



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y ARQUITECTURA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL



**ESTABILIZACIÓN DE SUELOS ARCILLOSOS INCORPORANDO
CENIZAS DE MADERA (ASERRÍN), EN SU COMPORTAMIENTO
MECÁNICO - DEFORMACIONAL PARA EL MEJORAMIENTO
DE LA SUBRASANTE, DE LAS VIAS DE LA URBANIZACIÓN
LAS GARDENIAS DE LA CIUDAD DE JULIACA**

TESIS

PRESENTADA POR:

Bach. JUAN ARCADIO JARA HANCCO

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO CIVIL

PUNO – PERÚ

2024



Reporte de similitud

NOMBRE DEL TRABAJO

ESTABILIZACIÓN DE SUELOS ARCILLOSOS INCORPORANDO CENIZAS DE MADERA (ASERRÍN), EN SU COMPORTAMIENTO MECÁNICO - DEFORMACIONAL PARA EL MEJORAMIENTO DE LA SUBRASANTE, DE LAS VIAS DE LA URBANIZACIÓN LA

AUTOR

JUAN ARCADIO JARA HANCCO

RECUENTO DE PALABRAS

32922 Words

RECUENTO DE CARACTERES

164007 Characters

RECUENTO DE PÁGINAS

170 Pages

TAMAÑO DEL ARCHIVO

4.5MB

FECHA DE ENTREGA

Jan 9, 2024 10:06 AM GMT-5

FECHA DEL INFORME

Jan 9, 2024 10:08 AM GMT-5

● 9% de similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para cada base de datos

- 8% Base de datos de Internet
- Base de datos de Crossref
- 6% Base de datos de trabajos entregados
- 1% Base de datos de publicaciones
- Base de datos de contenido publicado de Crossref

● Excluir del Reporte de Similitud

- Material bibliográfico
- Material citado
- Material citado
- Coincidencia baja (menos de 10 palabras)



Firmado digitalmente por CASTILLO ARONI Emilio FAU 20145496170 hard
Motivo: Soy el autor del documento
Fecha: 09.01.2024 11:14:15 -05:00



Firmado digitalmente por CASTILLO ARONI Emilio FAU 20145496170 hard
Motivo: Doy V° B°
Fecha: 09.01.2024 11:14:51 -05:00

Resumen



DEDICATORIA

Dedico este trabajo a Dios, por permitirme estudiar y guiarme hasta el final para concluir de manera satisfactoria esta carrera profesional.

Dedico este trabajo a mi querido padre Wilmer y a mis hermanos, Avile, Fiorela y Roly quienes fueron el motor principal y la ayuda mutua durante toda mi formación hasta culminar esta carrera profesional.

Dedico de manera especial a la Memoria de mi querida Madre Fulgencia y a la Memoria de mi hermano Waldir, quienes ahora ya no se encuentran en vida, pero que fueron y son una motivación y ejemplo para seguir adelante con todo lo que me enseñaron.

Juan Arcadio Jara Hanco



AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios por brindarme la vida, guiarme y cuidar de mi durante mi proceso de formación y permitirme llegar a cumplir esta meta.

A la Universidad Nacional del Altiplano, Carrera Profesional de Ingeniería Civil por permitirme estudiar y brindarme las enseñanzas a través de los docentes quienes conforman esta carrera profesional de ingeniería civil.

Agradezco a mi asesor y a los jurados de tesis por estar constantemente y apoyándome durante todo este proceso para lograr este objetivo.

Agradezco a mis padres y hermanos quienes fueron el apoyo fundamental tanto a nivel económico y emocional durante toda mi formación y durante este proceso de investigación.

Juan Arcadio Jara Hanco



ÍNDICE GENERAL

| | Pág. |
|--|-----------|
| DEDICATORIA | |
| AGRADECIMIENTO | |
| ÍNDICE GENERAL | |
| ÍNDICE DE TABLAS | |
| ÍNDICE DE FIGURAS | |
| ACRÓNIMOS | |
| RESUMEN | 18 |
| ABSTRACT..... | 19 |
| CAPÍTULO I | |
| INTRODUCCIÓN | |
| 1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA | 20 |
| 1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA..... | 22 |
| 1.2.1. Problema general..... | 22 |
| 1.2.2. Problemas específicos | 22 |
| 1.3. HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACIÓN..... | 23 |
| 1.3.1. Hipótesis general..... | 23 |
| 1.3.2. Hipótesis específicas | 23 |
| 1.4. JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN..... | 24 |
| 1.5. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN | 25 |
| 1.5.1. Objetivo general | 25 |
| 1.5.2. Objetivo específico..... | 25 |

CAPÍTULO II

REVISIÓN DE LITERATURA



| | | |
|-------------|--|-----------|
| 2.1. | ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN..... | 26 |
| 2.2. | BASES TEÓRICAS | 36 |
| 2.2.1. | Suelos Arcillosos..... | 36 |
| 2.2.1.1. | Arcilla..... | 36 |
| 2.2.1.2. | Propiedades de la arcilla..... | 37 |
| 2.2.1.3. | Clasificación de los suelos arcillosos | 39 |
| 2.2.2. | Cenizas de Madera | 40 |
| 2.2.2.1. | Proceso y Origen de obtención de la ceniza..... | 40 |
| 2.2.2.2. | Cenizas de Fondo | 41 |
| 2.2.2.3. | Estructura de la Ceniza de Fondo..... | 42 |
| 2.2.2.4. | Constitución química de la ceniza de fondo..... | 42 |
| 2.2.3. | Estabilización de Suelos..... | 43 |
| 2.2.3.1. | Estabilización de suelos arcillosos | 44 |
| 2.2.3.2. | Caracterización de los suelos para estabilizar | 44 |
| 2.2.3.3. | Técnicas de estabilización de suelos | 45 |
| 2.2.4. | Contenido de Humedad..... | 46 |
| 2.2.5. | Análisis Granulométrico | 46 |
| 2.2.5.1. | Granulometría análisis por tamizado..... | 47 |
| 2.2.5.2. | Granulometría análisis por sedimentación | 48 |
| 2.2.6. | Límites de Atterberg..... | 48 |
| 2.2.6.1. | Límite Líquido..... | 49 |
| 2.2.6.2. | Límite Plástico..... | 49 |
| 2.2.6.3. | Índice de plasticidad..... | 50 |
| 2.2.7. | Clasificación de suelos por el método (SUCS) | 51 |
| 2.2.8. | Clasificación de suelos método AASHTO..... | 53 |



| | |
|--|----|
| 2.2.9. Ensayo de Compactación Proctor | 55 |
| 2.2.10. Ensayo de CBR (California Bearing Ratio) | 56 |
| 2.2.11. Prueba de Consolidación Unidimensional | 58 |
| 2.2.12. Subrasante de una Vía | 62 |

CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

| | |
|--|-----------|
| 3.1. METODOLOGÍA | 64 |
| 3.1.1. Tipo de investigación | 64 |
| 3.1.2. Nivel de investigación | 64 |
| 3.1.3. Método de investigación | 65 |
| 3.1.4. Diseño de investigación | 65 |
| 3.1.5. Población | 66 |
| 3.1.6. Muestra | 66 |
| 3.1.6.1. Método de muestreo | 67 |
| 3.1.7. Recolección de datos | 68 |
| 3.1.8. Operacionalización de variables | 68 |
| 3.1.9. Prueba de hipótesis | 70 |
| 3.2. INSTRUMENTOS Y MATERIALES | 71 |
| 3.2.1. Ubicación de la muestra de suelo y la ceniza de madera | 71 |
| 3.2.2. Granulometría de la muestra C-1, C-2 y Ceniza | 73 |
| 3.2.3. Límites de consistencia del material arcilloso | 76 |
| 3.2.4. Clasificación de suelo de la muestra natural. | 80 |
| 3.2.5. Límites de consistencia de las muestras combinadas con ceniza. | 86 |
| 3.2.6. Prueba de compactación – Proctor Modificado | 98 |
| 3.2.7. California Bearing Ratio prueba de CBR | 108 |



3.2.8. Ensayo de Consolidación Unidimensional..... 123

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

| | |
|--|------------|
| 4.1. HIPÓTESIS GENERAL..... | 134 |
| 4.1.1. Composición química de la Ceniza (aserrín) | 134 |
| 4.1.2. Comportamiento mecánico (resistencia al esfuerzo) | 135 |
| 4.1.3. Comportamiento deformacional..... | 137 |
| 4.2. HIPÓTESIS ESPECÍFICA 1 | 138 |
| 4.2.1. Plasticidad del suelo | 138 |
| 4.2.2. Compactación..... | 139 |
| 4.2.3. Resistencia al esfuerzo | 142 |
| 4.3. HIPÓTESIS ESPECÍFICA 2 | 145 |
| 4.3.1. Comportamiento deformacional..... | 145 |
| 4.4. HIPÓTESIS ESPECÍFICA 3 | 149 |
| 4.5. DISCUSIÓN | 155 |
| V. CONCLUSIONES..... | 160 |
| VI. RECOMENDACIONES | 162 |
| VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... | 163 |
| ANEXOS..... | 168 |

TEMA: Estabilización de suelos arcillosos

ÁREA: Geotecnia

LÍNEA DE INVESTIGACIÓN: Geotecnia

FECHA DE SUTENTACIÓN: 17 de enero del 2024



ÍNDICE DE TABLAS

| | Pág. |
|---|-------------|
| Tabla 1 Suelos según tamaño de partículas (ASTM) | 37 |
| Tabla 2 Índice de plasticidad según ASTM..... | 37 |
| Tabla 3 Superficies de las arcillas..... | 38 |
| Tabla 4 Límite de partículas de suelo | 46 |
| Tabla 5 N° de Tamiz (aberturas de malla) | 48 |
| Tabla 6 Tabla de resumen sobre el tipo de prueba | 56 |
| Tabla 7 Características de la carga patrón unitaria para el índice CBR..... | 58 |
| Tabla 8 Condición de Sub rasante | 63 |
| Tabla 9 Población de estudio: vías | 66 |
| Tabla 10 Matriz de operacionalización de variables..... | 69 |
| Tabla 11 Escala de interpretación F_ratio | 70 |
| Tabla 12 Ubicación geográfica de la muestra de suelo | 71 |
| Tabla 13 Granulometría del material arcilloso C-1 | 73 |
| Tabla 14 Granulometría de la muestra de suelo calicata C-2 | 74 |
| Tabla 15 Granulometría de la ceniza de madera..... | 75 |
| Tabla 16 Limite liquido C-1, suelo natural..... | 77 |
| Tabla 17 Límite plástico C-1, suelo natural..... | 78 |
| Tabla 18 Limite liquido C-2, suelo natural..... | 78 |
| Tabla 19 Límite plástico C-2, suelo natural..... | 79 |
| Tabla 20 Limite liquido C-1 con 5% de ceniza | 86 |
| Tabla 21 Límite plástico C-1 con 5% de ceniza | 87 |
| Tabla 22 Limite liquido C-2 con 5% de ceniza | 87 |
| Tabla 23 Límite plástico C-2 con 5% de ceniza | 88 |



| | | |
|----------|---|-----|
| Tabla 24 | Limite liquido C-1 con 12% de ceniza | 89 |
| Tabla 25 | Límite plástico C-1 con 12% de ceniza | 90 |
| Tabla 26 | Límite líquido C-2 con 12% de ceniza | 90 |
| Tabla 27 | Límite plástico C-2 con 12% de ceniza | 91 |
| Tabla 28 | Limite liquido C-1 con 18% de ceniza | 92 |
| Tabla 29 | Límite plástico C-1 con 18% de ceniza | 93 |
| Tabla 30 | Limite liquido C-2 con 18% de ceniza | 93 |
| Tabla 31 | Límite plástico C-2 con 18% de ceniza | 94 |
| Tabla 32 | Limite liquido C-1 con 25% de ceniza | 95 |
| Tabla 33 | Límite plástico C-1 con 25% de ceniza | 96 |
| Tabla 34 | Limite liquido C-2 con 25% de ceniza | 96 |
| Tabla 35 | Límite plástico C-2 con 25% de ceniza | 97 |
| Tabla 36 | Dimensiones del molde de compactación..... | 98 |
| Tabla 37 | Resultado proctor modificado C-1, suelo natural | 98 |
| Tabla 38 | Resultado proctor modificado C-2, suelo natural | 99 |
| Tabla 39 | Resultado proctor modificado C-1 con 5% de ceniza..... | 100 |
| Tabla 40 | Resultado proctor modificado C-2 con 5% de ceniza..... | 101 |
| Tabla 41 | Resultado proctor modificado C-1 con 12% de ceniza..... | 102 |
| Tabla 42 | Resultado proctor modificado C-2 con 12% de ceniza..... | 103 |
| Tabla 43 | Resultado proctor modificado C-1 con 18% de ceniza..... | 104 |
| Tabla 44 | Resultado proctor modificado C-2 con 18% de ceniza..... | 105 |
| Tabla 45 | Resultado proctor modificado C-1 con 25% de ceniza..... | 106 |
| Tabla 46 | Resultado proctor modificado C-2 con 25% de ceniza..... | 107 |
| Tabla 47 | Expansión del suelo C-1, suelo natural..... | 109 |
| Tabla 48 | Índice de CBR C-1, suelo natural | 109 |



| | | |
|----------|---|-----|
| Tabla 49 | Expansión del suelo C-2, 100% suelo | 110 |
| Tabla 50 | Índice de CBR C-2, suelo natural | 111 |
| Tabla 51 | Expansión del suelo C-1 con 5% de ceniza | 112 |
| Tabla 52 | Índice de CBR C-1 con 5% de ceniza..... | 112 |
| Tabla 53 | Expansión del suelo C-2 con 5% de ceniza | 113 |
| Tabla 54 | Índice de CBR C-2 con 5% de ceniza..... | 114 |
| Tabla 55 | Expansión del suelo C-1 con 12% de ceniza | 115 |
| Tabla 56 | Índice de CBR C-1 con 12% de ceniza..... | 115 |
| Tabla 57 | Expansión del suelo C-2 con 12% de ceniza | 116 |
| Tabla 58 | Índice de CBR C-2 con 12% de ceniza..... | 117 |
| Tabla 59 | Expansión del suelo C-1 con 18% de ceniza | 118 |
| Tabla 60 | Índice de CBR C-1 con 18% de ceniza..... | 118 |
| Tabla 61 | Expansión del suelo C-2 con 18% de ceniza | 119 |
| Tabla 62 | Índice de CBR C-2 con 18% de ceniza..... | 120 |
| Tabla 63 | Expansión del suelo C-1 con 25% de ceniza | 121 |
| Tabla 64 | Índice de CBR C-1 con 25% de ceniza..... | 121 |
| Tabla 65 | Expansión del suelo C-2 con 25% de ceniza | 122 |
| Tabla 66 | Índice de CBR C-2 con 25% de ceniza..... | 123 |
| Tabla 67 | Resultado etapa de carga, 100% suelo..... | 124 |
| Tabla 68 | Resultados etapa de descarga, 100% suelo..... | 124 |
| Tabla 69 | Resultado etapa de carga, suelo con 5% de ceniza | 126 |
| Tabla 70 | Resultados etapa de descarga, suelo con 5% de ceniza | 126 |
| Tabla 71 | Resultado etapa de carga, suelo con 12% de ceniza | 128 |
| Tabla 72 | Resultados etapa de descarga, suelo con 12% de ceniza | 128 |
| Tabla 73 | Resultado etapa de carga, suelo con 18% de ceniza | 130 |



