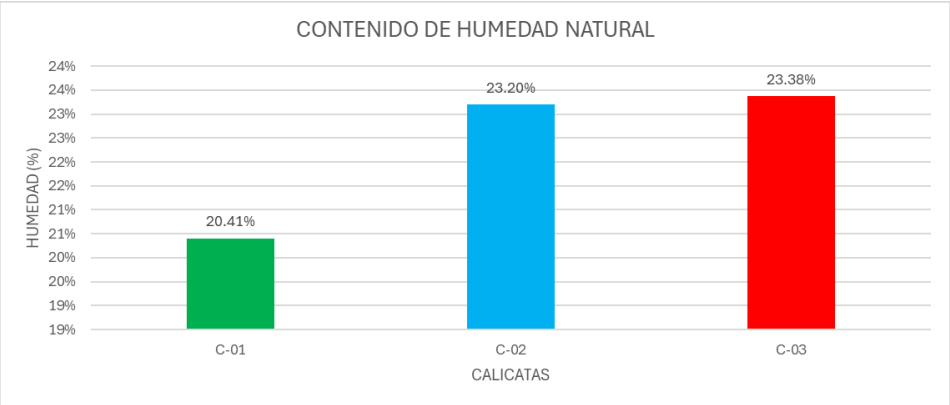


Gráfico 1. Contenido de Humedad

La tabla 26 y el gráfico 1 muestran los resultados del contenido de humedad del suelo natural muestran variaciones significativas entre las calicatas analizadas. La Calicata C-01 exhibe un contenido de humedad promedio de 20,41 %, mientras que las calicatas C-02 y C-03 muestran valores superiores, con promedios de 23,20 % y 23,38 %, respectivamente. Estas variaciones se atribuyen a la heterogeneidad intrínseca del suelo arcilloso, principalmente vinculada a un contenido elevado de finos y arcillas activas en las calicatas C-02 y C-03, lo que incrementa la capacidad de retención de agua debido a los efectos de adsorción superficial. Además, elementos tales como la profundidad del muestreo y el nivel de humedad en el lugar de muestreo ejercen influencia sobre los valores adquiridos. Los hallazgos demuestran que el suelo exhibe condiciones iniciales heterogéneas, las cuales deben ser consideradas en la interpretación de su comportamiento físico en las pruebas subsiguientes.

2. Granulometría por tamizado

El ensayo de granulometría por tamizado se tomó en cuenta la MTC E107. Asimismo, es importante resaltar que este ensayo no se realizó a las combinaciones de SN+%CBCE.

El promedio de limos y arcillas obtenidos en la granulometría por tamizado en las 3 calicatas fue: 89.78% (DE: 1.18%); 95.10% (DE 0.85%) y 80.65% (DE 0.69%) para C-01, C-02 y C-03, respectivamente.

Los resultados de la granulometría por tamizado de las 3 calicatas fueron los siguientes:

Tabla 27. Granulometría por tamizado de C-01

MUESTRA	Grava(%) 75.00-4.75 mm	Arena (%) 4.75-0.075 mm	Limo/ Arcilla (%) <0.075 mm
M-01	0.00%	9.18%	90.82%
M-02	0.10%	9.87%	90.03%
M-03	0.00%	11.51%	88.49%
PROMEDIO	0.03%	10.19%	89.78%

La tabla 27 muestra la evaluación granulométrica mediante tamizado del suelo natural correspondiente a la Calicata C-01 pone de manifiesto una predominancia significativa de la fracción fina. En términos promedio, el suelo se compone de un 89,78% de limo y arcilla, un 10,19% de arena y una presencia casi inexistente de grava (0,03%). Esta distribución granulométrica posibilita la categorización del material como un suelo fino, caracterizado por subrasantes arcillosas, en el que las partículas menores a 0,075 mm regulan el comportamiento físico-mecánico del suelo. El contenido reducido de arena y la falta de grava señalan una estructura granular insuficiente, lo que se manifiesta en una cohesión incrementada, una capacidad de retención de agua elevada y una mayor susceptibilidad a las fluctuaciones volumétricas frente a las fluctuaciones de humedad. La coherencia de los hallazgos entre las muestras M-01, M-02 y M-03 evidencia una homogeneidad granulométrica interna en la calicata, lo que corrobora la representatividad del muestreo efectuado.

Tabla 28. Granulometría por Tamizado de C-02

MUESTRA	Grava(%) 75.00-4.75 mm	Arena (%) 4.75-0.075 mm	Limo/ Arcilla (%) <0.075 mm
M-01	0.00%	5.80%	94.20%
M-02	0.00%	4.10%	95.90%
M-03	0.00%	4.80%	95.20%
PROMEDIO	0.00%	4.90%	95.10%

La tabla 28 muestra La evaluación granulométrica efectuada mediante tamizado del suelo natural correspondiente a la Calicata C-02 revela una predominancia aún más pronunciada de la fracción fina en comparación con la Calicata C-01. En términos promedio, el material se compone de un 95,10 % de limo y arcilla, un 4,90 % de arena y una total ausencia de grava.

Esta distribución pone de manifiesto que se trata de un suelo extremadamente fino, en el que las partículas inferiores a 0,075 mm ejercen un control casi total sobre el comportamiento del material. El bajo contenido de arena disminuye la capacidad de drenaje y la granulometría del suelo, promoviendo una retención de agua elevada y una cohesión más robusta. Además, la coherencia de los hallazgos entre las muestras M-01, M-02 y M-03 corrobora una homogeneidad granulométrica en el interior de la calicata. Estas propiedades son indicativas de suelos arcillosos de baja capacidad portante, un factor que debe ser tenido en cuenta en la interpretación de su comportamiento físico frente a los diversos ensayos de caracterización.

Tabla 29. Granulometría por Tamizado de C-03

MUESTRA	Grava(%) 75.00-4.75 mm	Arena (%) 4.75-0.075 mm	Limo/ Arcilla (%) <0.075 mm
M-01	0.10%	18.99%	80.91%
M-02	0.10%	20.04%	79.86%
M-03	0.30%	18.53%	81.17%
PROMEDIO	0.17%	19.19%	80.65%

La tabla 29 muestra La evaluación granulométrica efectuada mediante tamizado del suelo natural correspondiente a la Calicata C-03 revela una proporción superior de fracción arenosa en comparación con las calicatas C-01 y C-02. En promedio, el material se compone de un 80,65 % de limo y arcilla, un 19,19% de arena y una mínima proporción de grava de 0,17 %. Esta distribución sugiere que, aunque el suelo persiste en su clasificación como un suelo fino de carácter arcilloso, una mayor presencia de arena favorece una estructura granular relativa más favorable, favoreciendo el drenaje y mitigando parcialmente la cohesión excesiva característica de suelos altamente arcillosos.

La reducida variabilidad entre las muestras M-01, M-02 y M-03 corrobora la homogeneidad granulométrica interna de la calicata, corroborando así la representatividad del muestreo seleccionado. Estas propiedades distinguen a la Calicata C-03 respecto a las otras áreas examinadas y explican su comportamiento físico distintivo dentro del conjunto de suelos evaluados.

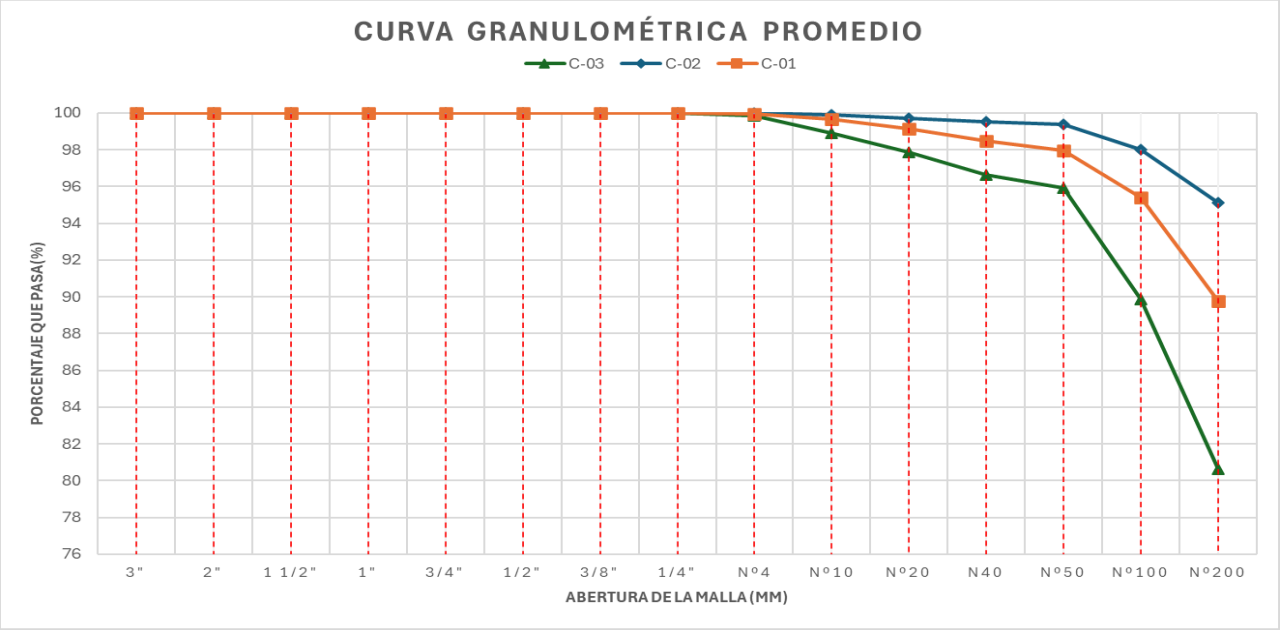


Gráfico 2. Curva granulométrica de C-01, C-02 y C-03

3. Gravedad específica

Para la gravedad especifica se siguió los lineamientos del MTC E 113. El promedio de las muestras de suelo natural (SN) y de las muestras de SN+ %CBCE, se pueden apreciar en la tabla 30. En dicha tabla se puede observar que a medida que se le va adicionando CBCE, la gravedad especifica aumenta.

Tabla 30. Gravedad específica calicata 1

CALICATA	DOSIFICACIÓN	MUESTRA	GRAVEDAD ESPECIFICA
C-01	100% SUELO NATURAL	PROMEDIO	2.52
	93% SUELO NATURAL + 7%CBCE	PROMEDIO	2.55
	90% SUELO NATURAL + 10%CBCE	PROMEDIO	2.55
	87% SUELO NATURAL + 13%CBCE	PROMEDIO	2.62

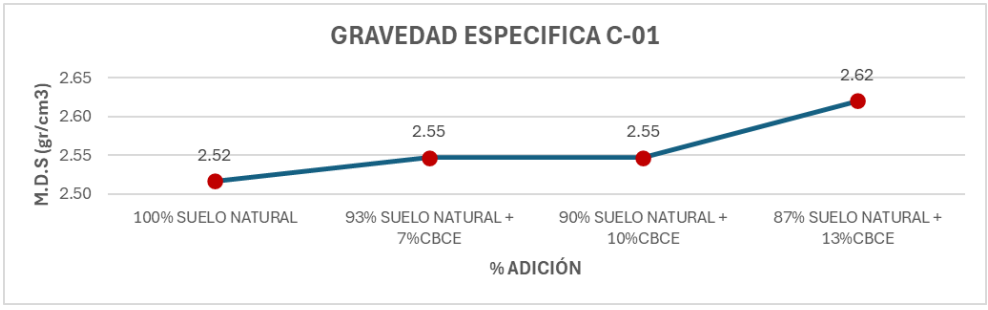


Gráfico 3. Variación en G.S. de C-01

La tabla 30 y gráfico 3 muestra los hallazgos del ensayo de gravedad específico para la Calicata C-01 evidencian una escalada progresiva a medida que se incrementa el porcentaje de ceniza de bagazo de caña de azúcar y ceniza de eucalipto (CBCE) incorporada al suelo. El suelo natural exhibe un valor promedio de gravedad específica de 2,52, en contraste con las combinaciones con 7% y 10% de CBCE que logran valores análogos de 2,55. La gravedad específica se incrementa hasta alcanzar un valor de 2,62.

Esta conducta es atribuible a la integración de partículas minerales derivadas de las cenizas, las cuales alteran la composición del sólido del suelo y producen una matriz con un peso específico relativo superior. Además, el incremento detectado insinúa una interacción sólido-sólida más eficaz entre las partículas del suelo arcilloso y el material estabilizador, lo que sugiere una modificación en la estructura interna del material. La ascendente tendencia de la gravedad específica pone de manifiesto que la incorporación de CBCE ejerce una influencia directa sobre las características físicas del suelo, un aspecto crucial para la interpretación de los resultados de compactación y el comportamiento mecánico de la subrasante estabilizada.

Tabla 31. Gravedad específica calicata 2

CALICATA	DOSIFICACIÓN	MUESTRA	GRAVEDAD ESPECIFICA
C-02	100% SUELO NATURAL	PROMEDIO	2.64
	93% SUELO NATURAL + 7%CBCE	PROMEDIO	2.68
	90% SUELO NATURAL + 10%CBCE	PROMEDIO	2.72
	87% SUELO NATURAL + 13%CBCE	PROMEDIO	2.77

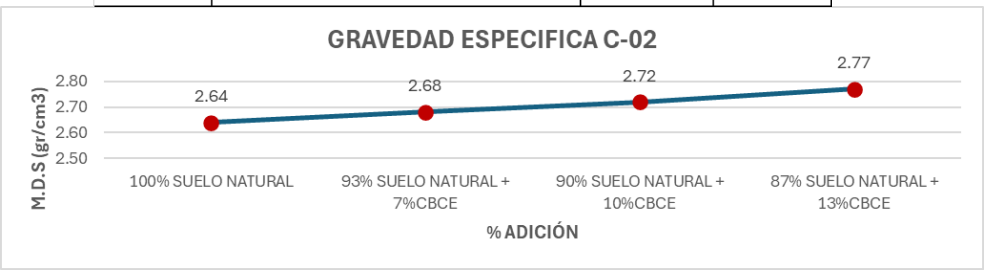


Gráfico 4. Variación en G.S. de C-02

La tabla 31 y gráfico 02 muestran los hallazgos del ensayo de gravedad específica aplicado a la Calicata C-02 demuestran un incremento sostenido y proporcional a medida que se incrementa el porcentaje de ceniza de bagazo de caña de azúcar y ceniza de eucalipto (CBCE) incorporada al suelo. El suelo natural exhibe una gravedad específica media de 2,64, un valor

que se eleva a 2,68 con una aplicación de 7% de CBCE, a 2,72 con un 10% y alcanza 2,77 al aplicar un 13% de material estabilizador.

Este comportamiento se atribuye a la elevada fracción fina del suelo de la Calicata C-02, que propicia una interacción más intensa entre las partículas arcillosas y las cenizas, facilitando una incorporación más efectiva del material estabilizante en la matriz sólida. Además, la finura incrementada del suelo permite la llenación de vacíos y la alteración de la estructura interna, lo cual se manifiesta en el incremento progresivo de la gravedad específica. Estos hallazgos corroboran que la incorporación de CBCE altera notablemente las características físicas del suelo de la Calicata C-02, un factor que debe ser contemplado en el examen de su comportamiento frente a los ensayos de compactación y resistencia.

Tabla 32. Gravedad específica calicata 3

CALICATA	DOSIFICACIÓN	MUESTRA	GRAVEDAD ESPECIFICA
C-03	100% SUELO NATURAL	PROMEDIO	2.53
	93% SUELO NATURAL + 7%CBCE	PROMEDIO	2.67
	90% SUELO NATURAL + 10%CBCE	PROMEDIO	2.74
	87% SUELO NATURAL + 13%CBCE	PROMEDIO	2.77

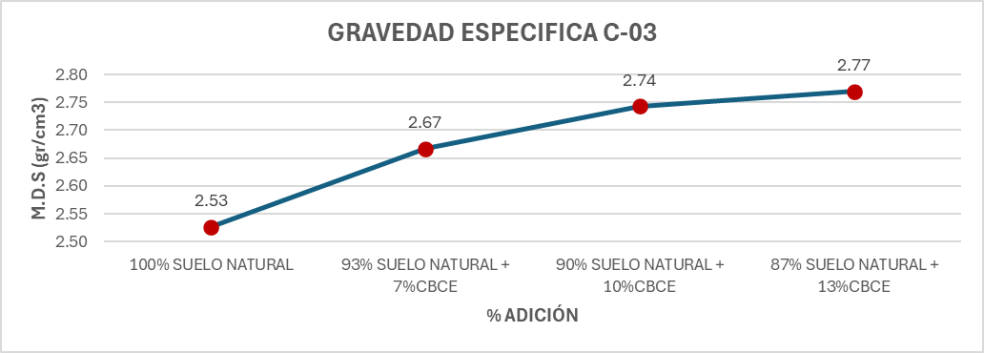


Gráfico 5. Variación G.S. de C-03

La tabla 32 y gráfico 5 muestran 0los hallazgos del ensayo de gravedad específico aplicado a la Calicata C-03 evidencian un incremento notable a medida que se eleva el porcentaje de ceniza de bagazo de caña de azúcar y ceniza de eucalipto (CBCE) incorporada al suelo. El terreno natural exhibe una gravedad específica media de 2,53, un valor que se incrementa a 2,67 con una aplicación del 7% de CBCE, a 2,74 con un 10% y alcanza 2,77 con un 13% de material estabilizante.

Este comportamiento se vincula con una mayor presencia de fracción arenosa en la Calicata C-03 en comparación con otras calicatas, lo que promueve una acomodación más eficaz de las partículas sólidas y una integración más eficaz del material estabilizador en la matriz del suelo. Además, la combinación de partículas finas y arenosas facilita una redistribución optimizada de vacíos, lo que resulta en un incremento del peso específico relativo del material compuesto. La tendencia observada corrobora que la incorporación de CBCE altera eficazmente las características físicas del terreno, lo cual se manifiesta en el incremento de la gravedad específica del material estabilizado.

4. Granulometría por hidrómetro o por sedimentación

Para la granulometría por sedimentación se siguió los lineamientos del MTC E109. La finalidad de este ensayo fue determinar el tamaño de las partículas que pasan por el tamiz N° 200 de la muestra de suelo de las 3 calicatas.

