

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL**



TESIS

**“ESTABILIZACIÓN DE SUELOS FINOS CON CENIZA DE FONDO Y
CEMENTO PARA USO COMO SUBRASANTE EN LA REGIÓN
CAJAMARCA”**

PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO CIVIL

ELABORADO POR

**LUIS ENRIQUE CARBAJAL CASTREJON
ID: 0009-0005-6229-6091**

ASESOR

**MSc. LUISA ESTHER SHUAN LUCAS
ID: 0000-0003-1228-5835**

LIMA - PERÚ

2025

© 2025, Universidad Nacional de Ingeniería. Todos los derechos reservados

**“El autor autoriza a la UNI a reproducir la Tesis en su totalidad o en parte,
con fines estrictamente académicos.”**

CARBAJAL CASTREJON, Luis Enrique

luis.carbajal.c@uni.pe

964713079

Dedicatoria:

A mis padres y mi hermano;

Por el apoyo incondicional y siempre creer en mí.

Por ser guía y fuente de conocimientos.

Por inculcar todos los valores que me formaron como persona.

AGRADECIMIENTOS

Expreso mi mayor agradecimiento a la asesora M.Sc. Luisa Esther Shuan Lucas por su invaluable ayuda y orientación durante todo el proceso de elaboración de mi tesis.

Al Instituto de Investigación de la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Nacional de Ingeniería por su apoyo con el financiamiento de la investigación para esta tesis.

Al Laboratorio N°2 de Mecánica de Suelos y al Laboratorio Químico de la Facultad de Ingeniería Civil UNI, por las facilidades brindadas para la ejecución de ensayos.

A la Dra. Carmen Reyes por su apoyo y guía para la ejecución de los ensayos químicos.

Al laboratorio y personal de la empresa CONCEL, que me apoyaron y brindaron consejos durante los ensayos realizados en la ciudad de Cajamarca.

A Ciro Chilón Tafur por permitirme, de manera desinteresada, extraer una gran cantidad de muestras en sus terrenos como apoyo a mi investigación.

A mis familiares por su constante apoyo y disposición de recursos, que fueron fundamentales para obtener materiales e información necesarios en mi camino hacia mis metas.

A mis abuelos Jesús y María, que, desde mi infancia, cultivaron en mí el interés por los estudios.

A todos los profesores de la Facultad de Ingeniería Civil por compartir no solo sus conocimientos, sino también sus valores, los cuales se reflejan constantemente en mi desarrollo profesional.

ÍNDICE

Resumen	4
Abstract.....	5
Prólogo.....	6
Lista de tablas.....	7
Lista de figuras	9
Lista de símbolos y siglas	11
Capítulo I: Introducción.....	12
1.1 Generalidades.....	12
1.2 Descripción del problema.....	12
1.3 Objetivos.....	13
1.3.1 Objetivo general.....	13
1.3.2 Objetivos específicos	13
1.4 Antecedentes referenciales.....	14
Capítulo II: Marco teórico y conceptual	15
2.1 Suelos finos	15
2.2 Subrasante.....	17
2.3 Las puzolanas.....	19
2.3.1 Cemento	19
2.3.2 Carbón mineral.....	20
2.3.3 Ceniza de fondo de carbón mineral.....	21
2.4 Estabilización de suelos en carretera	22
2.4.1 Estabilización con cenizas	23
2.4.2 Estabilización con cemento.....	24
2.5 Ensayos de caracterización física geotécnica	25
2.5.1 Análisis granulométrico por tamizado.....	25
2.5.2 Ensayo de gravedad específica de sólidos.....	26
2.5.3 Ensayo de contenido de humedad	26
2.5.4 Límites de consistencia	26
2.5.5 Clasificación con propósitos de ingeniería.....	27
2.5.5.1 Clasificación SUCS	28
2.5.5.2 Clasificación AASHTO	29
2.6 Ensayos de caracterización mecánica	30
2.6.1 Ensayo Proctor Modificado	30

2.6.2	Ensayo CBR	30
2.7	Ensayos de caracterización química	32
2.7.1	Difracción de rayos – X	32
2.7.2	Fluorescencia de rayos – X	32
2.7.3	Materia orgánica en suelos MTC E118	32
2.7.4	PH en los suelos MTC E129	33
2.7.5	Sales solubles MTC E219	33
	Capítulo III: Trabajo de campo.....	34
3.1	Selección de los materiales.....	34
3.1.1	Selección del suelo fino.....	35
3.1.2	Selección de la ceniza de fondo.....	39
3.2	Muestreo	40
3.2.1	Obtención del suelo fino.....	40
3.2.2	Obtención de la ceniza de fondo	40
3.2.3	Obtención de carbón mineral	43
	Capítulo IV: Ensayos de laboratorio.....	44
4.1	Preparación de los materiales	44
4.1.1	Preparación del suelo fino natural	44
4.1.2	Preparación de la ceniza de fondo	45
4.1.3	Cemento	46
4.2	Caracterización del suelo fino natural.....	46
4.2.1	Propiedades físicas del suelo natural	46
4.2.2	Propiedades químicas del suelo natural.....	47
4.3	Caracterización de la ceniza de fondo.....	48
4.3.1	Propiedades físicas de la ceniza de fondo	48
4.3.2	Propiedades químicas de la ceniza de fondo	48
4.4	Caracterización del cemento Portland.....	49
4.4.1	Propiedades físicas del cemento Portland.....	50
4.4.2	Propiedades químicas del cemento Portland	50
4.5	Caracterización del carbón mineral	50
4.5.1	Propiedades físicas del carbón mineral.....	50
4.5.2	Propiedades químicas del carbón mineral.....	51
4.6	Ensayos en las mezclas de suelo y ceniza.....	51
4.6.1	Protocolo de mezcla de suelo y ceniza.....	51
4.6.2	Caracterización de las mezclas de suelo y ceniza.....	52

4.6.3	Proctor modificado	55
4.6.4	Ensayos CBR en las mezclas de suelo y ceniza	57
4.7	Ensayos en mezclas de suelo, ceniza y cemento.....	59
4.7.1	Protocolo para incorporación del cemento en ensayos CBR	59
4.7.2	Criterios para elección preliminar del contenido de cemento.....	61
4.7.3	Ensayos CBR en las mezclas de suelo, ceniza y cemento.....	61
4.7.4	Características químicas y mineralógicas de la mezcla.....	68
Capítulo V: Análisis de resultados		70
5.1	Resultados de ensayos de caracterización física	70
5.2	Resultados de ensayo Proctor Modificado	72
5.3	Resultados de ensayos CBR.....	73
5.3.1	CBR de suelo y ceniza.....	73
5.3.2	CBR de suelo, ceniza y cemento	74
5.4	Acción puzolánica	75
5.5	Discusión de las dosificaciones a usar	76
5.6	Análisis económico y viabilidad de uso de ceniza de fondo en Cajamarca	77
5.6.1	Estimación de costos	77
5.6.2	Comparación de costos.....	78
Conclusiones		79
Recomendaciones		81
Referencias		82
Anexos		87

Resumen

La actual tendencia en la estabilización de suelos se enfoca en la aplicación de alternativas sostenibles que hacen uso de materiales locales. En este estudio, se propone el tratamiento de un suelo fino de alta plasticidad de Cajamarca, Perú, utilizando ceniza de fondo (CF) procedente de carbón mineral y cemento. Este suelo fue clasificado como A-7-5 según el sistema AASHTO, con un CBR del 2 %, que no cumple con las especificaciones de resistencia requeridas por el Ministerio de Transportes y Comunicaciones del Perú.

La adición de CF resultó en una mejora significativa de las propiedades geotécnicas del suelo, reduciendo tanto su plasticidad como su contenido de finos, pero el CBR solo aumentó marginalmente de 2 % a 2,4 % con 30 % de adición de CF. Para promover el efecto estabilizador de la CF se incorporó a la mezcla el cemento Portland tipo I en proporciones de 1,0 %, 1,5 %, 2 % y 4,0 %; en este caso, los resultados mostraron una mejora significativa, ya que los valores de CBR superaron los mínimos requeridos. Entre los resultados se obtuvo que con solo 1 % de cemento y 30 % de CF, se logró un CBR de 14,1 %; asimismo, al utilizar mayor porcentaje de aditivos el CBR continuó aumentando.

Se determinó que la adición de una pequeña cantidad de cemento tiene un impacto significativo en la reacción puzolánica, lo que resulta en un aumento del CBR en función del contenido de CF utilizado.

Palabras Clave: estabilización de suelo, ceniza de fondo, cemento, subrasante, sostenibilidad, California Bearing ratio

Abstract

The current trend in soil stabilization focuses on the application of sustainable alternatives that make use of local materials. In this study, the treatment of a fine soil of high plasticity from Cajamarca, Peru, is proposed using bottom ash (BA) from mineral coal and cement. This soil was classified as A-7-5 according to the AASHTO system, with a CBR of 2 %, which does not meet the resistance specifications required by the Ministry of Transportation and Communications of Peru.

The addition of BA resulted in a significant improvement of the geotechnical properties of the soil, reducing both its plasticity and its fines content, but the CBR only increased marginally from 2 % to 2,4 % with 30 % BA addition. To promote the stabilizing effect of BA, Portland cement type I was incorporated into the mixture in proportions of 1,0 %, 1,5 %, 2 % and 4,0 %; In this case, the results showed a significant improvement, since the CBR values exceeded the minimum required. Among the results, it was obtained that with only 1 % cement and 30 % BA, a CBR of 14,1 % was achieved; Moreover, when using a higher percentage of additives, the CBR continued to increase.

It was determined that the addition of a small amount of cement has a significant impact on the pozzolanic reaction, resulting in an increase in CBR depending on the BA content used.

Keywords: soil stabilization, subgrade, bottom ash, cement, sustainability
California Bearing ratio

Prólogo

En la presente tesis, el Bach. Luis Enrique Carbajal Castrejon propone una alternativa de estabilización de suelos finos de subrasante, mediante un tratamiento con cenizas de fondo de carbón mineral generadas por hornos artesanales y cemento; el ámbito de aplicación del proyecto es la región Cajamarca.

El tesista realizó una investigación completa, realizó trabajos de campo e identificó los factores socioeconómicos de diversas localidades y la necesidad de construcción de vías locales. Dada la amplia presencia de suelos finos en la zona y la generación de residuos de ceniza de fondo que no cumplen protocolos ambientales de eliminación, los resultados de la investigación representan una alternativa de estabilización técnica, económica y sostenible.

La investigación del Bach. Carbajal fue muy minuciosa, antes de los ensayos definitivos realizó pruebas piloto donde definió el protocolo de mezcla y el rango de adición del cemento, de esta forma, en los ensayos definitivos tuvo mejor criterio en la elección de las combinaciones a estudiar. En las diversas combinaciones de ceniza de fondo y cemento, optó por priorizar el factor económico, con mayor participación de la ceniza de fondo por ser un aditivo disponible localmente y reduciendo el cemento por ser más costoso en la zona. Los resultados fueron satisfactorios, obtuvo que dosificaciones bajas de cemento de 1% a 1.5% es suficiente para promover la propiedad puzolánica de la ceniza de fondo y activar la reacción química de la mezcla, aumentando la resistencia del suelo tratado.

Este trabajo puede ser replicado para la mejora de suelos finos de otras regiones del Perú, en las cuales las propiedades físicas y químicas de los materiales estabilizantes y suelos finos a tratar, pueden ser muy diversos.

MSc. LUISA ESTHER SHUAN LUCAS
Asesora

Lista de tablas

Tabla 1. Clasificación de suelos de acuerdo con el diámetro de partícula.....	15
Tabla 2. Clasificación de subrasantes de acuerdo con el CBR.	18
Tabla 3. Clasificación de las puzolanas según composición química.....	19
Tabla 4. Clasificación del carbón mineral.....	21
Tabla 5. Abertura de los tamices para el análisis granulométrico.....	25
Tabla 6. Tabla de clasificación de suelos SUCS.....	28
Tabla 7. Tabla de clasificación de suelos método AASHTO.	29
Tabla 8. Procedencia y clasificación de muestras de suelos de subrasantes.....	35
Tabla 9. Procedencia de muestras de ceniza de fondo.....	39
Tabla 10. Cantidad de ladrilleras artesanales en la región de Cajamarca.....	41
Tabla 11. Caracterización física del suelo fino natural	46
Tabla 12. Caracterización química del suelo fino natural	47
Tabla 13. Análisis de composición química de la muestra de suelo natural.	47
Tabla 14. Composición química de la muestra de suelo natural expresada en óxidos.....	47
Tabla 15. Caracterización física de la ceniza de fondo	48
Tabla 16. Caracterización de la ceniza de fondo.....	48
Tabla 17. Análisis de composición química de la muestra de ceniza de fondo. .	48
Tabla 18. Composición química expresada en óxidos de la ceniza de fondo.....	49
Tabla 19. Propiedades físicas del cemento Sol Tipo I.....	50
Tabla 20. Composición química del cemento Sol Tipo I.....	50
Tabla 21. Propiedades físicas del carbón mineral.....	50
Tabla 22. Propiedades químicas del carbón mineral.....	51
Tabla 23. Nomenclatura de las mezclas suelo-ceniza.	52
Tabla 24. Granulometría de las mezclas de suelo y ceniza.	52
Tabla 25. Gravedad específica de las mezclas suelo-ceniza.	53
Tabla 26. Límites de consistencia de las mezclas suelo-ceniza.....	54
Tabla 27. Clasificación SUCS y AASHTO de las mezclas suelo-ceniza.....	55
Tabla 28. Valores de OCH y MDS de las mezclas suelo-ceniza.	55
Tabla 29. Valores de presión obtenidos del ensayo CBR para las mezclas suelo- ceniza.....	57
Tabla 30. Valores de presión obtenidos del ensayo CBR para las mezclas suelo- ceniza y 1% de cemento.....	61

Tabla 31. Valores de presión obtenidos del ensayo CBR para las mezclas suelo-ceniza y 1.5% de cemento.....	63
Tabla 32. Valores de presión obtenidos del ensayo CBR para las mezclas suelo-ceniza y 2% de cemento.....	64
Tabla 33. Valores de presión obtenidos del ensayo CBR para las mezclas suelo-ceniza y 4% de cemento.....	66
Tabla 34. Análisis de composición química de la mezcla suelo + 20% CF + 1.5% cemento.....	68
Tabla 35. Análisis de composición elemental de la mezcla suelo + 20% CF + 1.5% cemento.....	68
Tabla 36. Análisis de composición química expresada en óxidos de la muestra de la mezcla suelo + 20% CF + 1.5% cemento.....	69
Tabla 37. Resultados de los ensayos de caracterización física de las muestras.	70
Tabla 38. Resultados de los ensayos proctor de las muestras.....	72
Tabla 39. Resultados de los ensayos CBR de las mezclas suelo-ceniza.....	74
Tabla 40. Resultados de los ensayos CBR para las mezclas suelo-ceniza-cemento.....	74
Tabla 41. Análisis de composición química expresada en óxidos.	76

Lista de figuras

Figura 1. Esquema de la composición estructural del pavimento.....	17
Figura 2. Ceniza de fondo de ladrillera de Cajamarca.	22
Figura 3. Proceso de selección del tipo de estabilización de suelos.	23
Figura 4. Cuadro de plasticidad para la clasificación SUCS.....	29
Figura 5. Ejemplo de curvas Presión vs Deformación que requieren y no requieren de corrección.	31
Figura 6. Ejemplo de corrección de curva Presión vs Deformación usando una curva tangente.	31
Figura 7. Mapa de ubicación del lugar de procedencia de los materiales usados en la investigación, en la región Cajamarca, Perú.	34
Figura 8. Ubicación de muestras extraídas en la provincia de Cajamarca.	36
Figura 9. Calicata excavada para la extracción de la muestra 2, zona urbana...	37
Figura 10. Talud de trocha de la muestra 7, zona turística.....	37
Figura 11. Trocha del C.P. Río Grande donde se ubica la muestra 6, zona rural.	37
Figura 12. Trocha del C.P. Porcón Bajo, ubicación de la muestra 8, zona rural.	38
Figura 13. Lugar de extracción de la muestra de suelo fino.	38
Figura 14. Lugar de extracción de la muestra de ceniza de fondo.	39
Figura 15. Extracción de muestra de suelo fino en talud de la trocha CA-1141.	40
Figura 16. Horno artesanal de Cajamarca.	42
Figura 17. Extracción de ceniza de fondo de ladrillera artesanal en Santa Bárbara.....	42
Figura 18. Extracción de carbón mineral utilizado en la quema de ladrillos.....	43
Figura 19. Secado de muestra de suelo fino en ambiente natural y con ventiladores.	44
Figura 20. Muestra de suelo fino tamizada y homogeneizada.....	45
Figura 21. Ceniza de granulometría completa que generan las ladrilleras.	45
Figura 22. Cemento Portland Tipo I usado en la investigación.....	46
Figura 23. Muestras de suelo y ceniza listas para la mezcla.....	51
Figura 24. Análisis granulométrico de las muestras de suelo natural, CF y sus mezclas.	53
Figura 25. Ejecución de ensayo de análisis granulométrico.	53
Figura 26. Ejecución de ensayo de gravedad específica.	54

Figura 27. Ejecución de ensayo de límites de consistencia.	55
Figura 28. Curvas del ensayo Proctor modificado obtenidas para las mezclas ensayadas.	56
Figura 29. Compactación de mezcla para ensayo Proctor Modificado.	56
Figura 30. Curvas de Presión vs Penetración para las mezclas de suelo-ceniza sin adición de cemento.	58
Figura 31. Preparación y compactación de mezclas en moldes para ensayo CBR.	58
Figura 32. Corrido de los moldes tras 07 días de saturación.....	59
Figura 33. Moldes CBR en etapa de curación.....	60
Figura 34. Moldes CBR en etapa de saturación.....	60
Figura 35. Curvas de Presión vs Penetración para las mezclas de suelo-ceniza con la adición de 1% de cemento.	62
Figura 36. Curvas de Presión vs Penetración para las mezclas de suelo-ceniza con la adición de 1.5% de cemento.	64
Figura 37. Curvas de Presión vs Penetración para las mezclas de suelo-ceniza con la adición de 2% de cemento.	65
Figura 38. Curvas de Presión vs Penetración para las mezclas de suelo-ceniza con la adición de 4% de cemento.	67
Figura 39. Variación de los límites de consistencia de las mezclas de suelo-ceniza.	71
Figura 40. Variación del índice de contracción de las mezclas suelo-ceniza.....	71
Figura 41. Índice de contracción de las muestras de suelo natural y ceniza de fondo.	72
Figura 42. Variación de la MDS de las mezclas suelo-ceniza.	73
Figura 43. Variación del OCH de las mezclas suelo-ceniza.	73
Figura 44. Comportamiento del CBR añadiendo ceniza de fondo al suelo natural.	74
Figura 45. Comportamiento del CBR al 95%MDS con la adición de cemento....	75

Lista de símbolos y siglas

AASHTO	: American Association of State Highway and Transportation Official.
ASTM	: American Society for Testing and Materials.
CBR	: California Bearing Ratio.
C_c	: Coeficiente de curvatura.
CF	: Ceniza de fondo.
CMS	: Suelo modificado con cemento.
CSS	: Suelo estabilizado con cemento.
C_u	: Coeficiente de uniformidad.
D_{10}	: Diámetro por debajo del cual queda 10% del peso total.
D_{30}	: Diámetro por debajo del cual queda 30% del peso total.
D_{60}	: Diámetro por debajo del cual queda 60% del peso total.
INEI	: Instituto Nacional de Estadística e Informática.
I_c	: Índice de contracción.
IP	: Índice de plasticidad.
LL	: Límite líquido.
LP	: Límite plástico.
MDS	: Máxima densidad seca.
MTC	: Ministerio de transportes y comunicaciones.
NTP	: Norma Técnica Peruana.
OCH	: Óptimo contenido de humedad.
SUCS	: Sistema Unificado de Clasificación de Suelos.
XRD	: Difracción de rayos X.
XRF	: Fluorescencia de rayos X.

Capítulo I: Introducción

1.1 Generalidades

Para mejorar las subrasantes de las carreteras, la estabilización de suelos es una alternativa técnica y económica fundamental. Con el fin de reemplazar los estabilizantes convencionales, que suelen ser costosos y a veces perjudiciales para el medio ambiente, se han explorado numerosas opciones que no solo son económicas, sino también sostenibles y respetuosas con el medio ambiente.

Cajamarca, una de las regiones más pobres de Perú, enfrenta importantes desafíos, ya que el 64.6% de su población reside en áreas rurales (Instituto Nacional de Estadística e Informática [INEI], 2018, p. 26). En las zonas rurales de un país en desarrollo como Perú, las trochas o caminos de tierra son frecuentes debido a la gran brecha en la pavimentación de carreteras. Debido a la falta de mantenimiento y recursos, estas vías, esenciales para la conectividad y el desarrollo económico, con frecuencia se encuentran en malas condiciones.

El uso de la ceniza de carbón mineral, un subproducto de los hornos de ladrillos artesanales de la zona, como estabilizante para suelos finos, es una solución innovadora y sostenible que este estudio propone. Al utilizar este material, se tiene como objetivo mejorar significativamente el estado de las trochas rurales, brindando caminos más sólidos y duraderos. Esta práctica no solo aprovecha un residuo, reduciendo su impacto ambiental, sino que también proporciona a las comunidades locales una solución económica. La mejora de las carreteras rurales también puede ayudar a la economía local al facilitar el transporte de personas y bienes, lo que contribuye al desarrollo integral de estas zonas desfavorecidas.

1.2 Descripción del problema

Las especificaciones técnicas para construcción de subrasantes en el Perú consideran que el suelo de fundación o suelo natural pueda considerarse como capa de subrasante si tienen una resistencia o capacidad de soporte $CBR \geq 6\%$ determinado con el método ASTM 1883-21 en especímenes saturados y al 95% del grado de compactación, por lo cual en suelos que no se cumpla esta condición, se recurre a técnicas de estabilización para mejorar sus propiedades geotécnicas y aumento del valor de CBR (Ministerio de Transportes y Comunicaciones [MTC], 2014).

En la región de Cajamarca, Perú, la mayor parte de la población reside en áreas rurales; las municipalidades de los centros poblados que administran gran parte de estas zonas rurales enfrentan una escasez de recursos económicos para la construcción de caminos adecuados en terrenos donde predominan suelos finos de baja capacidad de soporte.

En Cajamarca, la fabricación de ladrillos artesanales es una actividad ampliamente practicada, en los hornos donde se producen estos ladrillos se utiliza el carbón mineral conocido como "carbón de piedra", que se extrae de yacimientos locales. La combustión de este carbón genera ceniza de fondo.

Esta actividad artesanal no tiene controles, la informalidad y la ausencia de protocolos adecuados para la eliminación de las cenizas residuales generan contaminación ambiental. La presente investigación propone una alternativa sostenible para el mejoramiento de los suelos finos mediante el uso de cenizas de fondo generadas en la región de Cajamarca, aprovechando este subproducto industrial para mejorar la infraestructura vial y contribuir al desarrollo regional.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

- Proponer un método de estabilización de los suelos finos de la región Cajamarca utilizando cenizas de fondo provenientes de ladrilleras locales y cemento, para la mejora de sus propiedades físico-mecánicas, de manera que puedan ser usados como subrasante de carreteras.

1.3.2 Objetivos específicos

- Realizar trabajo de campo en la región Cajamarca para seleccionar el suelo fino y ceniza de fondo a usar en la investigación.
- Realizar ensayos para determinar las características físicas, químicas y mecánicas del suelo fino natural y de la ceniza de fondo; luego se efectuarán ensayos en la mezcla del suelo con diversas dosificaciones de ceniza de fondo y cemento.
- Evaluar los resultados de los ensayos realizados en las mezclas con diversas dosificaciones, determinar una dosificación apropiada de ceniza

de fondo y cemento para mejora del suelo y habilitación como subrasante de carretera.

- Evaluar la viabilidad económica en el uso de ceniza de fondo y cemento en la estabilización de carreteras en la región de Cajamarca.

1.4 Antecedentes referenciales

Se define un suelo modificado con cemento (CMS) cuando se añade una cantidad pequeña de cemento, generalmente entre un 2% y un 4%, logrando beneficios permanentes en el suelo, como el aumento del CBR. Por otro lado, los manuales de la PCA establecen que un suelo se considera estabilizado con cemento (CSS) cuando se emplea una mayor cantidad de cemento para obtener un material rígido con mayor resistencia (Gross, 2020).

Velásquez C. (2018) utilizó cemento portland tipo I para la estabilización de subrasantes arcillosas en Cajamarca, con la adición de 1, 3 y 5% logró reducir el IP del suelo arcilloso de 44% a 36, 23 y 15% respectivamente. Adicionalmente, la misma proporción de cemento logró aumentar el CBR de 1.3% a 3.5, 6.6 y 13.8%.

En un estudio, Osinubi (2000) utilizó cemento en combinación con ceniza de fondo de carbón pulverizado, sus concentraciones variaron del 2% al 8% de cemento y entre el 5% y el 30% de ceniza para estabilizar suelos compuestos por arcillas tropicales negras en Nigeria, observando un aumento notable en el valor CBR del 9% al 130%.

Cenizas de otros orígenes también han sido estudiadas. Según Basha et al. (2005), la estabilización haciendo uso de ceniza de cáscara de arroz (RHA) y cemento de un suelo residual de Malasia conllevó un aumento de resistencia y una disminución de la plasticidad. Concluyeron que se obtiene un óptimo cuando se utiliza entre 6% y 8% de cemento, y entre 10% y 15% de RHA.

Partab et al. (2021) estudiaron el efecto de añadir ceniza volante y cemento en subrasantes, determinaron que la plasticidad del suelo se vio reducida drásticamente y la expansión libre del suelo disminuyó de 41% a 12% con la adición de 20% de ceniza volante y 8% de cemento. Adicionalmente el valor de CBR se incrementó de 2.9% a 10.1%.

Capítulo I: Marco teórico y conceptual

2.1 Suelos finos

Los suelos finos se caracterizan por partículas de tamaño muy pequeño que pueden incluir limos y arcillas. Según Das y Sobhan (2017), los suelos finos son aquellos que contienen una alta proporción de partículas que pasan a través de un tamiz con aberturas de 0.075 mm (No. 200). Estos suelos tienden a mostrar propiedades plásticas significativas y pueden exhibir cambios volumétricos a causa de variaciones de la humedad.

Los suelos pueden clasificarse de acuerdo con el tamaño de sus partículas, la Tabla 1 muestra la clasificación USDA que considera como arcilla a los suelos finos con partículas menores de $2\mu\text{m}$ y como limos los tamaños entre $5\mu\text{m}$ y $2\mu\text{m}$.

Tabla 1. Clasificación de suelos de acuerdo con el diámetro de partícula.

Fuente: Soil Survey Manual.

Fracción de suelo	Diámetros (mm) (Clasificación de la USDA)
Arena muy gruesa	1.00 – 2.00
Arena gruesa	0.50 – 1.00
Arena media	0.25 – 0.50
Arena fina	0.10 – 0.25
Arena muy fina	0.05 – 0.10
Limo	0,002 – 0,05
Arcilla	< 0,002

La mineralogía de los suelos finos y limosos es fundamental para comprender sus propiedades físicas y mecánicas. Los suelos finos están compuestos principalmente por minerales arcillosos que incluyen caolinita, illita y esmectita. Según Mitchell y Soga (2005), estos minerales se diferencian principalmente por su estructura en capas y capacidad de intercambio de cationes. La caolinita tiene una estructura en capas con enlaces fuertes, resultando en baja plasticidad y expansividad. La illita posee una estructura similar, pero con cationes de potasio que brindan propiedades intermedias. La esmectita, con su alta capacidad de intercambio de cationes, permite una considerable expansión y contracción con cambios en el contenido de humedad, lo que hace que los suelos que contienen esmectita sean altamente expansivos.

Por otro lado, los suelos limosos están compuestos por partículas de tamaño intermedio entre las arenas y arcillas, y contienen diversos minerales. Craig (2004) menciona que los minerales comunes en los suelos limosos incluyen cuarzo, feldespatos y mica. El cuarzo es el mineral más abundante, este aporta alta resistencia y baja reactividad química contribuyendo a la estabilidad del suelo. Los feldespatos pueden alterarse químicamente para formar minerales arcillosos, especialmente en climas cálidos y húmedos, mientras que las micas, como la biotita y la moscovita, aportan elasticidad y afectan la plasticidad del suelo.

En términos de propiedades mecánicas, los suelos con un alto contenido de minerales de sílice como el cuarzo, tienden a tener una menor plasticidad, esto se debe a que el cuarzo es un mineral no reactivo con una estructura cristalina rígida, lo que limita su capacidad de absorber agua y deformarse plásticamente. En contraste, los suelos que contienen una mayor proporción de minerales arcillosos (que son silicatos aluminosos) como la esmectita y la ilita, exhiben una mayor plasticidad; estos minerales tienen una estructura en capas y una alta superficie específica, lo que les permite absorber más agua y experimentar deformaciones plásticas significativas (Craig, 2004; Mitchell & Soga, 2005).

Los suelos finos pueden presentar varios problemas geotécnicos en obras viales debido a sus propiedades inherentes, estos problemas incluyen la expansión y contracción, baja capacidad de soporte, alta susceptibilidad a la erosión y deformación permanente bajo cargas repetidas. A continuación, se describen algunos de los problemas específicos:

- **Expansión y contracción:** Los suelos arcillosos son especialmente susceptibles a cambios de volumen con variaciones en el contenido de humedad, la expansión durante periodos húmedos y la contracción durante periodos secos pueden causar grietas en las estructuras viales y deformaciones en la superficie del pavimento.
- **Baja capacidad de soporte:** Los suelos finos generalmente tienen una capacidad de soporte baja, lo que puede resultar en asentamientos y fallas estructurales en las carreteras.

- **Alta susceptibilidad a la erosión:** Algunos suelos finos, como las arcillas dispersivas son susceptibles a la erosión ante la presencia del agua, lo que puede causar la pérdida de material de subrasante y consiguiente inestabilidad de la carretera.
- **Deformación permanente:** Bajo cargas repetidas, como el paso de vehículos pesados, los suelos finos pueden experimentar deformaciones permanentes que causan la formación de ahuellamientos y otros defectos en la superficie del pavimento.

Según Das y Sobhan (2017), estos desafíos geotécnicos asociados con los suelos finos en aplicaciones viales son bien reconocidos en la ingeniería geotécnica y requieren medidas adecuadas de diseño y construcción para mitigar sus efectos.

2.2 Subrasante

Es la superficie terminada de suelo natural o estabilizado sobre la cual se coloca el afirmado o la estructura del pavimento. Esta capa debe estar conformada por suelos de características mínimas aceptables con un espesor compactado mínimo de 0.30m, a fin de absorber las cargas de tránsito a las que sea sometida. (MTC, 2014).

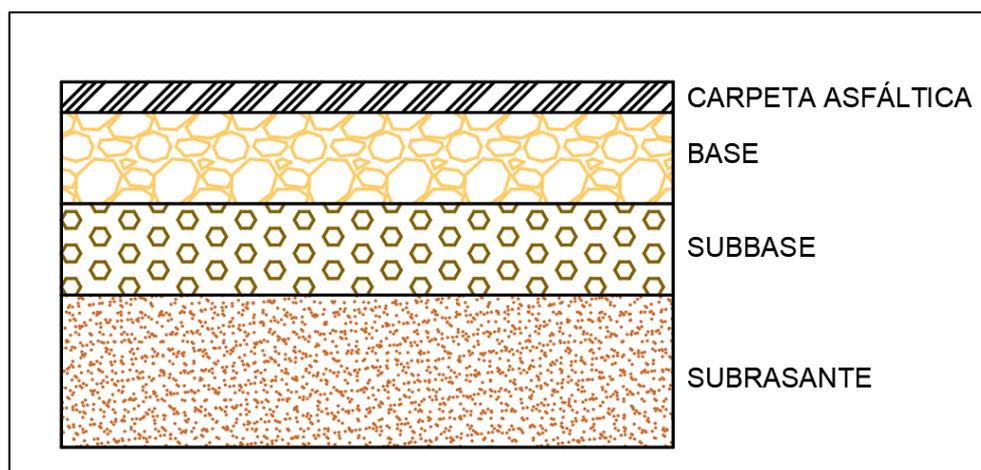


Figura 1. Esquema de la composición estructural del pavimento.

El módulo resiliente es una medida de la rigidez de la subrasante de un pavimento y su capacidad para soportar cargas repetidas, se determina mediante ensayos de carga repetida y se expresa en unidades de presión como MPa o psi. Un valor

alto de módulo resiliente indica una subrasante más rígida y capaz de soportar mejor las cargas del tráfico.

El Índice de Soporte California (CBR) es una medida de la resistencia relativa de una subrasante al ensayo de penetración de un pistón estándar bajo condiciones específicas de humedad y densidad. Se expresa como un porcentaje que representa la relación entre la resistencia de la subrasante ensayada y la resistencia de una muestra patrón conformada por un material gravoso de resistencia conocida. Un CBR más alto indica una mayor capacidad de soporte de la subrasante (Huang, 2017).

Ambos parámetros pueden usarse en el diseño de pavimentos de acuerdo con el método empleado; con el módulo resiliente se determina las propiedades elásticas bajo cargas repetitivas y se puede proyectar las deformaciones que puede producirse en la subrasante bajo las cargas del tráfico, mientras que el CBR se utiliza para evaluar la capacidad de soporte relativa de la subrasante y como un factor de diseño en el dimensionamiento de la estructura del pavimento (Huang, 2017).

En la etapa constructiva, los últimos 0.30m de suelo debajo del nivel superior de la subrasante, deberán ser compactados al 95% de la máxima densidad seca obtenida del ensayo Proctor Modificado y los suelos por debajo del nivel superior de la subrasante, en una profundidad no menor de 0.60 m, asimismo deberán ser suelos adecuados y estables con $CBR \geq 6\%$ (MTC, 2014). La Tabla 2 muestra la clasificación de las subrasantes en Perú de acuerdo con el Manual de carreteras, sección suelos y pavimentos.

Tabla 2. Clasificación de subrasantes de acuerdo con el CBR.
Fuente: MTC Manual de carreteras, sección Suelos y Pavimentos.

Símbolo	Categoría subrasante	CBR (%)
S0	Inadecuada	$CBR < 3$
S1	Insuficiente	$3 \leq CBR < 6$
S2	Regular	$6 \leq CBR < 10$
S3	Buena	$10 \leq CBR < 20$
S4	Muy buena	$20 \leq CBR < 30$
S5	excelente	$CBR \geq 30$

2.3 Las puzolanas

La reacción puzolánica es una reacción química entre materiales puzolánicos y el hidróxido de calcio en presencia de agua. Los materiales puzolánicos, como las cenizas, reaccionan con el hidróxido de calcio liberado durante la hidratación del cemento Portland, esta reacción forma productos cementantes adicionales, como el silicato de calcio hidratado (C-S-H), que mejoran la resistencia y durabilidad de la mezcla al reducir la porosidad y aumentar la densidad (Mehta & Monteiro, 2014).

La ASTM C618-22 (2023) define las puzolanas como "materiales silíceos o aluminosilíceos finamente divididos que, en presencia de humedad y en estado activado, reaccionan químicamente con el hidróxido de calcio a temperatura ambiente para formar compuestos con propiedades cementicias". La especificación clasifica a las puzolanas químicamente de acuerdo con las siguientes clases.

Tabla 3. Clasificación de las puzolanas según composición química.

Fuente: ASTM C618-22

	Clase		
	N ^A	F ^B	C ^C
Dióxido de silicio (SiO ₂) más óxido de aluminio (Al ₂ O ₃) más óxido de hierro (Fe ₂ O ₃), mín., %	70,0	50,0	50,0
Óxido de calcio (CaO), %	solo informar	18,0 máx.	< 18,0
Trióxido de azufre (SO ₃), máx., %	4,0	5,0	5,0
Contenido de humedad, máx., %	3,0	3,0	3,0
Pérdida en ignición, máx., %	10,0	6,0	6,0

^A Clase N: Puzolanas naturales sin procesar o calcinadas.

^B Clase F: Ceniza volante que tiene propiedades puzolánicas.

^C Clase C: Ceniza volante que tiene propiedades puzolánicas y algunas propiedades cementantes.

2.3.1 Cemento

El cemento Portland, ampliamente utilizado en la construcción, se compone principalmente de clinker y yeso, junto con otros aditivos. Su composición química incluye óxido de calcio (60-67%), dióxido de silicio (17-25%), óxido de aluminio (3-8%), óxido de hierro (0.5-6%), óxido de magnesio (menos del 5%), y pequeños porcentajes de óxidos de sodio y potasio. Además, contiene yeso (3-5%) para controlar el tiempo de fraguado, estos componentes forman los compuestos principales del clinker: silicato tricálcico(C₃S), silicato bicálcico(C₂S), aluminato

tricálcico y ferrito aluminato tetracálcico, que determinan las propiedades del cemento (Taylor, 1997).

La hidratación del cemento ocurre cuando el cemento Portland se mezcla con agua, formando productos que desarrollan la resistencia y durabilidad del concreto. Los componentes del clinker, como el C_3S y el C_2S reaccionan con el agua para formar silicato de calcio hidratado (C-S-H) e hidróxido de calcio ($Ca(OH)_2$). El C-S-H proporciona resistencia mecánica, mientras que el $Ca(OH)_2$ mantiene la alcalinidad, protegiendo el refuerzo de acero. Otros componentes, como el aluminato tricálcico (C_3A) y el ferrito aluminato tetracálcico (C_4AF), también reaccionan formando etringita y monosulfato, influyendo en el tiempo de fraguado y la resistencia a los sulfatos (Kosmatka & Wilson, 2016).

2.3.2 Carbón mineral

El carbón mineral es una roca sedimentaria de origen orgánico compuesta principalmente por restos vegetales litificados. Inicialmente, estos restos vegetales se depositan en ambientes húmedos o pantanosos, formando un material esponjoso y húmedo conocido como turba, con el tiempo, debido a procesos de diagénesis causados por el enterramiento de los sedimentos y la actividad tectónica, la turba experimenta cambios en su textura y composición, transformándose en una roca de origen orgánico (Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico INGEMMET, 2000).

Tabla 4. Clasificación del carbón mineral.

Fuente: ASTM D388-19.

Tipo de Carbón	Grupo	Límites de Carbón Fijo, %		Límites de Materia Volátil, %		Límites de Poder Calorífico, Kcal/Kg	
		Igual o Superior a	Inferior a	Superior a	Inferior a	Igual o Superior a	Inferior a
(En Base Seca)							
Antracita	Meta Antracita	98			2		
	Antracita	92	98	2	8		
	Semi Antracita	86	92	8	14		
Carbón Bituminoso	Bituminoso De Bajo Volátil	78	86	14	22		
	Bituminoso De Volátil Intermedio	69	78	22	31		
	Bituminoso A De Alto Volátil		69	31		7778	
	Bituminoso B De Alto Volátil					7222	7778
						6390	7222
	Bituminoso C De Alto Volátil					5830	6390
Carbón Sub Bituminoso	Sub Bituminoso A					5830	6390
	Sub Bituminoso B					5280	5830
	Sub Bituminoso C					4600	5280
Lignito	Lignito A					3500	4600

La Tabla 4 muestra los criterios de clasificación del carbón mineral según la norma ASTM D388-19 (2019), que considera los grupos de antracita, bituminoso, subbituminoso y lignito, que se basa en el contenido de carbón fijo, materia volátil y poder calorífico.

2.3.3 Ceniza de fondo de carbón mineral

La ceniza de fondo de carbón mineral estudiada proviene de la combustión de carbón mineral en hornos usados para la fabricación de ladrillos artesanales.

Según Ghosh y Subbarao (2007), su composición varía según el tipo de carbón y las condiciones de combustión, pero suele contener óxidos metálicos, sílice, aluminio y otros elementos. Aunque puede tener propiedades cementantes, como la ceniza volante, suele contener niveles más altos de contaminantes, lo que plantea desafíos ambientales; por lo tanto, su manejo requiere precaución para evitar impactos negativos en el medio ambiente y la salud pública.

Las cenizas de fondo son parte del residuo no combustible de la ignición en centrales eléctricas, calderas, hornos e incineradores, sus características físicas y químicas son muy variadas dependiendo de los materiales que se utilicen como combustible y la temperatura a la que sean sometidas (Rey, 2017).

Las características de las cenizas de fondo dependen de diversos factores como el tipo de carbón, el sistema de quemado, el proceso de vaciado del horno, entre otros; esto hace difícil establecer propiedades generales en base a datos de cenizas de fondo utilizadas por otros autores. No hay una referencia universal, algunas cenizas de fondo son tan distintas de otras que deben ser estudiadas como materiales diferentes, pudiendo usarse de distinta forma como un árido; además, hay que sumar que algunas industrias mezclan el carbón con otros residuos mientras se quema (Wyrzykowski, et al., 2016).

La composición química de la ceniza de fondo puede ser determinada bombardeando la ceniza con radiación fluorescente (rayos X) a través de la cual se mide su composición química (ASTM E2465-13, 2019).

En un contexto artesanal, en la región Cajamarca se denomina ceniza de fondo al residuo de la combustión de carbón mineral que se deposita en el fondo de los hornos después de un día de quemado y catorce días de enfriamiento.



Figura 2. Ceniza de fondo de ladrillera de Cajamarca.

2.4 Estabilización de suelos en carretera

Existen tres métodos principales de estabilización para mejorar la resistencia de un suelo: estabilización física, estabilización química y estabilización mecánica.

El Ministerio de Transporte y Comunicaciones (2014) considera los siguientes factores como determinantes para elegir el tipo de estabilización aplicable:

- Características físicas y mecánicas del suelo que será estabilizado.
- Uso del suelo que será estabilizado.
- Tipo de aditivo o agente estabilizador del suelo.
- Experiencia del tipo de estabilizador que se utilizará en subrasantes de similares características físicas y mecánicas.
- Fácil obtención en el mercado para el aditivo estabilizador.
- Obtención sin obstrucciones del equipo adecuado para realizar la estabilización de suelos.
- Estudio económico en el que se compararán diferentes propuestas de solución para tener en cuenta el costo – beneficio.

En la Figura 3 se visualiza el diagrama de flujo que la norma MTC (2014) propone para elegir un agente estabilizador.

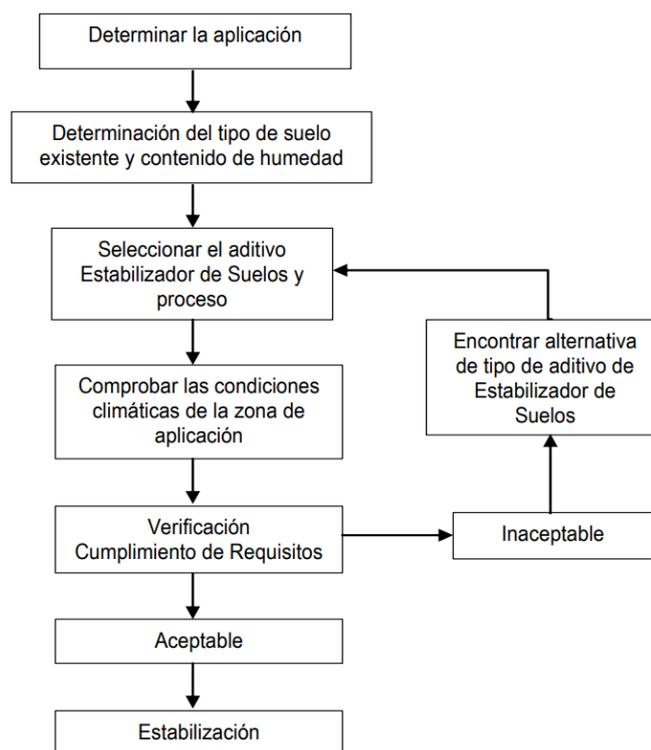


Figura 3. Proceso de selección del tipo de estabilización de suelos.

Fuente: Manual de Carreteras: Suelos, geología, geotecnia y pavimentos.

2.4.1 Estabilización con cenizas

La estabilización de subrasantes con diferentes tipos de ceniza es una técnica utilizada en la ingeniería civil para mejorar las propiedades del suelo, este proceso

incluye el uso de cenizas volantes, cenizas de fondo y cenizas de origen vegetal, cada una con características particulares que las hacen adecuadas para diferentes aplicaciones.

Las cenizas volantes son un subproducto de la combustión del carbón en las plantas de energía, contienen sílice reactiva y en algunos casos, aluminio, lo que les confiere propiedades puzolánicas. Cuando se mezclan con el suelo y agua, las cenizas volantes reaccionan químicamente para formar compuestos cementantes que mejoran la cohesión y la capacidad de soporte del suelo. La estabilización con cenizas volantes puede reducir la plasticidad del suelo, aumentar su resistencia y mejorar su comportamiento ante la carga cíclica de tráfico (Sivakumar Babu & Vasudevan, 2008).

Las cenizas de fondo también son un subproducto de la combustión del carbón, pero a diferencia de las cenizas volantes, se recogen en la parte inferior de los hornos. Estas cenizas tienen partículas más grandes y menos contenido de sílice reactiva lo que puede limitar su actividad puzolánica, sin embargo, pueden mejorar la estructura del suelo aumentando la fricción interna y reduciendo la deformación bajo carga. La mezcla de cenizas de fondo con suelos arcillosos puede mejorar la capacidad de soporte y reducir la expansividad (Ghosh y Subbarao, 2007).

La ceniza de cáscara de arroz es un subproducto de la quema de cáscaras de arroz. Es rica en sílice amorfa, lo que le confiere excelentes propiedades puzolánicas; cuando se mezcla con el suelo y agua, la ceniza de cáscara de arroz puede reaccionar para formar compuestos cementantes que mejoran la cohesión y la resistencia del suelo. Además, puede ayudar a reducir la plasticidad y aumentar la durabilidad del suelo estabilizado, haciéndolo más resistente a las condiciones climáticas adversas y a la erosión (Basha et al., 2005).

2.4.2 Estabilización con cemento

La estabilización con cemento para carreteras es un proceso utilizado para mejorar las propiedades del suelo en la construcción y mantenimiento de carreteras. En este método, se mezcla cemento con el suelo in situ para aumentar su resistencia y durabilidad, lo que resulta en una base más sólida y estable para la carretera, el cemento reacciona con el suelo y el agua presente formando

compuestos cementantes que unen las partículas del suelo y crean una matriz más cohesionada (Mitchell & Soga, 2005).

2.5 Ensayos de caracterización física geotécnica

2.5.1 Análisis granulométrico por tamizado

El análisis granulométrico por tamizado según la norma ASTM D6913M-17 (2021) es un método para determinar la distribución de tamaño de partículas de los suelos. Este procedimiento se utiliza comúnmente en ingeniería civil y geotecnia para caracterizar los suelos y determinar su idoneidad para diversas aplicaciones, como la construcción de carreteras, cimentaciones, entre otros.

El procedimiento implica pasar una muestra de suelo a través de una serie de tamices de diferentes tamaños de abertura. Estos tamices están diseñados para retener partículas de ciertos tamaños mientras dejan pasar partículas más pequeñas. Después de tamizar, se pesa cada fracción retenida en cada tamiz. Con estos datos, se puede determinar la distribución de tamaño de partículas del suelo y calcular parámetros como el porcentaje de material fino, la curva granulométrica y el coeficiente de uniformidad, entre otros. Este análisis es fundamental para comprender las propiedades del suelo y su comportamiento en diversas aplicaciones de ingeniería.

Tabla 5. Abertura de los tamices para el análisis granulométrico.

Fuente: ASTM D6913M-17

Tamices	Abertura (mm)
3"	75,000
2"	50,000
1 ½"	38,100
1"	25,000
¾"	19,000
3/8"	9,500
4	4,760
10	2,000
20	0,841
40	0,420
60	0,250
100	0,149
140	0,106
200	0,075

2.5.2 Ensayo de gravedad específica de sólidos

Este método de ensayo cubre la determinación de la gravedad específica de sólidos de suelo, que pasan el tamiz de 4,75 mm (N° 4) mediante un picnómetro de agua, tal ensayo consiste en determinar la masa de los sólidos del suelo y su correspondiente volumen, siendo la masa determinada con una balanza y el volumen se halla con el picnómetro al calcular el volumen de agua, desplazado al introducir el suelo seco cuyos vacíos han sido previamente extraídos con una bomba de vacío, baño maría o similares (ASTM D854-14, 2023).

2.5.3 Ensayo de contenido de humedad

Por su rápida ejecución y simplicidad, suele ser una de las pruebas más utilizadas en el laboratorio, ya que puede evaluar cualitativamente ciertas propiedades mecánicas del suelo y correlacionarlas con los resultados de otras pruebas. (López, 2021).

La norma ASTM D2216-19 (2019) define el contenido de humedad como la relación entre la masa de agua contenida en los espacios porosos del suelo o material rocoso y la masa sólida de partículas, expresada como porcentaje.

$$W = \frac{M_W}{M_S} \times 100$$

Donde:

W = Contenido de humedad (%)

M_W = Masa de agua contenido en la muestra (g.)

M_S = Masa seca de la muestra (g.)

2.5.4 Límites de consistencia

Este ensayo permite determinar el límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad, según el método ASTM D4318-17 (2018), estos parámetros se utilizan como parte del sistema de clasificación de suelos en ingeniería para caracterizar la fracción de grano fina del suelo.

El límite líquido se define como el porcentaje de contenido de humedad para el cual el suelo se encuentra entre los estados líquido y plástico. Este límite se determina mediante ensayos en los que se coloca la muestra en una copa de

bronce, se separa en dos 13 mm y luego se deja caer la copa 25 veces hasta que la muestra choque (ASTM D4318-17, 2018).

El límite plástico se define como el porcentaje de contenido de humedad para el cual el suelo se encuentra entre los estados plástico y semisólido. Este se determina formando barritas de 3,2 mm y haciéndolas rodar entre la palma de la mano y vidrio esmerilado hasta que la muestra se desmorona y no se puede volver a formar. En ese punto, se obtiene el porcentaje de humedad del límite plástico (ASTM D4318-17, 2018).

Se puede definir el índice de plasticidad de un suelo como la diferencia entre su límite líquido y su límite plástico.

$$IP = LL - LP$$

El límite de contracción se define como el contenido mínimo de agua, por debajo del cual una disminución de este no causará la disminución del volumen. Se determina utilizando una muestra de suelo secada lentamente, que forma un menisco capilar entre los granos individuales del suelo. Como resultado, los esfuerzos intergranulares aumentarán y el suelo sufrirá una disminución de volumen. A medida que la contracción continúe, el volumen seguirá reduciéndose, ya que el menisco se hace más pequeño y los esfuerzos capilares se incrementan, hasta llegar a un punto donde no hay una mayor reducción del volumen, pero el grado de saturación es esencialmente del 100%. El contenido de agua de la muestra del suelo en el cual esto ocurre se define como límite de contracción (ASTM D4943-18, 2024).

Se puede definir el índice de contracción (I_c) de un suelo como la diferencia entre su límite líquido y su límite de contracción.

$$I_c = L.L - L.C$$

2.5.5 Clasificación con propósitos de ingeniería

Para fines de construcción de obras civiles, los suelos se clasifican típicamente mediante los sistemas conocidos como SUCS y AASHTO.

2.5.5.1 Clasificación SUCS

El sistema Unificado de Clasificación de Suelos SUCS, según ASTM D2487-17 (2020), realiza la clasificación de los suelos para propósitos de ingeniería basada en la determinación en el laboratorio de las características granulométricas, límite líquido e índice plástico. La metodología considera los grupos de suelos que se indica en la Tabla 6, y criterios de plasticidad mostrado en la Figura 4.

Tabla 6. Tabla de clasificación de suelos SUCS
Fuente: ASTM D2487-17

Criterios para Asignar Grupos de Símbolos y Grupos de Nombres Utilizando Pruebas de Laboratorio ^A			Clasificación de Suelo ^B			
			Símbolo de Grupo	Nombre de grupo		
SUELOS DE GRANO GRUESO	Grava (Más del 50% de la fracción gruesa retenida en un tamiz No.4	Gravas Limpias (Menos del 5% fino ^C)	$Cu \geq 4$ y/o $1 < Cc \leq 3^D$	GW	Grava bien clasificada ^E	
			$Cu < 4$ y/o $[Cc < 1 \text{ o } Cc > 3]^D$	GP	Grava pobremente clasificada ^E	
		Grava fina (más del 12% fina)	Fina clasifica como ML o MH Fina clasifica como CI o CH	GM GC	Grava Limosa ^{E,F,G} Grava Arcillosa ^{E,F,G}	
	Más del 50% retenido en un tamiz No.200	Arenas (50% o más de la fracción gruesa pasa un tamiz No.4	Arena Limpia (fina menos del 5% ^H)	$Cu > 6$ y $1 < Cc \leq 3^D$ $Cu < 6$ y/o $[Cc < 1 \text{ o } Cc > 3]^D$	SW SP	Arena bien graduada ^I Arena pobremente graduada ^I
		Arena Fina (Más del 12% fina ^H)	Fina clasifica como ML o MH Fina clasifica como CI o CH	SM SC	Arena legamosa ^{F,G,I} Arena arcillosa ^{F,G,I}	
	SUELOS DE GRANO FINO	Légamos y Arcilla Límite Líquido Menor a 50	Inorgánico	$PI > 7$ y estructura sobre o por encima línea "A" ^J $PI < 4$ o estructura bajo línea "A" ^J	CL ML	Arcilla Magra ^{K,L,M} Légamo ^{K,L,M}
Orgánico			Límite Líquido – más seco < 0.75 Límite Líquido – no seco < 0.75	OL	Arcilla Orgánica ^{K,L,M,N} Légamo Orgánico ^{K,L,M,O}	
Légamos y Arcilla Límite Líquido Mayor a 50			Inorgánico	PI estructura sobre o por encima línea "A" ^J PI estructura bajo línea "A" ^J	CH MH	Arcilla Grasa ^{K,L,M} Légamo Elástico ^{K,L,M}
		Orgánico	Límite Líquido – más seco < 0.75 Límite Líquido – no seco < 0.75	OH	Arcilla Orgánica ^{K,L,M,P} Légamo Orgánico ^{K,L,M,O}	
		SUELOS ALTAMENTE ORGÁNICO	Materia primordialmente orgánica, de color oscuro y hedor orgánico.		PT	Turba

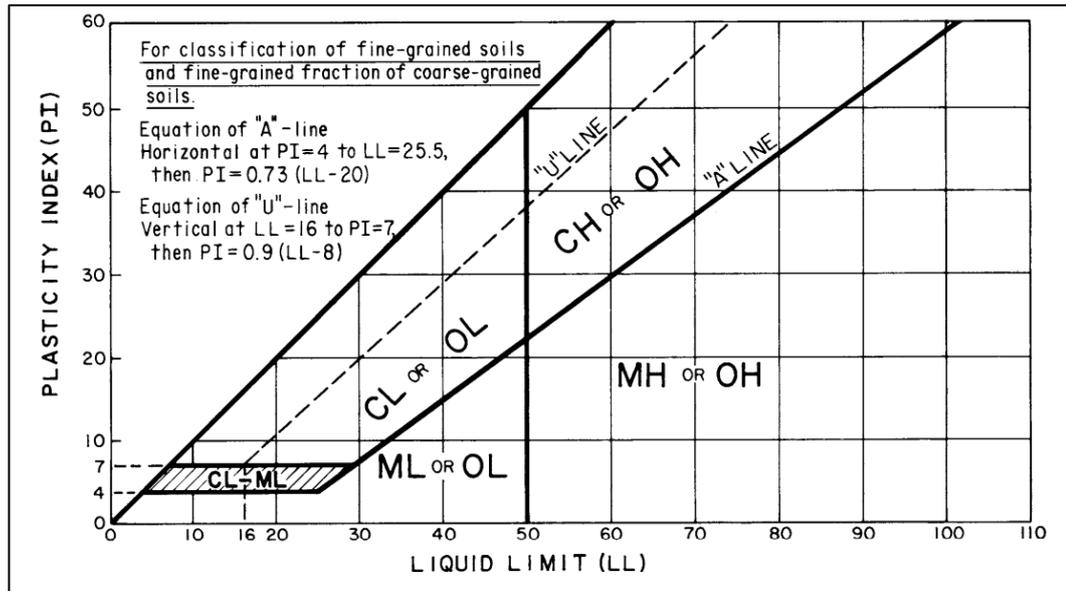


Figura 4. Cuadro de plasticidad para la clasificación SUCS.

Fuente: ASTM D2487-17

2.5.5.2 Clasificación AASHTO

La clasificación AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials) es un sistema utilizado para clasificar los suelos con el propósito de ingeniería de carreteras y pavimentación. Este sistema se basa en las propiedades de los suelos, como el tamaño de partícula, la plasticidad y el contenido de arena, limo y arcilla. La clasificación AASHTO clasifica los suelos en grupos principales (A-1 a A-7) y subgrupos (como A-2-4, A-6-5, etc.), que se muestran en la Tabla 7, cada uno con características específicas que ayudan a determinar su idoneidad para diferentes usos en la construcción de carreteras y obras de ingeniería civil (AASHTO M145-91, 2021).

Tabla 7. Tabla de clasificación de suelos método AASHTO.

Fuente: AASHTO M145-91.

General Classification	Granular Materials (35 % or less passing No. 200)							Silt-Clay Materials (More than 35 % passing No. 200)			
	A-1		A-3	A-2				A-4	A-5	A-6	A-7
Group classification	A-1-a	A-1-b	A-3	A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7	A-4	A-5	A-6	A-7-5, A-7-6
Sieve analysis, % passing:											
No. 10 (2.00 mm)	50 max	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
No. 40 (425 µm)	30 max	50 max	51 min	...	...	...	...	...	...	...	...
No. 200 (75 µm)	15 max	25 max	10 max	35 max	35 max	35 max	35 max	36 min	36 min	36 min	36 min
Characteristics of fraction passing No. 40 (425 µm):											
Liquid limit	...	...	...	40 max	41 min	40 max	41 min	40 max	41 min	40 max	41 min
Plasticity index	6 max	...	N.P.	10 max	10 max	11 min	11 min	10 max	10 max	11 min	11 min ⁴
Usual types of significant constituent materials	Stone Fragments, Gravel and Sand		Fine Sand	Silty or Clayey Gravel and Sand				Silty Soils		Clayey Soils	
General rating as subgrade	Excellent to Good							Fair to Poor			

2.6 Ensayos de caracterización mecánica

2.6.1 Ensayo Proctor Modificado

De acuerdo con el método ASTM D1557-12 (2021), este ensayo abarca los procedimientos de compactación usados en laboratorio, para determinar la relación entre el contenido de agua y peso unitario seco de los suelos compactados en un molde estandarizado con un pisón de 10 lbf que cae desde una altura de 18 pulgadas, produciendo una energía de compactación de 2700 kN-m/m³ o 56000 pie-lbf/pie³. Mediante este ensayo se obtiene la mayor densidad que puede alcanzar el suelo bajo el esfuerzo de compactación especificado y el contenido de agua en el cual se logra la densidad seca máxima.

2.6.2 Ensayo CBR

El ensayo CBR (California Bearing Ratio), según el método ASTM D1883-21 (2021), determina la relación de soporte de California utilizando las partículas del suelo menores a 3/4", esta relación se usa para evaluar la resistencia potencial de subrasante, subbase y material de base; incluyendo, materiales reciclados para usar en pavimentos de vías y de campos de aterrizaje.

Cuando al graficar los resultados del ensayo CBR se obtiene una curva Presión vs Deformación que inicia de forma cóncava hacia arriba, se deberá emplear el método de corrección según la ASTM D1883-21 (2021); se proyectará la línea recta de la curva hasta interceptar el eje X, la distancia al origen será añadido a los valores de 0.1" y 0.2" para obtener los valores de presión corregidos, tal como se muestran en la Figura 5 y Figura 6.

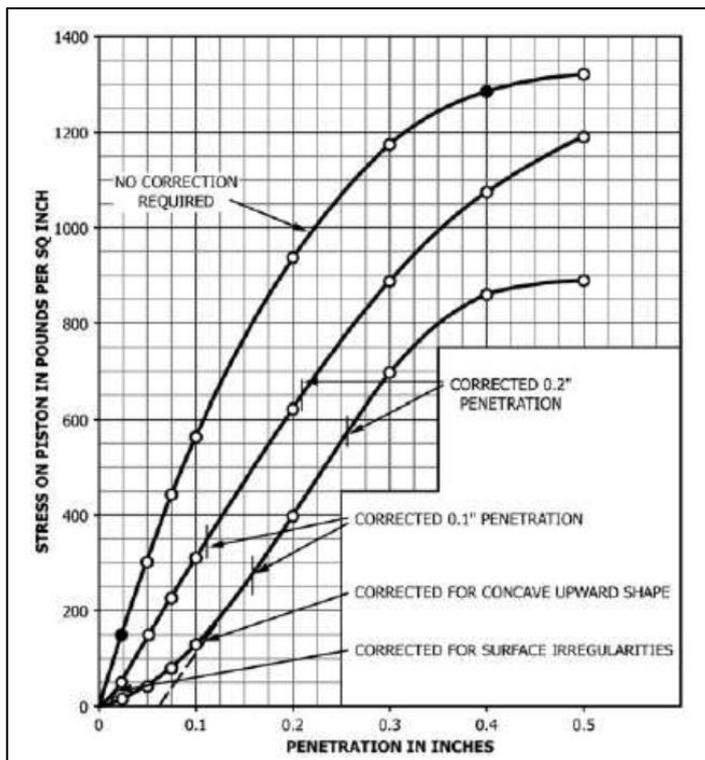


Figura 5. Ejemplo de curvas Presión vs Deformación que requieren y no requieren de corrección.

Fuente: ASTM D1883-21.

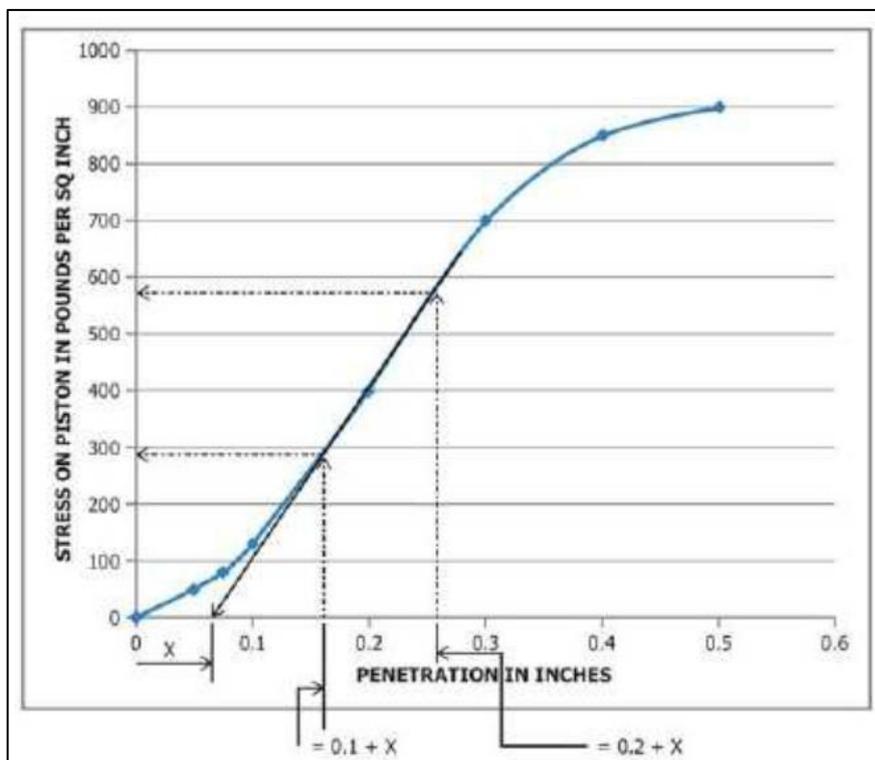


Figura 6. Ejemplo de corrección de curva Presión vs Deformación usando una curva tangente.

Fuente: ASTM D1883-21.

2.7 Ensayos de caracterización química

2.7.1 Difracción de rayos – X

La difracción de rayos X (XRD) es una técnica no destructiva poderosa para caracterizar materiales cristalinos al proporcionar información sobre estructuras, fases, orientaciones cristalinas preferidas y otros parámetros estructurales. Los picos de difracción de rayos X se generan por la interferencia constructiva de un haz de rayos X monocromáticos dispersados a ángulos específicos en una muestra, la intensidad de los picos está relacionada con la distribución de átomos en la estructura cristalina. Por lo tanto, el patrón de difracción de rayos X actúa como una huella digital de la disposición atómica periódica en un material (Bunaciu, et al., 2015).

2.7.2 Fluorescencia de rayos – X

La espectrometría de fluorescencia de rayos X (XRF) es una técnica ampliamente conocida, bien establecida y altamente aplicada en la determinación de muchas composiciones elementales principales de los materiales terrestres. La XRF confiere la capacidad de analizar muestras sólidas de manera no destructiva a través de radiación de rayos X. La ordenada, precisa y clara espectroscopía de emisión, convierten a esta técnica en un método geoquímico de elección en mineralogía e investigación de la composición química de materiales terrestres (Oyedotun, 2018).

Actualmente, los análisis de laboratorio de XRF siguen siendo la técnica estándar para proporcionar análisis de datos geoquímicos de alta calidad en la investigación de la composición elemental terrestre.

2.7.3 Materia orgánica en suelos MTC E118

Este ensayo permite la medición del contenido orgánico en suelos mediante la técnica de pérdida por ignición, enfocándose en materiales como turbas, lodos orgánicos y suelos con presencia de materia vegetal en un estado relativamente no descompuesto ni deteriorado. También se consideran materiales de plantas frescas como madera, raíces, pasto, y sustancias carbonáceas como lignito, carbón, entre otros (MTC, 2016).

2.7.4 PH en los suelos MTC E129

Según MTC (2016), el pH o Potencial de Hidrógeno se calcula como el logaritmo del inverso de la concentración del ion Hidrógeno, los extremos de los valores de pH son 0 y 14, siendo 7 el punto medio que indica una solución neutra. Valores menores de 7 indica acidez y valores mayores de 7 indica alcalinidad del suelo.

El ensayo tiene por objetivo definir determinar el nivel de acidez o alcalinidad en muestras de suelo dispersas en agua, utilizando el método electrométrico (MTC, 2016).

2.7.5 Sales solubles MTC E219

El procedimiento para determinar la presencia de sales en una muestra de agregado pétreo implica someterla a lavados continuos con agua destilada a temperatura de ebullición hasta extraer por completo las sales, se combina técnicas de lavado, análisis químico y cristalización. Durante el proceso se utilizan reactivos químicos para detectar la presencia de sales, evidenciada por la formación de precipitados visibles, una vez completado el lavado se recolecta el agua utilizada y se toma una alícuota para proceder a su cristalización. La cristalización permite determinar la cantidad de sales presentes en el agua, proporcionando información de la calidad del agregado en términos de su contenido de sales, el resultado es fundamental para asegurar la idoneidad de los agregados pétreos en diversas aplicaciones de construcción (MTC, 2016).

Capítulo II: Trabajo de campo

3.1 Selección de los materiales

En la Figura 7 se muestra la ubicación geográfica en el Perú de la región Cajamarca, lugar de procedencia de los materiales utilizados en la investigación. Los trabajos de campo se iniciaron con un recorrido por diversas localidades de la provincia de Cajamarca, para identificar las zonas accesibles para el muestreo y el reconocimiento de los suelos; se tomó muestras de varios lugares para realizar ensayos de propiedades índice y clasificación que fueron importantes para la seleccionar un suelo fino representativo. Posteriormente, para la selección del suelo también se consideró factores de disponibilidad del material en cantidad suficiente para los ensayos, accesibilidad a la zona y facilidades para el transporte. En el recorrido de la zona de trabajo, también se tomó datos de las ladrilleras existentes en la provincia y la producción de ceniza de fondo.

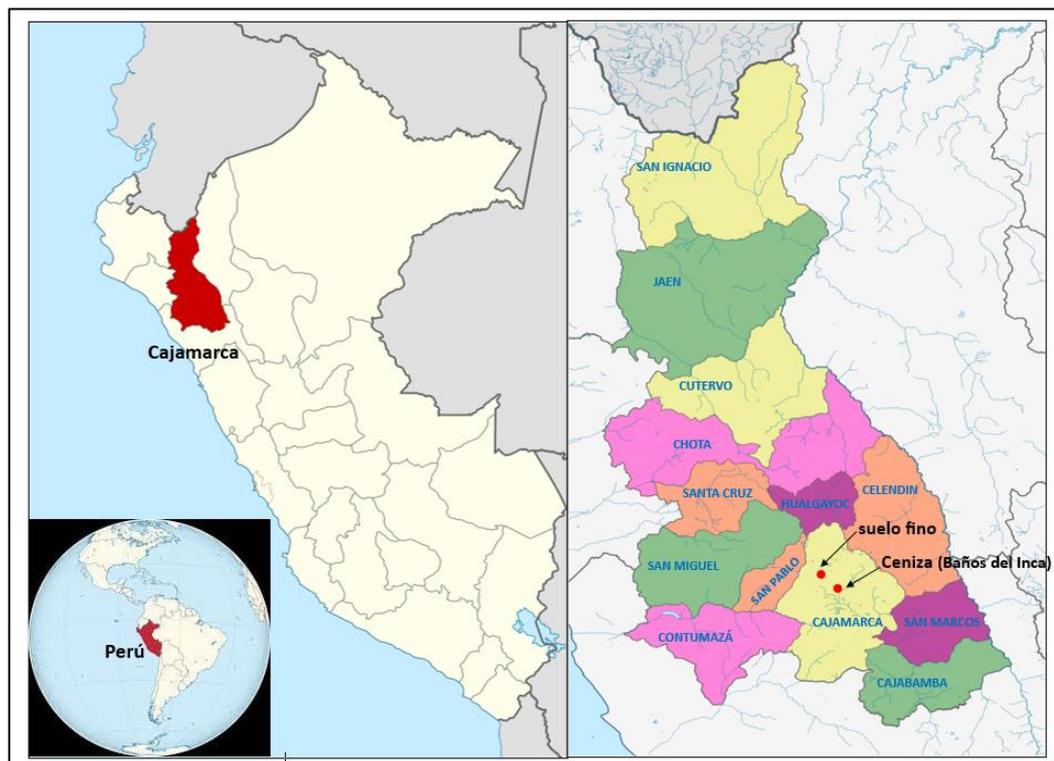


Figura 7. Mapa de ubicación del lugar de procedencia de los materiales usados en la investigación, en la región Cajamarca, Perú.

3.1.1 Selección del suelo fino

En la Tabla 8 y Figura 8 se presenta la información y un esquema con la ubicación de las muestras de suelos finos procedentes de diversas zonas urbanas y rurales, aunque el muestreo se realizó solo en ocho lugares, los materiales son de características similares a otros suelos finos que abundan en Cajamarca, se omitió la extracción de muestras de varias zonas debido a las dificultades de acceso.

Tabla 8. Procedencia y clasificación de muestras de suelos de subrasantes

Muestra	Provincia	Distrito	Centro Poblado	Coordenadas	Clasificación de Suelo
1	Cajamarca	Cajamarca	Rio Grande	7°02'52.7"S 78°31'23.2"W	MH
2	Cajamarca	Baños del inca	-	7°10'19.4"S 78°29'39.0"W	CL
3	Cajamarca	Cajamarca	-	7°09'17.2"S 78°31'40.0"W	CL
4	Cajamarca	Cajamarca	Shudal	7°11'30.0"S 78°30'09.3"W	CH
5	Cajamarca	Cajamarca	Rio grande	7°05'01.4"S 78°31'44.7"W	CL
6	Cajamarca	Cajamarca	Rio grande	7°05'01.7"S 78°31'24.9"W	CL
7	Cajamarca	Llacanora	Suyuscocha	7°11'18.1"S 78°22'40.0"W	CL
8	Cajamarca	Cajamarca	Porcón bajo	7°06'06.8"S 78°34'18.2"W	CL

De acuerdo con los resultados de los ensayos, se seleccionó la muestra 1 procedente del centro poblado Río Grande clasificada como limo de alta plasticidad MH, por poseer propiedades geotécnicas desfavorables y estar disponible en cantidad suficiente para la investigación.