| | | |
|----------|---|-----|
| Tabla 74 | Resultados etapa de descarga, suelo con 18% de ceniza | 130 |
| Tabla 75 | Resultado etapa de carga, suelo con 25% de ceniza | 132 |
| Tabla 76 | Resultados etapa de descarga, suelo con 25% de ceniza | 132 |
| Tabla 77 | Resultados de la constitución química de la ceniza y aserrín en crudo | 134 |
| Tabla 78 | Índice de CBR, muestra C-1 | 135 |
| Tabla 79 | Índice de CBR, muestra C-2 | 136 |
| Tabla 80 | Resultados de deformación | 137 |
| Tabla 81 | Resultados del índice de plasticidad muestra C-1 | 139 |
| Tabla 82 | Resultados del índice de plasticidad muestra C-2 | 139 |
| Tabla 83 | Resultados proctor modificado, muestra C-1 | 140 |
| Tabla 84 | Resultados proctor modificado, muestra C-2 | 140 |
| Tabla 85 | Resultados de CBR, muestra C-1 | 142 |
| Tabla 86 | Resultados de CBR, muestra C-2 | 143 |
| Tabla 87 | Análisis de varianza para el % de CBR según concentración de ceniza | 144 |
| Tabla 88 | Comparación de medias de Dunnett CBR vs concentración de ceniza | 144 |
| Tabla 89 | Resultados de deformación etapa de carga | 146 |
| Tabla 90 | Resultados de deformación etapa de descarga | 146 |
| Tabla 91 | Análisis de varianza para la deformación según concentración de ceniza .. | 148 |
| Tabla 92 | Comparación de medias de Dunnett deformación vs concentración de ceniza | 149 |
| Tabla 93 | Regresión cuadrática para la optimización del contenido de la ceniza | 152 |
| Tabla 94 | Estimadores de parámetros para la optimización de la ceniza | 152 |
| Tabla 95 | Costos por m ³ al estabilizar con cemento | 153 |
| Tabla 96 | Costos por m ³ al estabilizar con ceniza | 154 |



ÍNDICE DE FIGURAS

| | Pág. |
|---|-------------|
| Figura 1 Obtención del proceso de la ceniza de madera (aserrín) | 41 |
| Figura 2 Micrografía de SEM de la ceniza | 42 |
| Figura 3 Constitución química de la ceniza de carbón | 43 |
| Figura 4 Instrumento del límite líquido (cuchara de casagrande) | 49 |
| Figura 5 Carta de plasticidad | 52 |
| Figura 6 Sistema de clasificación SUCS | 52 |
| Figura 7 Clasificación por el método AASHTO | 54 |
| Figura 8 Carta de plasticidad - AASHTO..... | 54 |
| Figura 9 Principio de compactación | 55 |
| Figura 10 Curva del ensayo de CBR | 57 |
| Figura 11 Curva tiempo vs deformación, (logaritmo de tiempo) | 60 |
| Figura 12 Evaluación esfuerzo de preconsolidación, método casagrande..... | 61 |
| Figura 13 Gráfico de coeficiente de consolidación..... | 61 |
| Figura 14 Muestreo de suelos de 02 calicatas..... | 67 |
| Figura 15 Ubicación geográfica de la muestra | 71 |
| Figura 16 Extracción del material arcilloso, C-1 y C-2..... | 72 |
| Figura 17 Procedencia de la muestra de ceniza | 72 |
| Figura 18 Gráfica de granulometría de la muestra de suelo C-1 | 74 |
| Figura 19 Gráfica de granulometría de la muestra de suelo C-2 | 75 |
| Figura 20 Gráfica de granulometría de la ceniza de madera | 76 |
| Figura 21 Grafica de limite liquido C-1, suelo natural | 77 |
| Figura 22 Grafica de limite liquido C-2, suelo natural | 79 |
| Figura 23 Clasificación de Suelo AASHTO muestra C-1, suelo natural..... | 80 |



| | | |
|-----------|--|-----|
| Figura 24 | Carta de plasticidad – AASHTO muestra C-1, suelo natural..... | 81 |
| Figura 25 | Carta de plasticidad, muestra C-1, suelo natural | 82 |
| Figura 26 | Sistema de clasificación SUCS muestra C-1, suelo natural | 82 |
| Figura 27 | Clasificación de suelo AASHTO muestra C-2, suelo natural | 83 |
| Figura 28 | Carta de plasticidad – AASHTO, muestra C-2, suelo natural..... | 84 |
| Figura 29 | Carta de plasticidad muestra C-2, suelo natural | 85 |
| Figura 30 | Sistema de clasificación SUCS muestra C-2, suelo natural | 85 |
| Figura 31 | Gráfica de límite líquido C-1 con 5% de ceniza | 86 |
| Figura 32 | Gráfica del límite líquido C-2 con 5% de ceniza | 88 |
| Figura 33 | Gráfica del límite líquido C-1 con 12% de ceniza | 89 |
| Figura 34 | Gráfica del límite líquido C-2 con 12% de ceniza | 91 |
| Figura 35 | Gráfica del límite líquido C-1 con 18% de ceniza | 92 |
| Figura 36 | Gráfica del límite líquido C-2 con 18% de ceniza | 94 |
| Figura 37 | Gráfica del límite líquido C-1 con 25% de ceniza | 95 |
| Figura 38 | Gráfica del límite líquido C-2 con 25% de ceniza | 97 |
| Figura 39 | Gráfica de compactación C-1, 100% suelo | 99 |
| Figura 40 | Gráfica de compactación C-2, 100% natural..... | 100 |
| Figura 41 | Gráfica de compactación C-1 con 5% de ceniza..... | 101 |
| Figura 42 | Gráfica de compactación C-2 con 5% de ceniza..... | 102 |
| Figura 43 | Gráfica de compactación C-1 con 12% de ceniza..... | 103 |
| Figura 44 | Gráfica de compactación C-2 con 12% de ceniza..... | 104 |
| Figura 45 | Gráfica de compactación C-1 con 18% de ceniza..... | 105 |
| Figura 46 | Gráfica de compactación C-2 con 18% de ceniza..... | 106 |
| Figura 47 | Gráfica de compactación C-1 con 25% de ceniza..... | 107 |
| Figura 48 | Gráfica de compactación C-2 con 25% de ceniza..... | 108 |



| | | |
|-----------|---|-----|
| Figura 49 | Gráfica de CBR C-1, suelo natural..... | 110 |
| Figura 50 | Gráfica de CBR C-2, 100% suelo | 111 |
| Figura 51 | Gráfica de CBR C-1 con 5% de ceniza | 113 |
| Figura 52 | Gráfica de CBR C-2 con 5% de ceniza | 114 |
| Figura 53 | Gráfica de CBR C-1 con 12% de ceniza | 116 |
| Figura 54 | Gráfica de CBR C-2 con 12% de ceniza | 117 |
| Figura 55 | Gráfica de CBR C-1 con 18% de ceniza | 119 |
| Figura 56 | Gráfica de CBR C-2 con 18% de ceniza | 120 |
| Figura 57 | Gráfica de CBR C-1 con 25% de ceniza | 122 |
| Figura 58 | Gráfica de CBR C-2 con 25% de ceniza | 123 |
| Figura 59 | Gráfica de consolidación, suelo natural | 125 |
| Figura 60 | Gráfica coeficiente de consolidación, suelo natural | 125 |
| Figura 61 | Gráfica de consolidación suelo con 5% de ceniza..... | 127 |
| Figura 62 | Gráfica coeficiente de consolidación, suelo con 5% de ceniza | 127 |
| Figura 63 | Gráfica de consolidación suelo con 12% de ceniza..... | 129 |
| Figura 64 | Gráfica coeficiente de consolidación, suelo con 12% de ceniza | 129 |
| Figura 65 | Gráfica de consolidación suelo con 18% de ceniza..... | 131 |
| Figura 66 | Gráfica coeficiente de consolidación, suelo con 18% de ceniza | 131 |
| Figura 67 | Gráfica de consolidación suelo con 25% de ceniza..... | 133 |
| Figura 68 | Gráfica coeficiente de consolidación, suelo con 25% de ceniza | 133 |
| Figura 69 | CBR al 100% y 95%, muestra C-1 | 135 |
| Figura 70 | CBR al 100% y 95%, muestra C-2..... | 136 |
| Figura 71 | Curva de deformaciones | 138 |
| Figura 72 | Gráfica de compactación, muestra C-1 | 140 |
| Figura 73 | Gráfica de compactación, muestra C-2 | 141 |



| | | |
|-----------|---|-----|
| Figura 74 | Gráfica de CBR vs % de ceniza, muestra C-1..... | 142 |
| Figura 75 | Gráfica de CBR vs % de ceniza, muestra C-2..... | 143 |
| Figura 76 | Curva de deformaciones carga y descarga | 146 |
| Figura 77 | Curva del coeficiente de consolidación | 147 |
| Figura 78 | Porcentaje de CBR optimo, muestra C-1 | 150 |
| Figura 79 | Porcentaje de CBR optimo, muestra C-2 | 150 |
| Figura 80 | Porcentaje de CBR optimo, entre ambas muestras..... | 151 |



ACRÓNIMOS

| | |
|---------|---|
| CBR: | California Bearing Ratio |
| ASTM: | American Society for Testing and Materials |
| LP: | Límite plástico |
| LL: | Límite líquido |
| IP: | Índice de plasticidad |
| CL: | Arcilla de baja plasticidad |
| CH: | Arcilla de alta plasticidad |
| NP: | No Plástico |
| MTC: | Ministerio de Transportes y Comunicaciones |
| AASHTO: | American Association Standards Highway Transportation Officials |
| NTP: | Norma Técnica Peruana |
| MTC: | Ministerio de transportes y comunicaciones |
| PUCP: | Pontificia Universidad Católica del Perú |
| SUCS: | Sistema Unificado de Clasificación de Suelos |
| ANOVA: | Análisis de varianza |
| PRAL: | Programa Regional de Aire Limpio |



RESUMEN

La presente investigación abordó el desafío de mejorar la estabilidad de suelos arcillosos en carreteras, debido a las deficientes condiciones de las vías, especialmente por la presencia de estos suelos, que hacen que no cumplan los estándares de calidad para su utilización como subrasante. Para ello se planteó el uso de las cenizas de madera (aserrín) como estabilizante, aprovechando su comportamiento puzolánico por la presencia de sílice y aluminato. El problema planteado fue ¿En qué medida incide la estabilización de suelos arcillosos incorporando cenizas de madera (aserrín)? El objetivo de la investigación fue evaluar la incidencia de estabilización de suelos arcillosos incorporando cenizas de madera (aserrín), en su comportamiento mecánico - deformacional, para el mejoramiento de subrasante. El estudio fue de tipo aplicativo de enfoque cuantitativo y de nivel correlativo llevado a cabo mediante el método hipotético-deductivo. La muestra de estudio fue el material arcilloso extraído de 2 calicatas. Con esta investigación mediante la adición de cenizas de madera en proporciones de 5%, 12% 18% y 25% se logró mejorar el comportamiento mecánico deformacional de los suelos arcillosos, teniendo como resultados una disminución de la plasticidad de los suelos en un 31%, a su vez el incremento de la resistencia al esfuerzo de un 3.36% hasta un 17.26% de CBR lo que implica que es considerado como una subrasante. Asimismo, se observó una reducción del 29.82% al 21.75% en la deformación. En tal sentido la utilización de la ceniza como un material estabilizante resulta una alternativa económicamente viable, sostenible y con impacto positivo en el medio ambiente.

Palabras Clave: Cenizas de madera, Estabilización, Subrasante, Suelos arcillosos.



ABSTRACT

This research addresses the challenge of improving the stability of clay soils on roads, due to the poor conditions of the roads, especially due to the presence of these soils, which mean that they do not meet the quality standards for their use as subgrade. For this purpose, the use of wood ash (sawdust) as a stabilizer was proposed, taking advantage of its pozzolanic behavior due to the presence of silica and aluminate. The problem posed was: To what extent does the stabilization of clay soils affect incorporating wood ashes (sawdust)? The objective of the research was to evaluate the incidence of stabilization of clay soils by incorporating wood ash (sawdust), in its mechanical - deformational behavior, for the improvement of subgrade. The study was of an application type with a quantitative approach and a correlative level carried out using the hypothetico-deductive method. The study sample was the clay material extracted from 2 pits. With this research, by adding wood ash in proportions of 5%, 12%, 18% and 25%, it was possible to improve the mechanical deformational behavior of clay soils, resulting in a decrease in the plasticity of the soils by 31%. , in turn the increase in stress resistance from 3.36% to 17.26% of CBR which implies that it is considered a subgrade. Likewise, a reduction from 29.82% to 21.75% in deformation was observed. In this sense, the use of ash as a stabilizing material is an economically viable, sustainable alternative with a positive impact on the environment.

Keywords: Wood ash, Stabilization, Subgrade, Clay soils.



CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En el contexto peruano, se observa una considerable cantidad de carreteras que no satisfacen con los lineamientos de calidad necesarios para llevar a cabo la afirmación o pavimentación, principalmente debido a la presencia de suelos arcillosos en la región. Este factor impacta negativamente en el progreso de los proyectos, lo que conlleva a mejorar la estabilidad de los suelos arcillosos, tanto con materiales químicos como naturales y así obtener parámetros adecuados para su utilización. Según las directrices del MTC, (2014), se considera un material inapropiado de subrasante cuando el CBR es \geq 6%. En casos de un CBR menor (que se considera una subrasante deficiente o inapropiada) o presencia de nivel freático, se debe realizar un estudio especial de estabilización, mejora o reposición. Se analizará diversas opciones, tales como estabilización mecánica, la incorporación de productos o aditivos para mejorar las características de los suelos.