El promedio de las muestras para suelo natural de la granulometría por sedimentación obtenidas en las 3 calicatas presentó un tamaño máximo de 0.04 mm y un tamaño mínimo de 0.0012. Asimismo, cuando se adicionó los 3 porcentajes (7%, 10% y 13%) al Suelo natural (SN) se mantuvo el tamaño máximo y mínimo de partícula. Se observó que en la C-01 presentó mayor porcentaje de partículas cuyo diámetro osciló entre 0.038-0.004. En cambio, en la C-02 y C-03 se tuvo una menor cantidad de material pasante de material cuyo diámetro osciló entre 0.038-0.012. Esto se debe a que el porcentaje de limos y arcillas se disminuyó al reemplazar parte del suelo natural por CBCE.

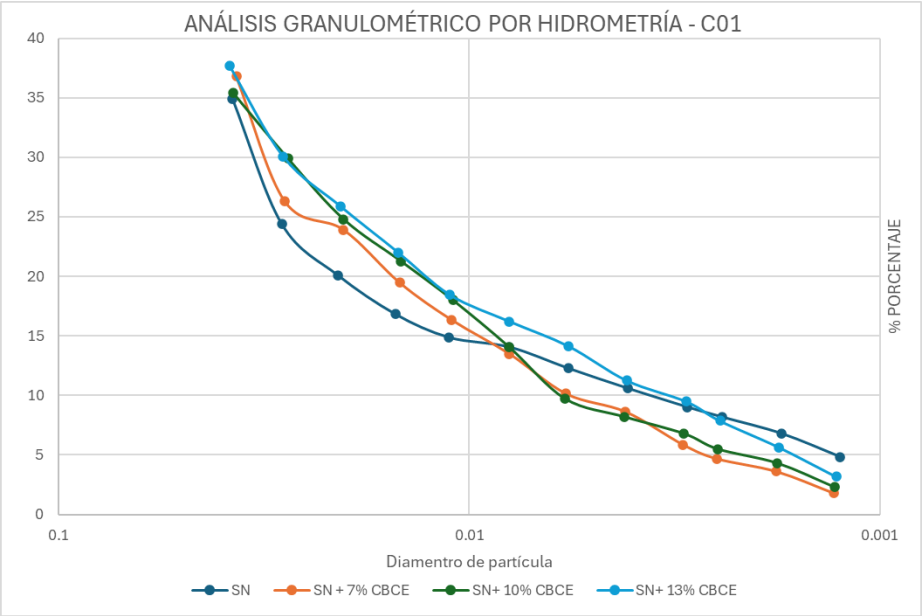


Gráfico 6. Curva granulométrica por sedimentación para C-01

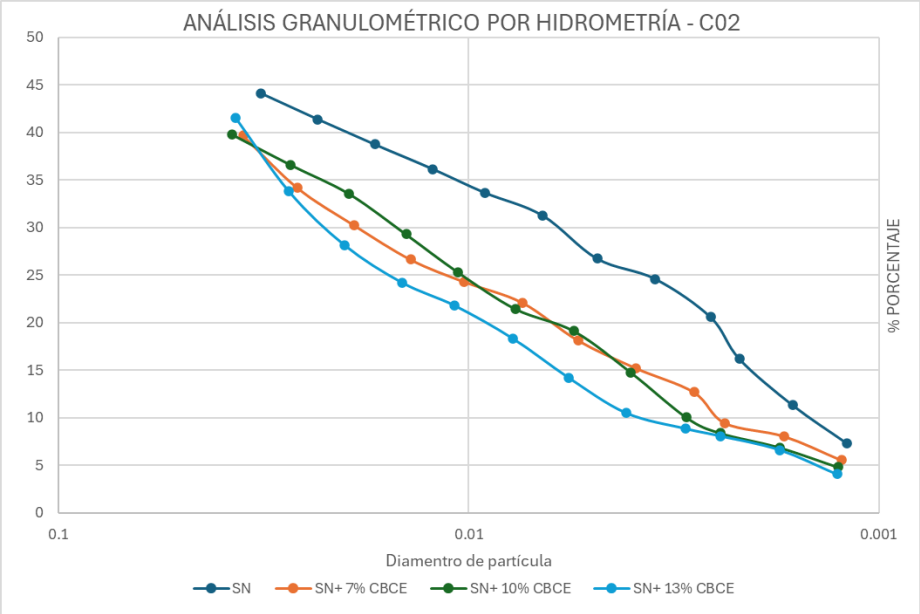


Gráfico 7. Curva granulométrica por sedimentación para C-02

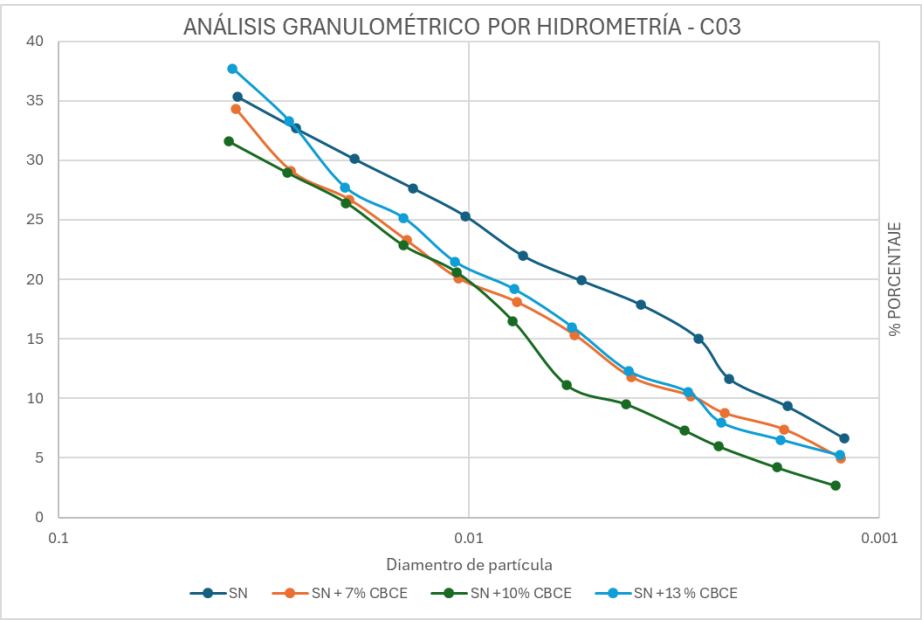


Gráfico 8. Curva granulométrica por sedimentación para C-03

5. Curva unificada de granulometría por tamizado y granulometría por sedimentación

Con el promedio de los retenidos de las muestras de granulometría por tamizado y los porcentajes promedios que pasa de las muestras de granulometría por sedimentación se unificó las curvas granulométricas. Las cuales se pueden apreciar en las gráficas 09, 10 y 11. Se obtuvo que en la C-01, C-02 y C-03 no presentó cambios en la curva granulométrica.

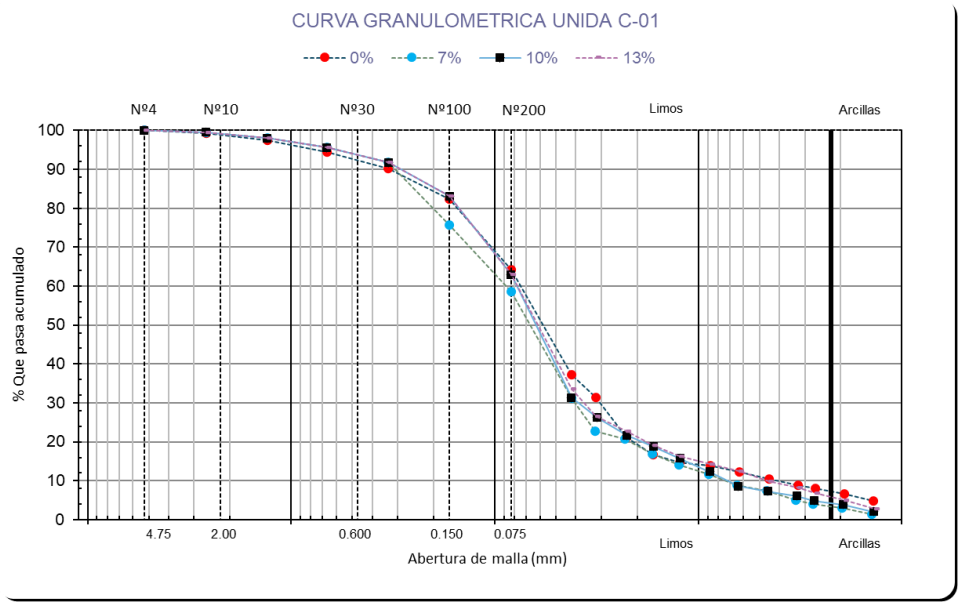


Gráfico 9. Curva granulométrica unida para C-01

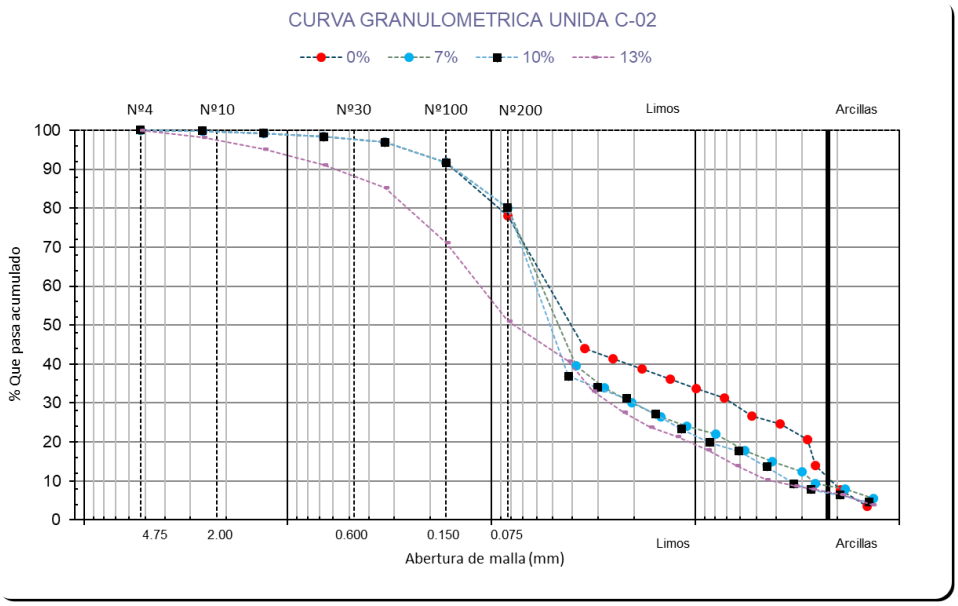


Gráfico 10. Curva granulométrica unida para C-02

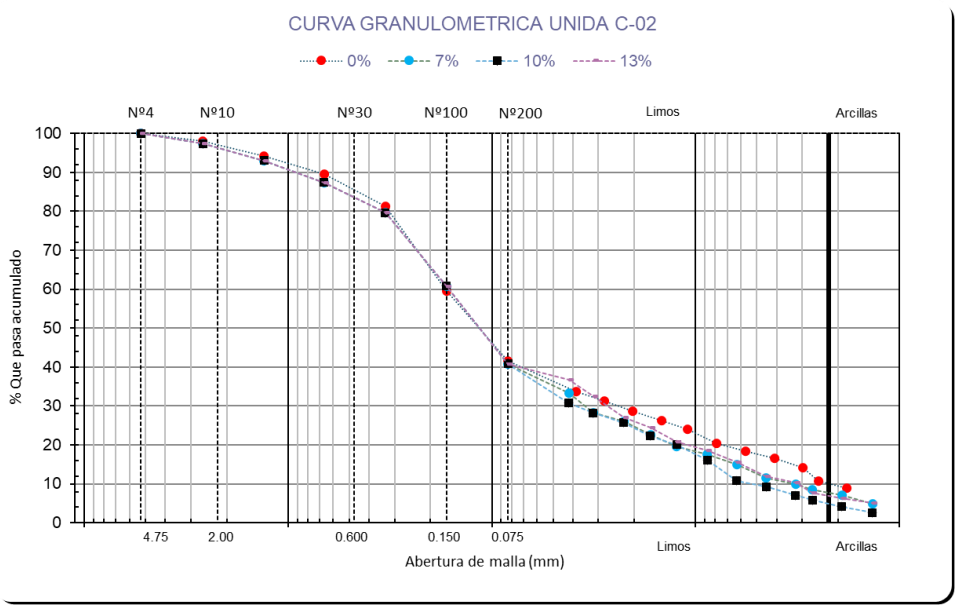


Gráfico 11. Curva granulométrica unida para C-03

6. Límites de atterberg

El ensayo de límites de atterberg se realizó siguiendo los lineamientos de la NTP 339.129.

Se realizó el promedio de las 3 muestras realizadas a cada calicata y cada combinación y se observó que el límite líquido (LL), límite plástico (LP) e Índice de Plástico (IP) aumentó gradualmente en cada porcentaje de adición de CBCE (Tabla 31).

Tabla 33. Tabla de límites de atterberg calicata 01

CALICATA	DOSIFICACIÓN	MUESTRA	LL	LP	IP
C-01	100% SUELO NATURAL	PROMEDIO	46.83%	19.68%	27.14%
	93% SUELO NATURAL + 7%CBCE	PROMEDIO	52.25%	23.57%	28.67%
	90% SUELO NATURAL + 10%CBCE	PROMEDIO	51.06%	21.12%	29.94%
	87% SUELO NATURAL + 13%CBCE	PROMEDIO	52.67%	21.69%	30.98%

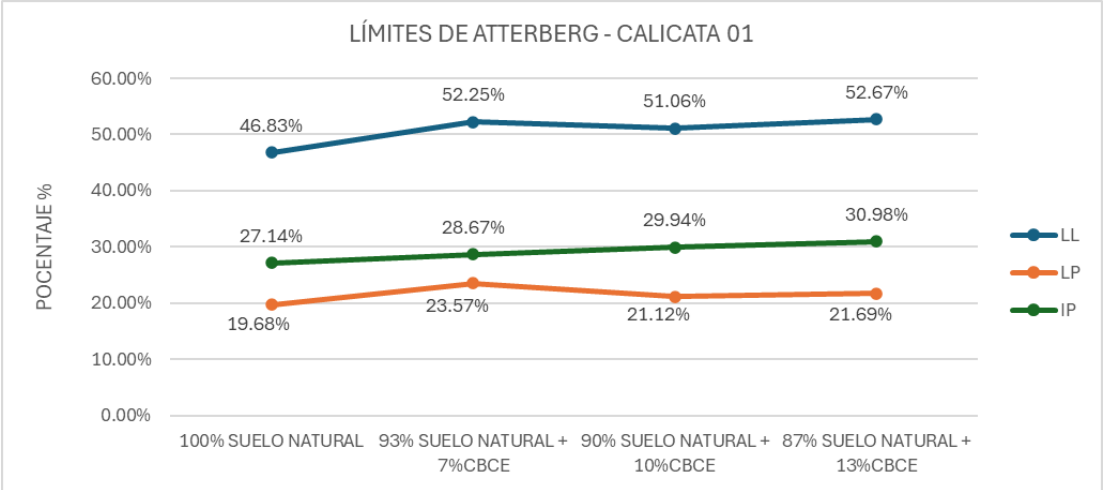


Gráfico 12. Gráfico de Límites de Atterberg de C-01

La tabla 33 y gráfico 12 demuestran que la incorporación de ceniza de bagazo de caña de azúcar y ceniza de eucalipto (CBCE) provoca fluctuaciones progresivas en las propiedades de plasticidad del suelo. El suelo natural exhibe un límite líquido promedio de 46,83 %, un límite plástico de 19,68 % y un índice de plasticidad de 27,14%, evidenciando así su carácter arcilloso. El límite líquido experimenta un incremento hasta alcanzar valores cercanos al 52 %, mientras que el límite plástico también exhibe un incremento moderado.

En consecuencia, el índice de plasticidad exhibe un incremento progresivo, alcanzando un 30,98 % con la dosificación más alta. Esta conducta se atribuye a la elevada finura y porosidad de las cenizas, factores que potencian la capacidad del suelo para retener agua, así como a la interacción superficial entre las partículas arcillosas y el material estabilizante. Las fluctuaciones observadas sugieren que, en la Calicata C-01, la incorporación de CBCE altera la plasticidad del suelo, elevando los intervalos de humedad en los que el material exhibe comportamiento plástico.

Tabla 34. Tabla de límites de atterberg calicata 02

CALICATA	DOSIFICACIÓN	MUESTRA	LL	LP	IP
C-02	100% SUELO NATURAL	PROMEDIO	44.91%	21.62%	23.28%
	93% SUELO NATURAL + 7%CBCE	PROMEDIO	46.22%	21.59%	24.63%
	90% SUELO NATURAL + 10%CBCE	PROMEDIO	47.38%	21.87%	25.51%
	87% SUELO NATURAL + 13%CBCE	PROMEDIO	47.04%	19.13%	27.91%

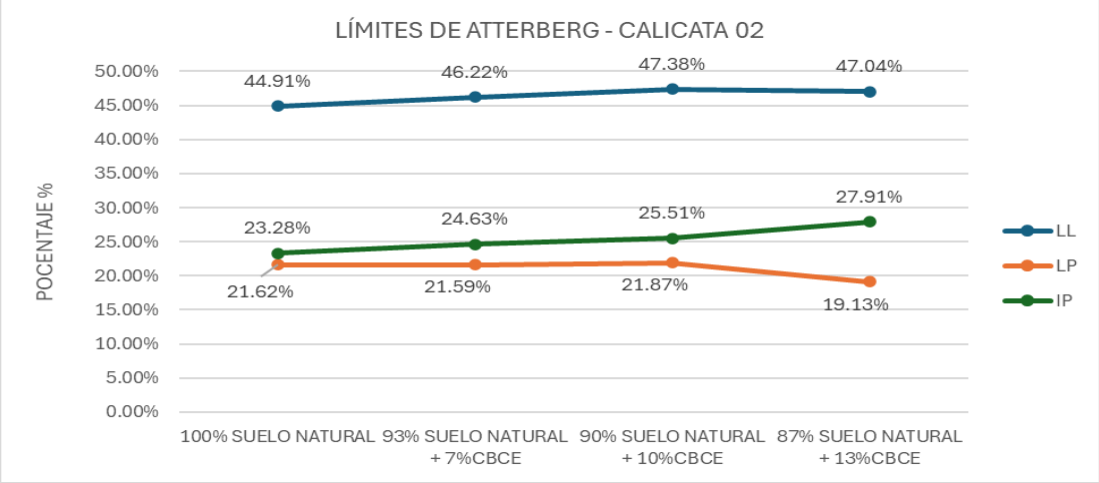


Gráfico 13. Gráfico de Límites de Atterberg de C-02

La tabla 34 y gráfico 13 muestran fluctuaciones progresivas en las características de consistencia del suelo a medida que se incrementa la concentración de ceniza de bagazo de caña de azúcar y ceniza de eucalipto (CBCE). El suelo natural exhibe un límite líquido promedio de 44,91%, un límite plástico de 21,62% y un índice de plasticidad de 23,28%, evidenciando así su naturaleza de suelo arcilloso. Con la integración de 7% y 10% de CBCE,

el límite líquido experimenta un leve incremento hasta alcanzar el 47,38 %, mientras que el límite plástico permanece prácticamente inalterado. En consecuencia, se observa un incremento moderado en el índice de plasticidad. No obstante, al incrementar la dosificación al 13% de CBCE, se registra una disminución del límite plástico hasta alcanzar el 19,13%, lo que resulta en un aumento más marcado del índice de plasticidad, alcanzando un 27,91%.