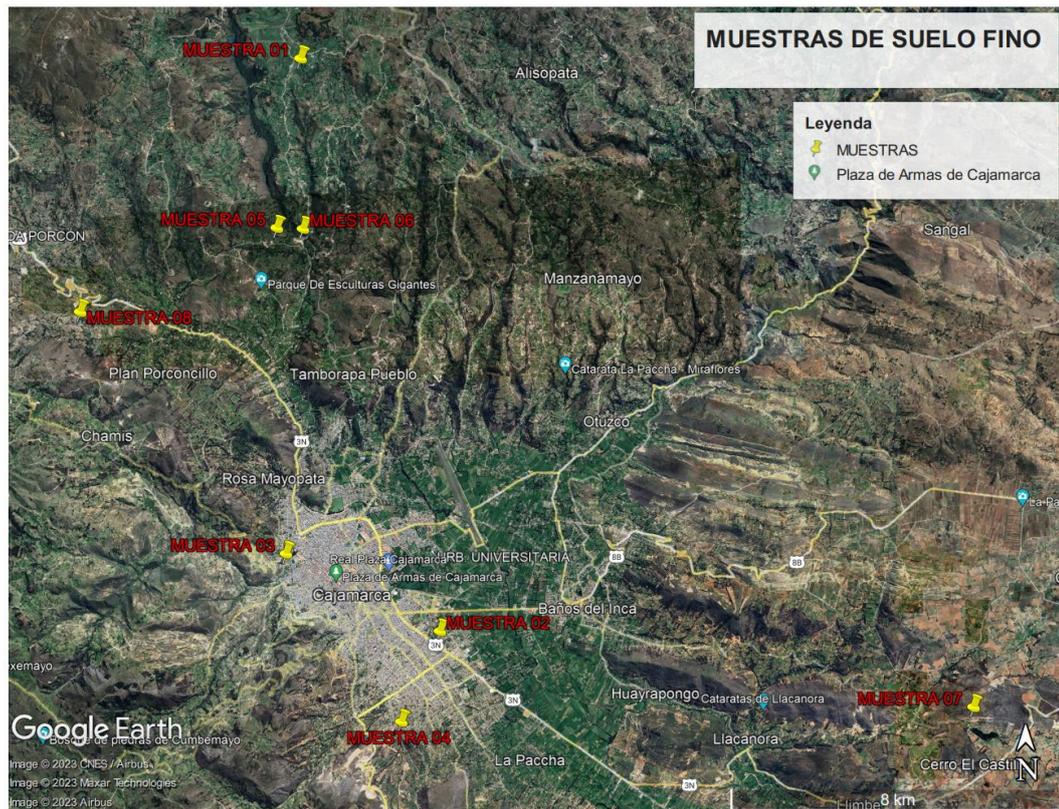


Figura 8. Ubicación de muestras extraídas en la provincia de Cajamarca.

Fuente: Google Earth.

Las muestras 2, 3 y 4 se tomaron de áreas urbanas con vías pavimentadas, mientras que la muestra 7 fue obtenida de la trocha de acceso al centro turístico Laguna Suyuscocha, que presenta dificultades de acceso durante la temporada de lluvias debido a la saturación de los suelos finos, la estabilización de los suelos subyacentes tendría un impacto significativo en el turismo, porque actualmente el acceso está limitado a vehículos aptos para circular en tales condiciones. Por otro lado, las muestras 1, 5, 6 y 8 se localizaron en zonas rurales de centros poblados con recursos limitados para pavimentar sus caminos, en dichos lugares la estabilización del suelo es crucial ya que durante la época de lluvias se producen hundimientos en las trochas, inestabilidad en los taludes y derrumbes, lo que en casos críticos puede aislar a los caseríos afectados.



Figura 9. Calicata excavada para la extracción de la muestra 2, zona urbana.



Figura 10. Talud de trocha de la muestra 7, zona turística.



Figura 11. Trocha del C.P. Río Grande donde se ubica la muestra 6, zona rural.



Figura 12. Trocha del C.P. Porcón Bajo, ubicación de la muestra 8, zona rural.

Finalmente, la muestra 1, representa el suelo limoso que fue utilizado para la presente investigación, este fue extraído de la trocha carrozable CA-1141 del centro poblado Río Grande, distrito de Cajamarca, provincia de Cajamarca, departamento de Cajamarca. La Figura 13 muestra la ubicación de la trocha.

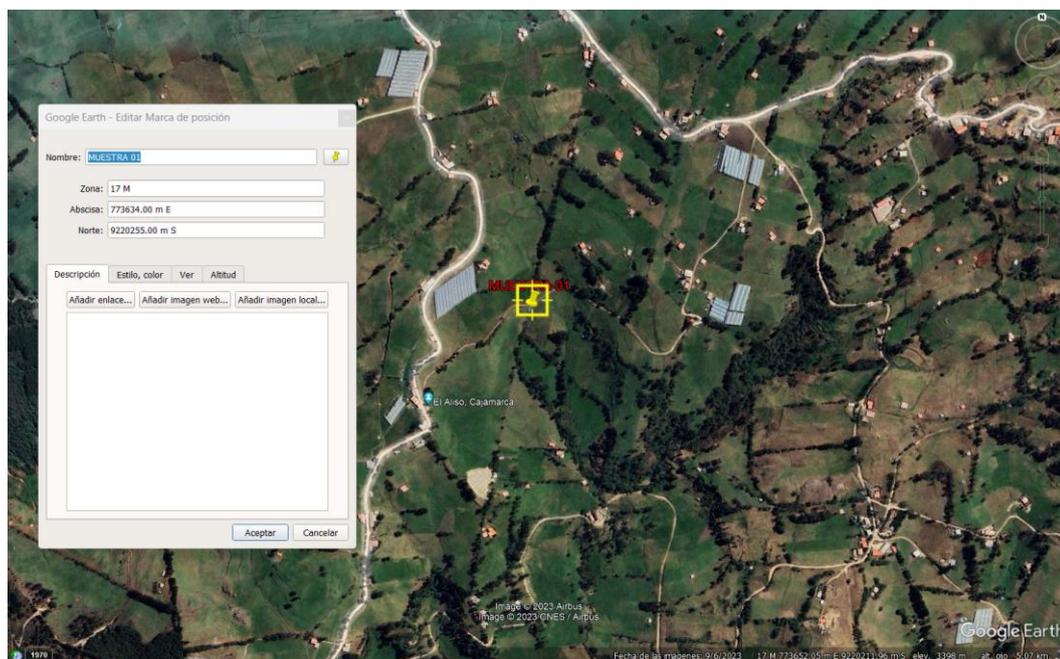


Figura 13. Lugar de extracción de la muestra de suelo fino.

Fuente: Google Earth.

3.1.2 Selección de la ceniza de fondo

Para la selección de la ceniza de fondo se consideró las dos provincias con mayor concentración de ladrilleras artesanales en Cajamarca, se tomó muestras procedentes de Hualgayoc y Cajamarca cuyos datos se muestran en la Tabla 9; finalmente, se optó por la ceniza de fondo proveniente del horno artesanal de una ladrillera del centro poblado de Santa Bárbara, distrito de Baños del Inca, provincia de Cajamarca, departamento de Cajamarca. Esta elección se basó en consideraciones de accesibilidad y facilidades de transporte, esta zona es reconocida por albergar numerosas familias dedicadas a la producción y venta de ladrillos artesanales. La ubicación del lugar de procedencia de la ceniza se indica en la Figura 14.

Tabla 9. Procedencia de muestras de ceniza de fondo

Muestra	Provincia	Distrito	Centro Poblado	Coordenadas
1	Cajamarca	Baños del Inca	Santa Bárbara	7°06'59.3"S 78°30'20.3"W
2	Hualgayoc	Bambamarca	Agomarca	6°41'18.0"S 78°32'09.9"W

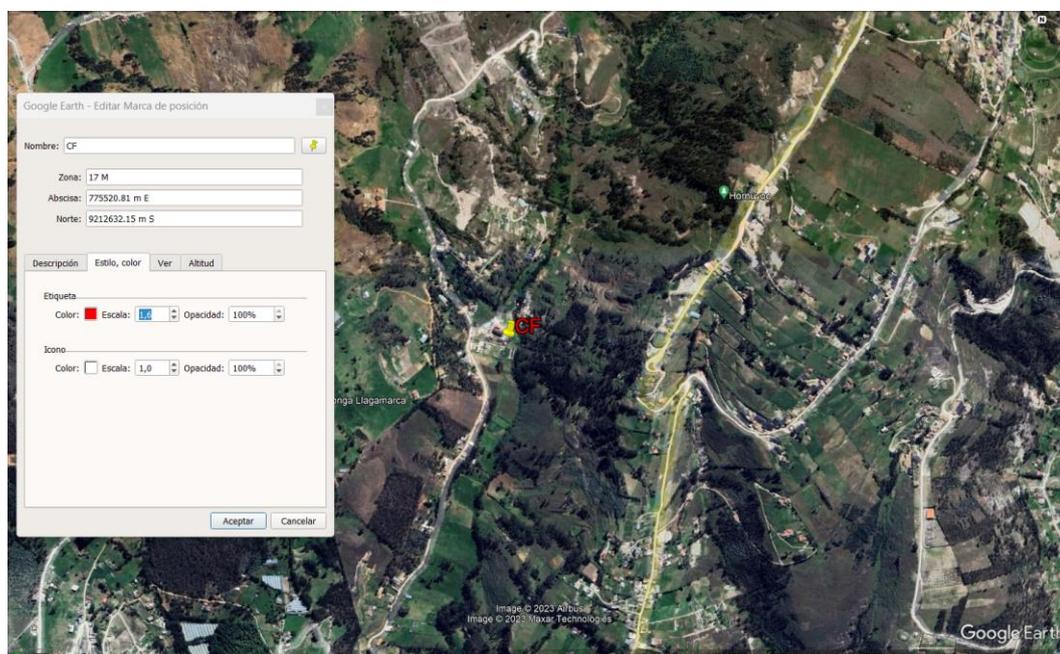


Figura 14. Lugar de extracción de la muestra de ceniza de fondo.

Fuente: Google Earth

3.2 Muestreo

3.2.1 Obtención del suelo fino

Con el fin de obtener una cantidad adecuada de muestra para llevar a cabo todos los ensayos necesarios en la investigación, se extrajo suelo limoso del talud de la trocha CA-1141, el cual presentaba características similares en color y textura a la trocha misma. Se recolectó aproximadamente una tonelada de muestra húmeda con el propósito de realizar una única extracción de suelo y así evitar alterar sus propiedades con extracciones adicionales.



Figura 15. Extracción de muestra de suelo fino en talud de la trocha CA-1141.

3.2.2 Obtención de la ceniza de fondo

Según Mercadeando S.A. (2012) en su Diagnóstico Nacional del Sector Ladrillero Artesanal existen 490 ladrilleras artesanales en la región Cajamarca, las cuales se concentran en la provincia de Cajamarca, como se muestra en la Tabla 10, con 411 ladrilleras, seguida por las provincias Hualgayoc y Cajabamba con una producción promedio de 21.15 millares de ladrillos por mes. Cada una de estas ladrilleras genera aproximadamente 0.8m^3 de ceniza por proceso de fabricación. Adicionalmente, el proceso de fabricación consta de 1 día de quemado, 14 días de enfriamiento y 2 semanas para la venta de los ladrillos, por lo que la producción de ceniza de fondo sería $0.8\text{m}^3/\text{mes}$.

Tabla 10. Cantidad de ladrilleras artesanales en la región de Cajamarca.

Fuente: Mercadeando S.A – 2012.

Provincia	Distrito	Zonas	Empresas	Total			
Cajamarca	Cerrillo	Cerrillo	49	100			
		Quinoa Pata	42				
		San José de las Madres	9				
		Carhuaquero	2				
		Homuyoc	66				
		Huacataz	Chicospata		6	111	
			Llushcapampa		9		
			Quirayquero Alto		28		
			Bajo Otuzco		3		
		Baños del inca	Plan Miraflores		33	100	411
	Otuzco		Alto Miraflores	17			
			Cristo Rey	17			
			Runipampa Alto	13			
	Manzanamayo		17				
	Santa bárbara		Colcapampa	11	100		
			Quirarquero Bajo	24			
			Shultin	41			
		Santa Barbara	16				
		Santa Barbara Alta	8				
	Cajabamba	Caday		1	4		
Callash			3				
Hualgayoc	Bambamarca	Frutillo	75	75	75		
			TOTAL	490			

Típicamente se utiliza un horno construido con adobe o arcilla con dimensiones aproximadas 4.5m de altura, 4m de largo y 4m de ancho. Se utiliza leña y carbón mineral como combustible; la leña es prendida inicialmente hasta encender el carbón mineral, el cual estará encendido por 1 día y pasará 14 días de enfriamiento.



Figura 16. Horno artesanal de Cajamarca.

La ceniza de fondo empleada en el proceso de estabilización del suelo limoso procede de los hornos utilizados en la producción de ladrillos artesanales en Cajamarca, está compuesta principalmente por el residuo de la combustión del carbón mineral tipo antracita. Esta ceniza se acumula naturalmente en la parte inferior del horno debido a la gravedad. Se recolectó la cantidad requerida para llevar a cabo todos los ensayos, ya que las propiedades de la ceniza varían ligeramente en cada ciclo de quema de ladrillos.



Figura 17. Extracción de ceniza de fondo de ladrillera artesanal en Santa Bárbara.

3.2.3 Obtención de carbón mineral

Se tomó una muestra del carbón mineral del mismo horno de ladrillos artesanales el día que se recolectó la ceniza de fondo, asegurando así que esta última procediera exclusivamente de dicho carbón mineral. Se extrajo una cantidad suficiente para realizar ensayos de caracterización y clasificación del carbón que dio origen a la ceniza de fondo utilizada, los resultados se presentan en el ítem 4.5.1.



Figura 18. Extracción de carbón mineral utilizado en la quema de ladrillos.

Capítulo III: Ensayos de laboratorio

4.1 Preparación de los materiales

4.1.1 Preparación del suelo fino natural

La muestra de suelo fino fue enviada de Cajamarca a Lima para la ejecución de los ensayos de laboratorio, dado que fue recolectada en temporada de lluvias el suelo llegó en estado saturado, por lo que fue necesario secarla previamente. Este secado se realizó al medio ambiente y con uso de ventiladores, evitando así el secado en horno para no alterar las propiedades del suelo. El proceso de secado se ilustra en la Figura 19.



Figura 19. Secado de muestra de suelo fino en ambiente natural y con ventiladores.

Posteriormente, la muestra de suelo fino se pasó por el tamiz de malla 10 a fin de obtener una muestra homogénea y trabajable, en este proceso se disgregó con mortero los grumos y terrones compactos que formó el suelo fino al secarse. Luego, la totalidad de la muestra tamizada se mezcló varias veces para asegurar su uniformidad, finalmente se reservó en sacos herméticos para protegerla de cualquier contaminación y preservar la humedad.

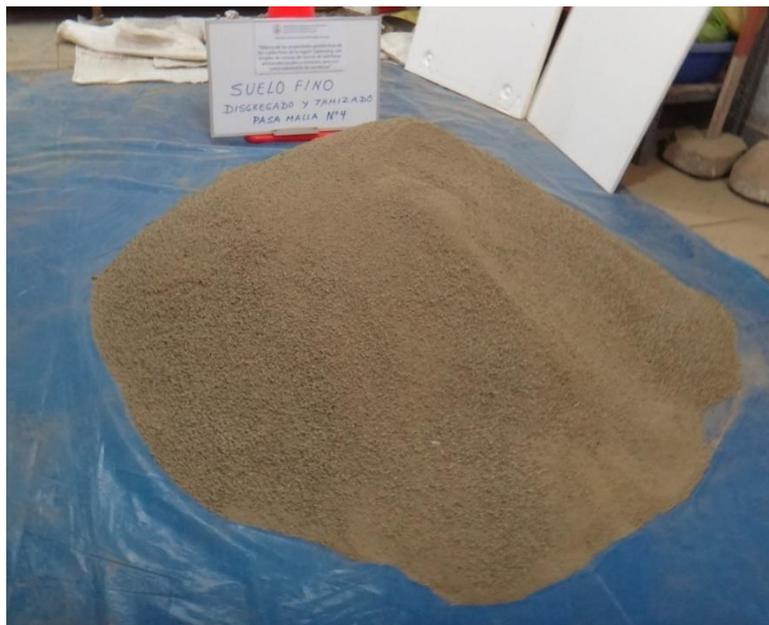


Figura 20. Muestra de suelo fino tamizada y homogeneizada.

4.1.2 Preparación de la ceniza de fondo

La ceniza de fondo presentó fragmentos aislados de carbón de hasta 2 pulgadas, algunos trozos frágiles se desintegraron fácilmente y los trozos más duros se retiraron con el tamizado, para la investigación se estandarizó el tamaño máximo tamizando el material por la malla 4. En la Figura 21 se presenta el material global proveniente de los hornos artesanales, la fracción gruesa que quedó retenida en el tamiz 4 y que fue retirada y el material que pasó el tamiz 4, esta fracción fue utilizada en la investigación. Finalmente, se procedió a mezclar toda la muestra de ceniza, se mezcló varias veces para homogeneizar el material y se colocó en sacos herméticos para prevenir cualquier tipo de contaminación y preservar su humedad.



Figura 21. Ceniza de granulometría completa que generan las ladrilleras.

4.1.3 Cemento

Se usó cemento Portland Tipo I de la marca Sol, producto comercial de uso general en el Perú que cumple especificaciones técnicas ASTM C150-07 (2012).



Figura 22. Cemento Portland Tipo I usado en la investigación.

4.2 Caracterización del suelo fino natural

4.2.1 Propiedades físicas del suelo natural

Tabla 11. Caracterización física del suelo fino natural

Característica	Valor
Contenido de grava, %	0
Contenido de arena, %	13.2
Finos, %	86.8
Límite líquido, %	64
Límite plástico, %	40
Índice plástico, %	24
Límite de contracción, %	32
Gravedad específica de sólidos	2.693
Clasificación SUCS	MH (Limo de alta plasticidad)
Clasificación AASHTO	A-7-5(27)
Máxima densidad seca (MDS), g/cm ³	1.610
Óptimo contenido de humedad (OCH), %	21.3

4.2.2 Propiedades químicas del suelo natural

En la tabla 13 se observa que la muestra de suelo natural no presenta minerales arcillosos.

Tabla 12. Caracterización química del suelo fino natural
Fuente: Registro LQU23-780-781 Laboratorio Químico FIC

Característica	Valor
Sales solubles totales, ppm	225
Sulfatos, SO ₄ ⁼ , ppm	99
Cloruros, Cl ⁻ , ppm	75
pH	7.06
Materia orgánica por ignición, %	1.37

Tabla 13. Análisis de composición química de la muestra de suelo natural.
Fuente: Informe 1291-23-LABICER

Parámetro	Resultado	Unidades	Método de Referencia
Óxido de silicio (Cuarzo), SiO ₂	43.78	%	
Oxalato de potasio, K ₂ C ₂ O ₄	17.24	%	
Silicato de aluminio y potasio (Sanidina), KAlSi ₃ O ₈	12.67	%	
Fosfato de aluminio, AlPO ₄	11.49	%	Difracción de
Óxido de hierro (magnetita), Fe ₃ O ₄	9.87	%	Rayos X
Hidrato de oxalato de cloruro de óxido de hierro y sodio, NaFe ₂ O(C ₂ O ₄) ₂ Cl ₂ (H ₂ O) ₄	3.81	%	
Óxido de hierro (hematita), Fe ₂ O ₃	1.13	%	

Tabla 14. Composición química de la muestra de suelo natural expresada en óxidos.
Fuente: Informe 1291-23-LABICER

Parámetro	Resultado	Unidades	Método de Referencia
Óxido de silicio, SiO ₂	50.636	%	
Óxido de aluminio, Al ₂ O ₃	33.335	%	
Óxido de hierro, Fe ₂ O ₃	9.618	%	
Óxido de magnesio, MgO	2.035	%	Espectrometría de fluorescencia de rayos X de energía dispersiva.
Óxido de potasio, K ₂ O	1.199	%	
Óxido de titanio, TiO ₂	1.044	%	
Óxido de calcio, CaO	0.850	%	
Óxido de azufre, SO ₃	0.662	%	

4.3 Caracterización de la ceniza de fondo

4.3.1 Propiedades físicas de la ceniza de fondo

Tabla 15. Caracterización física de la ceniza de fondo

Característica	Valor
Contenido de grava, %	0
Contenido de arena, %	69.9
Finos, %	30.1
Límite líquido, %	NP
Límite plástico, %	NP
Índice plástico, %	NP
Límite de contracción, %	NP
Gravedad específica de sólidos	2.448
Clasificación SUCS	SM (Arena limosa)
Clasificación AASHTO	A-2-4(0)

4.3.2 Propiedades químicas de la ceniza de fondo

Tabla 16. Caracterización de la ceniza de fondo.

Fuente: Registro LQU23-780-781 Laboratorio Químico FIC

Característica	Valor
Sales solubles totales, ppm	4587
Sulfatos, S04=, ppm	2673
Cloruros, Cl-, ppm	160
pH	6.94
Materia orgánica por ignición, %	0.98

Tabla 17. Análisis de composición química de la muestra de ceniza de fondo.

Fuente: Informe 1311-23-LABICER

Parámetro	Resultado	Unidades	Método de Referencia
Óxido de silicio (Cuarzo), SiO ₂	49.29	%	
Silicato de aluminio, calcio y sodio (Albita), Na _{0.685} Ca _{0.347} Al _{1.46} Si _{2.5408}	33.53	%	
Óxido de silicio y aluminio (Mullita), Al _{4.54} Si _{1.46} O _{9.73}	7.98	%	Difracción de Rayos X
Fosfato de aluminio, AlPO ₄	7.56	%	
Óxido de hierro (Hematita), Fe ₂ O ₃	1.36	%	
Hidróxido de silicato de hierro y magnesio, Fe _{6.5} Mg _{0.5} (Si ₈ O ₂₂ (OH) ₂)	0.28	%	

Según la tabla 17, se identifican los principales compuestos contaminantes presentes en la ceniza. La sílice cristalina (SiO_2), en su forma de polvo, es especialmente peligrosa, ya que puede causar silicosis y aumenta el riesgo de desarrollar cáncer de pulmón (Occupational Safety & Health Administration [OSHA], 2024). Adicionalmente, los fosfatos, como el AlPO_4 presente en la muestra, contribuyen a la eutrofización de los cuerpos de agua, lo que altera tanto los ecosistemas acuáticos como las propiedades del agua (Agencia de protección Ambiental de Estados Unidos [EPA], 2024). El empleo de la ceniza de fondo en la estabilización de suelos reduce significativamente la exposición de los trabajadores artesanales al riesgo asociado con la sílice cristalina, al tiempo que contribuiría a preservar los ecosistemas de ríos y quebradas, evitando su alteración.

Tabla 18. Composición química expresada en óxidos de la ceniza de fondo.

Fuente: Informe 1311-23-LABICER

Parámetro	Resultado	Unidades	Método de Referencia
Óxido de silicio, SiO_2	61.619	%	
Óxido de aluminio, Al_2O_3	29.089	%	
Óxido de hierro, Fe_2O_3	2.908	%	
Óxido de calcio, CaO	1.576	%	
Óxido de Azufre, SO_3	1.518	%	Espectrometría de fluorescencia de rayos X de energía dispersiva.
Óxido de titanio, TiO_2	1.035	%	
Óxido de zinc, ZnO	0.787	%	
Óxido de potasio, K_2O	0.718	%	
Óxido de fósforo, P_2O_5	0.326	%	
Óxido de plomo, PbO	0.301	%	

4.4 Caracterización del cemento Portland

A continuación, se muestra las propiedades físicas y químicas que presenta la ficha técnica del Cemento Sol Tipo I, utilizando en la investigación.

4.4.1 Propiedades físicas del cemento Portland

Tabla 19. Propiedades físicas del cemento Sol Tipo I

Fuente: Ficha técnica Cemento Sol Tipo I - Perú

Parámetro	Unidad	Contenido
Contenido de aire	%	7
Expansión autoclave	%	0.09
Superficie específica	m ² /kg	323
Densidad	g/cm ³	3.13
Resistencia a la compresión a 3 días	kg/cm ²	303
Resistencia a la compresión a 7 días	kg/cm ²	382
Resistencia a la compresión a 28 días	kg/cm ²	449

4.4.2 Propiedades químicas del cemento Portland

Tabla 20. Composición química del cemento Sol Tipo I

Fuente: Ficha técnica Cemento Sol Tipo I - Perú

Parámetro	%
Óxido de magnesio, MgO	2.9
Trióxido de azufre, SO ₃	2.8
Pérdida al fuego	2.2
Residuo insoluble	0.9
Silicato bicálcico, C ₂ S	12
Silicato tricálcico, C ₃ S	55
Aluminato tricálcico, C ₃ A	10
Ferroaluminato tetracálcico, C ₄ AF	10

4.5 Caracterización del carbón mineral

De acuerdo con la ASTM D388-19 (2019) el carbón mineral se clasifica con los parámetros de carbón fijo, materia volátil y poder calorífico. En la Tabla 21 y 22 se muestran los resultados de ensayos inmediatos realizados en el laboratorio de Espectrometría de la FIGMM-UNI.

4.5.1 Propiedades físicas del carbón mineral

Tabla 21. Propiedades físicas del carbón mineral.

Fuente: Laboratorio de Espectrometría FIGMM-UNI

Parámetros	Carbón antracítico
% Humedad	1.57
Poder calorífico Kcal/Kg	5010

4.5.2 Propiedades químicas del carbón mineral

Tabla 22. Propiedades químicas del carbón mineral.
Fuente: Laboratorio de Espectrometría FIGMM-UNI

Parámetros	Carbón antracítico
% Materia volátil	12.67
% Cenizas	42.33
% Carbono fijo	45.00
% S	0.14

4.6 Ensayos en las mezclas de suelo y ceniza

4.6.1 Protocolo de mezcla de suelo y ceniza.

Antes de realizar las mezclas de suelo y ceniza previamente preparadas según se indica en los ítems 4.1.1. y 4.1.2 , se determinó el contenido de humedad de cada material para realizar las correcciones necesarias en los pesos. Se pesó la cantidad requerida de suelo natural y ceniza de fondo para obtener dosificaciones de 10%, 15%, 20%, 25% y 30% de ceniza de fondo en relación con el peso total seco, luego se mezcló hasta lograr uniformidad en la combinación de suelo y ceniza. Para el uso en ensayos de compactación y CBR se determinó la humedad actual de la mezcla realizada, este dato se tomó en consideración para ajustar la cantidad de agua necesaria hasta alcanzar la humedad de compactación requerida.



Figura 23. Muestras de suelo y ceniza listas para la mezcla.

En la Tabla 23 se presentan las proporciones de suelo-ceniza de las mezclas y la nomenclatura asignada.

Tabla 23. Nomenclatura de las mezclas suelo-ceniza.

% Suelo	%Ceniza	Nomenclatura
100	0	SN
0	100	CF
90	10	90SN+10CF
85	15	85SN+15CF
80	20	80SN+20CF
75	25	75SN+25CF
70	30	70SN+30CF

4.6.2 Caracterización de las mezclas de suelo y ceniza

Los ensayos de laboratorio practicados sobre las muestras de suelo natural, ceniza de fondo y sus combinaciones obedecen a los procedimientos descritos en las normas de los capítulos 2.5, 2.6 y 2.7. A continuación, se muestran los resultados de los ensayos de caracterización física de las muestras y las mezclas suelo-ceniza.

Tabla 24. Granulometría de las mezclas de suelo y ceniza.

Muestra	SN	CF	Mezcla SN - CF				
Proporción suelo	100%	0%	90%	85%	80%	75%	70%
Proporción CF	0%	100%	10%	15%	20%	25%	30%
Porcentaje acumulado que pasa la malla (%)							
Nº4	100	100	100	100	100	100	100
Nº10	100	81	97.1	95.3	95.2	94.7	94.1
Nº20	98.6	63.7	94.4	91.8	90.7	89.5	88.6
Nº30	97.7	56.5	93.2	90.2	88.4	87.3	86.2
Nº40	96.6	49.8	91.5	88.3	85.9	84.5	83.3
Nº60	93.4	39.8	87.3	83.7	81.2	80.0	78.2
Nº100	90.2	34.1	84.2	79.8	77.2	76.1	74.5
Nº140	87.6	31.2	82.4	77.7	75.2	73.7	72.2
Nº200	86.8	30.1	81.5	76.7	74.2	72.6	71.0

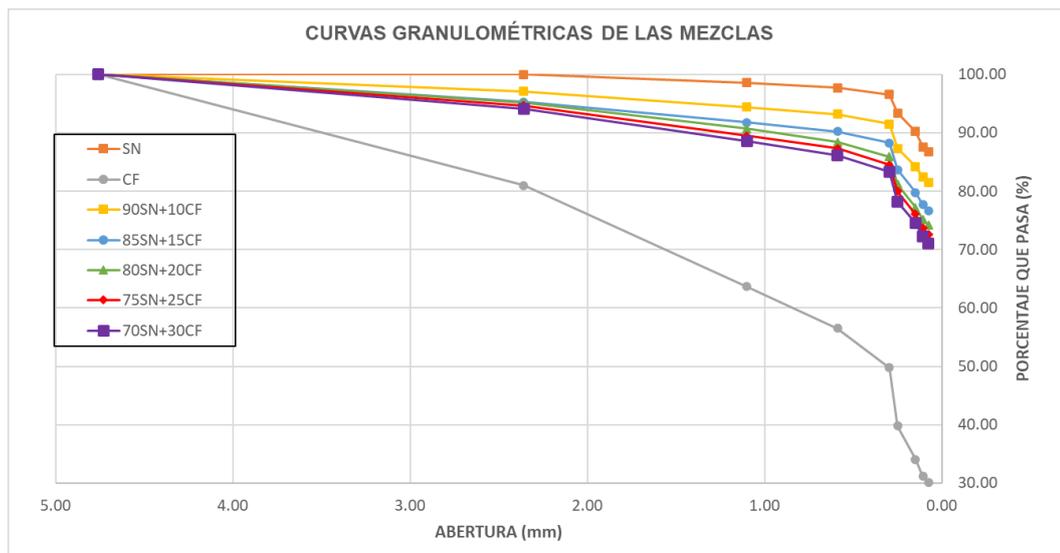


Figura 24. Análisis granulométrico de las muestras de suelo natural, CF y sus mezclas.



Figura 25. Ejecución de ensayo de análisis granulométrico.

Tabla 25. Gravedad específica de las mezclas suelo-ceniza.

Mezcla	Gs
SN	2.693
CF	2.448
90SN+10CF	2.686
85SN+15CF	2.665
80SN+20CF	2.644
75SN+25CF	2.622
70SN+30CF	2.602

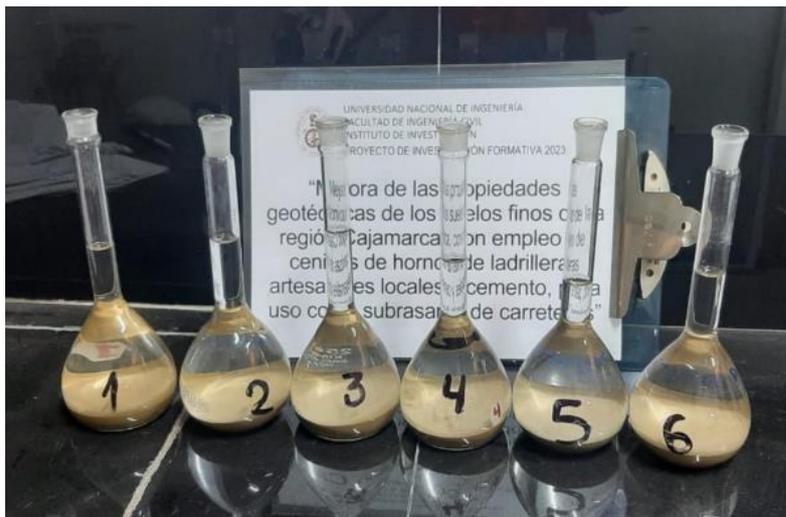


Figura 26. Ejecución de ensayo de gravedad específica.

Tabla 26. Límites de consistencia de las mezclas suelo-ceniza.

Mezcla	Límites	Valor (%)
SN	Límite Líquido	64
	Límite Plástico	40
	Límite de contracción	32
CF	Límite Líquido	No presenta
	Límite Plástico	No presenta
	Límite de contracción	No presenta
90SN+10CF	Límite Líquido	59
	Límite Plástico	38
	Límite de contracción	31
85SN+15CF	Límite Líquido	56
	Límite Plástico	38
	Límite de contracción	31
80SN+20CF	Límite Líquido	54
	Límite Plástico	38
	Límite de contracción	32
75SN+25CF	Límite Líquido	52
	Límite Plástico	37
	Límite de contracción	32
70SN+30CF	Límite Líquido	49
	Límite Plástico	36
	Límite de contracción	32



Figura 27. Ejecución de ensayo de límites de consistencia.

Tabla 27. Clasificación SUCS y AASHTO de las mezclas suelo-ceniza.

Mezcla	I.P	Clasificación de Suelos SUCS	Clasificación de Suelos AASHTO
SN	24%	MH	A-7-6
CF	No presenta	SM	A-2-4
90SN+10CF	21%	MH	A-7-6
85SN+15CF	18%	MH	A-7-6
80SN+20CF	16%	MH	A-7-6
75SN+25CF	15%	MH	A-7-6
70SN+30CF	13%	ML	A-7-6

4.6.3 Proctor modificado

A continuación, en la Tabla 28 se muestran los valores de óptimo contenido de humedad (OCH) y máxima densidad seca (MDS) de las muestras y las mezclas suelo-ceniza; en la Figura 28 se observa la tendencia de la variación del OCH y MDS.

Tabla 28. Valores de OCH y MDS de las mezclas suelo-ceniza.

	SN	SN + 10%CF	SN + 15%CF	SN + 20%CF	SN + 25%CF	SN + 30%CF
OCH (%)	21.30	20.60	20.30	20.00	19.50	19.00
MDS (gr/cm³)	1.61	1.606	1.596	1.588	1.567	1.559

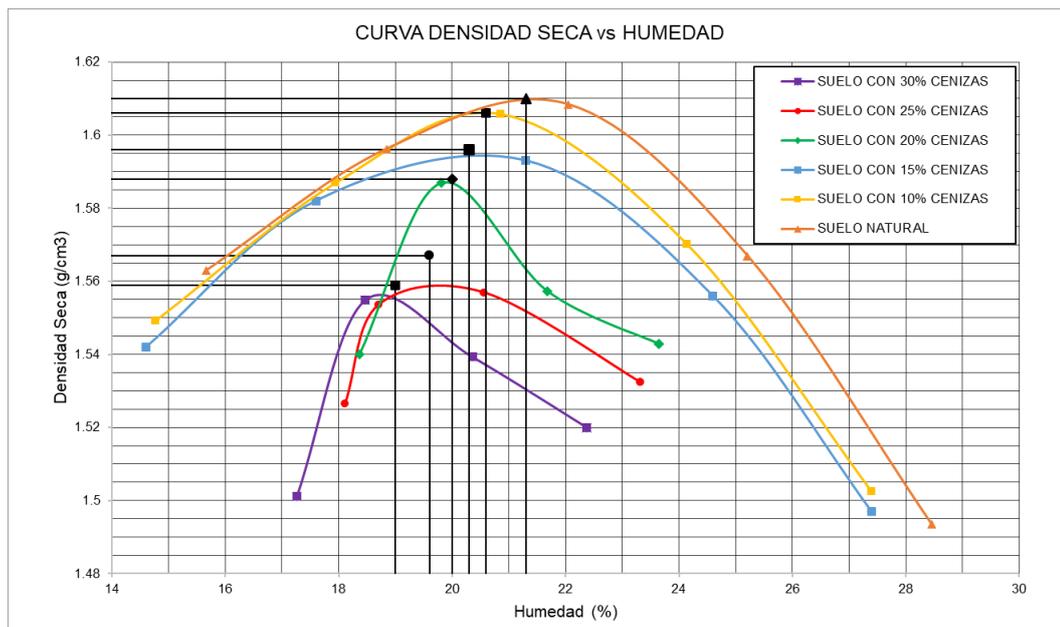


Figura 28. Curvas del ensayo Proctor modificado obtenidas para las mezclas ensayadas.



Figura 29. Compactación de mezcla para ensayo Proctor Modificado.

Los informes de los ensayos de caracterización física y mecánica de las diversas combinaciones de suelo y ceniza se presentan en el Anexo A.

En el Anexo B se presentan los informes de los ensayos de caracterización química realizados en el Laboratorio de Química FIC y el laboratorio de Espectrometría FIGMM; en el Anexo C se presentan los informes de los ensayos de fluorescencia y difracción rayos X realizado en el laboratorio LABICER de la Facultad de Ciencias de la Universidad Nacional de Ingeniería.

4.6.4 Ensayos CBR en las mezclas de suelo y ceniza

En la Tabla 29 se muestran los resultados de presión de los ensayos CBR realizados en el suelo natural y las mezclas suelo-ceniza, correspondiente al molde mayor energía compactados con 56 golpes por capa, y en la Figura 30 se muestran los gráficos respectivos.

Tabla 29. Valores de presión obtenidos del ensayo CBR para las mezclas suelo-ceniza.

Penetración (pulg)	Natural	SN + 10%CF	SN + 15%CF	SN + 20%CF	SN + 25%CF	SN + 30%CF
	Presión corregida	Presión corregida	Presión corregida	Presión corregida	Presión corregida	Presión corregida
	(Lb/pulg ²)	(Lb/pulg^{2})	(Lb/pulg^{2})	(Lb/pulg^{2})	(Lb/pulg^{2})	(Lb/pulg^{2})
0.000	0	0	0	0	0	0
0.025	8.08	9.50	6.61	7.64	5.83	5.83
0.050	13.22	14.00	11.75	13.08	13.08	11.27
0.075	16.89	18.40	17.00	18.52	20.33	18.52
0.100	20.56	22.00	22.30	25.77	25.77	25.77
0.125	23.50	24.95	25.65	33.03	33.03	33.93
0.150	26.44	27.90	29.00	40.28	40.28	42.09
0.175	29.37	30.85	33.00	45.72	48.44	52.07
0.200	32.31	33.80	37.00	51.16	56.60	62.04
0.300	43.33	43.30	49.20	67.48	81.99	94.68
0.400	54.34	51.40	60.95	80.18	101.94	125.51
0.500	64.62	58.70	70.50	92.87	120.07	145.46
CBR 0.1" 100%MDS	2.1%	2.2%	2.2%	2.6%	2.6%	2.6%
CBR 0.1" 95%MDS	2.0%	2.0%	2.0%	2.4%	2.5%	2.4%
CBR 0.2" 100%MDS	2.2%	2.3%	2.5%	3.4%	3.8%	4.1%
CBR 0.2" 95%MDS	2.1%	2.0%	2.1%	3.2%	3.5%	3.1%
Hinchamiento	9.9%	9.7%	8.7%	7.4%	6.5%	6.1%

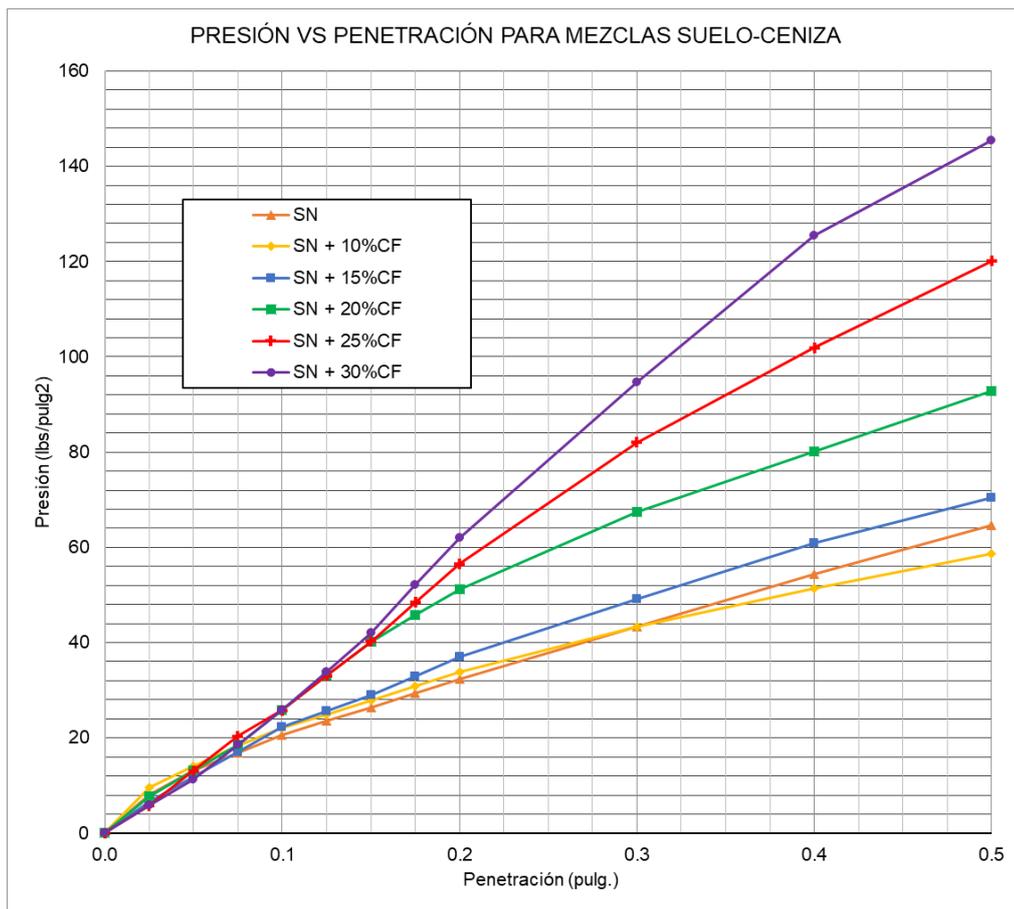


Figura 30. Curvas de Presión vs Penetración para las mezclas de suelo-ceniza sin adición de cemento.



Figura 31. Preparación y compactación de mezclas en moldes para ensayo CBR.



Figura 32. Corrido de los moldes tras 07 días de saturación.

4.7 Ensayos en mezclas de suelo, ceniza y cemento

4.7.1 Protocolo para incorporación del cemento en ensayos CBR

Después de mezclar el suelo y la ceniza siguiendo el procedimiento descrito en el ítem 4.6.1, se agregó el cemento en cantidad previamente establecida según la dosificación requerida, se mezcló completamente y se colocó en una bolsa hermética dejando reposar durante cuatro horas para permitir que la humedad entre el suelo, la ceniza y el cemento se uniformice. Luego, se colocó en una bandeja y se adicionó la cantidad necesaria de agua para alcanzar la humedad de compactación deseada, se mezcló completamente hasta obtener una humedad uniformemente distribuida.

Luego de aplicar la humedad de compactación se procedió a compactar los moldes CBR de acuerdo con el método ASTM D1883-21 (2021); a continuación, los moldes compactados se sometieron a la etapa de curado dejando reposar en un ambiente con temperatura controlada. En el caso de los ensayos realizados, los moldes se colocaron en bolsas herméticas para evitar la evaporación y se colocaron en contenedores plásticos herméticos sobre una capa de arena húmeda para mantener la humedad ambiental, como se muestra en la Figura 33.

La etapa de curado tuvo una duración de 7 días, en este lapso se permitió la hidratación del cemento presente en la mezcla.



Figura 33. Moldes CBR en etapa de curación.

Después de la etapa de curado, los moldes se llevaron a la etapa de saturación durante otros 7 días, como se ilustra en la Figura 34. Una vez completada la etapa de saturación, se procede con la penetración de los moldes de acuerdo con el procedimiento del ensayo CBR.



Figura 34. Moldes CBR en etapa de saturación.

4.7.2 Criterios para elección preliminar del contenido de cemento

Para definir la dosificación apropiada de cemento a incorporar en los ensayos CBR se realizó pruebas piloto con adición de diversos porcentajes, con los resultados que se obtuvieron y el propósito de la investigación se tuvo en cuenta lo siguiente:

- Con la adición de más de 4% de cemento el suelo mejorado mostró una alta rigidez y comportamiento típico de un suelo- cemento.
- El propósito de la adición de cemento fue usar una cantidad reducida y suficiente para que el suelo mejorado pueda usarse como subrasante.
- Se buscó un rango de mejora a una subrasante S2 a S5 (CBR>6%).
- Se consideró la adición de cemento en una cantidad máxima de 4%
- Se observó que el óptimo contenido de humedad (OCH) obtenido para las mezclas de suelo y ceniza no varió significativamente al adicionar el cemento.
- Se siguió las recomendaciones de los manuales de la PCA para suelos modificados con cemento (CMS) y se consideró un tiempo de 7 días de curado.

De acuerdo con estas consideraciones, se definió usar contenidos de cemento de 1%, 1,5%, 2% y 4%

4.7.3 Ensayos CBR en las mezclas de suelo, ceniza y cemento

En las tablas siguientes se presentan las presiones obtenidas en los moldes de mayor energía de los ensayos CBR, para las diversas combinaciones de suelo, ceniza y cemento en proporción de 1%, 1.5%, 2% y 4%.

Tabla 30. Valores de presión obtenidos del ensayo CBR para las mezclas suelo-ceniza y 1% de cemento.

Mezclas con adición de 1% cemento					
	SN	SN + 10%CF	SN + 15%CF	SN + 25%CF	SN + 30%CF
Penetración (pulg)	Presión corregida (Lb/pulg ²)				
0.000	0	0	0	0	0
0.025	11.02	17.20	16.89	11.13	22.40
0.050	22.03	35.40	36.72	26.23	46.00
0.075	34.51	56.20	58.75	48.48	80.60
0.100	46.26	72.30	91.10	107.40	157.70
0.125	55.08	85.00	104.28	104.11	160.00
0.150	63.89	101.00	118.96	132.72	198.00

0.175	71.96	112.00	134.38	158.94	240.00
0.200	77.84	123.20	149.40	198.20	299.10
0.250	90.00	145.00	158.00	210.00	327.60
0.300	101.34	165.20	165.96	229.67	359.00
0.400	115.29	190.00	180.65	255.10	410.00
0.500	132.18	205.90	202.00	288.48	451.70
<hr/>					
CBR 0.1”					
100%MDS	4.6%	7.2%	9.1%	10.7%	15.8%
CBR 0.1”					
95%MDS	3.9%	6.0%	7.7%	9.9%	14.1%
<hr/>					
CBR 0.2”					
100%MDS	5.2%	8.2%	10.0%	13.2%	19.9%
CBR 0.2”					
95%MDS	4.6%	6.8%	9.1%	12.0%	17.2%
<hr/>					
Hinchamiento	7.6%	6.2%	4.7%	4.1%	3.9%

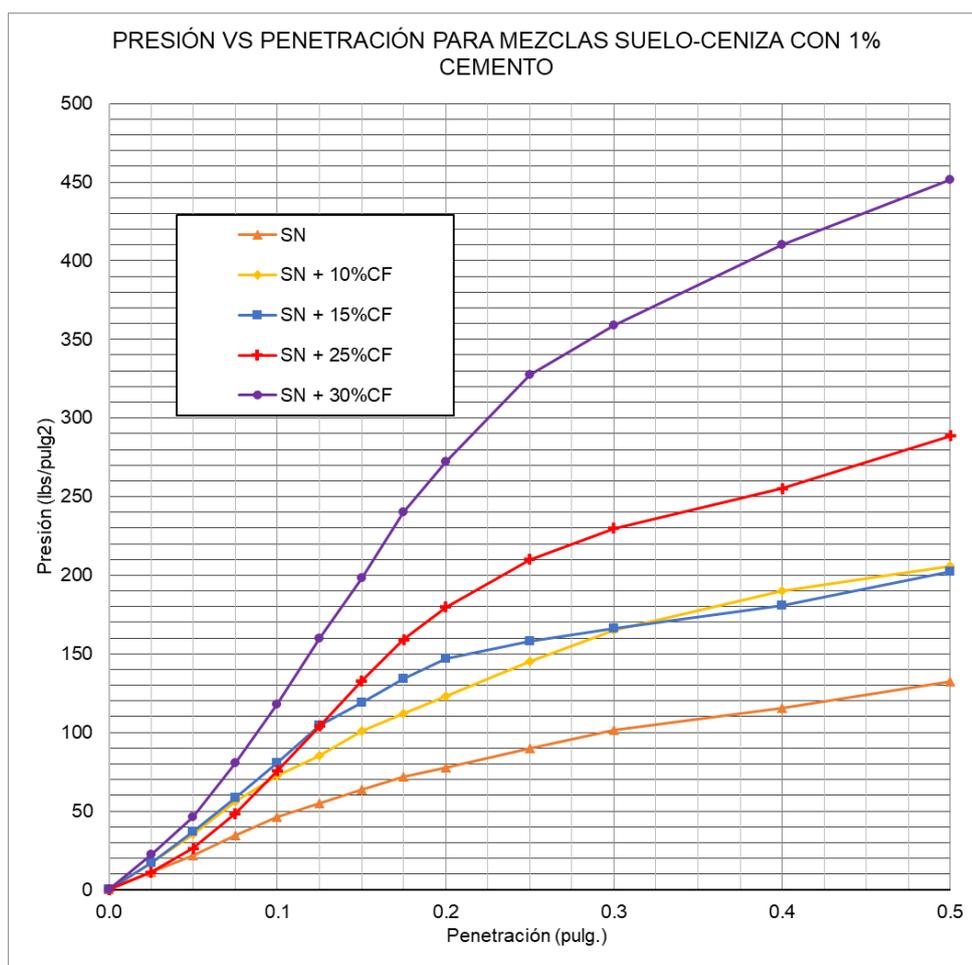


Figura 35. Curvas de Presión vs Penetración para las mezclas de suelo-ceniza con la adición de 1% de cemento.

Tabla 31. Valores de presión obtenidos del ensayo CBR para las mezclas suelo-ceniza y 1.5% de cemento.

Mezclas con adición de 1.5% cemento					
	SN	SN + 15%CF	SN + 20%CF	SN + 25%CF	SN + 30%CF
Penetración (pulg)	Presión corregida (Lb/pulg ²)				
0.000	0	0	0	0	0
0.025	5.00	19.83	33.05	90.00	155.00
0.050	16.00	64.62	105.74	300.00	350.00
0.075	30.00	119.70	193.13	464.10	620.00
0.100	98.00	168.90	317.20	640.00	950.00
0.125	80.00	212.22	351.75	819.52	1200.00
0.150	105.00	237.92	413.43	942.15	1350.00
0.175	123.00	255.55	442.07	1004.57	1420.00
0.200	160.90	263.63	470.80	1048.60	1470.00
0.250	165.00	275.00	470.00	1020.00	1480.00
0.300	172.00	284.19	478.79	888.50	1400.00
0.400	180.00	312.83	549.28	881.20	1350.00
0.500	190.00	317.23	648.42	881.20	1350.00
CBR 0.1" 100%MDS	9.8%	16.9%	31.7%	64.0%	95.0%
CBR 0.1" 95%MDS	7.5%	14.0%	25.6%	44.5%	72.0%
CBR 0.2" 100%MDS	10.7%	17.6%	31.4%	69.9%	98.0%
CBR 0.2" 95%MDS	9.2%	15.9%	25.1%	42.4%	71.0%
Hinchamiento	5.1%	3.9%	1.6%	0.8%	0.5%

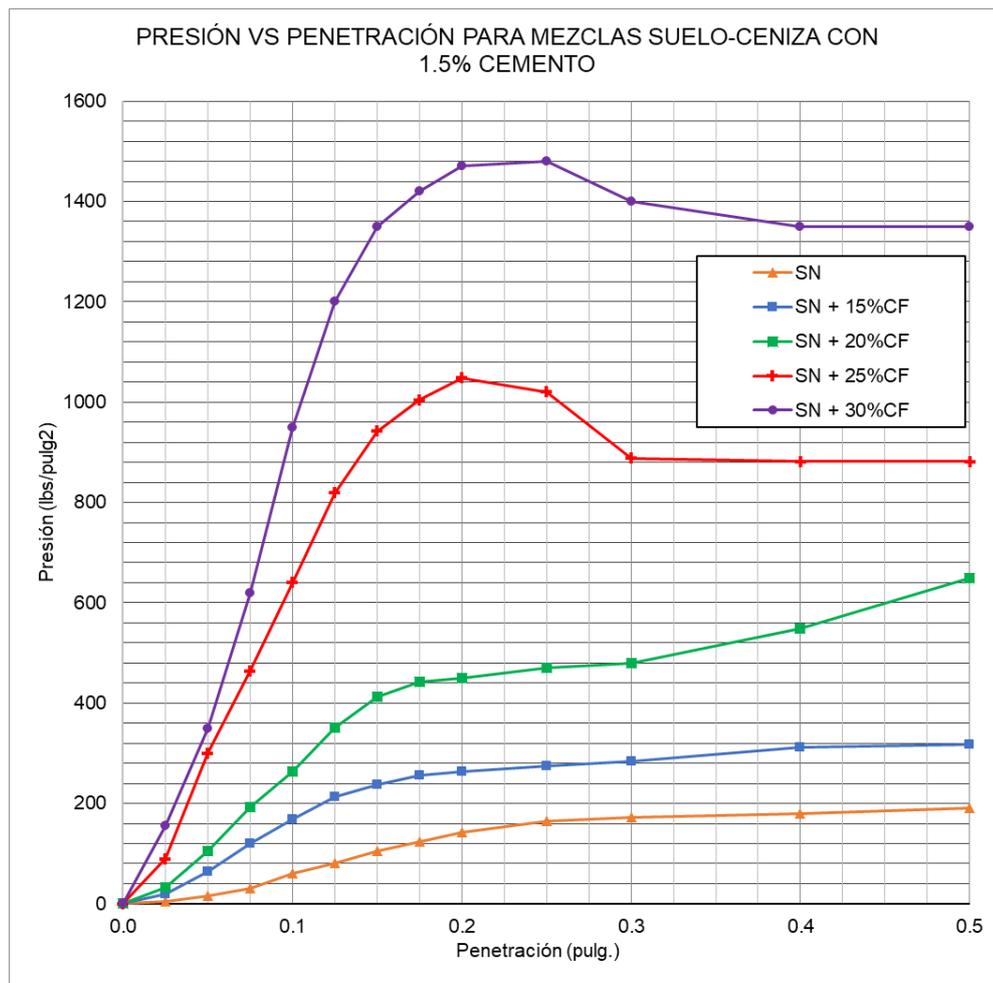


Figura 36. Curvas de Presión vs Penetración para las mezclas de suelo-ceniza con la adición de 1.5% de cemento.

Tabla 32. Valores de presión obtenidos del ensayo CBR para las mezclas suelo-ceniza y 2% de cemento.

Mezclas con adición de 2% cemento					
	SN	SN + 10%CF	SN + 15%CF	SN + 25%CF	SN + 30%CF
Penetración (pulg)	Presión corregida (Lb/pulg^{2})	Presión corregida (Lb/pulg^{2})	Presión corregida (Lb/pulg^{2})	Presión corregida (Lb/pulg^{2})	Presión corregida (Lb/pulg ²)
0.000	0	0	0	0	0
0.025	11.75	33.05	185.79	184.00	255.55
0.050	28.64	90.32	264.36	420.90	449.41
0.075	52.87	163.76	365.70	640.20	721.12
0.100	166.80	246.10	470.71	864.00	1100.00
0.125	132.18	268.77	552.22	1050.00	1291.69
0.150	176.24	308.42	628.59	1195.70	1476.01
0.175	202.68	365.70	660.90	1220.00	1527.41

0.200	260.30	385.60	673.80	1250.00	1468.67
0.250	260.00	393.00	710.00	1165.00	1400.00
0.300	284.19	375.98	751.22	1090.00	1268.93
0.400	316.50	366.43	848.89	1000.00	1268.93
0.500	347.34	366.43	966.38	1000.00	1268.93
<hr/>					
CBR 0.1"	16.7%	24.6%	47.1%	86.4%	110.0%
100%MDS					
CBR 0.1"	15.4%	17.2%	36.4%	59.0%	84.0%
95%MDS					
<hr/>					
CBR 0.2"	17.4%	25.7%	44.9%	83.3%	97.9%
100%MDS					
CBR 0.2"	14.8%	21.5%	37.6%	54.0%	75.0%
95%MDS					
<hr/>					
Hinchamiento	2.4%	1.6%	0.6%	0.2%	0.1%

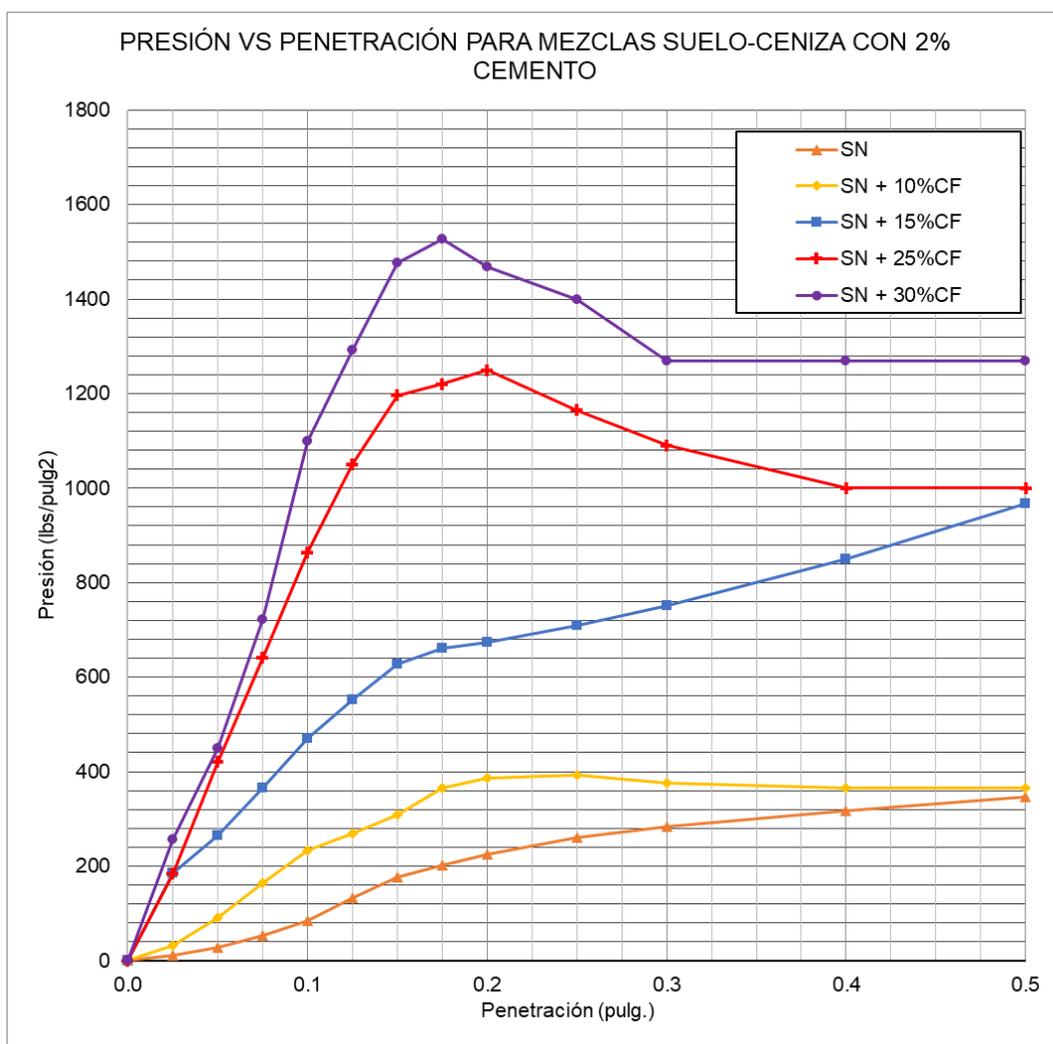


Figura 37. Curvas de Presión vs Penetración para las mezclas de suelo-ceniza con la adición de 2% de cemento.

Tabla 33. Valores de presión obtenidos del ensayo CBR para las mezclas suelo-ceniza y 4% de cemento.

Mezclas con adición de 4% cemento				
	SN	SN + 10%CF	SN + 15%CF	SN + 25%CF
Penetración (pulg)	Presión corregida (Lb/pulg ²)	Presión corregida (Lb/pulg ²)	Presión corregida (Lb/pulg ²)	Presión corregida (Lb/pulg ²)
0.000	0	0	0	0
0.025	284.92	230.00	356.15	505.22
0.050	519.91	530.00	691.01	778.39
0.075	740.21	820.00	923.79	1041.28
0.100	997.96	1098.00	1182.28	1290.96
0.125	1222.67	1480.00	1608.92	1478.21
0.150	1291.69	1650.00	1774.15	1760.93
0.175	1320.33	1790.00	1918.81	1966.54
0.200	1268.90	1720.00	1762.40	2044.40
0.250	1265.00	1580.00	1650.00	2210.00
0.300	1261.58	1470.00	1492.17	2191.25
0.400	1260.85	1400.00	1492.17	2100.00
0.500	1261.58	1400.00	1492.17	2100.00
CBR 0.1" 100%MDS	99.8%	109.8%	118.2%	129.1%
CBR 0.1" 95%MDS	87.4%	92.0%	96.6%	113.0%
CBR 0.2" 100%MDS	84.6%	114.7%	117.5%	136.3%
CBR 0.2" 95%MDS	69.5%	98.2%	100.6%	120.0%
Hinchamiento	0.2%	0.1%	0.1%	0%

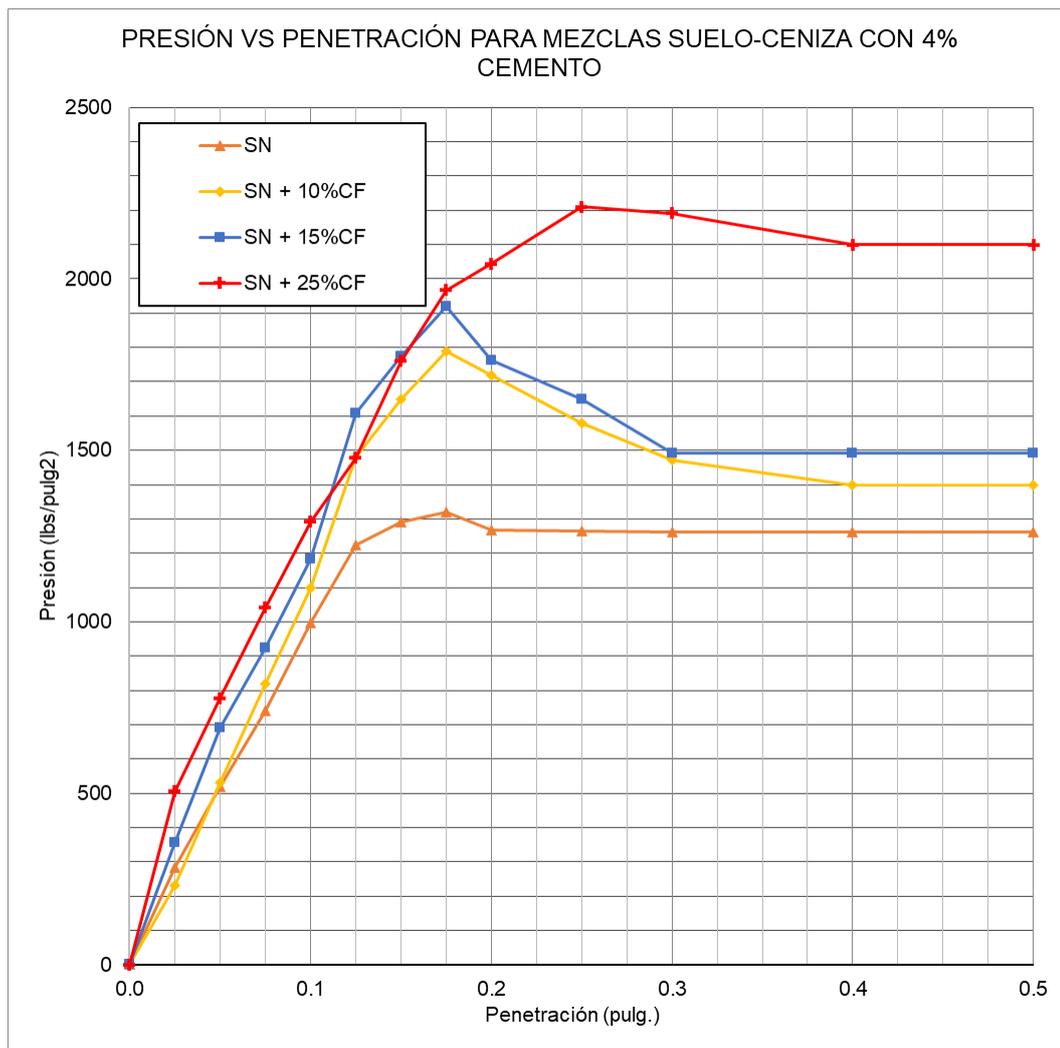


Figura 38. Curvas de Presión vs Penetración para las mezclas de suelo-ceniza con la adición de 4% de cemento.

Los informes de los ensayos CBR de las mezclas de suelo y ceniza, y de las mezclas de suelo, ceniza y cemento se presentan en los Anexos D y E respectivamente.

4.7.4 Características químicas y mineralógicas de la mezcla

A continuación, se muestra los resultados de los ensayos de fluorescencia y difracción rayos X para la mezcla de suelo con 20% de ceniza de fondo y 1.5% de cemento, como un ejemplo de combinación óptima, donde se obtuvo un buen resultado que alcanzó 25.6% de CBR al 95% de la MDS.

Tabla 34. Análisis de composición química de la mezcla suelo + 20% CF + 1.5% cemento.

Fuente: Informe 0212-24-LABICER

Parámetro	Resultado	Unidades	Método de Referencia
Óxido de silicio (cuarzo) SiO ₂	51.66	%	
Óxido de hierro (Hematita), Fe ₃ O ₃	1.69	%	
Óxido de silicio (cuarzo) SiO ₂	3.23	%	
Óxido de sodio, calcio, aluminio y silicio (Anortita), Ca ₂ .133Na1.867) (Si ₁₀ .003Al ₅ .987) O ₃₂	7.45	%	Difracción de Rayos X
Hidróxido de óxido de potasio, aluminio, hierro y silicio (Moscovita), KFe _{0.12} Al _{2.88} Si ₃ O ₁₀ (OH) ₂	29.32	%	
Hidróxido de óxido de aluminio y silicio (Caolinita), Al ₂ (Si ₂ O ₅ (OH) ₄)	6.64	%	

Tabla 35. Análisis de composición elemental de la mezcla suelo + 20% CF + 1.5% cemento.

Fuente: Informe 1311-24-LABICER

Parámetro	Resultado	Unidades	Método de Referencia
Silicio, Si	47.720	%	
Aluminio, Al	29.415	%	
Hierro, Fe	12.280	%	
Calcio, Ca	3.230	%	
Magnesio, Mg	2.199	%	
Potasio, K	1.867	%	
Titanio, Ti	1.363	%	Espectrometría de fluorescencia de rayos X de energía dispersiva
Azufre, S	0.798	%	
Zinc, Zn	0.346	%	
Fósforo, P	0.332	%	
Manganeso, Mn	0.295	%	
Estroncio, Sr	0.078	%	
Circonio, Zr	0.077	%	
Rubidio, Rb	0.001	%	

Tabla 36. Análisis de composición química expresada en óxidos de la muestra de la mezcla suelo + 20% CF + 1.5% cemento.

Parámetro	Resultado	Unidades	Método de Referencia
Óxido de silicio, SiO ₂	53.262	%	Espectrometría de fluorescencia de rayos X de energía dispersiva.
Óxido de aluminio, Al ₂ O ₃	28.996	%	
Óxido de hierro, Fe ₂ O ₃	9.16	%	
Óxido de calcio, CaO	2.358	%	
Óxido de magnesio, MgO	1.902	%	
Óxido de potasio, K ₂ O	1.173	%	
Óxido de titanio, TiO ₂	1.186	%	
Óxido de azufre, SO ₃	1.04	%	
Óxido de fósforo, P ₂ O ₅	0.225	%	
Óxido de zinc, ZnO	0.397	%	
Óxido de manganeso, MnO	0.199	%	
Óxido de zirconio, ZrO ₂	0.055	%	
Óxido de estroncio, SrO	0.048	%	
Óxido de rubidio, Rb ₂ O	0.001	%	

Capítulo IV: Análisis de resultados

5.1 Resultados de ensayos de caracterización física

En la Tabla 37 se presenta el resumen de los ensayos de caracterización física en el suelo natural, la ceniza de fondo, y en el suelo mejorado con 10%, 15%, 20%, 25% y 30% CF.

Tabla 37. Resultados de los ensayos de caracterización física de las muestras.

Muestra	CF	SN	Mezcla SN-CF				
	100%	0%	90%	85%	80%	75%	70%
Proporción suelo	100%	0%	10%	15%	20%	25%	30%
Proporción CF	0%	100%	10%	15%	20%	25%	30%
%grava	0	0	0	0	0	0	0
%arenas	69.9	13.2	18.5	23.3	25.8	27.4	29
%finos	30.1	86.8	81.5	76.7	74.2	72.6	71.0
Límite líquido (%)	NP	64	59	56	54	52	49
Límite plástico (%)	NP	40	38	38	38	37	36
Índice plástico (%)	NP	24	21	18	16	15	13
Límite de contracción (%)	NP	32	31	31	32	32	32
Índice de contracción (%)	NP	32	28	25	22	20	17
Clasificación SUCS	SM	MH	MH	MH	MH	MH	ML
Clasificación AASHTO	A-2-4(0)	A-7-5(27)	A-7-5(21)	A-7-5(17)	A-7-5(14)	A-7-5(13)	A-7-5(11)
Gravedad específica sólidos	2.448	2.693	2.686	2.665	2.644	2.622	2.602

Se observa que las mezclas de suelo-ceniza muestran una ligera reducción del contenido de finos pasante la malla 200 a medida que se aumenta la ceniza de fondo, el porcentaje de finos decrece de 86.8% del suelo natural a 71% con la adición de 30% de CF.

En la Figura 39 se observa una clara tendencia de disminución en el límite líquido e índice plástico del suelo natural con el incremento de la ceniza de fondo, esto se debe a las características no plásticas de la ceniza añadida, para la adición del 30% de CF el límite líquido se redujo en 15% y el índice plástico en 11%. La reducción de la plasticidad influye en una mejora en las propiedades físicas de la mezcla, ya que un menor índice de plasticidad implica un suelo menos deformable,

con menor sensibilidad a la humedad y de mejor comportamiento frente a las cargas del tráfico.

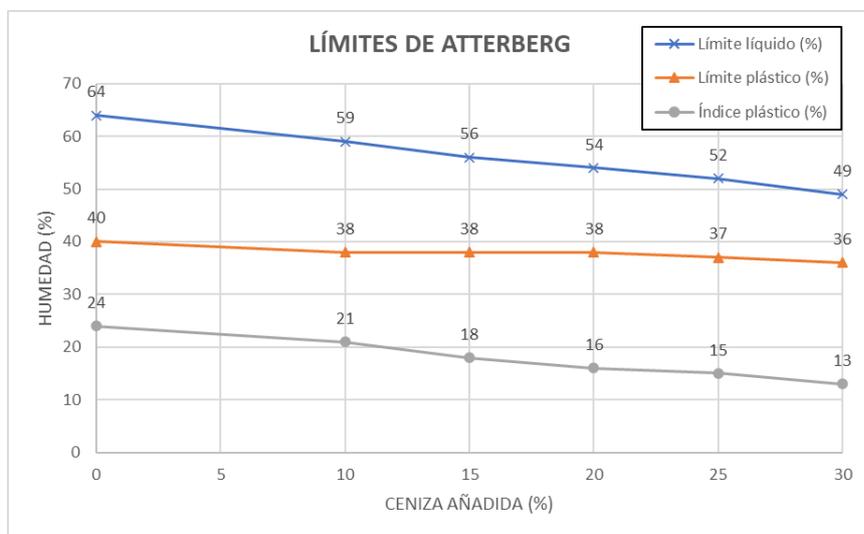


Figura 39. Variación de los límites de consistencia de las mezclas de suelo-ceniza.

El valor de límite de contracción no muestra cambios, pero en el índice de contracción se obtuvo una notable disminución con el incremento de CF a causa de la reducción del límite líquido, reduciendo el índice de contracción desde 32% para el suelo natural hasta 17% con la adición de 30% de CF tal como se observa en la Figura 40. La disminución en el índice de contracción implica menor susceptibilidad a los cambios volumétricos por contracción o expansión, lo que sugiere una mejora en las propiedades de la mezcla suelo-ceniza con el incremento de CF.