Estudios revelan que una de las formas de estabilización con productos naturales es la ceniza de fondo; Ayala et al., (2019), sostiene que, al incorporar cenizas, derivados de la combustión de la madera, incrementa significativamente la resistencia del suelo arcilloso, elevando el CBR desde un 2.2% inicial hasta un 9.5%. por otra parte Karim et al., (2018), refiere que las cenizas poseen la capacidad de desempeñar el papel de un asequible y viable estabilizador en la construcción de carreteras, contribuyendo a la mejora sustancial de diversas propiedades geotécnicas presentes en suelos arcillosos de baja cohesión.



La ceniza de madera surge como un subproducto derivado de la incineración llevada a cabo en hornos de ladrilleras artesanales. Según Soriano, C. (2012), menciona que en el Perú existen 1840 productores de ladrillo artesanal, siendo notable la presencia destacada en los departamentos de Puno, Piura y Cajamarca, los cuales constituyen el 58.04% del conjunto de ladrilleras a nivel del Perú. De las cuales existen un aproximado 2000 hornos de ladrilleras artesanales. Este material se clasifica en dos categorías distintas: cenizas volantes, caracterizadas por su finura y prevalencia en el aire, y ceniza de fondo, que se distingue por su mayor peso y tamaño de partícula.

Según Alanya Palomino, (2020) menciona que en la actualidad cada horno artesanal produce alrededor de 25,000 ton/año de cenizas de carbón, y es considerado como un material de desperdicio o desmonte, que son desechados en los rellenos sanitarios, sin embargo, investigaciones indican que dichas cenizas albergan características químicas cementantes, lo que posibilita su empleo como aditivo estabilizante o aglomerante en proyectos constructivos. Esto no solo abre la puerta a su aplicación en la edificación, sino que también ofrece la posibilidad de disminuir los gastos asociados a su eliminación.

El fin de este estudio consiste en determinar el impacto de la incorporación de cenizas de madera (aserrín) en la mejora del comportamiento físico-mecánicas del suelo arcilloso. Para alcanzar este propósito, se recolectaron muestras de material arcilloso y cenizas de madera (aserrín) provenientes de ladrilleras artesanales en la ciudad de Juliaca. Estas muestras fueron sometidas a un riguroso programa de pruebas de laboratorio, que abarcó calcular los límites de consistencia, la identificación de tamaños de partículas, características de compactación (incluyendo la humedad óptimo y densidad seca), resistencia al esfuerzo y propiedades deformacionales.



Con el propósito de analizar el impacto de la cenizas de madera (aserrín) en la mejora de las características del material arcilloso, se generaron diversas combinaciones de cenizas con el suelo arcilloso, las cuales fueron sometidas a idénticas pruebas de laboratorio. A su vez se determinó la proporción óptimo de cenizas de madera (aserrín) que debe agregarse a la subrasante, para posteriormente ser aplicados en las diferentes calles como mejoramiento de la subrasante existente y así mejorar las vías de transpirabilidad.

1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

1.2.1. Problema general

- ¿En qué medida incide la estabilización de suelos arcillosos incorporando cenizas de madera (aserrín) en su comportamiento mecánico – deformacional, para el mejoramiento de la subrasante de las vías de la urbanización las gardenias de la ciudad de Juliaca?

1.2.2. Problemas específicos

- ¿Cómo influye la incorporación de cenizas de madera (aserrín), en porcentajes de 5%, 12%, 18% y 25% en su comportamiento mecánico de un suelo arcilloso, para el mejoramiento de la subrasante, de las vías de la urbanización las gardenias de la ciudad de Juliaca?
- ¿Cómo influye la incorporación de cenizas de madera (aserrín), en porcentajes de 5%, 12%, 18% y 25% en su comportamiento deformacional de un suelo arcilloso, para el mejoramiento de la subrasante, de las vías de la urbanización las gardenias de la ciudad de Juliaca?



- ¿Cuál es la proporción óptima de ceniza de madera (aserrín) y la factibilidad técnica de estabilizar un suelo arcilloso, para el mejoramiento de la subrasante, de las vías de la urbanización las gardenias de la ciudad de Juliaca?

1.3. HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACIÓN

1.3.1. Hipótesis general

- La estabilización de suelos arcillosos incorporando cenizas de madera (aserrín), mejora de manera positiva el comportamiento mecánico - deformacional en el mejoramiento de la subrasante de las vías de la urbanización las gardenias de la ciudad de Juliaca.

1.3.2. Hipótesis específicas

- La incorporación de cenizas de madera (aserrín), en porcentajes de 5%, 12%, 18% y 25% mejora significativamente su comportamiento mecánico de un suelo arcilloso, en el mejoramiento de la subrasante, de las vías de la urbanización las gardenias de la ciudad de Juliaca.
- La incorporación de cenizas de madera (aserrín), en porcentajes de 5%, 12%, 18% y 25% mejora de manera positiva su comportamiento deformacional de un suelo arcilloso, en el mejoramiento de la subrasante, de las vías de la urbanización las gardenias de la ciudad de Juliaca.
- La proporción óptima de ceniza de madera (aserrín) y la factibilidad técnica de estabilizar un suelo arcilloso, incide de manera positiva en el mejoramiento de la subrasante, de las vías de la urbanización las gardenias de la ciudad de Juliaca.



1.4. JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

Esta investigación pretende ofrecer una mejora del comportamiento mecánico - deformacional en materiales arcillosos a nivel de capa de subrasante en las vías aun no pavimentadas de la ciudad de Juliaca.

Por ello se optó el uso de cenizas de madera (aserrín) como una opción alternativa, las cuales provienen de la actividad de ladrilleras artesanales de la ciudad de Juliaca, debido a que en la actualidad no se le da un adecuado uso a este residuo, siendo desechados inadecuadamente impactando de manera negativa al medio ambiente, ya que terminan como material de desmonte o almacenados en lugares inapropiados.

Según estudios realizados la composición principal de la ceniza de madera de fondo incluye predominantemente sílice y aluminatos de calcio. Estos elementos poseen la capacidad de inducir la reacción química necesaria para adquirir el material cementante y formar una masa solida resistente y durable, esto por el comportamiento puzolánico y la activación química con el agua.

Es por eso que esta investigación se centra en la aplicación de este material como aditivos estabilizante de suelos arcillosos, con el fin de mejorar el comportamiento físico, mecánicas y deformacionales de la subrasante existente en las diversas calles de la urbanización Las Gardenias, ubicada en la ciudad de Juliaca. Este enfoque no solo aportará desde el punto de vista técnico a la ingeniería, sino que también considerará aspectos económicos y ambientales. Para alcanzar este propósito, llevaremos a cabo estudios de mecánica de suelos para obtener información detallada sobre el tipo de suelo presente en las vías de dicha urbanización.



1.5. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

1.5.1. Objetivo general

- Evaluar la incidencia de estabilización suelos arcillosos incorporando cenizas de madera (aserrín), en su comportamiento mecánico - deformacional, para el mejoramiento de la subrasante de las vías de la urbanización las gardenias de la ciudad de Juliaca.

1.5.2. Objetivo específico

- Evaluar de qué manera influye la incorporación de cenizas de madera (aserrín), en porcentajes de 5%, 12%, 18% y 25% en su comportamiento mecánico de un suelo arcilloso, para el mejoramiento de la subrasante, de las vías de la urbanización las gardenias de la ciudad de Juliaca.
- Evaluar de qué manera influye la incorporación de cenizas de madera (aserrín), en porcentajes de 5%, 12%, 18% y 25% en su comportamiento deformacional de un suelo arcilloso, para el mejoramiento de la subrasante, de las vías de la urbanización las gardenias de la ciudad de Juliaca.
- Determinar la proporción óptima de la ceniza de madera (aserrín) y la factibilidad técnica de estabilizar un suelo arcilloso, para el mejoramiento de la subrasante, de las vías de la urbanización las gardenias de la ciudad de Juliaca.



CAPÍTULO II

REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN

Karim et al., (2018), en el artículo de investigación sobre la “Estabilización de suelos arcillosos blandos con cenizas”. El propósito fue estabilizar modelos de arcilla blanda mediante la incorporación de un aditivo de ceniza de aserrín (SDA), utilizando distintos porcentajes que variaron desde 0% hasta 10% del peso del suelo. Los resultados indicaron la ceniza tuvo efectos desfavorables al incrementar tanto el límite líquido como la plasticidad debido al contenido de arcilla. En cuanto a la influencia del SDA en la compactación, los resultados revelaron que reduce la densidad seca compactada y aumenta la humedad óptima. La combinación de cenizas de aserrín con suelos arcillosos blandos mejoró varias características mecánicas del suelo, evidenciadas por una disminución en los coeficientes de compresión (C_c y C_r) y un incremento en la resistencia al corte no drenado (c_u). La estabilización con 4 y 10% de cenizas dieron como resultado valores que pueden usarse como material de subbase y de regular a pobre para materiales de subrasante. El SDA se presenta como un agente estabilizador rentable y viable en el ámbito de ejecución de proyectos de carreteras para mejorar la mayoría de las propiedades geotécnicas del material arcilloso blando.

Nath et al., (2018), en el estudio realizado sobre “Características mecánicas del suelo mezclado con fino grano de Ceniza de madera”. Se tiene como objetivo gestionar la utilización de cenizas de madera como estabilizador de arcilla blanda particularmente en la resistencia a la compresión no confinada (UCS), parámetros de resistencia al corte, trabajabilidad y características de compactación y compresibilidad. El suelo se estabilizó



con un contenido de ceniza de madera del 5%, 7,5%, 10% y 12,5%. Observándose como resultado que hay una mejora de las propiedades mecánicas del suelo tratado con cenizas, de las cuales: Las cenizas de madera disminuye la plasticidad y densidad seca máxima de las arcillas, mientras que se requiere más agua para la aglomeración y floculación de las partículas de arcilla mediante reacción de intercambio catiónico y coagulación con la consiguiente reducción de la cantidad de finos. también origino un aumento en la resistencia a la compresión ilimitada en el suelo arcilloso blando, y una mezcla de 10% de ceniza de madera y arcilla optimiza los resultados. Cuanto mayor sea el porcentaje de cenizas insertadas, mayor será la resistencia. También se produce una mejora en los parámetros de resistencia al corte. El ángulo de fricción interna ha sido testigo de una mejora de aproximadamente el 85% con una adición de 10% de cemento, mientras que el valor de cohesión tiene una mejora de sólo aproximadamente un 6% con una adición de 10% de ceniza.

Según Parra (2018), en su estudio realizado a cerca de la “Estabilización con cal y la incorporación de cenizas volantes”. Tuvo como propósito evaluar el mejoramiento del suelo con comparaciones mediante adiciones de cal y cenizas volantes al 2, 4, 6 y 8%. Se concluye que partir de las pruebas realizadas y con una inclusión del 15% de CBCA, se evidencia una resistencia a la compresión que fluctúa entre 150.56 y 151.23 kPa. Este análisis concluye que la proporción óptima para alcanzar estabilizar un suelo a nivel de subrasante es del 15% de CBCA. Por ende, la cal proporciona una mayor resistencia de esfuerzos y deformaciones máximas, mientras que la ceniza no contribuyó positivamente a mejorar el suelo. En líneas generales, la ceniza mostró un rendimiento superior en tracción sin superar los resultados obtenidos con cal, en tal sentido, cuando se busca estabilizar un suelo de manera expedita, los datos recabados sugieren que la cal se perfila como la opción preferida para la mejora del comportamiento del suelo.



Alarcón et al., (2020), en la investigación realizada sobre la “Estabilización de suelos a través del empleo de lodos aceitoso”. Tuvo como propósito evaluar la viabilidad de emplear lodo aceitoso como agente estabilizador en materiales gruesos y suelos arcillosos de subrasante, con el objetivo de potenciar las características de resistencias y plasticidad. Se concluye que la adición del 6% de lodo produce los impactos más óptimos en cuanto a la mejora de las características de plasticidad y resistencia del suelo granular, y un 4% en subrasante de suelo arcilloso, con tiempos de curado de 26 días y por otra parte desde la evaluación económica, se destacan dos beneficios clave: la reducción de los espesores estructurales y la disminución de los costos constructivos por metro cúbico.

Florez et al., (2008), mencionan en el estudio realizado sobre “Estabilización química de suelos expansivos”. Donde se tuvo como objetivo analizar sus posibles ventajas y desventajas al proponer como aditivo químico cenizas volantes para lograr estabilizar un suelo arcilloso. Mostrando como resultados que el cambio del índice de plasticidad exhibe una tendencia a la disminución en el rango del 30-40%, especialmente con un porcentaje de mezcla del 30% de cenizas. Este fenómeno respalda la evidencia de la constitución de hidratos mediante interacciones puzolánicas con el sustrato de tierra arcillosa. Se plantea la factibilidad de incorporar una prueba de rayos (DRX) y microscopía electrónica para identificar con precisión la composición mineralógica y la estructura microscópica. Estas herramientas resultarían fundamentales para confirmar o descartar la naturaleza altamente expansiva del suelo.

Thenoux & Carrillo (2008), en su investigación “Estudio de la utilización de cenizas en la estabilización de suelos”. Se tuvo como objetivo explorar la viabilidad de emplear las cenizas generadas mediante el proceso de combustión de lecho fluido (FBC) generadas de la instalación de cogeneración Petropower para la mejora de suelos finos



con el propósito de fortalecerlos para la construcción de vías de acceso. Las cenizas volantes FBC destacan por su distinción respecto a las cenizas volantes convencionales, esencialmente debido a su contenido elevado de cal, otorgándoles propiedades beneficiosas para la mejora de suelos arcillosos. A partir de los hallazgos obtenidos en la investigación, se infiere que la ceniza FBC constituye una opción viable para la estabilización de suelos con características plásticas. Se cree que su empleo puede optimizar el desempeño de las estratos del terreno, especialmente la subrasante en caminos de ripio. Al mismo tiempo, el uso de cenizas volantes FBC aumentaría la capacidad de resistencia de la subrasante y mejoraría así los rendimientos de los distintos estratos que conforman las vías de acceso. Además, optimiza la respuesta del suelo a la humedad, particularmente en el caso de suelos con contenido arcilloso de menor plasticidad.