Esta conducta es atribuible a la elevada finura del suelo de la Calicata C-02, en la que la interacción entre las partículas arcillosas y las cenizas incrementa la demanda de agua y expande el espectro de comportamiento plástico. Las fluctuaciones detectadas demuestran que la reacción del suelo a la adición de CBCE no es lineal y está condicionada por la dosificación aplicada.

Tabla 35. Tabla de límites de atterberg calicata 03

CALICATA	DOSIFICACIÓN	MUESTRA	LL	LP	IP
C-03	100% SUELO NATURAL	PROMEDIO	46.08%	20.63%	25.45%
	93% SUELO NATURAL + 7%CBCE	PROMEDIO	49.71%	19.67%	30.04%
	90% SUELO NATURAL + 10%CBCE	PROMEDIO	53.13%	19.91%	33.23%
	87% SUELO NATURAL + 13%CBCE	PROMEDIO	54.17%	18.81%	35.36%

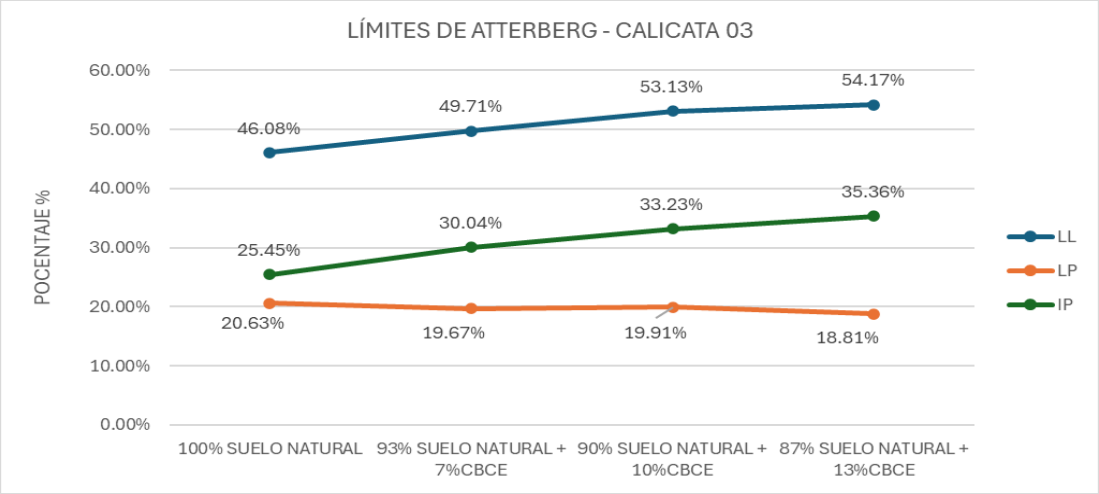


Gráfico 14. Gráfico de Límites de Atterberg de C-03

La tabla 35 y gráfico 14 ponen de manifiesto una fluctuación notable en las propiedades de plasticidad del suelo a medida que se incrementa la concentración de ceniza de bagazo de caña de azúcar y ceniza de eucalipto (CBCE). El suelo natural exhibe un promedio de límite líquido de 46,08 %, un límite plástico de 20,63 % y un índice de plasticidad de 25,45 %, lo que corrobora su naturaleza arcillosa.

Con la integración de 7%, 10% y 13% de CBCE, se observa un incremento gradual en el límite líquido hasta alcanzar un 54,17 %, mientras que el límite plástico exhibe una tendencia descendente, alcanzando un 18,81 % en la dosificación más alta. Por consiguiente, se observa un incremento significativo en el índice de plasticidad, alcanzando un valor de 35,36 %.

Esta conducta se debe a la elevada capacidad de absorción de agua de las cenizas y a su interacción con las partículas finas del suelo, lo que expande el espectro de humedad en el que el material exhibe comportamiento plástico. Las fluctuaciones detectadas señalan que la incorporación de CBCE potencia la plasticidad del suelo de la Calicata C-03, un factor que debe ser contemplado en el análisis de su comportamiento físico y en la elección de las dosificaciones apropiadas para su consolidación.

7. Clasificación de suelos según AASHTO y SUCS

Teniendo los resultados de granulometría por tamizado y límites de atterberg, se clasificó el tipo de suelo según las tablas de las normas de AASHTO y SUCS (Tabla 32). Se observó que en la C-01 y C-03, la adición de CBCE cambió la clasificación, pasó de ser una arcilla de baja plasticidad (CL) a ser una arcilla de alta plasticidad (CH). Por otro lado, en la calicata C-02 se observó que se mantuvo la clasificación según SUCS. Asimismo, en cuanto a la clasificación según AASHTO la adición de CBCE cambió el índice de grupo de cada muestra debido a los cambios en el LL e IP.

Tabla 36. Clasificación según AASHTO Y SUCS

Calicata	DOSIFICACIÓN	MUESTRA	AASHTO	SUCS
C-01	100% SUELO NATURAL	Promedio	A-7-6 (16)	CL
	93% SUELO NATURAL + 7%CBCE	Promedio	A-7-6 (17)	CH
	90% SUELO NATURAL + 10%CBCE	Promedio	A-7-6 (18)	CH
	87% SUELO NATURAL + 13%CBCE	Promedio	A-7-6 (18)	CH
C-02	100% SUELO NATURAL	Promedio	A-7-6 (14)	CL
	93% SUELO NATURAL + 7%CBCE	Promedio	A-7-6 (15)	CL
	90% SUELO NATURAL + 10%CBCE	Promedio	A-7-6 (16)	CL
	87% SUELO NATURAL + 13%CBCE	Promedio	A-7-6 (16)	CL
C-03	100% SUELO NATURAL	Promedio	A-7-6 (15)	CL
	93% SUELO NATURAL + 7%CBCE	Promedio	A-7-6 (16)	CL
	90% SUELO NATURAL + 10%CBCE	Promedio	A-7-6 (16)	CH
	87% SUELO NATURAL + 13%CBCE	Promedio	A-7-6 (16)	CH

- **Ensayos mecánicos: Proctor modificado y CBR**

8. Proctor modificado

El ensayo de Proctor modificado se realizó siguiendo los lineamientos de la NTP 339.141. Se realizó el promedio de las 3 muestras realizadas a cada calicata y cada combinación y el resumen de resultados se aprecia en la tabla 37, 38 y 39.

Tabla 37. Proctor modificado C-01

Proctor modificado C-01			
Dosificación	Muestra	C-01	
		O.C.H (%)	M.D.S (gr/cm3)
100 % Suelo Natural	Promedio	15.5	1.75
93% Suelo + 7% CBCE	Promedio	14.55	1.80
90% Suelo + 10% CBCE	Promedio	13.8	1.813
87% Suelo + 13% CBCE	Promedio	13.6	1.764

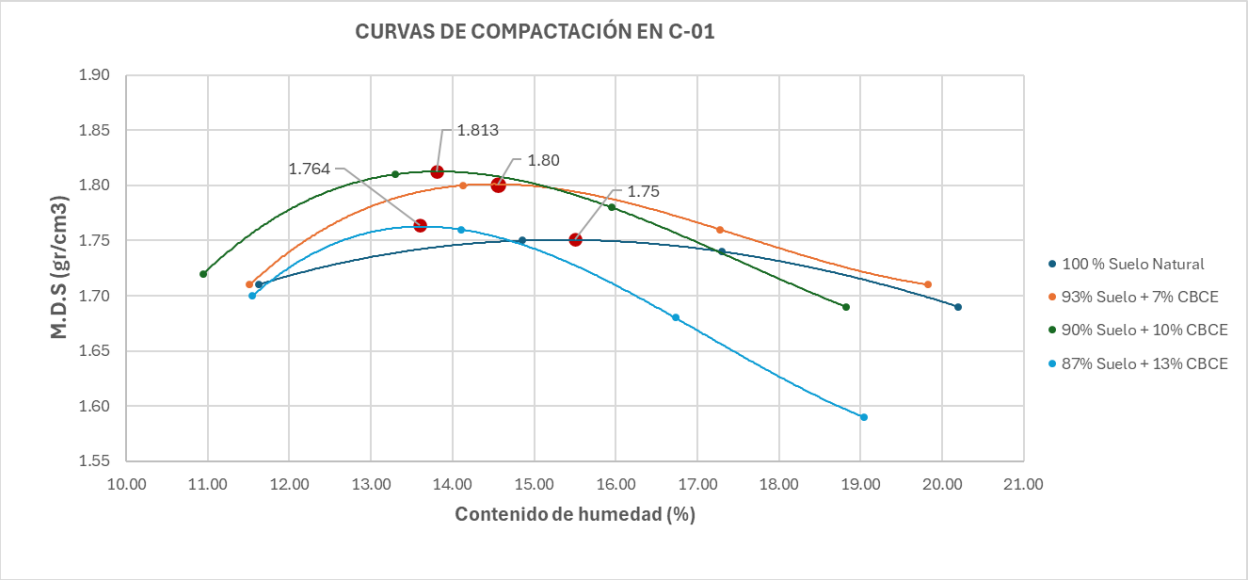


Gráfico 15. Curvas de compactación C-01

En la tabla 37 y gráfico 15 evidencian una mejora inicial del comportamiento de compactación del suelo con la adición de ceniza de bagazo de caña de azúcar y ceniza de eucalipto (CBCE).

El suelo natural presenta un contenido óptimo de humedad de 15,5 % y una máxima densidad seca de 1,75 g/cm³. Con la incorporación de 7 % y 10 % de CBCE, se observa una disminución progresiva del contenido óptimo de humedad hasta 14,55 % y 13,8 %, respectivamente, acompañada de un incremento de la máxima densidad seca, alcanzando un valor máximo de 1,813 g/cm³ con 10 % de CBCE.

Este comportamiento indica una mejor acomodación de las partículas sólidas y una interacción favorable entre el suelo arcilloso y el material estabilizante. Sin embargo, al incrementar la dosificación a 13 % de CBCE, la máxima densidad seca disminuye a 1,764 g/cm³, lo que sugiere que un exceso de material estabilizante puede generar una estructura menos densa debido al aumento de finos y a una mayor demanda de humedad.

En conjunto, los resultados muestran que, para la Calicata C-01, existe una dosificación óptima de CBCE que mejora las características de compactación del suelo.

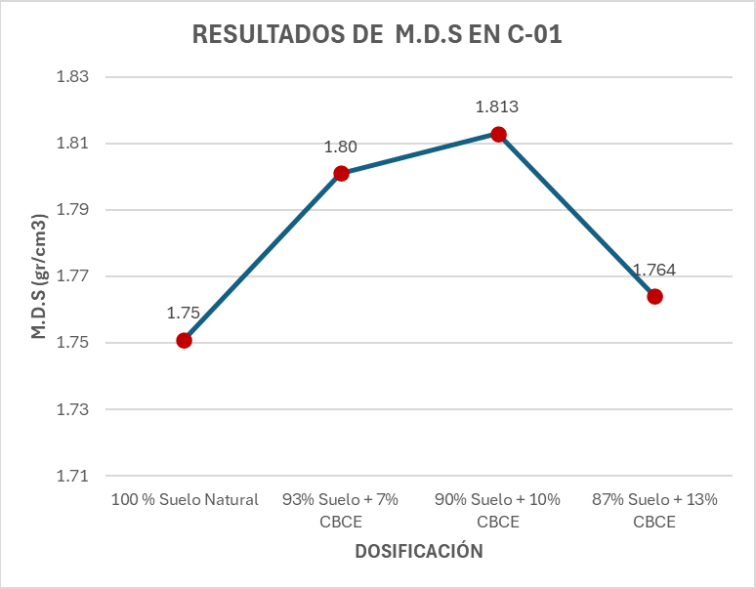


Gráfico 16. Variación de M.D.S. C-01

El Gráfico 16 ilustra que la densidad seca máxima de la Calicata C-01 se incrementa de manera progresiva con la incorporación de CBCE hasta alcanzar una dosificación del 10%, alcanzando su valor máximo, lo que pone de manifiesto una mejora en la compactación del suelo. Sin embargo, al aumentar la dosificación al 13%, se evidencia una reducción marginal de la densidad seca, lo que sugiere que un exceso de material estabilizante puede influir en la densificación adecuada del suelo. Esta conducta corrobora la presencia de una dosis óptima de CBCE para la Calicata C-01.

Tabla 38. Proctor modificado C-02

Proctor modificado C-02			
DOSIFICACION	Profundidad	C-02	
		O.C.H (%)	M.D.S (gr/cm3)
100 % Suelo Natural	1.5	14.7	1.891
93% Suelo + 7% CBCE	1.5	17	1.77
90% Suelo + 10% CBCE	1.5	16.8	1.76
87% Suelo + 13% CBCE	1.5	16	1.821

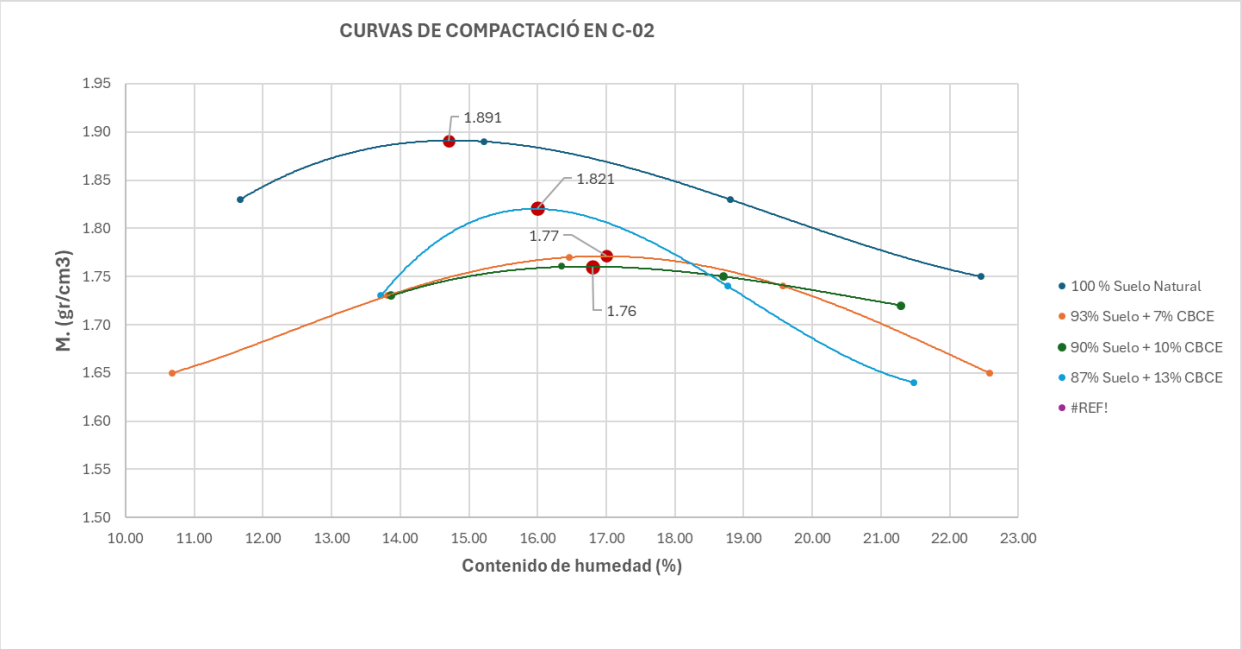


Gráfico 17. Curva de compactación C-02

La tabla 38 y gráfico 17 evidencian un comportamiento contraproducente de la máxima densidad seca (MDS) frente a la adición de ceniza de bagazo de caña de azúcar y ceniza de eucalipto (CBCE). El suelo natural presenta una MDS de 1,891 g/cm³ con un contenido óptimo de humedad de 14,7 %.

Sin embargo, al incorporar 7 % y 10 % de CBCE, la MDS disminuye de manera significativa hasta 1,77 g/cm³ y 1,76 g/cm³, respectivamente, acompañada de un incremento del contenido óptimo de humedad por encima del valor del suelo natural.

Este comportamiento se explica por la alta fracción de limo y arcilla presente en la Calicata C-02, la cual, al interactuar con el CBCE, favorece la formación de estructuras floculadas y agregadas que incrementan los vacíos internos del material, reduciendo su capacidad de densificación bajo energía de compactación. Asimismo, la elevada capacidad de absorción de

agua de las cenizas incrementa la demanda de humedad, dificultando la obtención de una estructura compacta.

Al aumentar la dosificación a 13 % de CBCE, la MDS muestra una recuperación parcial hasta 1,821 g/cm³, lo que sugiere una redistribución más uniforme del material estabilizante; no obstante, dicho valor continúa siendo inferior al del suelo natural.

En conjunto, los resultados indican que, para la Calicata C-02, la estabilización con CBCE no resulta favorable en términos de densificación, debido a las características intrínsecas del suelo altamente fino y su interacción con el material estabilizante.