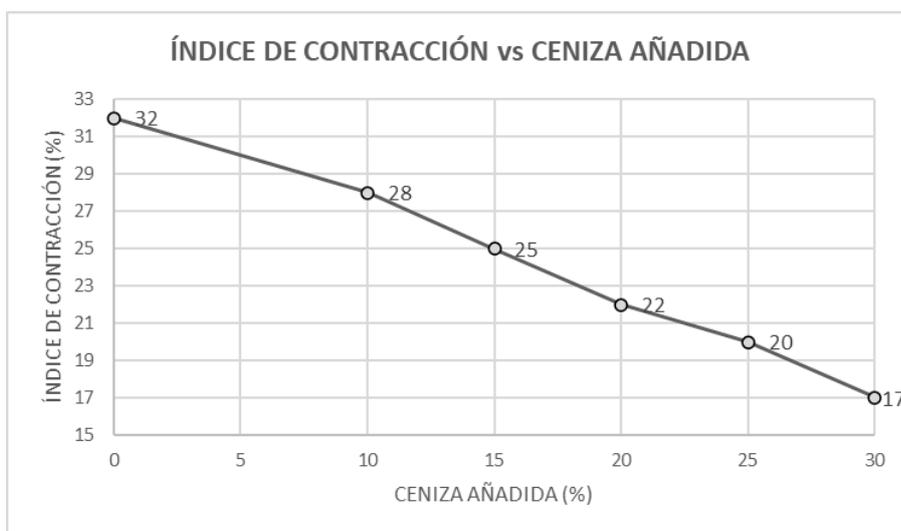


Figura 40. Variación del índice de contracción de las mezclas suelo-ceniza.

La gravedad específica de los sólidos (Gs) disminuye con la adición de ceniza de fondo, ya que el suelo natural presenta Gs 2.693 y la ceniza de fondo 2.448, a medida que se incrementa la cantidad de ceniza, la gravedad específica de la mezcla va disminuyendo en forma moderada hasta 2.602 para 30% CF, tal como muestra la Figura 41.

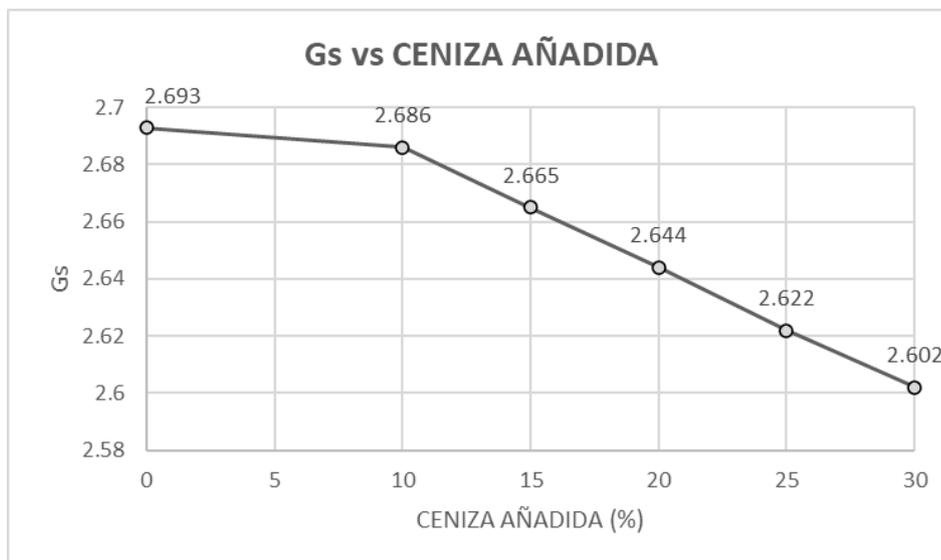


Figura 41. Índice de contracción de las muestras de suelo natural y ceniza de fondo.

5.2 Resultados de ensayo Proctor Modificado

En la Tabla 38 se presenta los resultados del ensayo Proctor modificado, se obtuvo una reducción ligera en la máxima densidad seca (MDS) con el incremento del porcentaje de ceniza, mientras que la variación en el óptimo contenido de humedad (OCH) muestra una reducción baja.

Tabla 38. Resultados de los ensayos proctor de las muestras.

Muestra	CF	SN	Mezcla SN - CF				
Proporción suelo	100%	0%	90%	85%	80%	75%	70%
Proporción CF	0%	100%	10%	15%	20%	25%	30%
OCH (%)	-	21.3	20.6	20.3	20.3	19.6	19.0
MDS (gr/cm ³)	-	1.610	1.606	1.596	1.588	1.567	1.559

La Figura 42 muestra la tendencia en la reducción de la MDS con el incremento de la CF debido a la influencia de la baja gravedad específica de la ceniza en la mezcla suelo-ceniza, desde 1.61gr/cm³ para el suelo natural hasta 1.559gr/cm³ para la mezcla con 30% de CF. En la Figura 43 se visualiza la reducción del OCH

a medida que aumenta la cantidad de ceniza, este comportamiento es compatible con la reducción de la plasticidad y el contenido de finos con el incremento de CF.

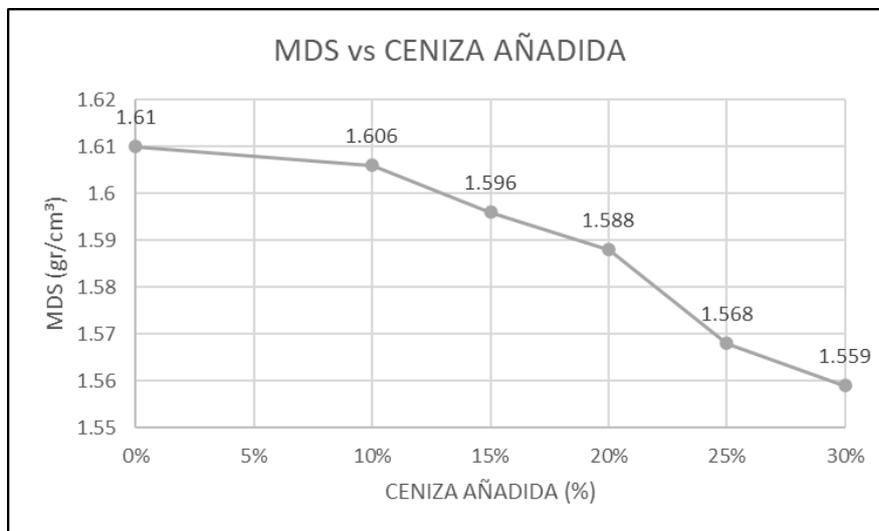


Figura 42. Variación de la MDS de las mezclas suelo-ceniza.

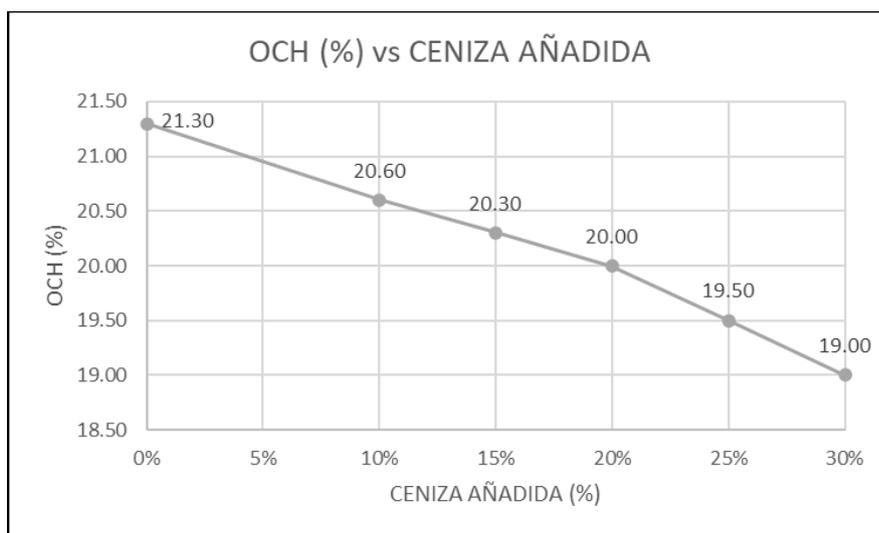


Figura 43. Variación del OCH de las mezclas suelo-ceniza.

5.3 Resultados de ensayos CBR

5.3.1 CBR de suelo y ceniza

En la Tabla 39 y Figura 44 se observa que la adición de ceniza de fondo por sí sola no es muy útil para mejorar el CBR de la mezcla suelo-ceniza ya que este no logra elevar significativamente el CBR y tampoco se alcanza la categoría S2 de subrasantes adecuadas.

Tabla 39. Resultados de los ensayos CBR de las mezclas suelo-ceniza.

Suelo %	CF %	CBR 100% MDS %	CBR 95% MDS %	Hinchamiento %
100	0	2.1	2.0	9.9
90	10	2.2	2.0	9.7
85	15	2.2	2.0	8.7
80	20	2.6	2.4	7.4
75	25	2.6	2.5	6.5
70	30	2.6	2.4	6.1

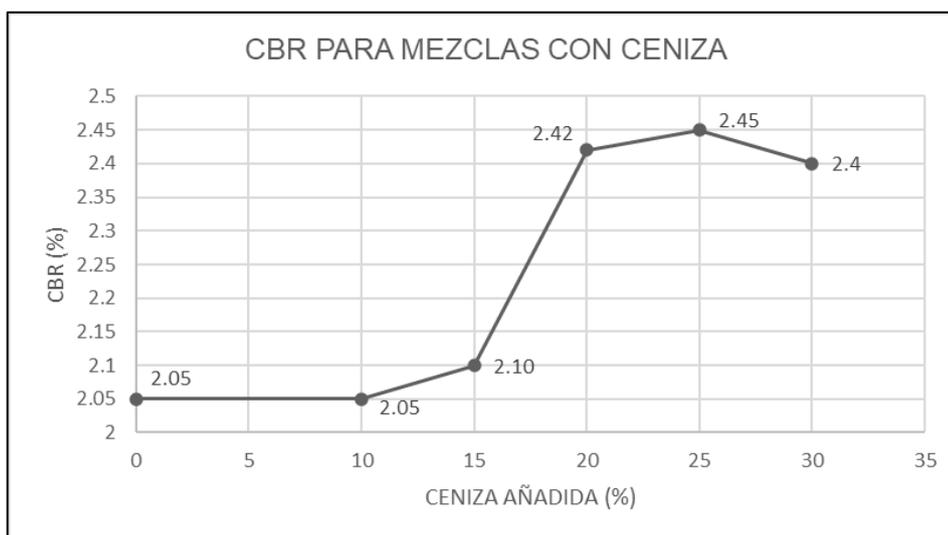


Figura 44. Comportamiento del CBR añadiendo ceniza de fondo al suelo natural.

5.3.2 CBR de suelo, ceniza y cemento

Al añadir una pequeña cantidad de cemento se activan las propiedades puzolánicas que potencian el efecto conjunto del cemento y la ceniza, lo que aumenta significativamente el CBR de la mezcla suelo-ceniza-cemento. Con la adición del 1% de cemento y el 10% de ceniza, se cumple el valor mínimo requerido del 6% para el CBR. Posteriormente, la adición en mayores proporciones en conjunto supera ampliamente este valor mínimo.

Tabla 40. Resultados de los ensayos CBR para las mezclas suelo-ceniza-cemento.

Suelo %	CF %	CBR 100% MDS %	CBR 95% MDS %	Hinchamiento %
1% cemento				
100	0	4.6	3.9	7.6
90	10	7.2	6.0	6.2
85	15	9.1	7.7	4.7
75	25	10.7	9.9	4.1
70	30	15.8	14.1	3.9
1.5% cemento				
100	0	9.8	7.5	5.1
85	15	16.9	13.7	3.9
80	20	31.7	25.6	1.6
75	25	64.0	44.5	0.8
70	30	95.0	72.0	0.5

2% cemento				
100	0	16.7	15.4	2.4
90	10	24.6	17.2	1.6
85	15	47.1	36.4	0.6
75	25	86.4	59.0	0.2
70	30	110.0	84.0	0.1
4% cemento				
100	0	99.8	87.4	0.2
90	10	109.8	90.2	0.1
85	15	118.2	96.6	0.1
75	25	129.1	108.4	0

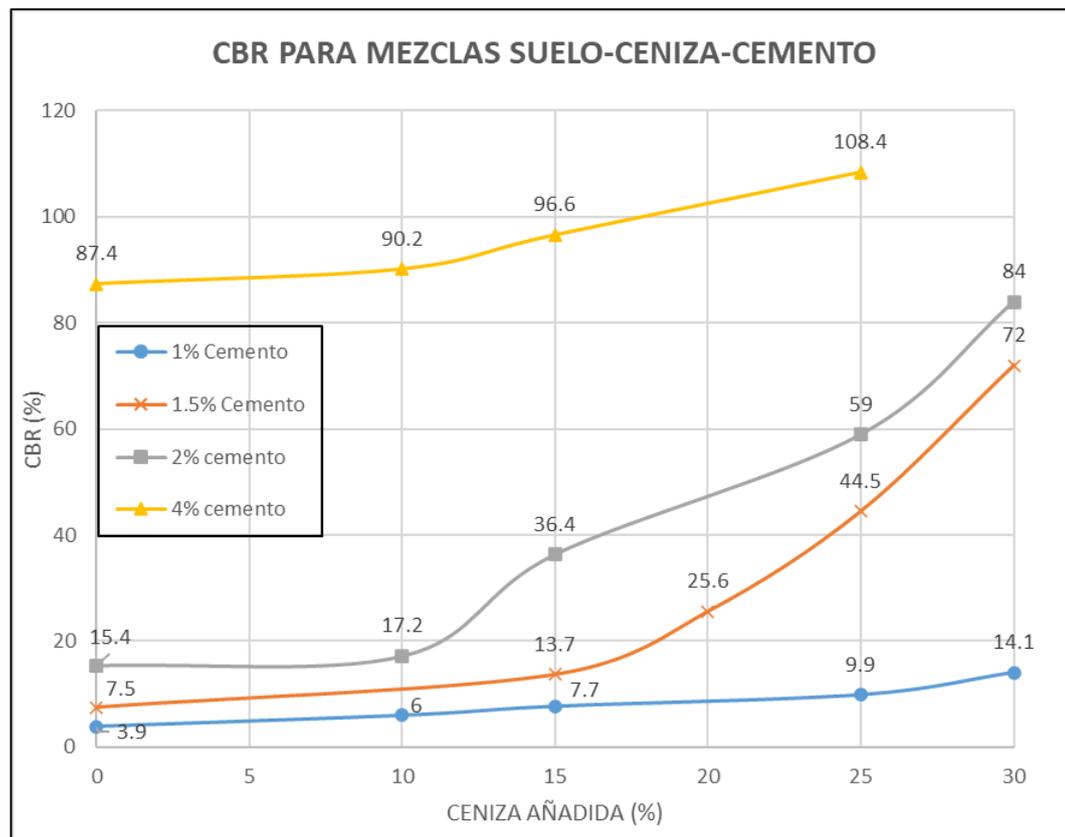


Figura 45. Comportamiento del CBR al 95%MDS con la adición de cemento.

5.4 Acción puzolánica

De acuerdo con la Tabla 3, se entiende que los componentes SiO₂, Al₂O₃ y FeO₃ tienen una mayor incidencia en las propiedades puzolánicas de un material, teniendo en la ceniza de fondo un porcentaje de 93.616% en suma, superior al 70% requerido por la una puzolana natural calcinada (N). Esto significa que químicamente la ceniza de fondo proveniente de carbón mineral si cumple las propiedades químicas de una puzolana, lo cual también se ve reflejado en el comportamiento de la mezcla suelo-ceniza-cemento.

Tabla 41. Análisis de composición química expresada en óxidos.

Fuente: Informe 1311-23-LABICER.

Parámetro	Resultado	Unidades
Óxido de silicio, SiO ₂	53.262	%
Óxido de aluminio, Al ₂ O ₃	28.996	%
Óxido de hierro, Fe ₂ O ₃	9.16	%

A pesar de no haber obtenido resultados favorables en el ensayo CBR con la mezcla de suelo y ceniza, se lograron resultados excelentes al añadir cemento, cuyos efectos fueron aún más intensificados con la mayor adición de CF. Esto sugiere que, durante la hidratación del cemento, se liberó hidróxido de calcio (Ca(OH)₂), el cual reaccionó con el óxido de sílice (SiO₂) y la alúmina (Al₂O₃) amorfa presentes en la ceniza. Estas reacciones formaron compuestos cementantes como el silicato de calcio hidratado (C-S-H) y el aluminato de calcio hidratado (C-A-H), los cuales aumentaron la resistencia al unir las partículas del suelo y rellenar los vacíos.

5.5 Discusión de las dosificaciones a usar

La dosificación mínima que cumple la condición de una subrasante categoría S2 se da con la adición de 1% de cemento y 10% de ceniza ya que se obtiene 6% de CBR al 95% de la MDS.

Con la adición de 1.5% de cemento y 15% de ceniza se logra una subrasante categoría S3, llegando a 14% de CBR al 95% de la MDS. Sucesivamente, adicionando 20% de ceniza se logra alcanzar la subrasante categoría S4, llegando a 25.6% de CBR al 95% de la MDS.

Utilizando únicamente 1.5% de cemento y 25% de ceniza o 2% de cemento y 15% de ceniza se logra la excelencia y se alcanza la categoría S5, superando así el 30% de CBR al 95% de la MDS.

Con 4% de cemento el material mostró alta resistencia, se obtuvo CBR mayores de 100% y un comportamiento asociado a los suelos estabilizados con cemento (CSS).

5.6 Análisis económico y viabilidad de uso de ceniza de fondo en Cajamarca
Se comparó la diferencia económica de usar únicamente cemento como aditivo estabilizador versus la combinación cemento y ceniza de fondo. Para ello se utilizaron dos dosificaciones que obtuvieron resultados similares y alcanzaron el rango de subrasante S3, 2% cemento y 1% de cemento con 30% de CF, los cuales alcanzaron los valores de 15.4% y 14.8% de CBR respectivamente al 95% de la MDS. En el anexo F se presentan los cálculos realizados.

Para el análisis se consideró a la CF como un desperdicio, cuyo precio de venta actual es cero. Adicionalmente, se consideró que la estabilización se realizaría en 0.3m de profundidad para una trocha de 5m de ancho y 1km de largo que equivale a 1500m³ de volumen estabilizado.

5.6.1 Estimación de costos

Los costos presentados son estimaciones referenciales basadas en el mercado actual de Cajamarca, Perú.

El costo de la bolsa de cemento Sol Portland Tipo I de 45 es de S/30.00.

El costo de alquiler por hora de 01 volquete de 15m³ es de \$23.0.

El consumo de combustible por hora de 01 volquete de 15m³ es de 4 galones.

El costo del galón de combustible es de S/16.0.

El costo horario de un operario de equipo pesado de acuerdo con las tablas salariales CAPECO 2024-2025 es de S/29.31.

El costo por uso de agua y compactación son menores debido a los valores del OCH y MDS inferiores cuando la mezcla incluye 30% de CF; sin embargo, estos deben ser analizados en campo. Para efectos de investigación y comparación, el costo por flete (Volquetes, operarios y combustible) son brindados por la entidad municipal a cargo de la estabilización, por ende, la variación en costo comparativo es de S/0.00. Asimismo, la variación en costo de compactación y uso de agua será despreciado.

5.6.2 Comparación de costos

De acuerdo con el anexo F, se observa que utilizando 2% de cemento se invertiría en materiales un total de S/16,666.60 y usando 1% de cemento con 30% CF se invertiría S/8,009.93 por cada kilómetro estabilizado.

Cabe mencionar que el análisis presentado sería el caso típico para el uso de CF, ya que se está considerando que el costo de operador, volquete y combustible es asumido por la entidad gubernamental encargada de la estabilización debido a que estas cuentan con recursos propios como maquinaria pesada, volquetes y operadores contratados.

Entonces se puede observar que usando CF y cemento se puede alcanzar una reducción en costo de 51.9% en materiales para la estabilización de trochas.

Conclusiones

Se estudió la mejora de las propiedades geotécnicas de un suelo fino de la región Cajamarca clasificado como A-7-5 (27), el suelo es un material pobre con 2% de CBR que no es apto para uso como subrasante, para su mejora se consideró un tratamiento con adición de ceniza de fondo proveniente de ladrilleras locales y cemento, se empleó el ensayo CBR con el objetivo de alcanzar valores superiores al 6% del CBR medido al 95% de la MDS, y 0.1 pulgada de penetración, conforme a las especificaciones técnicas peruanas para suelos de subrasante.

En la primera etapa de la investigación se adicionó exclusivamente la ceniza de fondo en proporciones de 10%, 15%, 20%, 25% y 30% en peso, en la mezcla se realizó ensayos de caracterización física y mecánica. Los resultados mostraron mejora en las propiedades físicas al reducirse la plasticidad, contenido de finos y óptimo contenido de humedad; sin embargo, se obtuvo una disminución de la máxima densidad seca en cuanto mayor era la proporción de ceniza de fondo por ser un material liviano.

Los resultados de los ensayos CBR con ceniza de fondo como único aditivo no mostró aumento significativo en la resistencia; es así como para el mayor contenido de 30% de ceniza de fondo el valor CBR solo aumentó de 2.0% a 2.4%, valor insuficiente que no cumplió el requerimiento mínimo.

En la segunda etapa de la investigación se agregó el cemento como aditivo secundario y se obtuvo resultados satisfactorios, una cantidad reducida de cemento propició la reacción puzolánica con la ceniza de fondo causando un aumento significativo de la resistencia del suelo. En todas las dosificaciones de cemento estudiadas el CBR aumentó proporcionalmente al contenido de ceniza de fondo, lo que demuestra la afinidad entre ambos aditivos.

Con un 1% de cemento y 10% de ceniza se alcanzó un CBR de 6.0% cumpliendo con la resistencia mínima requerida, a medida que se aumentó el contenido de ceniza también aumentó el CBR, es así como con 30% de ceniza y 1% de cemento el CBR aumentó a 14.1%. Asimismo, con la inclusión en mayor porcentaje de

aditivos, el CBR fue aumentando proporcionalmente logrando obtener categorías de subrasante “buena, muy buena y excelente”.

La expansión medida en el ensayo CBR se redujo con el contenido de ceniza y cemento; en el suelo natural sin aditivos se registró una expansión de 9.9%; en el suelo con adición de 30% ceniza se redujo hasta 6%; la reducción fue mayor cuando se combinó con cemento, con 2% de cemento se obtuvo expansiones menores de 1%, mientras que con 4% de cemento prácticamente se anuló, mostrando así la eficacia de esta combinación en la estabilización del suelo.

El uso de la ceniza de fondo es una alternativa sustentable para la región Cajamarca, donde se ubican localidades rurales con falta de controles en la eliminación de los residuos de actividades artesanales, la presente investigación promueve su utilización en la construcción de caminos rurales permitiendo reutilizar desechos y aminorar costos; esta alternativa puede replicarse en otras regiones del Perú con características similares.

Recomendaciones

Se recomienda ampliar la investigación a otros tipos de suelos finos de Cajamarca, como arcilla y limos de baja plasticidad, teniendo en cuenta que las propiedades índices pueden influir en las dosificaciones de los aditivos.

Estudiar la influencia del tipo de ceniza de fondo, para lo cual se puede ampliar la investigación utilizando cenizas de fondo de otros orígenes y tipos de carbón.

Investigar el uso de otros residuos como aditivos para el mejoramiento de suelo, tales como residuos de actividades industriales, agrícolas, etc., con lo cual se reducirá la contaminación y se contribuirá con la sostenibilidad ambiental.

Para el ensayo de nuevos aditivos estabilizantes, se recomienda emplearlos en combinación de estabilizantes ya conocidos para evaluar su acción conjunta.

Referencias

American Association of State Highway and Transportation Officials. (2021). *Standard Specification for Classification of Soils and Soil-Aggregate Mixtures for Highway Construction Purposes (M 145-91)*.

American Society for Testing and Materials. (2012). *Standard Specification for Portland Cement (ASTM C150-07)*.
<https://www.astm.org/standards/c150>

American Society for Testing and Materials. (2018). *Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils (ASTM D4318-17)*.
<https://www.astm.org/d4318-17.html>

American Society for Testing and Materials. (2019). *Standard classification of coals by rank (ASTM D388-19)*.
<https://www.astm.org/d0388-19.html>

American Society for Testing and Materials. (2019). *Standard Test Methods for Laboratory Determination of Water (Moisture) Content of Soil and Rock by Mass (ASTM D2216-19)*.
<https://www.astm.org/d2216-19.html>

American Society for Testing and Materials. (2019). *Standard Test Method for Analysis of Ni-Base Alloys by Wavelength Dispersive X-Ray Fluorescence Spectrometry (ASTM E2465-13)*.
<https://www.astm.org/e2465-13.html>

American Society for Testing and Materials. (2020). *Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System) (ASTM D2487-17)*.
<https://www.astm.org/d2487-17.html>

American Society for Testing and Materials. (2021). *Standard Test Method for California Bearing Ratio (CBR) of Laboratory-Compacted Soils (ASTM D1883-21)*.
<https://www.astm.org/d1883-21.html>

American Society for Testing and Materials. (2021). *Standard Test Methods for Particle-Size Distribution (Gradation) of Soils Using Sieve Analysis (ASTM D6913/D6913M-17)*.
https://www.astm.org/d6913_d6913m-17.html

- American Society for Testing and Materials. (2021). *Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Modified Effort (56,000 ft-lbf/ft³ [2,700 kN-m/m³])* (ASTM D1557-12).
<https://www.astm.org/d1557-12.html>
- American Society for Testing and Materials. (2023). *Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete* (ASTM C618-22).
<https://www.astm.org/c0618-22.html>
- American Society for Testing and Materials. (2023). *Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer* (ASTM D854-14).
<https://www.astm.org/d0854-14.html>
- American Society for Testing and Materials. (2024). *Standard Test Method for Shrinkage Factors of Cohesive Soils by the Water Submersion Method* (ASTM D4943-18).
<https://www.astm.org/d4943-18.html>
- Basha, E. A., Hashim, R., Mahmud, H. B., & Muntohar, A. S. (2005). Stabilization of residual soil with rice husk ash and cement. *Construction and Building Materials*, 19(6), 448-453.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2004.08.001>
- Bunaciu, A., Udristioiu, E., & Aboul-Enein, H. (2015). X-Ray Diffraction: Instrumentation and Applications. *Critical Reviews in Analytical Chemistry*, 45(4), 289-299.
<https://doi.org/10.1080/10408347.2014.949616>
- Craig, R. F. (2004). *Soil Mechanics* (7th ed.). Spon Press.
- Das, B. M., & Sobhan, K. (2017). *Principles of geotechnical engineering* (9th ed.). Cengage Learning.
- Environmental Protection Agency. (2024). Contaminación por nutrientes.
<https://espanol.epa.gov/espanol/contaminacion-por-nutrientes>
- Ghosh, A., & Subbarao, C. (2007). Strength Characteristics of Class F Fly Ash Modified with Lime and Gypsum. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 133(7), 757-766.
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2007\)133:7\(757\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2007)133:7(757))

- Gross, J., & Adaska, W. (2020). *Guide to Cement-Stabilized Subgrade Soils*. Portland Cement Association and National Concrete Pavement Technology Center.
- Huang, Y. H. (2017). *Pavement Analysis and Design* (3rd ed.). Pearson Education.
- Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico. (2000). Carbón en el Perú.
<https://hdl.handle.net/20.500.12544/234>
- Instituto Nacional de Estadística e Informática. (2018). Perú: Perfil Sociodemográfico, 2017.
https://www.inei.gob.pe/media/MenuRecursivo/publicaciones_digita/es/Est/Lib1539/libro.pdf
- Kosmatka, S. H., & Wilson, M. L. (2016). *Design and Control of Concrete Mixtures* (16th ed.). Portland Cement Association.
<https://www.cement.org/Learn/concrete-technology/concrete-design-production/design-and-control-mixtures-landing-page/sell-sheet---design-and-control-of-concrete-mixtures-landing-page>
- López, J. (2021). *Estabilización de suelos arcillosos aplicando ceniza de cáscara de arroz para el mejoramiento de subrasante, en la localidad de Moyobamba* [Tesis de pregrado, Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas].
<https://repositorioacademico.upc.edu.pe/handle/10757/654616>
- Mehta, P., & Monteiro, P. (2014). *Concrete: Microstructure, Properties, and Materials* (4th ed.). McGraw-Hill Education.
- Mercadeando S.A. (2012). *Diagnóstico Nacional del Sector Ladrillero Artesanal*.
- Ministerio de Transportes y Comunicaciones. (2014). Manual de Carreteras - "Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos" Sección Suelos y Pavimentos.
https://portal.mtc.gob.pe/transportes/caminos/normas_carreteras/MTC%20NORMAS/ARCH_PDF/MAN_7%20SGGP-2014.pdf
- Ministerio de Transportes y Comunicaciones. (2016). Manual de Ensayo de Materiales.
https://portal.mtc.gob.pe/transportes/caminos/normas_carreteras/documentos/manuales/Manual%20Ensayo%20de%20Materiales.pdf

- Mitchell, J. K., & Soga, K. (2005). *Fundamentals of soil behavior* (3rd ed.). John Wiley & Sons.
- Occupational Safety and Health Administration (OSHA). (2021). Peligros de Sílice en Construcción.
<https://www.osha.gov/sites/default/files/2021-05/Student%20Workbook%20%28Spanish%29.pdf>
- Osinubi, K. J. (2000). Stabilisation of Tropical Black Clay with Cement and Pulverised Coal Bottom Ash Admixture. *Advances in Unsaturated Geotechnics*.
[https://doi.org/10.1061/40510\(287\)20](https://doi.org/10.1061/40510(287)20)
- Oyedotun, T. (2018). X-Ray fluorescence (XRF) in the investigation of the composition of earth materials: a review and an overview. *Geology, Ecology, and Landscapes*, 2(2), 1-7.
<https://doi.org/10.1080/24749508.2018.1452459>
- Partab, R., Wenge, Q., HuaFu, P., Jihui, C., Xufeng, A., Yang, L., & Mahmood, A. (2021). Effect of Fly Ash and Cement on the Engineering Characteristic of Stabilized Subgrade Soil: An Experimental Study. *Geofluids*, 2021, 1-11.
<https://doi.org/10.1155/2021/1368194>
- Rey, E. (2017). *Ceniza de fondo de carbón: problemática, caracterización y uso como árido en morteros y hormigones* [Tesis de posgrado, Universidade Da Coruña]
- <https://ruc.udc.es/dspace/handle/2183/19579>
- Sivakumar Babu, G. L., & Vasudevan, A. K. (2008). Strength and stiffness response of coir fiber-reinforced tropical soil. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 20(9), 571-577.
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(2008\)20:9\(571\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(2008)20:9(571))
- Taylor, H. F. W. (1997). *Cement chemistry* (2nd ed.). Thomas Telford Publishing.
<http://dx.doi.org/10.1680/cc.25929>
- United States Department of Agriculture. (2017). *Soil Survey Manual* (18th ed.). Autoedición.
<https://www.nrcs.usda.gov/resources/guides-and-instructions/soil-survey-manual>

- Velásquez, C. (2018). *Influencia del cemento portland tipo I en la estabilización del suelo arcilloso de la subrasante de la avenida Dinamarca, sector La Molina* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Cajamarca].
<http://hdl.handle.net/20.500.14074/2534>
- Wyrzykowski, M., Ghourchian, S., Sinthupinyo, S., Chitvoranund, N., Chintana, T., & Lura, P. (2016). Internal curing of high performance mortars with bottom ash. *Cement and Concrete Composites*, 71, 1-9.
<https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2016.04.009>

Anexos

Anexo A: Ensayos de caracterización física y mecánica.....	88
Anexo B: Ensayos de caracterización química.....	102
Anexo C: Ensayos de fluorescencia y difracción rayos X.....	106
Anexo D: Ensayos CBR suelo-ceniza.....	120
Anexo E: Ensayos CBR suelo-ceniza-cemento	139
Anexo F: Hojas de cálculo - comparación de costos.....	197

Anexo A

Ensayos de caracterización física y mecánica

ENSAYOS DE CARACTERIZACIÓN FÍSICA DEL SUELO NATURAL

	UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA	RESULTADO DE ENSAYOS Página 1 de 1
	FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL	
ENSAYOS DE CARACTERIZACIÓN FÍSICA		
"ESTABILIZACIÓN DE SUELOS FINOS CON CENIZA DE FONDO Y CEMENTO PARA USO COMO SUBRASANTE EN LA REGIÓN CAJAMARCA"		Muestra: suelo fino natural Proporción ceniza: 0% Proporción cemento: 0%

INFORME DE ENSAYOS

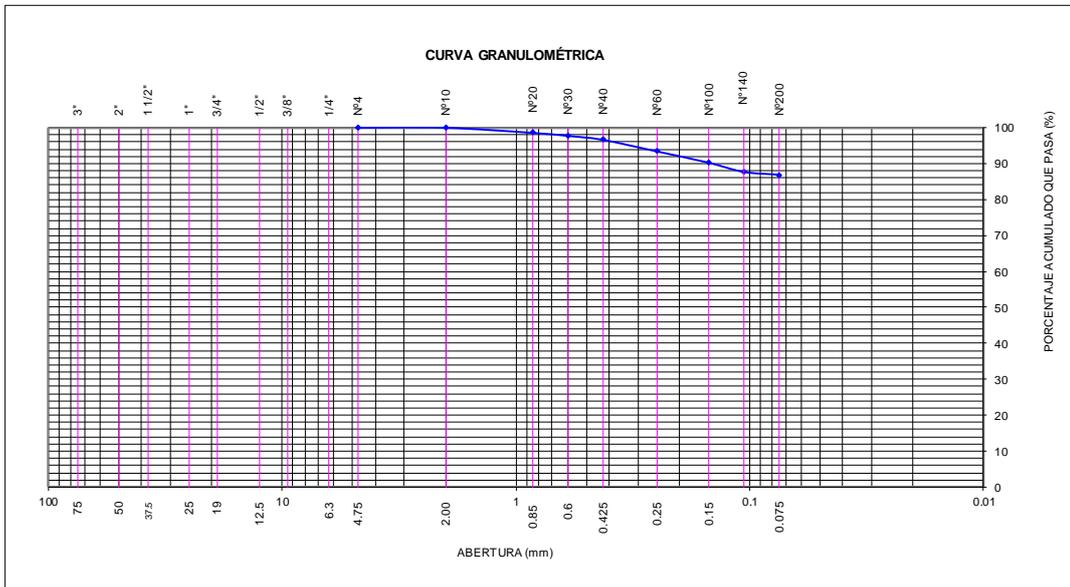
Tamiz	Abertura (mm)	Parcial Retenido (%)	Acumulado (%)	
			Retenido	Pasa
3"	75.000	-	-	-
2"	50.000	-	-	-
1 1/2"	37.500	-	-	-
1"	25.000	-	-	-
3/4"	19.000	-	-	-
1/2"	12.500	-	-	-
3/8"	9.500	-	-	-
1/4"	6.300	-	-	-
Nº4	4.750	-	-	100.0
Nº10	2.000	-	-	100.0
Nº20	0.850	1.4	1.4	98.6
Nº30	0.600	0.8	2.3	97.7
Nº40	0.425	1.1	3.4	96.6
Nº60	0.250	3.2	6.6	93.4
Nº100	0.150	3.2	9.8	90.2
Nº140	0.106	2.6	12.4	87.6
Nº200	0.075	0.8	13.2	86.8
FONDO		86.8		

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO - ASTM D6913	
% Grava :	----
% Arena :	13.2
% Finos :	86.8

LÍMITES DE CONSISTENCIA ASTM D4318	
Límite Líquido :	64.0
Límite Plástico :	40.0
Índice Plástico :	24.0
Límite de Contracción:	32.0
Índice de Contracción:	32.0

GRAVEDAD ESPECÍFICA ASTM D854	
Gs :	2.693

Clasificación SUCS ASTM D2487 :	MH
Clasificación AASHTO M 145 (ASTM D3282) :	A-7-5(10)



Ejecución/revisión: Luis Carbajal | Supervisión/aprobación: Luisa Shuan | Fecha: octubre 2023

ENSAYOS DE CARACTERIZACIÓN FÍSICA DE LA CENIZA DE FONDO

	UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA	RESULTADO DE ENSAYOS Página 1 de 1
	FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL	
ENSAYOS DE CARACTERIZACIÓN FÍSICA		
"ESTABILIZACIÓN DE SUELOS FINOS CON CENIZA DE FONDO Y CEMENTO PARA USO COMO SUBRASANTE EN LA REGIÓN CAJAMARCA"		Muestra: ceniza Proporción ceniza: 100% Proporción cemento: 0%

INFORME DE ENSAYO

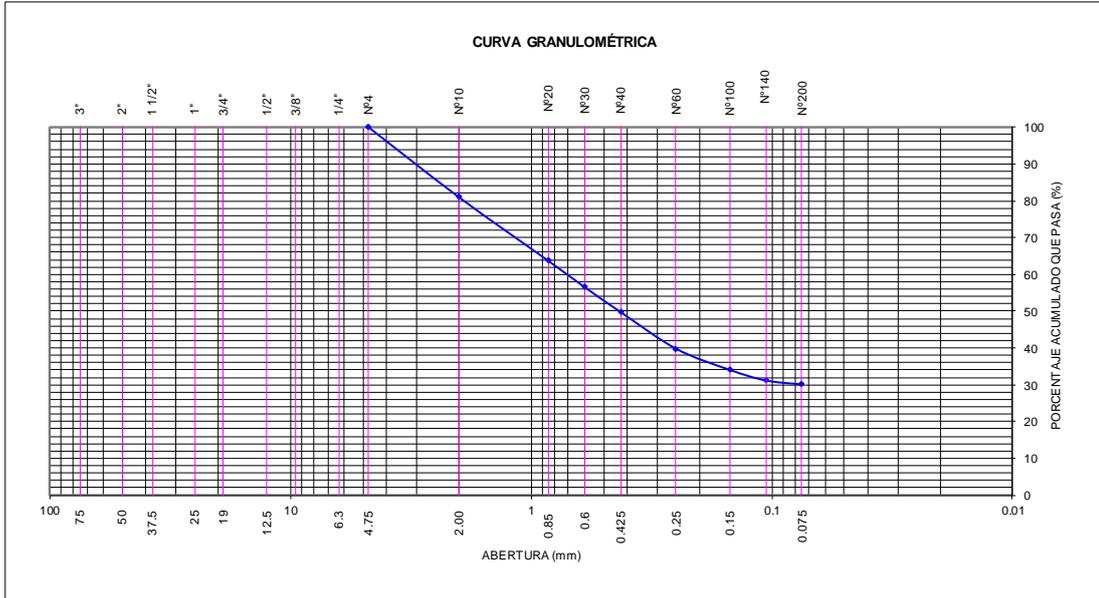
Tamiz	Abertura (mm)	Parcial Retenido (%)	(%) Acumulado	
			Retenido	Pasa
3"	75.000	-	-	
2"	50.000	-	-	
1 1/2"	37.500	-	-	
1"	25.000	-	-	
3/4"	19.000	-	-	
1/2"	12.500	-	-	
3/8"	9.500	-	-	
1/4"	6.300	-	-	
Nº4	4.750	-	-	100.0
Nº10	2.000	19.0	19.0	81.0
Nº20	0.850	17.3	36.3	63.7
Nº30	0.600	7.2	43.5	56.5
Nº40	0.425	6.8	50.2	49.8
Nº60	0.250	9.9	60.2	39.8
Nº100	0.150	5.7	65.9	34.1
Nº140	0.106	2.9	68.8	31.2
Nº200	0.075	1.1	69.9	30.1
FONDO		30.1		

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO - ASTM D6913	
% Grava :	----
% Arena :	69.9
% Finos :	30.1

LÍMITES DE CONSISTENCIA ASTM D4318	
Límite Líquido :	NP
Límite Plástico :	NP
Índice Plástico :	NP
Límite de Contracción:	NP
Índice de Contracción:	NP

GRAVEDAD ESPECÍFICA ASTM D854	
Gs :	2.448

Clasificación SUCS ASTM D2487 :	SM
Clasificación AASHTO M 145 (ASTM D3282) :	A-2-4(0)



Ejecución/revisión: Luis Carbajal Supervisión/aprobación: Luisa Shuan Fecha: octubre 2023

ENSAYOS DE CARACTERIZACIÓN FÍSICA DEL SUELO+10% CENIZA DE FONDO

	UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA	RESULTADO DE ENSAYOS Página 1 de 1
	FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL	
ENSAYOS DE CARACTERIZACIÓN FÍSICA		
"ESTABILIZACIÓN DE SUELOS FINOS CON CENIZA DE FONDO Y CEMENTO PARA USO COMO SUBRASANTE EN LA REGIÓN CAJAMARCA"		Muestra: suelo fino Proporción ceniza: 10% Proporción cemento: 0%

INFORME DE ENSAYOS

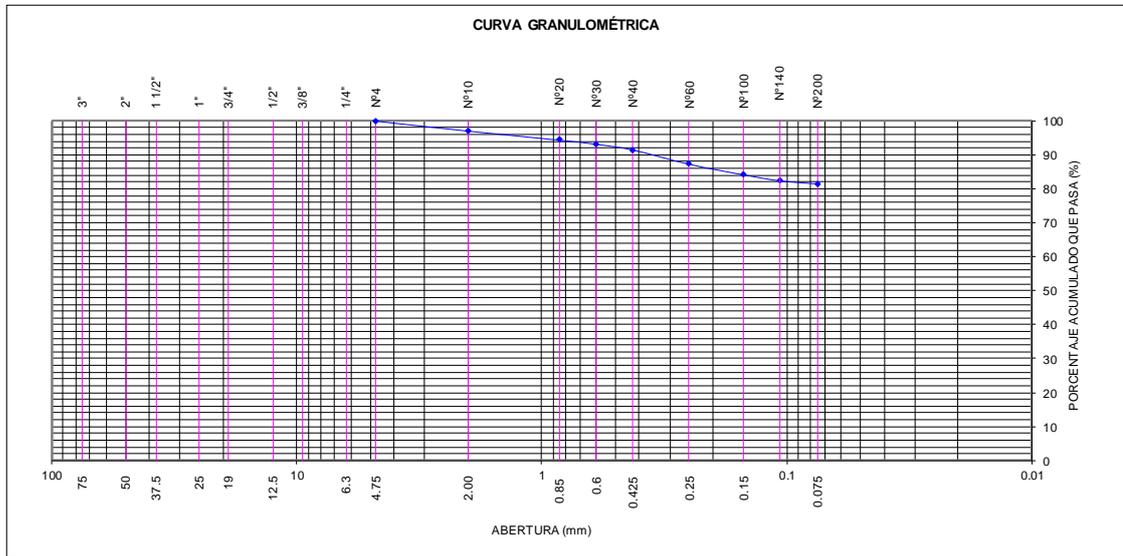
Tamiz	Abertura (mm)	Parcial Retenido (%)	Acumulado (%)	
			Retenido	Pasa
3"	75.000	-	-	-
2"	50.000	-	-	-
1 1/2"	37.500	-	-	-
1"	25.000	-	-	-
3/4"	19.000	-	-	-
1/2"	12.500	-	-	-
3/8"	9.500	-	-	-
1/4"	6.300	-	-	-
Nº4	4.750	-	-	100.0
Nº10	2.000	2.9	2.9	97.1
Nº20	0.850	2.7	5.6	94.4
Nº30	0.600	1.2	6.8	93.2
Nº40	0.425	1.7	8.5	91.5
Nº60	0.250	4.2	12.7	87.3
Nº100	0.150	3.1	15.8	84.2
Nº140	0.106	1.8	17.6	82.4
Nº200	0.075	0.9	18.5	81.5
FONDO		81.5		

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO - ASTM D6913	
% Grava :	----
% Arena :	18.5
% Finos :	81.5

LÍMITES DE CONSISTENCIA ASTM D4318/ASTM D4943	
Límite Líquido :	59.0
Límite Plástico :	38.0
Índice Plástico :	21.0
Límite de Contracción:	31.0
Índice de Contracción:	28.0

GRAVEDAD ESPECÍFICA ASTM D854	
Gs :	2.686

Clasificación SUCS ASTM D2487 :	MH
Clasificación AASHTO M 145 (ASTM D3282) :	A-7-5(7)



Ejecución/visión: Luis Carbajal | Supervisión/aprobación: Luisa Shuan | Fecha: octubre 2023

ENSAYOS DE CARACTERIZACIÓN FÍSICA DE SUELO+15%CENIZA DE FONDO

	UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL	RESULTADO DE ENSAYOS Página 1 de 1
	ENSAYOS DE CARACTERIZACIÓN FÍSICA	
"ESTABILIZACIÓN DE SUELOS FINOS CON CENIZA DE FONDO Y CEMENTO PARA USO COMO SUBRASANTE EN LA REGIÓN CAJAMARCA"		Muestra: suelo fino Proporción ceniza: 15% Proporción cemento: 0%

INFORME DE ENSAYOS

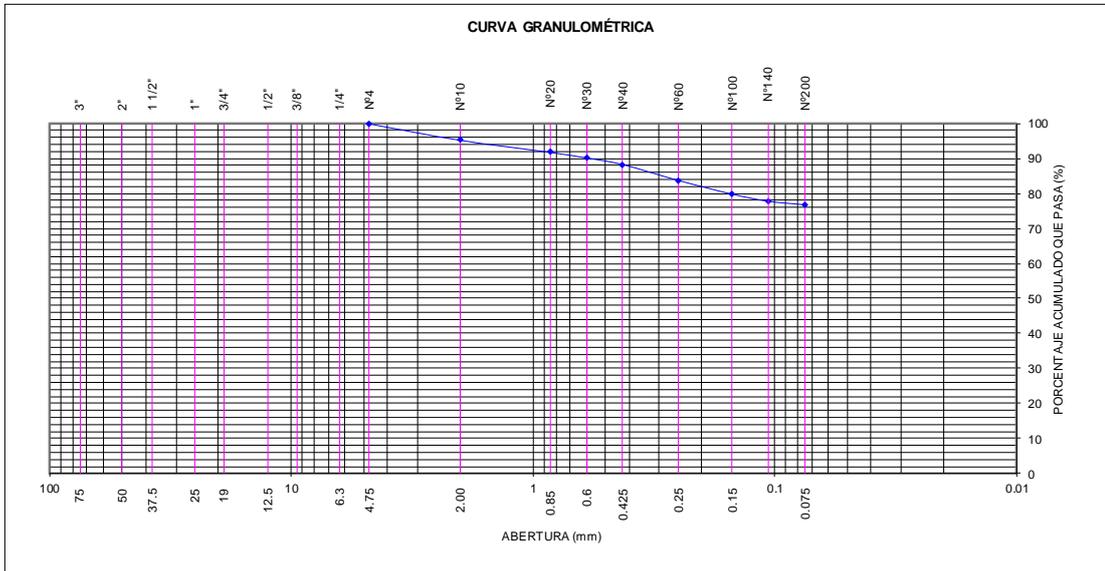
Tamiz	Abertura (mm)	Parcial Retenido (%)	Acumulado (%)	
			Retenido	Pasa
3"	75.000	-	-	
2"	50.000	-	-	
1 1/2"	37.500	-	-	
1"	25.000	-	-	
3/4"	19.000	-	-	
1/2"	12.500	-	-	
3/8"	9.500	-	-	
1/4"	6.300	-	-	
Nº4	4.750	-	-	100.0
Nº10	2.000	4.7	4.7	95.3
Nº20	0.850	3.5	8.2	91.8
Nº30	0.600	1.6	9.8	90.2
Nº40	0.425	1.9	11.7	88.3
Nº60	0.250	4.6	16.3	83.7
Nº100	0.150	3.9	20.2	79.8
Nº140	0.106	2.1	22.3	77.7
Nº200	0.075	1.0	23.3	76.7
FONDO		76.7		

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO - ASTM D6913	
% Grava :	----
% Arena :	23.3
% Finos :	76.7

LÍMITES DE CONSISTENCIA ASTM D4318	
Límite Líquido :	56.0
Límite Plástico :	38.0
Índice Plástico :	18.0
Límite de Contracción:	31.0
Índice de Contracción:	25.0

GRAVEDAD ESPECÍFICA ASTM D854	
Gs :	2.665

Clasificación SUCS ASTM D2487 :	MH
Clasificación AASHTO M 145 (ASTM D3282) :	A-7-5(5)



Ejecución/visión: Luis Carbajal Supervisión/aprobación: Luisa Shuan Fecha: octubre 2023

ENSAYOS DE CARACTERIZACIÓN FÍSICA DE SUELO+20%CENIZA DE FONDO

	UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL	RESULTADO DE ENSAYOS Página 1 de 1
	ENSAYOS DE CARACTERIZACIÓN FÍSICA	
"ESTABILIZACIÓN DE SUELOS FINOS CON CENIZA DE FONDO Y CEMENTO PARA USO COMO SUBRASANTE EN LA REGIÓN CAJAMARCA"		Muestra: suelo fino Proporción ceniza: 20% Proporción cemento: 0%

INFORME DE ENSAYOS

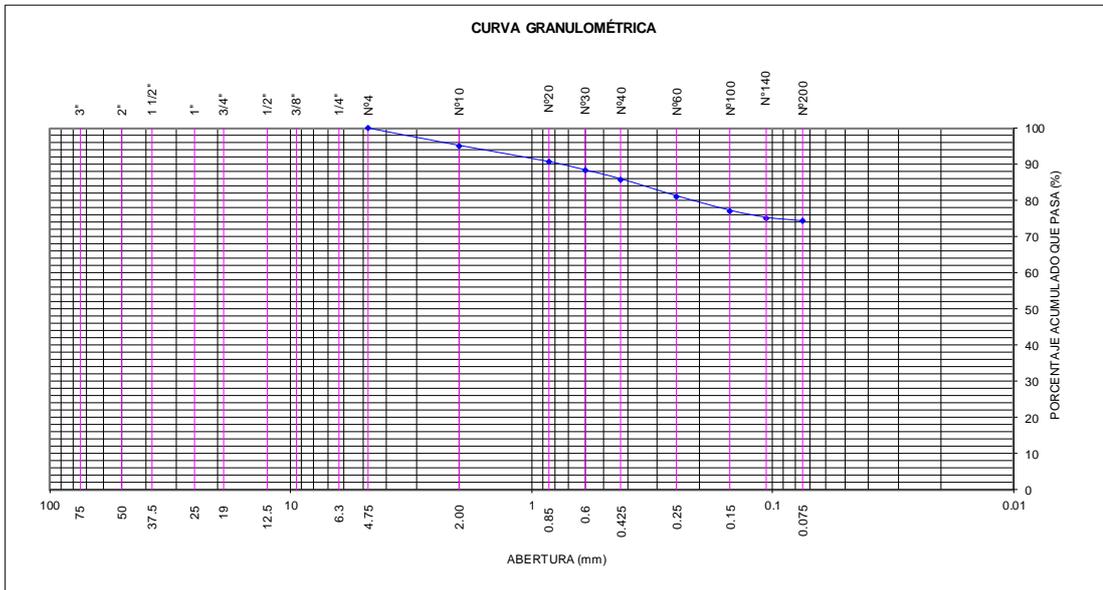
Tamiz	Abertura (mm)	Parcial Retenido (%)	Acumulado (%)	
			Retenido	Pasa
3"	75.000	-	-	-
2"	50.000	-	-	-
1 1/2"	37.500	-	-	-
1"	25.000	-	-	-
3/4"	19.000	-	-	-
1/2"	12.500	-	-	-
3/8"	9.500	-	-	-
1/4"	6.300	-	-	-
Nº4	4.750	-	-	100.0
Nº10	2.000	4.8	4.8	95.2
Nº20	0.850	4.5	9.3	90.7
Nº30	0.600	2.3	11.6	88.4
Nº40	0.425	2.5	14.1	85.9
Nº60	0.250	4.7	18.8	81.2
Nº100	0.150	4.0	22.8	77.2
Nº140	0.106	2.0	24.8	75.2
Nº200	0.075	1.0	25.8	74.2
FONDO		74.2		

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO - ASTM D6913	
% Grava :	----
% Arena :	25.8
% Finos :	74.2

LÍMITES DE CONSISTENCIA ASTM D4318	
Límite Líquido :	54.0
Límite Plástico :	38.0
Índice Plástico :	16.0
Límite de Contracción:	32.0
Índice de Contracción:	22.0

GRAVEDAD ESPECÍFICA ASTM D854	
Gs :	2.644

Clasificación SUCS ASTM D2487 :	MH
Clasificación AASHTO M 145 (ASTM D3282) :	A-7-5(4)



Ejecución/visión: Luis Carbajal | Supervisión/aprobación: Luisa Shuan | Fecha: octubre 2023

ENSAYOS DE CARACTERIZACIÓN FÍSICA DE SUELO+25%CENIZA DE FONDO

	UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL	RESULTADO DE ENSAYOS Página 1 de 1
	ENSAYOS DE CARACTERIZACIÓN FÍSICA	
"ESTABILIZACIÓN DE SUELOS FINOS CON CENIZA DE FONDO Y CEMENTO PARA USO COMO SUBRASANTE EN LA REGIÓN CAJAMARCA"		Muestra: suelo fino Proporción ceniza: 25% Proporción cemento: 0%

INFORME DE ENSAYOS

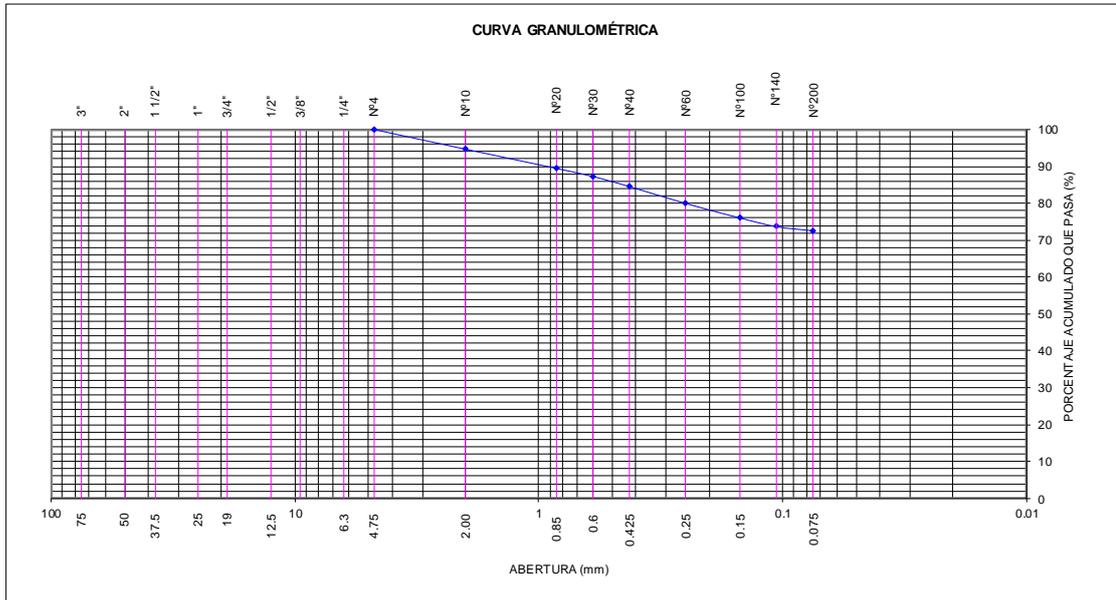
Tamiz	Abertura (mm)	(% Parcial Retenido)	(% Acumulado	
			Retenido	Pasa
3"	75.000	-	-	-
2"	50.000	-	-	-
1 1/2"	37.500	-	-	-
1"	25.000	-	-	-
3/4"	19.000	-	-	-
1/2"	12.500	-	-	-
3/8"	9.500	-	-	-
1/4"	6.300	-	-	-
Nº4	4.750	-	-	100.0
Nº10	2.000	5.3	5.3	94.7
Nº20	0.850	5.2	10.5	89.5
Nº30	0.600	2.2	12.7	87.3
Nº40	0.425	2.7	15.5	84.5
Nº60	0.250	4.6	20.0	80.0
Nº100	0.150	3.9	23.9	76.1
Nº140	0.106	2.4	26.3	73.7
Nº200	0.075	1.1	27.4	72.6
FONDO		72.6		

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO - ASTM D6913	
% Grava :	----
% Arena :	27.4
% Finos :	72.6

LÍMITES DE CONSISTENCIA ASTM D4318	
Límite Líquido :	52.0
Límite Plástico :	37.0
Índice Plástico :	15.0
Límite de Contracción:	32.0
Índice de Contracción:	20.0

GRAVEDAD ESPECÍFICA ASTM D854	
Gs :	2.622

Clasificación SUCS ASTM : D2487	MH
Clasificación AASHTO M 145 : (ASTM D3282)	A-7-5(3)



Ejecución/revisión: Luis Carbajal | Supervisión/aprobación: Luisa Shuan | Fecha: octubre 2023

ENSAYOS DE CARACTERIZACIÓN FÍSICA DE SUELO+30%CENIZA DE FONDO

	UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL	RESULTADO DE ENSAYOS Página 1 de 1
	ENSAYOS DE CARACTERIZACIÓN FÍSICA	
"ESTABILIZACIÓN DE SUELOS FINOS CON CENIZA DE FONDO Y CEMENTO PARA USO COMO SUBRASANTE EN LA REGIÓN CAJAMARCA"		Muestra: suelo fino Proporción ceniza: 30% Proporción cemento: 0%

INFORME DE ENSAYOS

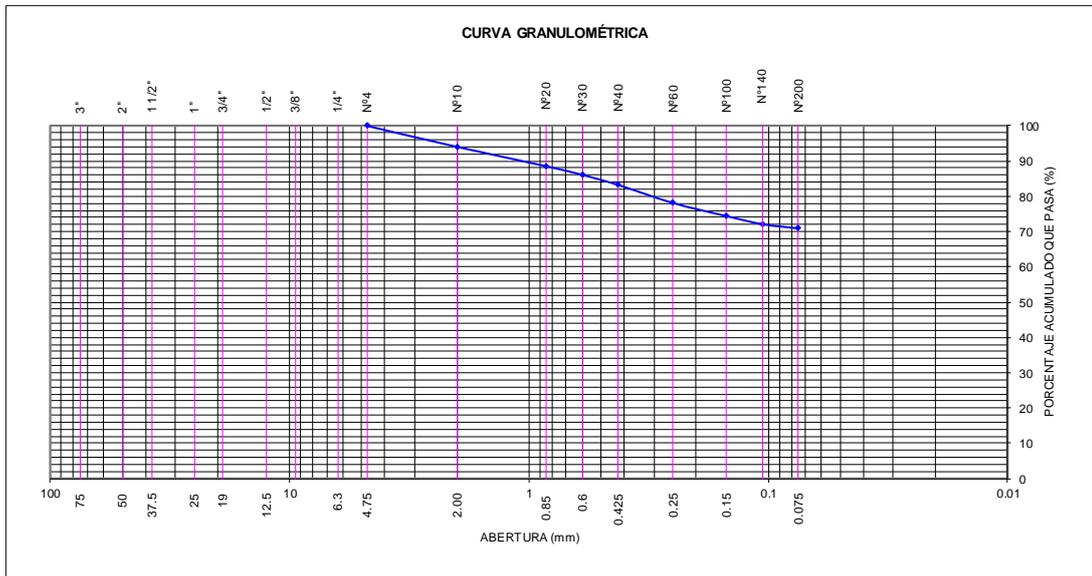
Tamiz	Abertura (mm)	Parcial Retenido (%)	Acumulado (%)	
			Retenido	Pasa
3"	75.000	-	-	-
2"	50.000	-	-	-
1 1/2"	37.500	-	-	-
1"	25.000	-	-	-
3/4"	19.000	-	-	-
1/2"	12.500	-	-	-
3/8"	9.500	-	-	-
1/4"	6.300	-	-	-
Nº4	4.750	-	-	100.0
Nº10	2.000	5.9	5.9	94.1
Nº20	0.850	5.5	11.4	88.6
Nº30	0.600	2.4	13.8	86.2
Nº40	0.425	2.8	16.7	83.3
Nº60	0.250	5.1	21.8	78.2
Nº100	0.150	3.7	25.5	74.5
Nº140	0.106	2.3	27.8	72.2
Nº200	0.075	1.2	29.0	71.0
FONDO		71.0		

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO - ASTM D6913	
% Grava :	----
% Arena :	29.0
% Finos :	71.0

LÍMITES DE CONSISTENCIA ASTM D4318	
Límite Líquido :	49.0
Límite Plástico :	36.0
Índice Plástico :	13.0
Límite de Contracción:	32.0
Índice de Contracción:	17.0

GRAVEDAD ESPECÍFICA ASTM D854	
Gs :	2.602

Clasificación SUCS ASTM D2487 :	ML
Clasificación AASHTO M 145 (ASTM D3282) :	A-7-5(2)



Ejecución/visión: Luis Carbajal | Supervisión/aprobación: Luisa Shuan | Fecha: octubre 2023

ENSAYO PROCTOR MODIFICADO SUELO NATURAL

	UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL	RESULTADO DE ENSAYOS Página 1 de 1
	CARACTERÍSTICAS DE COMPACTACIÓN DE SUELOS MEDIANTE ESFUERZO MODIFICADO - ASTM D1557	
"ESTABILIZACIÓN DE SUELOS FINOS CON CENIZA DE FONDO Y CEMENTO PARA USO COMO SUBRASANTE EN LA REGIÓN CAJAMARCA"		Muestra: suelo fino Proporción ceniza: 0% Proporción cemento: 0%

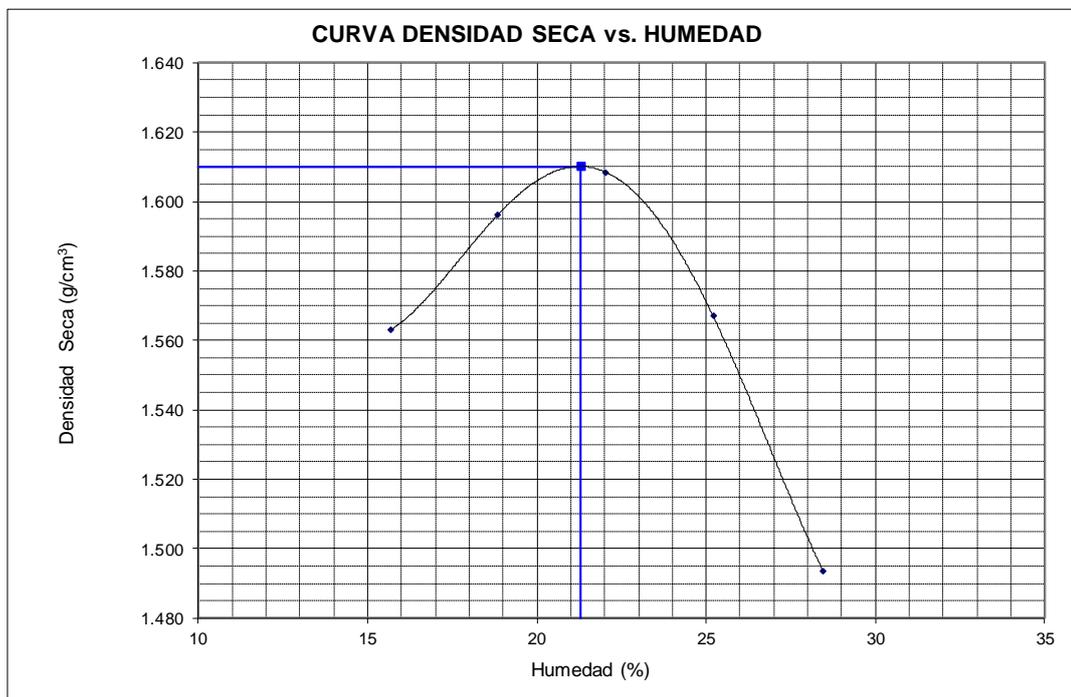
INFORME DE ENSAYO PRÓCTOR MODIFICADO

Método de ensayo: A

Prueba N°	1	2	3	4	5
Masa molde + suelo compactado (g)	5871.0	5955.0	6017.0	6016.0	5975.0
Masa del molde (g)	4170.0	4170.0	4170.0	4170.0	4170.0
Masa del suelo compactado (g)	1701.0	1785.0	1847.0	1846.0	1805.0
Volumen del molde (cm ³)	940.9	940.9	940.9	940.9	940.9
Densidad húmeda (g/cm ³)	1.808	1.897	1.963	1.962	1.918
Densidad seca (g/cm ³)	1.563	1.596	1.608	1.567	1.493
Contenido de humedad (%)	15.7	18.8	22.0	25.2	28.5

Máxima Densidad Seca (g/cm³) : 1.610

Óptimo Contenido de Humedad (%) : 21.3



Ejecución/revisión: Luis Carbajal

Supervisión/aprobación: Luisa Shuan

Fecha: octubre 2023

ENSAYO PROCTOR MODIFICADO SUELO+10% CENIZA DE FONDO

	UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA	RESULTADO DE ENSAYOS Página 1 de 1
	FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL CARACTERÍSTICAS DE COMPACTACIÓN DE SUELOS MEDIANTE ESFUERZO MODIFICADO - ASTM D1557	
"ESTABILIZACIÓN DE SUELOS FINOS CON CENIZA DE FONDO Y CEMENTO PARA USO COMO SUBRASANTE EN LA REGIÓN CAJAMARCA"		Muestra: suelo fino Proporción ceniza: 10% Proporción cemento: 0%

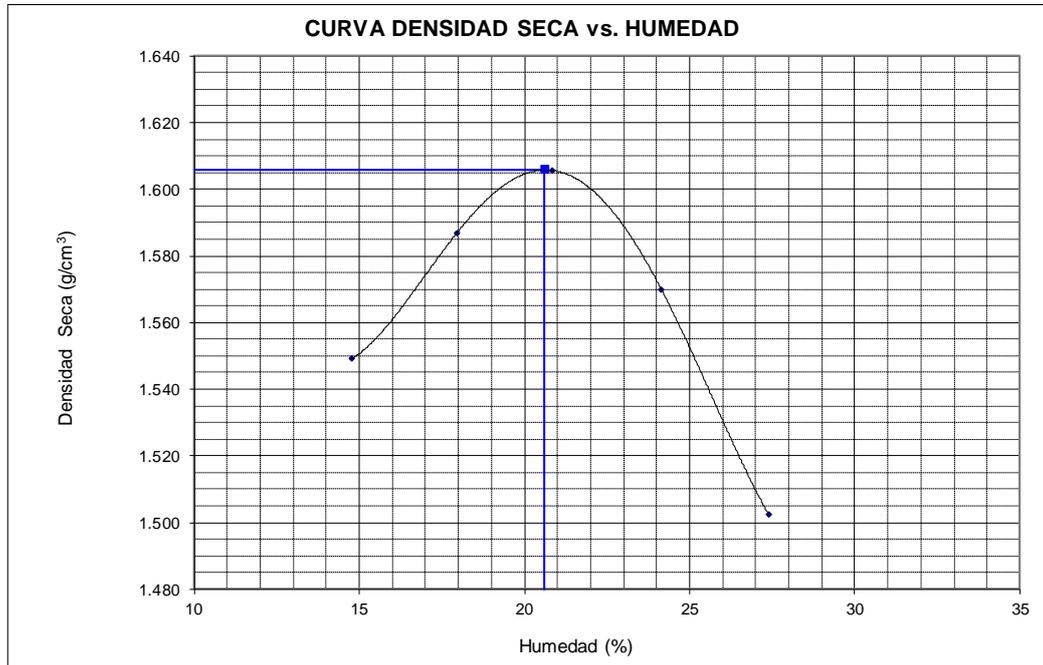
INFORME DE ENSAYO PRÓCTOR MODIFICADO

Método de ensayo A

Prueba N°	1	2	3	4	5
Masa molde + suelo compactado (g)	5843.0	5931.0	5996.0	6004.0	5971.0
Masa del molde (g)	4170.0	4170.0	4170.0	4170.0	4170.0
Masa del suelo compactado (g)	1673.0	1761.0	1826.0	1834.0	1801.0
Volumen del molde (cm ³)	941.0	941.0	941.0	941.0	941.0
Densidad húmeda (g/cm ³)	1.778	1.871	1.940	1.949	1.914
Densidad seca (g/cm ³)	1.549	1.587	1.606	1.570	1.502
Contenido de humedad (%)	14.8	17.9	20.9	24.1	27.4

Máxima Densidad Seca (g/cm³) : 1.606

Óptimo Contenido de Humedad (%) : 20.6



Ejecución/revisión: Luis Carbajal | Supervisión/aprobación: Luisa Shuan | Fecha: octubre 2023

ENSAYO PROCTOR MODIFICADO SUELO+15%CENIZA DE FONDO

	UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL	RESULTADO DE ENSAYOS Página 1 de 1
	CARACTERÍSTICAS DE COMPACTACIÓN DE SUELOS MEDIANTE ESFUERZO MODIFICADO - ASTM D1557	
"ESTABILIZACIÓN DE SUELOS FINOS CON CENIZA DE FONDO Y CEMENTO PARA USO COMO SUBRASANTE EN LA REGIÓN CAJAMARCA"		Muestra: suelo fino Proporción ceniza: 15% Proporción cemento: 0%

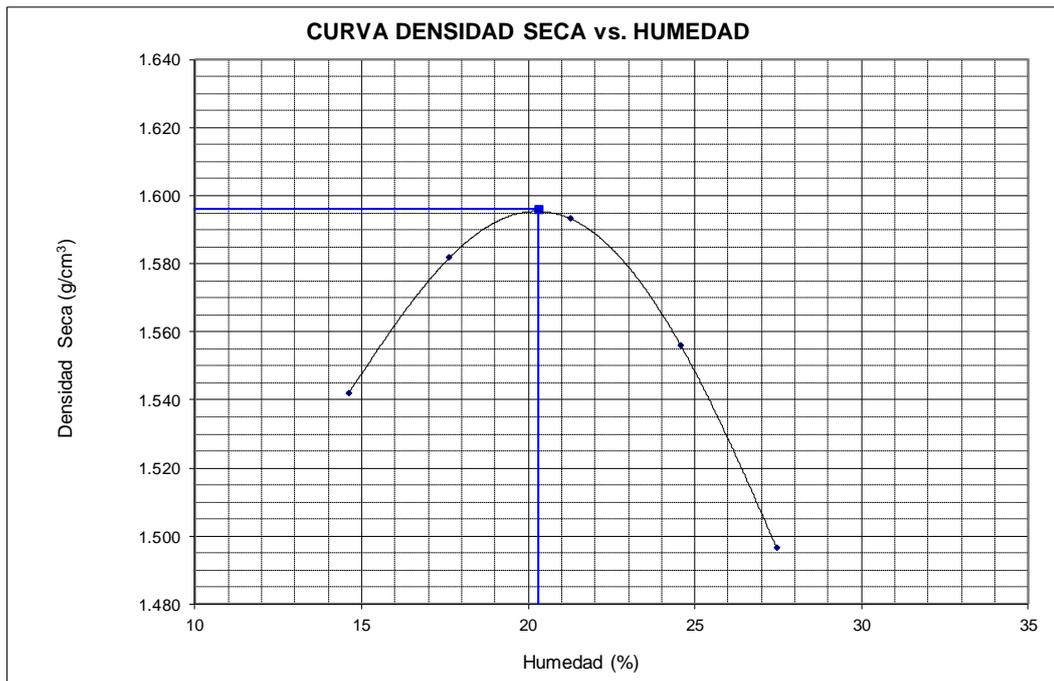
INFORME DE ENSAYO PRÓCTOR MODIFICADO

Método de ensayo: A

Prueba N°	1	2	3	4	5
Masa molde + suelo compactado (g)	5833.0	5921.0	5988.0	5994.0	5965.0
Masa del molde (g)	4170.0	4170.0	4170.0	4170.0	4170.0
Masa del suelo compactado (g)	1663.0	1751.0	1818.0	1824.0	1795.0
Volumen del molde (cm ³)	941.0	941.0	941.0	941.0	941.0
Densidad húmeda (g/cm ³)	1.767	1.861	1.932	1.938	1.908
Densidad seca (g/cm ³)	1.542	1.582	1.593	1.556	1.497
Contenido de humedad (%)	14.6	17.6	21.3	24.6	27.4

Máxima Densidad Seca (g/cm³) : 1.596

Optimo Contenido de Humedad (%) : 20.3



Ejecución/revisión: Luis Carbajal | Supervisión/aprobación: Luisa Shuan | Fecha: octubre 2023