Hernández et al., (2016), refiere en su estudio realizado sobre una “propuesta para fortalecimiento de terrenos con alto contenido de arcilla aplicado en pavimento rígido”. Donde se tuvo como objetivo analizar la mejora del estado de los suelos arcillosos usando cal como estabilizante en la subrasante para pavimentos rígidos. El tipo de estudio fue experimental, realizado en el tramo de la Universidad San Salvador. Concluyendo que el suelo natural analizado en este estudio no es adecuado para su uso como capa de subrasante, sin embargo, cuando se agrega un 5% de cal al suelo, incrementa el CBR en un valor de soporte de CBR de 1.93% a 54.00%, lo que confirma que un material que contenga 5% de cal puede ser apto en la utilización de subrasante de una estructura de pavimento.

Ayala et al., (2019), en la de investigación “Estudio sobre el impacto de la incorporación de ceniza de ladrilleras artesanales en la estabilización de suelos arcillosos



destinados a aplicaciones en pavimentación”. Donde se tuvo como objetivo evaluar el impacto producido al incorporar cenizas, procedentes de la quema del carbón y madera, la reacción mecánica de un suelo arcilloso. El estudio fue experimental tomado como muestra el material fue extraído de los extremos de la ciudad de Lima. Se concluye que es aceptable la utilización de CFLA como agente estabilizante, particularmente en la mejora de subrasantes en pavimentaciones. A medida que se incrementa la proporción de ceniza, se observa un incremento significativo en la resistencia del material arcilloso, elevando el CBR desde un 2.2% inicial hasta un 9.5% con la incorporación del 20% de CFLA. Sin embargo, para mezclas de cenizas superiores al 20%, se observa una disminución en el CBR.

Mamanchura (2022), en su investigación efectuada sobre “Incidencia de la aplicación innovadora de residuos de combustión para mejorar la base de suelos en proyectos de pavimentación”. Mostro como objetivo llevar a cabo un estudio aplicada con el propósito de observar el impacto del empleo de residuos de combustión en la mejora de suelos destinados a pavimentación. El estudio fue experimental desarrollado en Moquegua. Como resultados se tiene que, con base en las proporciones establecidas de cenizas volantes en este procedimiento, se observó un valor inicial del CBR de 13.512%, tomando en cuenta al añadir 22% de ceniza. Concluyendo que se logró elevar un 18.917% de CBR, representando un aumento considerable en la resistencia del suelo.

Mamani & Yataco (2017), en su investigación sobre “Estabilización de suelos arcillosos empleando cenizas de fondo”. El propósito consistió en determinar la contribución proporcional de la ceniza de madera procedente de ladrilleras artesanales en la mejora de la estabilidad de material arcilloso en la Región Ayacucho. El resultado es una optimización de las características físicas de la arcilla para un rendimiento superior



debido a la cohesión de las cenizas de fondo, que puede reducir el índice plástico en un 43%, lo que corresponde a la plasticidad. También se puede argumentar que en los ensayos de Proctor modificado permite la mayor densidad de las combinaciones realizadas y un porcentaje de humedad adecuada para obtener una reducción de la humedad en referencia a la incorporación de ceniza.

Apolinarez (2018), en el estudio efectuado “Estabilización de la subrasante añadiendo ceniza vegetal”. Cuyo fin fue determinar la influencia en la mejora de la firmeza de la subrasante al añadir ceniza vegetal. Concluyendo que la cantidad óptima de ceniza vegetal requerida para mejorar la subrasante en la Avenida Huarancayo, tramo de la cuadra 6 a la 11, difiere según las características del suelo. Para la muestra 1, clasificada como arena gravosa, se requiere un 35% de ceniza para lograr un índice de CBR del 24.7%. En el caso de la muestra 2, representativa de un suelo arena limosa, se recomienda un 35% de cenizas para alcanzar un CBR del 23.7%. En las dos proporciones el CBR obtenida es de 24.7% y 23.7%, los cuales cumplen con el estándar de capacidad mínima de tránsito del manual de carreteras, considerando a la subrasante como muy buena, en la de estudio realizado.

Aguilar & Bravo (2020). Tesis “Análisis de la eficacia de las cenizas residuales en la mejora de la estabilidad de un suelo arcilloso”. Plantea como objetivo, analizar cómo incide la incorporación de la ceniza residual al estabilizar la subrasante en suelos con alto contenido de arcilla, procedente de las plantas ladrilleras del en Cusco. Concluyendo demostrar que al adicionar ceniza residual de los hornos ladrilleros en mezclas del 30, 40 y 50 porciento al suelo arcilloso resulta en una mejora sustancial de las características mecánicas de la subrasante en estudio, además se infiere que las muestras de suelo son aptas al ser estabilizadas a nivel de subrasante, cumpliendo de manera satisfactoria con



los requisitos establecidos por las normativas técnicas peruanas CE.010 (Pavimento Urbano) y CE.020 (Estabilización de Suelo y Taludes).

Quispe (2019), En la investigación efectuada sobre “El comportamiento mecánico de la arcilla una exploración experimental y numérica integrando técnicas convencionales y la adición de ceniza de madera” (tesis). El propósito central fue examinar las propiedades mecánicas de una arcilla mejorada mediante la adición de ceniza de madera, comparando su desempeño con aquellos casos donde la mejora se logró a través de la aplicación de cemento, cal y geomallas biaxiales. Concluyendo que la reacción mecánica de la ceniza de la combustión de las ladrilleras puede variar debido a diferentes porcentajes de sílice y alúmina en diferentes especies de madera, como lo muestra el estudio de Siddique (2012). Comparando las gráficas de deformaciones en las propuestas indicadas: sólo arcilla, arcilla con ceniza y arcilla con cal al cabo de siete días, se observa que las deformaciones mencionadas no tienen gran diferencia. Sin embargo, en el día 21, la deformación de la arcilla con cal y la arcilla con ceniza difiere de la de la arcilla únicamente, lo que se debe a reacciones puzolánicas.

Aponte et al., (2019), realizan una investigación a cerca de un “Estudio sobre desempeño geotécnico de suelos arenosos mediante la adición de cenizas de madera y carbón procedentes de plantas ladrilleras”. El objetivo fue evidenciar las mejoras de las características geotécnicas de las mezclas suelo-ceniza y aportar al análisis de los beneficios derivados de la reutilización de estos materiales residuales; el estudio es de tipo aplicada de diseño experimental. Se concluye que los resultados obtenidos del estudio posibilitan la inferencia de que, al examinar las propiedades geotécnicas de cohesión y ángulo de fricción, la composición que incluye un 10% de ceniza respecto al peso seco presenta resultados ventajosos en contraste con el suelo no modificado,



especialmente en condiciones de confinamiento reducido, abarcando principalmente esfuerzos de confinamiento más bajos.

Terrones (2018), en su trabajo de investigación sobre “Mejora de la subrasante a través de la estabilización de un suelo cohesivo mediante la adición de cenizas provenientes del bagazo de caña”. El propósito fue estabilizar un suelo cohesivo con limos localizado en las vías de acceso, mediante la inclusión de cenizas de caña de azúcar (bagazo) en diversos porcentajes de 5, 10 y 15% en referencia al peso del suelo natural. La investigación fue experimental donde se efectuaron pruebas de caracterización al suelo. Los resultados encontrados indican que la introducción de un CBCA del 15% en la muestra de natural satisface los criterios referidos en el manual de la normativa, pues se obtuvo una resistencia equivalente de 150.60 kPa y un valor de 23.67% de CBR, lo cual conlleva a resultados significativos para las empresas en el rubro de la construcción vial.

Alanya (2020), en su investigación acerca de la “Mejora de las características de un suelo arcilloso mediante la inclusión de cenizas de madera provenientes de plantas ladrilleras”. El fin de la investigación fue determinar el impacto que genera la ceniza de las ladrilleras, en la mejora de la estabilidad de un suelo arcilloso. El enfoque del estudio es aplicado, no experimental y con una técnica centrada en la observación. En este estudio, se plantean dosificaciones específicas de ceniza de madera, siendo del 17%, 21% y 25%. Se concluye que la inclusión del 25% de cenizas resulta en una mejoría significativa en todas las propiedades del suelo. Este aporte positivo se refleja en un aumento del 18.5% en la cohesión, un 6.2% en la densidad seca máxima, un 23.2% en la humedad óptimo y un 24.4% en la resistencia al esfuerzo.



Según Tacca (2021), en el estudio realizado sobre la “Estabilización de un suelo arcilloso con la incorporación de cal para la mejora de subrasante”. La finalidad fue estabilizar el suelo arcilloso con la incorporación de cal para ver el incremento de la calidad en una subrasante. El tipo de investigación es un enfoque cuantitativo, es un método de formulación de hipótesis, que examina el tipo de estudio y el nivel experimental del estudio. Concluyendo que la adición de cal en porcentajes de 4, 8 y 12% mejoró la capacidad portante del suelo, mejorando así la estabilidad del subsuelo. Los suelos tratados con 4% de cal alcanzaron un CBR de 19.2%, el suelo tratado con 8% de cal obtuvo un CBR de 25%, y el suelo tratado con 12% de cal logra un CBR del 28.5%, que es significativamente mayor que el CBR del suelo natural que es 9,4%.

Goñas (2019), en la investigación realizada sobre la “Optimización de la subrasante mediante la aplicación de cenizas de carbón para estabilizar un suelo”. Tuvo como propósito evaluar la incidencia sobre las propiedades mecánicas que tiene la cenizas de carbón procedente de una planta ladrillera en Chachapoyas. La investigación fue de diseño experimental al azar, tomando como muestra el suelo extraído. La investigación evidencio que los datos obtenidos revelaron que el aumento en la capacidad de carga de los suelos analizados fue ajustado a la proporción de ceniza añadida en 15%, 20% y 25%. Lo que llevó a concluir que la ceniza de carbón mejoró la resistencia de carga de los suelos arcillosos (alta plasticidad y orgánico) , se ha determinado estadísticamente que agregar un 25% de ceniza mejorará el comportamiento de la subrasante.

Espinoza & Honores, (2018) mencionan que en el estudio realizado sobre la “Mejora de la consistencia de suelos con contenido de arcilla mediante la combinación de conchas de abanico y cenizas de carbón para la utilización en pavimento”. El objetivo consistió en mejorar la consistencia de suelos arcillosos mediante la añadidura de cenizas



de carbón y conchas de abanico, con el propósito de prepararlos para la pavimentación, este objetivo se abordó a través de ensayos exhaustivos para caracterizar física y mecánicamente el suelo arcilloso del asentamiento humano Nuevo Santa. Los resultados derivados de las pruebas aplicadas a las mezclas con proporciones del 20%, 25%, y 30% revelan un significativo incremento en la resistencia al esfuerzo CBR. Así como alteraciones en las características físicas con respecto al suelo original, que inciden de manera positiva en la consistencia de suelos arcillosos.

González et al., (2019), en el estudio realizado acerca sobre “Propiedades de resistencia y comportamiento deformacional en combinaciones de suelo y escoria blanca derivadas a través de pruebas de corte directo y compresión uniaxial”. Tuvo como propósito es evaluar las mejoras del comportamiento geotécnico de un material arcilloso al agregar escoria blanca en proporciones de 5 y 10%. Como resultado se evidencio que en un plazo corto las combinaciones con un 5% de escoria exhiben un incremento de resistencia a la compresión de un suelo. Sin embargo, en las combinaciones que contienen un 10% de escoria, se observa un aumento de incidencia en los porcentajes de deformación de rotura en el punto de 50%. A lo largo del tiempo, se registra un incremento en el ángulo máximo de rozamiento interno, partiendo de 24 grados en el material arcilloso y alcanzando hasta los 32 grados en la combinación de escoria blanca al 10%



2.2. BASES TEÓRICAS

2.2.1. Suelos Arcillosos

Según , Cubas & Falen, (2016), indica que la constitución de un suelo arcilloso se caracteriza por la presencia predominante de minerales activos, como la montmorillonita en cantidades significativas, acompañada en menor medida por la clorita y la vermiculita. Por otro lado, se identifican minerales como la caolinita y las illitas, considerados menos activos, que pueden incidir en las propiedades expansivas del suelo de un suelo cuando se encuentren en grandes cantidades.

2.2.1.1. Arcilla

Según, Badillo & Rico, (2005), la arcilla se forma como resultado de la degradación química de varios minerales presentes en las rocas ígneas, culminando en su producción final (alúmina y principalmente silicatos). Tienen diferentes colores según el contenido de impurezas. Desde otra perspectiva física, se trata de partículas extraordinariamente diminutas con una superficie lisa, presentando un diámetro de partícula arcillosa menor a 0,002 mm.

Según la ASTM D422 (1998), las dimensiones de sus partículas se consideran según la clase de material desde grava, arena, limo y arcillas, las dimensiones es según se puede ver en la tabla 1.

Tabla 1*Suelos según tamaño de partículas (ASTM)*

| Clase de Material | Dimensión de Partículas (mm) |
|-------------------|------------------------------|
| Grava | 75 – 2 |
| Arena | 2 – 0.2 (arena gruesa) |
| | 0.2 – 0.05 (arena fina) |
| Limo | 0.05 – 0.005 |
| Arcilla | Menor a 0.005 |

Nota. Extraído de Manual de Ensayo de Materiales. (Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2016).

La identificación de las cualidades de un suelo arcilloso según el índice de plasticidad se detalla en la tabla 2, (ASTM D422, 1998). Donde su peso específico oscila entre 2,60 y 2,75 gr/cm³. La densidad del suelo se relaciona directamente con su solidez, lo que implica una resistencia elevada a la erosión a medida que el suelo se torna más compacto.

Tabla 2*Índice de plasticidad según ASTM*

| Plasticidad | Características |
|--------------|--------------------|
| IP > 20 | Bastante arcilloso |
| 20 > IP > 10 | Arcilloso |
| 10 > IP > 4 | Poco arcilloso |
| 20 > IP > 10 | Libre de arcillas |

Nota. Tomado del Manual. (MTC, 2016). Ensayo de materiales.

2.2.1.2. Propiedades de la arcilla

De acuerdo a García & Suárez, (2005), refieren que las propiedades fundamentales de la arcilla son:

- a) **Superficie específica:** Se refiere a la suma de la superficie externa y la interna de las partículas que componen el suelo. Las arcillas se caracterizan por tener una superficie específica considerable, lo cual es relevante en los procesos de interacción entre sólidos y fluidos.