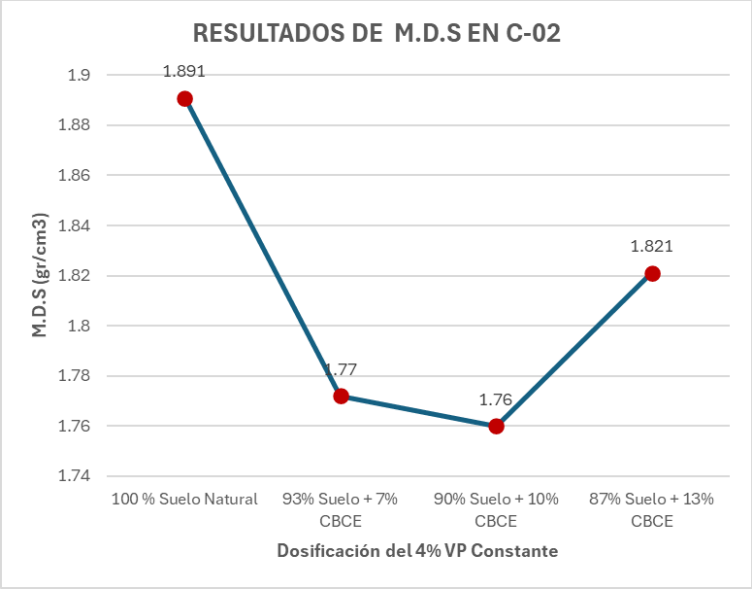


Gráfico 18. Variación de M.D.S. C-02

El Gráfico 18 evidencia que la adición de CBCE en la Calicata C-02 genera una disminución de la máxima densidad seca respecto al suelo natural, especialmente en las dosificaciones de 7 % y 10 %. Este comportamiento confirma que la interacción entre el CBCE y el suelo de alta fracción fina produce una estructura menos densa, asociada a un aumento del contenido óptimo de humedad y a la formación de agregados floculados, lo que limita la eficiencia del proceso de compactación.

Tabla 39. Proctor modificado C-03

Proctor modificado C-03			
		C-03	
DOSIFICACIÓN	PROFUNDIDAD	O.C.H. (%)	M.D.S. (gr/cm3)
100% Suelo Natural	1.5	16	1.920
93% Suelo + 7% CBCE	1.5	16.5	1.800
90% Suelo + 10% CBCE	1.5	16.3	1.795
87% Suelo + 13% CBCE	1.5	15.4	1.832

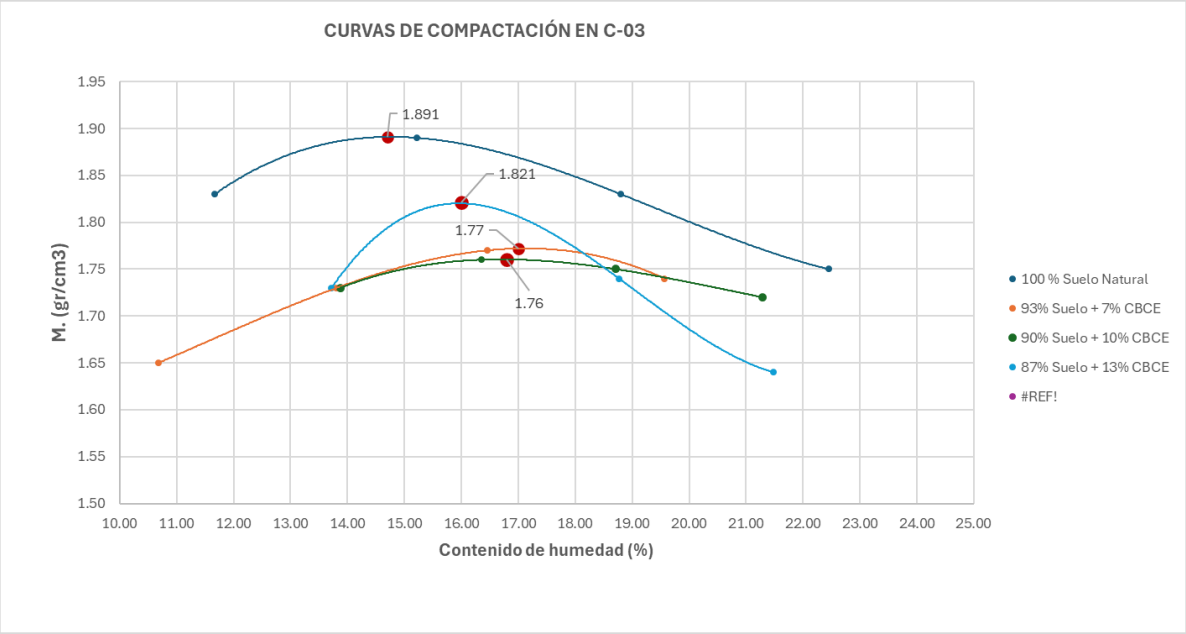


Gráfico 19. Curva de compactación C-03

La tabla 39 y gráfico 19 se observa que la adición de CBCE genera una disminución inicial de la Máxima Densidad Seca respecto al suelo natural (1.92 g/cm³), alcanzando valores mínimos con dosificaciones del 7 % y 10 %. Este comportamiento se atribuye a la menor densidad y a la interferencia del CBCE en el empaquetamiento de las partículas del suelo. Sin embargo, con una dosificación del 13 % de CBCE se evidencia una recuperación parcial de la M.D.S. (1.832 g/cm³), lo que indica una mejor interacción suelo–CBCE y una mayor eficiencia en la compactación, acompañada de una reducción del contenido óptimo de humedad.

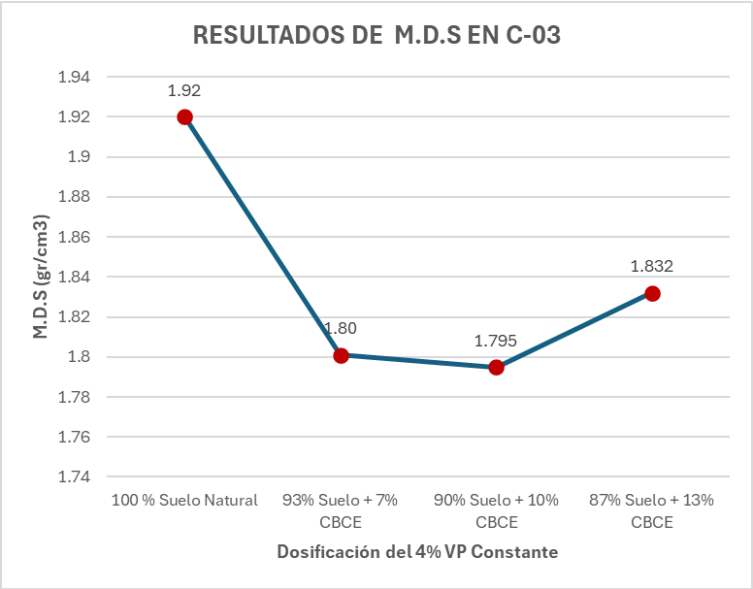


Gráfico 20. Variación de M.D.S. C-03

9. CBR

El ensayo de CBR se realizó siguiendo los lineamientos de la ASTM. Se realizó el promedio de las 5 muestras realizadas a cada calicata para el suelo natural (SN) y de las 10 muestras para cada porcentaje de adición (7%, 10% y 13%). El resumen de resultados se aprecia en la tabla 36, 37 y 38.

Tabla 40. Valores de CBR de C-01

CALICATA C-01	Muestra	CBR al 100%: 0.1"	CBR al 95%: 0.1"
100 % Suelo Natural	PROMEDIO	2.51	2.15
93% Suelo + 7 CBCE%	PROMEDIO	4.62	3.85
90% Suelo + 10 CBCE%	PROMEDIO	8.99	6.66
87% Suelo + 13 CBCE%	PROMEDIO	5.66	4.62

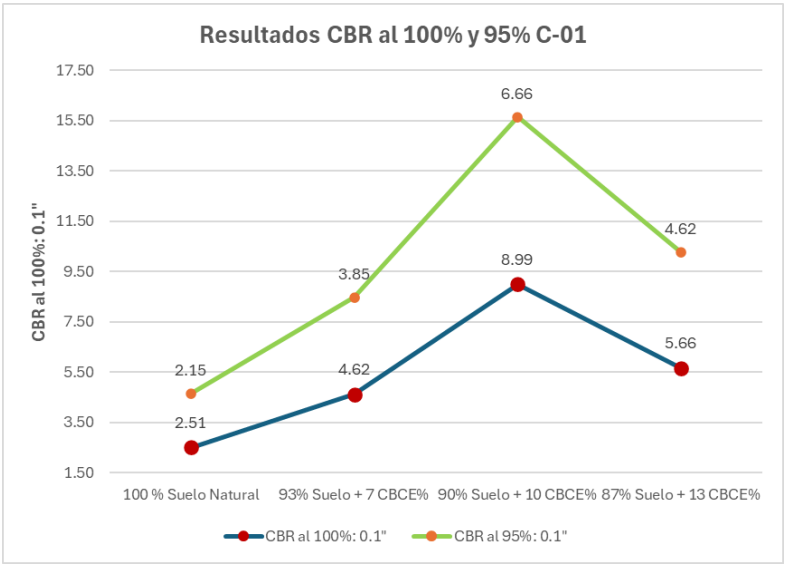


Gráfico 21. Variación de CBR en C-01

En la tabla 40 y gráfico 21 se observa como la incorporación de CBCE ocasionó una elevación gradual del CBR hasta alcanzar el 10% de la dosificación, alcanzando un valor máximo de 8.99% al 100% de la MDS. Esta conducta sugiere que la integración del material estabilizador propició la optimización de la resistencia al esfuerzo cortante a través de mecanismos de floculación-aglomeración y potenciales reacciones puzolánicas iniciales.

No obstante, un incremento en la dosificación del 13% resultó en una reducción del CBR, lo que indica que un exceso de material estabilizador propicia una estructura más vulnerable o con un contenido elevado de vacíos, lo que disminuye la capacidad portante. Este comportamiento pone de manifiesto la presencia de una dosificación óptima aproximadamente del 10% para esta calicata.

Tabla 41. Valores de CBR de C-02

CALICATA C-02	Muestra	CBR al 100%: 0.1"	CBR al 95%: 0.1"
100 % Suelo Natural	PROMEDIO	2.36	2.31
93% Suelo + 7 CBCE%	PROMEDIO	3.00	2.55
90% Suelo + 10 CBCE%	PROMEDIO	7.52	6.19
87% Suelo + 13 CBCE%	PROMEDIO	3.09	2.57

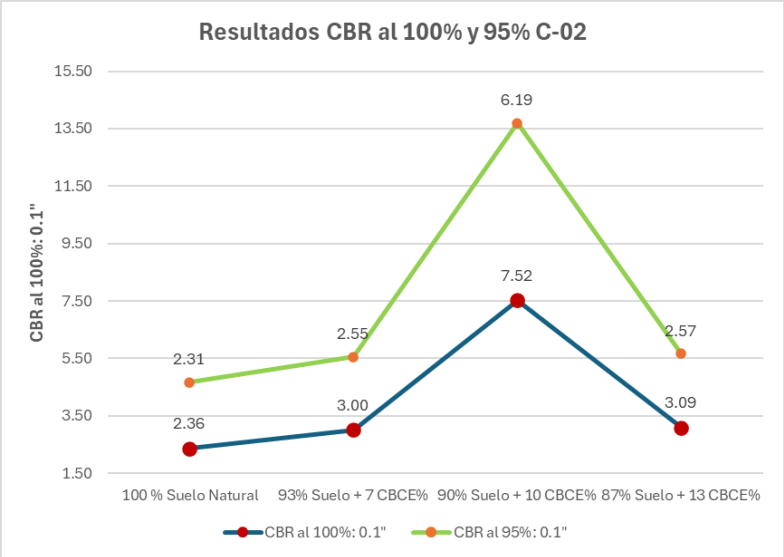


Gráfico 22. Variación de CBR en C-02

En la tabla 41 y gráfico 22 se observa como la integración de CBCE propició una elevación notable del CBR hasta una dosificación del 10%, alcanzando un valor máximo de 7.52% al 100% de la MDS. Esta conducta demuestra que, a pesar de la reducción marginal observada en la densidad seca máxima en el ensayo Proctor, la resistencia mecánica del suelo experimentó una mejora significativa debido a los procesos de floculación y al desarrollo de enlaces cementantes entre partículas.

Sin embargo, al incrementar la dosificación al 13%, el CBR experimentó una reducción adicional. Esto sugiere que el exceso de ceniza perturba el equilibrio estructural del sistema suelo-estabilizador, resultando en una matriz menos eficaz en la transmisión de cargas. En consecuencia, se determina una dosificación óptima que se aproxima al 10% para esta calicata.

Tabla 42. Valores de CBR de C-03

CALICATA C-03	Muestra	CBR al 100%: 0.1"	CBR al 95%: 0.1"
100 % Suelo Natural	PROMEDIO	3.10	2.44
93% Suelo + 7 CBCE%	PROMEDIO	4.66	3.46
90% Suelo + 10 CBCE%	PROMEDIO	7.70	5.79
87% Suelo + 13 CBCE%	PROMEDIO	3.42	3.09

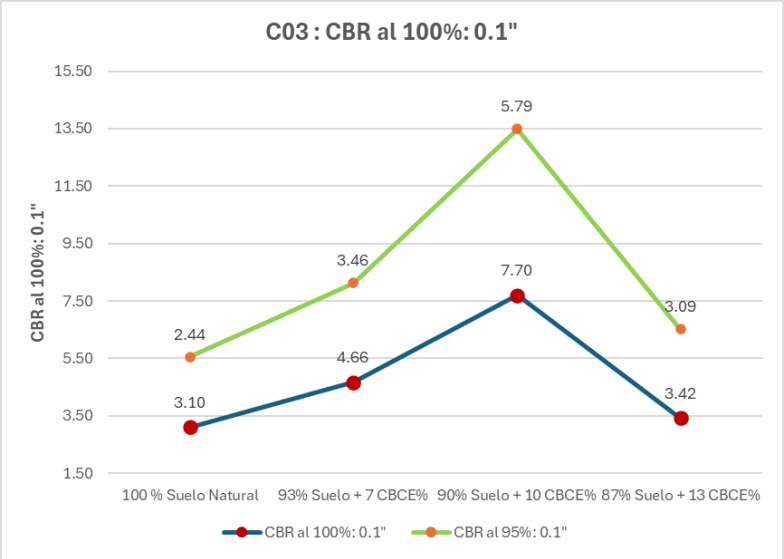


Gráfico 23. Variación de CBR en C-03

En la tabla 42 y gráfico 23 se observa como la incorporación de CBCE ocasionó un aumento gradual del CBR hasta alcanzar una dosificación del 10%, alcanzando un valor máximo de 7.70% al 100% de la MDS. Esta conducta pone de manifiesto que la integración del estabilizante incrementó la capacidad portante del suelo a través de la alteración estructural de la matriz arcillosa, promoviendo la floculación de partículas y el desarrollo de enlaces cementantes.

No obstante, un incremento en la dosificación del 13% resultó en una reducción del CBR, lo que indica que un exceso de material estabilizador puede propiciar un incremento de vacíos o una estructura más frágil, lo que puede disminuir la eficiencia en la transmisión de cargas. Por ende, se vuelve a identificar una dosificación óptima cercana al 10%.

- **Determinación de la dosificación óptima de adición de ceniza de bagazo de caña de azúcar y cenia de eucalipto (CBCE)**

Según los datos observados en el grafico 21, 22 y 23, se obtuvo que el valor máximo de CBR en las 03 calicatas fue con la adición de 10% de CBCE. Obteniéndose los siguientes resultados:

Tabla 43. Determinación óptima de adición de CBCE

	CBR al 95%: 0.1"	
	100 % Suelo Natural	90% Suelo + 10 CBCE%
C-01	2.15	6.66
C-02	2.31	6.19
C-03	2.44	5.79

Por lo cual, el 10% de adición de CBCE fue el contenido óptimo de cenizas en la estabilización del suelo arcilloso de tipo CL.

- **Análisis económico**

Con el propósito de obtener un valor aproximado de costo de producción de CBCE, se realiza lo siguiente:

Tabla 44. Peso de agente estabilizador

1 par de muestra reciclada	Desgaste Gradual (gr)		
	Muestra reciclada	Muestra Calcinada	Muestra Tamizado
	150 gr	130gr	90 gr

Fuente: Propia

Densidad de CBCE reciclado

$$\rho = \frac{m}{v}$$

$$\rho = \frac{0.160\ kg}{0.00085235\ m3}$$

$$\rho = 187.72 \text{ kg/m3}$$

Teniendo en cuenta los datos anteriores, cuando obtengo 90 gr de CBCE tendría 0.0005 m3 de CBCE. Si requiero por metro cuadrado 0.01m3 de CBCE, necesitaría 1800gr es decir 1.8 kg.

- ✓ El costo por kg de la ceniza de CBCE es de s/. 0.01595 soles, entonces nos costaría s/. 0.02 soles pulverizar 1.8 kg.

Con la finalidad de realizar una comparación económica objetiva entre los estabilizantes evaluados, se consideró como criterio principal la equivalencia en el desempeño mecánico alcanzado. En los ensayos realizados, la adición del 3% de cal observada en el autor Zambrano y meza [28], donde obtuvieron un CBR de 6.85%, mientras que con el 10% de ceniza de bagazo de caña de azúcar y ceniza de eucalipto (CBCE) se alcanzó un CBR de 6.66%.

Dado que ambos valores son técnicamente similares y cumplen con los requerimientos mínimos establecidos para subrasantes mejoradas, se considera válida la comparación económica entre ambas alternativas. De esta manera, el análisis no se basa únicamente en el costo del material, sino en el costo necesario para alcanzar un desempeño equivalente en la capacidad de soporte del suelo.

En ese sentido, a continuación, se presentan los análisis de precios unitarios correspondientes a cada alternativa de estabilización.

Tabla 45. APU- Estabilización de suelos con el 3% de Cal

Partida: 01.01	**CONFORMACION DE SUBRASANTE**						
Rendimiento	**m/DIA**	**800.00**	EQ.	**800.00**	Costo unitario directo por : m2		**5.56**
Descripción			**Unidad**		**Cuadrilla**	**Cantidad**	**Precio S/.**	**Parcial S/.**
Mano de Obra								**0.61**
PEON			hh		3.0000	0.0300	20.22	0.61
Materiales								**0.14**
CAL			m3			0.0060	13.90	0.08
AGUA			m3			0.0177	3.00	0.05
Equipos								**4.8182**
HERRAMIENTAS MANUALES			%MO			3.0000	0.61	0.02
CAMION CISTERNA 4X2 (AGUA) 1,500 GAL.			hm		0.5000	0.0050	180.00	0.90
RODILLO LISO VIBR AUTOP 70-100 HP 7-9 T.			hm		1.0000	0.0100	160.00	1.60
MOTONIVELADORA DE 125 HP			hm		1.0000	0.0100	230.00	2.30

El análisis de precios unitarios para la estabilización de la subrasante con 3% de cal muestra un costo directo de S/ 5.56 por metro cuadrado. La cantidad de material considerada en el análisis (0.006 m³ de cal por m²) fue determinada en función de la dosificación óptima del 3%, la cual permitió alcanzar un CBR de 6.85%, valor que cumple con los requerimientos técnicos establecidos para subrasantes mejoradas.