ENSAYO PROCTOR MODIFICADO SUELO+20% CENIZA DE FONDO

	UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL	RESULTADO DE ENSAYOS Página 1 de 1
	CARACTERÍSTICAS DE COMPACTACIÓN DE SUELOS MEDIANTE ESFUERZO MODIFICADO - ASTM D1557	
"ESTABILIZACIÓN DE SUELOS FINOS CON CENIZA DE FONDO Y CEMENTO PARA USO COMO SUBRASANTE EN LA REGIÓN CAJAMARCA"		Muestra: suelo fino Proporción ceniza: 20% Proporción cemento: 0%

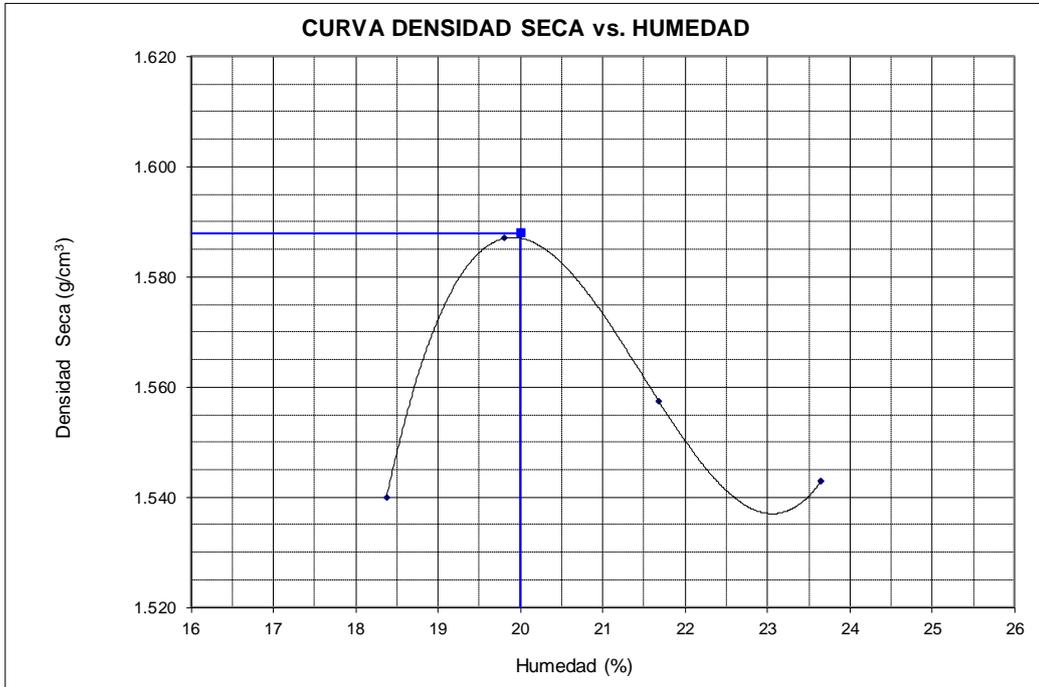
INFORME DE ENSAYO PRÓCTOR MODIFICADO

Método de ensayo: A

Prueba N°	1	2	3	4
Masa molde + suelo compactado (g)	5149.0	5223.0	5217.0	5229.0
Masa del molde (g)	3430.0	3430.0	3430.0	3430.0
Masa del suelo compactado (g)	1719.0	1793.0	1787.0	1799.0
Volumen del molde (cm ³)	943.0	943.0	943.0	943.0
Densidad húmeda (g/cm ³)	1.823	1.901	1.895	1.908
Densidad seca (g/cm ³)	1.540	1.587	1.557	1.543
Contenido de humedad (%)	18.4	19.8	21.7	23.6

Máxima Densidad Seca (g/cm³) : 1.588

Optimo Contenido de Humedad (%) : 20.0



Ejecución/revisión: Luis Carbajal

Supervisión/aprobación: Luisa Shuan

Fecha: octubre 2023

ENSAYO PROCTOR MODIFICADO SUELO+25% CENIZA DE FONDO

	UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA	RESULTADO DE ENSAYOS Página 1 de 1
	FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL	
CARACTERÍSTICAS DE COMPACTACIÓN DE SUELOS MEDIANTE ESFUERZO MODIFICADO - ASTM D1557		
"ESTABILIZACIÓN DE SUELOS FINOS CON CENIZA DE FONDO Y CEMENTO PARA USO COMO SUBRASANTE EN LA REGIÓN CAJAMARCA"		Muestra: suelo fino Proporción ceniza: 25% Proporción cemento: 0%

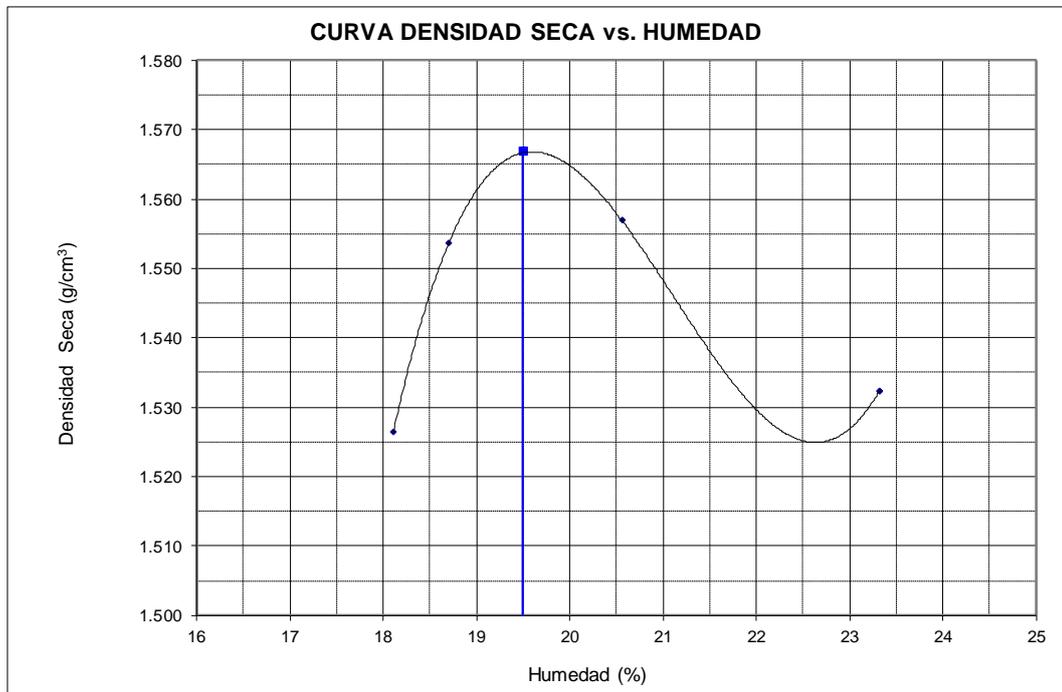
INFORME DE ENSAYO PRÓCTOR MODIFICADO

Método de ensayo: A

Prueba N°	1	2	3	4
Masa molde + suelo compactado (g)	5130.0	5169.0	5200.0	5212.0
Masa del molde (g)	3430.0	3430.0	3430.0	3430.0
Masa del suelo compactado (g)	1700.0	1739.0	1770.0	1782.0
Volumen del molde (cm ³)	943.0	943.0	943.0	943.0
Densidad húmeda (g/cm ³)	1.803	1.8	1.9	1.9
Densidad seca (g/cm ³)	1.526	1.554	1.557	1.532
Contenido de humedad (%)	18.1	18.7	20.6	23.3

Máxima Densidad Seca (g/cm³) : 1.567

Óptimo Contenido de Humedad (%) : 19.5



Ejecución/revisión: Luis Carbajal

Supervisión/aprobación: Luisa Shuan

Fecha: octubre 2023

ENSAYO PROCTOR MODIFICADO SUELO+30% CENIZA DE FONDO

	UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA	RESULTADO DE ENSAYOS Página 1 de 1
	FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL CARACTERÍSTICAS DE COMPACTACIÓN DE SUELOS MEDIANTE ESFUERZO MODIFICADO - ASTM D1557	
"ESTABILIZACIÓN DE SUELOS FINOS CON CENIZA DE FONDO Y CEMENTO PARA USO COMO SUBRASANTE EN LA REGIÓN CAJAMARCA"		Muestra: suelo fino Proporción ceniza: 30% Proporción cemento: 0%

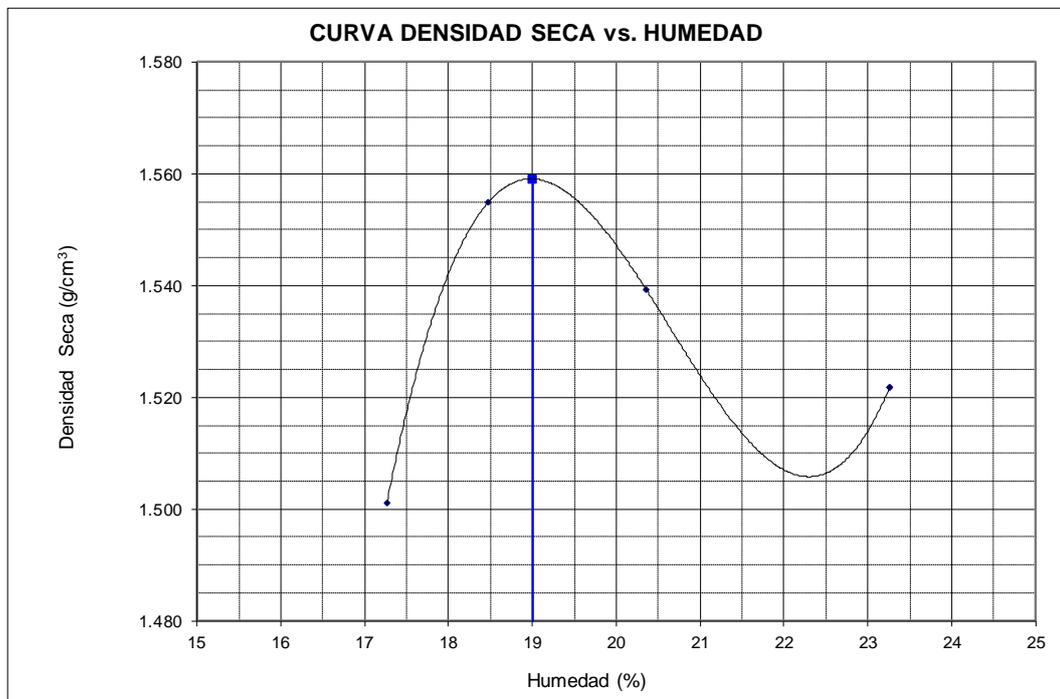
INFORME DE ENSAYO PRÓCTOR MODIFICADO

Método de ensayo: A

Prueba N°	1	2	3	4
Masa molde + suelo compactado (g)	5090.0	5167.0	5177.0	5199.0
Masa del molde (g)	3430.0	3430.0	3430.0	3430.0
Masa del suelo compactado (g)	1660.0	1737.0	1747.0	1769.0
Volumen del molde (cm ³)	943.0	943.0	943.0	943.0
Densidad húmeda (g/cm ³)	1.760	1.842	1.853	1.876
Densidad seca (g/cm ³)	1.501	1.555	1.539	1.522
Contenido de humedad (%)	17.3	18.5	23.3	23.3

Máxima densidad seca (g/cm³) : 1.559

Óptimo contenido de humedad (%) : 19.0



Ejecución/revisión: Luis Carbajal

Supervisión/aprobación: Luisa Shuan

Fecha: octubre 2023

Anexo B

Ensayos de caracterización química



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA

Facultad de Ingeniería Civil

LABORATORIO QUÍMICO FIC

ANÁLISIS FÍSICO-QUÍMICO

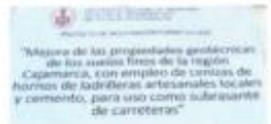
SOLICITANTE : LUISA ESTHER SHUAN LUCAS - LUIS ENRIQUE CARBAJAL CASTREJON

REGISTRO : LQU23-780-781

PROYECTO : MEJORA DE LAS PROPIEDADES GEOTECNICAS DE LOS SUELOS FINOS DE LA REGIÓN CAJAMARCA CON EMPLEO DE CENIZAS DE HORNO DE LAS LADRILLERAS ARTESANALES LOCALES Y CEMENTO, PARA USO COMO SUBRASANTE DE CARRETERAS

UBICACIÓN : LIMA, PERÚ

RECEPCIÓN DE LA MUESTRA : 26-09-2023

PROCEDIMIENTOS DE PREPARACION DE MUESTRAS	DESIGNACIÓN		MATERIA ORGÁNICA MTC E-118 %	CARBONATOS ASTM D 1068	
				CO ₂ ppm	HCO ₃ ppm
 	Tipo de muestra :	Suelo fino	1,37	0	63
	Clasificación referencial	Limo MH			
	Procedencia:	Localidad Río Grande, Distrito Cajamarca, Provincia Cajamarca			
 	Tipo de muestra :	Ceniza de fondo Carbón mineral	0,98	51	128
Procedencia:	C.P. Santa Bárbara, Distrito Baños del Inca, Provincia Cajamarca				

Lima, 18 de octubre del 2023


CARMEN M. REYES *QUÍMICA*
 Dra. JEFA (e) DEL LABORATORIO DE QUÍMICA
 Laboratorio de Química de la Facultad de Ingeniería Civil
 UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
 Facultad de Ingeniería Civil
 Lima, Perú
 EFATURA
 LABORATORIO DE QUÍMICA

El Laboratorio no se responsabiliza del muestreo ni de la procedencia de la muestra

Av. Tupac Amaru 210, Código Postal: 15333, Perú
 Apartado Postal 1301 Lima 100 - Perú / Telefax: (511) 481 - 9845
 Central Telefónica: 481-1070/Anexos: 4020 - 4003

Carrera de Ingeniería Civil Acreditada por



Engineering
Accreditation
Commission



LABORATORIO QUÍMICO FIC ANÁLISIS FÍSICO-QUÍMICO

SOLICITANTE : LUISA ESTHER SHUAN LUCAS - LUIS ENRIQUE CARBAJAL CASTREJON

REGISTRO : LQU23-780-781

PROYECTO : MEJORA DE LAS PROPIEDADES GEOTECNICAS DE LOS SUELOS FINOS DE LA REGIÓN CAJAMARCA CON EMPLEO DE CENIZAS DE HORNO DE LAS LADRILLERAS ARTESANALES LOCALES Y CEMENTO, PARA USO COMO SUBRASANTE DE CARRETERAS

UBICACIÓN : LIMA, PERÚ

RECEPCIÓN DE LA MUESTRA : 26-09-2023

PROCEDIMIENTOS DE PREPARACION DE MUESTRAS	DESIGNACIÓN		SULFATOS (SO4) ⁻ ASTM D 516 AASHTO T 290 ppm	CLORUROS Cl ⁻ ASTM 512 AASHTO T291 ppm	SALES SOLUBLES TOTALES MTC E219 ppm	pH MTC E129
 <p>"Mejora de las propiedades geotécnicas de los suelos finos de la región Cajamarca, con empleo de cenizas de hornos de ladrilleras artesanales locales y cemento, para uso como subrasante de carreteras"</p>	Tipo de muestra :	Suelo fino	99	75	225	7,06
	Clasificación referencial	Limo MH				
	Procedencia:	Localidad Rio Grande, Distrito Cajamarca, Provincia Cajamarca				
 <p>"Mejora de las propiedades geotécnicas de los suelos finos de la región Cajamarca, con empleo de cenizas de hornos de ladrilleras artesanales locales y cemento, para uso como subrasante de carreteras"</p>	Tipo de muestra :	Ceniza de fondo Carbón mineral	2 673	160	4 587	6,94
	Procedencia:	C.P. Santa Bárbara, Distrito Baños del Inca, Provincia Cajamarca				

Lima, 18 de octubre del 2023


CARMEN M. REYES C.
Dra. JEFA (e) DEL LABORATORIO
Laboratorio de Química Físico-Química

El Laboratorio no se responsabiliza del muestreo ni de la procedencia de la muestra

Av. Tupac Amaru 210, Código Postal: 15333, Perú
Apartado Postal 1301 Lima 100 - Perú / Telefax: (511) 481 - 9845
Central Telefónica: 481-1070/Anexos: 4020 - 4003

Carrera de Ingeniería Civil Acreditada por



Engineering
Accreditation
Commission



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA

Facultad de Ingeniería Geológica, Minera y Metalúrgica

Laboratorio de Espectrometría

ANALISIS DE MUESTRA DE CARBON

SOLICITADO POR : LUISA SHUAN LUCAS

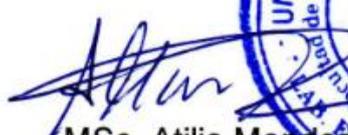
Procedencia de muestra : Cajamarca

Recepción de muestra : Lima, 20 de Febrero del 2024

RESULTADO DEL ANALISIS DE MUESTRA DE CARBON

Parámetros	Carbón antracítico
%Humedad	1.57
%Materia Volátil	12.67
% Cenizas	42.33
%Carbono Fijo	45.00
% S	0.14
Poder Calorífico Kcal / Kg	5010

Lima, 1 de Marzo del 2024


MSc. Atilio Mendoza A.
Jefe Lab. Espectrometría



Av. Túpac Amará N° 210, Lima 25, Apartado 1301-Perú

Teléfono: (511) 4824427, Central Telefónica (511) 4811070, Anexo 4245

e-mail: labespectro@uni.edu.pe

Anexo C

Ensayos de fluorescencia y difracción rayos X



INFORME DE ENSAYO N° 0212 – 24 – LABICER

1. DATOS DEL CLIENTE

- 1.1. NOMBRE / RAZÓN SOCIAL : LUIS ENRIQUE CARBAJAL CASTREJON
1.2. D.N.I / R.U.C. : 70989175
1.3. DIRECCIÓN : –

2. CRONOGRAMA DE FECHAS

- 2.1. FECHA DE RECEPCIÓN DE LA MUESTRA : 20 / 02 / 2024
2.2. FECHA DE EJECUCIÓN DEL ENSAYO : 22 / 02 / 2024
2.3. FECHA DE EMISIÓN DEL INFORME : 28 / 02 / 2024

3. ANÁLISIS SOLICITADO : ANÁLISIS DE COMPOSICIÓN QUÍMICA POR DIFRACCIÓN DE RAYOS X Y ESPECTROMETRÍA DE FLUORESCENCIA DE RAYOS X

4. DATOS DE LA MUESTRA

- 4.1. TIPO DE MUESTRA : SUELO
4.2. DESCRIPCIÓN DE LA MUESTRA : 01 MUESTRA DE MEZCLA DE SUELO FINO + 20% CENIZA DE FONDO CARBÓN MINERAL +1.5% CEMENTO TESIS : "ESTABILIZACIÓN DE SUBRASANTES ARCILLOSA CON CENIZA DE FONDO Y CEMENTO EN LA REGIÓN CAJAMARCA"
4.3. OBSERVACIONES (SI APLICA) : ENVASE PLÁSTICO

5. LUGAR DE RECEPCIÓN Y ANÁLISIS : LABORATORIO LABICER - UNI

6. CONDICIONES AMBIENTALES : Temperatura: 21; Humedad relativa: 67%

7. RESULTADOS

7.1. ANÁLISIS DE DIFRACCIÓN DE RAYOS X

PARÁMETRO	RESULTADO	UNIDADES	MÉTODO DE REFERENCIA ⁽¹⁾
Óxido de silicio (Cuarzo), SiO ₂	51.66	%	Difracción de Rayos X ⁽²⁾
Óxido de hierro (Hematita), Fe ₂ O ₃	1.69	%	
Óxido de silicio (Cristobalita), SiO ₂	3.23	%	
Óxido de sodio, calcio, aluminio y silicio (Anortita), (Ca _{2.133} Na _{1.867})(Si _{10.003} Al _{5.987})O ₃₂	7.45	%	
Hidróxido de óxido de potasio, aluminio, hierro y silicio (Moscovita), KFe _{0.12} Al _{2.88} Si ₃ O ₁₀ (OH) ₂	29.32	%	
Hidróxido de óxido de aluminio y silicio (Caolinita), Al ₂ (Si ₂ O ₅ (OH) ₄)	6.64	%	

⁽¹⁾ Método de ensayo de referencia o técnica aceptada por el cliente.

⁽²⁾ La identificación de las fases cristalinas es el resultado con mayor probabilidad (Score) brindado por el software HighScore Plus X4.9 de Malvern Panalytical utilizando la Base de datos PDF4+-2023. El análisis semicuantitativo se basa en uso del Método de Refinamiento Rietveld considerando un balance de las fases cristalinas al 100%. Equipo: DIFRACTÓMETRO DE RAYOS X. PANALYTICAL, EMPYREAN. Ver difractograma en Anexo Figura N°4.



7.2. ANÁLISIS DE COMPOSICIÓN QUÍMICA POR ESPECTROMETRÍA DE FLUORESCENCIA DE RAYOS X

7.2.1. ANÁLISIS DE COMPOSICIÓN QUÍMICA ELEMENTAL

PARÁMETRO	RESULTADO	UNIDADES	MÉTODO DE REFERENCIA ⁽¹⁾
Silicio, Si	47.720	%	Espectrometría de fluorescencia de rayos X de energía dispersiva ⁽²⁾
Aluminio, Al	29.415	%	
Hierro, Fe	12.280	%	
Calcio, Ca	3.230	%	
Magnesio, Mg	2.199	%	
Potasio, K	1.867	%	
Titanio, Ti	1.363	%	
Azufre, S	0.798	%	
Zinc, Zn	0.346	%	
Fósforo, P	0.332	%	
Manganeso, Mn	0.295	%	
Estroncio, Sr	0.078	%	
Circonio, Zr	0.077	%	
Rubidio, Rb	0.001	%	

⁽¹⁾ Método de ensayo de referencia o técnica aceptada por el cliente.

⁽²⁾ Balance de resultados del análisis elemental (del sodio al uranio) por espectrometría de fluorescencia de rayos X. Análisis semicuantitativo en atmósfera de vacío. Equipo: Espectrómetro de Fluorescencia de rayos X de energía dispersiva. SHIMADZU, EDX-800HS.

7.2.1. ANÁLISIS DE COMPOSICIÓN QUÍMICA EXPRESADA EN ÓXIDOS

PARÁMETRO	RESULTADO	UNIDADES	MÉTODO DE REFERENCIA ⁽¹⁾
Óxido de silicio, SiO ₂	53.262	%	Espectrometría de fluorescencia de rayos X de energía dispersiva ^(2,3)
Óxido de aluminio, Al ₂ O ₃	28.996	%	
Óxido de hierro, Fe ₂ O ₃	9.160	%	
Óxido de calcio, CaO	2.358	%	
Óxido de magnesio, MgO	1.902	%	
Óxido de potasio, K ₂ O	1.173	%	
Óxido de titanio, TiO ₂	1.186	%	
Óxido de azufre, SO ₃	1.040	%	
Óxido de fósforo, P ₂ O ₅	0.225	%	
Óxido de zinc, ZnO	0.397	%	
Óxido de manganeso, MnO	0.199	%	
Óxido de zirconio, ZrO ₂	0.055	%	
Óxido de estroncio, SrO	0.048	%	
Óxido de rubidio, Rb ₂ O	0.001	%	

⁽¹⁾ Método de ensayo o de referencia o técnica aceptada por el cliente.

⁽²⁾ Balance de resultados al 100% de óxidos calculados del análisis elemental (del sodio al uranio) por espectrometría de fluorescencia de rayos X. Análisis semicuantitativo en atmósfera de vacío. Equipo: Espectrómetro de Fluorescencia de rayos X de energía dispersiva. SHIMADZU, EDX-800HS.

⁽³⁾ Resultados expresados en óxidos según pedido del cliente.



8. VALIDEZ DEL INFORME DE ENSAYO

Los resultados del informe de ensayo sólo son válidos para la(s) muestra(s) ensayadas, descrita(s) en el ítem 4 del presente documento.



Fabio Jurado
Analista
LABICER – UNI



M.Sc. Christian Jacinto Hernández
Jefe de Laboratorio (e)
CQP 1154

NOTAS:

1. LABICER-UNI no se responsabiliza del muestreo ni de la procedencia de la muestra.
2. LABICER-UNI no se hace responsable de la información proporcionada por el cliente, incluidos en los ítems 1 y del 4.1 al 4.2 del presente documento.
3. Los resultados de los ensayos obtenidos no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce.
4. Este documento carece de validez sin sello y firmas correspondientes.

ANEXO

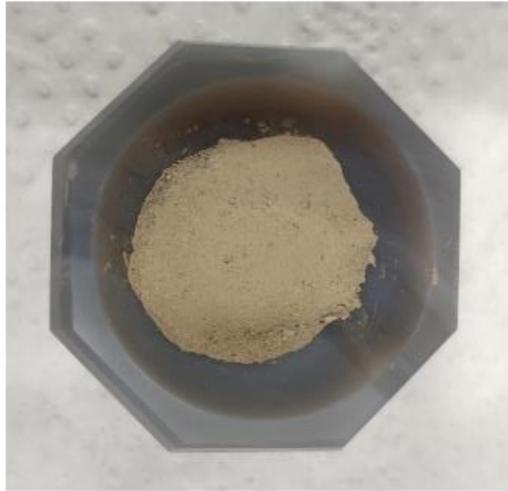


FIGURA N°1. MUESTRA DE SUELO.



FIGURA N°2. ESPECTRÓMETRO DE FLUORESCENCIA DE RAYOS X DE ENERGÍA DISPERSIVA (SHIMADZU, EDX-800HS).





FIGURA N°3. DIFRACTÓMETRO DE RAYOS X (MALVERN-PANALYTICAL EMPYREAN ALPHA)

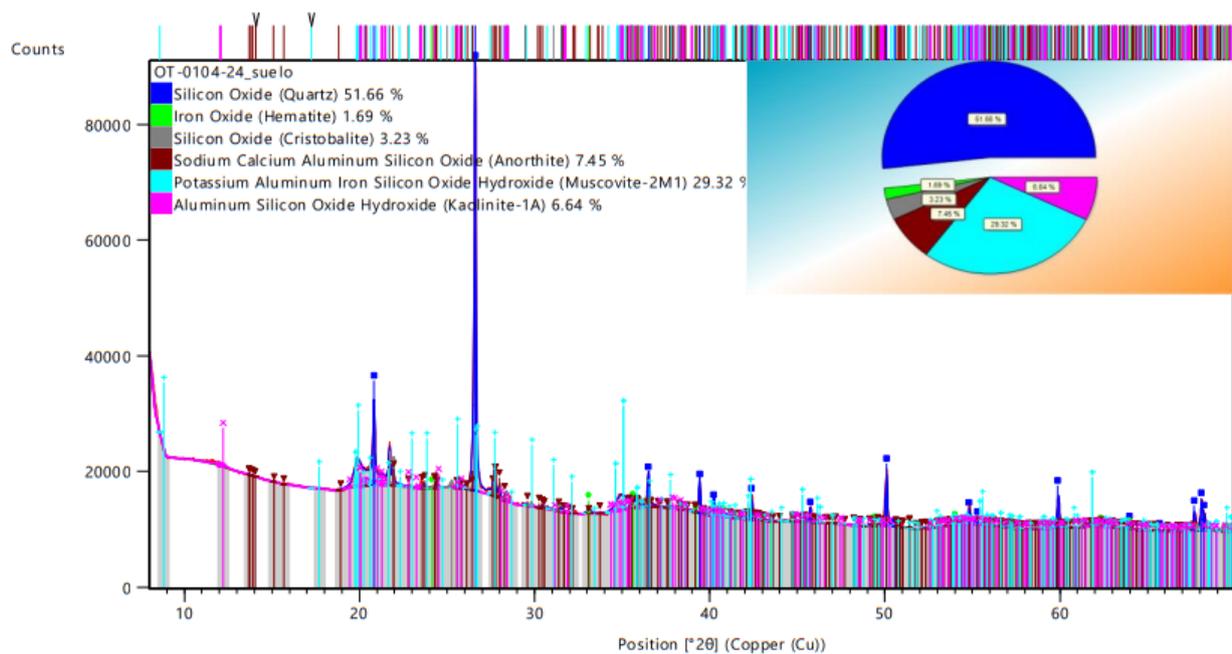


Figura N°4. Difractograma de la muestra.





INFORME DE ENSAYO N° 1291 – 23 – LABICER

1. **DATOS DEL CLIENTE**
 - 1.1. NOMBRE / RAZÓN SOCIAL : LUIS ENRIQUE CARBAJAL CASTREJON
 - 1.2. D.N.I / R.U.C. : 70989175
 - 1.3. DIRECCIÓN : --
2. **CRONOGRAMA DE FECHAS**
 - 2.1. FECHA DE RECEPCIÓN DE LA MUESTRA : 16 / 10 / 2023
 - 2.2. FECHA DE EJECUCIÓN DEL ENSAYO : 17 / 10 / 2023 al 26 / 10 / 2023
 - 2.3. FECHA DE EMISIÓN DEL INFORME : 26 / 10 / 2023
3. **ANÁLISIS SOLICITADO** : ANÁLISIS DE COMPOSICIÓN QUÍMICA POR DIFRACCIÓN DE RAYOS X Y ESPECTROMETRÍA DE FLUORESCENCIA DE RAYOS X DE ENERGÍA DISPERSIVA
4. **DATOS DE LA MUESTRA**
 - 4.1. TIPO DE MUESTRA : SUELO
 - 4.2. DESCRIPCIÓN DE LA MUESTRA : 01 MUESTRA DE LIMO DE ALTA PLASTICIDAD (CLASIFICACIÓN SUCS MH).
LA MAYOR PARTE PASA POR LA MALLA #200.
PROCEDENCIA : CANTERA EN LA PROVINCIA DE CAJAMARCA
TESIS : "ESTABILIZACIÓN DE SUBRASANTES ARCILLOSAS CON GENIZA DE FONDO Y CEMENTO EN LA REGIÓN CAJAMARCA"
 - 4.3. OBSERVACIONES (SI APLICA) : --
5. **LUGAR DE RECEPCIÓN Y ANÁLISIS** : LABORATORIO LABICER-UNI
6. **CONDICIONES AMBIENTALES** : Temperatura: 22.6°C; Humedad relativa: 62%
7. **RESULTADOS**
 - 7.1. **ANÁLISIS DE COMPOSICIÓN QUÍMICA POR DIFRACCIÓN DE RAYOS X**

PARÁMETRO	RESULTADO	UNIDADES	MÉTODO DE REFERENCIA (1)
Óxido de silicio (Cuarzo), SiO ₂	43.78	%	Difracción de Rayos X (2)
Oxalato de potasio, K ₂ C ₂ O ₄	17.24	%	
Silicato de aluminio y potasio (Sanidina), KAISi ₃ O ₈	12.67	%	
Fosfato de aluminio, AlPO ₄	11.49	%	
Óxido de hierro (magnetita), Fe ₃ O ₄	9.87	%	
Hidrato de oxalato de cloruro de óxido de hierro y sodio, Na ₂ Fe ₂ O(C ₂ O ₄) ₂ Cl ₂ (H ₂ O) ₄	3.81	%	
Óxido de hierro (hematita), Fe ₂ O ₃	1.13	%	

(1) Método de ensayo de referencia o técnica aceptada por el cliente.

(2) La identificación de las fases cristalinas es el resultado con mayor probabilidad (Score) brindado por el software HighScore Plus V4.9 de Malvern Panalytical utilizando la Base de datos PDF4+-2023. El análisis semicuantitativo se basa en uso del Método de Refinamiento Rietveld, considerando un balance de las fases cristalinas al 100%. Equipo: DIFRACTÓMETRO DE RAYOS X. PANALYTICAL, EMPYREAN. Ver difractograma en Anexo, Figura N°2.



7.2. ANÁLISIS DE COMPOSICIÓN QUÍMICA ELEMENTAL

PARÁMETRO	RESULTADO	UNIDADES	MÉTODO DE REFERENCIA ⁽¹⁾
Silicio, Si	43.977	%	Espectrometría de fluorescencia de rayos X de energía dispersiva ⁽²⁾
Aluminio, Al	30.473	%	
Hierro, Fe	16.420	%	
Magnesio, Mg	2.761	%	
Potasio, K	2.221	%	
Titanio, Ti	1.399	%	
Calcio, Ca	1.383	%	
Azufre, S	0.572	%	
Fósforo, P	0.384	%	
Manganeso, Mn	0.284	%	
Estroncio, Sr	0.064	%	
Vanadio, V	0.061	%	

⁽¹⁾ Método de ensayo de referencia o técnica aceptada por el cliente.

⁽²⁾ Balance de resultados del análisis elemental (del sodio al uranio) por espectrometría de fluorescencia de rayos X. Análisis semicuantitativo en atmósfera de vacío. Equipo: Espectrómetro de Fluorescencia de rayos X de energía dispersiva. SHIMADZU, EDX-800HS.

7.3. ANÁLISIS DE COMPOSICIÓN QUÍMICA EXPRESADA EN ÓXIDOS

PARÁMETRO	RESULTADO	UNIDADES	MÉTODO DE REFERENCIA ⁽¹⁾
Óxido de silicio, SiO ₂	50.636	%	Espectrometría de fluorescencia de rayos X de energía dispersiva ^(2,3)
Óxido de aluminio, Al ₂ O ₃	33.335	%	
Óxido de hierro, Fe ₂ O ₃	9.618	%	
Óxido de magnesio, MgO	2.035	%	
Óxido de potasio, K ₂ O	1.199	%	
Óxido de titanio, TiO ₂	1.044	%	
Óxido de calcio, CaO	0.850	%	
Óxido de azufre, SO ₃	0.662	%	
Óxido de fósforo, P ₂ O ₅	0.387	%	
Óxido de manganeso, MnO	0.154	%	
Óxido de vanadio, V ₂ O ₅	0.049	%	
Óxido de estroncio, SrO	0.031	%	

⁽¹⁾ Método de ensayo o de referencia o técnica aceptada por el cliente.

⁽²⁾ Balance de resultados al 100% de óxidos calculados del análisis elemental (del sodio al uranio) por espectrometría de fluorescencia de rayos X. Análisis semicuantitativo en atmósfera de vacío. Equipo: Espectrómetro de Fluorescencia de rayos X de energía dispersiva. SHIMADZU, EDX-800HS.

⁽³⁾ Resultados expresados en óxidos según pedido del cliente.

8. VALIDEZ DEL INFORME DE ENSAYO

Los resultados del informe de ensayo sólo son válidos para la(s) muestra(s) ensayadas, descrita(s) en el ítem 4 del presente documento.


Bach. David Rojas Morales
Analista
LABICER – UNI


Fabio Jurado Morazzani
Analista
LABICER – UNI




M.Sc. Ily Marilu Maza Mejía
Jefe de Laboratorio
CQP 1149

NOTAS:

- LABICER-UNI no se responsabiliza del muestreo ni de la procedencia de la muestra.
- LABICER-UNI no se hace responsable de la información proporcionada por el cliente, incluidos en los ítems 1 y del 4.1 al 4.2 del presente documento.
- Los resultados de los ensayos obtenidos no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce.
- Este documento carece de validez sin sello y firmas correspondientes.

ANEXO



FIGURA N°1. Muestra de limo de alta plasticidad (CLASIFICACIÓN SUCS MH).

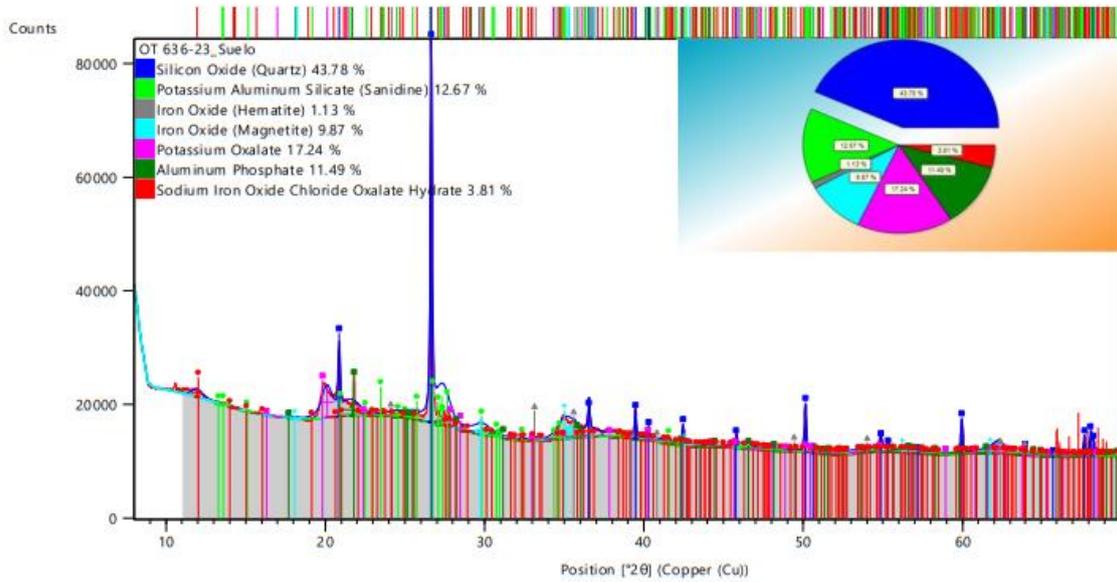


FIGURA N°2. Difractograma de la muestra.



FIGURA N°3. Muestra en el equipo EDX para su análisis.





FIGURA N°4. Espectrómetro de fluorescencia de Rayos X de energía dispersiva (SHIMADZU, EDX-800HS).





INFORME DE ENSAYO N° 1311 – 23 – LABICER

1. **DATOS DEL CLIENTE**
 - 1.1. NOMBRE / RAZÓN SOCIAL : LUIS ENRIQUE CARBAJAL CASTREJON
 - 1.2. D.N.I / R.U.C. : 70989175
 - 1.3. DIRECCIÓN : --
2. **CRONOGRAMA DE FECHAS**
 - 2.1. FECHA DE RECEPCIÓN DE LA MUESTRA : 16 / 10 / 2023
 - 2.2. FECHA DE EJECUCIÓN DEL ENSAYO : 17 / 10 / 2023 al 24 / 10 / 2023
 - 2.3. FECHA DE EMISIÓN DEL INFORME : 24 / 10 / 2023
3. **ANÁLISIS SOLICITADO** : ANÁLISIS DE COMPOSICIÓN QUÍMICA POR DIFRACCIÓN DE RAYOS X Y ESPECTROMETRÍA DE FLUORESCENCIA DE RAYOS X DE ENERGÍA DISPERSIVA
4. **DATOS DE LA MUESTRA**
 - 4.1. TIPO DE MUESTRA : SUELO
 - 4.2. DESCRIPCIÓN DE LA MUESTRA : 01 MUESTRA DE CENIZA DE FONDO DE CARBÓN MINERAL, GENERADA POR LA COMBUSTIÓN DEL MISMO EN UN HORNO ARTESANAL DE LADRILLOS. LA MAYOR PARTE DE SU GRANULOMETRÍA ES FINA, CON PRESENCIA DE ALGUNOS CRISTALES DE CARBÓN MINERAL TRITURADOS.
PROCEDENCIA : LADRILLERA ARTESANAL DEL CENTRO POBLADO SANTA BÁRBARA – CAJAMARCA.
TESIS : "ESTABILIZACIÓN DE SUBRASANTES ARCILLOSAS CON CENIZA DE FONDO Y CEMENTO EN LA REGIÓN CAJAMARCA"
 - 4.3. OBSERVACIONES (SI APLICA) : --
5. **LUGAR DE RECEPCIÓN Y ANÁLISIS** : LABORATORIO LABICER-UNI
6. **CONDICIONES AMBIENTALES** : Temperatura: 22.6°C; Humedad relativa: 62%
7. **RESULTADOS**
 - 7.1. **ANÁLISIS DE COMPOSICIÓN QUÍMICA POR DIFRACCIÓN DE RAYOS X**

PARÁMETRO	RESULTADO	UNIDADES	MÉTODO DE REFERENCIA (1)
Óxido de silicio (Cuarzo), SiO ₂	49.29	%	Difracción de Rayos X (2)
Silicato de aluminio, calcio y sodio (Albita), Na _{0.685} Ca _{0.347} Al _{1.46} Si _{2.54} O ₈	33.53	%	
Óxido de silicio y aluminio (Mullita), Al _{4.54} Si _{1.46} O _{9.73}	7.98	%	
Fosfato de aluminio, AlPO ₄	7.56	%	
Óxido de hierro (Hematita), Fe ₂ O ₃	1.36	%	
Hidróxido de silicato de hierro y magnesio, Fe _{6.5} Mg _{0.5} (Si ₈ O ₂₂ (OH) ₂)	0.28	%	

(1) Método de ensayo de referencia o técnica aceptada por el cliente.

(2) La identificación de las fases cristalinas es el resultado con mayor probabilidad (Score) brindado por el software HighScore Plus V4.9 de Malvern Panalytical utilizando la Base de datos PDF4+ -2023. El análisis semicuantitativo se basa en uso del Método de Refinamiento Rietveld, considerando un balance de las fases cristalinas al 100%. Equipo: DIFRACTÓMETRO DE RAYOS X. PANALYTICAL, EMPYREAN. Ver difractograma en Anexo Figura N°2.



7.2. ANÁLISIS DE COMPOSICIÓN QUÍMICA ELEMENTAL

PARÁMETRO	RESULTADO	UNIDADES	MÉTODO DE REFERENCIA ⁽¹⁾
Silicio, Si	56.806	%	Espectrometría de fluorescencia de rayos X de energía dispersiva ⁽²⁾
Aluminio, Al	26.817	%	
Hierro, Fe	5.630	%	
Calcio, Ca	2.952	%	
Zinc, Zn	1.814	%	
Titanio, Ti	1.624	%	
Potasio, K	1.527	%	
Azufre, S	1.491	%	
Plomo, Pb	0.696	%	
Fósforo, P	0.368	%	
Estroncio, Sr	0.157	%	
Manganeso, Mn	0.075	%	
Cobre, Cu	0.043	%	

⁽¹⁾ Método de ensayo de referencia o técnica aceptada por el cliente.

⁽²⁾ Balance de resultados del análisis elemental (del sodio al uranio) por espectrometría de fluorescencia de rayos X. Análisis semicuantitativo en atmósfera de vacío. Equipo: Espectrómetro de Fluorescencia de rayos X de energía dispersiva. SHIMADZU, EDX-800HS.

7.3. ANÁLISIS DE COMPOSICIÓN QUÍMICA EXPRESADA EN ÓXIDOS

PARÁMETRO	RESULTADO	UNIDADES	MÉTODO DE REFERENCIA ⁽¹⁾
Óxido de silicio, SiO ₂	61.619	%	Espectrometría de fluorescencia de rayos X de energía dispersiva ^(2,3)
Óxido de aluminio, Al ₂ O ₃	29.089	%	
Óxido de hierro, Fe ₂ O ₃	2.908	%	
Óxido de calcio, CaO	1.576	%	
Óxido de azufre, SO ₃	1.518	%	
Óxido de titanio, TiO ₂	1.035	%	
Óxido de zinc, ZnO	0.787	%	
Óxido de potasio, K ₂ O	0.718	%	
Óxido de fósforo, P ₂ O ₅	0.326	%	
Óxido de plomo, PbO	0.301	%	
Óxido de estroncio, SrO	0.068	%	
Óxido de manganeso, MnO	0.036	%	
Óxido de cobre, CuO	0.018	%	

⁽¹⁾ Método de ensayo o de referencia o técnica aceptada por el cliente.

⁽²⁾ Balance de resultados al 100% de óxidos calculados del análisis elemental (del sodio al uranio) por espectrometría de fluorescencia de rayos X. Análisis semicuantitativo en atmósfera de vacío. Equipo: Espectrómetro de Fluorescencia de rayos X de energía dispersiva. SHIMADZU, EDX-800HS.

⁽³⁾ Resultados expresados en óxidos según pedido del cliente.

8. VALIDEZ DEL INFORME DE ENSAYO

Los resultados del informe de ensayo sólo son válidos para la(s) muestra(s) ensayadas, descrita(s) en el ítem 4 del presente documento.


Bach. David Rojas Morales
Analista
LABICER – UNI


Fabio Jurado Morazzani
Analista
LABICER – UNI




M.Sc. Ily Marilú Maza Mejía
Jefe de Laboratorio
CQP 1149

NOTAS:

- LABICER-UNI no se responsabiliza del muestreo ni de la procedencia de la muestra.
- LABICER-UNI no se hace responsable de la información proporcionada por el cliente, incluidos en los ítems 1 y del 4.1 al 4.2 del presente documento.
- Los resultados de los ensayos obtenidos no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce.
- Este documento carece de validez sin sello y firmas correspondientes.

ANEXO

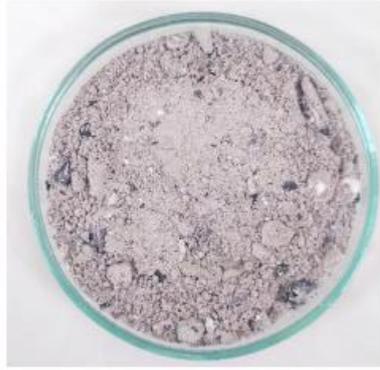


FIGURA N°1. Muestra de ceniza de fondo de carbón mineral.

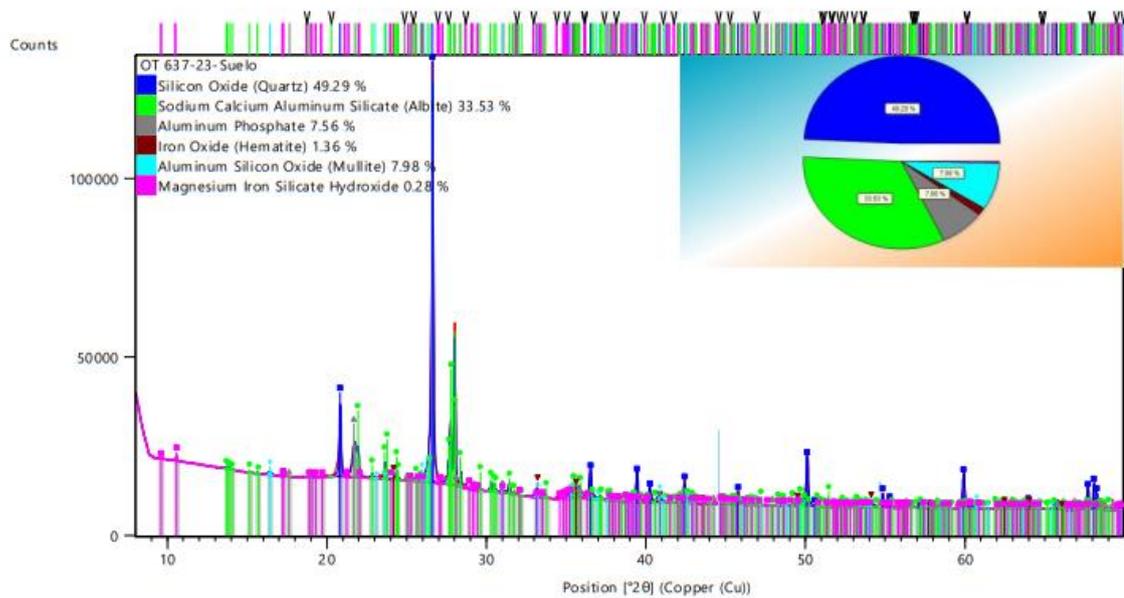


FIGURA N°2. Difractograma de la muestra.



FIGURA N°3. Muestra en el equipo EDX para su análisis.





FIGURA N°4. Espectrómetro de fluorescencia de Rayos X de energía dispersiva (SHIMADZU, EDX-800HS).



Anexo D

Ensayos CBR suelo-ceniza

ENSAYO CBR SUELO NATURAL (SN)

	UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA	RESULTADO DE ENSAYOS Página 1 de 3
	FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL	
CALIFORNIA BEARING RATIO - CBR ASTM D1883		
"ESTABILIZACIÓN DE SUELOS FINOS CON CENIZA DE FONDO Y CEMENTO PARA USO COMO SUBRASANTE EN LA REGIÓN CAJAMARCA"		Muestra: suelo fino Proporción ceniza: 0% Proporción cemento: 0%

INFORME DE ENSAYO DETERMINACIÓN DE CBR EN SUELO COMPACTADO EN LABORATORIO

CARACTERÍSTICAS DE LOS ESPECÍMENES COMPACTADOS

Molde	1		2		3	
Numero de golpes/capa	56		25		10	
Condición de la muestra	inicial	final	inicial	final	inicial	final
Densidad húmeda (g/cm ³)	1.943	1.913	1.789	1.815	1.597	1.695
Densidad seca (g/cm ³)	1.606	1.462	1.476	1.357	1.317	1.225
Contenido de humedad (%)	20.9	30.8	21.2	33.7	21.3	38.3
Expansión (%)	0.0	9.9	0.0	8.7	0.0	7.5

RESULTADOS ENSAYO PRESIÓN - PENETRACIÓN

Molde 56 golpes/capa				Molde 25 golpes/capa				Molde 10 golpes/capa			
Penetración (pulgadas)	Presión (lb/pulg ²)	Presión patrón (lb/pulg ²)	Presión corregida (lb/pulg ²)	Penetración (pulgadas)	Presión (lb/pulg ²)	Presión patrón (lb/pulg ²)	Presión corregida (lb/pulg ²)	Penetración (pulgadas)	Presión (lb/pulg ²)	Presión patrón (lb/pulg ²)	Presión corregida (lb/pulg ²)
0.000	0.0			0.000	0.0			0.000	0.0		
0.025	8.1			0.025	8.1			0.025	5.1		
0.050	13.2			0.050	12.5			0.050	7.3		
0.075	16.9			0.075	16.2			0.075	9.5		
0.100	20.6	1000	20.6	0.100	19.1	1000	19.1	0.100	11.0	1000	11.0
0.125	23.5			0.125	22.0			0.125	12.5		
0.150	26.4			0.150	24.2			0.150	14.0		
0.175	29.4			0.175	26.4			0.175	14.7		
0.200	32.3	1500	32.3	0.200	28.6	1500	28.6	0.200	15.4	1500	15.4
0.300	43.3	1900		0.300	35.2	1900		0.300	19.1	1900	
0.400	54.3	2300		0.400	41.1	2300		0.400	22.8	2300	
0.500	64.6	2600		0.500	48.5	2600		0.500	25.7	2600	

VALOR DE CBR 0.1 PULG. DE PENETRACIÓN

Molde	Golpes/capa	Penetración (pulg)	Presión (Lb/pulg ²)	Presión patrón (Lb/pulg ²)	C.B.R. (%)	CBR al 100% MDS	CBR al 95% MDS
1	56	0.1	21	1000	2.1	2.1%	2.0%
2	25	0.1	19	1000	1.9		
3	10	0.1	11	1000	1.1		

VALOR DE CBR 0.2 PULG. DE PENETRACIÓN

Molde	Golpes/capa	Penetración (pulg)	Presión (Lb/pulg ²)	Presión patrón (Lb/pulg ²)	C.B.R. (%)	CBR al 100% MDS	CBR al 95% MDS
1	56	0.2	32	1500	2.2	2.2%	2.1%
2	25	0.2	29	1500	1.9		
3	10	0.2	15	1500	1.0		

MÉTODO DE COMPACTACIÓN Y CONDICIÓN DE LAS MUESTRAS

Muestra: suelo fino sin aditivos

Método de compactación: Próctor Modificado ASTM D1557

Humedad referencial de compactación (%): 21.3

Periodo de inmersión: siete días

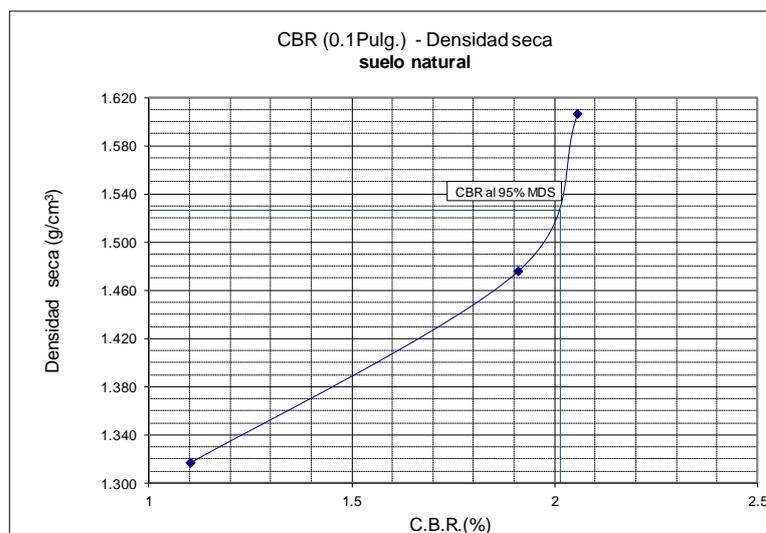
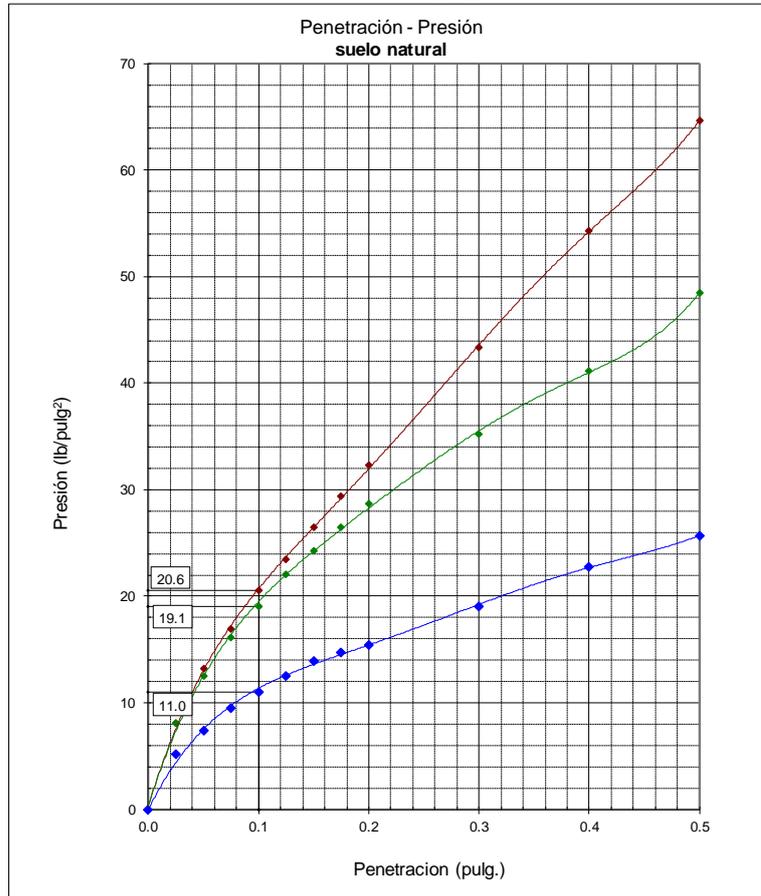
Ejecución/revisión: Luis Carbajal	Supervisión/aprobación: Luisa Shuan	Fecha: octubre 2023
-----------------------------------	-------------------------------------	---------------------



"ESTABILIZACIÓN DE SUELOS FINOS CON CENIZA DE FONDO Y CEMENTO PARA USO COMO SUBRASANTE EN LA REGIÓN CAJAMARCA"

Muestra: suelo fino
Proporción ceniza: 0%
Proporción cemento: 0%

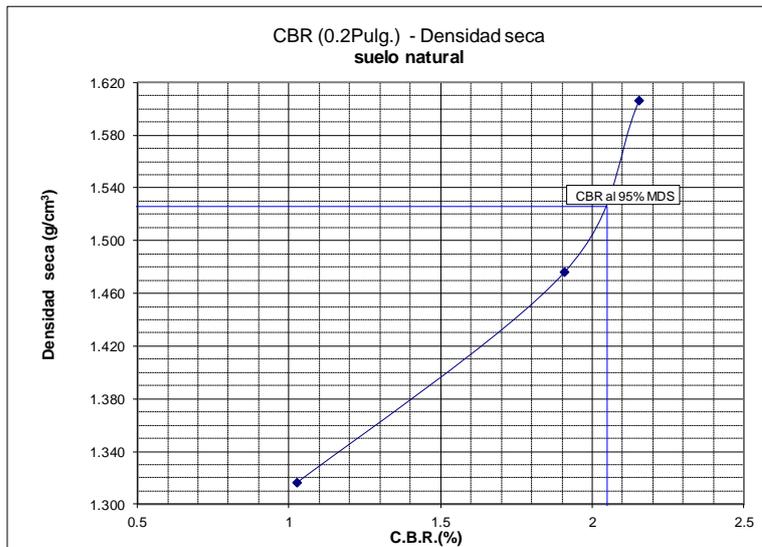
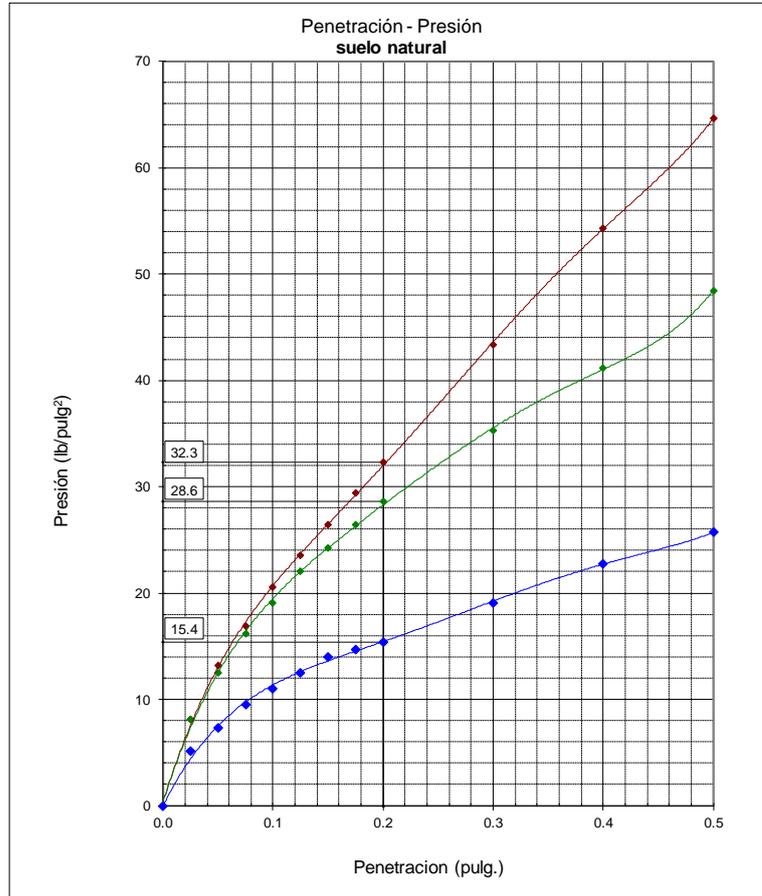
Gráficos CBR - 0.1 pulgadas



CBR al 100% de la MDS (%)	: 2.1
CBR al 95% de la MDS (%)	: 2.0

	UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL	RESULTADO DE ENSAYOS Página 3 de 3
	CALIFORNIA BEARING RATIO - CBR ASTM D1883	Muestra: suelo fino Proporción ceniza: 0% Proporción cemento: 0%
"ESTABILIZACIÓN DE SUELOS FINOS CON CENIZA DE FONDO Y CEMENTO PARA USO COMO SUBRASANTE EN LA REGIÓN CAJAMARCA"		

Gráficos CBR - 0.2 pulgadas



CBR al 100% de la MDS (%)	: 2.2
CBR al 95% de la MDS (%)	: 2.1

ENSAYO CBR SUELO+10% CENIZA DE FONDO

	UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL	RESULTADO DE ENSAYOS Página 1 de 3
	CALIFORNIA BEARING RATIO - CBR ASTM D1883	
"ESTABILIZACIÓN DE SUELOS FINOS CON CENIZA DE FONDO Y CEMENTO PARA USO COMO SUBRASANTE EN LA REGIÓN CAJAMARCA"		Muestra: suelo fino Proporción ceniza: 10% Proporción cemento: 0%

INFORME DE ENSAYO DETERMINACIÓN DE CBR EN SUELO COMPACTADO EN LABORATORIO

CARACTERÍSTICAS DE LOS ESPECÍMENES COMPACTADOS

Molde	1		2		3	
	56		25		10	
Condición de la muestra	inicial	final	inicial	final	inicial	final
Densidad húmeda (g/cm ³)	1.928	1.908	1.809	1.846	1.606	1.707
Densidad seca (g/cm ³)	1.600	1.461	1.505	1.388	1.334	1.246
Contenido de humedad (%)	20.5	30.6	20.2	33.0	20.4	37.0
Expansión (%)	0.0	9.7	0.0	8.5	0.0	7.1

RESULTADOS ENSAYO PRESIÓN - PENETRACIÓN

Molde 56 golpes/capa				Molde 25 golpes/capa				Molde 10 golpes/capa			
Penetración (pulgadas)	Presión (lb/pulg ²)	Presión patrón (lb/pulg ²)	Presión corregida (lb/pulg ²)	Penetración (pulgadas)	Presión (lb/pulg ²)	Presión patrón (lb/pulg ²)	Presión corregida (lb/pulg ²)	Penetración (pulgadas)	Presión (lb/pulg ²)	Presión patrón (lb/pulg ²)	Presión corregida (lb/pulg ²)
0.000	0.0			0.000	0.0			0.000	0.0		
0.025	9.5			0.025	7.3			0.025	4.4		
0.050	14.0			0.050	12.5			0.050	5.9		
0.075	18.4			0.075	16.2			0.075	7.3		
0.100	22.0	1000	22.0	0.100	19.1	1000	19.1	0.100	8.8	1000	8.8
0.125	25.0			0.125	21.6			0.125	10.3		
0.150	27.9			0.150	24.0			0.150	11.7		
0.175	30.9			0.175	26.7			0.175	12.5		
0.200	33.8	1500	33.8	0.200	29.4	1500	29.4	0.200	13.2	1500	13.2
0.300	43.3	1900		0.300	37.5	1900		0.300	16.9	1900	
0.400	51.4	2300		0.400	45.5	2300		0.400	21.3	2300	
0.500	58.7	2600		0.500	52.1	2600		0.500	24.2	2600	

VALOR DE CBR 0.1 PULG. DE PENETRACIÓN

Molde	Golpes/capa	Penetración (pulg)	Presión (Lb/pulg ²)	Presión patrón (Lb/pulg ²)	C.B.R. (%)	CBR al 100% MDS	CBR al 95% MDS
1	56	0.1	22	1000	2.2	2.2%	2.0%
2	25	0.1	19	1000	1.9		
3	10	0.1	9	1000	0.9		

VALOR DE CBR 0.2 PULG. DE PENETRACIÓN

Molde	Golpes/capa	Penetración (pulg)	Presión (Lb/pulg ²)	Presión patrón (Lb/pulg ²)	C.B.R. (%)	CBR al 100% MDS	CBR al 95% MDS
1	56	0.2	34	1500	2.3	2.3%	2.0%
2	25	0.2	29	1500	2.0		
3	10	0.2	13	1500	0.9		

MÉTODO DE COMPACTACIÓN Y CONDICIÓN DE LAS MUESTRAS

Muestra: suelo fino mejorado con 10% de ceniza
 Método de compactación: Próctor Modificado ASTM D1557
 Humedad referencial de compactación (%): 20.6
 Periodo de inmersión: siete días

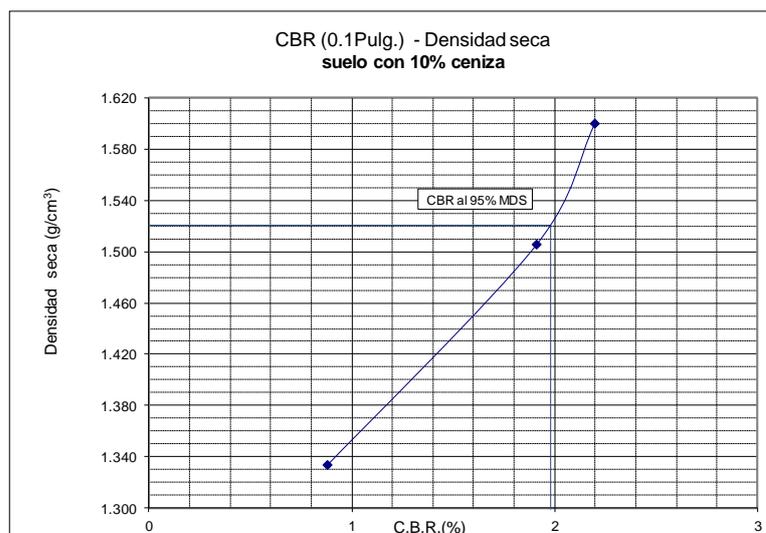
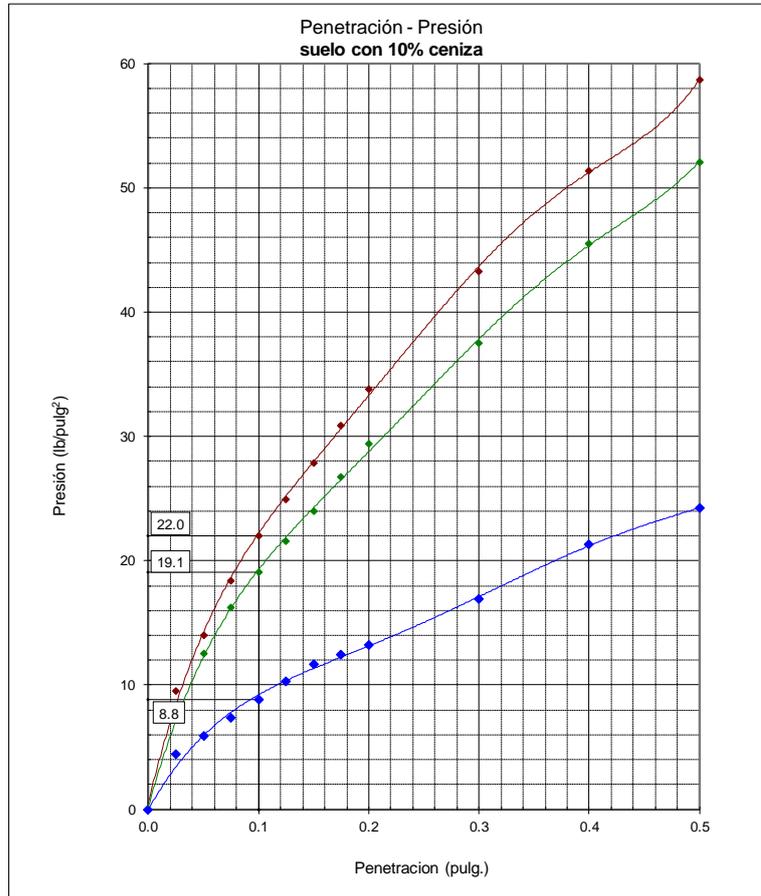
Ejecución/revisión: Luis Carbajal Supervisión/aprobación: Luisa Shuan Fecha: octubre 2023



"ESTABILIZACIÓN DE SUELOS FINOS CON CENIZA DE FONDO Y CEMENTO PARA USO COMO SUBRASANTE EN LA REGIÓN CAJAMARCA"

Muestra: suelo fino
Proporción ceniza: 10%
Proporción cemento: 0%

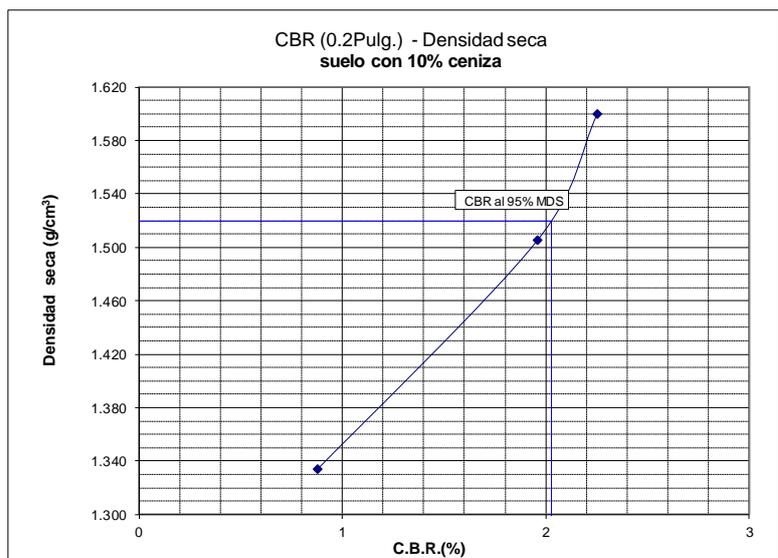
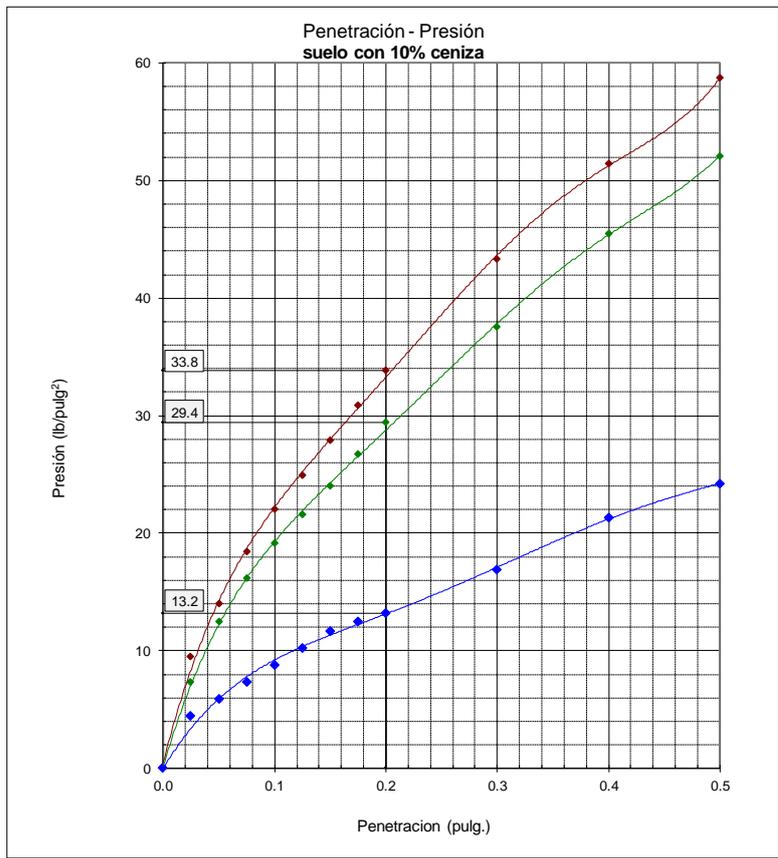
Gráficos CBR - 0.1 pulgadas



CBR al 100% de la MDS (%)	: 2.2
CBR al 95% de la MDS (%)	: 2.0

	UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL	RESULTADO DE ENSAYOS Página 3 de 3
	CALIFORNIA BEARING RATIO - CBR ASTM D1883	Muestra: suelo fino Proporción ceniza: 10% Proporción cemento: 0%
"ESTABILIZACIÓN DE SUELOS FINOS CON CENIZA DE FONDO Y CEMENTO PARA USO COMO SUBRASANTE EN LA REGIÓN CAJAMARCA"		

Gráficos CBR - 0.2 pulgadas



CBR al 100% de la MDS (%)	: 2.3
CBR al 95% de la MDS (%)	: 2.0

ENSAYO CBR SUELO+15% CENIZA DE FONDO

	UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL	RESULTADO DE ENSAYOS Página 1 de 3
	CALIFORNIA BEARING RATIO - CBR ASTM D1883	
"ESTABILIZACIÓN DE SUELOS FINOS CON CENIZA DE FONDO Y CEMENTO PARA USO COMO SUBRASANTE EN LA REGIÓN CAJAMARCA"		Muestra: suelo fino Proporción ceniza: 15% Proporción cemento: 0%

INFORME DE ENSAYO DETERMINACIÓN DE CBR EN SUELO COMPACTADO EN LABORATORIO

CARACTERÍSTICAS DE LOS ESPECÍMENES COMPACTADOS

Molde	1		2		3	
	56		25		10	
Condición de la muestra	inicial	final	inicial	final	inicial	final
Densidad húmeda (g/cm ³)	1.935	1.925	1.795	1.811	1.596	1.678
Densidad seca (g/cm ³)	1.606	1.477	1.484	1.374	1.320	1.240
Contenido de humedad (%)	20.5	30.3	21.0	31.8	20.9	35.3
Expansión (%)	0.0	8.7	0.0	8.0	0.0	6.5