Tabla 3

Superficies de las arcillas

| Clase de Arcilla | Superficie (m ² /gr) |
|-----------------------------------|---------------------------------|
| Caolinita con alta cristalinidad. | 15 |
| Caolinita con baja cristalinidad. | 50 |
| Halloisita. | 60 |
| Illita. | 50 |
| Motmorillonita. | 80 - 300 |
| Sepiolita. | 100 - 240 |
| Paligorskita. | 100 - 200 |

Nota. Extraído de (García & Suárez, 2005)

- b) **Capacidad de Absorción:** relacionada con la textura, que abarca la superficie específica y la porosidad, se pueden observar dos procesos físicos de manera independiente (proceso de absorción y proceso de adsorción).
- c) **Hinchamiento:** El proceso de hinchamiento se da producto de la absorción de agua en el espacio interlaminar donde a medida que el agua penetra y las láminas se separan, se generan fuerzas electrostáticas de repulsión entre las láminas, lo cual contribuye al proceso de hinchamiento logrando disociar unas láminas de otras.
- d) **Plasticidad:** Es la fundamental cualidad de un suelo arcilloso, debido a la configuración de la partícula y la dimensión del grano.



- e) **Tixotropía:** Se define como la disminución de la resistencia de un material al ser sometido a amasado, seguido de su gradual recuperación a lo largo del tiempo. Para exhibir su comportamiento tixotrópico, el material debe contener un porcentaje específico de agua que lo acerque a su límite líquido.

2.2.1.3. Clasificación de los suelos arcillosos

- a) **Por su Volumen:** Cruz, (2001), menciona la Clasificación del M.I.T. (Massachusetts Institute of Technology) de las arcillas de la siguiente manera, gruesas (0.002 a 0.0006mm), medianas (0.0006 a 0.0002mm) y finas (menores a 0.0002mm).
- b) **Por los Filosilicatos:** Los filosilicatos se clasifican en función a que sean bilaminares o trilaminares y dioctaédricos o trioctaédricos. Como se puede observar, los filosilicatos incluyen grupos minerales como las micas y las arcillas, (García & Suárez, 2005).
- c) **Por su Estructura:** Como lo mencionan Badillo & Rico, (2005) de acuerdo con su configuración reticular, los minerales de la arcilla se clasifican en: Caolinitas ($Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O$), comprenden una estructura de láminas silícicas y láminas alumínicas que se superponen de manera indefinida; “Montmorilonitas $[(OH)_4Si_8Al_4O_{20} \cdot n H_2O]$, conformadas por 1 lámina alumínica y 2 láminas silícicas que se sobreponen de manera continua.” e Illitas $[(OH)_4 \cdot Ky(Si_8-y Aly) (Al_4 Fe_4 Mg_4 Mg_6) O_{20}$, con $y = 1.5]$, presentan similitudes con las montmorillonitas, sin embargo, su estructura interna tiende a



agruparse formando grumos de material, lo que resulta en una reducción del área presentada al agua por unid/vol.

2.2.2. Cenizas de Madera

Son los residuos derivados de la combustión de carbón pulverizado en centrales térmicas, conocidos como cenizas de madera (carbón), se clasifican en cenizas de fondo, cenizas volantes y combinados (según la definición de la norma ASTM), (Petermann & Saeed, 2010).

2.2.2.1. Proceso y Origen de obtención de la ceniza

Según Swisscontact (2012), en el Perú se generan un aproximado de 53,500 ton/año de ceniza de fondo que están distribuidos en 2000 hornos artesanales, provenientes de las distintas regiones del país.

Según Soriano, C. (2012). La región de Puno cuenta aproximadamente con 334 plantas de ladrilleras artesanales, la mayor parte se encuentra en la provincia de San Román Juliaca cerca del 74.85%, con 250 hornos generando aproximadamente 6,687.5 toneladas de ceniza de fondo al año. Los materiales empleados para la cocción de los ladrillos artesanales son: La Leña (aserrín) que constituye el 65.87%, un 34.13% de guano y cerca del 1.80% de llantas o residuos plásticos.

La obtención de la ceniza de fondo ocurre tras un periodo de enfriamiento de 1-2 días en los hornos. El proceso de recolección de la ceniza se realizan de forma manual utilizando palas mecánicas que facilitan la remoción y acumulación del material, posteriormente colocado

en sacos, posteriormente son desechados en forma de montículos como material desechable, afectando al medio ambiente.

Figura 1

Obtención del proceso de la ceniza de madera (aserrín)



Nota. Elaboración propia

2.2.2.2. Cenizas de Fondo

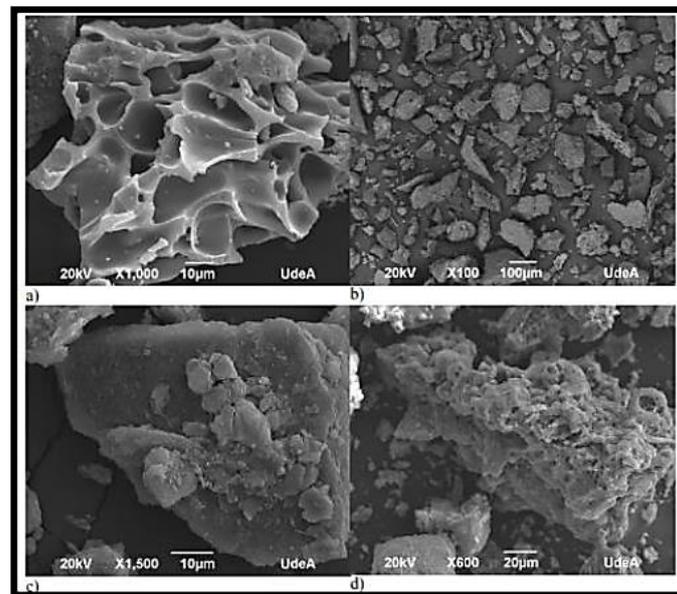
La ceniza de fondo surge como un subproducto resultante de la quema de madera de eucalipto y carbón, siendo también un componente en la producción de ladrillos artesanales que sigue una línea de fabricación. Este producto constituye la fracción más gruesa de la ceniza generada en los hornos de ladrillos, depositándose en el fondo del horno y separándose de manera mecánica. Las cenizas de fondo constituyen cerca del 60% que es la mayor parte de las cenizas generadas al quemar madera y carbón, (Aguilar & Bravo, 2020).

2.2.2.3. Estructura de la Ceniza de Fondo

Para el autor Morales Zuluaga, (2015), al analizar la micrografía a través de microscopio electrónico de barrido (SEM), se evidenció una presencia reducida de partículas esféricas, destacando esta como una las cualidades significativa en las cenizas de carbón.

Figura 2

Micrografía de SEM de la ceniza



Nota. a) Partícula con alta porosidad, carbón inquemado. b) Fragmentos de partículas de la Ceniza, partículas angulares. c) Partícula compacta rica en sílice y alúmina. d) Partícula de carbón inquemado con trozos de esferas de sílice y alúmina. Tomado de (Morales Zuluaga, 2015).

2.2.2.4. Constitución química de la ceniza de fondo

Para Aguilar & Bravo, (2020) los autores indican que la constitución química de las cenizas de fondo son provenientes de los materiales quemados en su mayoría de madera (aserrín), mediante la combustión a una elevada temperatura, su composición principal incluye sílice (SiO_2), aluminatos de calcio y óxido de calcio, desempeñando un

papel crucial en la reacción química necesaria para la obtención del material cementante.

Según Cubas & Falen (2016), menciona que el análisis químico de la muestra de ceniza revela que la presencia de los compuestos con propiedades puzolánicas ($\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-CaO-FeO}_3$) constituye el 25.71% del peso total de la ceniza, mientras que el 74.29% esta relacionado con carbono no quemado.

Figura 3

Constitución química de la ceniza de carbón

| | | | | | | | | |
|-----------|------------|-------------|-----------|-----------|-----------|--------------|-----------|-----------|
| Mo | Na | Nb | Ni | P | Pb | SiO2 | Sb | Sc |
| PPM | % | PPM | PPM | % | PPM | % | PPM | PPM |
| ICP40B | ICP40B | ICP40B | ICP40B | ICP40B | ICP40B | ICP40B | ICP40B | ICP40B |
| 12 | 0.27 | 2 | 2 | 0.52 | 11 | >10 | <5 | 2.5 |
| Ag | CaO | As | Ba | Be | Bi | Al2O3 | Cd | Co |
| PPM | % | PPM | PPM | PPM | PPM | % | PPM | PPM |
| ICP40B | ICP40B | ICP40B | ICP40B | ICP40B | ICP40B | ICP40B | ICP40B | ICP40B |
| 0.3 | 0.45 | 16 | 127 | <0.5 | <5 | >15 | <1 | 1 |
| Cr | Cu | FeO3 | Ga | K | La | Li | Mg | Mn |
| PPM | PPM | % | PPM | % | PPM | PPM | % | PPM |
| ICP40B | ICP40B | ICP40B | ICP40B | ICP40B | ICP40B | ICP40B | ICP40B | ICP40B |
| 3 | 28.1 | 0.26 | <10 | 9.85 | <0.5 | 2 | 0.92 | 159 |
| Sn | Sr | Ti | Tl | V | W | Y | Zn | Zr |
| PPM | PPM | % | PPM | PPM | PPM | PPM | PPM | PPM |
| ICP40B | ICP40B | ICP40B | ICP40B | ICP40B | ICP40B | ICP40B | ICP40B | ICP40B |
| <10 | 2372 | 0.02 | <2 | 6 | <10 | 1.2 | 47.9 | 12 |

Nota. Extraído de (Cubas & Falen, 2016)

2.2.3. Estabilización de Suelos

La estabilización del suelo implica someterlo a procesos específicos o tratamientos con la finalidad de optimizar sus cualidades, logrando de esta manera la formación de una capa de base sólida y resistente. Esta capa resultante es capaz



de soportar eficazmente tanto al peso vehicular como las condiciones climáticas más adversas, garantizando la estabilidad de la plataforma, (Fernández Loaiza, 1982).

Según, Fajardo & Vásquez, (2014) , indica que la mejora y modificación de las características de un suelo se puede llevar a cabo mediante procesos químicos, físicos o una combinación de ambos, como parte del proceso de estabilización del suelo. El objetivo de la estabilización de los suelos es la utilización de agentes estabilizantes para optimizar las cualidades geotécnicas del suelo y permitir que sea favorable para la etapa constructiva.

2.2.3.1. Estabilización de suelos arcillosos

Aguilar & Bravo (2020), refiere que la estabilización de suelos arcillosos implica la alteración de ciertos atributos no deseados, con el objetivo de adaptar el suelo para un uso específico. Entre las características no esperados de la arcilla plástica se incluyen un índice plástico elevado, indicativo de una expansión (o contracción) significativa, así como una capacidad estructural insuficiente para soportar cargas.

2.2.3.2. Caracterización de los suelos para estabilizar

Para Fajardo & Vásquez, (2014), menciona que la tarea principal es la evaluación donde implica la identificación de su tipo (arena, arcilla u orgánico), así como la determinación de la proporción de finos y su plasticidad. Este análisis considera aspectos clave como sensibilidad, expansividad y deformabilidad.



Si es posible obtener información completa sobre la identificación del suelo, podremos solucionar cualquier problema en el mismo y en este caso sabremos si el uso del método de estabilización es adecuado.

2.2.3.3. Técnicas de estabilización de suelos

Para los autores Fajardo & Vásquez, (2014), las técnicas de estabilización varían desde la inclusión de elementos estabilizadores diseñados para conferir solidez, asegurando la creación de sistemas de protección frente a las inclemencias climáticas. Estos pueden incluir:

Mecánicos: Métodos que permiten mejorar significativamente el suelo sin reacciones químicas importantes, es decir, conseguir una buena compactación del material de soporte.

Físicos: Consiste en lograr una granularidad suficiente añadiendo al suelo primitivo materiales granulares, finos o ambos al mismo tiempo.

Químicos: Es el uso de un estabilizador químico, consiste en la modificación en las propiedades del suelo debido a resultados físicos y químicos del ámbito, como al agregar asfalto, cemento, cloruro de sodio permeable y cal.

Hidráulicos: En el subsuelo el drenaje es la fijación de elementos en el suelo con mayor porosidad que los elementos existentes. Este es el camino que sigue el líquido cuando el elemento definido se conecta a la salida definida en el proyecto, en cuyo caso se evacúa el líquido.

2.2.4. Contenido de Humedad

Para el autor Morales Zuluaga (2015), menciona que “el contenido de humedad se define como la relación entre el peso del agua presente en una muestra en su estado original y el peso de dicha muestra después de haber sido deshidratada en un horno a una temperatura oscilante entre 105 y 110 grados Celsius.”

La respuesta y fortaleza de los suelos están condicionadas por la proporción de humedad que albergan, dado que este factor influye de manera directa en sus variaciones volumétricas y en su estabilidad mecánica. La humedad se representa numéricamente como un porcentaje que oscila desde el 0%, cuando el suelo está completamente sin humedad, hasta el 100%.

2.2.5. Análisis Granulométrico

Para la PUCP (2012), refiere que el análisis del tamaño de las partículas del suelo implica separar y clasificar las partículas del suelo que lo componen según su tamaño. Esta prueba nos permite hacer suposiciones aproximadas sobre ciertas propiedades del suelo, principalmente de los suelos gruesos.

Tabla 4

Límite de partículas de suelo

| Organización | Tamaño partículas (mm) | | | |
|---|------------------------|----------|--------------|---------|
| | Grava | Arena | Limo | Arcilla |
| Instituto Tecnológico de Massachusetts. (MIT) | > 2 | 2 - 0.06 | 0.06 - 0.002 | < 0.002 |
| Departamento de Agricultura de Estados Unidos. (USDA) | > 2 | 2 - 0.05 | 0.05 - 0.002 | < 0.002 |

| Organización | Tamaño partículas (mm) | | | |
|---|------------------------|--------------|---------------------------------|---------|
| | Grava | Arena | Limo | Arcilla |
| Asociación Americana de Funcionarios del Transporte y Carreteras Estatales AASHTO. | 76.2 - 2 | 2 - 0.075 | 0.075 - 0.002 | < 0.002 |
| Sistema unificado de clasificación de suelos (SUCS). Bureau of Reclamation; American Society for Testing and Materials. | 76.2 a 4.75 | 4.75 a 0.075 | Finos (limos y arcilla) < 0.075 | |

Nota. La tabla muestra el tamaño de partículas según la organización. Tomado de "Fundamentos de la geotecnia" Das, 2013, (p. 28)

2.2.5.1. Granulometría análisis por tamizado

La PUCP (2012), menciona que el tamaño de partículas por tamizado es la disgregación del suelo a través una secuencia de tamices que establecen el tamaño de las partículas, mediante el porcentaje que pasa o retenido en cada abertura de malla, ver tabla 5.