Desde el punto de vista económico, el costo del material estabilizante asciende a S/ 0.08 por m², lo que representa una proporción reducida dentro del costo total del proceso. Esto evidencia que, al emplearse una dosificación relativamente baja (3%), el consumo de cal es moderado y técnicamente eficiente, ya que con una pequeña cantidad de material se logra una mejora significativa en la capacidad de soporte del suelo.

En consecuencia, la alternativa con 3% de cal demuestra que es posible alcanzar un desempeño mecánico adecuado con una baja incidencia del costo del estabilizante dentro del presupuesto total, lo que la convierte en una opción económicamente competitiva para la estabilización de suelos arcillosos en subrasantes.

Tabla 46. APU- Estabilización de suelos con el 10% de CBCE

Partida: 01.01	**CONFORMACION DE SUBRASANTE**						
Rendimiento	**m/DIA**	**800.00**	EQ.	**800.00**	Costo unitario directo por : m2		**5.48**
Descripción			**Unidad**		**Cuadrilla**	**Cantidad**	**Precio S/.**	**Parcial S/.**
Mano de Obra								**0.61**
PEON			hh		3.0000	0.0300	20.22	0.61
Materiales								**0.05**
CBCE			m3			0.0200	0.02	0.00
AGUA			m3			0.0177	3.00	0.05
Equipos								**4.8182**
HERRAMIENTAS MANUALES			%MO			3.0000	0.61	0.02
CAMION CISTERNA 4X2 (AGUA) 1,500 GAL.			hm		0.5000	0.0050	180.00	0.90
RODILLO LISO VIBR AUTOP 70-100 HP 7-9 T			hm		1.0000	0.0100	160.00	1.60
MOTONIVELADORA DE 125 HP			hm		1.0000	0.0100	230.00	2.30

El análisis de precios unitarios para la estabilización de la subrasante con 10% de ceniza de bagazo de caña de azúcar y ceniza de eucalipto (CBCE) presenta un costo directo de S/ 5.48 por m². La cantidad de material considerada (0.020 m³ por m²) corresponde a la dosificación del 10%, la cual permitió alcanzar un CBR de 6.66%, valor técnicamente similar al obtenido con 3% de cal.

En cuanto a los materiales, el costo del CBCE es mínimo dentro del presupuesto total (S/ 0.00 – S/ 0.05 por m² aproximadamente), debido a que se trata de un material residual de bajo costo de adquisición. Sin embargo, la mayor dosificación requerida (10%) implica un mayor volumen incorporado al suelo en comparación con la alternativa con cal.

Esto evidencia que, aunque el CBCE requiere una mayor proporción de material para alcanzar un desempeño mecánico equivalente, su bajo costo unitario permite que el costo final por metro cuadrado se mantenga competitivo.

Comparación técnica – económica entre alternativas

Para efectos de comparación, se consideró la equivalencia en desempeño mecánico alcanzado en los ensayos de CBR, donde el 3% de cal permitió obtener un valor de 6.85%[28], mientras que el 10% de CBCE alcanzó 6.66%. Dado que ambos resultados son técnicamente similares y cumplen con los requerimientos para subrasantes mejoradas, se procedió a comparar los costos unitarios correspondientes.

El costo directo obtenido fue de S/ 5.56 por m² para la estabilización con 3% de cal y S/ 5.48 por m² para la estabilización con 10% de CBCE, observándose una diferencia de S/ 0.08 por m², equivalente aproximadamente a un 1.44% menor costo a favor del CBCE.

Desde el punto de vista económico, ambas alternativas presentan costos muy similares; sin embargo, el CBCE muestra una ligera ventaja económica debido a su bajo costo como material residual. En consecuencia, considerando un desempeño mecánico equivalente, la alternativa con CBCE se presenta como una opción técnicamente viable y económicamente competitiva para la estabilización de suelos arcillosos en subrasantes.

- **Método de ensayo estándar para la densidad y peso unitario del suelo insitu mediante el cono de arena**

El ensayo se llevó a cabo con el objetivo de evaluar la eficiencia de la adición de CBCE en su porcentaje óptimo (10%) en suelos de naturaleza arcillosa, con el propósito de corroborar los resultados obtenidos en laboratorio. Este procedimiento permitió comparar los valores de compactación determinados en laboratorio con los obtenidos en campo (in situ), lo que facilitó analizar el grado de compactación alcanzado bajo condiciones reales de ejecución y, de esta manera, validar el desempeño del CBCE como material estabilizador en la mejora de las propiedades geotécnicas del suelo.

Ilustración 14. Densidad de campo de tramo de prueba

En la Tabla N°43 se registran los datos obtenidos del grado de compactación, con la adición del 10% CBCE. Asimismo, en la Ilustración N°36 se puede visualizar el informe del ensayo bajo la normativa N.T.P. 339.143 ASTM D-1556.

Tabla 47. Datos de densidad de campo

I.- Ubicación y/o Descripción de Prueba							
N° de Prueba / N° BASE		D-01	D-02	D-03	D-04	D-05	D-06
Cono		2	2	2	2	2	2
Placa		A	A	A	A	A	A
II.- Datos de Campo y de Laboratorio							
1.- Peso de frasco + arena calibrada	g.	7521.0	7492.0	7466.0	7432.0	7405.0	7672.0
2.- Peso de frasco + arena que queda	g.	2979.0	3098.0	3222.0	2932.0	2880.0	3215.0
3.- Peso de la arena en el cono	g.	1816.0	1816.0	1816.0	1816.0	1816.0	1816.0
4.- Densidad de la arena	g/cm3	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4
5.- Volumen del material extraído	cm3	2004.0	1896.0	1785.0	1974.0	1992.0	1942.0
6.- Peso del material + recipiente	g.	3872.0	3944.0	3809.0	3972.0	4012.0	3992.0
7.- Peso del recipiente	g.	9.0	9.0	9.0	9.0	9.0	9.0
8.- Peso del material retenido 3/4"	g.	0	0	0	0	0	0
9.- Peso especifico de la grava	g/cm3	2.7	2.7	2.7	2.7	2.7	2.7
10.-Volumen de la grava	cm3	0	0	0	0	0	0
11.- Peso de finos	g.	3863.0	3935.0	3800.0	3963.0	4003.0	3983.0
12.- Volumen de finos	cm3	2004.0	1896.0	1785.0	1974.0	1992.0	1942.0
13.- Densidad natural húmeda	g/cm3	1.927	2.076	2.129	2.008	2.010	2.051
III.- Contenido de Humedad							
14.- Humedad (speedy)	(%)	14.5	14.8	15.5	13.3	15.9	16.2
15.- Densidad natural seca	g/cm3	1.683	1.808	1.843	1.772	1.734	1.765
IV.- Resultados de Laboratorio (Proctor Modificado)							
16.- MÁXIMA DENSIDAD SECA	g/cm3	1.750	1.891	1.920	1.813	1.760	1.795
17.- OPTIMO CONTENIDO DE HUMEDAD	(%)	15.50	14.70	16.00	13.80	16.80	16.30
V.- Resultados Final							
18.- GRADO DE COMPACTACIÓN	(%)	96.2	95.6	96.0	97.8	98.5	98.3

D-01 CALICATA N° 01 - TERRENO NATURAL
D-02 CALICATA N° 02 - TERRENO NATURAL
D-03 CALICATA N° 03 - TERRENO NATURAL
D-04 CALICATA N° 01 + ADICIÓN DE 10%CBCE - TERRENO NATURAL
D-05 CALICATA N° 02 + ADICIÓN DE 10%CBCE - TERRENO NATURAL
D-06 CALICATA N° 03 + ADICIÓN DE 10%CBCE - TERRENO NATURAL

- **Tramo de prueba y Ensayo PDC**

El ensayo de Penetrómetro dinámico de cono (PDC) se realizó siguiendo los lineamientos de la ASTM D 6951 sobre un tramo de prueba de 2m x 2m con una profundidad de 50 cm.

Para el tramo de prueba se usó una plancha compactadora y se adicionó el óptimo porcentaje de 10% de CBCE.

En dicho ensayo se realizó la comparación de los resultados de CBR del terreno natural versus los resultados de CBR del tramo de prueba para conocer en cuanto mejora el CBR con la adición de CBCE.

Se realizaron 6 puntos de ensayo, de los cuales 3 se usaron para obtener el CBR del terreno natural y 3 sobre el tramo de prueba para conocer el CBR con la adicción de CBCE.

Los resultados obtenidos arrojaron que se obtuvo una mejora del 50.34%, 98.69% y 69.10% a los 10cm, 20cm y 30cm de penetración (Tabla 45 y 46)

Tabla 48. Resultados de CBR por DCP para el suelo natural

	Suelo natural		
Profundidad	10cm	20cm	30cm
CBR(%)	10.19	7.94	10.19
	12.50	10.19	12.50
	10.19	7.94	7.94
Promedio	10.96	8.69	10.21

Tabla 49. Resultados de CBR por DCP para el suelo natural + 10% CBCE

	Suelo natural + 10% CBCE		
Profundidad	10cm	20cm	30cm
CBR(%)	19.68	17.25	19.68
	17.25	19.68	17.25
	12.50	14.86	14.86
Promedio	16.48	17.26	17.26

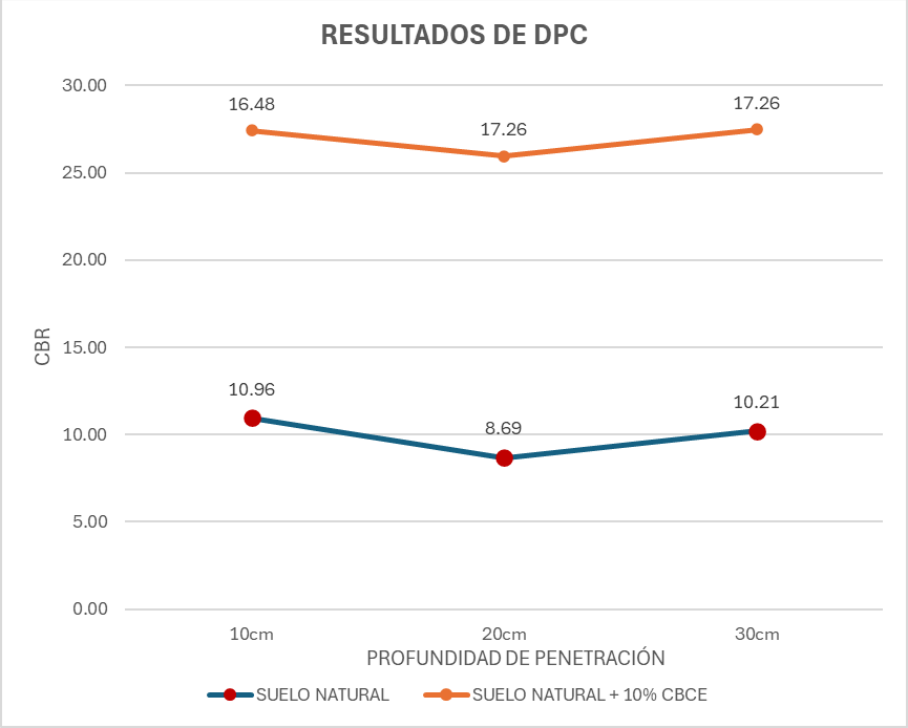


Gráfico 24. Variación de CBR por DCP

Discusiones

Respecto al **objetivo específico N°1**, se caracterizó la ceniza de bagazo de caña de azúcar y la ceniza de eucalipto mediante el ensayo de espectroscopia de fluorescencia de rayos x. Este ensayo permitió conocer los principales componentes y distribución porcentual presentes en las cenizas. Los resultados obtenidos indican un alto contenido de sílice (72.37%) en la ceniza de bagazo de caña de azúcar, parecido a la muestra de la investigación realizada por Talekar & Joshi [7] (69.23%).

Asimismo, respecto a la ceniza de eucalipto se obtuvo un alto de contenido de óxido de calcio (63.56%). Parecido a lo encontrado en la investigación realizada por Cristóbal & Quinte [4], donde encontraron que la ceniza de eucalipto contuvo un 64.66% de este compuesto.

Las diferencias en los porcentajes de óxido de sílice y de calcio obtenidos al compararlos con otras investigaciones posiblemente se deben a las diferentes variedades de eucalipto y caña de azúcar. Dado que en el Perú existen cerca de 10 especies de eucalipto y en cuanto, a la caña de azúcar existen más de 8 especies distintas en el mundo.

Respecto al **objetivo específico N°2**, se clasificó el suelo natural de las 3 calicatas realizadas en la investigación mediante el ensayo de la granulometría por tamizado de la MTC E 107 y el ensayo de límites de atterberg de la NTP 339.129. Donde se encontró que las 3 calicatas realizadas presentan arcillas de baja plasticidad (CL) según SUCS y pertenece a la clasificación A-7 según AASHTO. Similar a la investigación realizada por Cruz [11] en dónde encontró que el suelo estudiado también pertenece a una clasificación CL y A-6, según SUCS y AASHTO.

Además, la adición del porcentaje óptimo (10%) de CBCE al suelo natural en la presente investigación, cambió la clasificación SUCS de la calicata 01 y calicata 03, esto es ocasionado por el aumento del límite líquido. Por otro lado, la calicata mantuvo su clasificación (CL), a pesar del aumento del límite líquido en la muestra. Comparándolo con la investigación de Cruz [11], la adición óptima (20%) de ceniza de arroz y leña (CDL) cambió la clasificación SUCS de sus muestras a arena arcillosa (SC) y arena limosa (SM).

La diferencia en los resultados obtenidos se debe a que en la investigación de Cruz [11] se trabajó con pasante de la N°100, teniendo un mayor porcentaje de arenas a diferencia de la presente investigación en donde se trabajo con una ceniza pasante de la N°200.

Con los resultados obtenidos de la fluorescencia de rayos x y la gradación de las cenizas realizados en la presente investigación. Se infiere que las cenizas utilizadas tienen

características puzolánicas. Por lo tanto, la ceniza tiene alta porosidad conllevando a que absorba una mayor cantidad de agua, esto se refleja en el aumento del límite líquido, originando el cambio de CL a CH.

Respecto al **objetivo específico N°3**, se realizaron los ensayos de gravedad especifica, granulometría por sedimentación, límites de consistencia, Proctor modificado y CBR.

La adición de el porcentaje óptimo (10%) de CBCE a las muestras de suelo natural aumentó la gravedad específica en un 1.1%, 3.0% y 8.6% en las calicatas 01, 02 y 03 respectivamente. Similar a la investigación realizada por Cruz [11] en dónde se encontró que la adición óptima (20%) de ceniza de arroz y leña (CDL) aumentó la gravedad específica en un 6.4% y 1.3% para las calicatas 01 y 03, respectivamente.

Dicho aumento en la gravedad especifica, se debe a que la densidad de las cenizas es mayor que la densidad del suelo natural. Por lo tanto, al realizar la adición, el valor de la gravedad especifica se ajustó a un valor intermedio entre la gravedad especifica del suelo y la ceniza.

En la granulometría por sedimentación, se obtuvo que la adición del porcentaje óptimo (10%) de CBCE a las muestras de suelo natural no generó cambios en el tamaño máximo y mínimo (0.04 y 0.0012mm) de la partícula. Semejante a la investigación realizada por Cruz [11] en dónde se encontró que la adición óptima (20%) de ceniza de arroz y leña (CDL) mantuvo el tamaño de partícula aún con la adición del agente estabilizador.

El que se mantenga el tamaño de partícula con la adición del agente estabilizador, se debe a que el tamaño de partícula de las cenizas es parecido al de las arcillas (<0.075mm).

En los límites de atterberg la adición de el porcentaje óptimo (10%) CBCE en la calicata 01 aumentó en un 9.0%, 7.3% y 10.3% el límite líquido (LL), límite plástico (LP) e índice de plasticidad (IP), respectivamente. En la calicata 02, el aumento que se tuvo fue de 5.5% en el LL, 1.1% en el LP y 9.6% IP. En la calicata 03 el aumento del LL fue de 15.3% y 10.3% en IP, y una disminución de 3.5% en el LP.

Similar a la a la investigación realizada por Cristóbal & Quinte [4] en dónde se encontró que la adición óptima (10%) de ceniza de bagazo de caña de azúcar en la calicata 01 aumentó el LP en 45.2% y una disminuyó el LL e IP 2.6% 55%, respectivamente. En cambio, en la calicata 02 se observó un aumento de 43.7% en el LP; y una disminución en el LL e IP de 1.4% y 53.6%, respectivamente. En la calicata 03 el LL y LLP aumentó en 6.6% y 63.6%, respectivamente; en cuanto al IP este disminuyó en 57.5%.

El aumento del LP y LL se debe a las características puzolánicas y porosidad de las cenizas, que mejoran la cohesión de las partículas y aumenta la retención del agua en la muestra.

En el ensayo de Proctor modificado, la adición del porcentaje óptimo (10%) de CBCE en la calicata 01 aumentó la máxima densidad seca (MDS) en 3.5%. Similar a lo ocurrido en la investigación de Cristóbal & Quinte [4] en dónde la máxima densidad seca aumentó con respecto a la adición de su porcentaje óptimo (10%) de ceniza de bagazo de caña de azúcar.

Por otro lado, en las calicatas 02 y 03, la M.D.S. disminuyó en 6.9% y 6.5%, respectivamente. Este comportamiento es similar a lo reportado por Prada [5], Cruz [11] y Nath et al. [12], quienes observaron una reducción de la densidad seca máxima al incorporar sus porcentajes óptimos de material estabilizante.

La variación observada en la M.D.S. no se atribuye a una menor gravedad específica de las cenizas, sino principalmente a la modificación de la estructura del suelo producto de las características puzolánicas, la alta porosidad y la morfología irregular de las partículas del CBCE, las cuales incrementan la absorción de agua y dificultan un reacomodo eficiente de los granos durante el proceso de compactación.

En el ensayo de CBR, la adición del porcentaje óptimo (10%) de CBCE aumentó el CBR (al 95% de la MDS) en 210.3%, 168.0% y 137.3% para las calicatas 01, 02 y 03; respectivamente. Parecido a lo encontrado en Prada [5], Cruz [11], Cristóbal & Quinte [4] y Nath et al [12] en dónde la adición de los porcentajes óptimos de la ceniza aumenta el CBR.