RESULTADOS ENSAYO PRESIÓN - PENETRACIÓN

Molde 56 golpes/capa				Molde 25 golpes/capa				Molde 10 golpes/capa			
Penetración (pulgadas)	Presión (lb/pulg ²)	Presión patrón (lb/pulg ²)	Presión corregida (lb/pulg ²)	Penetración (pulgadas)	Presión (lb/pulg ²)	Presión patrón (lb/pulg ²)	Presión corregida (lb/pulg ²)	Penetración (pulgadas)	Presión (lb/pulg ²)	Presión patrón (lb/pulg ²)	Presión corregida (lb/pulg ²)
0.000	0.0			0.000	0.0			0.000	0.0		
0.025	6.6			0.025	6.6			0.025	5.9		
0.050	11.7			0.050	11.0			0.050	10.3		
0.075	17.0			0.075	14.7			0.075	14.7		
0.100	22.3	1000	22.3	0.100	18.6	1000	18.6	0.100	16.0	1000	16.0
0.125	25.7			0.125	21.8			0.125	19.4		
0.150	29.0			0.150	25.0			0.150	22.8		
0.175	33.0			0.175	27.6			0.175	25.0		
0.200	37.0	1500	37.0	0.200	30.1	1500	30.1	0.200	27.2	1500	27.2
0.300	49.2	1900		0.300	38.9	1900		0.300	33.0	1900	
0.400	60.9	2300		0.400	46.3	2300		0.400	38.2	2300	
0.500	70.5	2600		0.500	52.9	2600		0.500	43.3	2600	

VALOR DE CBR 0.1 PULG. DE PENETRACIÓN

Molde	Golpes/capa	Penetración (pulg)	Presión (Lb/pulg ²)	Presión patrón (Lb/pulg ²)	C.B.R. (%)	CBR al 100% MDS	CBR al 95% MDS
1	56	0.1	22	1000	2.2	2.2%	2.0%
2	25	0.1	19	1000	1.9		
3	10	0.1	16	1000	1.6		

VALOR DE CBR 0.2 PULG. DE PENETRACIÓN

Molde	Golpes/capa	Penetración (pulg)	Presión (Lb/pulg ²)	Presión patrón (Lb/pulg ²)	C.B.R. (%)	CBR al 100% MDS	CBR al 95% MDS
1	56	0.2	37	1500	2.5	2.5%	2.1%
2	25	0.2	30	1500	2.0		
3	10	0.2	27	1500	1.8		

MÉTODO DE COMPACTACIÓN Y CONDICIÓN DE LAS MUESTRAS

Muestra: suelo fino mejorado con 15% de ceniza
 Método de compactación: Próctor Modificado ASTM D1557
 Humedad referencial de compactación (%): 20.3
 Periodo de inmersión: siete días

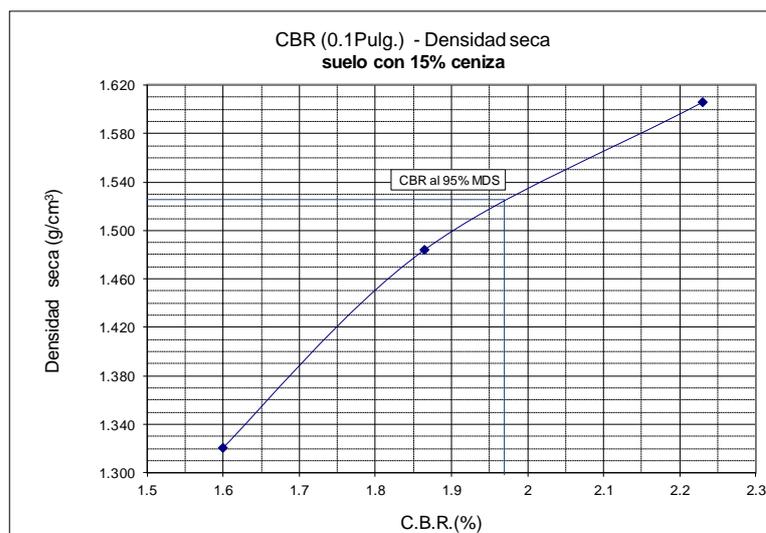
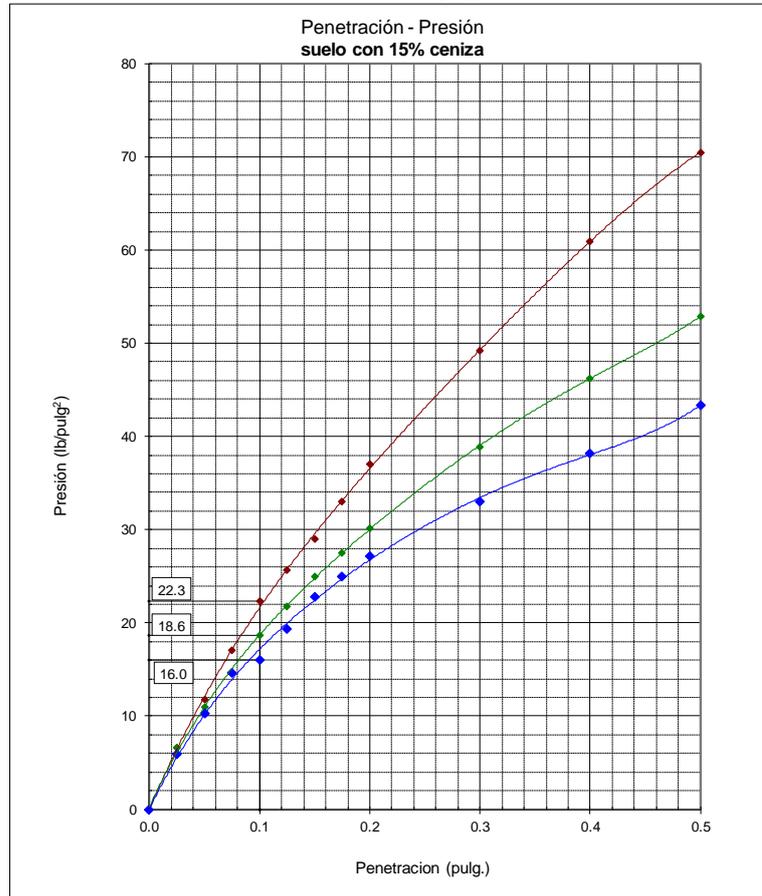
Ejecución/visión: Luis Carbajal Supervisión/aprobación: Luisa Shuan Fecha: octubre 2023



"ESTABILIZACIÓN DE SUELOS FINOS CON CENIZA DE FONDO Y CEMENTO PARA USO COMO SUBRASANTE EN LA REGIÓN CAJAMARCA"

Muestra: suelo fino
Proporción ceniza: 15%
Proporción cemento: 0%

Gráficos CBR - 0.1 pulgadas



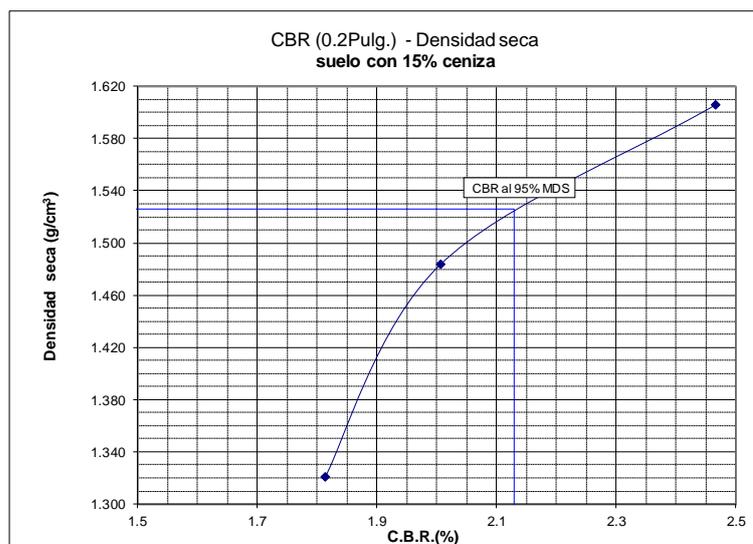
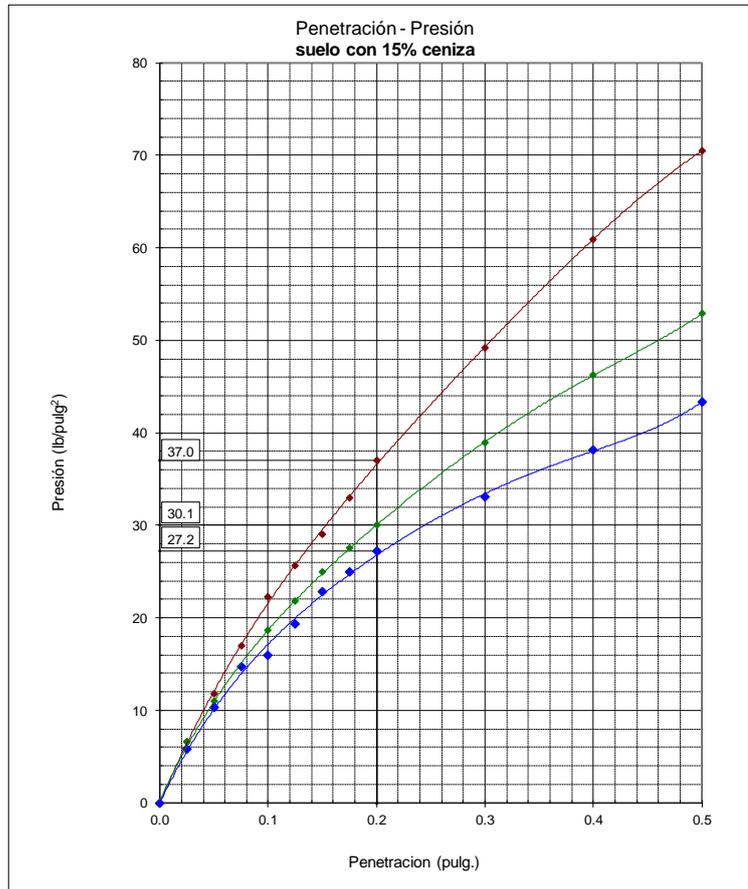
CBR al 100% de la MDS (%)	: 2.2
CBR al 95% de la MDS (%)	: 2.0



"ESTABILIZACIÓN DE SUELOS FINOS CON CENIZA DE FONDO Y CEMENTO PARA USO COMO SUBRASANTE EN LA REGIÓN CAJAMARCA"

Muestra: suelo fino
Proporción ceniza: 15%
Proporción cemento: 0%

Gráficos CBR - 0.2 pulgadas



CBR al 100% de la MDS (%)	: 2.5
CBR al 95% de la MDS (%)	: 2.1

ENSAYO CBR SUELO+20% CENIZA DE FONDO

	UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL	RESULTADO DE ENSAYOS Página 1 de 3
	CALIFORNIA BEARING RATIO - CBR ASTM D1883	
"ESTABILIZACIÓN DE SUELOS FINOS CON CENIZA DE FONDO Y CEMENTO PARA USO COMO SUBRASANTE EN LA REGIÓN CAJAMARCA"		Muestra: suelo fino Proporción ceniza: 20% Proporción cemento: 0%

INFORME DE ENSAYO DETERMINACIÓN DE CBR EN SUELO COMPACTADO EN LABORATORIO

CARACTERÍSTICAS DE LOS ESPECÍMENES COMPACTADOS

Molde	1		2		3	
	56		25		10	
Numero de golpes/capa	inicial	final	inicial	final	inicial	final
Densidad húmeda (g/cm ³)	1.930	2.002	1.821	1.929	1.640	1.784
Densidad seca (g/cm ³)	1.610	1.498	1.521	1.425	1.370	1.301
Contenido de humedad (%)	19.9	33.6	19.7	35.4	19.7	37.1
Expansión (%)	0.0	7.4	0.0	6.8	0.0	5.3

RESULTADOS ENSAYO PRESIÓN - PENETRACIÓN

Molde 56 golpes/capa				Molde 25 golpes/capa				Molde 10 golpes/capa			
Penetración (pulgadas)	Presión (lb/pulg ²)	Presión patrón (lb/pulg ²)	Presión corregida (lb/pulg ²)	Penetración (pulgadas)	Presión (lb/pulg ²)	Presión patrón (lb/pulg ²)	Presión corregida (lb/pulg ²)	Penetración (pulgadas)	Presión (lb/pulg ²)	Presión patrón (lb/pulg ²)	Presión corregida (lb/pulg ²)
0.000	0.0			0.000	0.0			0.000	0.0		
0.025	7.6			0.025	5.8			0.025	4.0		
0.050	13.1			0.050	13.1			0.050	9.5		
0.075	18.5			0.075	18.5			0.075	13.1		
0.100	25.8	1000	25.8	0.100	24.0	1000	24.0	0.100	16.7	1000	16.7
0.125	33.0			0.125	30.3			0.125	20.3		
0.150	40.3			0.150	36.7			0.150	24.0		
0.175	45.7			0.175	42.1			0.175	26.7		
0.200	51.2	1500	51.2	0.200	47.5	1500	47.5	0.200	29.4	1500	29.4
0.300	67.5	1900		0.300	65.7	1900		0.300	36.7	1900	
0.400	80.2	2300		0.400	78.4	2300		0.400	43.9	2300	
0.500	92.9	2600		0.500	92.9	2600		0.500	49.3	2600	

VALOR DE CBR 0.1 PULG. DE PENETRACIÓN

Molde	Golpes/capa	Penetración (pulg)	Presión (Lb/pulg ²)	Presión patrón (Lb/pulg ²)	C.B.R. (%)	CBR al 100% MDS	CBR al 95% MDS
1	56	0.1	26	1000	2.6	2.6%	2.4%
2	25	0.1	24	1000	2.4		
3	10	0.1	17	1000	1.7		

VALOR DE CBR 0.2 PULG. DE PENETRACIÓN

Molde	Golpes/capa	Penetración (pulg)	Presión (Lb/pulg ²)	Presión patrón (Lb/pulg ²)	C.B.R. (%)	CBR al 100% MDS	CBR al 95% MDS
1	56	0.2	51	1500	3.4	3.4%	3.2%
2	25	0.2	48	1500	3.2		
3	10	0.2	29	1500	2.0		

MÉTODO DE COMPACTACIÓN Y CONDICIÓN DE LAS MUESTRAS

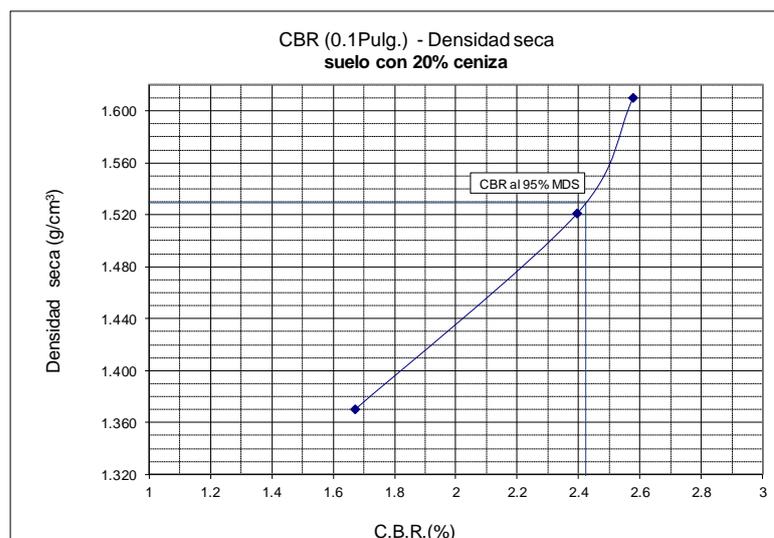
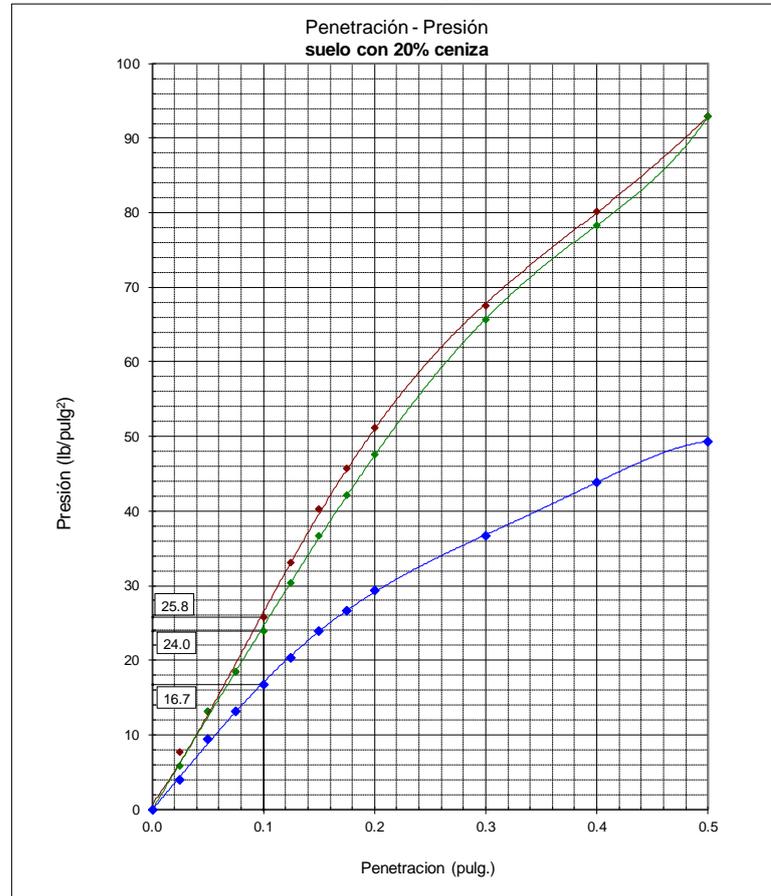
Muestra: suelo fino mejorado con 20% de ceniza
 Método de compactación: Próctor Modificado ASTM D1557
 Humedad referencial de compactación (%): 20.0
 Periodo de inmersión: siete días



"ESTABILIZACIÓN DE SUELOS FINOS CON CENIZA DE FONDO Y CEMENTO PARA USO
COMO SUBRASANTE EN LA REGIÓN CAJAMARCA"

Muestra: **suelo fino**
Proporción ceniza: **20%**
Proporción cemento: **0%**

Gráficos CBR - 0.1 pulgadas



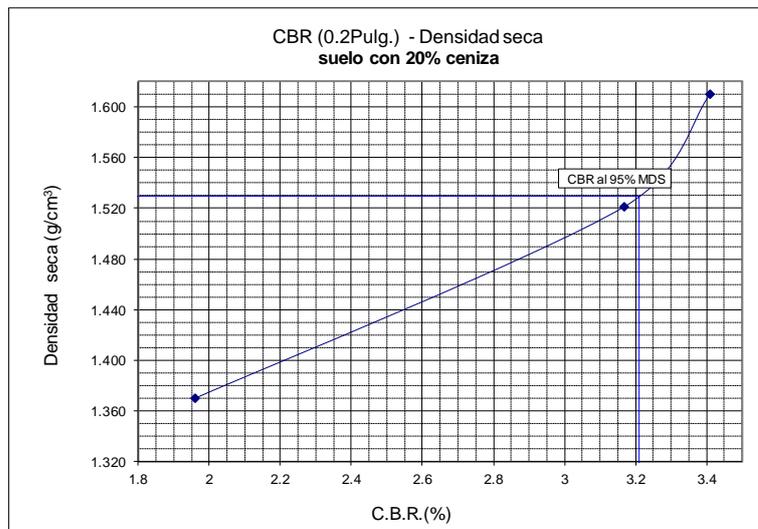
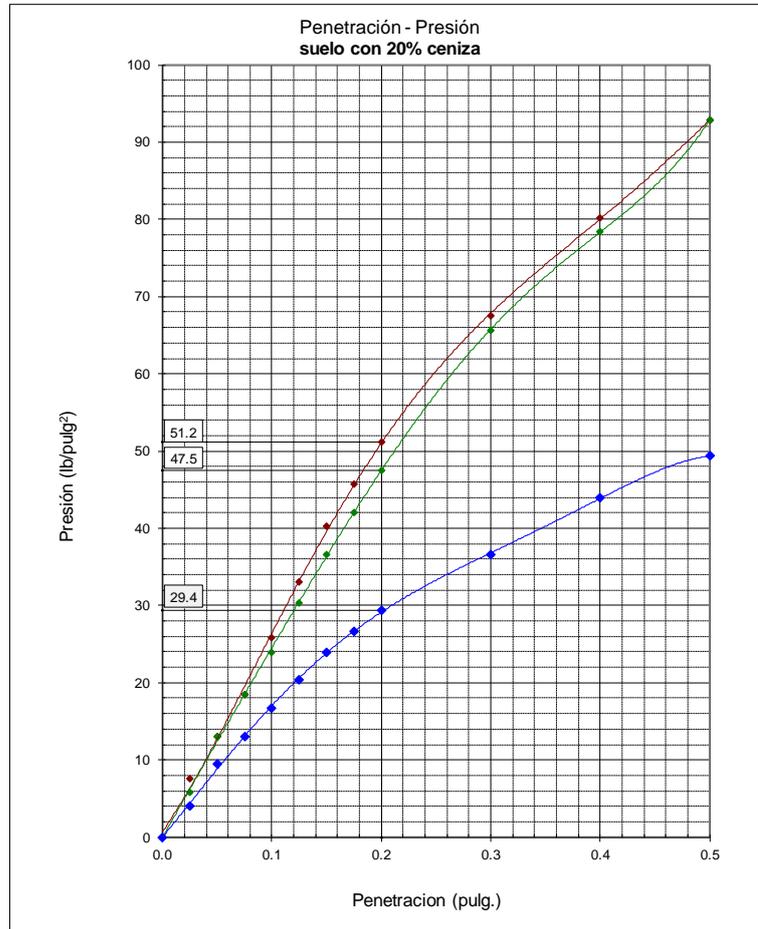
CBR al 100% de la MDS (%)	: 2.6
CBR al 95% de la MDS (%)	: 2.4



"ESTABILIZACIÓN DE SUELOS FINOS CON CENIZA DE FONDO Y CEMENTO PARA USO COMO SUBRASANTE EN LA REGIÓN CAJAMARCA"

Muestra: suelo fino
Proporción ceniza: 20%
Proporción cemento: 0%

Gráficos CBR - 0.2 pulgadas



CBR al 100% de la MDS (%) : 3.4
CBR al 95% de la MDS (%) : 3.2

ENSAYO CBR SUELO+25% CENIZA DE FONDO

	UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL	RESULTADO DE ENSAYOS Página 1 de 3
	CALIFORNIA BEARING RATIO - CBR ASTM D1883	
"ESTABILIZACIÓN DE SUELOS FINOS CON CENIZA DE FONDO Y CEMENTO PARA USO COMO SUBRASANTE EN LA REGIÓN CAJAMARCA"		Muestra: suelo fino Proporción ceniza: 25% Proporción cemento: 0%

INFORME DE ENSAYO DETERMINACIÓN DE CBR EN SUELO COMPACTADO EN LABORATORIO

CARACTERÍSTICAS DE LOS ESPECÍMENES COMPACTADOS

Molde	1		2		3	
	56		25		10	
Condición de la muestra	inicial	final	inicial	final	inicial	final
Densidad húmeda (g/cm ³)	1.914	1.996	1.805	1.930	1.630	1.794
Densidad seca (g/cm ³)	1.602	1.505	1.506	1.422	1.361	1.300
Contenido de humedad (%)	19.5	32.7	19.9	35.7	19.7	38.0
Expansión (%)	0.0	6.5	0.0	5.9	0.0	4.7

RESULTADOS ENSAYO PRESIÓN - PENETRACIÓN

Molde 56 golpes/capa				Molde 25 golpes/capa				Molde 10 golpes/capa			
Penetración (pulgadas)	Presión (lb/pulg ²)	Presión patrón (lb/pulg ²)	Presión corregida (lb/pulg ²)	Penetración (pulgadas)	Presión (lb/pulg ²)	Presión patrón (lb/pulg ²)	Presión corregida (lb/pulg ²)	Penetración (pulgadas)	Presión (lb/pulg ²)	Presión patrón (lb/pulg ²)	Presión corregida (lb/pulg ²)
0.000	0.0			0.000	0.0			0.000	0.0		
0.025	5.8			0.025	5.8			0.025	2.2		
0.050	13.1			0.050	11.3			0.050	5.8		
0.075	20.3			0.075	18.5			0.075	9.5		
0.100	25.8	1000	25.8	0.100	24.0	1000	24.0	0.100	13.1	1000	13.1
0.125	33.0			0.125	31.2			0.125	16.7		
0.150	40.3			0.150	38.5			0.150	20.3		
0.175	48.4			0.175	44.8			0.175	24.0		
0.200	56.6	1500	56.6	0.200	51.2	1500	51.2	0.200	27.6	1500	27.6
0.300	82.0	1900		0.300	71.1	1900		0.300	34.8	1900	
0.400	101.9	2300		0.400	85.6	2300		0.400	42.1	2300	
0.500	120.1	2600		0.500	98.3	2600		0.500	47.5	2600	

VALOR DE CBR 0.1 PULG. DE PENETRACIÓN

Molde	Golpes/capa	Penetración (pulg)	Presión (Lb/pulg ²)	Presión patrón (Lb/pulg ²)	C.B.R. (%)	CBR al 100% MDS	CBR al 95% MDS
1	56	0.1	26	1000	2.6	2.6%	2.5%
2	25	0.1	24	1000	2.4		
3	10	0.1	13	1000	1.3		

VALOR DE CBR 0.2 PULG. DE PENETRACIÓN

Molde	Golpes/capa	Penetración (pulg)	Presión (Lb/pulg ²)	Presión patrón (Lb/pulg ²)	C.B.R. (%)	CBR al 100% MDS	CBR al 95% MDS
1	56	0.2	57	1500	3.8	3.8%	3.5%
2	25	0.2	51	1500	3.4		
3	10	0.2	28	1500	1.8		

MÉTODO DE COMPACTACIÓN Y CONDICIÓN DE LAS MUESTRAS

Muestra: suelo fino mejorado con 25% de ceniza
Método de compactación: Próctor Modificado ASTM D1557
Humedad referencial de compactación: 19.5
Periodo de inmersión: siete días

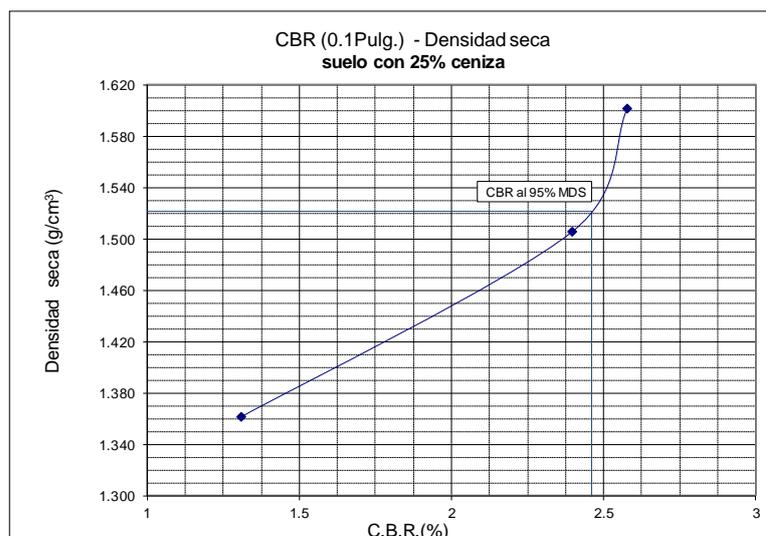
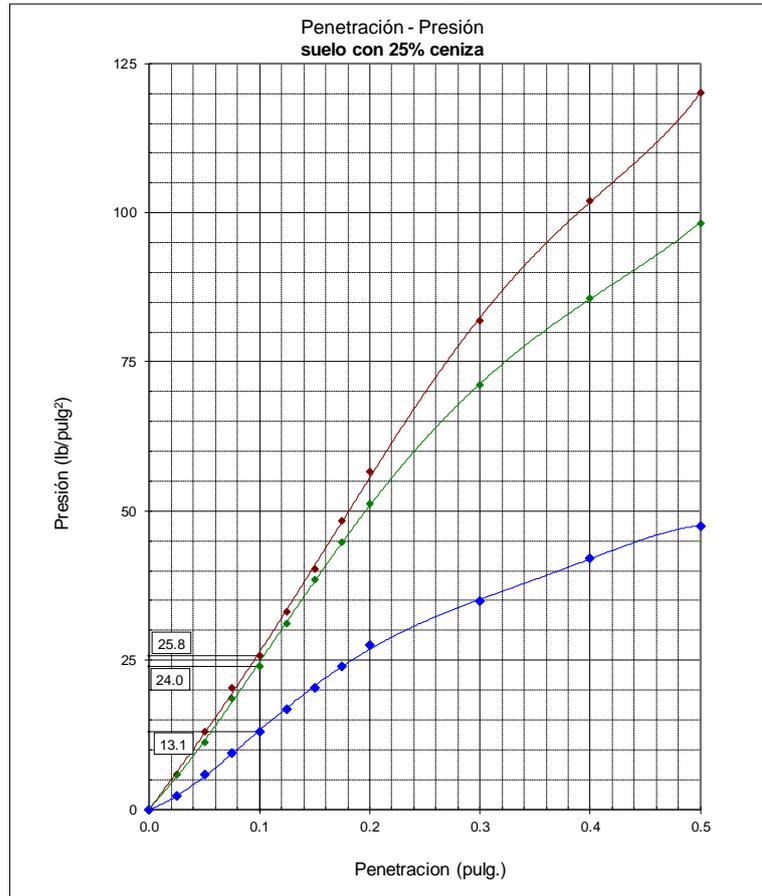
Ejecución/revisión: Luis Carbajal Supervisión/aprobación: Luisa Shuan Fecha: octubre 2023



"ESTABILIZACIÓN DE SUELOS FINOS CON CENIZA DE FONDO Y CEMENTO PARA USO COMO SUBRASANTE EN LA REGIÓN CAJAMARCA"

Muestra: suelo fino
Proporción ceniza: 25%
Proporción cemento: 0%

Gráficos CBR - 0.1 pulgadas



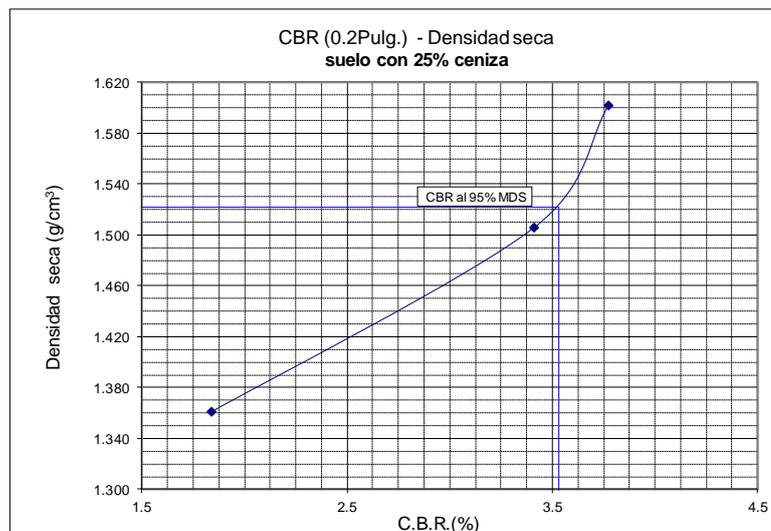
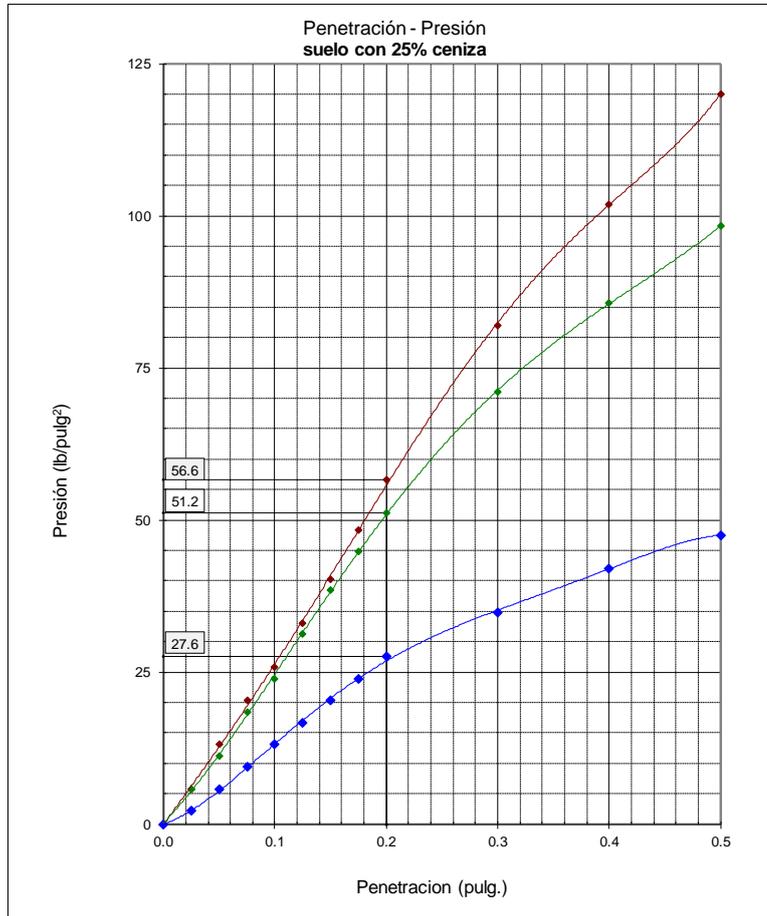
CBR al 100% de la MDS (%)	: 2.6
CBR al 95% de la MDS (%)	: 2.5



"ESTABILIZACIÓN DE SUELOS FINOS CON CENIZA DE FONDO Y CEMENTO PARA USO
COMO SUBRASANTE EN LA REGIÓN CAJAMARCA"

Muestra: suelo fino
Proporción ceniza: 25%
Proporción cemento: 0%

Gráficos CBR - 0.2 pulgadas



CBR al 100% de la MDS (%)	: 3.8
CBR al 95% de la MDS (%)	: 3.5

ENSAYO CBR SUELO+30% CENIZA DE FONDO

	UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL	RESULTADO DE ENSAYOS Página 1 de 3
	CALIFORNIA BEARING RATIO - CBR ASTM D1883	
"ESTABILIZACIÓN DE SUELOS FINOS CON CENIZA DE FONDO Y CEMENTO PARA USO COMO SUBRASANTE EN LA REGIÓN CAJAMARCA"		Muestra: suelo fino Proporción ceniza: 30% Proporción cemento: 0%

INFORME DE ENSAYO DETERMINACIÓN DE CBR EN SUELO COMPACTADO EN LABORATORIO

CARACTERÍSTICAS DE LOS ESPECÍMENES COMPACTADOS

Molde	1		2		3	
Numero de golpes/capa	56		25		10	
Condición de la muestra	inicial	final	inicial	final	inicial	final
Densidad húmeda (g/cm ³)	1.878	1.982	1.780	1.935	1.613	1.797
Densidad seca (g/cm ³)	1.582	1.491	1.502	1.421	1.364	1.302
Contenido de humedad (%)	18.7	33.0	18.5	36.1	18.3	38.0
Expansión (%)	0.0	6.1	0.0	5.7	0.0	4.8

RESULTADOS ENSAYO PRESIÓN - PENETRACIÓN

Molde 56 golpes/capa				Molde 25 golpes/capa				Molde 10 golpes/capa			
Penetración (pulgadas)	Presión (lb/pulg ²)	Presión patrón (lb/pulg ²)	Presión corregida (lb/pulg ²)	Penetración (pulgadas)	Presión (lb/pulg ²)	Presión patrón (lb/pulg ²)	Presión corregida (lb/pulg ²)	Penetración (pulgadas)	Presión (lb/pulg ²)	Presión patrón (lb/pulg ²)	Presión corregida (lb/pulg ²)
0.000	0.0			0.000	0.0			0.000	0.0		
0.025	5.8			0.025	5.8			0.025	4.0		
0.050	11.3			0.050	9.5			0.050	7.6		
0.075	18.5			0.075	14.9			0.075	13.1		
0.100	25.8	1000	25.8	0.100	24.0	1000	24.0	0.100	18.5	1000	18.5
0.125	33.9			0.125	29.4			0.125	23.1		
0.150	42.1			0.150	34.8			0.150	27.6		
0.175	52.1			0.175	40.3			0.175	32.1		
0.200	62.0	1500	62.0	0.200	45.7	1500	45.7	0.200	36.7	1500	36.7
0.300	94.7	1900		0.300	63.9	1900		0.300	47.5	1900	
0.400	125.5	2300		0.400	80.2	2300		0.400	58.4	2300	
0.500	145.5	2600		0.500	92.9	2600		0.500	65.7	2600	

VALOR DE CBR 0.1 PULG. DE PENETRACIÓN

Molde	Golpes/capa	Penetración (pulg)	Presión (Lb/pulg ²)	Presión patrón (Lb/pulg ²)	C.B.R. (%)	CBR al 100% MDS	CBR al 95% MDS
1	56	0.1	26	1000	2.6	2.6%	2.4%
2	25	0.1	24	1000	2.4		
3	10	0.1	19	1000	1.9		

VALOR DE CBR 0.2 PULG. DE PENETRACIÓN

Molde	Golpes/capa	Penetración (pulg)	Presión (Lb/pulg ²)	Presión patrón (Lb/pulg ²)	C.B.R. (%)	CBR al 100% MDS	CBR al 95% MDS
1	56	0.2	62	1500	4.1	4.1%	3.1%
2	25	0.2	46	1500	3.0		
3	10	0.2	37	1500	2.4		

MÉTODO DE COMPACTACIÓN Y CONDICIÓN DE LAS MUESTRAS

Muestra: suelo fino mejorado con 30% de ceniza
 Método de compactación: Próctor Modificado ASTM D1557
 Humedad referencial de compactación: 19.0
 Periodo de inmersión: siete días

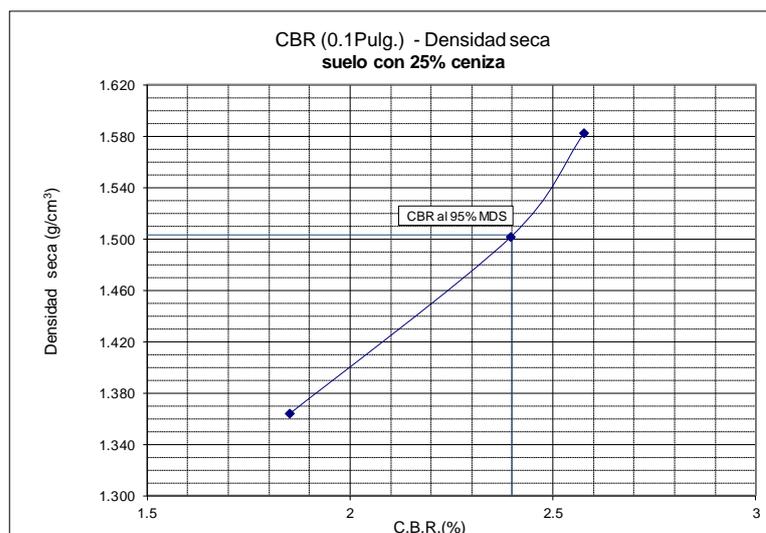
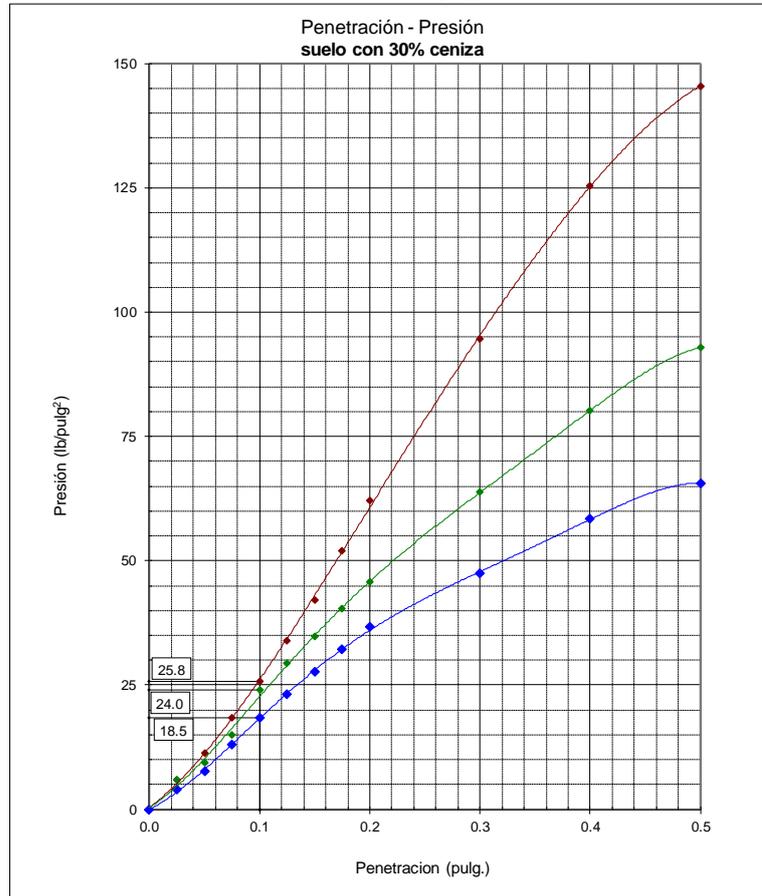
Ejecución/revisión: Luis Carbajal Supervisión/aprobación: Luisa Shuan Fecha: octubre 2023



"ESTABILIZACIÓN DE SUELOS FINOS CON CENIZA DE FONDO Y CEMENTO PARA USO COMO SUBRASANTE EN LA REGIÓN CAJAMARCA"

Muestra: suelo fino
Proporción ceniza: 30%
Proporción cemento: 0%

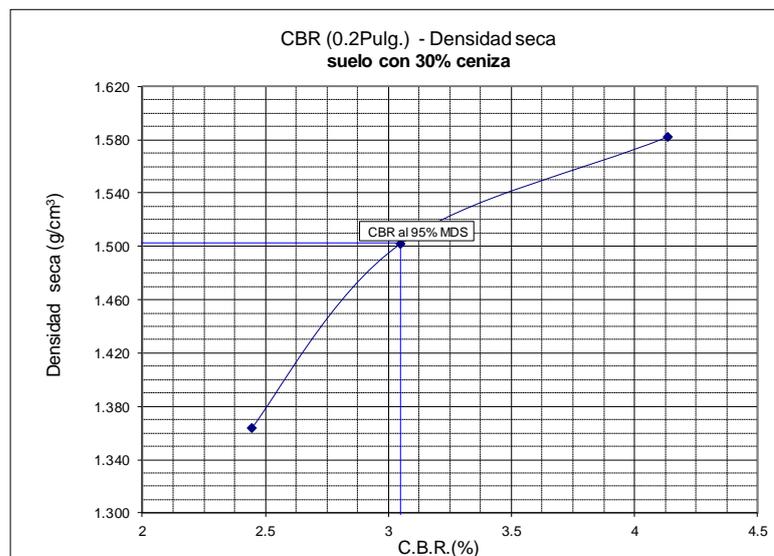
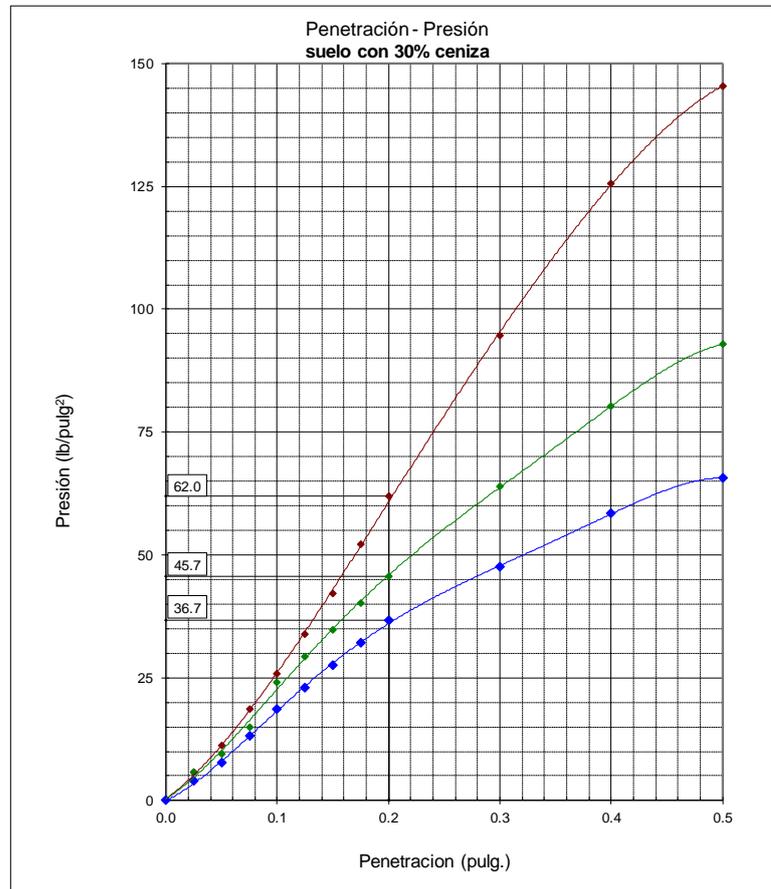
Gráficos CBR - 0.1 pulgadas



CBR al 100% de la MDS (%)	: 2.6
CBR al 95% de la MDS (%)	: 2.4

	UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL	RESULTADO DE ENSAYOS Página 3 de 3
	CALIFORNIA BEARING RATIO - CBR ASTM D1883	
"ESTABILIZACIÓN DE SUELOS FINOS CON CENIZA DE FONDO Y CEMENTO PARA USO COMO SUBRASANTE EN LA REGIÓN CAJAMARCA"		Muestra: suelo fino Proporción ceniza: 30% Proporción cemento: 0%

Gráficos CBR - 0.2 pulgadas



CBR al 100% de la MDS (%)	: 4.1
CBR al 95% de la MDS (%)	: 3.1

Anexo E

Ensayos CBR suelo-ceniza-cemento

ENSAYO CBR SN+1%CEMENTO

	UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL	RESULTADO DE ENSAYOS Página 1 de 3
	CALIFORNIA BEARING RATIO - CBR ASTM D1883	
"ESTABILIZACIÓN DE SUELOS FINOS CON CENIZA DE FONDO Y CEMENTO PARA USO COMO SUBRASANTE EN LA REGIÓN CAJAMARCA"		Muestra: suelo fino Proporción ceniza: 0% Proporción cemento: 1%

INFORME DE ENSAYO DETERMINACIÓN DE CBR EN SUELO COMPACTADO EN LABORATORIO

CARACTERÍSTICAS DE LOS ESPECÍMENES COMPACTADOS

Molde	1		2		3	
Numero de golpes/capa	56		25		10	
Condición de la muestra	inicial	final	inicial	final	inicial	final
Densidad húmeda (g/cm ³)	1.946	1.981	1.791	1.877	1.589	1.705
Densidad seca (g/cm ³)	1.610	1.497	1.481	1.414	1.323	1.273
Contenido de humedad (%)	20.9	32.3	20.9	32.8	20.1	34.0
Expansión (%)	0.0	7.6	0.0	4.7	0.0	3.9

RESULTADOS ENSAYOS PRESIÓN - PENETRACIÓN

Molde 56 golpes/capa				Molde 25 golpes/capa				Molde 10 golpes/capa			
Penetración (pulgadas)	Presión (lb/pulg ²)	Presión patrón (lb/pulg ²)	Presión corregida (lb/pulg ²)	Penetración (pulgadas)	Presión (lb/pulg ²)	Presión patrón (lb/pulg ²)	Presión corregida (lb/pulg ²)	Penetración (pulgadas)	Presión (lb/pulg ²)	Presión patrón (lb/pulg ²)	Presión corregida (lb/pulg ²)
0.000	0.0			0.000	0.0			0.000	0.0		
0.025	11.0			0.025	9.3			0.025	10.3		
0.050	22.0			0.050	17.7			0.050	20.6		
0.075	34.5			0.075	26.2			0.075	27.2		
0.100	46.3	1000	46.3	0.100	35.5	1000	35.5	0.100	32.3	1000	32.3
0.125	55.1			0.125	41.6			0.125	37.5		
0.150	63.9			0.150	50.1			0.150	40.4		
0.175	72.0			0.175	57.8			0.175	44.8		
0.200	77.8	1500	77.8	0.200	63.2	1500	63.2	0.200	48.5	1500	48.5
0.250	90.0			0.250	74.0			0.250	55.0		
0.300	101.3	1900		0.300	81.7	1900		0.300	58.7	1900	
0.400	115.3	2300		0.400	95.6	2300		0.400	67.6	2300	
0.500	132.2	2600		0.500	106.4	2600		0.500	77.8	2600	

VALOR DE CBR 0.1 PULG. DE PENETRACIÓN

Molde	Golpes/capa	Penetración (pulg)	Presión (Lb/pulg ²)	Presión patrón (Lb/pulg ²)	C.B.R. (%)	CBR 100% MDS	CBR 95% MDS
1	56	0.1	46.3	1000	4.6	4.6	3.9
2	25	0.1	35.5	1000	3.5		
3	10	0.1	32.3	1000	3.2		

VALOR DE CBR 0.2 PULG. DE PENETRACIÓN

Molde	Golpes/capa	Penetración (pulg)	Presión (Lb/pulg ²)	Presión patrón (Lb/pulg ²)	C.B.R. (%)	CBR 100% MDS	CBR 95% MDS
1	56	0.2	77.8	1500	5.2	5.2	4.6
2	25	0.2	63.2	1500	4.2		
3	10	0.2	48.5	1500	3.2		

MÉTODO DE COMPACTACIÓN Y CONDICIÓN DE LAS MUESTRAS

Muestra: suelo fino mejorado con 1% de cemento
 Método de compactación: Próctor Modificado ASTM D1557
 Humedad referencial de compactación: 21.0%
 Periodo de reposo en ambiente controlado: siete días
 Periodo de inmersión: siete días.

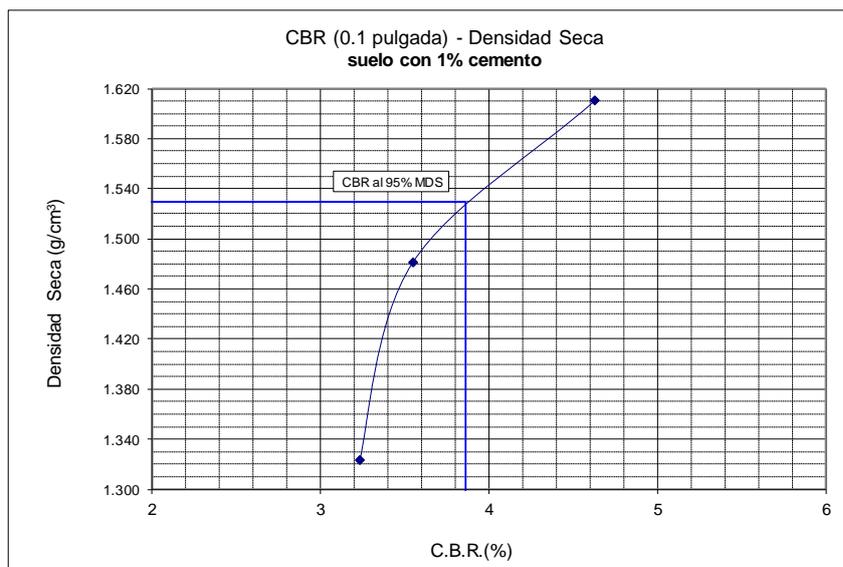
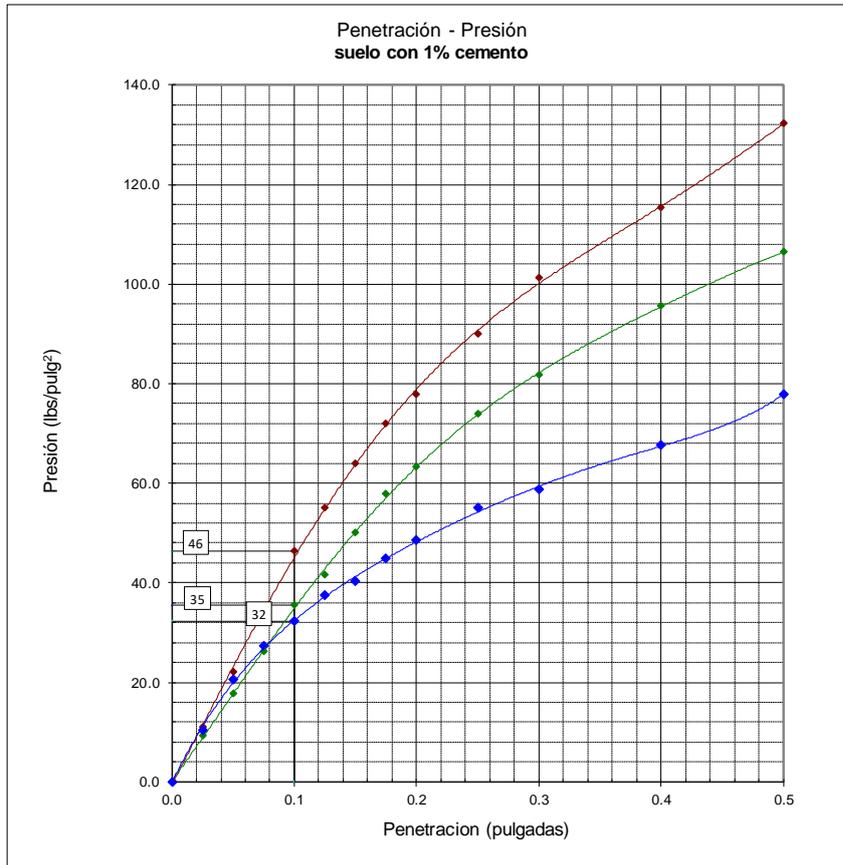
Ejecución/visión: Luis Carbajal Supervisión/aprobación: Luisa Shuan Fecha: Noviembre 2023



"ESTABILIZACIÓN DE SUELOS FINOS CON CENIZA DE FONDO Y CEMENTO PARA USO COMO SUBRASANTE EN LA REGIÓN CAJAMARCA"

Muestra: suelo fino
Proporción ceniza: 0%
Proporción cemento: 1%

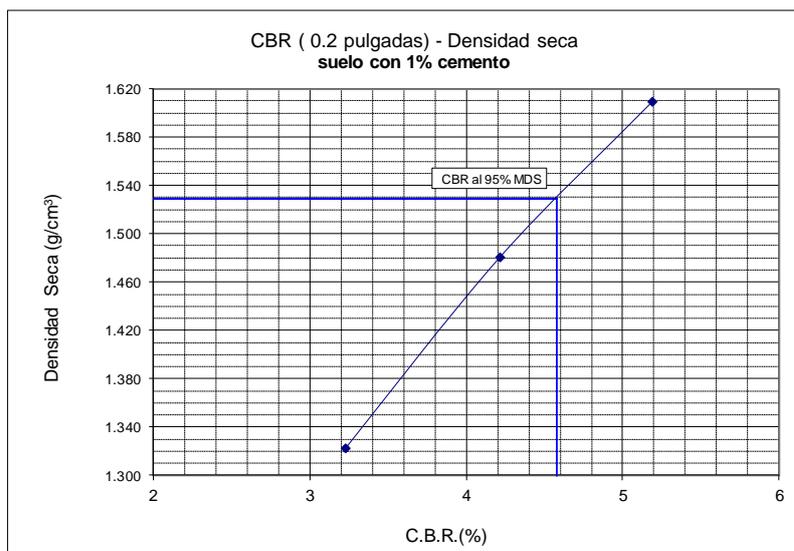
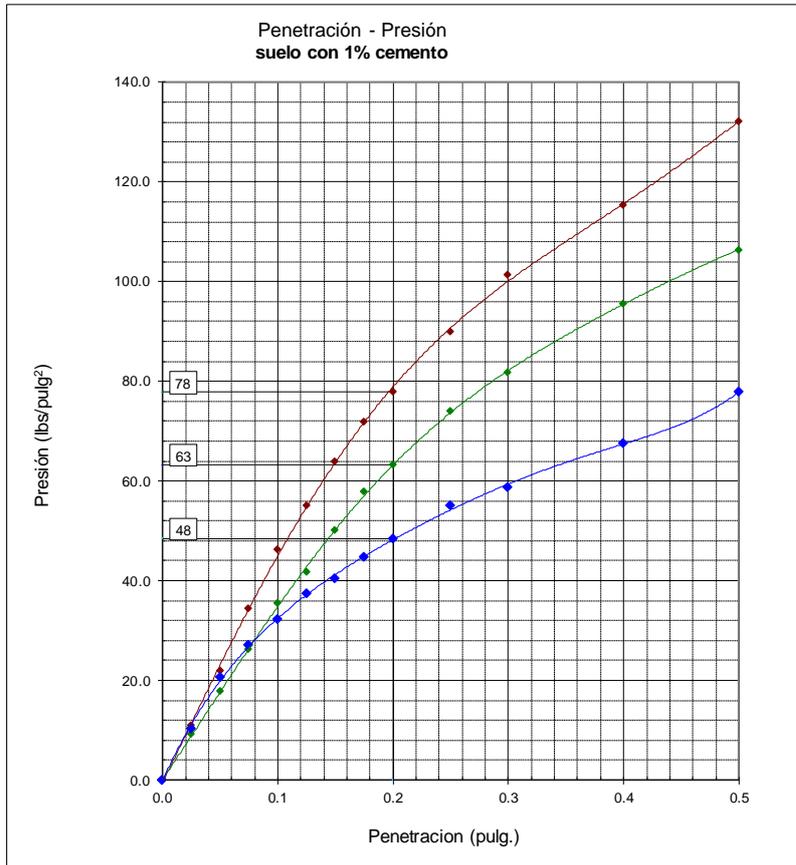
Gráficos CBR - 0.1 pulgadas



CBR (0.1 Pulg.) al 100% de la MDS : 4.6%
CBR (0.1 Pulg.) al 95% de la MDS : 3.9%

	UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL	RESULTADO DE ENSAYOS Página 3 de 3
	CALIFORNIA BEARING RATIO - CBR ASTM D1883	
"ESTABILIZACIÓN DE SUELOS FINOS CON CENIZA DE FONDO Y CEMENTO PARA USO COMO SUBRASANTE EN LA REGIÓN CAJAMARCA"		Muestra: suelo fino Proporción ceniza: 0% Proporción cemento: 1%

Gráficos CBR - 0.2 pulgadas



CBR (0.2 Pulg.) al 100% de la MDS : 5.2%
 CBR (0.2 Pulg.) al 95% de la MDS : 4.6%

ENSAYO CBR SUELO+1%CEMENTO+10%CENIZA DE FONDO

	UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA	RESULTADO DE ENSAYOS Página 1 de 3
	FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL	
CALIFORNIA BEARING RATIO - CBR ASTM D1883		
"ESTABILIZACIÓN DE SUELOS FINOS CON CENIZA DE FONDO Y CEMENTO PARA USO COMO SUBRASANTE EN LA REGIÓN CAJAMARCA"		Muestra: suelo fino Proporción ceniza: 10% Proporción cemento: 1%

INFORME DE ENSAYO DETERMINACIÓN DE CBR EN SUELO COMPACTADO EN LABORATORIO

CARACTERÍSTICAS DE LOS ESPECÍMENES COMPACTADOS

Molde	1		2		3	
Numero de golpes/capa	56		25		10	
Condición de la muestra	inicial	final	inicial	final	inicial	final
Densidad húmeda (g/cm ³)	1.930	1.988	1.779	1.854	1.605	1.689
Densidad seca (g/cm ³)	1.602	1.508	1.477	1.406	1.332	1.279
Contenido de humedad (%)	20.5	31.8	20.4	31.9	20.5	32.0
Expansión (%)	0.0	6.2	0.0	5.1	0.0	4.1

RESULTADOS ENSAYOS PRESIÓN - PENETRACIÓN

Molde 56 golpes/capa				Molde 25 golpes/capa				Molde 10 golpes/capa			
Penetración (pulgadas)	Presión (lb/pulg ²)	Presión patrón (lb/pulg ²)	Presión corregida (lb/pulg ²)	Penetración (pulgadas)	Presión (lb/pulg ²)	Presión patrón (lb/pulg ²)	Presión corregida (lb/pulg ²)	Penetración (pulgadas)	Presión (lb/pulg ²)	Presión patrón (lb/pulg ²)	Presión corregida (lb/pulg ²)
0.000	0.0			0.000	0.0			0.000	0.0		
0.025	17.2			0.025	15.0			0.025	10.4		
0.050	35.4			0.050	29.8			0.050	24.8		
0.075	56.2			0.075	40.7			0.075	34.0		
0.100	72.3	1000	72.3	0.100	54.0	1000	54.0	0.100	43.8	1000	43.8
0.125	85.0			0.125	62.3			0.125	51.6		
0.150	101.0			0.150	74.2			0.150	60.6		
0.175	112.0			0.175	85.5			0.175	67.2		
0.200	123.2	1500	123.2	0.200	92.3	1500	92.3	0.200	72.7	1500	72.7
0.250	145.0			0.250	110.3			0.250	83.2		
0.300	165.2	1900		0.300	125.0	1900		0.300	91.2	1900	
0.400	190.0	2300		0.400	145.0	2300		0.400	105.0	2300	
0.500	205.9	2600		0.500	160.0	2600		0.500	117.0	2600	

VALOR DE CBR 0.1 PULG. DE PENETRACIÓN

Molde	Golpes/capa	Penetración (pulg)	Presión (Lb/pulg ²)	Presión patrón (Lb/pulg ²)	C.B.R. (%)	CBR 100% MDS	CBR 95% MDS
1	56	0.1	72.3	1000	7.2	7.2	6.0
2	25	0.1	54.0	1000	5.4		
3	10	0.1	43.8	1000	4.4		

VALOR DE CBR 0.2 PULG. DE PENETRACIÓN

Molde	Golpes/capa	Penetración (pulg)	Presión (Lb/pulg ²)	Presión patrón (Lb/pulg ²)	C.B.R. (%)	CBR 100% MDS	CBR 95% MDS
1	56	0.2	123.2	1500	8.2	8.2	6.8
2	25	0.2	92.3	1500	6.2		
3	10	0.2	72.7	1500	4.8		

MÉTODO DE COMPACTACIÓN Y CONDICIÓN DE LAS MUESTRAS

Muestra: suelo fino mejorado con 10% de ceniza y 1% de cemento
 Método de compactación: Próctor Modificado ASTM D1557
 Humedad referencial de compactación: 21.0%
 Periodo de reposo en ambiente controlado: siete días
 Periodo de inmersión: siete días.

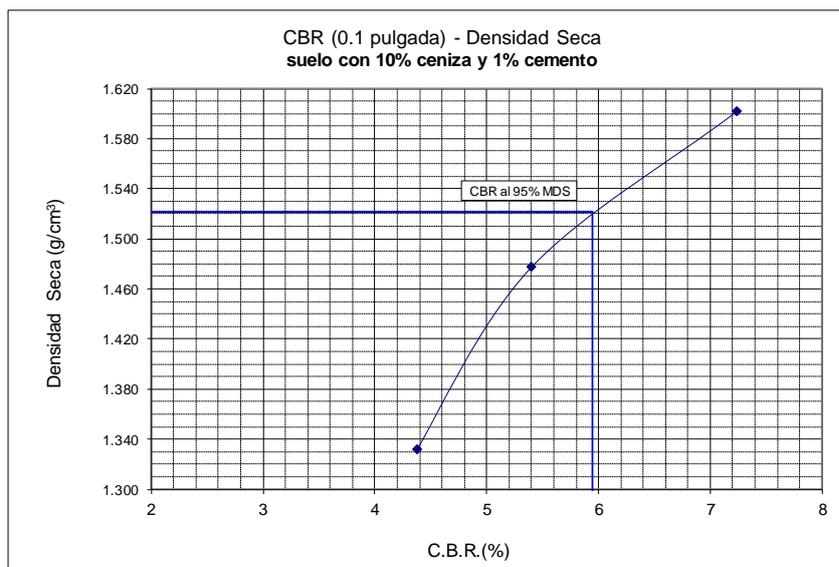
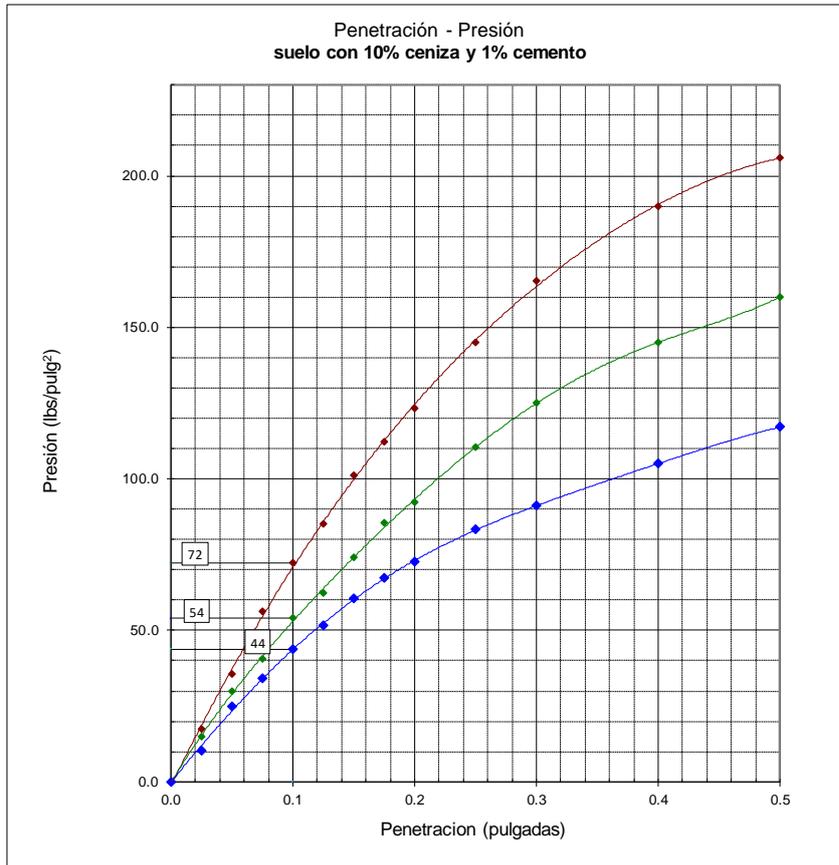
Ejecución/revisión: Luis Carbajal Supervisión/aprobación: Luisa Shuan Fecha: Noviembre 2023



"ESTABILIZACIÓN DE SUELOS FINOS CON CENIZA DE FONDO Y CEMENTO PARA USO COMO SUBRASANTE EN LA REGIÓN CAJAMARCA"

Muestra: suelo fino
Proporción ceniza: 10%
Proporción cemento: 1.0%

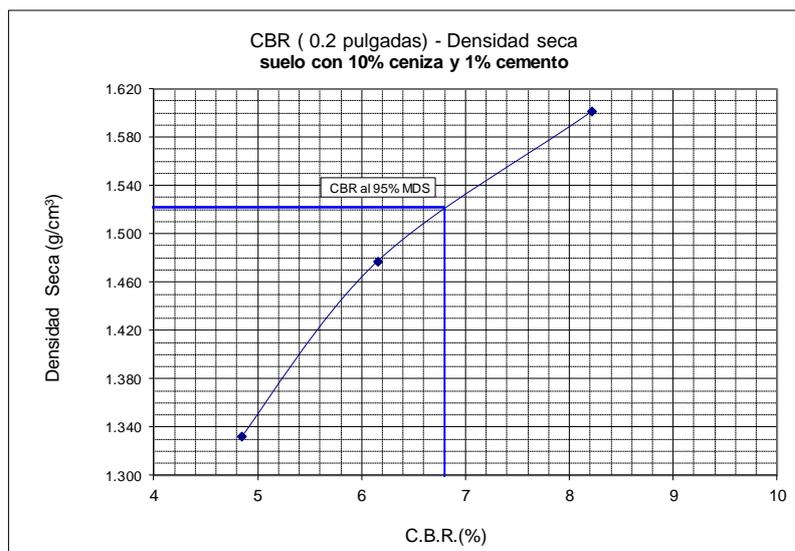
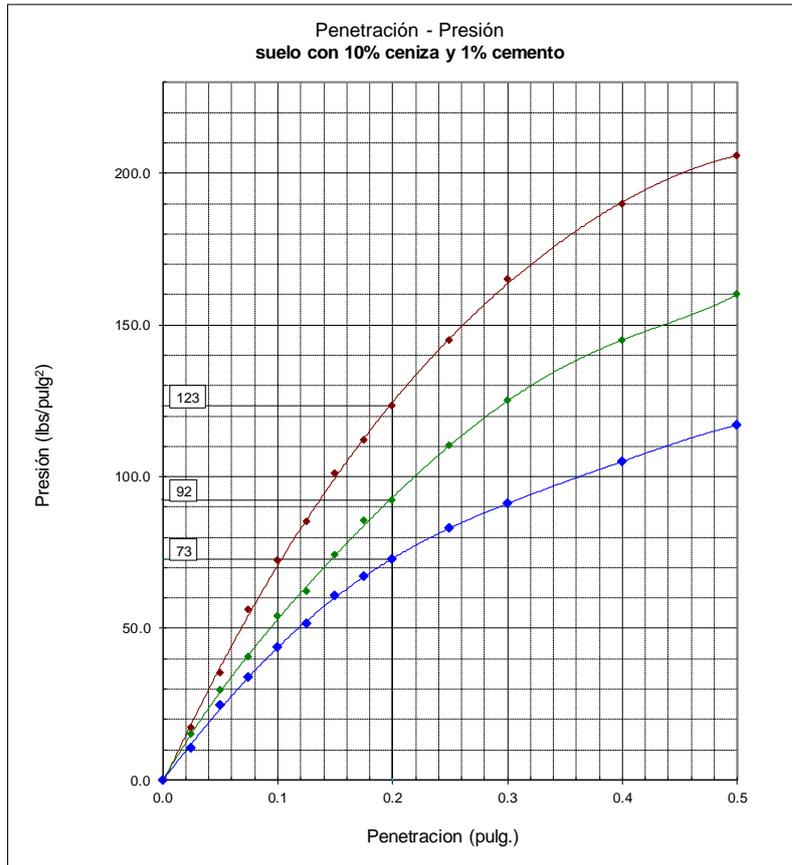
Gráficos CBR - 0.1 pulgadas



CBR (0.1 Pulg.) al 100% de la MDS : 7.2%
CBR (0.1 Pulg.) al 95% de la MDS : 6.0%

	UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL	RESULTADO DE ENSAYOS Página 3 de 3
	CALIFORNIA BEARING RATIO - CBR ASTM D1883	
"ESTABILIZACIÓN DE SUELOS FINOS CON CENIZA DE FONDO Y CEMENTO PARA USO COMO SUBRASANTE EN LA REGIÓN CAJAMARCA"		Muestra: suelo fino Proporción ceniza: 10% Proporción cemento: 1%

Gráficos CBR - 0.2 pulgadas



CBR (0.2 Pulg.) al 100% de la MDS : 8.2%
CBR (0.2 Pulg.) al 95% de la MDS : 6.8%

ENSAYO CBR SUELO+1%CEMENTO+15%CEMINA DE FONDO

	UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL	RESULTADO DE ENSAYOS Página 1 de 3
	CALIFORNIA BEARING RATIO - CBR ASTM D1883	
"ESTABILIZACIÓN DE SUELOS FINOS CON CENIZA DE FONDO Y CEMENTO PARA USO COMO SUBRASANTE EN LA REGIÓN CAJAMARCA"		Muestra: suelo fino Proporción ceniza: 15% Proporción cemento: 1%

INFORME DE ENSAYO DETERMINACIÓN DE CBR EN SUELO COMPACTADO EN LABORATORIO

CARACTERÍSTICAS DE LOS ESPECÍMENES COMPACTADOS

Molde	1		2		3	
Numero de golpes/capa	56		25		10	
Condición de la muestra	inicial	final	inicial	final	inicial	final
Densidad húmeda (g/cm ³)	1.886	1.970	1.779	1.857	1.605	1.711
Densidad seca (g/cm ³)	1.578	1.507	1.485	1.434	1.342	1.301
Contenido de humedad (%)	19.6	30.7	19.8	29.5	19.6	31.5
Expansión (%)	0.0	4.7	0.0	3.6	0.0	3.2

RESULTADOS ENSAYOS PRESIÓN - PENETRACIÓN

Molde 56 golpes/capa				Molde 25 golpes/capa				Molde 10 golpes/capa			
Penetración (pulgadas)	Presión (lb/pulg ²)	Presión patrón (lb/pulg ²)	Presión corregida (lb/pulg ²)	Penetración (pulgadas)	Presión (lb/pulg ²)	Presión patrón (lb/pulg ²)	Presión corregida (lb/pulg ²)	Penetración (pulgadas)	Presión (lb/pulg ²)	Presión patrón (lb/pulg ²)	Presión corregida (lb/pulg ²)
0.000	0.0			0.000	0.0			0.000	0.0		
0.025	16.9			0.025	10.3			0.025	14.0		
0.050	36.7			0.050	22.0			0.050	27.2		
0.075	58.7			0.075	36.7			0.075	41.9		
0.100	80.8	1000	91.1	0.100	55.1	1000	75.2	0.100	58.7	1000	58.7
0.125	104.3			0.125	76.4			0.125	70.5		
0.150	119.0			0.150	96.2			0.150	78.6		
0.175	134.4			0.175	110.9			0.175	85.2		
0.200	146.9	1500	149.4	0.200	125.6	1500	132.7	0.200	93.3	1500	93.3
0.250	158.0			0.250	139.0			0.250	105.0		
0.300	166.0	1900		0.300	146.9	1900		0.300	113.8	1900	
0.400	180.6	2300		0.400	154.2	2300		0.400	131.4	2300	
0.500	202.0	2600		0.500	174.8	2600		0.500	150.5	2600	

VALOR DE CBR 0.1 PULG. DE PENETRACIÓN

Molde	Golpes/capa	Penetración (pulg)	Presión (Lb/pulg ²)	Presión patrón (Lb/pulg ²)	C.B.R. (%)	CBR 100% MDS	CBR 95% MDS
1	56	0.1	91.1	1000	9.1	9.1	7.7
2	25	0.1	75.2	1000	7.5		
3	10	0.1	58.7	1000	5.9		

VALOR DE CBR 0.2 PULG. DE PENETRACIÓN

Molde	Golpes/capa	Penetración (pulg)	Presión (Lb/pulg ²)	Presión patrón (Lb/pulg ²)	C.B.R. (%)	CBR 100% MDS	CBR 95% MDS
1	56	0.2	149.4	1500	10.0	10.0	9.1
2	25	0.2	132.7	1500	8.8		
3	10	0.2	93.3	1500	6.2		

MÉTODO DE COMPACTACIÓN Y CONDICIÓN DE LAS MUESTRAS

Muestra: suelo fino mejorado con 15% de ceniza y 1% de cemento

Método de compactación: Próctor Modificado ASTM D1557

Humedad referencial de compactación: 20.0%

Periodo de reposo en ambiente controlado: siete días

Periodo de inmersión: siete días.