Mediante los resultados obtenidos de la granulometría, se configura la curva granulométrica, donde las ordenadas están representadas por el "porcentaje que pasa", y los tamices actúan como las abscisas. Como alternativa, también es posible exhibir el "porcentaje retenido".

Tabla 5*Nº de Tamiz (aberturas de malla)*

| TAMICES | Dimensión del orificio (cm) |
|---------|-----------------------------|
| 3 ” | 7.500 |
| 1 ½ ” | 3.810 |
| ¾ ” | 1.900 |
| # 4 | 0.950 |
| # 8 | 0.476 |
| # 16 | 0.236 |
| # 30 | 0.110 |
| # 50 | 0.0297 |
| # 100 | 0.0149 |
| # 200 | 0.0075 |

Nota. Tomado de Manual del (MTC, 2016)

2.2.5.2. Granulometría análisis por sedimentación

Para la PUCP (2012), el análisis del tamaño de partículas por sedimentación es apropiado para suelos con que pasan mayor proporción el tamiz Nº 200 (0.0075 cm) y mayores a la malla 0.0001 cm, aunque no se puede determinar referente a sus características mecánicas, pero nos es útil para evaluar el potencial de expansibilidad (calculando la trabajabilidad de la arcilla) y la susceptibilidad a la congelación.

2.2.6. Límites de Atterberg

Se trata de ensayos estándar que nos facilitan la obtención de los límites que delimitan la humedad en el que el suelo permanece plástico. La norma ASTM D 4318 nos presenta cómo realizar esto, los procedimientos de prueba para determinar el límite plástico, el límite líquido y el estado plástico del suelo.

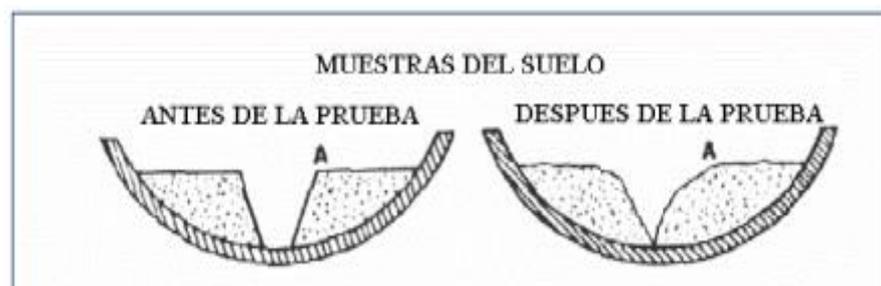
2.2.6.1. Límite Líquido

Según PUCP (2012), menciona que el límite líquido hace referencia al nivel de humedad, expresado en porcentaje, en el cual un suelo permanece entre su estado líquido y plástico. Su determinación se lleva a cabo a través de la prueba conocido como Casagrande.

Para el Ministerio de Transportes y Comunicaciones, (2016) este dispositivo se compone de una copa fabricada en bronce y una base construida con hule resistente. El procedimiento implica la preparación de dos secciones de suelo, cada una con un espesor de 10 mm, que deben ser alisadas y posteriormente unidas a lo largo de una longitud de 12 mm. La prueba está basada en colocar la copa sobre una base de 10 mm de altura, con 25 golpes, porque que es difícil lograr un cierre de 12 mm, se recomienda realizar la prueba 3 veces en una sola capa.

Figura 4

Instrumento del límite líquido (cuchara de casagrande)



Nota. Tomado de (Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2016)

2.2.6.2. Límite Plástico

Para el autor Morales Zuluaga (2015), menciona que “el límite plástico se define como el porcentaje de humedad respecto al suelo seco,



en el cual el suelo experimenta la transición de su estado plástico a semisólido y, a su vez, de semisólido a sólido. Este valor se reconoce como el contenido de humedad mínimo.”

El procedimiento implica la formación elipsoidal de una porción de suelo sobre una plancha de vidrio de diámetro de 3,2 mm. Si la muestra se torna quebradiza debido a la pérdida de humedad, se registra el contenido de humedad. En caso de que la plasticidad sea claramente definida, se adiciona más suelo y se lleva a cabo el ensayo del límite líquido. Cuando la plasticidad es baja, se realiza primero el ensayo del límite líquido, seguido inmediatamente por el ensayo del límite plástico utilizando la pasta de suelo restante. Este procedimiento se repite 3 veces para obtener datos más precisos. Para encontrar el límite plástico, multiplique la humedad promedio por 100, que muestra la ecuación (1).

$$\text{limite plastico} = \frac{\text{peso de agua}}{\text{peso de suelo seco}} * 100$$

2.2.6.3. Índice de plasticidad

De acuerdo al Ministerio de Transportes y Comunicaciones, (2016), el índice de plasticidad de un suelo se puede conceptualizar como la disparidad entre su límite líquido y su límite plástico. Este índice constituye una medida que indica la capacidad del suelo para retener agua antes de volverse soluble en una solución.

En casos en los que no sea posible establecer tanto el límite líquido como el límite plástico, se denota el índice de plasticidad con la abreviatura NP (no plástico). Del mismo modo, cuando el límite plástico iguala o



supera al límite líquido, el índice de plasticidad se registra como NP (no plástico).

2.2.7. Clasificación de suelos por el método (SUCS)

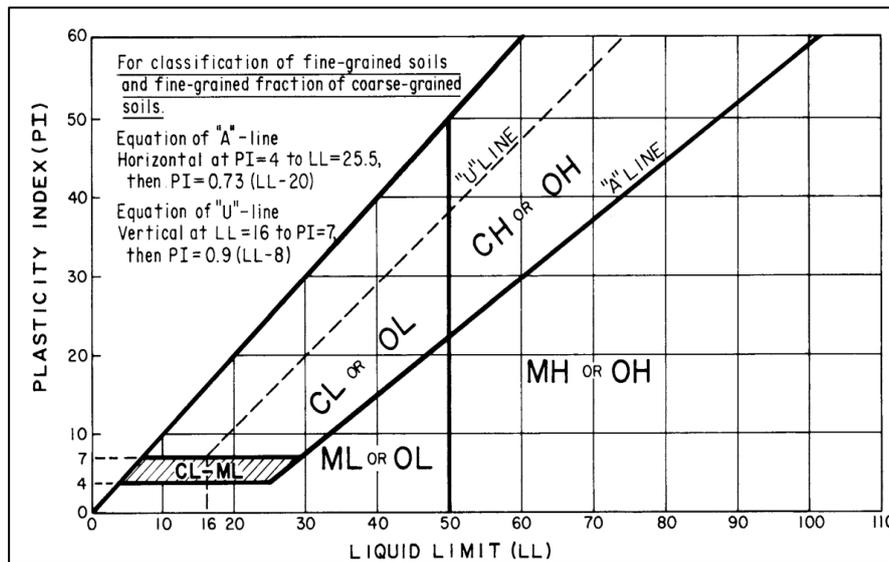
Según (Badillo & Rico, 2005; Das, 2013), señalan que “este método se fundamenta en el empleo de la Carta de Plasticidad, la cual fue inicialmente ideada por Casagrande y posteriormente adoptada por el cuerpo de ingenieros del ejército de los EE.UU.”

La norma ASTM-D-2487 (2011), nos guía en la clasificación de suelos, utilizando como criterios fundamentales el tamaño de partícula y las características de los límites de Atterberg. En una primera fase, se procede a la división del suelo en dos amplias categorías, dando inicio a un método que distingue y organiza los suelos en función de sus características esenciales:

Suelos que menos del 50% de su peso pasa la malla N°200, por tanto, en su mayoría estarán compuestos por grava y arena.

Suelos que más del 50% de su peso pasa la malla N°200: compuesto mayormente por arcilla o limo.

Figura 5
Carta de plasticidad



Nota. El gráfico muestra límite líquido vs índice de plasticidad, división de las regiones que indican el tipo de suelo. Tomado de (ASTM-D-2487, 2011, p. 13).

Figura 6
Sistema de clasificación SUCS

| Criterios para la asignación de grupo y nombres de grupo con el uso de pruebas de laboratorio ^a | | | | Clasificación de suelos | |
|--|---|--|--|---|---|
| | | | | Símbolo | Nombre de Grupo ^b |
| Suelos de partículas gruesas Más del 50 % retenido en la malla N°200. | Gravas Más del 50% de la fracción gruesa retenida en el tamiz N°4 | Gravas Limpias | $C_u \geq 4$ y $1 \leq C_c \leq 3$ ^e | GW | Grava bien graduada ^f |
| | | Menos del 5% de finos ^c | $C_u < 4$ y/o $1 > C_c > 3$ ^e | GP | Grava mal graduada ^f |
| | Arenas El 50% de la fracción gruesa pasa el tamiz N°4 | Gravas con finos | Los finos se clasifican como ML o MH | GM | Grava limosa ^{g,h} |
| | | Más del 12% de finos ^c | Los finos se clasifican como CL o CH | GC | Grava arcillosa ^{g,h} |
| Suelos de partículas finas El 50 % o más pasa la malla N°200. | Limos y Arcillas Límite Líquido menor que 50 | Arenas Limpias | $C_u \geq 6$ y $1 \leq C_c \leq 3$ ^e | SW | Arena bien graduada ⁱ |
| | | Menos del 5% de finos ^d | $C_u < 6$ y/o $1 > C_c > 3$ ^e | SP | Arena mal graduada ⁱ |
| | Limos y Arcillas Límite Líquido 50 o más | Arenas con finos | Los finos se clasifican como ML o MH | SM | Arena Limosa ^{g,h,i} |
| | | Más del 12% de finos ^d | Los finos se clasifican como CL o CH | SC | Arena Arcillosa ^{g,h,i} |
| | Limos y Arcillas Límite Líquido menor que 50 | Inorgánicos | IP > 7 y se grafica en o arriba de la línea ^l "A" | CL | Arcilla de baja plasticidad (ligera) ^{k,l,m} |
| | | Orgánicos | IP < 4 y se grafica en o arriba de la línea ^l "A" | ML | Limo ^{k,l,m} |
| Limos y Arcillas Límite Líquido 50 o más | Inorgánicos | $\frac{\text{Limite Líquido secado en horno}}{\text{Limite Líquido no secado}} < 0.75$ | OL | Arcilla Orgánica ^{k,l,m,n} Limo Orgánico ^{k,l,m,o} | |
| | Orgánicos | IP se grafica en o arriba de la línea "A" | CH | Arcilla de alta plasticidad ^{k,l,m} | |
| Suelos altamente orgánicos | Principalmente materia inorgánica, de color oscuro y con olor orgánico | Inorgánicos | IP se grafica debajo de la línea "A" | MH | Limo Orgánico ^{k,l,m} |
| | | Orgánicos | $\frac{\text{Limite Líquido secado en horno}}{\text{Limite Líquido no secado}} < 0.75$ | OH | Arcilla Orgánica ^{k,l,m,p} Limo Orgánico ^{k,l,m,q} |
| Suelos altamente orgánicos | | | | PT | Turba |

Nota. El gráfico muestra el procedimiento para clasificar un suelo mediante la clasificación SUCS. Tomado de (Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2016).

2.2.8. Clasificación de suelos método AASHTO

De acuerdo con las fuentes de (Badillo & Rico, 2005; Das, 2013), se expone que este enfoque se sustenta en la distribución de la granulometría del límite líquido y la plasticidad, organizados en 7 grupos principales, identificados como A-1 al A-7, y subdivididos en dos fracciones:

Partículas de mayor tamaño conforman los grupos A-1, A-2 y A-3, cuando el porcentaje que atraviesa el tamiz N°200 es igual o inferior al 35%. Por otro lado, las partículas finas incluyen los grupos A-4, A-5, A-6 y A-7, caracterizados por tener más del 35% de la muestra pasando por el tamiz N°200. Al subdividir el grupo A-7, se evalúa tanto el límite líquido como el índice de grupo (IG), siendo más limitado en su aplicación a medida que el IG aumenta. Un valor de IG igual o superior a 20 señala un material de baja resistencia para el propósito requerido.

$$IG = 0.01(F200 - 35) (IP - 10) + (F200 - 35) (0.2 + 0.005(LL - 40))$$

Cuando se realiza el cálculo del índice de grupo para un suelo clasificado en los grupos A-2-6 o A-2-7, se aplica la ecuación de índice de grupo parcial en relación con el índice de plasticidad.

$$IG = (IP - 10) * (F200 - 35)$$

Dónde:

$F200$ = porcentaje pasante el tamiz N°200.

LL = Límite Líquido.

IP = Índice de plasticidad.

Figura 7

Clasificación por el método AASHTO

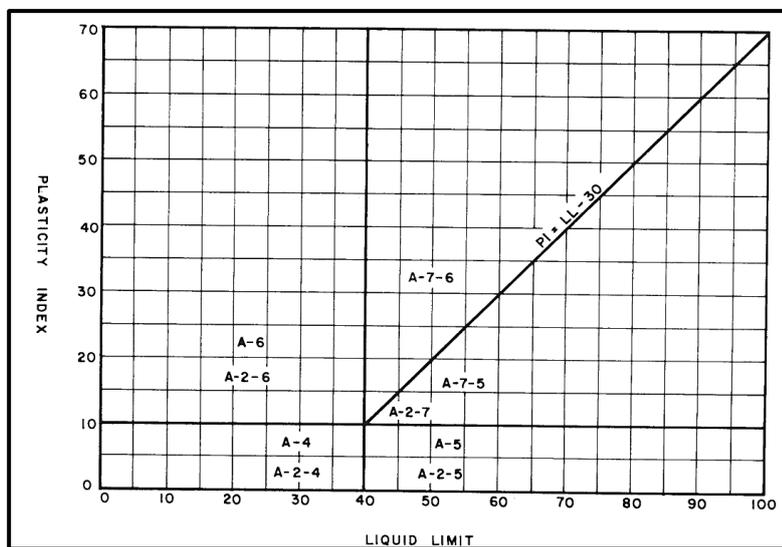
| Clasificación General | | Suelos Granulares ($\leq 35\%$ pasa por tamiz N°200) | | | | | | Suelos Granulares ($>35\%$ pasa por tamiz N°200) | | | | | |
|-------------------------------|-------------|---|--------|------------|--------------------------------------|--------|---------|---|--------|-------------------|--------|----------|----------|
| | | A-1 | | A-3 | A-2 | | | A-4 | A-5 | A-6 | A-7 | | |
| Sub - Grupo | | A-1a | A-1b | | A-2-4 | A-2-5 | A-2-6 * | A-2-7 * | | | | A-7-5 ** | A-7-6 ** |
| (% que pasa) | Tamiz N°10 | 50 max | | | | | | | | | | | |
| | Tamiz N°40 | 30 max | 50 max | 51 min | | | | | | | | | |
| | Tamiz N°200 | 15 max | 25 max | 10 max | 35 max | | | 36 min | | | | | |
| Del Tamiz AASHTO | LL | | | | 40 max | 41 min | 40 max | 41 min | 40 max | 41 min | 40 max | 41 min | 41 min |
| | IP | 6 max | | NP | 10 max | 10 max | 11 min | 11 min | 10 max | 10 max | 11 min | 11 min | 11 min |
| Tipo de material más común | | Fragmentos de Rocas, Gravas y Arenas | | Arena Fina | Gravas y arenas limosas o Arcillosas | | | Suelos Limosos | | Suelos Arcillosos | | | |
| Calificación de la Subrasante | | Excelente a Buena | | | | | | Regular a pobre | | | | | |
| | | | | | ** Si: $IP \leq (LL-30)$ es A-7-5 | | | Si el Suelo es NP $\gg IG=0$; Si $IG < 0 \gg IG=0$ | | | | | |
| | | | | | ** Si: $IP > (LL-30)$ es A-7-6 | | | | | | | | |

Nota. El gráfico muestra el procedimiento para clasificar un suelo mediante la clasificación AASHTO.