Este aumento de CBR se debe a que las cenizas adicionadas tienen características puzolánicas que mejoran la cohesión y rigidez interna del suelo.

Respecto al **objetivo específico N°4**, se realizó un análisis económico considerando la equivalencia en el desempeño mecánico alcanzado en los ensayos de CBR. Se determinó que la estabilización con 3% de cal permitió alcanzar un CBR de 6.85%, mientras que con 10% de CBCE se obtuvo un CBR de 6.66%, valores técnicamente similares para su aplicación en subrasantes mejoradas.

En términos económicos, el costo unitario directo fue de S/ 5.56 por m² para la alternativa con cal y S/ 5.48 por m² para la alternativa con CBCE, lo que representa una diferencia aproximada del 1.44% a favor del CBCE. Si bien la diferencia económica no es considerable, el CBCE presenta una ligera ventaja debido a su bajo costo como material residual, aun cuando requiere una mayor dosificación (10%) en comparación con la cal (3%).

Por lo tanto, el uso de ceniza de bagazo de caña de azúcar y ceniza de eucalipto como agente estabilizador no solo demuestra viabilidad técnica, sino que constituye una alternativa económicamente competitiva y ambientalmente sostenible frente a los estabilizantes tradicionales. Parecido a la investigación realizada por Cruz [11], donde se concluyó que la adición óptima (20%) de ceniza de arroz y leña resultó 2.4 y 1.2 veces más económico que estabilizar con cemento y cal.

Respecto al **objetivo específico N°5**, se realizó un tramo de prueba con el óptimo porcentaje (10%) de CBCE, y mediante los resultados de DPC se obtuvo que la adición de CBCE mejoró el CBR en un 50.34%, 98.69% y 69.10% a los 10cm, 20cm y 30cm de penetración, respectivamente. Por lo cual, la adición de CBCE sirvió como agente estabilizador de suelos arcillosos porque logró mejorar el comportamiento como subrasante del suelo.

Conclusiones

1. La espectroscopia de FRX evidenció que la ceniza de bagazo de caña de azúcar presentó 72.37% de óxido de sílice y la de eucalipto 63.56% de óxido de calcio, confirmando su idoneidad como estabilizadores de suelos arcillosos.
2. Los ensayos físicos clasificaron los suelos de las tres calicatas como arcillas de baja plasticidad (CL) según SUCS y como A-7-6 según AASHTO, confirmando su bajo desempeño como subrasantes.
3. La adición del porcentaje óptimo (10%) de CBCE aumenta el límite líquido e índice de plasticidad en las 3 calicatas, cambiando su clasificación según SUCS (CL a CH) y su índice de grupo según AASHTO.
4. Con la adición del porcentaje óptimo (10%) de CBCE se logró un aumento del CBR en 209.8%, 168.0% y 137.3% en la calicata 01, 02 y 03; respectivamente. Este aumento demuestra que el uso de CBCE es positiva como agente estabilizador de suelos arcillosos de baja plasticidad.
5. El uso del 10% de ceniza de bagazo de caña de azúcar y ceniza de eucalipto (CBCE) como agente estabilizador de suelos arcillosos demostró ser técnicamente viable, al alcanzar un CBR de 6.66%, valor comparable al obtenido con 3% de cal (6.85%). En el análisis económico, ambas alternativas presentaron costos unitarios similares, registrándose una ligera ventaja del 1.44% a favor del CBCE. En consecuencia, el CBCE constituye una alternativa competitiva frente a la cal, tanto por su desempeño mecánico como por su bajo costo relativo. Además, su utilización contribuye a la valorización de residuos agroindustriales y a la sostenibilidad del proceso constructivo.
6. En el tramo de prueba se usó 10% de CBCE, donde se evidenció la mejora del CBR en un 50.3%, 98.7% y 69.1% a los 10cm, 20cm y 30cm, respectivamente. Por lo tanto, se concluye que el uso de CBCE como agente estabilizador mejora la capacidad de soporte del suelo.

Recomendaciones

1. Se debe buscar un análisis más precios que la fluorescencia de rayos x, con la finalidad de poder conocer no solamente la composición química, sino también el tamaño de partícula, su morfología, etc.
2. Se recomienda trabajar en otro tipo de suelos diferentes a los trabajados en la presente investigación para poder conocer el comportamiento de CBCE como agente estabilizador.
3. Se recomienda realizar los ensayos de corte directo y consolidación unidimensional, con la finalidad de conocer los parámetros de cohesión del suelo y el ángulo de fricción interna. Asimismo, trabajar con una gradación diferente a la utilizada en la presente investigación, con el propósito de conocer si el tamaño de partícula influye en el mejoramiento de las propiedades mecánicas de un suelo arcilloso
4. Se recomienda utilizar distintas dosificaciones a las trabajadas en la presente investigación, es decir, trabajar con otra proporción que no sea 50% de ceniza de bagazo de caña de azúcar y 50% de ceniza de eucalipto
5. Se recomienda utilizar distintos porcentajes cercanos al 10%, esto con el fin de conocer el más porcentaje ideal en dónde se puedan obtener mejores resultados que los obtenidos en la presente investigación.
6. Se recomienda realizar un análisis económico más preciso y parecido a lo real. De esta manera, tener mayor precisión respecto al beneficio económico del uso de cenizas como agente estabilizador de subrasantes.
7. Se debe realizar un ensayo más preciso diferente al DCP para poder tener más información acerca del comportamiento de la adición de CBCE como agente estabilizante de subrasantes.

Referencias

[1] A. N. Chamaya Peregrino *et al.*, "Diagnóstico del comportamiento de arcillas en el distrito de Chiclayo, departamento de Lambayeque", Chiclayo, dic. 2022. Accedido: 12 de noviembre de 2023. [En línea]. Disponible en: https://repositorio.utp.edu.pe/handle/20.500.12867/6955

[2] INDECI, "PLAN DE PREVENCION ANTE DESASTRES: USOS DEL SUELO Y MEDIDAS DE MITIGACION CIUDAD DE CHICLAYO", Chiclayo, 2003. Accedido: 12 de noviembre de 2023. [En línea]. Disponible en: https://acortar.link/qNQvhp

[3] Ministerio de Transportes y Comunicaciones, *MANUAL DE CARRETERAS SUELOS, GEOLOGÍA, GEOTECNIA Y PAVIMENTOS SECCIÓN SUELOS Y PAVIMENTOS*. Lima, 2014. [En línea]. Disponible en: www.mtc.gob.pe

[4] F. P. Cristobal Gavancho y M. M. Quinte Baltazar, "Estabilización de subrasante con cenizas de Eucalipto, paraje turístico Piedra Parada, Concepción, Junín 2021", Universidad Continental, Huancayo, 2022. Accedido: 10 de noviembre de 2023. [En línea]. Disponible en: https://acortar.link/PKBRcJ

[5] J. C. Prada Torres, "Estabilización del suelo usando ceniza de bagazo de caña de azúcar para caminos no pavimentados", USS, Pimentel, 2023. Accedido: 11 de noviembre de 2023. [En línea]. Disponible en: https://acortar.link/Ud1aBE

[6] S. P. Peralta Tingal, "ESTABILIZACIÓN DE SUELOS ARCILLOSOS CON CENIZAS DE BAGAZO DE CAÑA DE AZÚCAR", PUCP, Lima, 2023. Accedido: 6 de noviembre de 2023. [En línea]. Disponible en: https://acortar.link/mRflzV

[7] S. Talekar y S. R. Joshi, "Soil Stabilization Using Waste Material Sugarcane Baggash Ash", 2022. [En línea]. Disponible en: https://ssrn.com/abstract=4043355

[8] Y. Pérez Mantilla, "Resistencia del concreto f´c=210 kg/cm2 sustituyendo al cemento en 4% y 8% por la ceniza de tronco de Eucalipto (Eucaliptus Globulus)", Universidad San Pedro, Chimbote, 2017. Accedido: 10 de noviembre de 2023. [En línea]. Disponible en: https://acortar.link/Y7yHHn

[9] F. Tarhuni, "EFFICACY OF RICE HUSK ASH (RHA) AND HYDRATED LIME AS STABILIZING AGENTS FOR POOR SUBGRADE SOILS IN ARKANSAS", 2023.

[10] G. V. Rama Subbarao, D. Siddartha, T. Muralikrishna, K. S. Sailaja, y T. Sowmya, "Industrial Wastes in Soil Improvement", *ISRN Civil Engineering*, vol. 2011, pp. 1–5, sep. 2011, doi: 10.5402/2011/138149.

[11] C. M. Cruz Tafur, “Mejoramiento de las propiedades mecánicas para suelos arcillosos en subrasantes adicionando ceniza de pajilla de arroz y madera proveniente de ladrilleras artesanales de la provincia de Chachapoyas, 2022”, USAT, 2024. Accedido: 20 de octubre de 2024. [En línea]. Disponible en: https://acortar.link/De3GT5

[12] B. D. Nath, G. Sarkar, S. Siddiqua, M. Rokunuzzaman, y M. R. Islam, “Geotechnical Properties of Wood Ash-Based Composite Fine-Grained Soil”, *Advances in Civil Engineering*, vol. 2018, 2018, doi: 10.1155/2018/9456019.

[13] R. Abdulwahab *et al.*, “The Effects of Wood ash on the Geotechnical Properties of Lateritic Soil”, 2018. [En línea]. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/328262872

[14] A. Ahalya y K. S. R. Prasad, “Stabilization of black cotton soil with waste plastic and admixtures”, en *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, Institute of Physics, 2023. doi: 10.1088/1755-1315/1130/1/012038.

[15] R. Zapata y S. Angelone, “TIPOS DE SUELOS: CARACTERIZACIÓN DE SUELOS ARCILLOSOS Y LIMOSOS”, 2018. Accedido: 5 de noviembre de 2023. [En línea]. Disponible en: https://acortar.link/aZqeXs

[16] Ministerio de Transportes y Comunicaciones, *MANUAL DE CARRETERAS SUELOS, GEOLOGÍA, GEOTECNIA Y PAVIMENTOS SECCIÓN SUELOS Y PAVIMENTOS*. Lima, 2014. [En línea]. Disponible en: www.mtc.gob.pe

[17] Y. M. Torres Mora, “ESTABILIZACIÓN DE SUELOS COHESIVOS UTILIZANDO ESCORIA DE COBRE PARA SU USO COMO SUBRASANTE MEJORADA" PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO CIVIL”, UNI, Lima, 2019.

[18] Y. Ninanya Sánchez, “EFECTOS DE LA DIATOMITA EN LA ESTABILIZACIÓN DE SUELOS FINOS PARA SUBRASANTE”, Universidad Peruana Los Andes, Huancayo, 2021.

[19] H. Quispe Chuquicusma y A. Quispe Olivera, “Estabilización de suelos arcillosos de subrasante adicionando ceniza de arroz y café para obras viales en Jaén 2022”, 2023. Accedido: 6 de noviembre de 2023. [En línea]. Disponible en: https://acortar.link/pXHHe3

[20] Y. Espinosa Morales, “La fluorescencia de rayos x (FRX) como técnica de analisis en bienes culturales”.

[21] ASTM, “ASTM C618-19”, *ASTM*, pp. 1–6, ene. 2019.

[22] REVISTARENERGIA.PE, “Aumenta uso de leña en los hogares: una de cada 5 familias peruanas la empleó para cocinar en el 2021”, LIMA, ene. 2002. Accedido: 10 de noviembre de 2023. [En línea]. Disponible en: https://acortar.link/YgAyxa

[23] INACAL, “NTP 339.127 SUELOS. Método de ensayo para determinar el contenido de humedad de un suelo 1998 (revisada el 2019)”, *INACAL*, vol. 1, pp. 1–17, 1998.

[24] INACAL, “NTP 339.129 SUELOS. Método de ensayo para determinar el límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad de suelos”, *INACAL*, vol. 1, pp. 1–35, oct. 2019, Accedido: 9 de noviembre de 2023. [En línea]. Disponible en: https://acortar.link/2VhJuW

[25] INACAL, “NTP 339-141 SUELOS. Método de ensayo para la compactación del suelo en laboratorio utilizando una energía modificada 1999”, *INACAL*, vol. 1, pp. 1–35, 1999.

[26] ASTM, “D1883 - 16. Standard Test Method for California Bearing Ratio (CBR) Of Laboratory-Compacted Soils”, *ASTM INTERNATIONAL*, doi: 10.1520/D1883-16.

[27] J. SUCASAIRE PILCO, *ORIENTACIONES PARA LA SELECCIÓN Y EL CÁLCULO DEL TAMAÑO DE LA MUESTRA EN INVESTIGACIÓN*, Primera edición. Lima: Bibiloteca Nacional del Perú.

[28] T. Z. M. Zambrano, «ESTABILIZACIÓN DE SUELO CON CAL Y CEMENTO PARA EL MEJORAMIENTO DE SUBRASANTE,» REVISTA CIENTÍFICA MULTIDISCIPLINARIA ARBITRADA YACHASUN, vol. 7, nº 3, p. 15, 2023.

Anexos

Panel fotográfico

Ilustración 15. Calcinación de muestra

Ilustración 16: Contenido de humedad

Ilustración 17: Granulometría por tamizado

Ilustración 18: Limites de consistencia

Ilustración 19: Gravedad específica

Ilustración 20: Proctor modificado

Ilustración 21: Granulometría por sedimentación

Gráfico 25. CBR

Ilustración 22. Tramo de prueba

Ilustración 23. PDC

Documentación

UNIVERSIDAD CATOLICA SANTO TORIBIO DE MOGROVEJO
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA CIVIL
LABORATORIO DE ENSAYO DE MATERIALES, SUELOS Y PAVIMENNTOS

INFORME N° LEM USAT 015-2024-II
FECHA: 22 de octubre 2024

VALIDACIÓN DE ENSAYOS DE LABORATORIO

ESTUDIANTE: Lee Franklin Mego Ruiz

TITULO DE LA TESIS: Estabilización de suelos arcillosos para subrasantes adicionando ceniza de bagazo de caña de azúcar y ceniza de eucalipto

El que suscribe, responsable del laboratorio de Ingeniería Civil, verifica y da conformidad que los siguientes ensayos de laboratorio realizados por el indicado estudiante se han efectuado en las instalaciones de la USAT, asimismo valida los ensayos realizados fuera de nuestras instalaciones siempre que no se puedan realizar en esta universidad:

- Espectroscopia de fluorescencia de rayos x
- Contenido de humedad
- Granulometría por tamizado
- Granulometría por hidrómetro o por sedimentación
- Límites de atterberg
- Gravedad específica
- Proctor modificado
- Penetrómetro dinámico de cono (PDC)
- California bearing ratio (CBR)

Se alcanza al interesado para los fines pertinentes.
Observación: Adjunto

Henry Rivadeneyra Oblitas
Responsable de Lab Ing. Civil

Ilustración 24. Validación de ensayos

UNIVERSIDAD NACIONAL PEDRO RUIZ GALLO
FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA E INDUSTRIAS ALIMENTARIAS
LABORATORIO DE INVESTIGACIÓN Y SERVICIOS TÉCNICOS

REPORTE DE ANÁLISIS N° 51 – FIQIA

1. DATOS DE CLIENTE:

a) Nombre: **Lee Franklin Mego Ruiz**
b) Proyecto: **Estabilización de suelos arcillosos para subrasantes adicionando ceniza de bagazo de caña de azúcar y ceniza de eucalipto**

2. DATOS DE LA MUESTRA

- Número de muestras : 02
- Tipo de muestra de Caña de azúcar : Sólida – Ceniza de Eucalipto / Ceniza de Bagazo
- Fecha de muestreo : 22-05-24

3. RESULTADOS DE ANÁLISIS POR ICP

COMPOSICION	Ceniza de Eucalipto (%)	METODOLOGIA
Óxido de Aluminio, Al_2O_3	5.28	Espectrometria de Fluorescencia de Rayos X
Óxido de boro, B_2O_3	0.22	
Óxido de Calcio, CaO	63.56	
Óxido de Hierro, Fe_2O_3	1.13	
Óxido de Potasio, K_2O	9.72	
Óxido de Magnesio, MgO	2.45	
Óxido de Sodio, Na_2O	3.14	
Óxido de Fósforo, P_2O_5	3.16	
Óxido de Silicio, SiO_2	3.65	
Perdida por quemado	7.68	

COMPOSICION	Ceniza de Bagazo de Caña de Azúcar (%)	METODOLOGIA
Óxido de Aluminio, Al_2O_3	1.61	Espectrometria de Fluorescencia de Rayos X
Óxido de boro, B_2O_3	0.54	
Óxido de Calcio, CaO	3.81	
Óxido de Cromo, Cr_2O_3	1.44	
Óxido de Fierro, Fe_2O_3	7.46	
Óxido de Potasio, K_2O	1.21	
Óxido de Magnesio, MgO	1.29	
Óxido de Sodio, Na_2O	0.91	
Óxido de Fósforo P_2O_5	1.92	
Óxido de Silicio, SiO_2	72.37	
Perdida por quemado	9.04	

USAT

TÉCNICO DE LABORATORIO

USAT

UNIVERSIDAD NACIONAL PEDRO RUIZ GALLO
FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA E INDUSTRIAS ALIMENTARIAS
LABORATORIO DE INVESTIGACIÓN Y SERVICIOS TÉCNICOS

4. Alcances

La muestra se calcino a 1000°C

Firma		Firma	INGENIERO QUIMICO REG. CIP 111172
Analista	Marilyn Catherine Quinteros Vilchez	V°B°	Ing. Cristian David Visconde Beltrán
Fecha del Reporte		31 de mayo del 2024	

USAT

TÉCNICO DE LABORATORIO

USAT

Ilustración 25. Reporte de FRX

UNIVERSIDAD CATÓLICA SANTO TORIBIO DE MOGROVEJO
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL AMBIENTAL
LABORATORIO DE SUELOS, CONCRETO Y ENSAYOS DE MATERIALES

Tesista	:	Mego Ruiz Lee Franklin
Escuela	:	Ingeniería Civil
Proyecto/Tesis	:	Estabilización de suelos arcillosos para subrasantes adicionando ceniza de bagazo de caña de azúcar y ceniza de eucalipto
Ubicación	:	Dist. Chiclayo, Prov. Chiclayo, Reg. Lambayeque.
Fecha de emisión	:	Chiclayo, 22 de octubre del 2024
ENSAYO	:	CEMENTOS. Método de ensayo normalizado para determinar la densidad del cemento Pórtland
NORMA	:	NTP 334.005

Muestra **ceniza de bagazo de caña de azúcar**

Masa de Ceniza de ASERRÍN	(gr)	50	50	50
Vol.inicial kerosene	(ml)	0	0	0
Vol.final desplazado kerosene	(ml)	18.3	18.8	18.4
Densidad Ceniza de ASERRÍN	(g/ml)	**2.73**	**2.66**	**2.72**

- Muestreo, identificación y ensayo realizado por el solicitante.