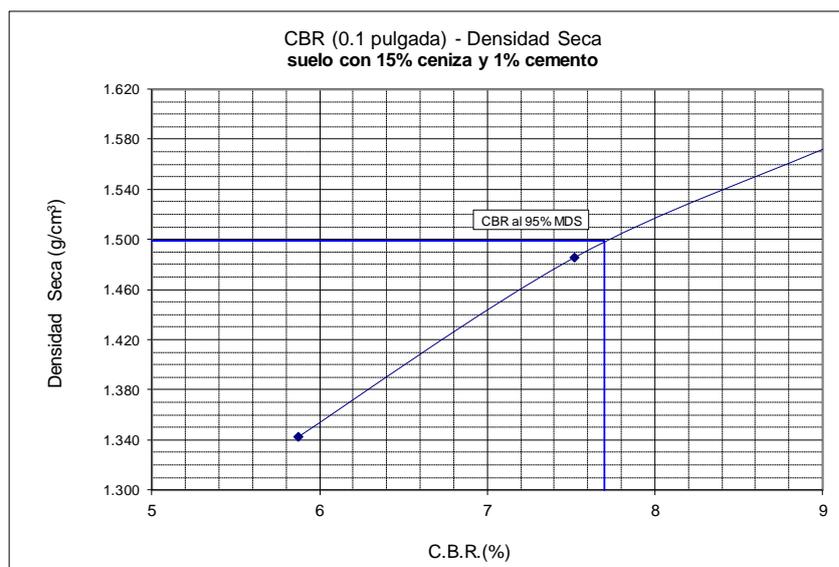
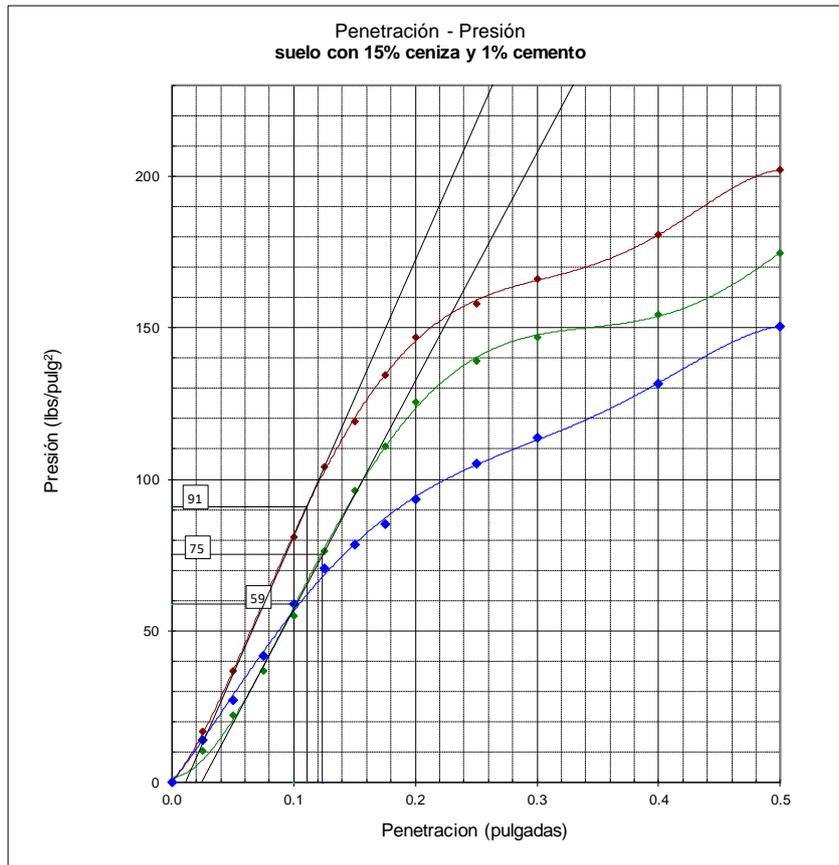
Ejecución/revisión: Luis Carbajal Supervisión/aprobación: Luisa Shuan Fecha: Noviembre 2023



"ESTABILIZACIÓN DE SUELOS FINOS CON CENIZA DE FONDO Y CEMENTO PARA USO COMO SUBRASANTE EN LA REGIÓN CAJAMARCA"

Muestra: suelo fino
Proporción ceniza: 15%
Proporción cemento: 1.0%

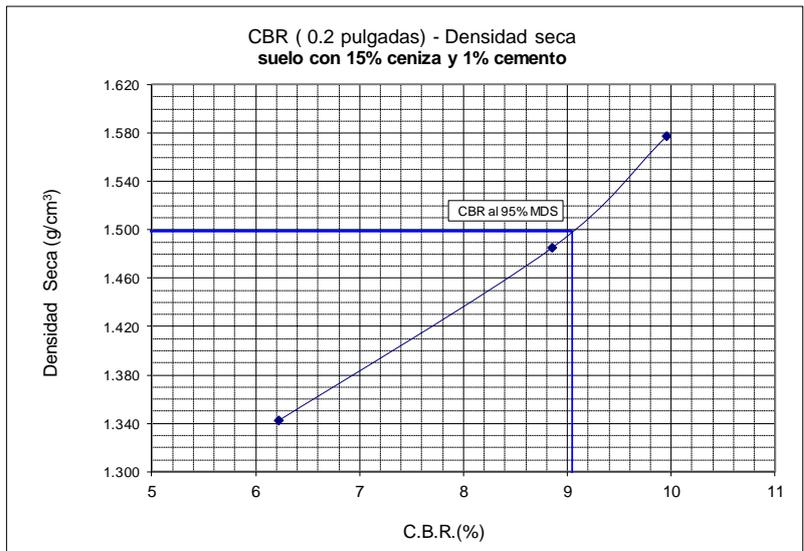
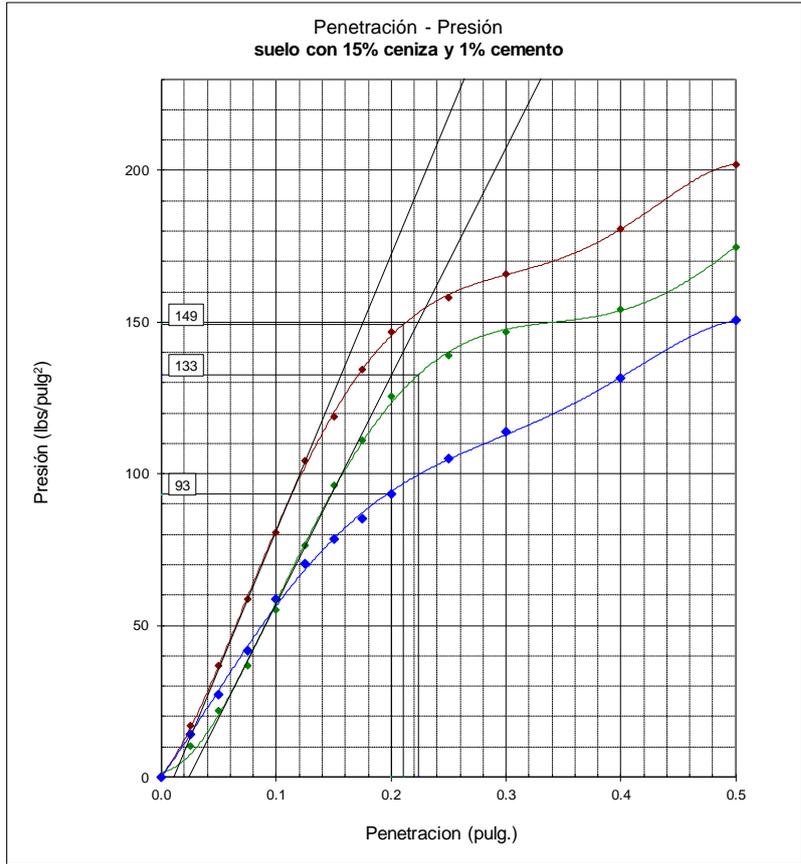
Gráficos CBR - 0.1 pulgadas



CBR (0.1 Pulg.) al 100% de la MDS : 9.1%
CBR (0.1 Pulg.) al 95% de la MDS : 7.7%

	UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL	RESULTADO DE ENSAYOS Página 3 de 3
	CALIFORNIA BEARING RATIO - CBR ASTM D1883	
"ESTABILIZACIÓN DE SUELOS FINOS CON CENIZA DE FONDO Y CEMENTO PARA USO COMO SUBRASANTE EN LA REGIÓN CAJAMARCA"		Muestra: suelo fino Proporción ceniza: 15% Proporción cemento: 1%

Gráficos CBR - 0.2 pulgadas



CBR (0.2 Pulg.) al 100% de la MDS : 10.0%
 CBR (0.2 Pulg.) al 95% de la MDS : 9.1%

ENSAYO CBR SUELO+1%CEMENTO+25%CEZINA DE FONDO

	UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL	RESULTADO DE ENSAYOS Página 1 de 3
	CALIFORNIA BEARING RATIO - CBR ASTM D1883	
"ESTABILIZACIÓN DE SUELOS FINOS CON CENIZA DE FONDO Y CEMENTO PARA USO COMO SUBRASANTE EN LA REGIÓN CAJAMARCA"		Muestra: suelo fino Proporción ceniza: 25% Proporción cemento: 1%

INFORME DE ENSAYO DETERMINACIÓN DE CBR EN SUELO COMPACTADO EN LABORATORIO

CARACTERÍSTICAS DE LOS ESPECÍMENES COMPACTADOS

Molde	1		2		3	
	56		25		10	
Condición de la muestra	inicial	final	inicial	final	inicial	final
Densidad húmeda (g/cm ³)	1.871	1.957	1.746	1.852	1.597	1.724
Densidad seca (g/cm ³)	1.572	1.510	1.465	1.421	1.341	1.310
Contenido de humedad (%)	19.0	29.6	19.1	30.3	19.1	31.6
Expansión (%)	0.0	4.1	0.0	3.1	0.0	2.4

RESULTADOS ENSAYOS PRESIÓN - PENETRACIÓN

Molde 56 golpes/capa				Molde 25 golpes/capa				Molde 10 golpes/capa			
Penetración (pulgadas)	Presión (lb/pulg ²)	Presión patrón (lb/pulg ²)	Presión corregida (lb/pulg ²)	Penetración (pulgadas)	Presión (lb/pulg ²)	Presión patrón (lb/pulg ²)	Presión corregida (lb/pulg ²)	Penetración (pulgadas)	Presión (lb/pulg ²)	Presión patrón (lb/pulg ²)	Presión corregida (lb/pulg ²)
0.000	0.0			0.000	0.0			0.000	0.0		
0.025	11.1			0.025	12.2			0.025	14.7		
0.050	26.2			0.050	30.2			0.050	31.6		
0.075	48.5			0.075	51.8			0.075	51.4		
0.100	75.5	1000	107.4	0.100	77.7	1000	95.0	0.100	67.6	1000	67.6
0.125	104.1			0.125	110.8			0.125	83.0		
0.150	132.7			0.150	126.7			0.150	93.3		
0.175	158.9			0.175	144.6			0.175	102.8		
0.200	179.6	1500	198.2	0.200	164.8	1500	170.8	0.200	107.9	1500	107.9
0.250	210.0			0.250	180.0			0.250	119.0		
0.300	229.7	1900		0.300	191.4	1900		0.300	129.2	1900	
0.400	255.1	2300		0.400	212.3	2300		0.400	149.1	2300	
0.500	288.5	2600		0.500	241.8	2600		0.500	168.9	2600	

VALOR DE CBR 0.1 PULG. DE PENETRACIÓN

Molde	Golpes/capa	Penetración (pulg)	Presión (Lb/pulg ²)	Presión patrón (Lb/pulg ²)	C.B.R. (%)	CBR 100% MDS	CBR 95% MDS
1	56	0.1	107.4	1000	10.7	10.7	9.9
2	25	0.1	95.0	1000	9.5		
3	10	0.1	67.6	1000	6.8		

VALOR DE CBR 0.2 PULG. DE PENETRACIÓN

Molde	Golpes/capa	Penetración (pulg)	Presión (Lb/pulg ²)	Presión patrón (Lb/pulg ²)	C.B.R. (%)	CBR 100% MDS	CBR 95% MDS
1	56	0.2	198.2	1500	13.2	13.2	12.0
2	25	0.2	170.8	1500	11.4		
3	10	0.2	107.9	1500	7.2		

MÉTODO DE COMPACTACIÓN Y CONDICIÓN DE LAS MUESTRAS

Muestra: suelo fino mejorado con 25% de ceniza y 1% de cemento

Método de compactación: Próctor Modificado ASTM D1557

Humedad referencial de compactación: 19.0%

Periodo de reposo en ambiente controlado: siete días

Periodo de inmersión: siete días.

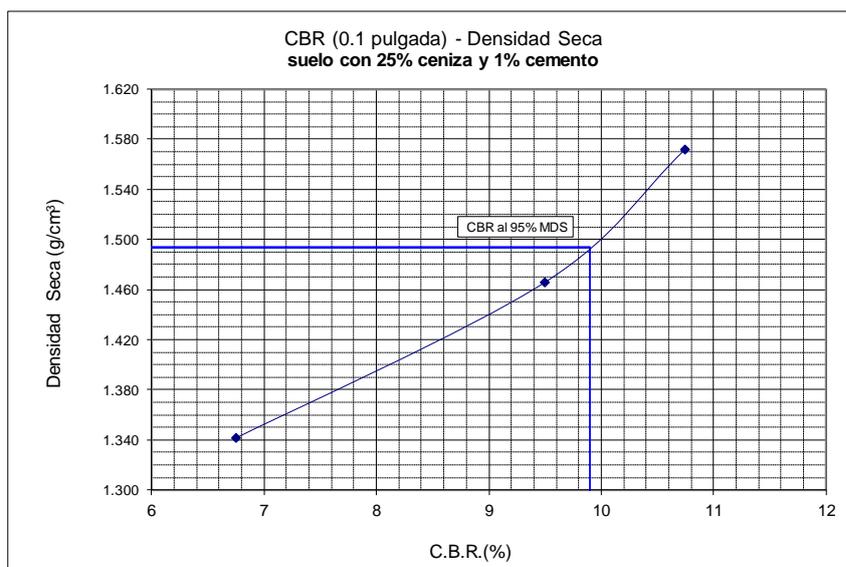
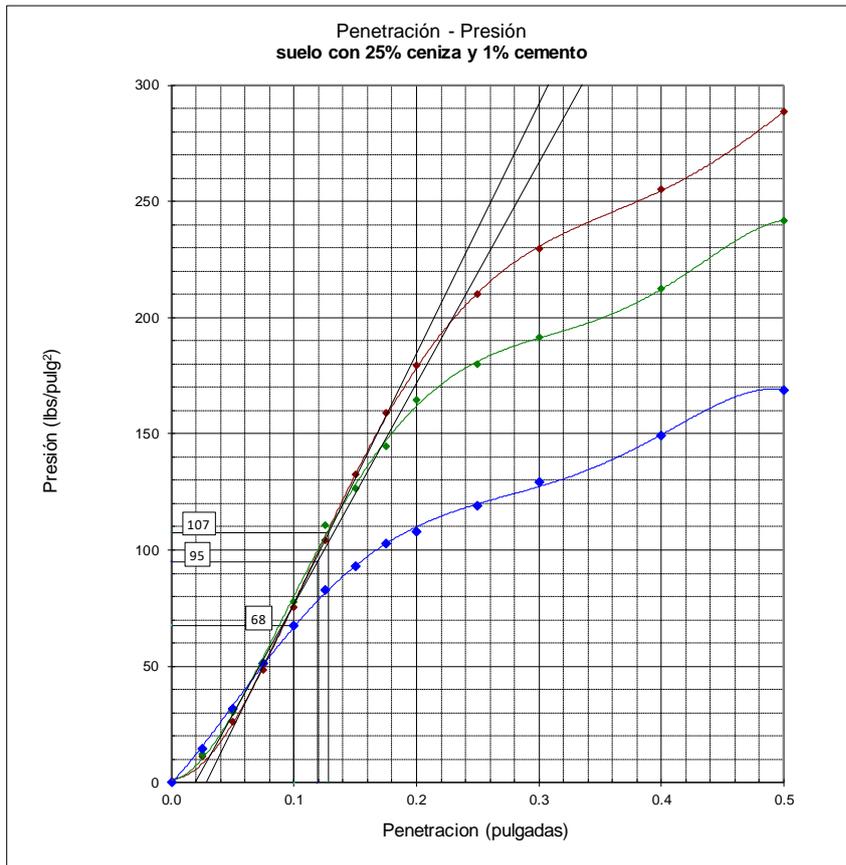
Ejecución/revisión: Luis Carbajal Supervisión/aprobación: Luisa Shuan Fecha: Noviembre 2023



"ESTABILIZACIÓN DE SUELOS FINOS CON CENIZA DE FONDO Y CEMENTO PARA USO COMO SUBRASANTE EN LA REGIÓN CAJAMARCA"

Muestra: suelo fino
Proporción ceniza: 25%
Proporción cemento: 1.0%

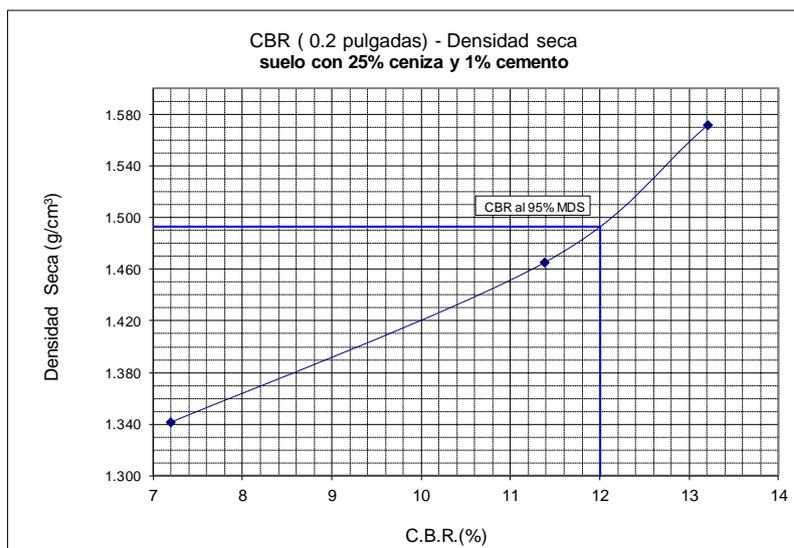
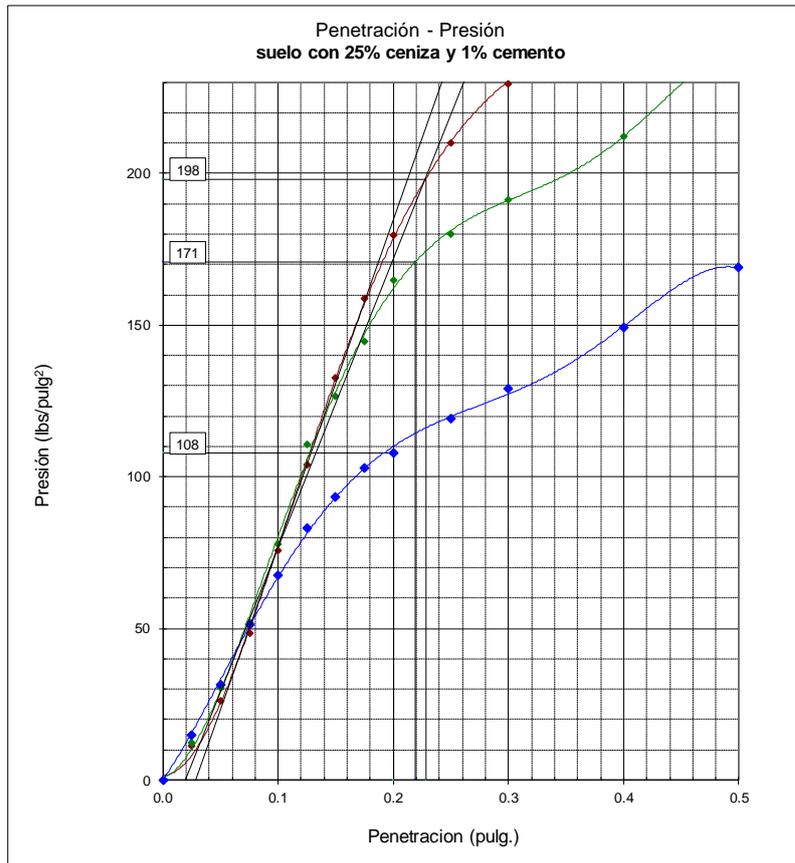
Gráficos CBR - 0.1 pulgadas



CBR (0.1 Pulg.) al 100% de la MDS	: 10.7%
CBR (0.1 Pulg.) al 95% de la MDS	: 9.9%

	UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL	RESULTADO DE ENSAYOS Página 3 de 3
	CALIFORNIA BEARING RATIO - CBR ASTM D1883	
"ESTABILIZACIÓN DE SUELOS FINOS CON CENIZA DE FONDO Y CEMENTO PARA USO COMO SUBRASANTE EN LA REGIÓN CAJAMARCA"		Muestra: suelo fino Proporción ceniza: 25% Proporción cemento: 1%

Gráficos CBR - 0.2 pulgadas



CBR (0.2 Pulg.) al 100% de la MDS : 13.2%
 CBR (0.2 Pulg.) al 95% de la MDS : 12.0%

ENSAYO CBR SUELO+1%CEMENTO+30%CEMINA DE FONDO

	UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA	RESULTADO DE ENSAYOS Página 1 de 3
	FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL	
CALIFORNIA BEARING RATIO - CBR ASTM D1883		
"ESTABILIZACIÓN DE SUELOS FINOS CON CENIZA DE FONDO Y CEMENTO PARA USO COMO SUBRASANTE EN LA REGIÓN CAJAMARCA"		Muestra: suelo fino Proporción ceniza: 30% Proporción cemento: 1%

INFORME DE ENSAYO DETERMINACIÓN DE CBR EN SUELO COMPACTADO EN LABORATORIO

CARACTERÍSTICAS DE LOS ESPECÍMENES COMPACTADOS

Molde	1		2		3	
Numero de golpes/capa	56		25		10	
Condición de la muestra	inicial	final	inicial	final	inicial	final
Densidad húmeda (g/cm ³)	1.858	1.938	1.732	1.837	1.588	1.710
Densidad seca (g/cm ³)	1.560	1.501	1.453	1.411	1.329	1.302
Contenido de humedad (%)	19.1	29.1	19.2	30.2	19.5	31.4
Expansión (%)	0.0	3.9	0.0	3.0	0.0	2.1

RESULTADOS ENSAYOS PRESIÓN - PENETRACIÓN

Molde 56 golpes/capa				Molde 25 golpes/capa				Molde 10 golpes/capa			
Penetración (pulgadas)	Presión (lb/pulg ²)	Presión patrón (lb/pulg ²)	Presión corregida (lb/pulg ²)	Penetración (pulgadas)	Presión (lb/pulg ²)	Presión patrón (lb/pulg ²)	Presión corregida (lb/pulg ²)	Penetración (pulgadas)	Presión (lb/pulg ²)	Presión patrón (lb/pulg ²)	Presión corregida (lb/pulg ²)
0.000	0.0			0.000	0.0			0.000	0.0		
0.025	22.4			0.025	15.0			0.025	15.0		
0.050	46.0			0.050	35.0			0.050	40.0		
0.075	80.6			0.075	60.0			0.075	65.0		
0.100	118.0	1000	157.7	0.100	95.0	1000	133.6	0.100	92.3	1000	92.3
0.125	160.0			0.125	135.0			0.125	113.4		
0.150	198.0			0.150	165.0			0.150	135.0		
0.175	240.0			0.175	192.0			0.175	149.8		
0.200	272.0	1500	299.1	0.200	220.0	1500	241.6	0.200	163.0	1500	163.0
0.250	327.6			0.250	260.0			0.250	173.3		
0.300	359.0	1900		0.300	275.0	1900		0.300	190.0	1900	
0.400	410.0	2300		0.400	315.0	2300		0.400	205.0	2300	
0.500	451.7	2600		0.500	345.0	2600		0.500	240.0	2600	

VALOR DE CBR 0.1 PULG. DE PENETRACIÓN

Molde	Golpes/capa	Penetración (pulg)	Presión (Lb/pulg ²)	Presión patrón (Lb/pulg ²)	C.B.R. (%)	CBR 100% MDS	CBR 95% MDS
1	56	0.1	157.7	1000	15.8	15.8	14.1
2	25	0.1	133.6	1000	13.4		
3	10	0.1	92.3	1000	9.2		

VALOR DE CBR 0.2 PULG. DE PENETRACIÓN

Molde	Golpes/capa	Penetración (pulg)	Presión (Lb/pulg ²)	Presión patrón (Lb/pulg ²)	C.B.R. (%)	CBR 100% MDS	CBR 95% MDS
1	56	0.2	299.1	1500	19.9	19.9	17.2
2	25	0.2	241.6	1500	16.1		
3	10	0.2	163.0	1500	10.9		

MÉTODO DE COMPACTACIÓN Y CONDICIÓN DE LAS MUESTRAS

Muestra: suelo fino mejorado con 30% de ceniza y 1% de cemento

Método de compactación: Próctor Modificado ASTM D1557

Humedad referencial de compactación: 19.0%

Periodo de reposo en ambiente controlado: siete días

Periodo de inmersión: siete días.

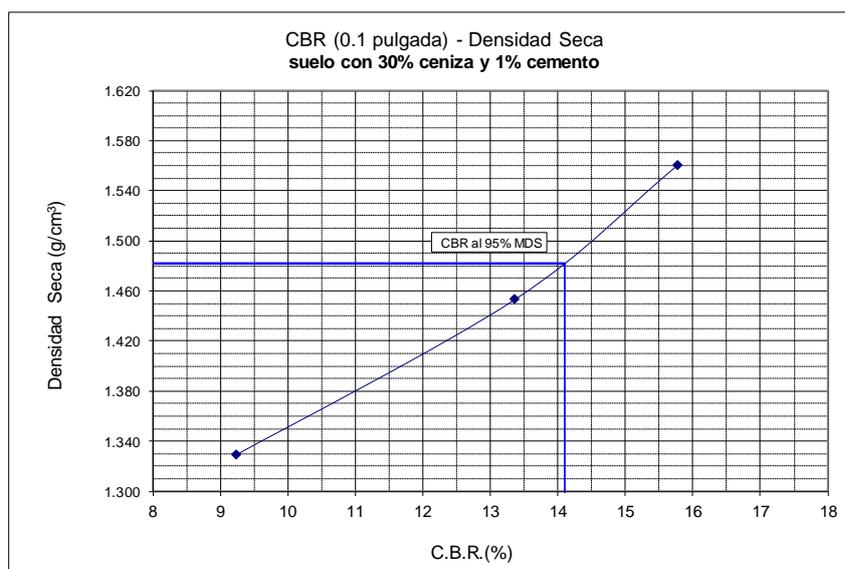
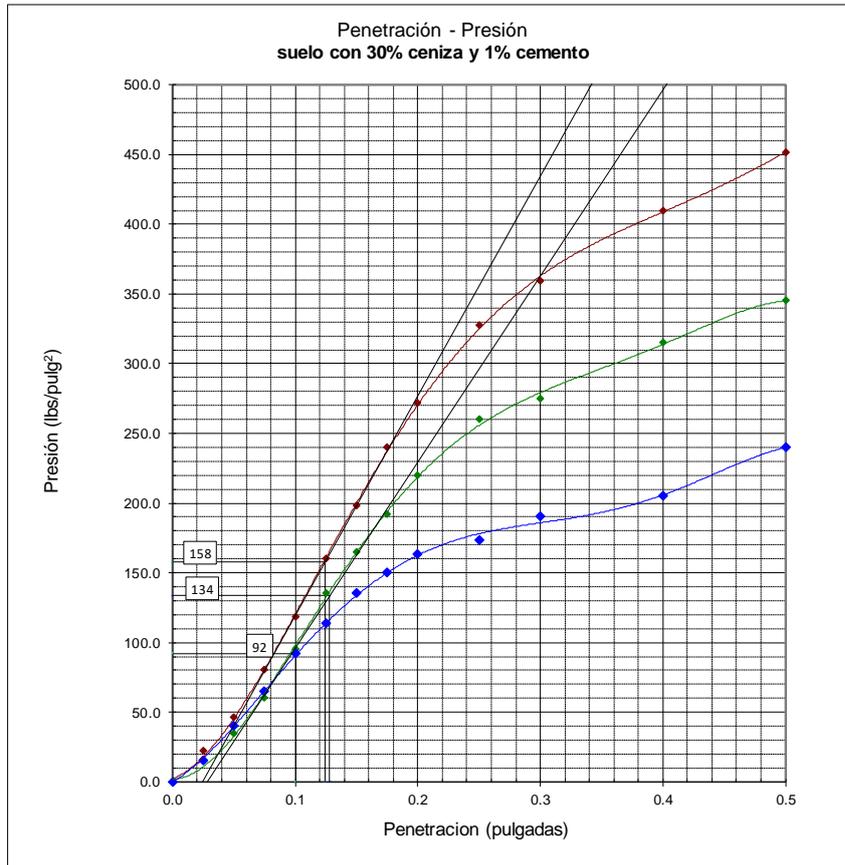
Ejecución/revisión: Luis Carbajal Supervisión/aprobación: Luisa Shuan Fecha: Noviembre 2023



"ESTABILIZACIÓN DE SUELOS FINOS CON CENIZA DE FONDO Y CEMENTO PARA USO COMO SUBRASANTE EN LA REGIÓN CAJAMARCA"

Muestra: suelo fino
Proporción ceniza: 30%
Proporción cemento: 1.0%

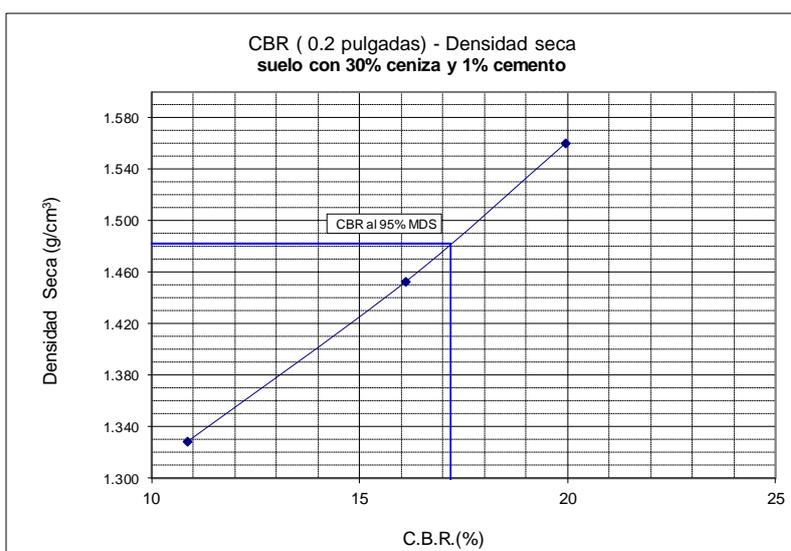
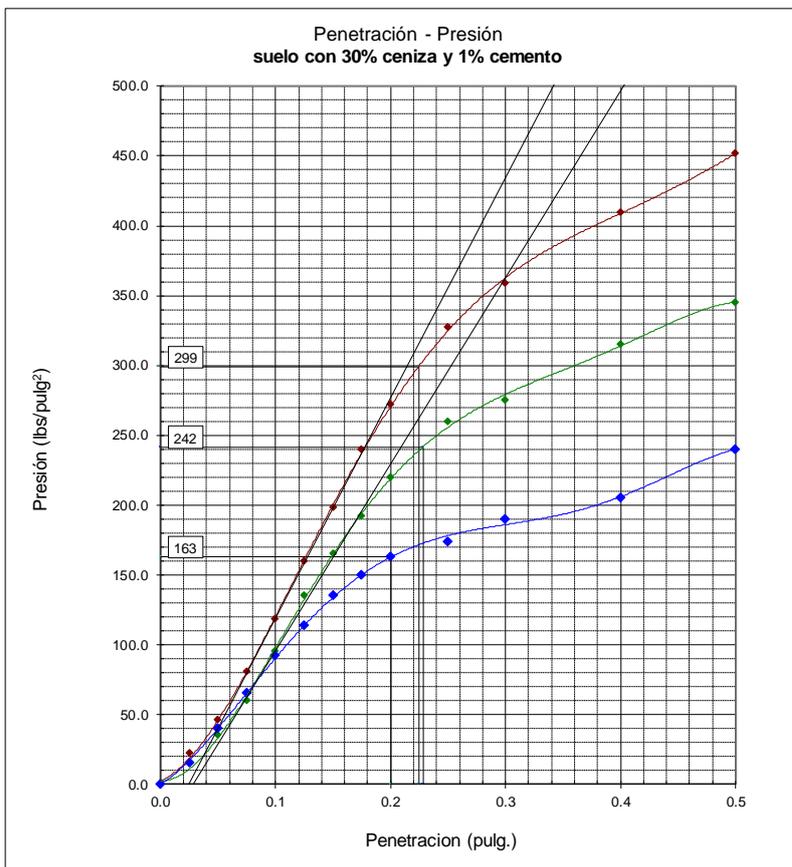
Gráficos CBR - 0.1 pulgadas



CBR (0.1 Pulg.) al 100% de la MDS	: 15.8%
CBR (0.1 Pulg.) al 95% de la MDS	: 14.1%

	UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL	RESULTADO DE ENSAYOS Página 3 de 3
	CALIFORNIA BEARING RATIO - CBR ASTM D1883	
"ESTABILIZACIÓN DE SUELOS FINOS CON CENIZA DE FONDO Y CEMENTO PARA USO COMO SUBRASANTE EN LA REGIÓN CAJAMARCA"		Muestra: suelo fino Proporción ceniza: 30% Proporción cemento: 1%

Gráficos CBR - 0.2 pulgadas



CBR (0.2 Pulg.) al 100% de la MDS	: 19.9%
CBR (0.2 Pulg.) al 95% de la MDS	: 17.2%

ENSAYO CBR SN+1.5%CEMENTO

	UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL	RESULTADO DE ENSAYOS Página 1 de 3
	CALIFORNIA BEARING RATIO - CBR ASTM D1883	
"ESTABILIZACIÓN DE SUELOS FINOS CON CENIZA DE FONDO Y CEMENTO PARA USO COMO SUBRASANTE EN LA REGIÓN CAJAMARCA"		Muestra: suelo fino Proporción ceniza: 0% Proporción cemento: 1.5%

INFORME DE ENSAYO DETERMINACIÓN DE CBR EN SUELO COMPACTADO EN LABORATORIO

CARACTERÍSTICAS DE LOS ESPECÍMENES COMPACTADOS

Molde	1		2		3	
	56		25		10	
Condición de la muestra	inicial	final	inicial	final	inicial	final
Densidad húmeda (g/cm ³)	1.963	1.975	1.810	1.850	1.602	1.673
Densidad seca (g/cm ³)	1.622	1.543	1.502	1.437	1.327	1.286
Contenido de humedad (%)	21.0	28.0	20.5	28.7	20.7	30.1
Expansión (%)	0.0	5.1	0.0	4.5	0.0	3.2

RESULTADOS ENSAYOS PRESIÓN - PENETRACIÓN

Molde 56 golpes/capa				Molde 25 golpes/capa				Molde 10 golpes/capa			
Penetración (pulgadas)	Presión (lb/pulg ²)	Presión patrón (lb/pulg ²)	Presión corregida (lb/pulg ²)	Penetración (pulgadas)	Presión (lb/pulg ²)	Presión patrón (lb/pulg ²)	Presión corregida (lb/pulg ²)	Penetración (pulgadas)	Presión (lb/pulg ²)	Presión patrón (lb/pulg ²)	Presión corregida (lb/pulg ²)
0.000	0.0			0.000	0.0			0.000	0.0		
0.025	5.0			0.025	3.0			0.025	15.0		
0.050	16.0			0.050	10.0			0.050	25.0		
0.075	30.0			0.075	26.2			0.075	32.2		
0.100	60.0	1000	98.0	0.100	40.0	1000	65.7	0.100	37.3	1000	37.3
0.125	80.0			0.125	58.0			0.125	42.5		
0.150	105.0			0.150	75.0			0.150	45.4		
0.175	123.0			0.175	90.0			0.175	49.8		
0.200	142.0	1500	160.9	0.200	110.0	1500	124.9	0.200	52.5	1500	52.5
0.250	165.0			0.250	130.0			0.250	60.0		
0.300	172.0	1900		0.300	145.0	1900		0.300	62.7	1900	
0.400	180.0	2300		0.400	160.0	2300		0.400	72.6	2300	
0.500	190.0	2600		0.500	170.0	2600		0.500	82.8	2600	

VALOR DE CBR 0.1 PULG. DE PENETRACIÓN

Molde	Golpes/capa	Penetración (pulg)	Presión (Lb/pulg ²)	Presión patrón (Lb/pulg ²)	C.B.R. (%)	CBR 100% MDS	CBR 95% MDS
1	56	0.1	98.0	1000	9.8	9.8	7.5
2	25	0.1	65.7	1000	6.6		
3	10	0.1	37.3	1000	3.7		

VALOR DE CBR 0.2 PULG. DE PENETRACIÓN

Molde	Golpes/capa	Penetración (pulg)	Presión (Lb/pulg ²)	Presión patrón (Lb/pulg ²)	C.B.R. (%)	CBR 100% MDS	CBR 95% MDS
1	56	0.2	160.9	1500	10.7	10.7	9.2
2	25	0.2	124.9	1500	8.3		
3	10	0.2	52.5	1500	3.5		

MÉTODO DE COMPACTACIÓN Y CONDICIÓN DE LAS MUESTRAS

Muestra: suelo fino mejorado con 1% de cemento
 Método de compactación: Próctor Modificado ASTM D1557
 Humedad referencial de compactación: 21.0%
 Periodo de reposo en ambiente controlado: siete días
 Periodo de inmersión: siete días.

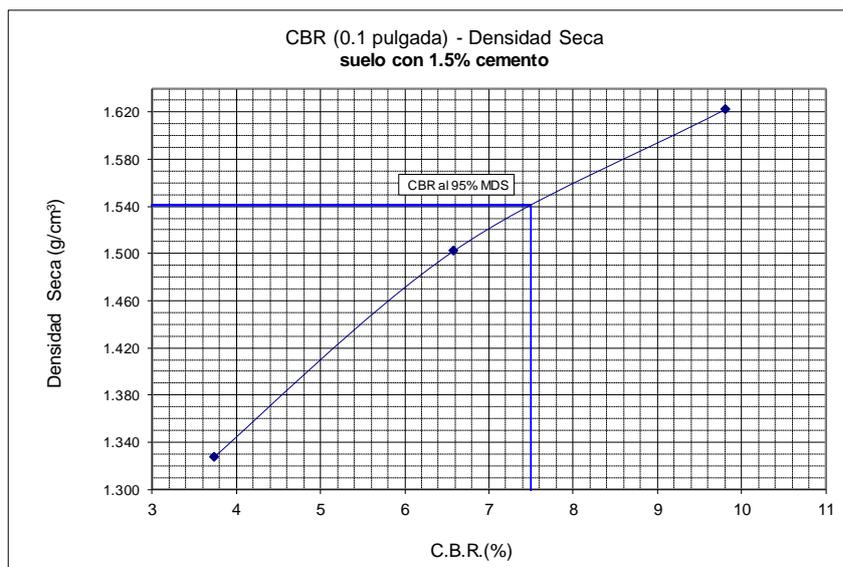
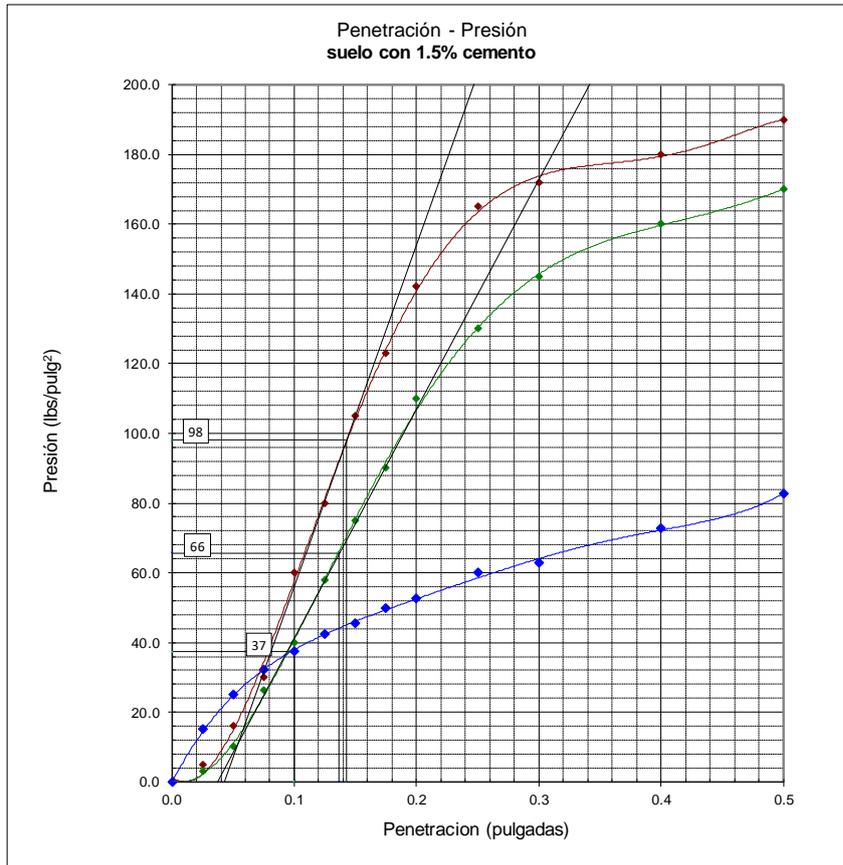
Ejecución/revisión: Luis Carbajal Supervisión/aprobación: Luisa Shuan Fecha: Noviembre 2023



"ESTABILIZACIÓN DE SUELOS FINOS CON CENIZA DE FONDO Y CEMENTO PARA USO COMO SUBRASANTE EN LA REGIÓN CAJAMARCA"

Muestra: suelo fino
Proporción ceniza: 0%
Proporción cemento: 1.5%

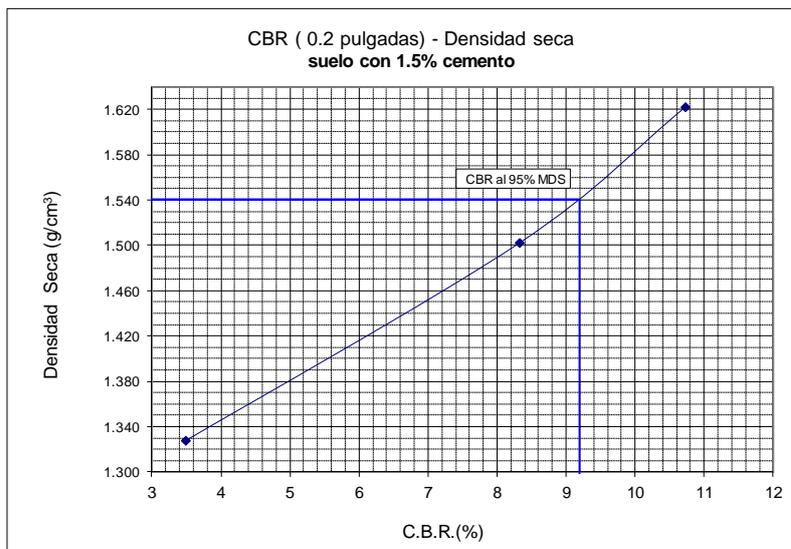
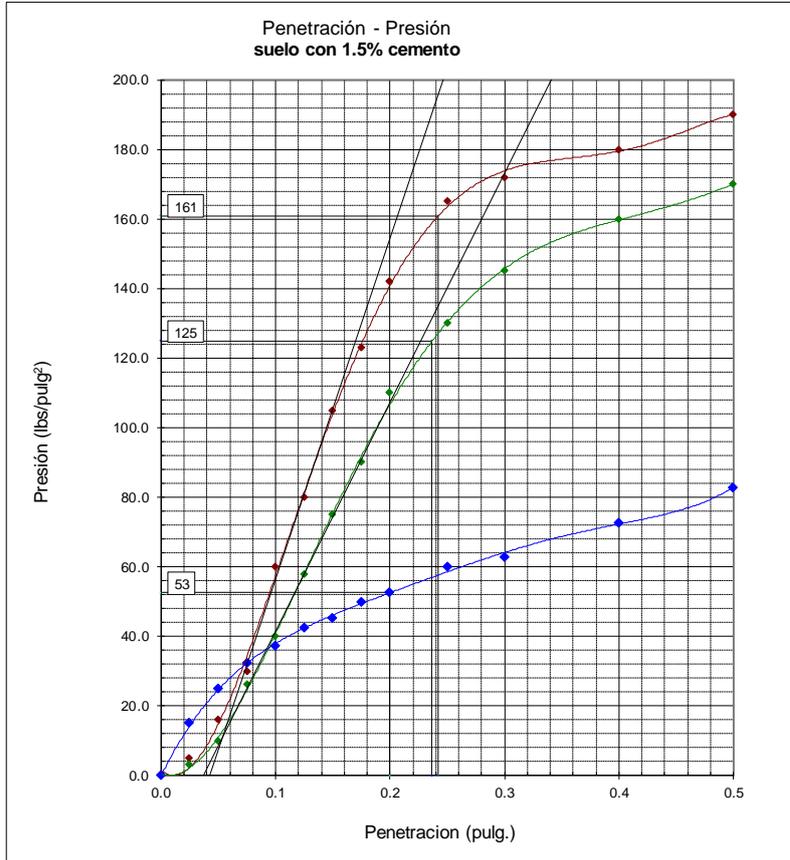
Gráficos CBR - 0.1 pulgadas



CBR (0.1 Pulg.) al 100% de la MDS : 9.8%
CBR (0.1 Pulg.) al 95% de la MDS : 7.5%

	UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL	RESULTADO DE ENSAYOS Página 3 de 3
	CALIFORNIA BEARING RATIO - CBR ASTM D1883	
"ESTABILIZACIÓN DE SUELOS FINOS CON CENIZA DE FONDO Y CEMENTO PARA USO COMO SUBRASANTE EN LA REGIÓN CAJAMARCA"		Muestra: suelo fino Proporción ceniza: 0% Proporción cemento: 1.5%

Gráficos CBR - 0.2 pulgadas



CBR (0.2 Pulg.) al 100% de la MDS : 10.7%
 CBR (0.2 Pulg.) al 95% de la MDS : 9.2%

ENSAYO CBR SUELO+1.5%CEMENTO+15%CENIZA DE FONDO

	UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL	RESULTADO DE ENSAYOS Página 1 de 3
	CALIFORNIA BEARING RATIO - CBR ASTM D1883	
"ESTABILIZACIÓN DE SUELOS FINOS CON CENIZA DE FONDO Y CEMENTO PARA USO COMO SUBRASANTE EN LA REGIÓN CAJAMARCA"		Muestra: suelo fino Proporción ceniza: 15% Proporción cemento: 1.5%

INFORME DE ENSAYO DETERMINACIÓN DE CBR EN SUELO COMPACTADO EN LABORATORIO

CARACTERÍSTICAS DE LOS ESPECÍMENES COMPACTADOS

Molde	1		2		3	
Numero de golpes/capa	56		25		10	
Condición de la muestra	inicial	final	inicial	final	inicial	final
Densidad húmeda (g/cm ³)	1.936	1.955	1.812	1.889	1.639	1.724
Densidad seca (g/cm ³)	1.621	1.559	1.515	1.486	1.365	1.343
Contenido de humedad (%)	19.4	25.3	19.6	27.1	20.1	28.4
Expansión (%)	0.0	3.9	0.0	1.9	0.0	1.7

RESULTADOS ENSAYOS PRESIÓN - PENETRACIÓN

Molde 56 golpes/capa				Molde 25 golpes/capa				Molde 10 golpes/capa			
Penetración (pulgadas)	Presión (lb/pulg ²)	Presión patrón (lb/pulg ²)	Presión corregida (lb/pulg ²)	Penetración (pulgadas)	Presión (lb/pulg ²)	Presión patrón (lb/pulg ²)	Presión corregida (lb/pulg ²)	Penetración (pulgadas)	Presión (lb/pulg ²)	Presión patrón (lb/pulg ²)	Presión corregida (lb/pulg ²)
0.000	0.0			0.000	0.0			0.000	0.0		
0.025	19.8			0.025	11.3			0.025	10.7		
0.050	64.6			0.050	26.7			0.050	31.5		
0.075	119.7			0.075	52.5			0.075	59.4		
0.100	168.9	1000	168.9	0.100	84.8	1000	133.8	0.100	87.3	1000	111.6
0.125	212.2			0.125	123.6			0.125	115.2		
0.150	237.9			0.150	158.3			0.150	135.6		
0.175	255.5			0.175	185.0			0.175	145.4		
0.200	263.6	1500	263.6	0.200	215.0	1500	229.3	0.200	152.0	1500	162.2
0.250	275.0			0.250	235.0			0.250	165.0		
0.300	284.2	1900		0.300	238.7	1900		0.300	174.8	1900	
0.400	312.8	2300		0.400	228.4	2300		0.400	195.3	2300	
0.500	317.2	2600		0.500	228.4	2600		0.500	163.0	2600	

VALOR DE CBR 0.1 PULG. DE PENETRACIÓN

Molde	Golpes/capa	Penetración (pulg)	Presión (Lb/pulg ²)	Presión patrón (Lb/pulg ²)	C.B.R. (%)	CBR 100% MDS	CBR 95% MDS
1	56	0.1	168.9	1000	16.9	16.9	14.0
2	25	0.1	133.8	1000	13.4		
3	10	0.1	111.6	1000	11.2		

VALOR DE CBR 0.2 PULG. DE PENETRACIÓN

Molde	Golpes/capa	Penetración (pulg)	Presión (Lb/pulg ²)	Presión patrón (Lb/pulg ²)	C.B.R. (%)	CBR 100% MDS	CBR 95% MDS
1	56	0.2	263.6	1500	17.6	17.6	15.9
2	25	0.2	229.3	1500	15.3		
3	10	0.2	162.2	1500	10.8		

MÉTODO DE COMPACTACIÓN Y CONDICIÓN DE LAS MUESTRAS

Muestra: suelo fino mejorado con 15% de ceniza y 1.5% de cemento

Método de compactación: Próctor Modificado ASTM D1557

Humedad referencial de compactación: 20.0%

Periodo de reposo en ambiente controlado: siete días

Periodo de inmersión: siete días.

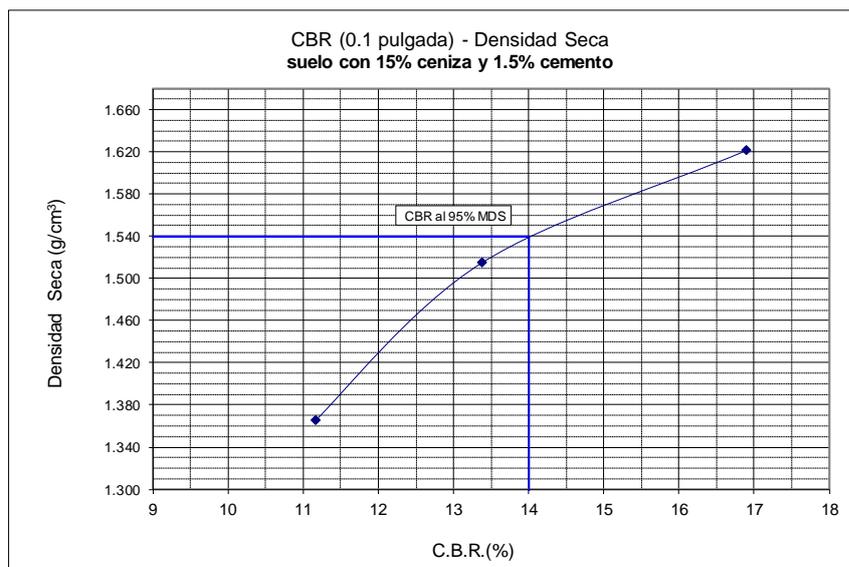
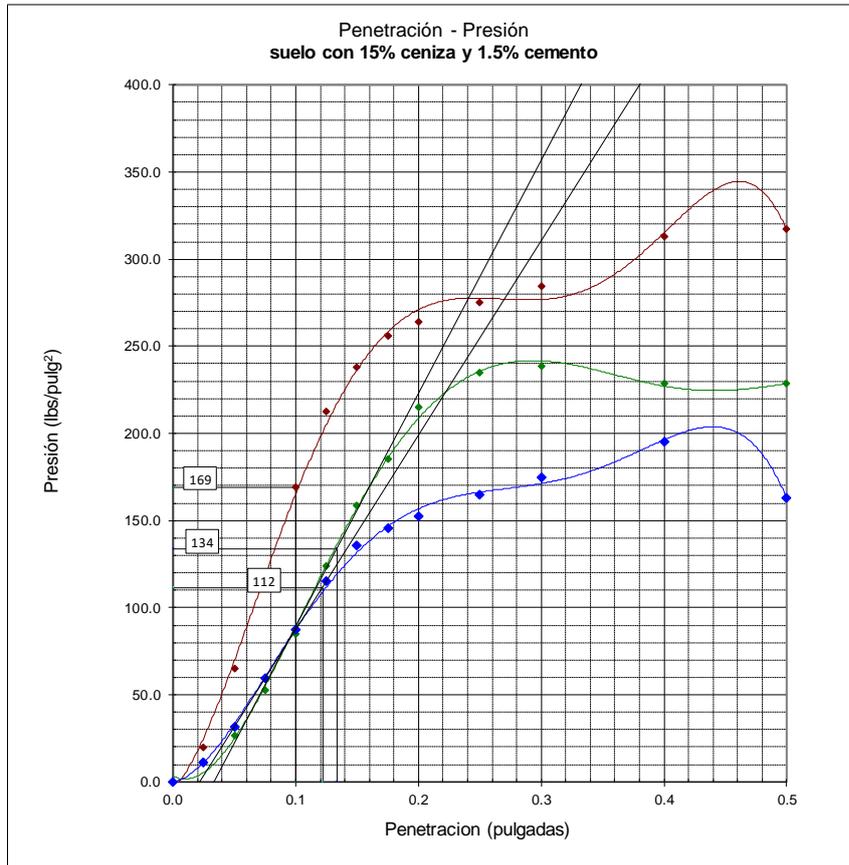
Ejecución/revisión: Luis Carbajal Supervisión/aprobación: Luisa Shuan Fecha: Noviembre 2023



"ESTABILIZACIÓN DE SUELOS FINOS CON CENIZA DE FONDO Y CEMENTO PARA USO COMO SUBRASANTE EN LA REGIÓN CAJAMARCA"

Muestra: suelo fino
Proporción ceniza: 15%
Proporción cemento: 1.5%

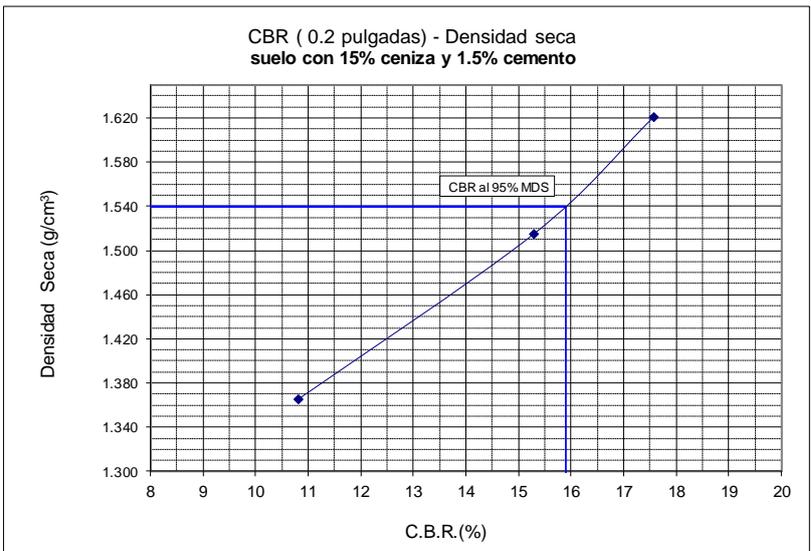
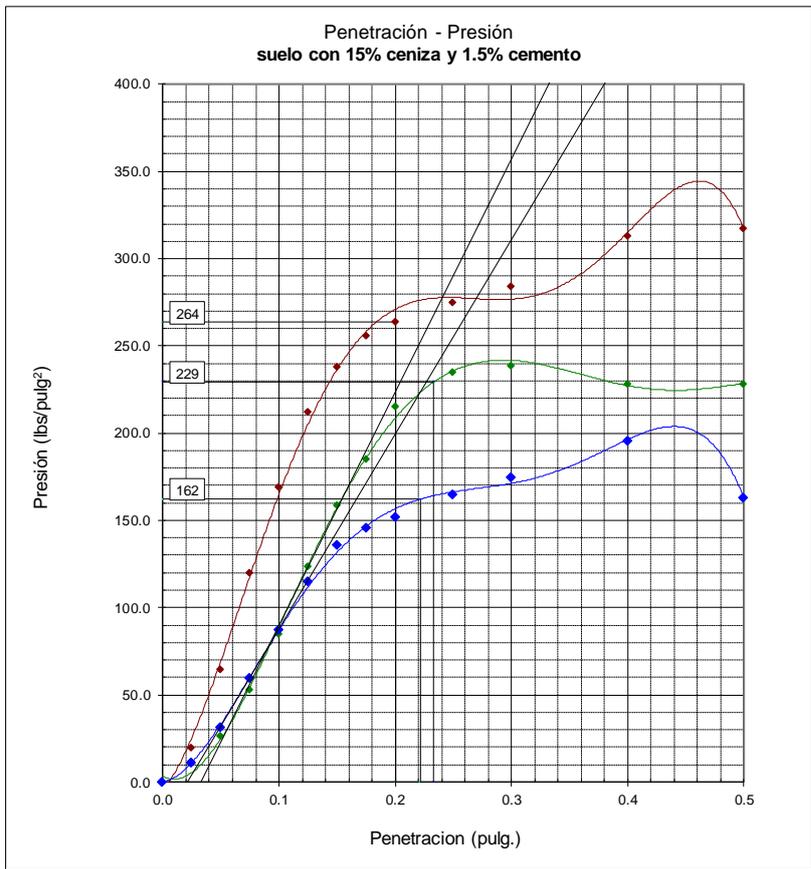
Gráficos CBR - 0.1 pulgadas



CBR (0.1 Pulg.) al 100% de la MDS	: 16.9%
CBR (0.1 Pulg.) al 95% de la MDS	: 14.0%

	UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL	RESULTADO DE ENSAYOS Página 3 de 3
	CALIFORNIA BEARING RATIO - CBR ASTM D1883	
"ESTABILIZACIÓN DE SUELOS FINOS CON CENIZA DE FONDO Y CEMENTO PARA USO COMO SUBRASANTE EN LA REGIÓN CAJAMARCA"		Muestra: suelo fino Proporción ceniza: 15% Proporción cemento: 1.5%

Gráficos CBR - 0.2 pulgadas



CBR (0.2 Pulg.) al 100% de la MDS	: 17.6%
CBR (0.2 Pulg.) al 95% de la MDS	: 15.9%

ENSAYO CBR SUELO+1.5%CEMENTO+20%CENIZA DE FONDO

	UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL	RESULTADO DE ENSAYOS Página 3 de 3
	CALIFORNIA BEARING RATIO - CBR ASTM D1883	
"ESTABILIZACIÓN DE SUELOS FINOS CON CENIZA DE FONDO Y CEMENTO PARA USO COMO SUBRASANTE EN LA REGIÓN CAJAMARCA"		Muestra: suelo fino Proporción ceniza: 20% Proporción cemento: 1.5%

INFORME DE ENSAYO DETERMINACIÓN DE CBR EN SUELO COMPACTADO EN LABORATORIO

CARACTERÍSTICAS DE LOS ESPECÍMENES COMPACTADOS

Molde	1		2		3	
	inicial	final	inicial	final	inicial	final
Numero de golpes/capa	56		25		10	
Condición de la muestra	inicial	final	inicial	final	inicial	final
Densidad húmeda (g/cm ³)	1.929	2.007	1.783	1.877	1.615	1.738
Densidad seca (g/cm ³)	1.621	1.596	1.490	1.469	1.353	1.339
Contenido de humedad (%)	19.0	25.8	19.7	27.8	19.3	29.8
Expansión (%)	0.0	1.6	0.0	1.4	0.0	1.0

RESULTADOS ENSAYOS PRESIÓN - PENETRACIÓN

Molde 56 golpes/capa				Molde 25 golpes/capa				Molde 10 golpes/capa			
Penetración (pulgadas)	Presión (lb/pulg ²)	Presión patrón (lb/pulg ²)	Presión corregida (lb/pulg ²)	Penetración (pulgadas)	Presión (lb/pulg ²)	Presión patrón (lb/pulg ²)	Presión corregida (lb/pulg ²)	Penetración (pulgadas)	Presión (lb/pulg ²)	Presión patrón (lb/pulg ²)	Presión corregida (lb/pulg ²)
0.000	0.0			0.000	0.0			0.000	0.0		
0.025	33.0			0.025	18.4			0.025	10.5		
0.050	105.7			0.050	58.7			0.050	30.9		
0.075	193.1			0.075	117.5			0.075	49.9		
0.100	262.9	1000	317.2	0.100	173.3	1000	215.6	0.100	74.9	1000	74.9
0.125	351.7			0.125	232.0			0.125	91.8		
0.150	413.4			0.150	277.6			0.150	111.6		
0.175	442.1			0.175	291.5			0.175	118.2		
0.200	449.4	1500	470.8	0.200	296.7	1500	313.7	0.200	119.0	1500	119.0
0.250	470.0			0.250	310.0			0.250	150.0		
0.300	478.8	1900		0.300	316.5	1900		0.300	164.5	1900	
0.400	549.3	2300		0.400	362.8	2300		0.400	193.1	2300	
0.500	648.4	2600		0.500	426.6	2600		0.500	208.6	2600	

VALOR DE CBR 0.1 PULG. DE PENETRACIÓN

Molde	Golpes/capa	Penetración (pulg)	Presión (Lb/pulg ²)	Presión patrón (Lb/pulg ²)	C.B.R. (%)	CBR 100% MDS	CBR 95% MDS
1	56	0.1	317.2	1000	31.7	31.7	25.6
2	25	0.1	215.6	1000	21.6		
3	10	0.1	74.9	1000	7.5		

VALOR DE CBR 0.2 PULG. DE PENETRACIÓN

Molde	Golpes/capa	Penetración (pulg)	Presión (Lb/pulg ²)	Presión patrón (Lb/pulg ²)	C.B.R. (%)	CBR 100% MDS	CBR 95% MDS
1	56	0.2	470.8	1500	31.4	31.4	25.1
2	25	0.2	313.7	1500	20.9		
3	10	0.2	119.0	1500	7.9		

MÉTODO DE COMPACTACIÓN Y CONDICIÓN DE LAS MUESTRAS

Muestra: suelo fino mejorado con 20% de ceniza y 1.5% de cemento

Método de compactación: Próctor Modificado ASTM D1557

Humedad referencial de compactación: 20.0%

Periodo de reposo en ambiente controlado: siete días

Periodo de inmersión: siete días.