Tomado de (Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2016)

Figura 8

Carta de plasticidad - AASHTO



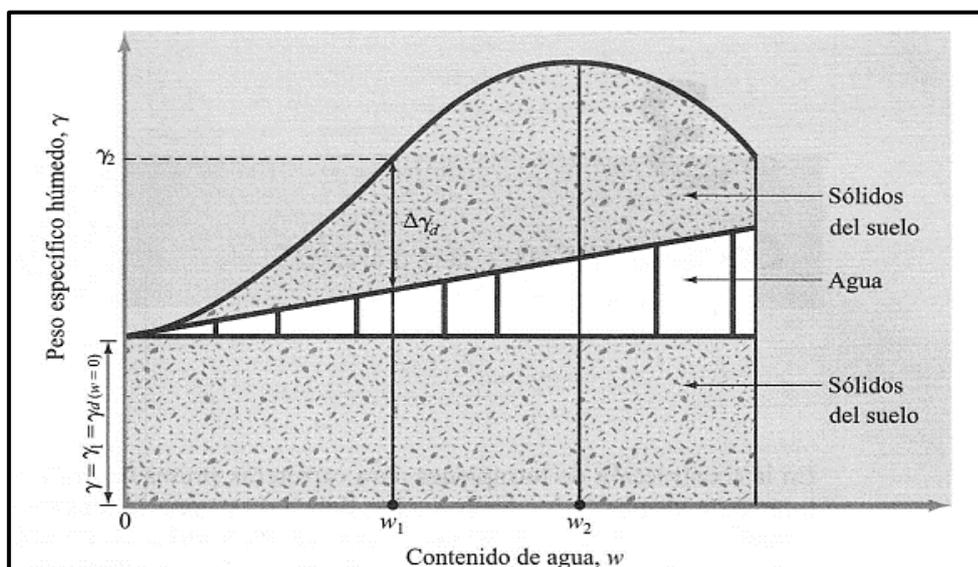
Nota. El gráfico muestra la relación índice de plasticidad Vs el límite líquido, para identificar el tipo de suelo. Tomado de “The Preparation Of Subgrades” (O. J. Porter, 1938, p. 327).

2.2.9. Ensayo de Compactación Proctor

Según Das (2001), la compactación busca la consolidación del suelo mediante la eliminación de aire mediante energía mecánica. Además, se emplea agua durante este proceso con el objetivo de suavizar las partículas del suelo, facilitando su movimiento y cambio de posición para lograr una densificación efectiva, ver figura 9.

Figura 9

Principio de compactación



Nota. En el gráfico se observa la densidad máxima para una cantidad de agua. Tomado de (Das, 2001, p. 52). “Fundamentos de la ingeniería geotécnica”.

Según la PUCP (2012), indica que la prueba de compactación tipo Proctor (estándar y modificada) solo se pueden utilizar en suelos donde no más del 30% (en peso) de las partículas se encuentran retenidas en la malla 3/4” (19 mm). El suelo, con un nivel preciso de humedad, se estratifica en capas dentro de un molde de dimensiones específicas, y cada estrato se consolida mediante una cantidad definida de golpes, utilizando un martillo con un peso y alturas de caída estandarizados. La densidad seca se determina repitiendo el método con diferentes

contenidos de humedad varias veces para establecer una relación entre la densidad seca y la humedad del suelo. Los datos al ser graficados, se materializa la representación gráfica de la curva de compactación, de la cual se extraen los parámetros fundamentales: la densidad seca máxima y la humedad óptima.

La ASTM D1557-07 (2007), indica que la naturaleza estándar o modificada de una prueba se determina a través de factores como la energía, expresada en términos del número de capas, el peso y la altura de caída del martillo, determinadas por la naturaleza del suelo a examinar, estas clasificaciones señalarán si se trata de una prueba categorizado como A, B o C.

Tabla 6

Tabla de resumen sobre el tipo de prueba

| Tipo de Ensayo | Estándar | | Modificado |
|----------------------|------------------|-----------------------------------|---------------------------------|
| Peso del martillo | 5.5 lbf (2.49kg) | | 10 lbf (4.54 kg) |
| Altura de caída | 12" (305 mm) | | 18" (457 mm) |
| Numero de capas | 3 capas | | 5 capas |
| Procedimiento ensayo | A | B | C |
| Material empleado | < N°4 | < 3/8" | < 3/4" |
| Diámetro del molde | 4" | 4" | 6" |
| Numero de golpes | 25 | 25 | 56 |
| Gradación | Hasta 20% > N°4 | Mas de 20% >N°4 y hasta 20% >3/8" | Mas 20% >3/8" y menos 30% >3/4" |

Nota. La tabla muestra la aplicación del tipo de ensayo. Tomado de "Guía de Laboratorio de Mecánica de Suelo", (PUCP, 2012).

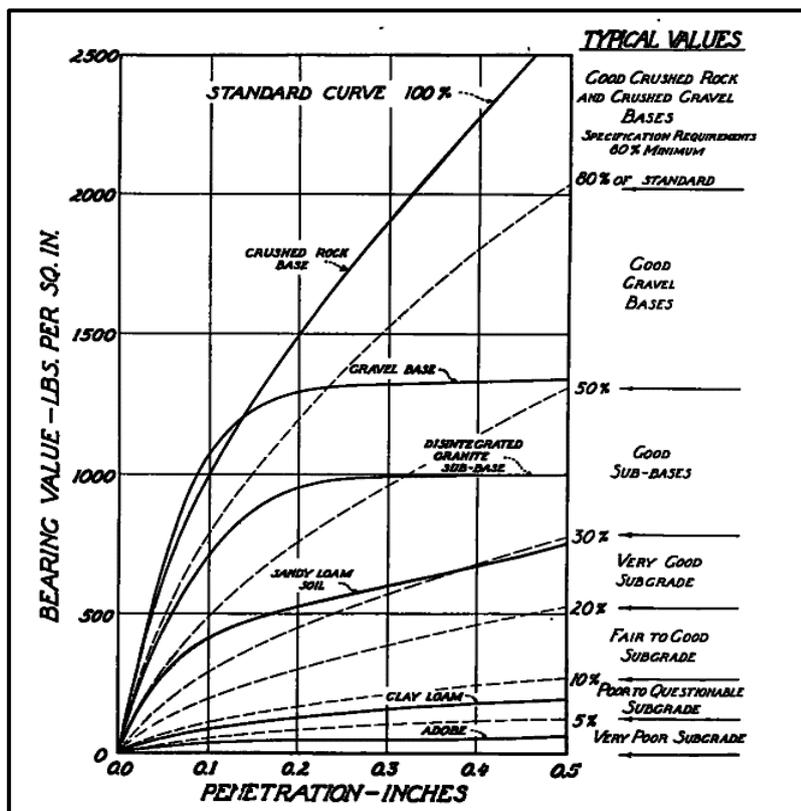
2.2.10. Ensayo de CBR (California Bearing Ratio)

El ensayo CBR es el valor de la relación de soporte, según B. O. J. Porter (1938) menciona que la prueba implica la humectación del material hasta alcanzar un contenido de humedad óptimo. Posteriormente, se consolida la muestra en un

molde cilíndrico de 6 pulg. de diámetro. Después de esta operación, el espécimen se sumerge y se coloca en un tanque de agua, tomando la primera medida de altura. Durante la fase de saturación, se confina la muestra dentro del molde mediante un disco poroso de peso de 10 libras, que simboliza el efecto de sobrecarga en la subrasante de espesor de 4 a 5 pulg. Luego, se somete a una carga de 2000 lb/pulg². La muestra se evalúa para determinar el valor de soporte penetrando el centro de la muestra compactada a una velocidad de 0,05 pulg/min con un pistón de área de 3 pulg². Un dial sujeto al dispositivo mide con precisión la penetración del pistón. Se registran las cargas para cada incremento de 0,1 pulgada de penetración, hasta alcanzar un total de 0,5 pulgadas.

Figura 10

Curva del ensayo de CBR



Nota. En el gráfico se observa la relación de penetración Vs esfuerzo de un suelo. Tomado de "The Preparation Of Subgrades" (B. O. J. Porter, 1938, p. 327)

Este procedimiento de prueba se emplea con el fin de determinar la capacidad de resistencia que puede tener una subrasante o material de base, incluida la resistencia de los materiales reciclados utilizados en la superficie de vías pavimentadas. El índice de CBR derivado de este ensayo constituye un componente esencial en diversos métodos para el diseño de pavimentos flexibles. El CBR se puede determinar en relación a la humedad óptima para una resistencia de compactación determinada. Los criterios para la preparación de muestras de prueba mediante la adición de materiales cementados (y otros) que se regeneren con el tiempo deben realizarse bajo criterios geotécnicos. El valor de la capacidad portante (índice de resistencia CBR) se determina según la carga patrón unitaria de la tabla 7, este indicador se emplea para analizar la capacidad de resistencia de los materiales empleados en las capas de subrasante, así como en las capas de base, subbase y afirmado, (MTC, 2016).

Tabla 7

Características de la carga patrón unitaria para el índice CBR

| Penetración | | | Presión | |
|-------------|-------|-------------------|---------------------|-----------------------|
| mm. | Pulg. | MN/m ² | Kgf/cm ² | Lbr/pulg ² |
| 2.54 | 0.1 | 6.90 | 70.31 | 1,000 |
| 5.08 | 0.2 | 10.35 | 105.46 | 1,500 |

Nota. La tabla muestra los puntos patrón para determinar el valor de CBR. Tomado de (MTC, 2016). “Manual de ensayo de Materiales”.

2.2.11. Prueba de Consolidación Unidimensional

Conforme a la PUCP (2012), se describe que la prueba de consolidación unidimensional implica la compresión vertical de una muestra de suelo confinada en un anillo rígido, siguiendo una orden predefinida de cargas. En cada incremento de carga, la muestra experimenta una primera deformación relacionada con la



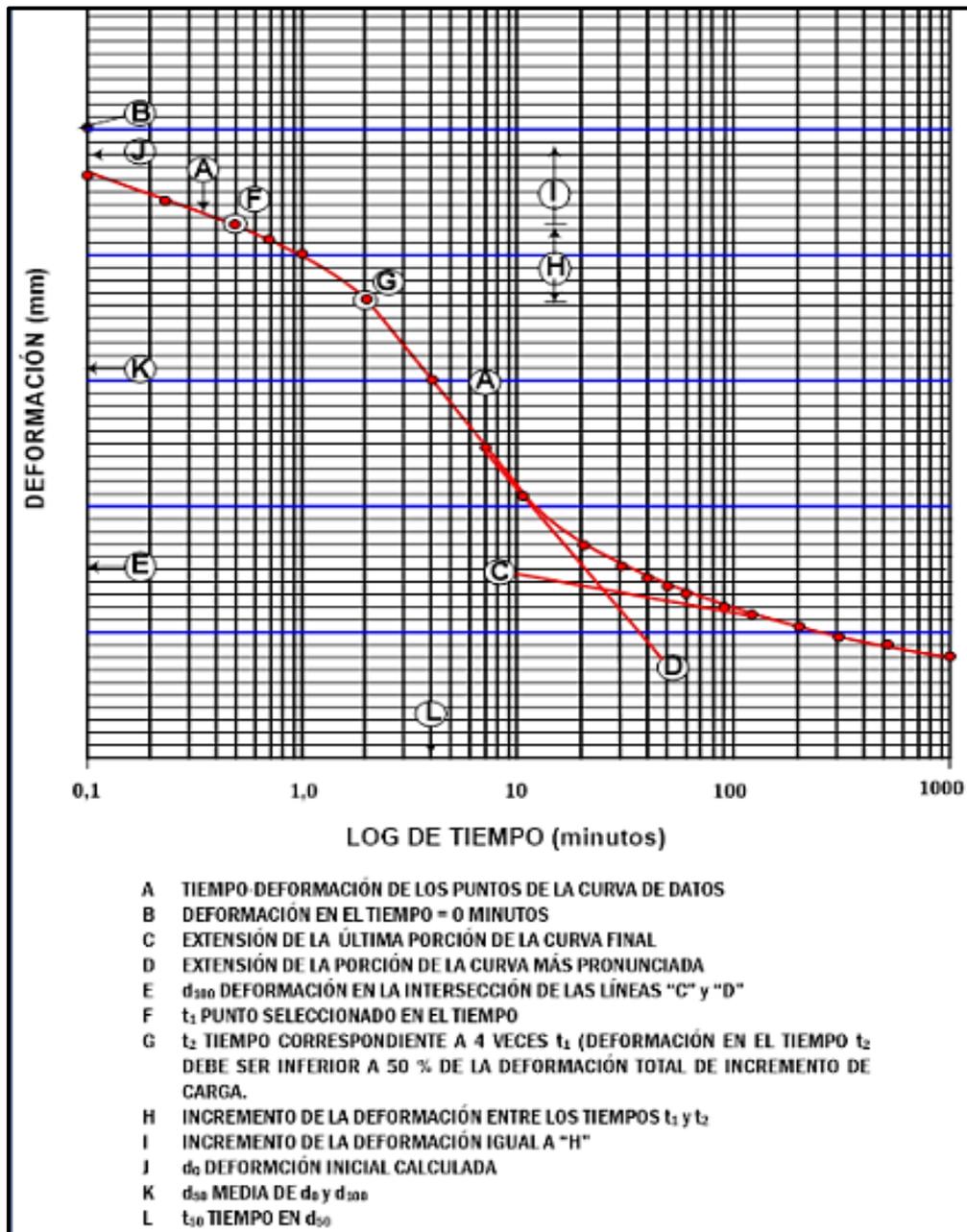
expulsión de agua o aire, conocida como consolidación primaria, seguida por una segunda deformación vinculada a los fenómenos de flujo plástico en el suelo, cuyas repercusiones son más notorias una vez concluida la consolidación primaria.