USAT

TECNICO DE LABORATORIO

Ilustración 26. Gravedad especifica de ceniza de bagazo de caña de azucar

UNIVERSIDAD CATÓLICA SANTO TORIBIO DE MOGROVEJO
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
LABORATORIO DE SUELOS, CONCRETO Y ENSAYOS DE MATERIALES

Tesista	:	Mego Ruiz Lee Franklin
Escuela	:	Ingeniería Civil
Proyecto/Tesis	:	Estabilización de suelos arcillosos para subrasantes adicionando ceniza de bagazo de caña de azúcar y ceniza de eucalipto
Ubicación	:	Dist. Chiclayo, Prov. Chiclayo, Reg. Lambayeque.
Fecha de emisión	:	Chiclayo, 22 de octubre del 2024
ENSAYO	:	CEMENTOS. Método de ensayo normalizado para determinar la densidad del cemento Pórtland
NORMA	:	NTP 334.005

Muestra **ceniza de eucalipto**

Masa de Ceniza de ASERRÍN	(gr)	50	50	50
Vol.inicial kerosene	(ml)	0	0	0
Vol.final desplazado kerosene	(ml)	18.5	18.8	18.4
Densidad Ceniza de ASERRÍN	(g/ml)	**2.70**	**2.66**	**2.72**

- Muestreo, identificación y ensayo realizado por el solicitante.

USAT

TÉCNICO DE LABO

Ilustración 27. Gravedad especifica de ceniza de eucalipto

UNIVERSIDAD CATÓLICA SANTO TORIBIO DE MOGROVEJO
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
LABORATORIO DE SUELOS, CONCRETO Y ENSAYOS DE MATERIALES

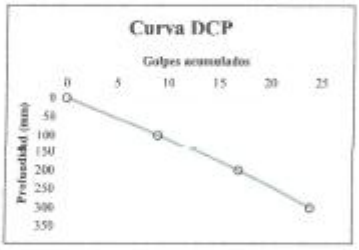
INFORME DE ENSAYO

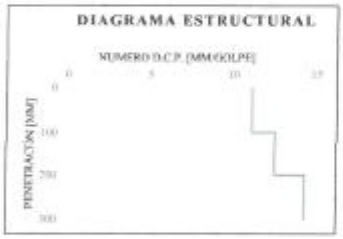
Tesista : Mego Ruiz Lee Franklin
ATENCION: : ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL
TESIS: : Estabilización de suelos arcillosos para subrasantes adicionando ceniza de bagazo de caña de azúcar y ceniza de eucalipto
UBICACIÓN: : Dist. Chiclayo, Prov. Chiclayo, Reg. Lambayeque.
FECHA RECEPCIÓN: : Chiclayo, 22 de Octubre del 2024

PENETRÓMETRO DINÁMICO DE CONO
ASTM D 6951

PUNTO:	3	CL	Arcilla de baja plasticidad	
LOCALIZACIÓN				
PESO DEL MARTILLO:	8.0 kg		FECHA:	12/10/2024
FACTOR DEL MARTILLO:	1.0			
CLASIFICACIÓN DEL TERRENO:	CL			
ADICIÓN	Terreno Natural + 10% CBCE			

Número de golpes acumulado	Número de golpes	% golpes	Penetración [1] acumulada (mm)	Penetración [2] por lectura (mm)	Índice DCP (mm/golpe)	CBR [3] (%)
0	0	0.0	0			
9	9	37.5	100	100	11.1	19.68
17	8	70.8	200	100	12.5	17.25
24	7	100.0	300	100	14.3	14.86





OBSERVACIONES:

PENETRACIÓN REALIZADA SOBRE NIVEL NATURAL DEL TERRENO

CORRELACIONES:

1. Ministerio de Transportes y Comunicaciones (2000) $CBR = 292/((DCP)^{1.12})$

Ilustración 28. Ensayo de DPC a SN+10%CBCE

UNIVERSIDAD CATÓLICA SANTO TORIBIO DE MOGROVEJO
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
LABORATORIO DE SUELOS, CONCRETO Y ENSAYOS DE MATERIALES

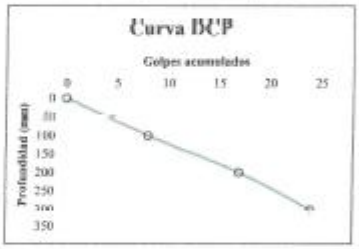
INFORME DE ENSAYO

Tesista : Mego Ruiz Lee Franklin
ATENCION. : ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL
TESIS: : Estabilización de suelos arcillosos para subrasantes adicionando ceniza de bagazo de caña de azúcar y ceniza de eucalipto
UBICACIÓN: : Dist. Chiclayo, Prov. Chiclayo, Reg. Lambayeque.
FECHA RECEPCIÓN: : Chiclayo, 22 de Octubre del 2024

PENETRÓMETRO DINÁMICO DE CONO
ASTM D 6951

PUNTO:	2	CL	Arena de baja plasticidad
LOCALIZACIÓN			
PESO DEL MARTILLO:	8,0 kg	FECHA:	12/10/2024
FACTOR DEL MARTILLO:	1,0		
CLASIFICACIÓN DEL TERRENO:	CL		
ORIGEN	Terreno Natural + 10% CBCE		

Número de golpes acumulado	Número de golpes	% golpes	Penetración acumulada (mm)	Penetración por lectura (mm)	Índice DCP (mm/golpe)	CBR [1] (%)
0	0	0.0	0			
8	8	33.3	100	100	12.5	17.25
17	9	70.8	200	100	11.1	19.68
24	7	100.0	300	100	14.3	14.86



OBSERVACIONES:

PENETRACIÓN REALIZADA SOBRE NIVEL NATURAL DEL TERRENO

CORRELACIONES:

1. Ministerio de Transportes y Comunicaciones (2000) $CBR = 292/(DCP)^{1.12}$

Ilustración 29. Ensayo de DPC a SN+10%CBCE

UNIVERSIDAD CATÓLICA SANTO TORIBIO DE MOGROVEJO
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
LABORATORIO DE SUELOS, CONCRETO Y ENSAYOS DE MATERIALES

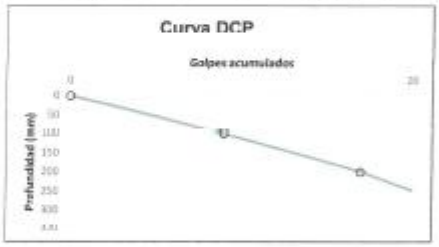
INFORME DE ENSAYO

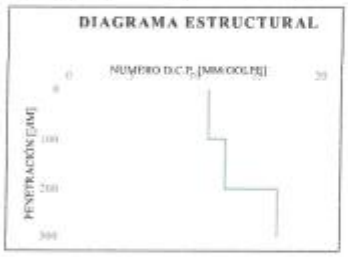
Tesista : Mego Ruiz Lee Franklin
ATENCION : ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL
TESIS: : Estabilización de suelos arcillosos para subrasantes adicionando ceniza de bagazo de caña de azúcar y ceniza de eucalipto
UBICACIÓN: : Dist. Chiclayo, Prov. Chiclayo, Reg. Lambayeque.
FECHA RECEPCIÓN: Chiclayo, 22 de Octubre del 2024

PENETRÓMETRO DINÁMICO DE CONO
ASTM D 6951

PUNTO: I CL Arcilla de baja plasticidad
LOCALIZACIÓN
PESO DEL MARTILLO: 8,0 kg FECHA: 12/10/2024
FACTOR DEL MARTILLO: 1,0
CLASIFICACIÓN DEL TERRENO: CL
ABSCISA: Terreno Natural : 19% SUCS

Número de golpes acumulado	Número de golpes	% golpes	Penetración acumulada (mm)	Penetración por lectura (mm)	Índice DCP (mm/golpe)	CBR [1] (%)
0	0	0.0	0			
9	9	39.1	100	100	11.1	19.68
17	8	73.9	200	100	12.5	17.25
23	6	100.0	300	100	16.7	12.50





OBSERVACIONES:
PENETRACIÓN REALIZADA SOBRE NIVEL NATURAL DEL TERRENO

CORRELACIONES:

1. Ministerio de Transportes y Comunicaciones (2000) $CBR = 292/((PDC)^{1.12})$

Ilustración 30. Ensayo de DPC a SN+10%CBCE

UNIVERSIDAD CATÓLICA SANTO TORIBIO DE MOGROVEJO
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
LABORATORIO DE SUELOS, CONCRETO Y ENSAYOS DE MATERIALES

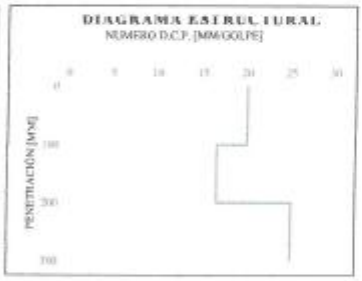
INFORME DE ENSAYO

Tesista : Mego Ruiz Lee Franklin
ATENCION. : ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL
TESIS: : Estabilización de suelos arcillosos para subrasantes adicionando ceniza de bagazo de caña de azúcar y ceniza de eucalipto
UBICACIÓN: : Dist. Chiclayo, Prov. Chiclayo, Reg. Lambayeque.
FECHA RECEPCIÓN: : Chiclayo, 22 de Octubre del 2021

PENETRÓMETRO DINÁMICO DE CONO
ASTM D 6951

PUNTO:	3	CL	Arcilla de baja plasticidad	
LOCALIZACIÓN				
PESO DEL MARTILLO:	8,0 kg		FECHA:	12/10/2024
FACTOR DEL MARTILLO:	1,0			
CLASIFICACIÓN DEL TERRENO:	CL			
ADICIÓN	[illegible]			

Número de golpes acumulado	Número de golpes	% golpes	Penetración acumulada (mm)	Penetración por lectura (mm)	Índice DCP (mm/golpe)	CBR [1] (%)
0	0	0.0	0			
5	5	33.3	100	100	20.0	10.19
11	6	73.3	200	100	16.7	12.50
15	4	100.0	300	100	25.0	7.94



OBSERVACIONES:

PENETRACIÓN REALIZADA SOBRE NIVEL NATURAL DEL TERRENO

CORRELACIONES:

1. Ministerio de Transportes y Comunicaciones (2000) **CBR = 292/((DCP)^1.12)**

USAT
TECNICO DE LABORATORIO

USAT

Ilustración 31.Ensayo de DPC a SN

FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
LABORATORIO DE SUELOS, CONCRETO Y ENSAYOS DE MATERIALES

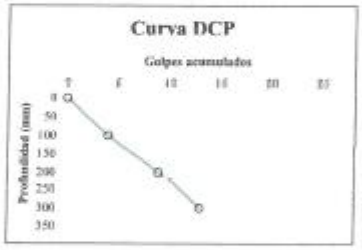
INFORME DE ENSAYO

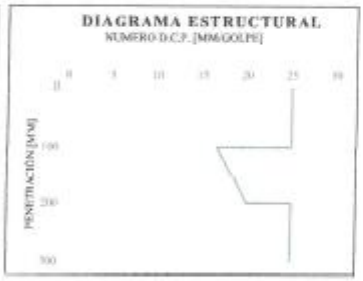
Tesista : Mego Ruiz Lee Franklin
ATENCION: : ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL
TESIS: : Estabilización de suelos arcillosos para subrasantes adicionando ceniza de bagazo de caña de azúcar y ceniza de eucalipto
UBICACIÓN: : Usil. Chiclayo, Prov. Chiclayo, Reg. Lambayeque.
FECHA RECEPCIÓN: : Chiclayo, 22 de Octubre del 2024

PENETRÓMETRO DINÁMICO DE CONO
ASTM D 6951

PUNTO:	2	CL	Arcilla de baja plasticidad
LOCALIZACIÓN			
PESO DEL MARTILLO:	8.0 kg	FECHA:	12/10/2024
FACTOR DEL MARTILLO:	1.0		
CLASIFICACIÓN DEL TERRENO:	CL		
ADICIÓN	Terreno Natural		

Número de golpes acumulados	Número de golpes	% golpes	Penetración acumulada (mm)	Penetración por lectura (mm)	Índice DCP (mm/golpe)	CBR [1] (%)
0	0	0.0	0			
4	4	30.8	100	100	25.0	7.94
9	5	69.2	200	100	20.0	10.19
13	4	100.0	300	100	25.0	7.94





OBSERVACIONES:

PENETRACIÓN REALIZADA SOBRE NIVEL NATURAL DEL TERRENO

CORRELACIONES:

1. Ministerio de Transportes y Comunicaciones (2000) $CBR = 292/((DCP)^{1.12})$

USAT
TÉCNICO DE LABORATORIO

USAT

Ilustración 32.Ensayo de DPC a SN

UNIVERSIDAD CATÓLICA SANTO TORIBIO DE MOGROVEJO
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
LABORATORIO DE SUELOS, CONCRETO Y ENSAYOS DE MATERIALES

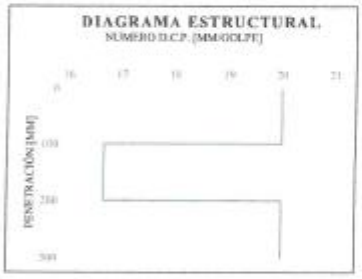
INFORME DE ENSAYO

Tesista : Mego Ruiz Lee Franklin
ATENCION: : ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL
TESIS: : Estabilización de suelos arcillosos para subrasantes adicionando ceniza de bagazo de caña de azúcar y ceniza de eucalipto
UBICACION: : Dist. Chiclayo, Prov. Chiclayo, Reg. Lambayeque.
FECHA RECEPCIÓN: : Chiclayo, 22 de Octubre del 2024

PENETRÓMETRO DINÁMICO DE CONO
ASTM D 6951

PUNTO:	1	CL	Arcilla de baja plasticidad	
LOCALIZACIÓN				
PESO DEL MARTILLO:	8,0 kg		FECHA:	12/10/2024
FACTOR DEL MARTILLO:	1,0			
CLASIFICACIÓN DEL TERRENO:	CL			
ADICIÓN	Terreno Natural			

Número de golpes acumulado	Número de golpes	% golpes	Penetración acumulada (mm)	Penetración por lectura (mm)	Índice DCP (mm/golpe)	CBR [1] (%)
0	0	0.0	0			
5	5	31.3	100	100	20.0	10.19
11	6	68.8	200	100	16.7	12.50
16	5	100.0	300	100	20.0	10.19



OBSERVACIONES:

PENETRACIÓN REALIZADA SOBRE NIVEL NATURAL DEL TERRENO

CORRELACIONES:

1. Ministerio de Transportes y Comunicaciones (2000) $CBR = 292/((PDC)^{1.12})$

Ilustración 33.Ensayo de DPC a SN

QUINTEROS VILCHEZ MARILYN CATHERINE

INGENIERO
MZA. 38 LOTE. 47 SEC. PROGRESO LAMBAYEQUE CHICLAYO PUCALA

TELÉFONO:

R.U.C. 10466545240
RECIBO POR HONORARIOS ELECTRONICO
Nro: E001- 11

Recibí de: LEE FRANKLIN MEGO RUIZ

Identificado con DNI **número** 71882880

Forma de Pago: AL CONTADO

La suma de: TRESCIENTOS SESENTA Y 00/100 SOLES

Por concepto de ENSAYO POR ESPECTROMETRIA DE FLUORESCENCIA DE RAYOS X DE 2 MUESTRAS: CENIZA DE EUCALIPTO Y CENIZA DE BAGAZO

Observación -

Inciso A DEL ARTÍCULO 33 DE LA LEY DEL IMPUESTO A LA RENTA

Fecha de emisión 10 **de** Septiembre **del** 2024

Total por honorarios:	360.00	
Retención (8 %) IR:	(0.00)	
Total Neto Recibido:	360.00	SOLES

LABORATORIO DE SUELOS, CONCRETO Y ENSAYOS DE MATERIALES
USAT
TÉCNICO DE LABORATORIO

Henry Rivadeneyra Oblitas
Tec. Laboratorio USAT
USAT Universidad Católica

Ilustración 34. Recibo de ensayo de FRX

SUCROALCOLERA DEL CHIRA S.A.