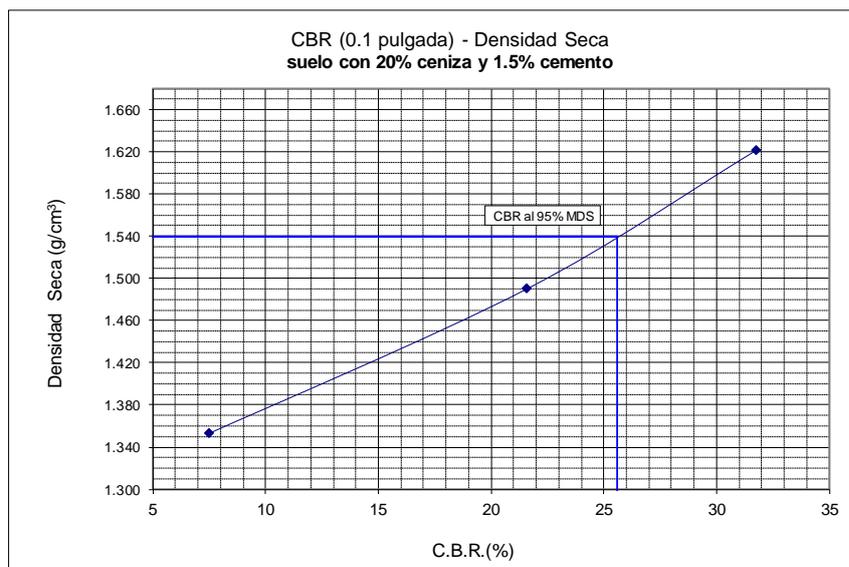
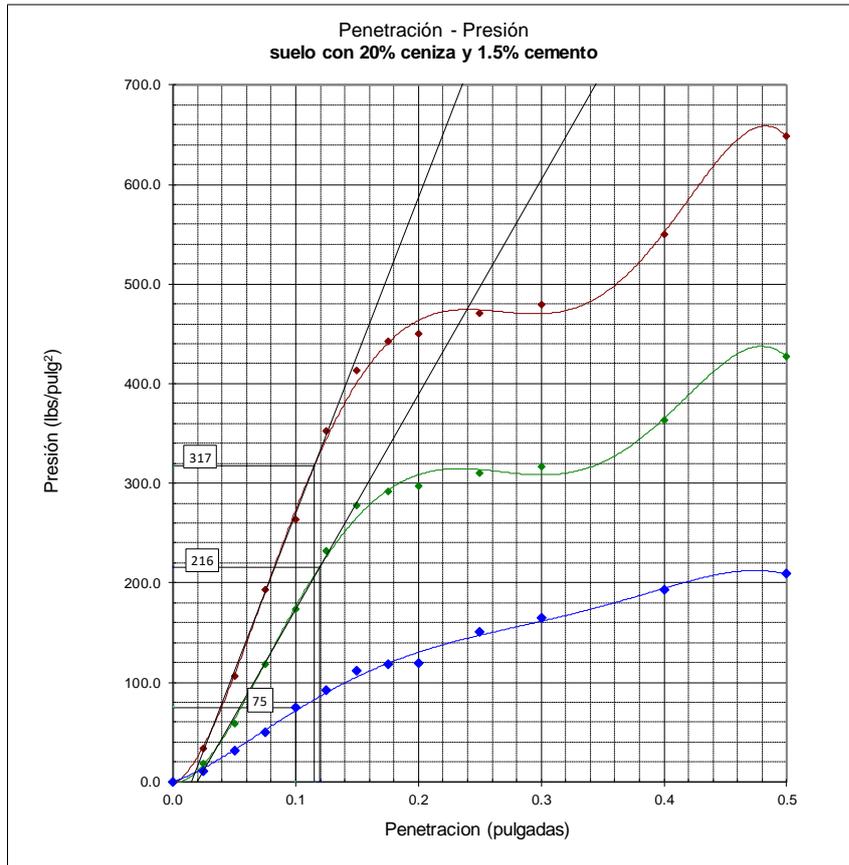
Ejecución/revisión: Luis Carbajal Supervisión/aprobación: Luisa Shuan Fecha: Noviembre 2023



"ESTABILIZACIÓN DE SUELOS FINOS CON CENIZA DE FONDO Y CEMENTO PARA USO COMO SUBRASANTE EN LA REGIÓN CAJAMARCA"

Muestra: suelo fino
Proporción ceniza: 20%
Proporción cemento: 1.5%

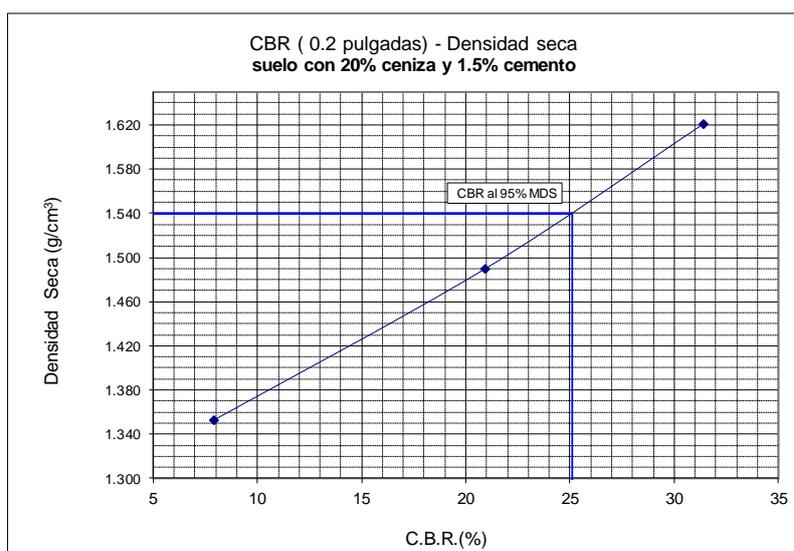
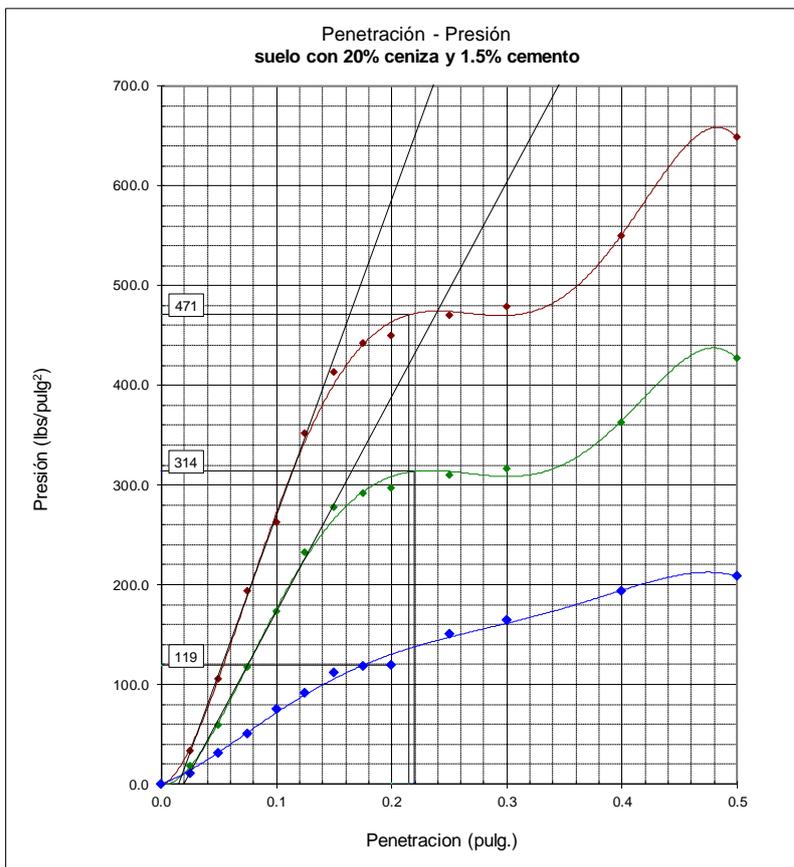
Gráficos CBR - 0.1 pulgadas



CBR (0.1 Pulg.) al 100% de la MDS	: 31.7%
CBR (0.1 Pulg.) al 95% de la MDS	: 25.6%

	UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL	RESULTADO DE ENSAYOS Página 3 de 3
	CALIFORNIA BEARING RATIO - CBR ASTM D1883	
"ESTABILIZACIÓN DE SUELOS FINOS CON CENIZA DE FONDO Y CEMENTO PARA USO COMO SUBRASANTE EN LA REGIÓN CAJAMARCA"		Muestra: suelo fino Proporción ceniza: 20% Proporción cemento: 1.5%

Gráficos CBR - 0.2 pulgadas



CBR (0.2 Pulg.) al 100% de la MDS	: 31.4%
CBR (0.2 Pulg.) al 95% de la MDS	: 25.1%

ENSAYO CBR SUELO+1.5%CEMENTO+25%CENIZA DE FONDO

	UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA	RESULTADO DE ENSAYOS Página 1 de 3
	FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL	
CALIFORNIA BEARING RATIO - CBR ASTM D1883		
"ESTABILIZACIÓN DE SUELOS FINOS CON CENIZA DE FONDO Y CEMENTO PARA USO COMO SUBRASANTE EN LA REGIÓN CAJAMARCA"		Muestra: suelo fino Proporción ceniza: 25% Proporción cemento: 1.5%

INFORME DE ENSAYO DETERMINACIÓN DE CBR EN SUELO COMPACTADO EN LABORATORIO

CARACTERÍSTICAS DE LOS ESPECÍMENES COMPACTADOS

Molde	1		2		3	
Numero de golpes/capa	56		25		10	
Condición de la muestra	inicial	final	inicial	final	inicial	final
Densidad húmeda (g/cm ³)	1.930	2.004	1.802	1.901	1.618	1.756
Densidad seca (g/cm ³)	1.619	1.606	1.510	1.499	1.358	1.354
Contenido de humedad (%)	19.2	24.8	19.3	26.8	19.2	29.7
Expansión (%)	0.0	0.8	0.0	0.7	0.0	0.3

RESULTADOS ENSAYOS PRESIÓN - PENETRACIÓN

Molde 56 golpes/capa				Molde 25 golpes/capa				Molde 10 golpes/capa			
Penetración (pulgadas)	Presión (lb/pulg ²)	Presión patrón (lb/pulg ²)	Presión corregida (lb/pulg ²)	Penetración (pulgadas)	Presión (lb/pulg ²)	Presión patrón (lb/pulg ²)	Presión corregida (lb/pulg ²)	Penetración (pulgadas)	Presión (lb/pulg ²)	Presión patrón (lb/pulg ²)	Presión corregida (lb/pulg ²)
0.000	0.0			0.000	0.0			0.000	0.0		
0.025	90.0			0.025	38.9			0.025	43.4		
0.050	300.0			0.050	138.8			0.050	98.3		
0.075	464.1			0.075	248.2			0.075	141.8		
0.100	640.0	1000	640.0	0.100	391.4	1000	391.4	0.100	192.2	1000	192.2
0.125	819.5			0.125	471.4			0.125	218.9		
0.150	942.1			0.150	499.3			0.150	227.3		
0.175	1004.6			0.175	513.3			0.175	229.6		
0.200	1048.6	1500	1048.6	0.200	519.9	1500	519.9	0.200	236.0	1500	236.0
0.250	1020.0			0.250	500.0			0.250	240.0		
0.300	888.5	1900		0.300	490.5	1900		0.300	249.0	1900	
0.400	881.2	2300		0.400	489.1	2300		0.400	254.9	2300	
0.500	881.2	2600		0.500	474.4	2600		0.500	259.4	2600	

VALOR DE CBR 0.1 PULG. DE PENETRACIÓN

Molde	Golpes/capa	Penetración (pulg)	Presión (Lb/pulg ²)	Presión patrón (Lb/pulg ²)	C.B.R. (%)	CBR 100% MDS	CBR 95% MDS
1	56	0.1	640.0	1000	64.0	64.0	44.5
2	25	0.1	391.4	1000	39.1		
3	10	0.1	192.2	1000	19.2		

VALOR DE CBR 0.2 PULG. DE PENETRACIÓN

Molde	Golpes/capa	Penetración (pulg)	Presión (Lb/pulg ²)	Presión patrón (Lb/pulg ²)	C.B.R. (%)	CBR 100% MDS	CBR 95% MDS
1	56	0.2	1048.6	1500	69.9	69.9	42.4
2	25	0.2	519.9	1500	34.7		
3	10	0.2	236.0	1500	15.7		

MÉTODO DE COMPACTACIÓN Y CONDICIÓN DE LAS MUESTRAS

Muestra: suelo fino mejorado con 25% de ceniza y 1% de cemento
 Método de compactación: Próctor Modificado ASTM D1557
 Humedad referencial de compactación: 19.5%
 Periodo de reposo en ambiente controlado: siete días
 Periodo de inmersión: siete días.

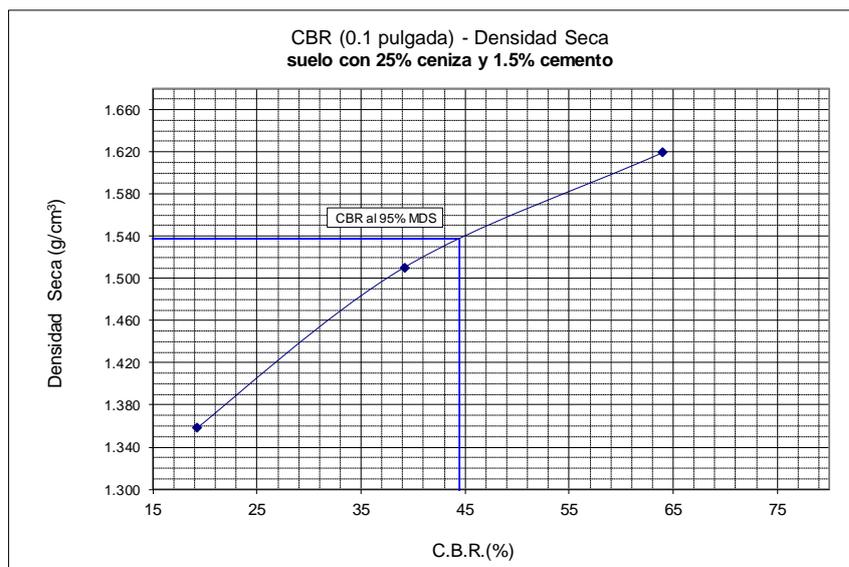
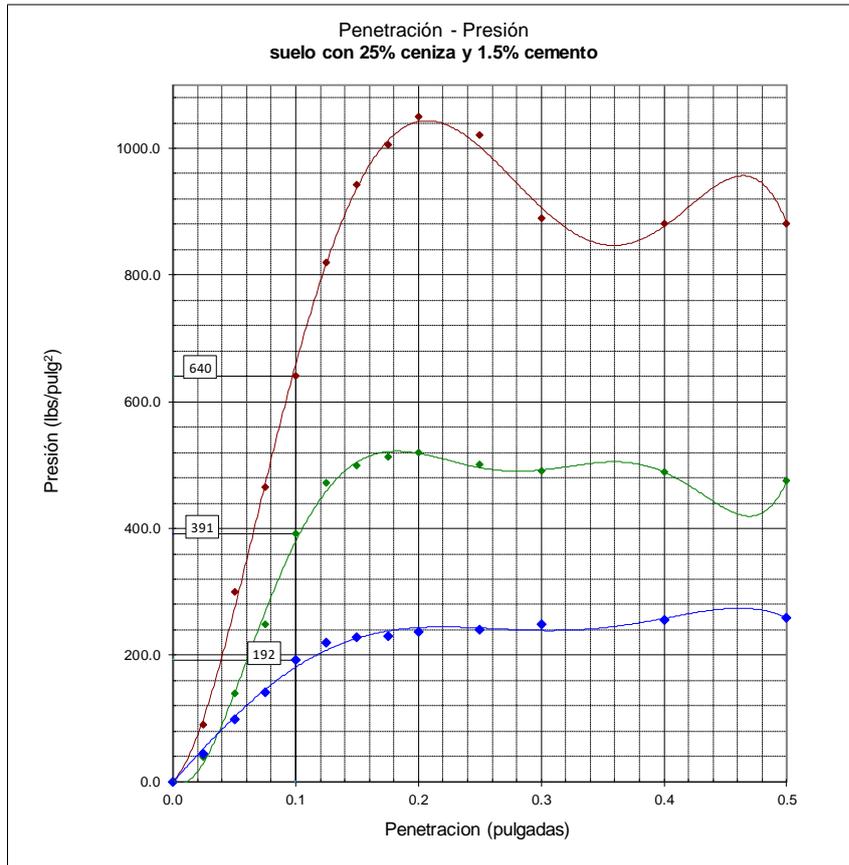
Ejecución/revisión: Luis Carbajal Supervisión/aprobación: Luisa Shuan Fecha: Noviembre 2023



"ESTABILIZACIÓN DE SUELOS FINOS CON CENIZA DE FONDO Y CEMENTO PARA USO COMO SUBRASANTE EN LA REGIÓN CAJAMARCA"

Muestra: suelo fino
Proporción ceniza: 25%
Proporción cemento: 1.5%

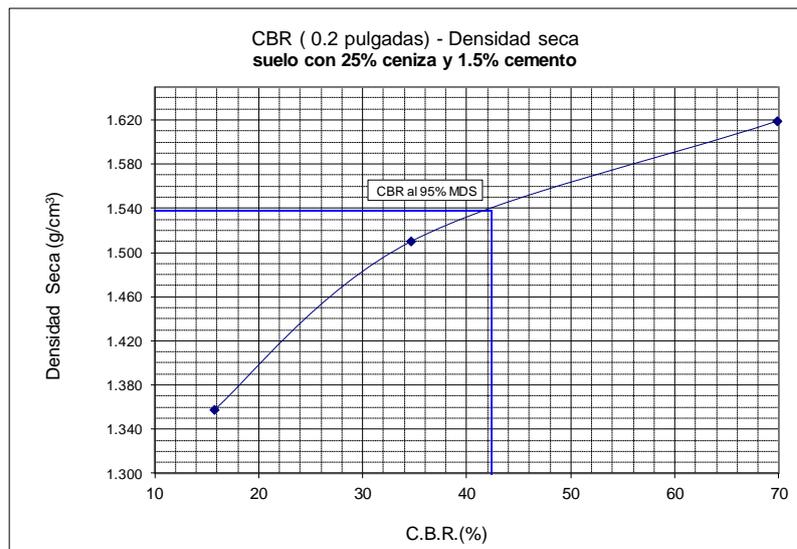
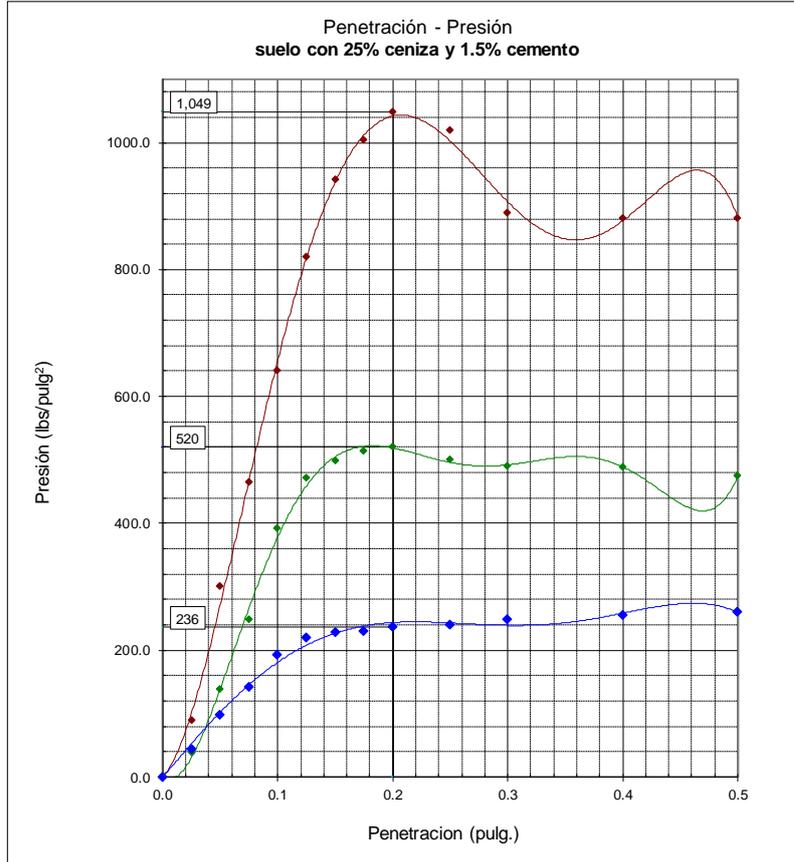
Gráficos CBR - 0.1 pulgadas



CBR (0.1 Pulg.) al 100% de la MDS	: 64.0%
CBR (0.1 Pulg.) al 95% de la MDS	: 44.5%

	UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA	RESULTADO DE ENSAYOS Página 3 de 3
	FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL CALIFORNIA BEARING RATIO - CBR ASTM D1883	
"ESTABILIZACIÓN DE SUELOS FINOS CON CENIZA DE FONDO Y CEMENTO PARA USO COMO SUBRASANTE EN LA REGIÓN CAJAMARCA"		Muestra: suelo fino Proporción ceniza: 25% Proporción cemento: 1.5%

Gráficos CBR - 0.2 pulgadas



CBR (0.2 Pulg.) al 100% de la MDS	: 69.9%
CBR (0.2 Pulg.) al 95% de la MDS	: 42.4%

ENSAYO CBR SUELO+1.5%CEMENTO+30%CENIZA DE FONDO

	UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL	RESULTADO DE ENSAYOS Página 1 de 3
	CALIFORNIA BEARING RATIO - CBR ASTM D1883	
"ESTABILIZACIÓN DE SUELOS FINOS CON CENIZA DE FONDO Y CEMENTO PARA USO COMO SUBRASANTE EN LA REGIÓN CAJAMARCA"		Muestra: suelo fino Proporción ceniza: 30% Proporción cemento: 1.5%

INFORME DE ENSAYO DETERMINACIÓN DE CBR EN SUELO COMPACTADO EN LABORATORIO

CARACTERÍSTICAS DE LOS ESPECÍMENES COMPACTADOS

Molde	1		2		3	
Numero de golpes/capa	56		25		10	
Condición de la muestra	inicial	final	inicial	final	inicial	final
Densidad húmeda (g/cm ³)	1.916	2.019	1.782	1.892	1.591	1.731
Densidad seca (g/cm ³)	1.610	1.602	1.496	1.492	1.335	1.335
Contenido de humedad (%)	19.0	26.0	19.1	26.8	19.2	29.7
Expansión (%)	0.0	0.5	0.0	0.3	0.0	0.0

RESULTADOS ENSAYOS PRESIÓN - PENETRACIÓN

Molde 56 golpes/capa				Molde 25 golpes/capa				Molde 10 golpes/capa			
Penetración (pulgadas)	Presión (lb/pulg ²)	Presión patrón (lb/pulg ²)	Presión corregida (lb/pulg ²)	Penetración (pulgadas)	Presión (lb/pulg ²)	Presión patrón (lb/pulg ²)	Presión corregida (lb/pulg ²)	Penetración (pulgadas)	Presión (lb/pulg ²)	Presión patrón (lb/pulg ²)	Presión corregida (lb/pulg ²)
0.000	0.0			0.000	0.0			0.000	0.0		
0.025	155.0			0.025	140.0			0.025	117.2		
0.050	350.0			0.050	365.7			0.050	207.9		
0.075	620.0			0.075	527.3			0.075	318.3		
0.100	950.0	1000	950.0	0.100	650.0	1000	650.0	0.100	433.1	1000	433.1
0.125	1200.0			0.125	767.4			0.125	525.1		
0.150	1350.0			0.150	840.1			0.150	600.0		
0.175	1420.0			0.175	888.5			0.175	623.2		
0.200	1470.0	1500	1470.0	0.200	939.9	1500	939.9	0.200	614.2	1500	614.2
0.250	1480.0			0.250	950.0			0.250	600.0		
0.300	1400.0	1900		0.300	900.0	1900		0.300	620.0	1900	
0.400	1350.0	2300		0.400	890.0	2300		0.400	600.0	2300	
0.500	1350.0	2600		0.500	890.0	2600		0.500	600.0	2600	

VALOR DE CBR 0.1 PULG. DE PENETRACIÓN

Molde	Golpes/capa	Penetración (pulg)	Presión (Lb/pulg ²)	Presión patrón (Lb/pulg ²)	C.B.R. (%)	CBR 100% MDS	CBR 95% MDS
1	56	0.1	950.0	1000	95.0	95.0	72.0
2	25	0.1	650.0	1000	65.0		
3	10	0.1	433.1	1000	43.3		

VALOR DE CBR 0.2 PULG. DE PENETRACIÓN

Molde	Golpes/capa	Penetración (pulg)	Presión (Lb/pulg ²)	Presión patrón (Lb/pulg ²)	C.B.R. (%)	CBR 100% MDS	CBR 95% MDS
1	56	0.2	1470.0	1500	98.0	98.0	71.0
2	25	0.2	939.9	1500	62.7		
3	10	0.2	614.2	1500	40.9		

MÉTODO DE COMPACTACIÓN Y CONDICIÓN DE LAS MUESTRAS

Muestra: suelo fino mejorado con 30% de ceniza y 1.5% de cemento

Método de compactación: Próctor Modificado ASTM D1557

Humedad referencial de compactación: 19.0%

Periodo de reposo en ambiente controlado: siete días

Periodo de inmersión: siete días.

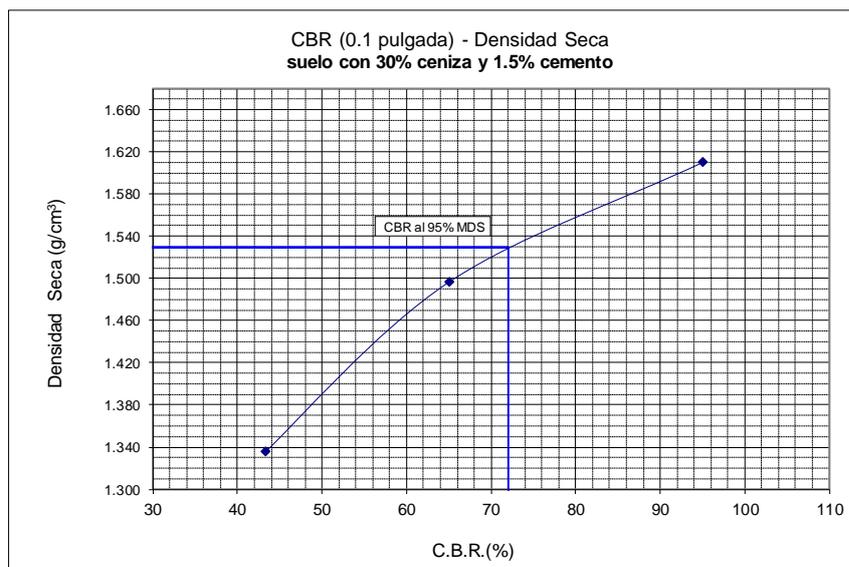
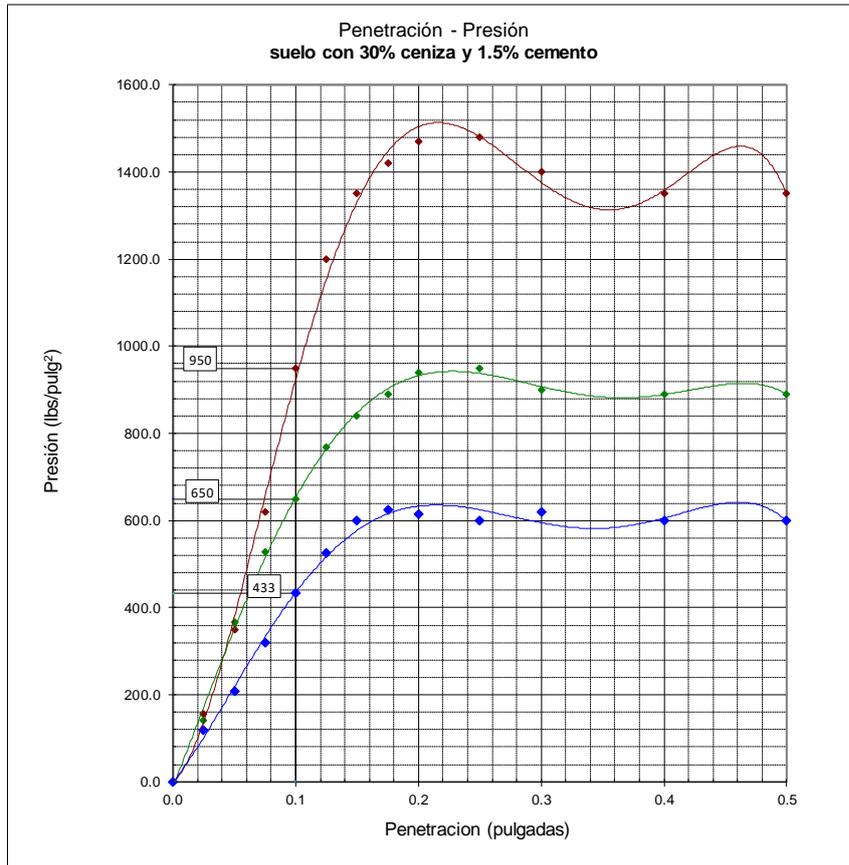
Ejecución/revisión: Luis Carbajal Supervisión/aprobación: Luisa Shuan Fecha: Noviembre 2023



"ESTABILIZACIÓN DE SUELOS FINOS CON CENIZA DE FONDO Y CEMENTO PARA USO COMO SUBRASANTE EN LA REGIÓN CAJAMARCA"

Muestra: suelo fino
Proporción ceniza: 30%
Proporción cemento: 1.5%

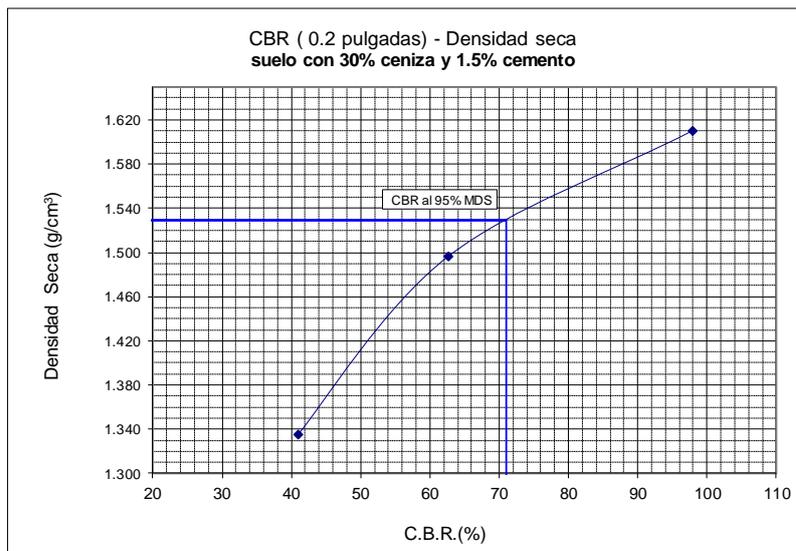
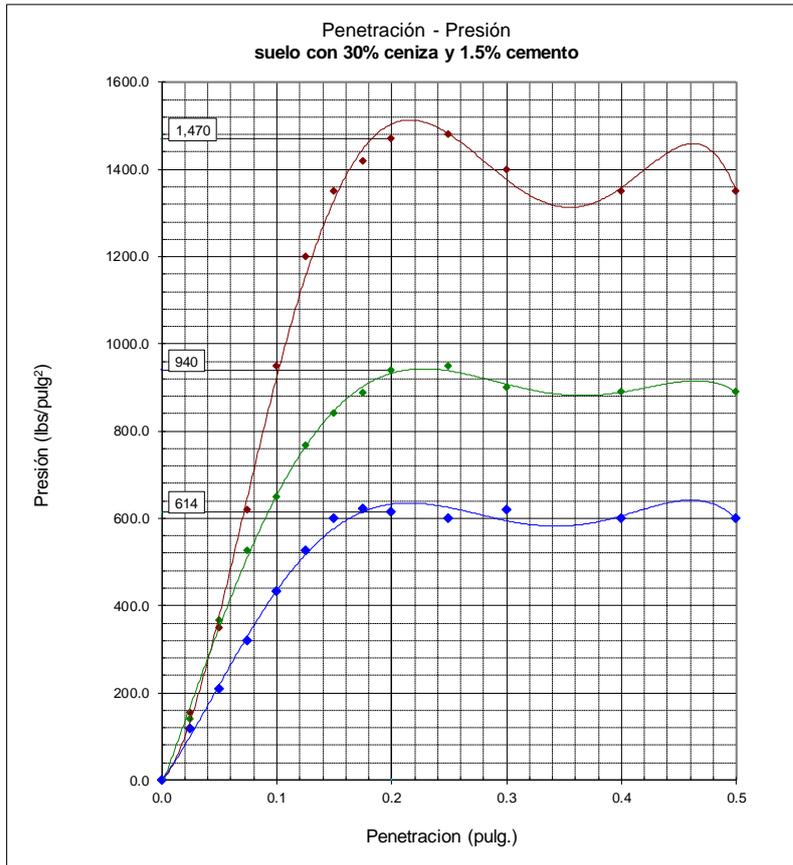
Gráficos CBR - 0.1 pulgadas



CBR (0.1 Pulg.) al 100% de la MDS	: 95.0%
CBR (0.1 Pulg.) al 95% de la MDS	: 72.0%

	UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL	RESULTADO DE ENSAYOS Página 3 de 3
	CALIFORNIA BEARING RATIO - CBR ASTM D1883	
"ESTABILIZACIÓN DE SUELOS FINOS CON CENIZA DE FONDO Y CEMENTO PARA USO COMO SUBRASANTE EN LA REGIÓN CAJAMARCA"		Muestra: suelo fino Proporción ceniza: 30% Proporción cemento: 1.5%

Gráficos CBR - 0.2 pulgadas



CBR (0.2 Pulg.) al 100% de la MDS : 98.0%
CBR (0.2 Pulg.) al 95% de la MDS : 71.0%

ENSAYO CBR SN+2%CEMENTO

	UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA	RESULTADO DE ENSAYOS Página 1 de 3
	FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL	
CALIFORNIA BEARING RATIO - CBR ASTM D1883		
"ESTABILIZACIÓN DE SUELOS FINOS CON CENIZA DE FONDO Y CEMENTO PARA USO COMO SUBRASANTE EN LA REGIÓN CAJAMARCA"		Muestra: suelo fino Proporción ceniza: 0% Proporción cemento: 2%

INFORME DE ENSAYO DETERMINACIÓN DE CBR EN SUELO COMPACTADO EN LABORATORIO

CARACTERÍSTICAS DE LOS ESPECÍMENES COMPACTADOS

Molde	1		2		3	
Numero de golpes/capa	56		25		10	
Condición de la muestra	inicial	final	inicial	final	inicial	final
Densidad húmeda (g/cm ³)	1.972	2.054	1.859	1.965	1.667	1.765
Densidad seca (g/cm ³)	1.623	1.585	1.528	1.494	1.368	1.339
Contenido de humedad (%)	21.5	29.6	21.7	31.5	21.9	31.8
Expansión (%)	0.0	2.4	0.0	2.3	0.0	2.1

RESULTADOS ENSAYOS PRESIÓN - PENETRACIÓN

Molde 56 golpes/capa				Molde 25 golpes/capa				Molde 10 golpes/capa			
Penetración (pulgadas)	Presión (lb/pulg ²)	Presión patrón (lb/pulg ²)	Presión corregida (lb/pulg ²)	Penetración (pulgadas)	Presión (lb/pulg ²)	Presión patrón (lb/pulg ²)	Presión corregida (lb/pulg ²)	Penetración (pulgadas)	Presión (lb/pulg ²)	Presión patrón (lb/pulg ²)	Presión corregida (lb/pulg ²)
0.000	0.0			0.000	0.0			0.000	0.0		
0.025	11.7			0.025	15.4			0.025	27.2		
0.050	28.6			0.050	34.5			0.050	54.3		
0.075	52.9			0.075	63.9			0.075	72.7		
0.100	85.2	1000	166.8	0.100	105.7	1000	150.7	0.100	97.7	1000	97.7
0.125	132.2			0.125	148.3			0.125	115.3		
0.150	176.2			0.150	180.6			0.150	127.0		
0.175	202.7			0.175	195.3			0.175	136.6		
0.200	224.7	1500	260.3	0.200	201.9	1500	215.7	0.200	143.9	1500	143.9
0.250	260.0			0.250	215.0			0.250	150.0		
0.300	284.2	1900		0.300	218.1	1900		0.300	161.6	1900	
0.400	316.5	2300		0.400	240.9	2300		0.400	185.8	2300	
0.500	347.3	2600		0.500	278.3	2600		0.500	209.3	2600	

VALOR DE CBR 0.1 PULG. DE PENETRACIÓN

Molde	Golpes/capa	Penetración (pulg)	Presión (Lb/pulg ²)	Presión patrón (Lb/pulg ²)	C.B.R. (%)	CBR 100% MDS	CBR 95% MDS
1	56	0.1	166.8	1000	16.7	16.7	15.4
2	25	0.1	150.7	1000	15.1		
3	10	0.1	97.7	1000	9.8		

VALOR DE CBR 0.2 PULG. DE PENETRACIÓN

Molde	Golpes/capa	Penetración (pulg)	Presión (Lb/pulg ²)	Presión patrón (Lb/pulg ²)	C.B.R. (%)	CBR 100% MDS	CBR 95% MDS
1	56	0.2	260.3	1500	17.4	17.4	14.8
2	25	0.2	215.7	1500	14.4		
3	10	0.2	143.9	1500	9.6		

MÉTODO DE COMPACTACIÓN Y CONDICIÓN DE LAS MUESTRAS

Muestra: suelo fino mejorado con 2% de cemento
 Método de compactación: Próctor Modificado ASTM D1557
 Humedad referencial de compactación: 21.5%
 Periodo de reposo en ambiente controlado: siete días
 Periodo de inmersión: siete días.

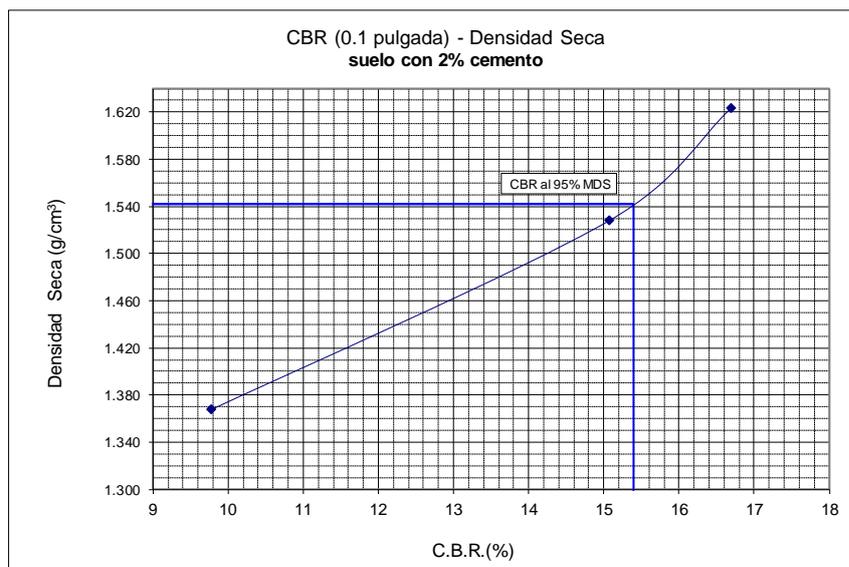
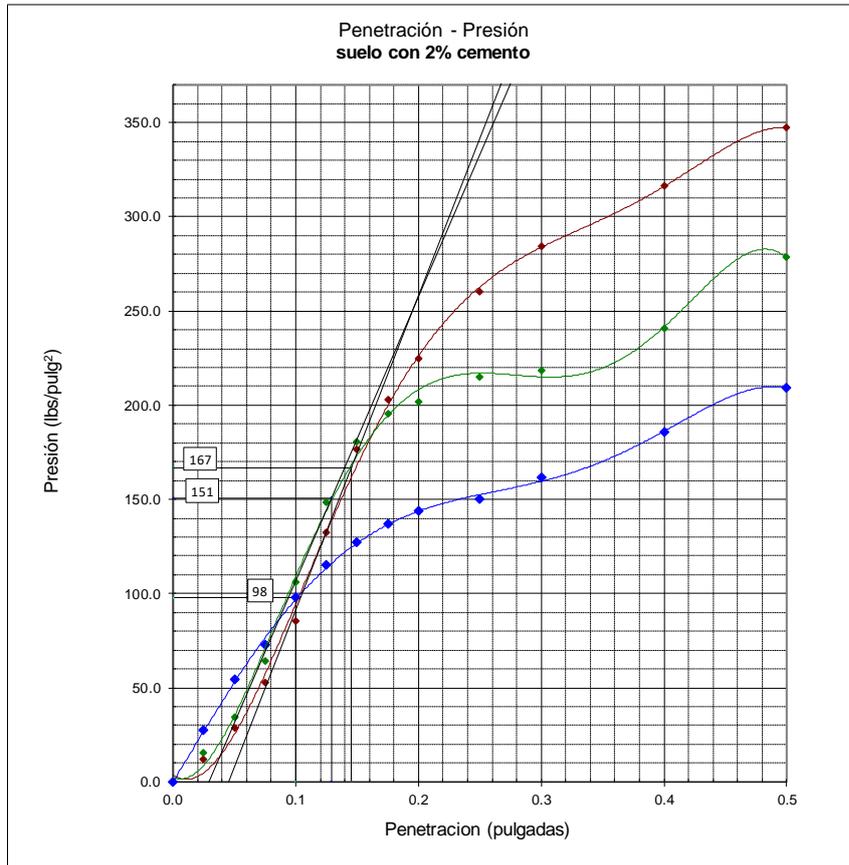
Ejecución/revisión: Luis Carbajal Supervisión/aprobación: Luisa Shuan Fecha: Noviembre 2023



"ESTABILIZACIÓN DE SUELOS FINOS CON CENIZA DE FONDO Y CEMENTO PARA USO COMO SUBRASANTE EN LA REGIÓN CAJAMARCA"

Muestra: suelo fino
Proporción ceniza: 0%
Proporción cemento: 2%

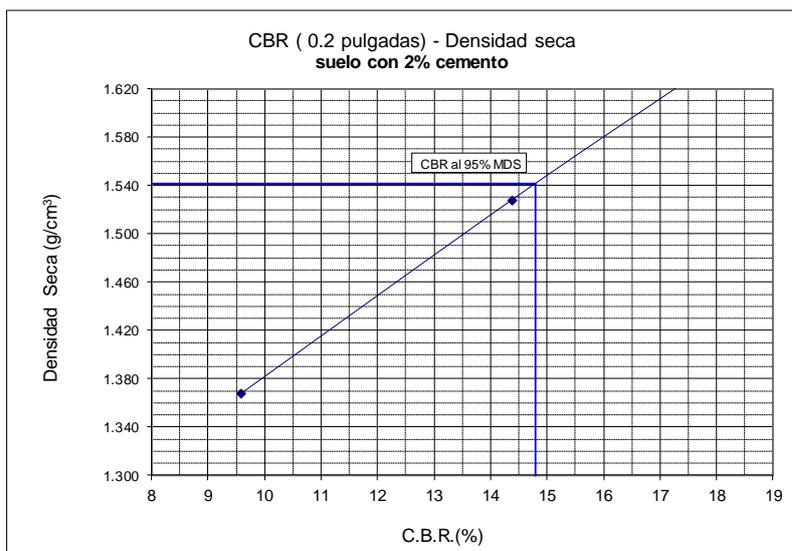
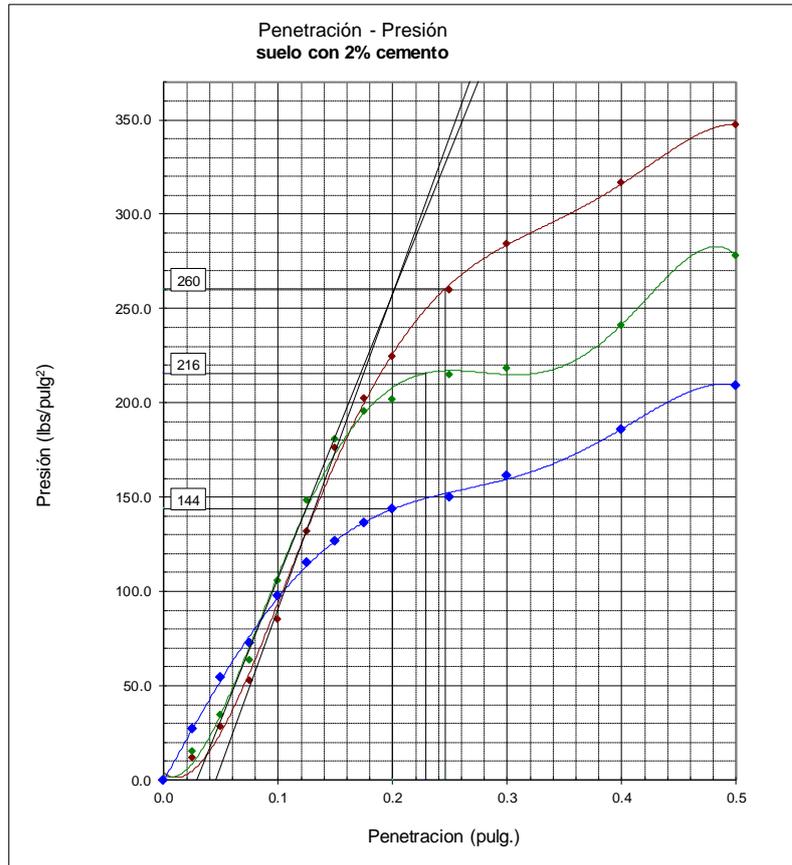
Gráficos CBR - 0.1 pulgadas



CBR (0.1 Pulg.) al 100% de la MDS : 16.7%
CBR (0.1 Pulg.) al 95% de la MDS : 15.4%

	UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL	RESULTADO DE ENSAYOS Página 3 de 3
	CALIFORNIA BEARING RATIO - CBR ASTM D1883	
"ESTABILIZACIÓN DE SUELOS FINOS CON CENIZA DE FONDO Y CEMENTO PARA USO COMO SUBRASANTE EN LA REGIÓN CAJAMARCA"		Muestra: suelo fino Proporción ceniza: 0% Proporción cemento: 2%

Gráficos CBR - 0.2 pulgadas



CBR (0.2 Pulg.) al 100% de la MDS : 17.4%
 CBR (0.2 Pulg.) al 95% de la MDS : 14.8%

ENSAYO CBR SUELO+2%CEMENTO+10%CEMENTO DE FONDO

	UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL	RESULTADO DE ENSAYOS Página 1 de 3
	CALIFORNIA BEARING RATIO - CBR ASTM D1883	
"ESTABILIZACIÓN DE SUELOS FINOS CON CENIZA DE FONDO Y CEMENTO PARA USO COMO SUBRASANTE EN LA REGIÓN CAJAMARCA"		Muestra: suelo fino Proporción ceniza: 10% Proporción cemento: 2.0%

INFORME DE ENSAYO DETERMINACIÓN DE CBR EN SUELO COMPACTADO EN LABORATORIO

CARACTERÍSTICAS DE LOS ESPECÍMENES COMPACTADOS

Molde	1		2		3	
	56		25		10	
Numero de golpes/capa	56		25		10	
Condición de la muestra	inicial	final	inicial	final	inicial	final
Densidad húmeda (g/cm ³)	1.945	2.022	1.849	1.947	1.624	1.728
Densidad seca (g/cm ³)	1.619	1.593	1.538	1.515	1.352	1.338
Contenido de humedad (%)	20.2	26.9	20.2	28.5	20.1	29.1
Expansión (%)	0.0	1.6	0.0	1.5	0.0	1.1

RESULTADOS ENSAYOS PRESIÓN - PENETRACIÓN

Molde 56 golpes/capa				Molde 25 golpes/capa				Molde 10 golpes/capa			
Penetración (pulgadas)	Presión (lb/pulg ²)	Presión patrón (lb/pulg ²)	Presión corregida (lb/pulg ²)	Penetración (pulgadas)	Presión (lb/pulg ²)	Presión patrón (lb/pulg ²)	Presión corregida (lb/pulg ²)	Penetración (pulgadas)	Presión (lb/pulg ²)	Presión patrón (lb/pulg ²)	Presión corregida (lb/pulg ²)
0.000	0.0			0.000	0.0			0.000	0.0		
0.025	33.0			0.025	24.2			0.025	14.9		
0.050	90.3			0.050	68.3			0.050	41.2		
0.075	163.8			0.075	123.4			0.075	74.7		
0.100	234.3	1000	246.1	0.100	171.8	1000	171.8	0.100	105.6	1000	105.6
0.125	268.8			0.125	223.2			0.125	127.9		
0.150	308.4			0.150	273.9			0.150	151.4		
0.175	365.7			0.175	305.5			0.175	174.5		
0.200	387.0	1500	385.6	0.200	321.6	1500	321.6	0.200	184.2	1500	184.2
0.250	393.0			0.250	330.0			0.250	192.0		
0.300	376.0	1900		0.300	329.7	1900		0.300	198.2	1900	
0.400	366.4	2300		0.400	329.7	2300		0.400	203.0	2300	
0.500	366.4	2600		0.500	329.7	2600		0.500	217.7	2600	

VALOR DE CBR 0.1 PULG. DE PENETRACIÓN

Molde	Golpes/capa	Penetración (pulg)	Presión (Lb/pulg ²)	Presión patrón (Lb/pulg ²)	C.B.R. (%)	CBR 100% MDS	CBR 95% MDS
1	56	0.1	246.1	1000	24.6	24.6	17.2
2	25	0.1	171.8	1000	17.2		
3	10	0.1	105.6	1000	10.6		

VALOR DE CBR 0.2 PULG. DE PENETRACIÓN

Molde	Golpes/capa	Penetración (pulg)	Presión (Lb/pulg ²)	Presión patrón (Lb/pulg ²)	C.B.R. (%)	CBR 100% MDS	CBR 95% MDS
1	56	0.2	385.6	1500	25.7	25.7	21.5
2	25	0.2	321.6	1500	21.4		
3	10	0.2	184.2	1500	12.3		

MÉTODO DE COMPACTACIÓN Y CONDICIÓN DE LAS MUESTRAS

Muestra: suelo fino mejorado con 10% de ceniza y 2% de cemento

Método de compactación: Próctor Modificado ASTM D1557

Humedad referencial de compactación: 20.5%

Periodo de reposo en ambiente controlado: siete días

Periodo de inmersión: siete días.

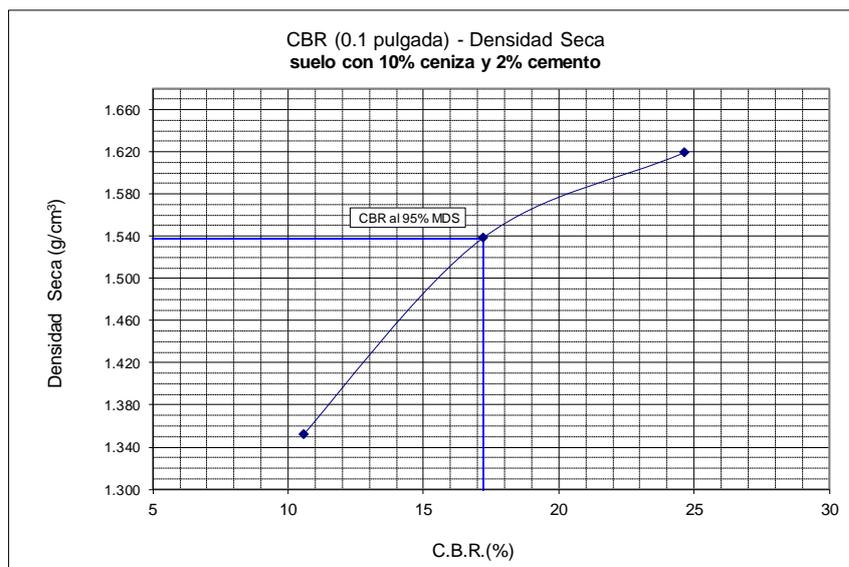
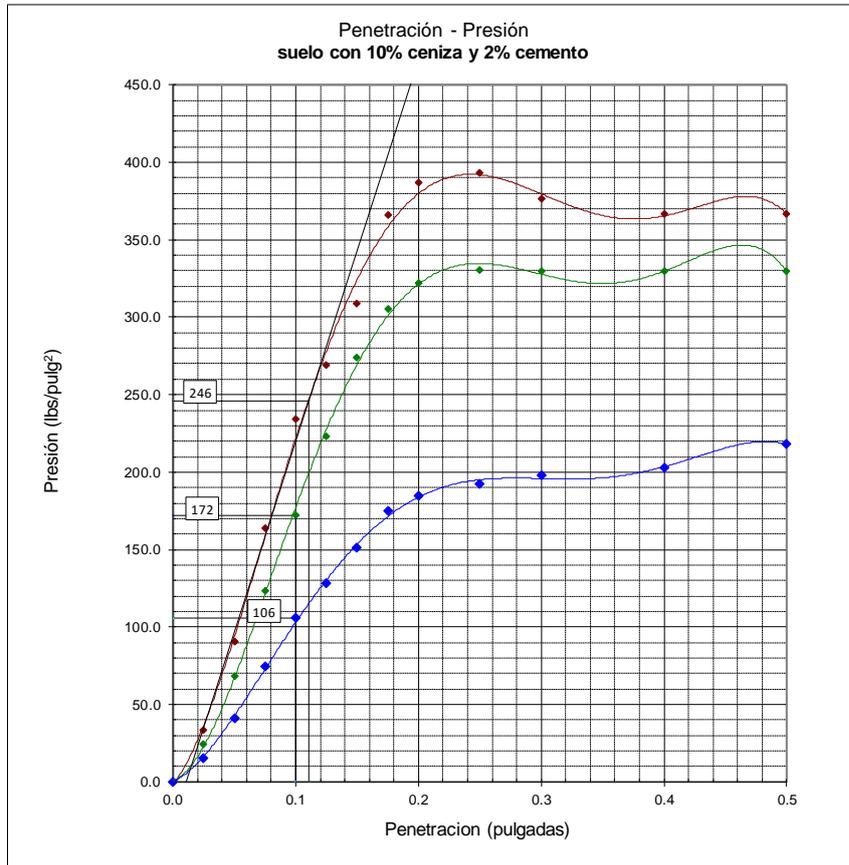
Ejecución/visión: Luis Carbajal Supervisión/aprobación: Luisa Shua Fecha: Noviembre 2023



"ESTABILIZACIÓN DE SUELOS FINOS CON CENIZA DE FONDO Y CEMENTO PARA USO COMO SUBRASANTE EN LA REGIÓN CAJAMARCA"

Muestra: suelo fino
Proporción ceniza: 10%
Proporción cemento: 2.0%

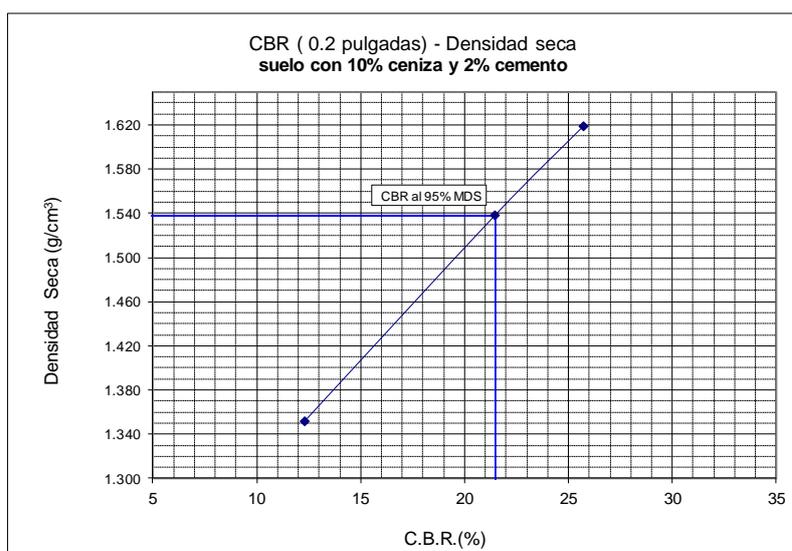
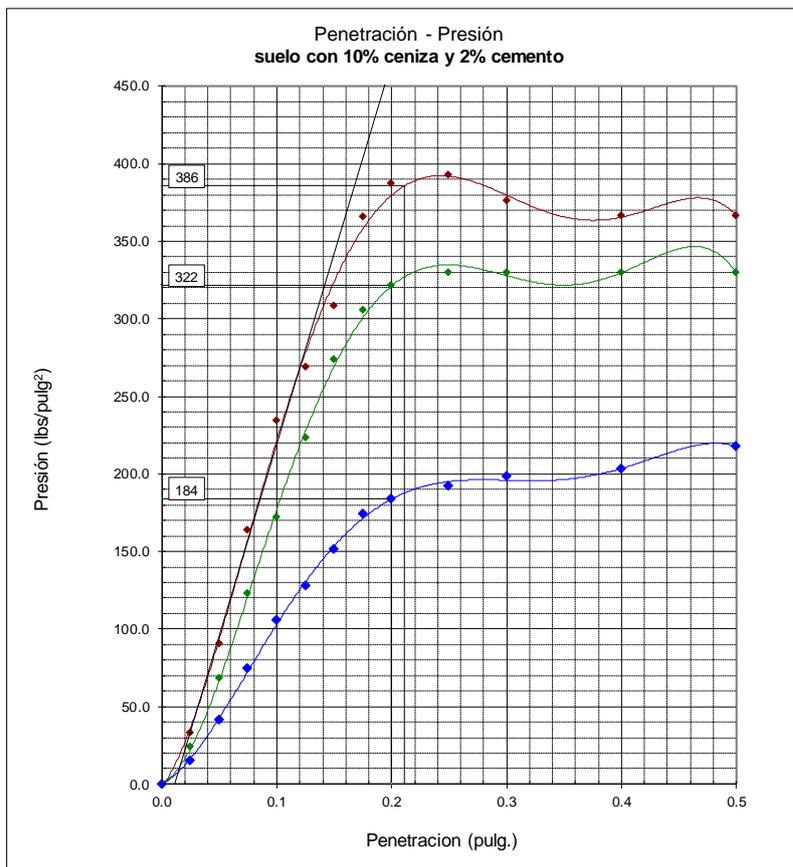
Gráficos CBR - 0.1 pulgadas



CBR (0.1 Pulg.) al 100% de la MDS	: 24.6%
CBR (0.1 Pulg.) al 95% de la MDS	: 17.2%

	UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL	RESULTADO DE ENSAYOS Página 3 de 3
	CALIFORNIA BEARING RATIO - CBR ASTM D1883	
"ESTABILIZACIÓN DE SUELOS FINOS CON CENIZA DE FONDO Y CEMENTO PARA USO COMO SUBRASANTE EN LA REGIÓN CAJAMARCA"		Muestra: suelo fino Proporción ceniza: 10% Proporción cemento: 2.0%

Gráficos CBR - 0.2 pulgadas



CBR (0.2 Pulg.) al 100% de la MDS : 25.7%
CBR (0.2 Pulg.) al 95% de la MDS : 21.5%

ENSAYO CBR SUELO+2%CEMENTO+15%CEMENTO DE FONDO

	UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA	RESULTADO DE ENSAYOS Página 1 de 3
	FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL	
CALIFORNIA BEARING RATIO - CBR ASTM D1883		
"ESTABILIZACIÓN DE SUELOS FINOS CON CENIZA DE FONDO Y CEMENTO PARA USO COMO SUBRASANTE EN LA REGIÓN CAJAMARCA"		Muestra: suelo fino Proporción ceniza: 15% Proporción cemento: 2%

INFORME DE ENSAYO DETERMINACIÓN DE CBR EN SUELO COMPACTADO EN LABORATORIO

CARACTERÍSTICAS DE LOS ESPECÍMENES COMPACTADOS

Molde	1		2		3	
	inicial	final	inicial	final	inicial	final
Numero de golpes/capa	56		25		10	
Condición de la muestra	inicial	final	inicial	final	inicial	final
Densidad húmeda (g/cm ³)	1.952	1.992	1.812	1.894	1.633	1.766
Densidad seca (g/cm ³)	1.615	1.606	1.498	1.492	1.348	1.343
Contenido de humedad (%)	20.8	24.1	21.0	27.0	21.1	31.5
Expansión (%)	0.0	0.6	0.0	0.4	0.0	0.3

RESULTADOS ENSAYOS PRESIÓN - PENETRACIÓN

Molde 56 golpes/capa				Molde 25 golpes/capa				Molde 10 golpes/capa			
Penetración (pulgadas)	Presión (lb/pulg ²)	Presión patrón (lb/pulg ²)	Presión corregida (lb/pulg ²)	Penetración (pulgadas)	Presión (lb/pulg ²)	Presión patrón (lb/pulg ²)	Presión corregida (lb/pulg ²)	Penetración (pulgadas)	Presión (lb/pulg ²)	Presión patrón (lb/pulg ²)	Presión corregida (lb/pulg ²)
0.000	0.0			0.000	0.0			0.000	0.0		
0.025	185.8			0.025	80.8			0.025	47.7		
0.050	264.4			0.050	157.9			0.050	95.5		
0.075	365.7			0.075	234.3			0.075	145.4		
0.100	470.7	1000	470.7	0.100	320.9	1000	320.9	0.100	181.4	1000	181.4
0.125	552.2			0.125	412.0			0.125	202.7		
0.150	628.6			0.150	467.0			0.150	218.1		
0.175	660.9			0.175	507.4			0.175	224.7		
0.200	673.8	1500	673.8	0.200	510.4	1500	510.4	0.200	232.0	1500	232.0
0.250	710.0			0.250	508.0			0.250	240.0		
0.300	751.2	1900		0.300	495.7	1900		0.300	251.9	1900	
0.400	848.9	2300		0.400	550.8	2300		0.400	264.4	2300	
0.500	966.4	2600		0.500	589.0	2600		0.500	273.2	2600	

VALOR DE CBR 0.1 PULG. DE PENETRACIÓN

Molde	Golpes/capa	Penetración (pulg)	Presión (Lb/pulg ²)	Presión patrón (Lb/pulg ²)	C.B.R. (%)	CBR 100% MDS	CBR 95% MDS
1	56	0.1	470.7	1000	47.1	47.1	36.4
2	25	0.1	320.9	1000	32.1		
3	10	0.1	181.4	1000	18.1		

VALOR DE CBR 0.2 PULG. DE PENETRACIÓN

Molde	Golpes/capa	Penetración (pulg)	Presión (Lb/pulg ²)	Presión patrón (Lb/pulg ²)	C.B.R. (%)	CBR 100% MDS	CBR 95% MDS
1	56	0.2	673.8	1500	44.9	44.9	37.6
2	25	0.2	510.4	1500	34.0		
3	10	0.2	232.0	1500	15.5		

MÉTODO DE COMPACTACIÓN Y CONDICIÓN DE LAS MUESTRAS

Muestra: suelo fino mejorado con 15% de ceniza y 2% de cemento

Método de compactación: Próctor Modificado ASTM D1557

Humedad referencial de compactación: 20.5%

Periodo de reposo en ambiente controlado: siete días

Periodo de inmersión: siete días.

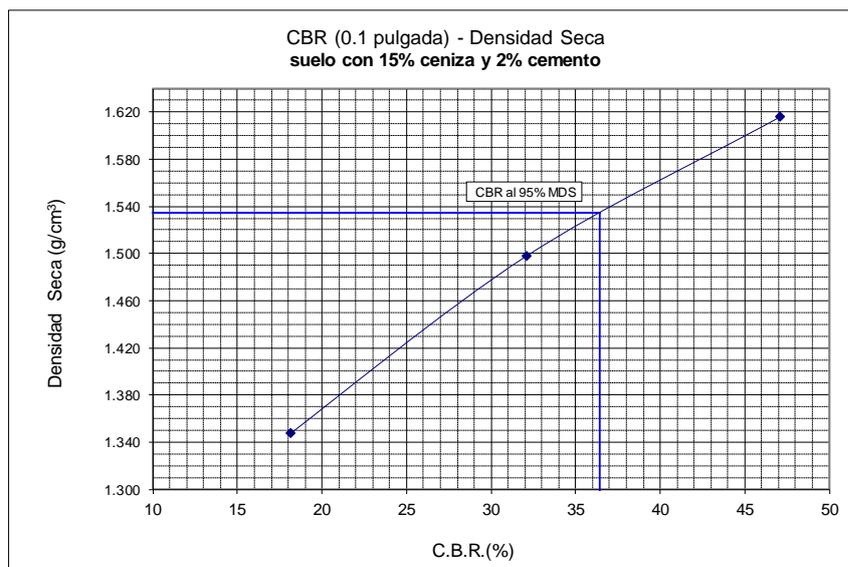
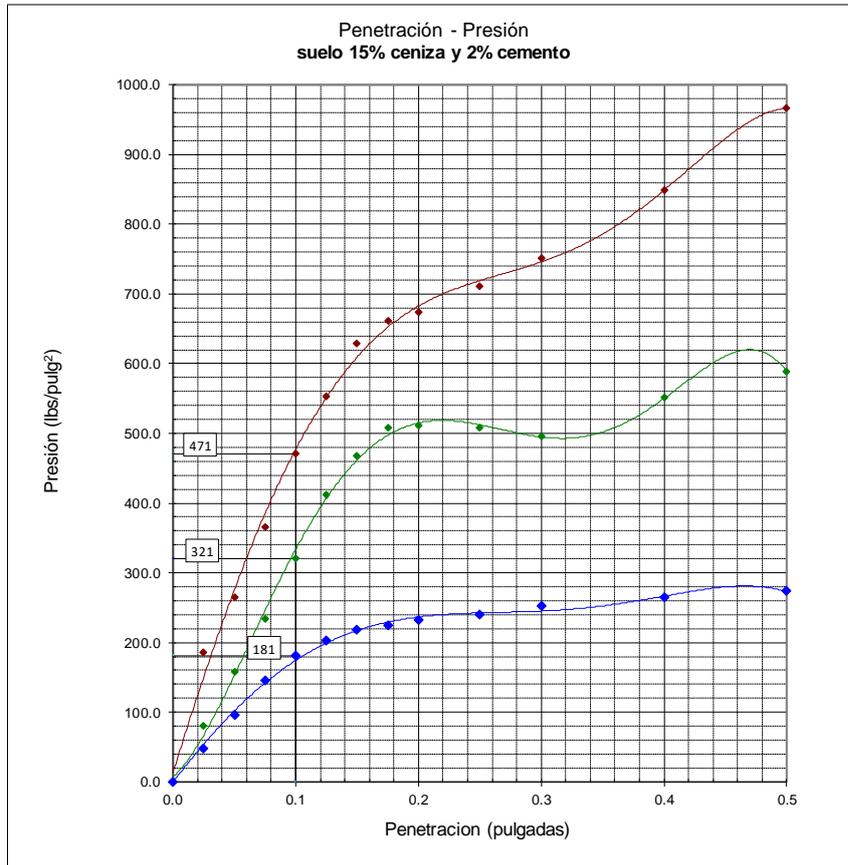
Ejecución/revisión: Luis Carbajal	Supervisión/aprobación: Luisa Shuan	Fecha: Noviembre 2023
-----------------------------------	-------------------------------------	-----------------------



"ESTABILIZACIÓN DE SUELOS FINOS CON CENIZA DE FONDO Y CEMENTO PARA USO COMO SUBRASANTE EN LA REGIÓN CAJAMARCA"

Muestra: suelo fino
Proporción ceniza: 15%
Proporción cemento: 2%

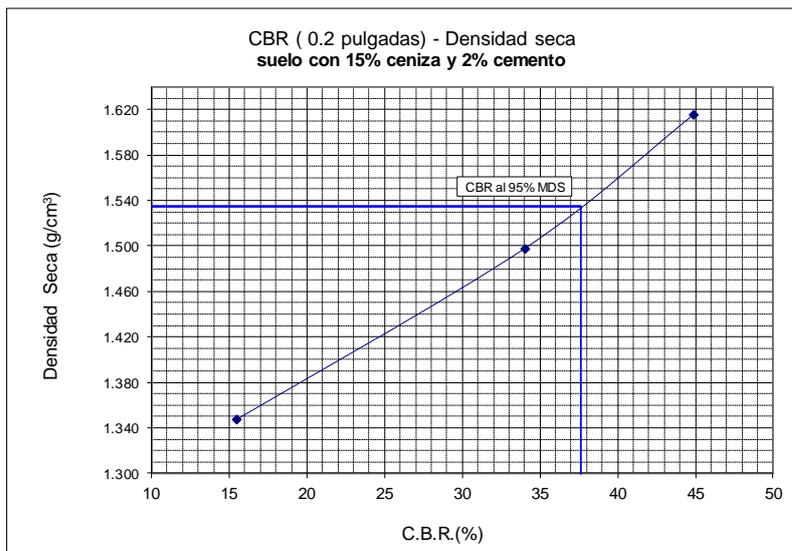
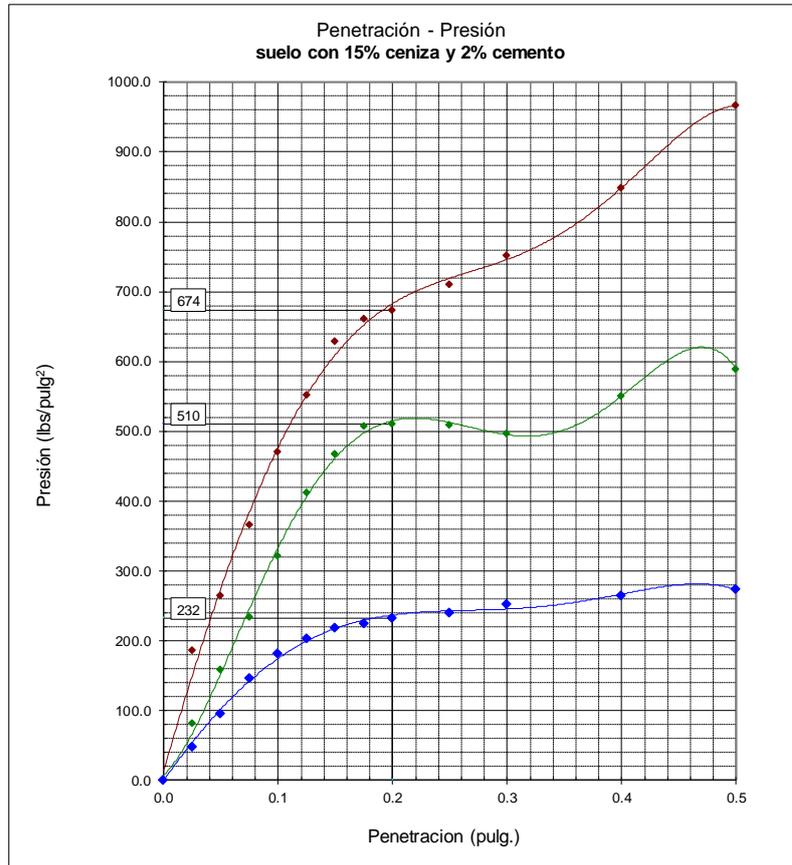
Gráficos CBR - 0.1 pulgadas



CBR (0.1 Pulg.) al 100% de la MDS	: 47.1%
CBR (0.1 Pulg.) al 95% de la MDS	: 36.4%

	UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL	RESULTADO DE ENSAYOS Página 3 de 3
	CALIFORNIA BEARING RATIO - CBR ASTM D1883	
"ESTABILIZACIÓN DE SUELOS FINOS CON CENIZA DE FONDO Y CEMENTO PARA USO COMO SUBRASANTE EN LA REGIÓN CAJAMARCA"		Muestra: suelo fino Proporción ceniza: 15% Proporción cemento: 2%

Gráficos CBR - 0.2 pulgadas



CBR (0.2 Pulg.) al 100% de la MDS : 44.9%
 CBR (0.2 Pulg.) al 95% de la MDS : 37.6%

ENSAYO CBR SUELO+2%CEMENTO+25%CEMENTO DE FONDO

	UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL	RESULTADO DE ENSAYOS Página 1 de 3
	CALIFORNIA BEARING RATIO - CBR ASTM D1883	
"ESTABILIZACIÓN DE SUELOS FINOS CON CENIZA DE FONDO Y CEMENTO PARA USO COMO SUBRASANTE EN LA REGIÓN CAJAMARCA"		Muestra: suelo fino Proporción ceniza: 25% Proporción cemento: 2%

INFORME DE ENSAYO DETERMINACIÓN DE CBR EN SUELO COMPACTADO EN LABORATORIO

CARACTERÍSTICAS DE LOS ESPECÍMENES COMPACTADOS

Molde	1		2		3	
Numero de golpes/capa	56		25		10	
Condición de la muestra	inicial	final	inicial	final	inicial	final
Densidad húmeda (g/cm ³)	1.943	2.004	1.787	1.848	1.626	1.729
Densidad seca (g/cm ³)	1.617	1.614	1.481	1.479	1.343	1.342
Contenido de humedad (%)	20.2	24.2	20.7	24.9	21.1	28.8
Expansión (%)	0.0	0.2	0.0	0.1	0.0	0.1

RESULTADOS ENSAYOS PRESIÓN - PENETRACIÓN

Molde 56 golpes/capa				Molde 25 golpes/capa				Molde 10 golpes/capa			
Penetración (pulgadas)	Presión (lb/pulg ²)	Presión patrón (lb/pulg ²)	Presión corregida (lb/pulg ²)	Penetración (pulgadas)	Presión (lb/pulg ²)	Presión patrón (lb/pulg ²)	Presión corregida (lb/pulg ²)	Penetración (pulgadas)	Presión (lb/pulg ²)	Presión patrón (lb/pulg ²)	Presión corregida (lb/pulg ²)
0.000	0.0			0.000	0.0			0.000	0.0		
0.025	184.0			0.025	38.9			0.025	43.4		
0.050	420.9			0.050	138.8			0.050	98.3		
0.075	640.2			0.075	248.2			0.075	141.8		
0.100	864.0	1000	864.0	0.100	421.4	1000	421.4	0.100	192.2	1000	192.2
0.125	1050.0			0.125	501.4			0.125	218.9		
0.150	1195.7			0.150	540.0			0.150	227.3		
0.175	1220.0			0.175	570.0			0.175	229.6		
0.200	1250.0	1500	1250.0	0.200	549.9	1500	549.9	0.200	236.0	1500	236.0
0.250	1165.0			0.250	530.0			0.250	240.0		
0.300	1090.0	1900		0.300	490.5	1900		0.300	249.0	1900	
0.400	1000.0	2300		0.400	489.1	2300		0.400	254.9	2300	
0.500	1000.0	2600		0.500	474.4	2600		0.500	259.4	2600	

VALOR DE CBR 0.1 PULG. DE PENETRACIÓN

Molde	Golpes/capa	Penetración (pulg)	Presión (Lb/pulg ²)	Presión patrón (Lb/pulg ²)	C.B.R. (%)	CBR 100% MDS	CBR 95% MDS
1	56	0.1	864.0	1000	86.4	86.4	59.0
2	25	0.1	421.4	1000	42.1		
3	10	0.1	192.2	1000	19.2		

VALOR DE CBR 0.2 PULG. DE PENETRACIÓN

Molde	Golpes/capa	Penetración (pulg)	Presión (Lb/pulg ²)	Presión patrón (Lb/pulg ²)	C.B.R. (%)	CBR 100% MDS	CBR 95% MDS
1	56	0.2	1250.0	1500	83.3	83.3	54.0
2	25	0.2	549.9	1500	36.7		
3	10	0.2	236.0	1500	15.7		

MÉTODO DE COMPACTACIÓN Y CONDICIÓN DE LAS MUESTRAS

Muestra: suelo fino mejorado con 25% de ceniza y 2% de cemento

Método de compactación: Próctor Modificado ASTM D1557

Humedad referencial de compactación: 21.0%

Periodo de reposo en ambiente controlado: siete días

Periodo de inmersión: siete días.