RUC N°20525538738
GUÍA DE REMISIÓN ELECTRÓNICA REMITENTE
N° EG07 - 00003224

Fecha y hora de emisión : 25/01/2024 08:31 AM

Fecha de Inicio de Traslado :25/01/2024

Punto de Partida FUNDO MONTELIMA-CARRETERA IGNACIO ESCUDERO KM5 TAMARINDO PIURA-SULLANA-IGNACIO ESCUDERO PIURA-SULLANA-IGNACIO ESCUDERO - IGNACIO ESCUDERO - SULLANA - PIURA

Motivo de Traslado :OTROS

Punto de llegada juan buendia 577 - CHICLAYO - CHICLAYO - LAMBAYEQUE

Descripción de Motivo :MUESTRA DE CENIZA

Datos del Destinatario :NICOO RUIZ LEE FRANKLIN - DOCUMENTO NACIONAL DE IDENTIDAD N° 71682888

Bienes por transportar:

N°	Bien normalizado	Código de Bien	Código producto SUNAT	Partida arancelaria	Código GTIN	Descripción Detallada	Unidad de medida	Cantidad
1	NO					ceniza en saco	UNIDAD (MU)	12.00

Unidad de Medida del Peso Bruto: KGM

Peso Bruto total de la carga: 300

Datos del traslado:

Modalidad de Traslado:Privado

Indicador de transbordo programado NO

Indicador de traslado en vehículos de categoría M1 o L: SI

Placa de vehículo: M4H751

USAT

TÉCNICO DE LABORATORIO

USAT

Esta es una representación impresa sin valor tributario de la Guía de Remisión Electrónica generada en el sistema de la SUNAT. Puede verificarla utilizando su clave SOL

Ilustración 35.Guia de remisión de ceniza de bagazo de caña de azúcar

Amazing
CONSTRUCCIÓN Y SEVICIOS GENERALES

LABORATORIO DE ENSAYO ACREDITADO POR EL ORGANISMO PERUANO DE ACREDITACIÓN INDECOPI - SNA CON REGISTRO Nº LE - 00110315

INFORME DE ENSAYO Nº 3140

(Pág. 01 de 01)

Expediente Nº : 3110 - 2025 L.E.M. AMAZING S.A.C
Solicitante : LEE FRANKLIN MEGO RUIZ
Proyecto : ESTABILIZACIÓN DE SUELOS ARCILLOSOS PARA SUBRASANTES ADICIONANDO CENIZA DE BAGAZO DE CAÑA DE AZÚCAR Y CENIZA DE EUCALIPTO
Ubicación : DISTRITO DE JOSE CHICLAYO– PROVINCIA DE CHICLAYO – DEPARTAMENTO DE LAMBAYEQUE
Ensayo realizado : Chiclayo, 13 de Junio del 2025

ENSAYO : SUELOS, Método de ensayo estándar para la densidad y peso unitario del suelo In-Situ mediante el cono de arena.
REFERENCIA : NORMA N.T.P. 339.143 ASTM D-1556

I.- Ubicación y/o Descripción de Prueba

Nº de Prueba / Nº Base		D - 01	D - 02	D - 03	D - 04	D - 05	D - 06
Cono		2	2	2	2	2	2
Placa		A	A	A	A	A	A
II.- Datos de Campo y de Laboratorio							
1.-Peso de frasco + arena calibrada	g.	7521	7492	7466	7432	7405	7672
2.-Peso de frasco + arena que queda	g.	2979	3098	3222	2932	2880	3215
3.-Peso de la arena en el cono	g.	1816	1816	1816	1816	1816	1816
4.-Densidad de la arena	g/cm³	1.36	1.36	1.36	1.36	1.36	1.36
5.-Volumen del material extraído	cm³	2004	1896	1785	1974	1992	1942
6.-Peso del material + recipiente	g.	3872	3944	3809	3972	4012	3992
7.-Peso del recipiente	g.	9.0	9.0	9.0	9.0	9.0	9.0
8.-Peso del material retenido 3/4"	g.	0	0	0	0	0	0
9.-Peso específico de la grava	g/cm³	2.66	2.66	2.66	2.66	2.66	2.66
10.-Volumen de la grava	cm³	0	0	0	0	0	0
11.-Peso de finos	g.	3863	3935	3800	3963	4003	3983
12.-Volumen de finos	cm³	2004	1896	1785	1974	1992	1942
13.-Densidad natural húmeda	g/cm³	1.927	2.076	2.129	2.008	2.010	2.051
III.- Contenido de Humedad							
14.-Humedad (Speedy)	(%)	14.5	14.8	15.5	13.3	15.9	16.2
15.-Densidad natural seca	g/cm³	1.683	1.808	1.843	1.772	1.734	1.765
IV.- Resultados de Laboratorio (Proctor Modificado)							
16.-MÁXIMA DENSIDAD SECA	g/cm³	1.750	1.891	1.920	1.813	1.760	1.795
17.-OPTIMO CONTENIDO DE HUMEDAD	(%)	15.50	14.70	16.00	13.80	16.80	16.30
V.- Resultados Final							
18.-GRADO DE COMPACTACIÓN	(%)	**96.2**	**95.6**	**96.0**	**97.8**	**98.5**	**98.3**

D - 01 CALICATA N° 01 - TERRENO NATURAL
D - 02 CALICATA N° 02 - TERRENO NATURAL
D - 03 CALICATA N° 03 - TERRENO NATURAL
D - 04 CALICATA N° 01+ADICION DE 10% CBCE - TERRENO NATURAL
D - 05 CALICATA N° 02+ADICION DE 10% CBCE - TERRENO NATURAL
D - 06 CALICATA N° 03+ADICION DE 10% CBCE - TERRENO NATURAL

OBSERVACIONES:
- Identificación y Ubicación de pruebas designadas por el solicitante.
- El presente documento no deberá reproducirse sin la autorización escrita del Laboratorio.

USAT

German Oscar Gastelo Chirinos
TEC. LABORATORIO DE ENSAYO DE MATERIALES

AMAZONAS INGENIERÍA CIVIL S.A.C.

Juan Carlos Firmo Ojeda Ayesta
INGENIERO CIVIL
Reg. CIP. 123351

Henry Rivadeneyra

964423 859 / 963847718 / 943011231
amazing.sac.ic@gmail.com
Oficina y laboratorio: Francisco Cabrera N° 1201
Chiclayo - Lambayeque

Ilustración 36. Informe de densidad de campo

CONSTRUCCIÓN Y SEVICIOS GENERALES

LABORATORIO DE ENSAYO ACREDITADO POR EL ORGANISMO PERUANO DE ACREDITACIÓN INDECOPI - SNA CON REGISTRO N° LE - 00119315

CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN
N° LMA-270-2024

Página 1 de 3

Arsou Group
Laboratorio de Metrología

Fecha de emisión	2024/12/03
Solicitante	**AMAZONAS INGENIERIA CIVIL SOCIEDAD ANONIMA CERRADA**
Dirección	CAL.JOSE FRANCISCO CABRERA NRO. 1201 CERCADO DE CHICLAYO LAMBAYEQUE - CHICLAYO - CHICLAYO
Instrumento de medición	**BALANZA**
Identificación	NO INDICA
Intervalo de indicación	30000 g
División de escala Resolución	1 g
División de verificación (e)	1 g
Tipo de indicación	Digital
Marca / Fabricante	CAS
Modelo	SW-LR
N° de serie	181252453
Procedencia	NO INDICA
Ubicación Lugar de calibración	Laboratorio de suelos Instalaciones del cliente
Fecha de calibración	2024/12/03

Método/Procedimiento de calibración
"Procedimiento para la Calibración de Balanzas de Funcionamiento no Automático Clase III y IIII" (PC-001) del SNM-INDECOPI, 3era edición Enero 2009 y la Norma Metrológica Peruana "Instrumentos de Pesaje de Funcionamiento No Automático (NMP 003:2009)

Este certificado de calibración documenta la trazabilidad a patrones nacionales o internacionales, que realizan las unidades de medida de acuerdo con el Sistema Internacional de Unidades (SI)

Los resultados son válidos en el momento de la calibración. Al solicitante le corresponde disponer en su momento recalibrar sus instrumentos a intervalos regulares, los cuales deben ser establecidos sobre la base de las características propias del instrumento, sus condiciones de uso, el mantenimiento realizado y conservación del instrumento de medición o de acuerdo a reglamentaciones vigentes.

ARSOU GROUP S.A.C. no se responsabiliza de los perjuicios que pueda ocasionar el uso inadecuado de este instrumento después de su calibración, ni de una incorrecta interpretación de los resultados de la calibración declarados en este documento.

Este certificado no podrá ser reproducido o difundido parcialmente, excepto con autorización previa por escrito de ARSOU GROUP S.A.C.

Arsou Group S.A.C

ARSOU GROUP S.A.C.
Joshep Andres Arevalo Flores
METROLOGIA

AMAZONAS INGENIERIA CIVIL S.A.C.
Juan Carlos Firmo Ojeda Ayesta
INGENIERO CIVIL
Reg. CIP. 123351

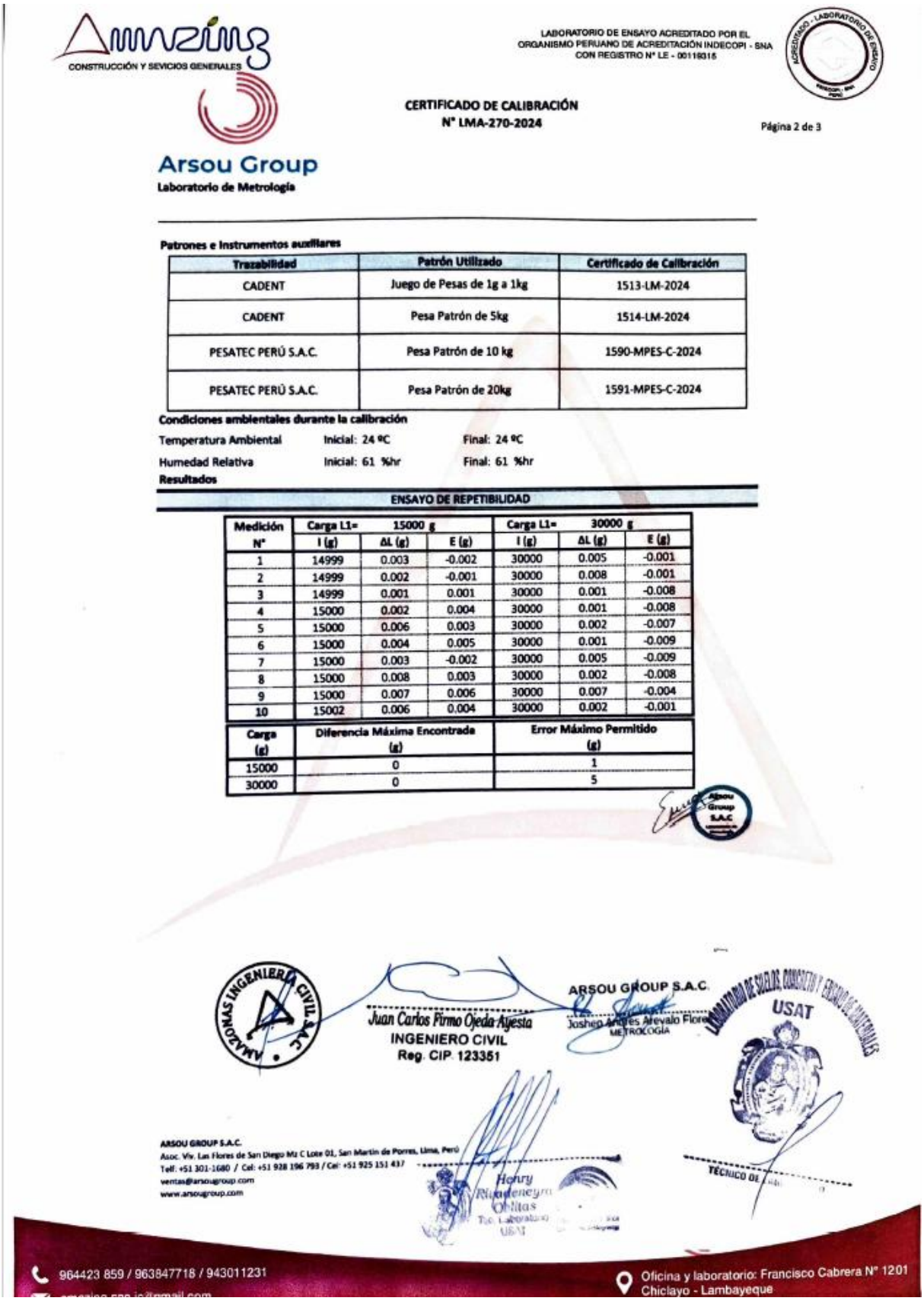
USAT

Henry Rivadeneyra Ovilas
TEC. LABORATORIO
USAT

TECNICO DE LABORATORIO

ARSOU GROUP S.A.C.
Asoc. Viv. Las Flores de San Diego Mz C Lote 01, San Martin de Porres, Lima, Perú
Telf: +51 301-1680 / Cel: +51 928 196 793 / Cel: +51 925 151 437
ventas@arsougroup.com
www.arsougroup.com

Ilustración 37. Certificado de calibración de balanza



CONSTRUCCIÓN Y SEVICIOS GENERALES

LABORATORIO DE ENSAYO ACREDITADO POR EL ORGANISMO PERUANO DE ACREDITACIÓN INDECOPI - SNA CON REGISTRO N° LE - 00116015

CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN
N° LMA-270-2024

Página 2 de 3

Arsou Group
Laboratorio de Metrología

Patrones e Instrumentos auxiliares

Trazabilidad	Patrón Utilizado	Certificado de Calibración
CADENT	Juego de Pesas de 1g a 1kg	1513-LM-2024
CADENT	Pesa Patrón de 5kg	1514-LM-2024
PESATEC PERÚ S.A.C.	Pesa Patrón de 10 kg	1590-MPES-C-2024
PESATEC PERÚ S.A.C.	Pesa Patrón de 20kg	1591-MPES-C-2024

Condiciones ambientales durante la calibración

Temperatura Ambiental Inicial: 24 ºC Final: 24 ºC

Humedad Relativa Inicial: 61 %hr Final: 61 %hr

Resultados

ENSAYO DE REPETIBILIDAD

Medición N°	Carga L1= 15000 g			Carga L1= 30000 g		
	I (g)	ΔL (g)	E (g)	I (g)	ΔL (g)	E (g)
1	14999	0.003	-0.002	30000	0.005	-0.001
2	14999	0.002	-0.001	30000	0.008	-0.001
3	14999	0.001	0.001	30000	0.001	-0.008
4	15000	0.002	0.004	30000	0.001	-0.008
5	15000	0.006	0.003	30000	0.002	-0.007
6	15000	0.004	0.005	30000	0.001	-0.009
7	15000	0.003	-0.002	30000	0.005	-0.009
8	15000	0.008	0.003	30000	0.002	-0.008
9	15000	0.007	0.006	30000	0.007	-0.004
10	15002	0.006	0.004	30000	0.002	-0.001

Carga (g)	Diferencia Máxima Encontrada (g)	Error Máximo Permitido (g)
15000	0	1
30000	0	5

Juan Carlos Pirmo Ojeda Ayesta
INGENIERO CIVIL
Reg. CIP 123351

ARSOU GROUP S.A.C.
Joshep Andres Arevalo Flores
METROLOGÍA

USAT

TECNICO DE

Henry Ruidenerya Ohtas
Tec. Laboratorio USAT

ARSOU GROUP S.A.C.
Asoc. Viv. Las Flores de San Diego Mz C Lote 01, San Martin de Porres, Lima, Perú
Telf. +51 301-1680 / Cel: +51 928 196 793 / Cel: +51 925 151 437
ventas@arsougroup.com
www.arsougroup.com

Ilustración 38. Certificado de calibración de repetibilidad de Balanza

Amazing
CONSTRUCCIÓN Y SEVICIOS GENERALES

LABORATORIO DE ENSAYO ACREDITADO POR EL ORGANISMO PERUANO DE ACREDITACIÓN INDECOPI - SNA CON REGISTRO N° LE - 00118315

ACREDITADO - LABORATORIO DE ENSAYO

Arsou Group
Laboratorio de Metrología

CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN
N° LMA-270-2024

Página 3 de 3

ENSAYO DE EXCENTRICIDAD

Posición de la Carga	Determinación de E_0				Determinación de E_0				
	Carga Min[1] (g)	I (g)	ΔL (g)	EO (g)	Carga L (g)	I (kg)	ΔL (g)	E (g)	Ec (g)
1	500	500	0.006	0.001	10000	10000	0.003	-0.005	0.016
2		500	0.005	-0.003		10000	0.002	0.004	0.012
3		500	0.003	0.002		10000	0.003	0.001	0.008
4		500	0.001	-0.001		9999	0.006	0.006	0.002
5		500	0.001	0.005		9999	0.004	0.007	-0.003

ENSAYO DE PESAJE

Carga L (g)	Crecientes				Decrecientes				EMP[2] (±g)
	I (g)	ΔL (g)	E (g)	E_c (g)	I (g)	ΔL (g)	E (g)	E_c (g)	
1	1	0.003	0.003	0.001					
5	5	0.006	0.005	0.006	5	0.002	0.004	-0.002	0.1
10	10	0.008	0.009	0.008	10	0.006	0.003	0.003	0.1
50	50	0.009	0.008	0.004	50	0.008	-0.001	0.001	0.1
100	100	0.011	-0.002	0.009	100	0.008	-0.002	0.009	0.1
500	500	0.004	0.003	-0.003	500	0.009	0.009	0.006	0.2
1000	1000	0.006	-0.001	-0.004	1000	0.007	0.006	0.012	0.2
5000	5000	0.008	-0.005	0.009	5000	0.004	0.001	0.016	0.2
10000	10000	0.009	0.009	0.012	10000	0.003	0.005	0.009	0.2
20000	20000	0.012	0.011	0.008	20000	0.001	0.009	0.004	0.6
30000	30000	0.011	0.008	0.007	30000	0.001	0.006	0.003	0.6

Leyenda
I: Indicación de la balanza
ΔL: Carga Incrementada
E: Error encontrado
E_0: Error en cero
E_c: Error corregido
EMP: Error máximo permitido

INCERTIDUMBRE EXPANDIDA Y LECTURA CORREGIDA

Incertidumbre expandida de medición: $U_R = 2 * \sqrt{0.31751\ g^2 + 0.0000000003543\ R^2}$

Lectura Corregida: $R_{corregida} = R + 0.000081425\ R$

R Indicacion de lectura de balanza (g)

Arsou Group S.A.C Laboratorio de Metrología

Observaciones
1. Antes de la calibración no se realizó ningún tipo de ajuste.
2. Los EMP para esta balanza, corresponden para balanzas en uso de funcionamiento no automático de clase de exactitud II según la Norma Metrológica Peruana NMP 003:2009
3. La incertidumbre de la medición ha sido calculada para un nivel de confianza de aproximadamente del 95 % con un factor de cobertura k=2 .
4. (*) Codigo indicado en una etiqueta adherida al instrumento.
5. Con fines de identificación se colocó una etiqueta autoadhesiva con la indicación "CALIBRADO"

Fin de documento

AMAZONAS INGENIERÍA CIVIL S.A.C.

Juan Carlos Firmo Ojeda Ayesta
INGENIERO CIVIL
Reg. CIP. 123351

ARSOU GROUP S.A.C.
Josnep Andres Arevalo Flores
METROLOGIA

LABORATORIO DE SUELOS, CONCRETO Y ENSAYO DE MATERIALES
USAT

Henry Rivadeneyra Oblitas
Tec. Laboratorio
USAT

TÉCNICO DE LABORATORIO

ARSOU GROUP S.A.C.
Asoc. Viv. Las Flores de San Diego Mz C Lote 01, San Martín de Porres, Lima - Perú
Telf: +51 301-1680 / Cel: +51 928 196 793 / Cel: +51 925 151 437
ventas@arsougroup.com
www.arsougroup.com

964423 859 / 963847718 / 943011231
amazing.sac.ic@gmail.com
Oficina y laboratorio: Francisco Cabrera N° 1201
Chiclayo - Lambayeque

Ilustración 39. Certificado de Calibración de excentricidad y pesaje de Balanza

Los resultados realizados en la presente investigación se pueden encontrar en el siguiente enlace:

https://drive.google.com/drive/folders/1mdBMIMAdCfG3Dx6OpPlC_nhz2epEMU72?usp=sharing