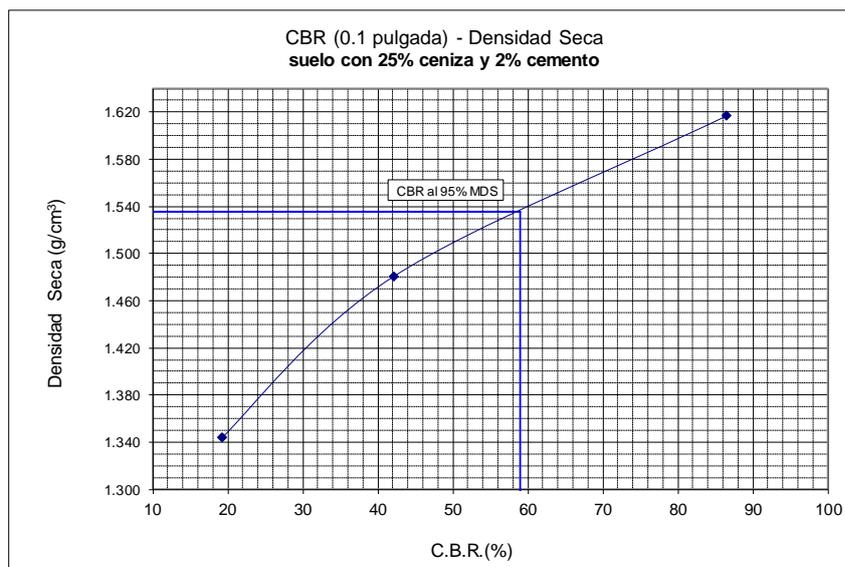
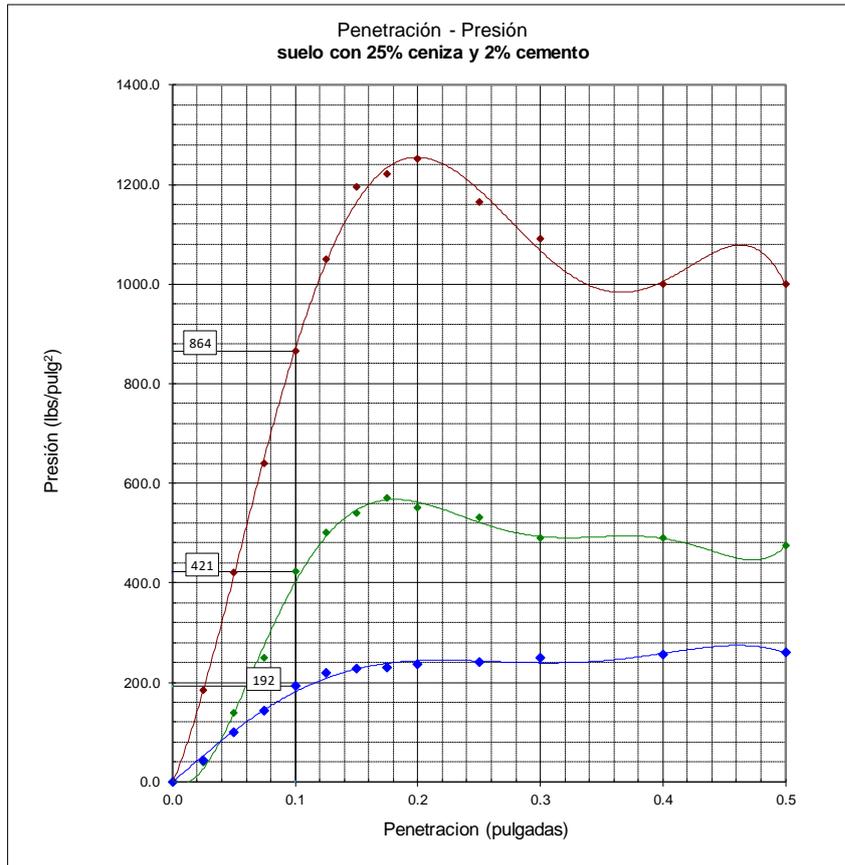
Ejecución/revisión: Luis Carbajal Supervisión/aprobación: Luisa Shuan Fecha: Noviembre 2023



"ESTABILIZACIÓN DE SUELOS FINOS CON CENIZA DE FONDO Y CEMENTO PARA USO COMO SUBRASANTE EN LA REGIÓN CAJAMARCA"

Muestra: suelo fino
Proporción ceniza: 25%
Proporción cemento: 2%

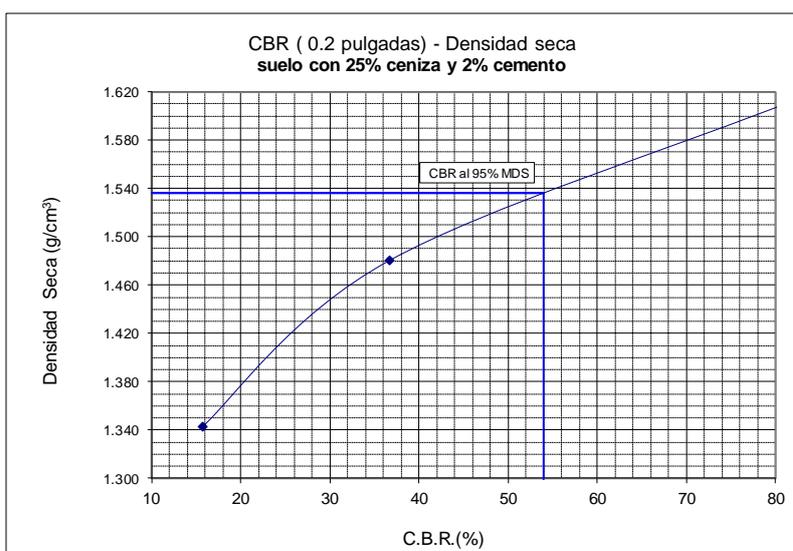
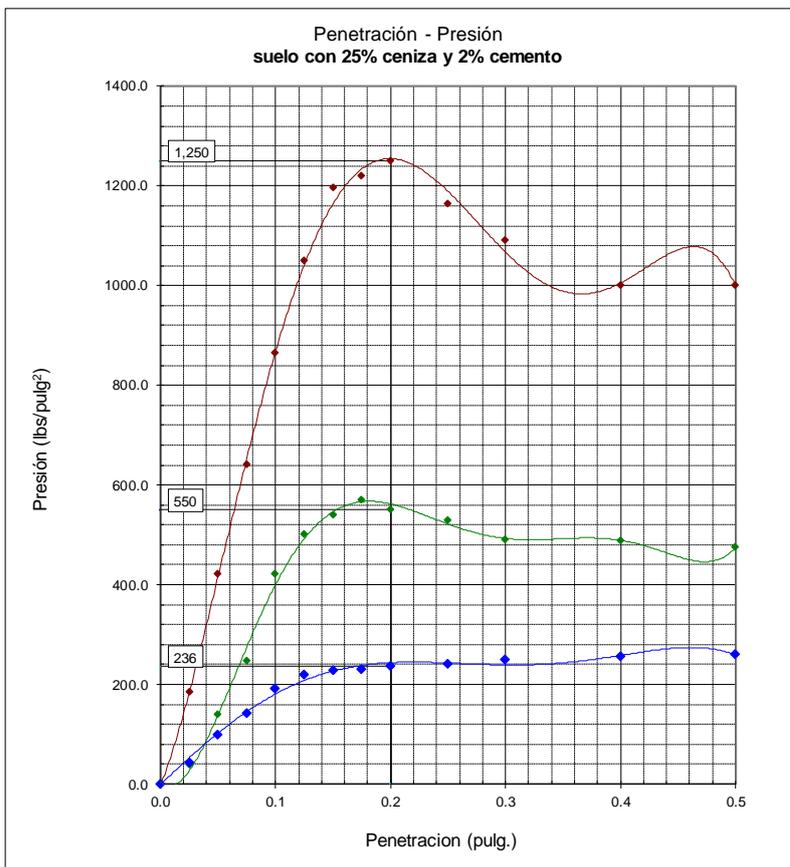
Gráficos CBR - 0.1 pulgadas



CBR (0.1 Pulg.) al 100% de la MDS	: 86.4%
CBR (0.1 Pulg.) al 95% de la MDS	: 59.0%

	UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL	RESULTADO DE ENSAYOS Página 3 de 3
	CALIFORNIA BEARING RATIO - CBR ASTM D1883	
"ESTABILIZACIÓN DE SUELOS FINOS CON CENIZA DE FONDO Y CEMENTO PARA USO COMO SUBRASANTE EN LA REGIÓN CAJAMARCA"		Muestra: suelo fino Proporción ceniza: 25% Proporción cemento: 2%

Gráficos CBR - 0.2 pulgadas



CBR (0.2 Pulg.) al 100% de la MDS	: 83.3%
CBR (0.2 Pulg.) al 95% de la MDS	: 54.0%

ENSAYO CBR SUELO+2%CEMENTO+30%CEMENTO DE FONDO

	UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL	RESULTADO DE ENSAYOS Página 1 de 3
	CALIFORNIA BEARING RATIO - CBR ASTM D1883	
"ESTABILIZACIÓN DE SUELOS FINOS CON CENIZA DE FONDO Y CEMENTO PARA USO COMO SUBRASANTE EN LA REGIÓN CAJAMARCA"		Muestra: suelo fino Proporción ceniza: 30% Proporción cemento: 2%

INFORME DE ENSAYO DETERMINACIÓN DE CBR EN SUELO COMPACTADO EN LABORATORIO

CARACTERÍSTICAS DE LOS ESPECÍMENES COMPACTADOS

Molde	1		2		3	
	56		25		10	
Numero de golpes/capa	inicial	final	inicial	final	inicial	final
Densidad húmeda (g/cm ³)	1.907	2.005	1.753	1.863	1.591	1.730
Densidad seca (g/cm ³)	1.601	1.599	1.470	1.468	1.335	1.334
Contenido de humedad (%)	19.1	25.4	19.3	26.8	19.2	29.7
Expansión (%)	0.0	0.1	0.0	0.1	0.0	0.0

RESULTADOS ENSAYOS PRESIÓN - PENETRACIÓN

Molde 56 golpes/capa				Molde 25 golpes/capa				Molde 10 golpes/capa			
Penetración (pulgadas)	Presión (lb/pulg ²)	Presión patrón (lb/pulg ²)	Presión corregida (lb/pulg ²)	Penetración (pulgadas)	Presión (lb/pulg ²)	Presión patrón (lb/pulg ²)	Presión corregida (lb/pulg ²)	Penetración (pulgadas)	Presión (lb/pulg ²)	Presión patrón (lb/pulg ²)	Presión corregida (lb/pulg ²)
0.000	0.0			0.000	0.0			0.000	0.0		
0.025	255.5			0.025	162.3			0.025	117.2		
0.050	449.4			0.050	365.7			0.050	207.9		
0.075	721.1			0.075	527.3			0.075	318.3		
0.100	1100.0	1000	1100.0	0.100	696.1	1000	696.1	0.100	433.1	1000	433.1
0.125	1291.7			0.125	767.4			0.125	525.1		
0.150	1476.0			0.150	840.1			0.150	600.0		
0.175	1527.4			0.175	888.5			0.175	623.2		
0.200	1468.7	1500	1468.7	0.200	939.9	1500	939.9	0.200	614.2	1500	614.2
0.250	1400.0			0.250	880.0			0.250	600.0		
0.300	1268.9	1900		0.300	783.5	1900		0.300	523.4	1900	
0.400	1268.9	2300		0.400	771.8	2300		0.400	520.4	2300	
0.500	1268.9	2600		0.500	771.8	2600		0.500	520.4	2600	

VALOR DE CBR 0.1 PULG. DE PENETRACIÓN

Molde	Golpes/capa	Penetración (pulg)	Presión (Lb/pulg ²)	Presión patrón (Lb/pulg ²)	C.B.R. (%)	CBR 100% MDS	CBR 95% MDS
1	56	0.1	1100.0	1000	110.0	110.0	84.0
2	25	0.1	696.1	1000	69.6		
3	10	0.1	433.1	1000	43.3		

VALOR DE CBR 0.2 PULG. DE PENETRACIÓN

Molde	Golpes/capa	Penetración (pulg)	Presión (Lb/pulg ²)	Presión patrón (Lb/pulg ²)	C.B.R. (%)	CBR 100% MDS	CBR 95% MDS
1	56	0.2	1468.7	1500	97.9	97.9	75.0
2	25	0.2	939.9	1500	62.7		
3	10	0.2	614.2	1500	40.9		

MÉTODO DE COMPACTACIÓN Y CONDICIÓN DE LAS MUESTRAS

Muestra: suelo fino mejorado con 30% de ceniza y 2% de cemento

Método de compactación: Próctor Modificado ASTM D1557

Humedad referencial de compactación: 19.0%

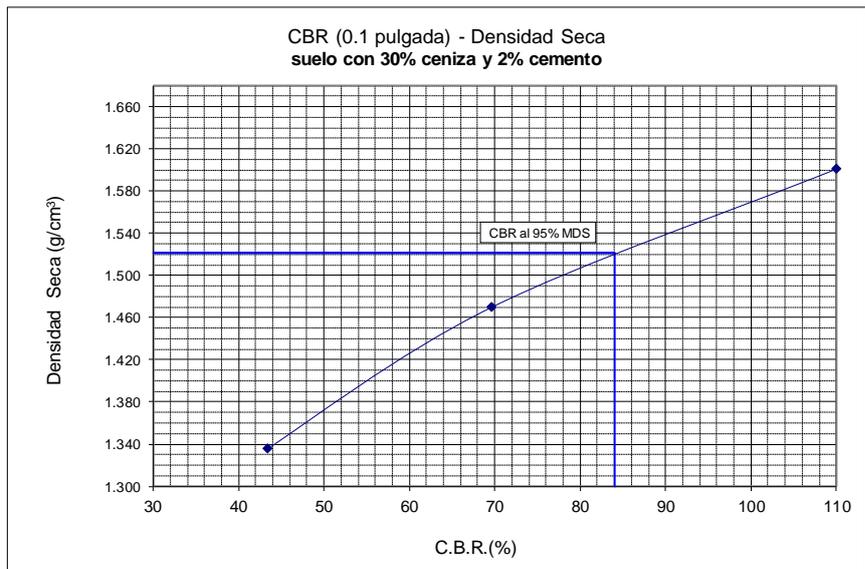
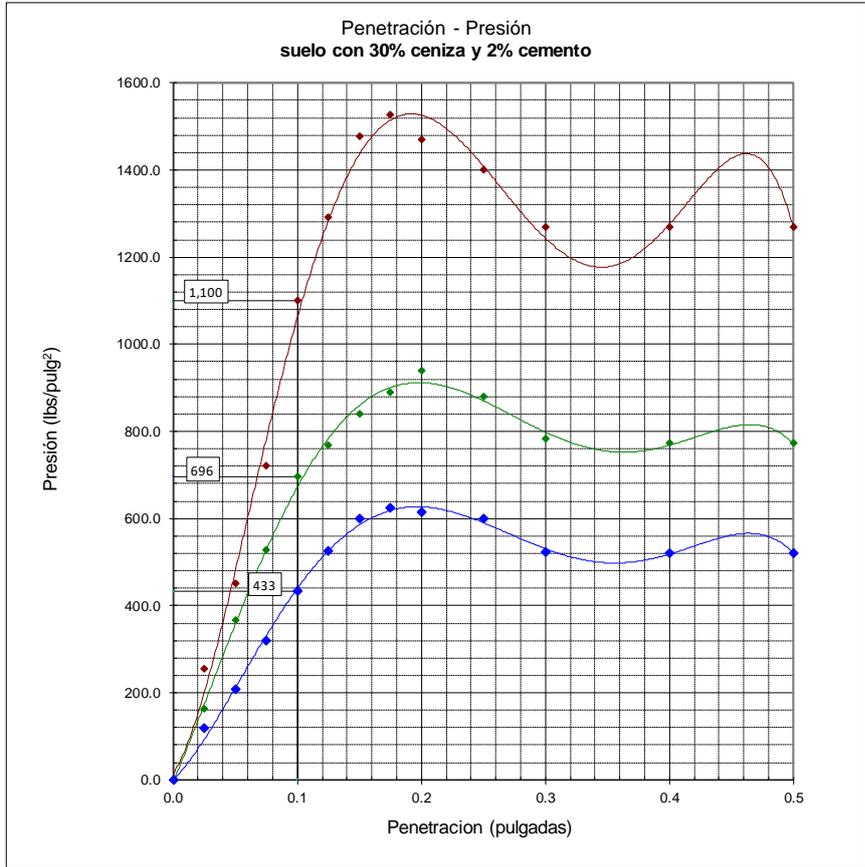
Periodo de reposo en ambiente controlado: siete días

Periodo de inmersión: siete días.

Ejecución/revisión: Luis Carbajal Supervisión/aprobación: Luisa Shuan Fecha: Noviembre 2023

	UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL	RESULTADO DE ENSAYOS Página 2 de 3
	CALIFORNIA BEARING RATIO - CBR ASTM D1883	
"ESTABILIZACIÓN DE SUELOS FINOS CON CENIZA DE FONDO Y CEMENTO PARA USO COMO SUBRASANTE EN LA REGIÓN CAJAMARCA"		Muestra: suelo fino Proporción ceniza: 30% Proporción cemento: 2%

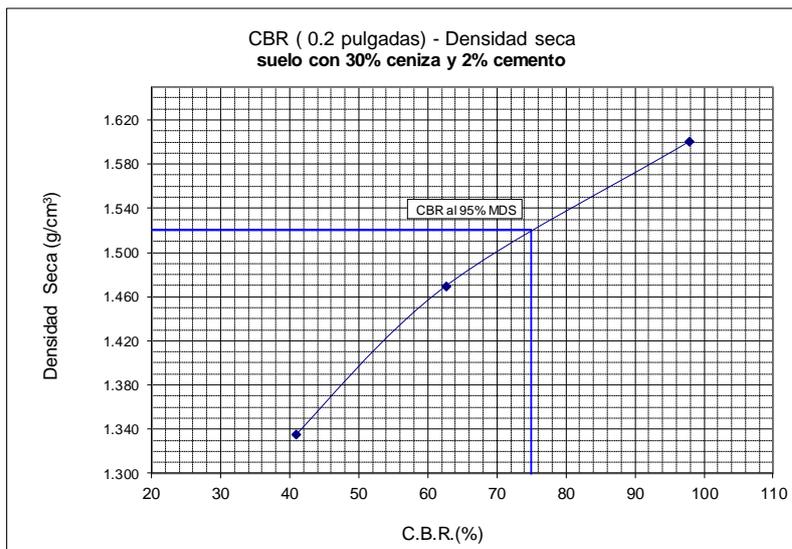
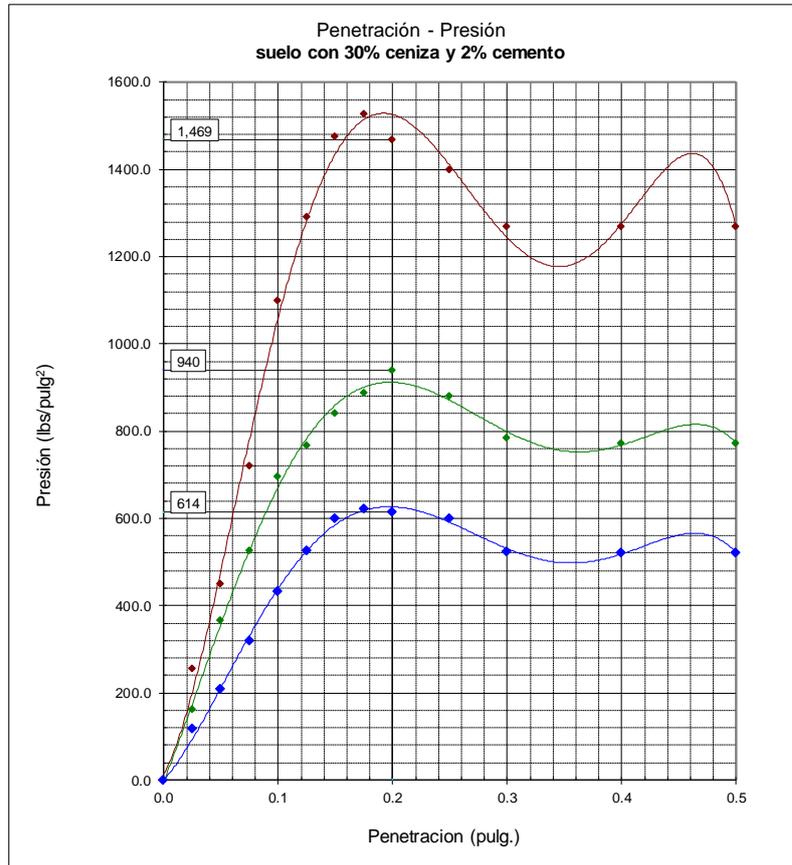
Gráficos CBR - 0.1 pulgadas



CBR (0.1 Pulg.) al 100% de la MDS	: 110.0%
CBR (0.1 Pulg.) al 95% de la MDS	: 84.0%

	UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL	RESULTADO DE ENSAYOS Página 3 de 3
	CALIFORNIA BEARING RATIO - CBR ASTM D1883	
"ESTABILIZACIÓN DE SUELOS FINOS CON CENIZA DE FONDO Y CEMENTO PARA USO COMO SUBRASANTE EN LA REGIÓN CAJAMARCA"		Muestra: suelo fino Proporción ceniza: 30% Proporción cemento: 2%

Gráficos CBR - 0.2 pulgadas



CBR (0.2 Pulg.) al 100% de la MDS : 97.9%
 CBR (0.2 Pulg.) al 95% de la MDS : 75.0%

ENSAYO CBR SN+4%CEMENTO

	UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA	RESULTADO DE ENSAYOS Página 1 de 3
	FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL	
CALIFORNIA BEARING RATIO - CBR ASTM D1883		
"ESTABILIZACIÓN DE SUELOS FINOS CON CENIZA DE FONDO Y CEMENTO PARA USO COMO SUBRASANTE EN LA REGIÓN CAJAMARCA"		Muestra: suelo fino Proporción ceniza: 0% Proporción cemento: 4%

INFORME DE ENSAYO DETERMINACIÓN DE CBR EN SUELO COMPACTADO EN LABORATORIO

CARACTERÍSTICAS DE LOS ESPECÍMENES COMPACTADOS

Molde	1		2		3	
Numero de golpes/capa	56		25		10	
Condición de la muestra	inicial	final	inicial	final	inicial	final
Densidad húmeda (g/cm ³)	1.970	1.987	1.805	1.870	1.639	1.753
Densidad seca (g/cm ³)	1.626	1.622	1.492	1.491	1.364	1.364
Contenido de humedad (%)	21.2	22.5	21.0	25.4	20.2	28.5
Expansión (%)	0.0	0.2	0.0	0.1	0.0	0.0

RESULTADOS ENSAYOS PRESIÓN - PENETRACIÓN

Molde 56 golpes/capa				Molde 25 golpes/capa				Molde 10 golpes/capa			
Penetración (pulgadas)	Presión (lb/pulg ²)	Presión patrón (lb/pulg ²)	Presión corregida (lb/pulg ²)	Penetración (pulgadas)	Presión (lb/pulg ²)	Presión patrón (lb/pulg ²)	Presión corregida (lb/pulg ²)	Penetración (pulgadas)	Presión (lb/pulg ²)	Presión patrón (lb/pulg ²)	Presión corregida (lb/pulg ²)
0.000	0.0			0.000	0.0			0.000	0.0		
0.025	284.9			0.025	222.5			0.025	149.1		
0.050	519.9			0.050	462.6			0.050	251.9		
0.075	740.2			0.075	643.3			0.075	329.0		
0.100	998.0	1000	998.0	0.100	774.0	1000	774.0	0.100	370.8	1000	370.8
0.125	1222.7			0.125	861.4			0.125	401.7		
0.150	1291.7			0.150	919.4			0.150	427.4		
0.175	1320.3			0.175	907.6			0.175	450.9		
0.200	1268.9	1500	1268.9	0.200	885.6	1500	885.6	0.200	464.8	1500	464.8
0.250	1265.0			0.250	900.0			0.250	470.0		
0.300	1261.6	1900		0.300	923.8	1900		0.300	475.8	1900	
0.400	1260.9	2300		0.400	923.8	2300		0.400	475.8	2300	
0.500	1261.6	2600		0.500	923.8	2600		0.500	475.8	2600	

VALOR DE CBR 0.1 PULG. DE PENETRACIÓN

Molde	Golpes/capa	Penetración (pulg)	Presión (Lb/pulg ²)	Presión patrón (Lb/pulg ²)	C.B.R. (%)	CBR 100% MDS	CBR 95% MDS
1	56	0.1	998.0	1000	99.8	99.8	87.4
2	25	0.1	774.0	1000	77.4		
3	10	0.1	370.8	1000	37.1		

VALOR DE CBR 0.2 PULG. DE PENETRACIÓN

Molde	Golpes/capa	Penetración (pulg)	Presión (Lb/pulg ²)	Presión patrón (Lb/pulg ²)	C.B.R. (%)	CBR 100% MDS	CBR 95% MDS
1	56	0.2	1268.9	1500	84.6	84.6	69.5
2	25	0.2	885.6	1500	59.0		
3	10	0.2	464.8	1500	31.0		

MÉTODO DE COMPACTACIÓN Y CONDICIÓN DE LAS MUESTRAS

Muestra: suelo fino mejorado con 4% de cemento

Método de compactación: Próctor Modificado ASTM D1557

Humedad referencial de compactación: 21.0%

Periodo de reposo en ambiente controlado: siete días

Periodo de inmersión: siete días.

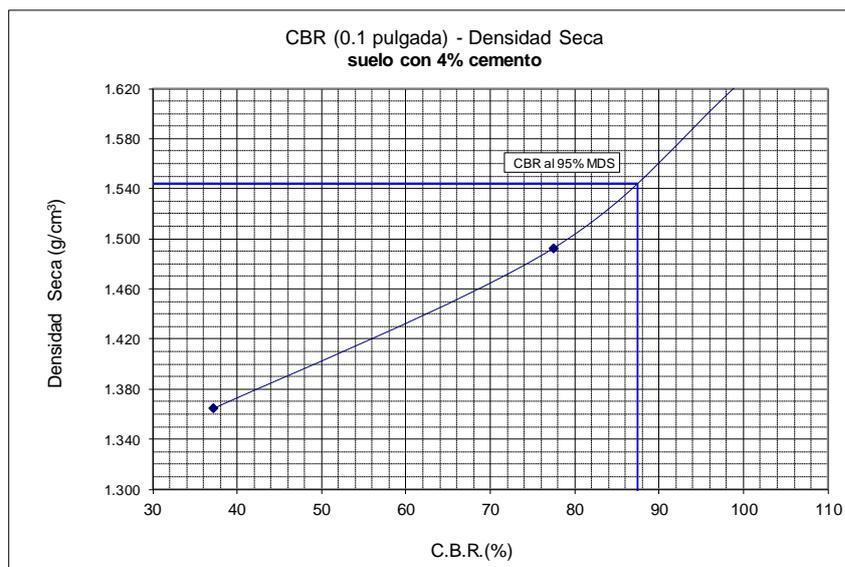
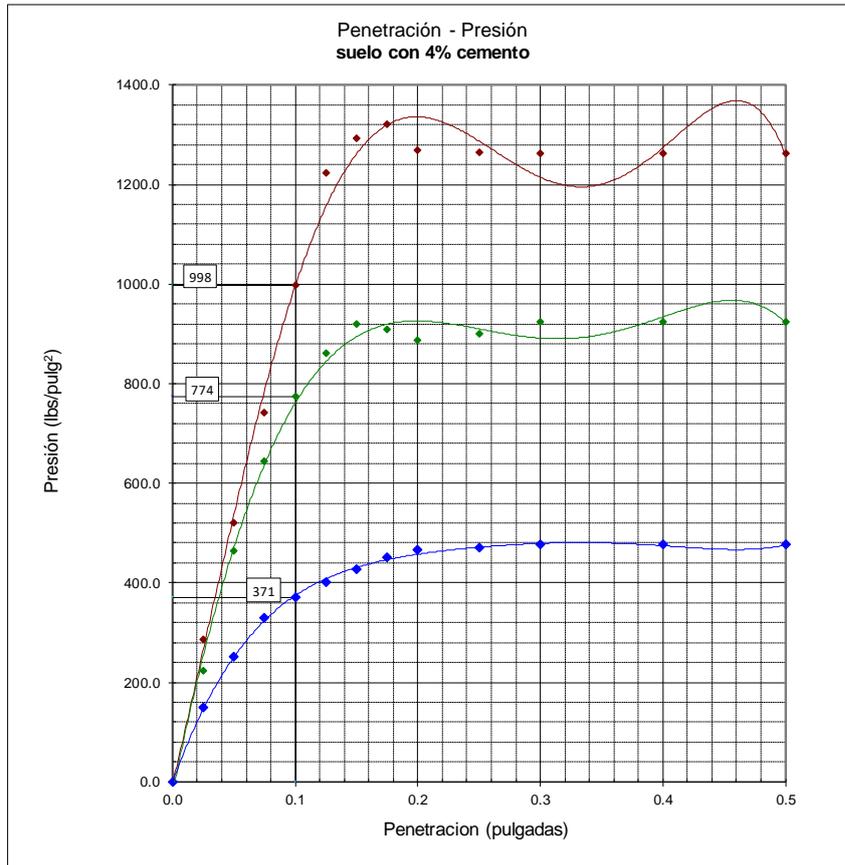
Ejecución/revisión: Luis Carbajal	Supervisión/aprobación: Luisa Shuan	Fecha: Noviembre 2023
-----------------------------------	-------------------------------------	-----------------------



"ESTABILIZACIÓN DE SUELOS FINOS CON CENIZA DE FONDO Y CEMENTO PARA USO COMO SUBRASANTE EN LA REGIÓN CAJAMARCA"

Muestra: suelo fino
Proporción ceniza: 0%
Proporción cemento: 4%

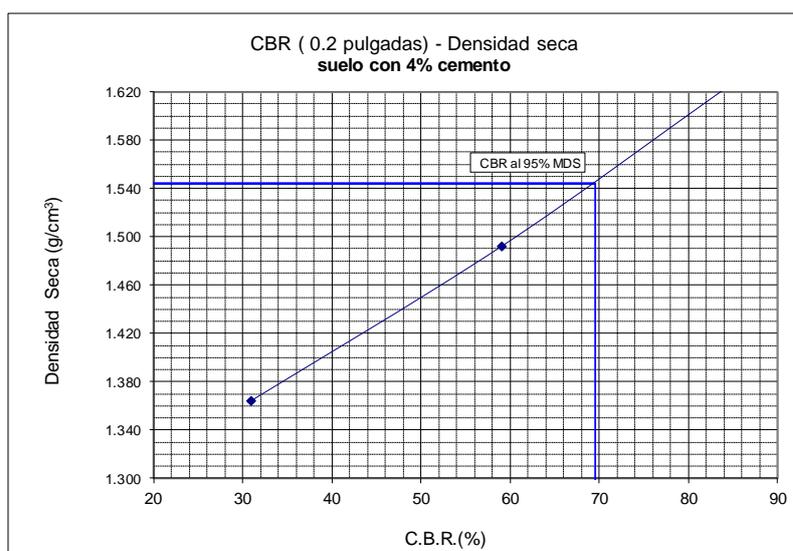
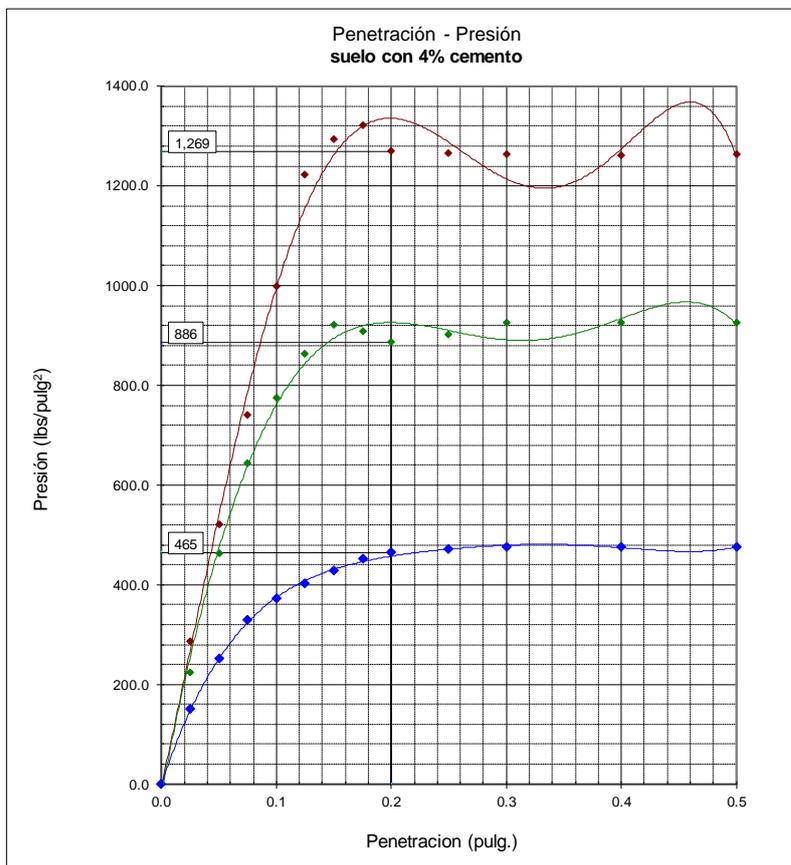
Gráficos CBR - 0.1 pulgadas



CBR (0.1 Pulg.) al 100% de la MDS : 99.8%
CBR (0.1 Pulg.) al 95% de la MDS : 87.4%

	UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL	RESULTADO DE ENSAYOS Página 3 de 3
	CALIFORNIA BEARING RATIO - CBR ASTM D1883	
"ESTABILIZACIÓN DE SUELOS FINOS CON CENIZA DE FONDO Y CEMENTO PARA USO COMO SUBRASANTE EN LA REGIÓN CAJAMARCA"		Muestra: suelo fino Proporción ceniza: 0% Proporción cemento: 4%

Gráficos CBR - 0.2 pulgadas



CBR (0.2 Pulg.) al 100% de la MDS	: 84.6%
CBR (0.2 Pulg.) al 95% de la MDS	: 69.5%

ENSAYO CBR SUELO+4%CEMENTO+10%CENIZA DE FONDO

	UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL	RESULTADO DE ENSAYOS Página 1 de 3
	CALIFORNIA BEARING RATIO - CBR ASTM D1883	
"ESTABILIZACIÓN DE SUELOS FINOS CON CENIZA DE FONDO Y CEMENTO PARA USO COMO SUBRASANTE EN LA REGIÓN CAJAMARCA"		Muestra: suelo fino Proporción ceniza: 10% Proporción cemento: 4%

INFORME DE ENSAYO DETERMINACIÓN DE CBR EN SUELO COMPACTADO EN LABORATORIO

CARACTERÍSTICAS DE LOS ESPECÍMENES COMPACTADOS

Molde	1		2		3	
Numero de golpes/capa	56		25		10	
Condición de la muestra	inicial	final	inicial	final	inicial	final
Densidad húmeda (g/cm ³)	1.948	2.035	1.783	1.867	1.664	1.749
Densidad seca (g/cm ³)	1.622	1.620	1.485	1.484	1.385	1.385
Contenido de humedad (%)	20.1	25.6	20.0	25.8	20.2	26.3
Expansión (%)	0.0	0.1	0.0	0.1	0.0	0.0

RESULTADOS ENSAYOS PRESIÓN - PENETRACIÓN

Molde 56 golpes/capa				Molde 25 golpes/capa				Molde 10 golpes/capa			
Penetración (pulgadas)	Presión (lb/pulg ²)	Presión patrón (lb/pulg ²)	Presión corregida (lb/pulg ²)	Penetración (pulgadas)	Presión (lb/pulg ²)	Presión patrón (lb/pulg ²)	Presión corregida (lb/pulg ²)	Penetración (pulgadas)	Presión (lb/pulg ²)	Presión patrón (lb/pulg ²)	Presión corregida (lb/pulg ²)
0.000	0.0			0.000	0.0			0.000	0.0		
0.025	230.0			0.025	156.0			0.025	140.0		
0.050	530.0			0.050	360.0			0.050	260.0		
0.075	820.0			0.075	570.0			0.075	370.0		
0.100	1098.0	1000	1098.0	0.100	790.0	1000	790.0	0.100	450.0	1000	450.0
0.125	1480.0			0.125	950.0			0.125	503.0		
0.150	1650.0			0.150	1050.0			0.150	520.0		
0.175	1790.0			0.175	1200.0			0.175	550.0		
0.200	1720.0	1500	1720.0	0.200	1270.0	1500	1270.0	0.200	560.0	1500	560.0
0.250	1580.0			0.250	1350.0			0.250	575.0		
0.300	1470.0	1900		0.300	1260.0	1900		0.300	644.7	1900	
0.400	1400.0	2300		0.400	1150.0	2300		0.400	728.5	2300	
0.500	1400.0	2600		0.500	1150.0	2600		0.500	708.6	2600	

VALOR DE CBR 0.1 PULG. DE PENETRACIÓN

Molde	Golpes/capa	Penetración (pulg)	Presión (Lb/pulg ²)	Presión patrón (Lb/pulg ²)	C.B.R. (%)	CBR 100% MDS	CBR 95% MDS
1	56	0.1	1098.0	1000	109.8	109.8	92.0
2	25	0.1	790.0	1000	79.0		
3	10	0.1	450.0	1000	45.0		

VALOR DE CBR 0.2 PULG. DE PENETRACIÓN

Molde	Golpes/capa	Penetración (pulg)	Presión (Lb/pulg ²)	Presión patrón (Lb/pulg ²)	C.B.R. (%)	CBR 100% MDS	CBR 95% MDS
1	56	0.2	1720.0	1500	114.7	114.7	98.2
2	25	0.2	1270.0	1500	84.7		
3	10	0.2	560.0	1500	37.3		

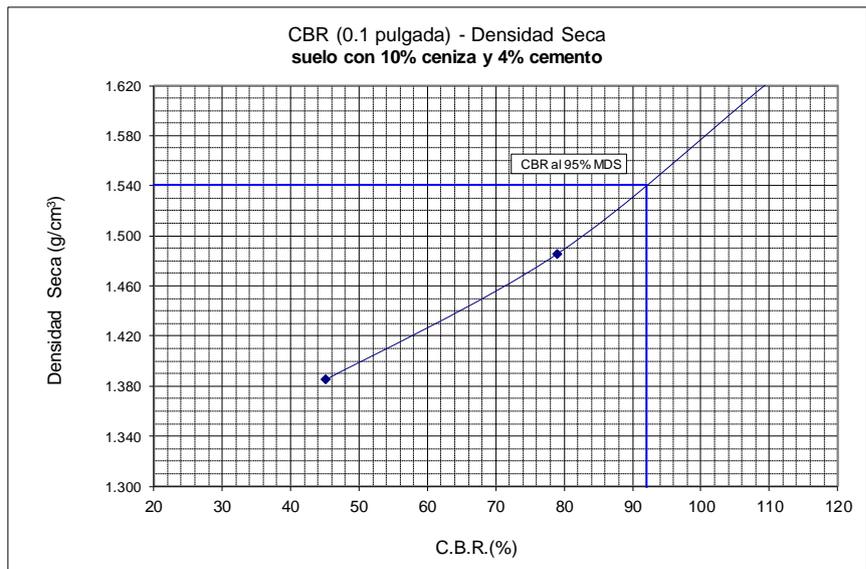
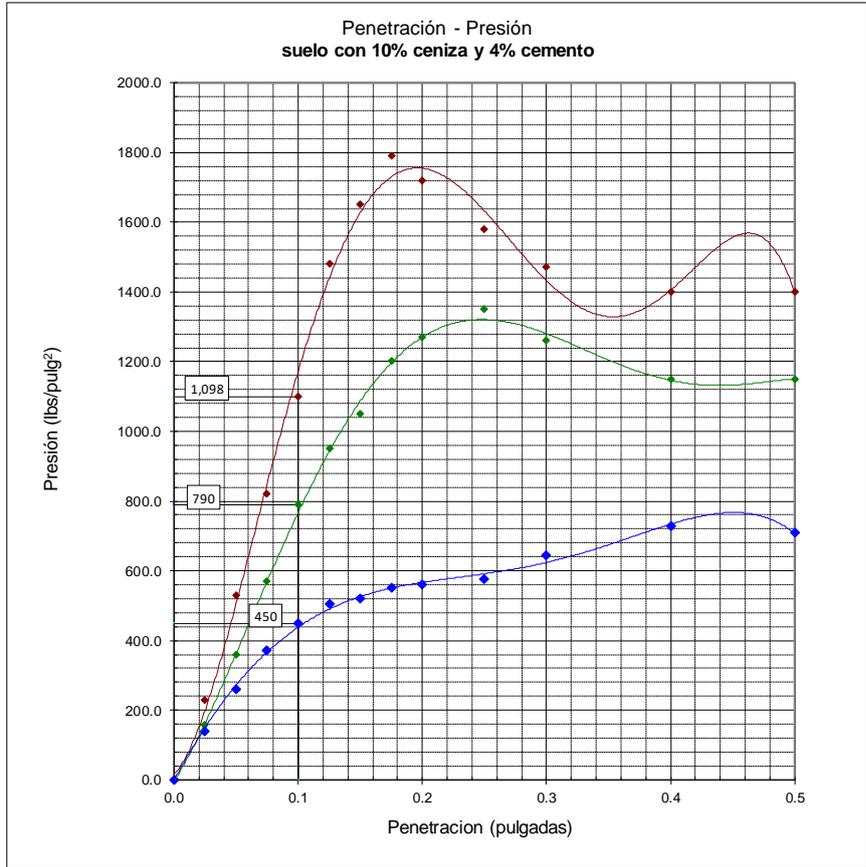
MÉTODO DE COMPACTACIÓN Y CONDICIÓN DE LAS MUESTRAS

Muestra: suelo fino mejorado con 10% de ceniza y 4% de cemento
 Método de compactación: Próctor Modificado ASTM D1557
 Humedad referencial de compactación: 20.0%
 Periodo de reposo en ambiente controlado: siete días
 Periodo de inmersión: siete días.

Ejecución/revisión: Luis Carbajal Supervisión/aprobación: Luisa Shuan Fecha: Noviembre 2023

	UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL	RESULTADO DE ENSAYOS Página 2 de 3
	CALIFORNIA BEARING RATIO - CBR ASTM D1883	
"ESTABILIZACIÓN DE SUELOS FINOS CON CENIZA DE FONDO Y CEMENTO PARA USO COMO SUBRASANTE EN LA REGIÓN CAJAMARCA"		Muestra: suelo fino Proporción ceniza: 10% Proporción cemento: 4%

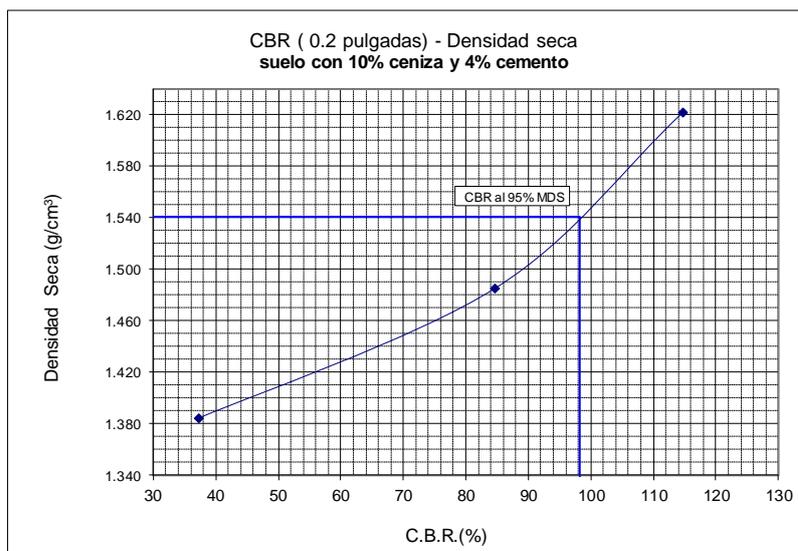
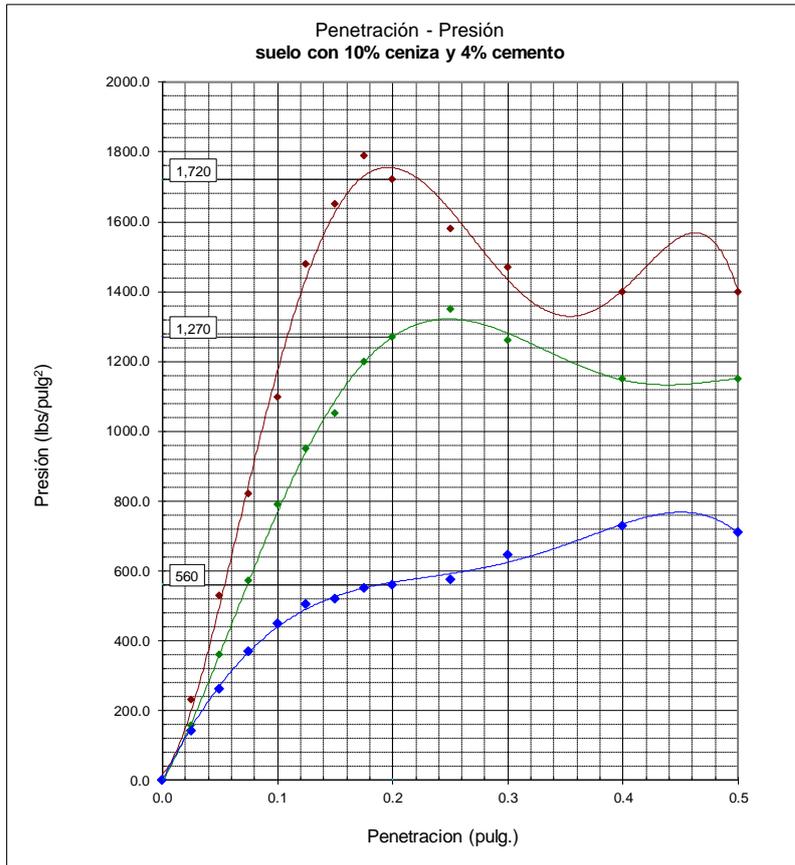
Gráficos CBR - 0.1 pulgadas



CBR (0.1 Pulg.) al 100% de la MDS	: 109.8%
CBR (0.1 Pulg.) al 95% de la MDS	: 92.0%

	UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL	RESULTADO DE ENSAYOS Página 3 de 3
	CALIFORNIA BEARING RATIO - CBR ASTM D1883	
"ESTABILIZACIÓN DE SUELOS FINOS CON CENIZA DE FONDO Y CEMENTO PARA USO COMO SUBRASANTE EN LA REGIÓN CAJAMARCA"		Muestra: suelo fino Proporción ceniza: 10% Proporción cemento: 4%

Gráficos CBR - 0.2 pulgadas



CBR (0.2 Pulg.) al 100% de la MDS : 114.7%
 CBR (0.2 Pulg.) al 95% de la MDS : 98.2%

ENSAYO CBR SUELO+4%CEMENTO+15%CEMENTO DE FONDO

	UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL	RESULTADO DE ENSAYOS Página 1 de 3
	CALIFORNIA BEARING RATIO - CBR ASTM D1883	
"ESTABILIZACIÓN DE SUELOS FINOS CON CENIZA DE FONDO Y CEMENTO PARA USO COMO SUBRASANTE EN LA REGIÓN CAJAMARCA"		Muestra: suelo fino Proporción ceniza: 15% Proporción cemento: 4%

INFORME DE ENSAYO DETERMINACIÓN DE CBR EN SUELO COMPACTADO EN LABORATORIO

CARACTERÍSTICAS DE LOS ESPECÍMENES COMPACTADOS

Molde	1		2		3	
	56		25		10	
Condición de la muestra	inicial	final	inicial	final	inicial	final
Densidad húmeda (g/cm ³)	1.935	1.990	1.783	1.859	1.664	1.786
Densidad seca (g/cm ³)	1.620	1.618	1.491	1.490	1.392	1.392
Contenido de humedad (%)	19.4	23.0	19.6	24.8	19.5	28.3
Expansión (%)	0.0	0.1	0.0	0.1	0.0	0.0

RESULTADOS ENSAYOS PRESIÓN - PENETRACIÓN

Molde 56 golpes/capa				Molde 25 golpes/capa				Molde 10 golpes/capa			
Penetración (pulgadas)	Presión (lb/pulg ²)	Presión patrón (lb/pulg ²)	Presión corregida (lb/pulg ²)	Penetración (pulgadas)	Presión (lb/pulg ²)	Presión patrón (lb/pulg ²)	Presión corregida (lb/pulg ²)	Penetración (pulgadas)	Presión (lb/pulg ²)	Presión patrón (lb/pulg ²)	Presión corregida (lb/pulg ²)
0.000	0.0			0.000	0.0			0.000	0.0		
0.025	356.2			0.025	206.3			0.025	189.5		
0.050	691.0			0.050	410.5			0.050	315.0		
0.075	923.8			0.075	622.0			0.075	417.1		
0.100	1182.3	1000	1182.3	0.100	834.2	1000	834.2	0.100	500.8	1000	500.8
0.125	1608.9			0.125	1060.4			0.125	553.7		
0.150	1774.1			0.150	1174.9			0.150	577.9		
0.175	1918.8			0.175	1260.9			0.175	599.2		
0.200	1762.4	1500	1762.4	0.200	1316.7	1500	1316.7	0.200	608.0	1500	608.0
0.250	1650.0			0.250	1480.0			0.250	620.0		
0.300	1492.2	1900		0.300	1483.4	1900		0.300	644.7	1900	
0.400	1492.2	2300		0.400	1233.7	2300		0.400	728.5	2300	
0.500	1492.2	2600		0.500	1233.7	2600		0.500	708.6	2600	

VALOR DE CBR 0.1 PULG. DE PENETRACIÓN

Molde	Golpes/capa	Penetración (pulg)	Presión (Lb/pulg ²)	Presión patrón (Lb/pulg ²)	C.B.R. (%)	CBR 100% MDS	CBR 95% MDS
1	56	0.1	1182.3	1000	118.2	118.2	96.6
2	25	0.1	834.2	1000	83.4		
3	10	0.1	500.8	1000	50.1		

VALOR DE CBR 0.2 PULG. DE PENETRACIÓN

Molde	Golpes/capa	Penetración (pulg)	Presión (Lb/pulg ²)	Presión patrón (Lb/pulg ²)	C.B.R. (%)	CBR 100% MDS	CBR 95% MDS
1	56	0.2	1762.4	1500	117.5	117.5	100.6
2	25	0.2	1316.7	1500	87.8		
3	10	0.2	608.0	1500	40.5		

MÉTODO DE COMPACTACIÓN Y CONDICIÓN DE LAS MUESTRAS

Muestra: suelo fino mejorado con 15% de ceniza y 4% de cemento

Método de compactación: Próctor Modificado ASTM D1557

Humedad referencial de compactación: 20.0%

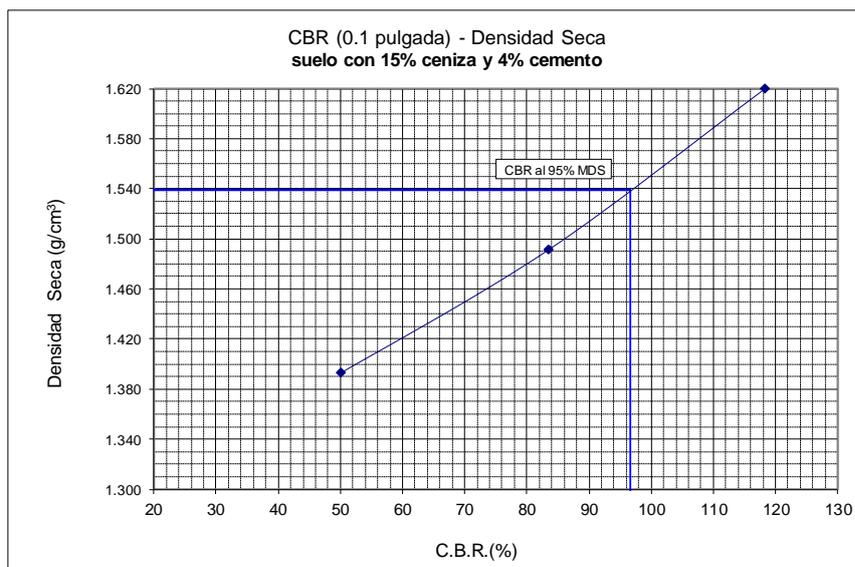
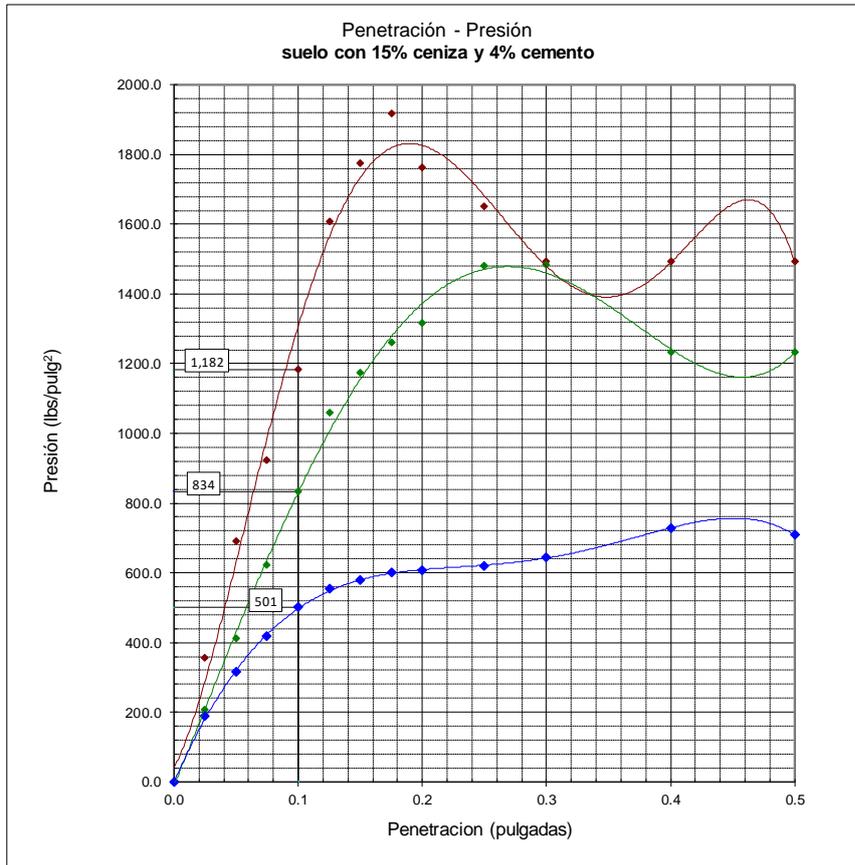
Periodo de reposo en ambiente controlado: siete días

Periodo de inmersión: siete días.

Ejecución/revisión: Luis Carbajal	Supervisión/aprobación: Luisa Shuan	Fecha: Noviembre 2023
-----------------------------------	-------------------------------------	-----------------------

	UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL	RESULTADO DE ENSAYOS Página 2 de 3
	CALIFORNIA BEARING RATIO - CBR ASTM D1883	
"ESTABILIZACIÓN DE SUELOS FINOS CON CENIZA DE FONDO Y CEMENTO PARA USO COMO SUBRASANTE EN LA REGIÓN CAJAMARCA"		Muestra: suelo fino Proporción ceniza: 15% Proporción cemento: 4%

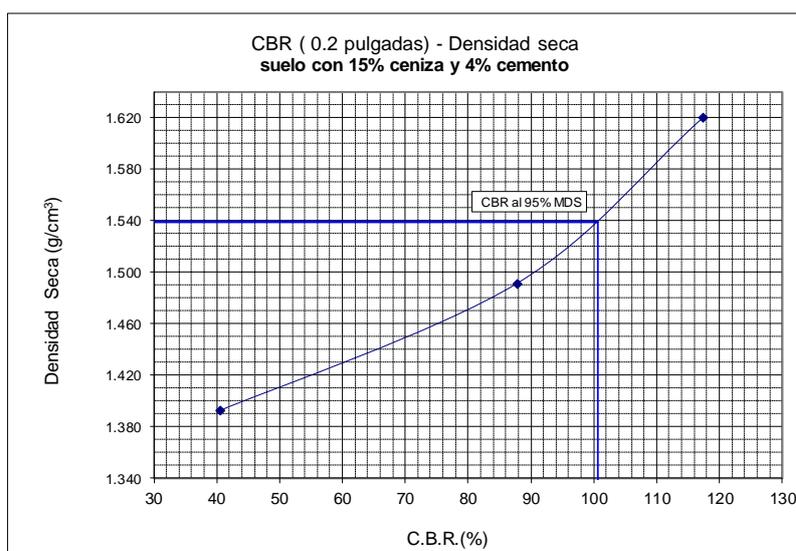
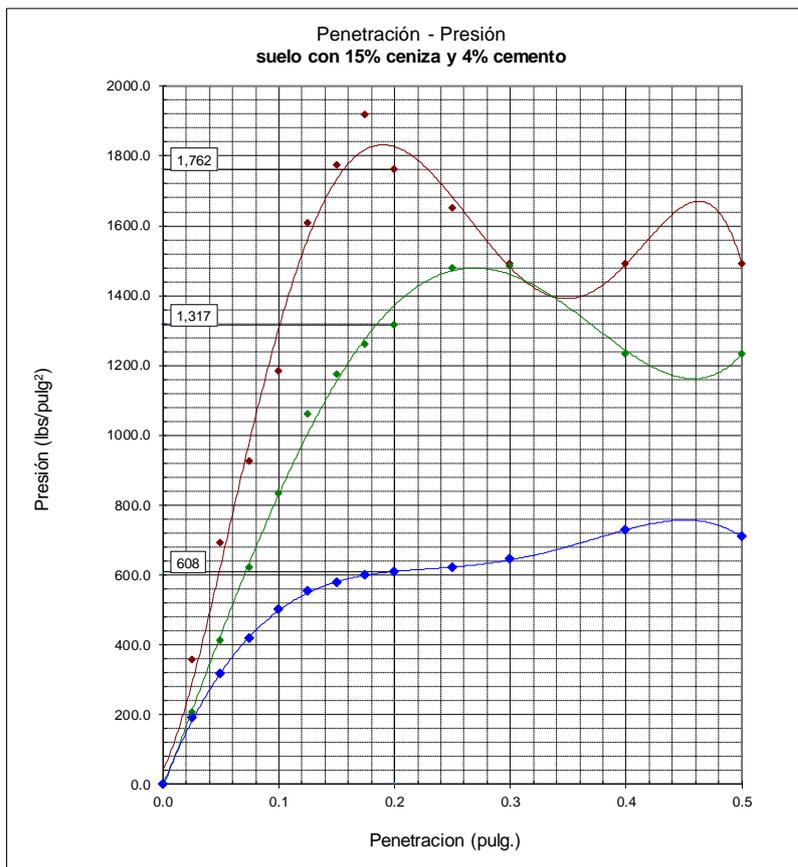
Gráficos CBR - 0.1 pulgadas



CBR (0.1 Pulg.) al 100% de la MDS	: 118.2%
CBR (0.1 Pulg.) al 95% de la MDS	: 96.6%

	UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL	RESULTADO DE ENSAYOS Página 3 de 3
	CALIFORNIA BEARING RATIO - CBR ASTM D1883	
"ESTABILIZACIÓN DE SUELOS FINOS CON CENIZA DE FONDO Y CEMENTO PARA USO COMO SUBRASANTE EN LA REGIÓN CAJAMARCA"		Muestra: suelo fino Proporción ceniza: 15% Proporción cemento: 4%

Gráficos CBR - 0.2 pulgadas



CBR (0.2 Pulg.) al 100% de la MDS : 117.5%
 CBR (0.2 Pulg.) al 95% de la MDS : 100.6%

ENSAYO CBR SUELO+4%CEMENTO+25%CEMINA DE FONDO

	UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA	RESULTADO DE ENSAYOS Página 1 de 3
	FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL	
CALIFORNIA BEARING RATIO - CBR ASTM D1883		
"ESTABILIZACIÓN DE SUELOS FINOS CON CENIZA DE FONDO Y CEMENTO PARA USO COMO SUBRASANTE EN LA REGIÓN CAJAMARCA"		Muestra: suelo fino Proporción ceniza: 25% Proporción cemento: 4%

INFORME DE ENSAYO DETERMINACIÓN DE CBR EN SUELO COMPACTADO EN LABORATORIO

CARACTERÍSTICAS DE LOS ESPECÍMENES COMPACTADOS

Molde	1		2		3	
	56		25		10	
Numero de golpes/capa	56		25		10	
Condición de la muestra	inicial	final	inicial	final	inicial	final
Densidad húmeda (g/cm ³)	1.932	2.008	1.771	1.841	1.610	1.744
Densidad seca (g/cm ³)	1.619	1.619	1.488	1.488	1.352	1.352
Contenido de humedad (%)	19.3	24.0	19.0	23.7	19.0	29.0
Expansión (%)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

RESULTADOS ENSAYOS PRESIÓN - PENETRACIÓN

Molde 56 golpes/capa				Molde 25 golpes/capa				Molde 10 golpes/capa			
Penetración (pulgadas)	Presión (lb/pulg ²)	Presión patrón (lb/pulg ²)	Presión corregida (lb/pulg ²)	Penetración (pulgadas)	Presión (lb/pulg ²)	Presión patrón (lb/pulg ²)	Presión corregida (lb/pulg ²)	Penetración (pulgadas)	Presión (lb/pulg ²)	Presión patrón (lb/pulg ²)	Presión corregida (lb/pulg ²)
0.000	0.0			0.000	0.0			0.000	0.0		
0.025	505.2			0.025	275.4			0.025	156.4		
0.050	778.4			0.050	609.5			0.050	291.5		
0.075	1041.3			0.075	799.0			0.075	389.2		
0.100	1291.0	1000	1291.0	0.100	997.2	1000	997.2	0.100	462.6	1000	462.6
0.125	1478.2			0.125	1180.1			0.125	514.8		
0.150	1760.9			0.150	1338.0			0.150	551.5		
0.175	1966.5			0.175	1452.5			0.175	586.0		
0.200	2044.4	1500	2044.4	0.200	1576.6	1500	1576.6	0.200	605.8	1500	605.8
0.250	2210.0			0.250	1450.0			0.250	620.0		
0.300	2191.3	1900		0.300	1313.7	1900		0.300	712.3	1900	
0.400	2100.0	2300		0.400	1313.7	2300		0.400	793.8	2300	
0.500	2100.0	2600		0.500	1313.7	2600		0.500	763.7	2600	

VALOR DE CBR 0.1 PULG. DE PENETRACIÓN

Molde	Golpes/capa	Penetración (pulg)	Presión (Lb/pulg ²)	Presión patrón (Lb/pulg ²)	C.B.R. (%)	CBR 100% MDS	CBR 95% MDS
1	56	0.1	1291.0	1000	129.1	129.1	113.0
2	25	0.1	997.2	1000	99.7		
3	10	0.1	462.6	1000	46.3		

VALOR DE CBR 0.2 PULG. DE PENETRACIÓN

Molde	Golpes/capa	Penetración (pulg)	Presión (Lb/pulg ²)	Presión patrón (Lb/pulg ²)	C.B.R. (%)	CBR 100% MDS	CBR 95% MDS
1	56	0.2	2044.4	1500	136.3	136.3	120.0
2	25	0.2	1576.6	1500	105.1		
3	10	0.2	605.8	1500	40.4		

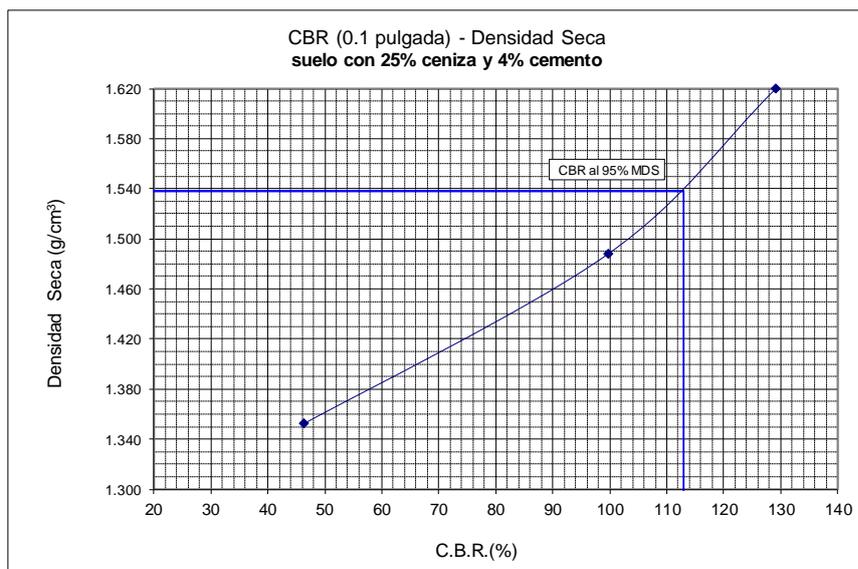
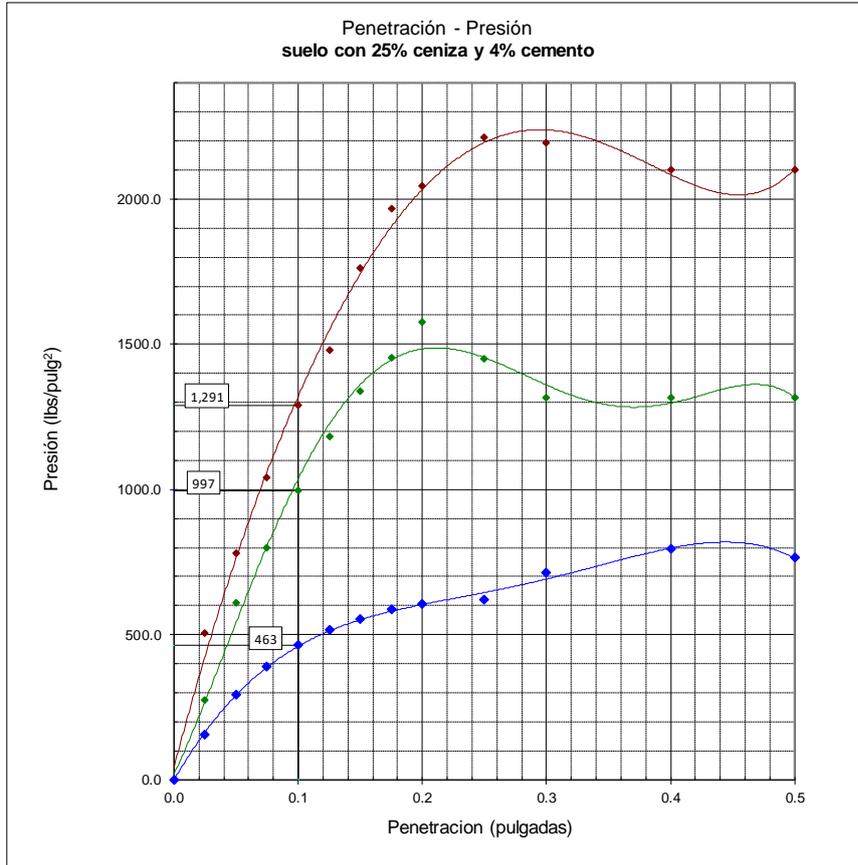
MÉTODO DE COMPACTACIÓN Y CONDICIÓN DE LAS MUESTRAS

Muestra: suelo fino mejorado con 25% de ceniza y 4% de cemento
 Método de compactación: Próctor Modificado ASTM D1557
 Humedad referencial de compactación: 19.0%
 Período de reposo en ambiente controlado: siete días
 Período de inmersión: siete días.

Ejecución/revisión: Luis Carbajal Supervisión/aprobación: Luisa Shuan Fecha: Noviembre 2023

	UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL	RESULTADO DE ENSAYOS Página 2 de 3
	CALIFORNIA BEARING RATIO - CBR ASTM D1883	
"ESTABILIZACIÓN DE SUELOS FINOS CON CENIZA DE FONDO Y CEMENTO PARA USO COMO SUBRASANTE EN LA REGIÓN CAJAMARCA"		Muestra: suelo fino Proporción ceniza: 25% Proporción cemento: 4%

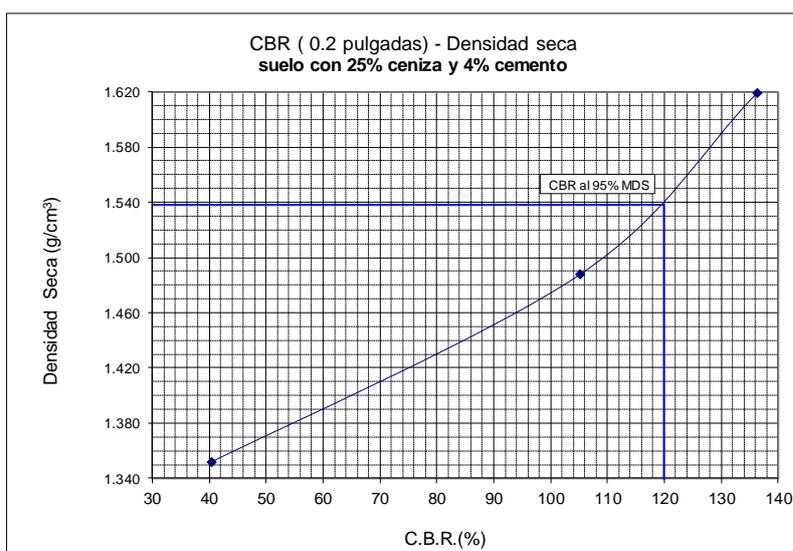
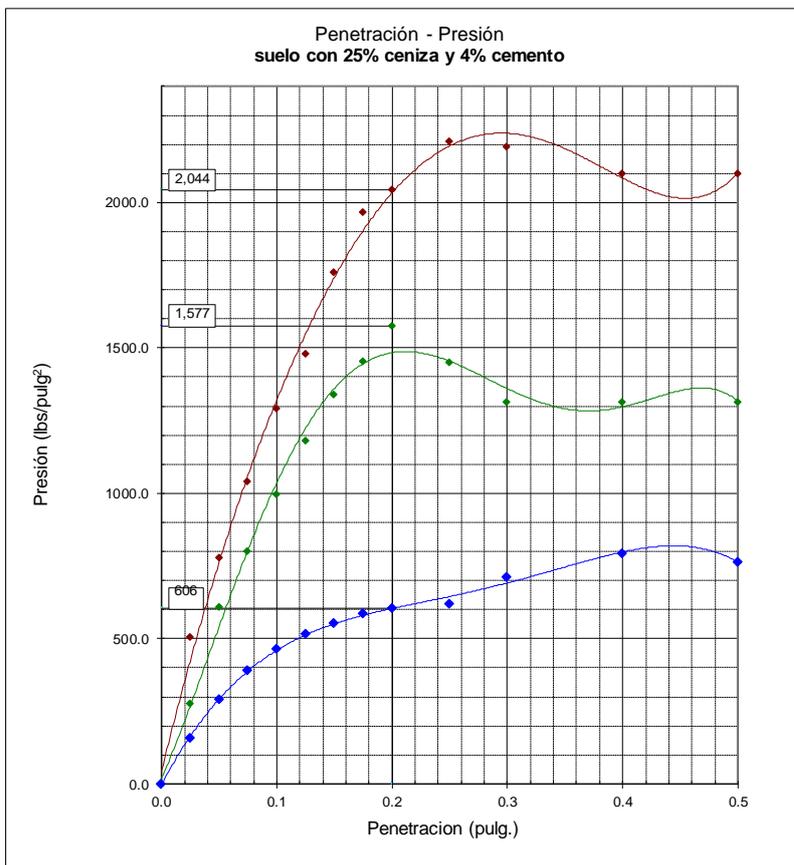
Gráficos CBR - 0.1 pulgadas



CBR (0.1 Pulg.) al 100% de la MDS	: 129.1%
CBR (0.1 Pulg.) al 95% de la MDS	: 113.0%

	UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL	RESULTADO DE ENSAYOS Página 3 de 3
	CALIFORNIA BEARING RATIO - CBR ASTM D1883	
"ESTABILIZACIÓN DE SUELOS FINOS CON CENIZA DE FONDO Y CEMENTO PARA USO COMO SUBRASANTE EN LA REGIÓN CAJAMARCA"		Muestra: suelo fino Proporción ceniza: 25% Proporción cemento: 4%

Gráficos CBR - 0.2 pulgadas



CBR (0.2 Pulg.) al 100% de la MDS : 136.3%
 CBR (0.2 Pulg.) al 95% de la MDS : 120.0%

Anexo F

Hojas de cálculo - comparación de costos



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

"ESTABILIZACIÓN DE SUELOS FINOS CON CENIZA DE FONDO Y CEMENTO PARA USO COMO SUBRASANTE EN LA REGIÓN CAJAMARCA"

Datos			
Producción de CF por horno	0.8 m3/mes	Cantidad mínima de hornos por ladrillera artesanal	5 und
Cantidad de ladrilleras artesanales en Cajamarca	490 und	Producción de CF en Cajamarca por mes	1960 m3/mes
Trocha de análisis			
Profundidad de estabilización (H)	0.3 m	Vm= H*B*L	
Ancho de trocha (B)	5 m	Vm=1500m3	
Longitud de trocha (L)	1000 m		
Proporciones en peso (Wi%)			
SN =	98%	SN =	69%
CF =	0%	CF =	30%
CEM =	2%	CEM =	1%
Densidad (Di)			
Dc = 3,130.00 kg/m3 (Ficha técnica Cemento Sol Tipo I)			
Densidad mezclas			
D1 =	1,623.00 kg/m3	D2 =	1,560.00 kg/m3
Peso de la mezcla			
W1 = D1*Vm		W2 = D2*Vm	
W1 =	2,434,500.00 kg	W2 =	2,340,000.00 kg
Peso de aditivos			
Wc2= 2%*W1		Wc1= W2*1%	
Wc2=	48,690.00 kg	Wc1=	23,400.00 kg
Volumen de aditivos			
Vc2= Wc2/Dc		Vc1= Wc1/Dc	
Vc2=	15.56 m3	Vc1=	7.48 m3
Costo de aditivos			
Costo de bolsa de cemento = S/ 30.0 Volumen de bolsa de cemento = 0.028 m3. Costo de m3 de cemento = 1071.4 soles.			
Costo de cemento para estabilización con 2% de cemento		Costo de cemento para estabilización con 1% de cemento y 30% CF	
Cc2 = Vc2*1071.4		Cc1 = Vc1*1071.4	
Cc2 =	16,666.60 soles	Cc1 =	8,009.83 soles
Diferencia en costo de aditivos = S/8,656.77			