Para el procedimiento del ensayo se siguió norma ASTM D-2435 (2011), donde nos posibilita la evaluación de la velocidad y la amplitud del proceso de consolidación en suelos confinados lateralmente y con drenaje axial, sometidos a incrementos de carga bajo control. Para ello este propósito se logra a través de la implementación de dos métodos de ensayo específicos:

- **Procedimiento de prueba A:** se incrementa la carga de forma continua a lo largo de un periodo total de 24 horas o múltiplos de este periodo. Durante este proceso, es necesario registrar las lecturas de tiempo-deformación en al menos dos aumentos consecutivos de carga. Este procedimiento de prueba específico únicamente ofrece la curva de presión del anillo y los resultados integran tanto la consolidación primaria como la deformación secundaria.
- **Procedimiento de prueba B:** es imperativo tomar registro de lectura del tiempo-deformación para todos los aumentos de carga aplicados. Los aumentos de carga consecutivos se emplean después de haber logrado el 100% de la consolidación primaria, o mediante el incremento constante en el tiempo, según lo especificado en el procedimiento de Ensayo A. Este procedimiento proporciona información precisa sobre la curva de compresión que tiene en cuenta la compresión secundaria, el factor de consolidación del material saturado y la tasa de compresión secundaria.

Figura 11

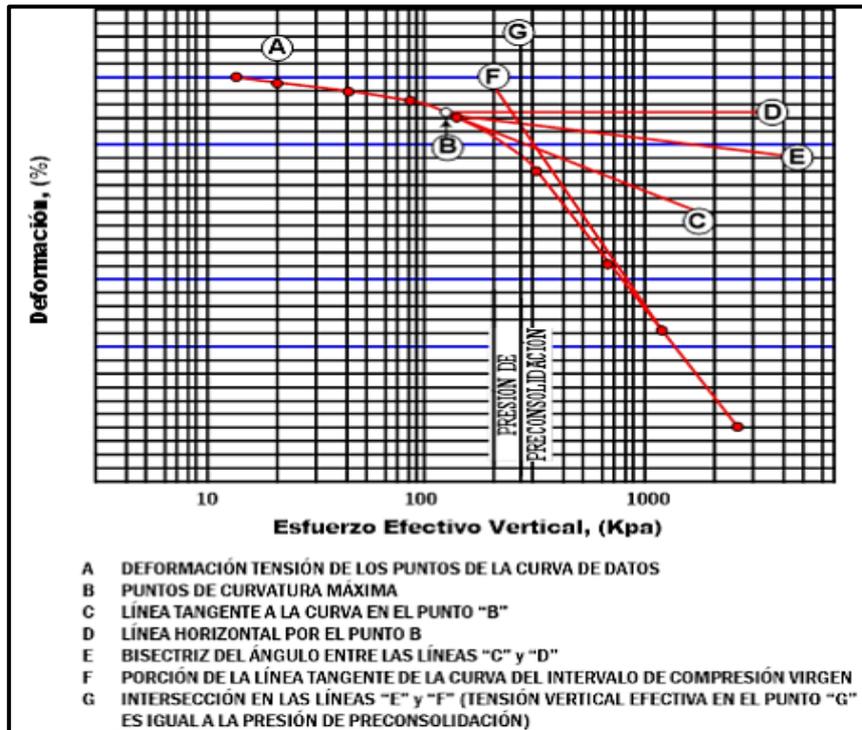
Curva tiempo vs deformación, (logaritmo de tiempo)



Nota. El gráfico muestra la curva tiempo vs deformación. Tomado de (Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2016).

Figura 12

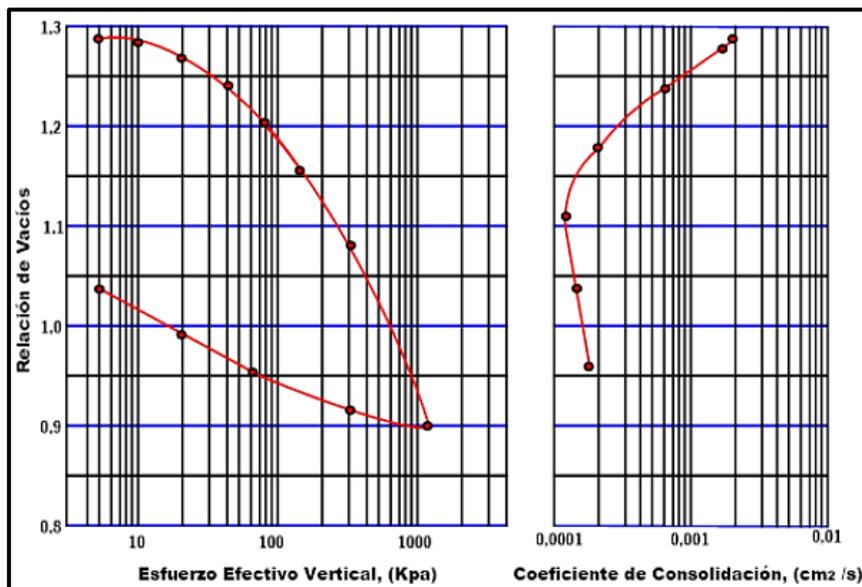
Evaluación esfuerzo de preconsolidación, método casagrande



Nota. Gráfico del esfuerzo de preconsolidación. Tomado de (MTC, 2016).

Figura 13

Gráfico de coeficiente de consolidación



Nota. El gráfico muestra la curva del coeficiente de consolidación. Tomado de (MTC, 2016).



2.2.12. Subrasante de una Vía

De acuerdo con el MTC, (2014), la subrasante se define como el nivel superior del terraplén o el fondo del terreno natural excavado, que forma parte de la estructura del pavimento. Está integrada por un material de suelo cuidadosamente seleccionado que satisface los requisitos específicos, siendo compactado en diversas capas para constituir un cuerpo estable en condiciones óptimas.

La capacidad de resistencia, conjuntamente con la circulación vehicular y las cualidades de los materiales destinados a la construcción de la capa de rodadura, son elementos cruciales para alcanzar un diseño eficaz de la estructura del pavimento. “Durante la etapa constructiva, se requiere compactar los últimos 30 cm del suelo bajo el nivel superior de la subrasante hasta alcanzar el 95% de la densidad seca máxima determinada mediante la prueba de Proctor modificado.

Los suelos ubicados a una profundidad no menor de 60 cm bajo la parte superior de la subrasante deben ser suelos apropiados y sólidos, con valores de $CBR \geq 6\%$. En caso que el CBR sea $< 6\%$, se considera una subrasante insuficiente o inadecuada, lo que implica la necesidad de estabilizar los suelos mediante diversas alternativas, como estabilizar mecánicamente, reemplazo del suelo, una estabilización química, el uso de geosintéticos, la elevación de la rasante, o la modificación del trazado vial. La alternativa de la técnica más adecuada se basará en consideraciones tanto técnicas como económicas, según el MTC, (2014).



Tabla 8

Condición de Sub rasante

| Condición de Subrasante | Valores de CBR |
|-------------------------|------------------------|
| Inadecuada | $CBR < 3\%$ |
| Insuficiente | $6\% > CBR \geq 3\%$ |
| Regular | $10 > CBR \geq 6\%$ |
| Buena | $20\% > CBR \geq 10\%$ |
| Muy buena | $30\% > CBR \geq 20\%$ |
| Excelente | $CBR \geq 30\%$ |

Nota. La tabla muestra el índice de CBR según las condiciones de subrasante. Tomado de “Manual de Carreteras” MTC, (2014).



CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. METODOLOGÍA

3.1.1. Tipo de investigación

Según lo que menciona Hernandez et al., (2014), se hace referencia a que el enfoque de naturaleza cuantitativa implica la recolección de datos con el objetivo de identificar patrones de comportamiento y verificar teorías mediante la evaluación de hipótesis fundamentadas en mediciones de análisis estadístico y numéricas.

Hernández & Mendoza, (2018), menciona que “representa una serie de procesos ordenados secuencialmente para probar ciertos supuestos. Cada paso precede al siguiente y no se puede evadir el paso, el orden es estricto, aunque por supuesto podemos desglosar algunos pasos”.

Por ende, este estudio se clasifica como una investigación aplicada, orientada hacia el enfoque cuantitativo, dado que los resultados derivados del trabajo de laboratorio serán expresados en valores numéricos susceptibles de medición.

3.1.2. Nivel de investigación

Según menciona Hernandez et al., (2014), la finalidad de la investigación correlacional consiste en comprender la conexión o el nivel de vinculación entre dos o más conceptos, categorías o variables dentro de un contexto específico.



La categoría de investigación se clasifica como correlativa, ya que implica la medición, evaluación, cuantificación y análisis de la interrelación entre variables.

3.1.3. Método de investigación

La metodología de investigación adoptada es la Hipotético-Deductiva. En este estudio, se formularon hipótesis que, mediante un proceso deductivo basado en valores numéricos susceptibles de medición, se busca validar de manera empírica a través de experimentos de laboratorio.

3.1.4. Diseño de investigación

Según lo indicado por Hernandez et al., (2014), un diseño de investigación constituye el punto donde convergen las fases conceptuales del proceso de investigación, tales como la formulación del problema, el enfoque teórico y el desarrollo de hipótesis, que se vinculan con etapas posteriores, de naturaleza más funcional.

Dentro de este marco nuevamente Hernandez et al., (2014) indica que en una situación de control, los estudios experimentales intentan manipular un tratamiento o intervención (conocido como variables independientes) para ver cómo interfieren en la otra variable (las dependientes).

Por lo tanto, la investigación se dé un diseño que se considera experimental, porque la variable independiente (ceniza de madera), en diversas combinaciones, provoca los efectos y reacciones en la variable dependiente (estabilización de suelos arcillosos). El diseño del estudio es a escala de laboratorio, se considera 02 muestra de suelo, extraídos a cielo abierto (calicatas)



de las vías de la urbanización las gardenias. Las combinaciones para ser ensayados en laboratorio son en las proporciones de 0%, 5%, 12%, 18% y 25% de ceniza de madera (aserrín) en cada muestra extraída. Las pruebas destinadas al análisis fueron llevadas a cabo en el laboratorio de mecánica de suelos de la EPIC UNAP.

3.1.5. Población

Según lo señalado por Hernandez et al., (2014), se nos refiere que la población constituye la totalidad de los elementos o unidades de análisis que forman parte del espacio geográfico en el cual se lleva a cabo la labor de investigación.

Por ende, la población de estudio son los suelos provenientes de las vías no pavimentadas de la urbanización las Gardenias de la ciudad de Juliaca.

Tabla 9

Población de estudio: vías

| Condición de vía | Pavimentada | No pavimentada |
|------------------|-------------|----------------|
| Avenida | 1 | 2 |
| Jirón | 0 | 7 |
| Pasaje | 0 | 4 |

Nota. Elaboración propia

3.1.6. Muestra

Según la referencia de Hernandez et al., (2014), menciona que la muestra corresponde a una subdivisión de la población, representando un conjunto más reducido de elementos que forman parte del universo en cuestión.

En tal sentido para este estudio la muestra es el material arcilloso que fue extraída de dos (02) calicatas realizadas a una profundidad de 1.00 y 1.05 m

respectivamente, de las vías no pavimentadas de la urbanización las gardenias de la ciudad de Juliaca, ver figura 14.

Figura 14

Muestreo de suelos de 02 calicatas



Nota. Se observa la obtención de las muestras. Elaboración propia

3.1.6.1. Método de muestreo

De acuerdo con lo expresado por Hernandez et al., (2014), se destaca que el muestreo constituye una herramienta en la investigación científica, cuya función primordial radica en identificar qué fracción de la población debe ser examinada para obtener conclusiones significativas sobre el universo en consideración.

En tal sentido para la obtención de muestra de suelo, se realizaron 2 calicatas a cielo abierto que se seleccionaron de manera discrecional por parte del investigador con propósitos de estudio, iniciando con un reconocimiento de las carreteras locales y luego evaluando aspectos como accesibilidad, estratigrafía, identificación de áreas críticas y la conveniencia de obtener el material sin causar perjuicios a los habitantes



del lugar, de la misma forma se identificó una planta artesanal de la elaboración de ladrillos ubicada a la salida Arequipa de la ciudad de Juliaca, para luego extraer las muestras de ceniza.

3.1.7. Recolección de datos

La técnica de la recolección de los datos es el análisis documental mediante la utilización de formatos y registro digital diseñados en hojas de cálculo según la necesidad de realizar los ensayos. Finalmente se procesó los resultados y los cálculos pertinentes.

3.1.8. Operacionalización de variables

Según Ñaupas Paitán et al., (2018), indican que la operacionalización de variables es un proceso lógico en el que las variables teóricas se transforman en variables más precisas, estas últimas en indicadores, y luego se crean los instrumentos de aplicación en base a estos últimos.

Esta investigación, según el planteamiento de los problemas, objetivos e hipótesis se cuenta con 2 variables una independiente y la otra dependiente con su operacionalización respectiva, ver tabla 10.

Tabla 10

Matriz de operacionalización de variables

| Variables | Definiciones conceptuales | Definición operacional | Dimensión | Indicadores | Instrumento |
|--|---|--|--|--|---|
| Variable independiente: Cenizas de madera | <p>“Los restos resultantes de la incineración de carbón pulverizado en plantas termoeléctricas son conocidos como cenizas de madera (carbón). Este proceso de combustión se clasifica en cenizas de fondo, cenizas volantes (según la definición de la norma ASTM) y subproductos combinados.”</p> | <p>“Se utilizará una mezcla de estabilizador con ceniza de madera para conferir propiedades impermeabilizantes, adhesivas y de preservación al suelo arcilloso. En el caso de suelos friccionantes, además de la estabilización química, se puede contemplar la estabilización mecánica. Por lo tanto, es esencial examinar cuidadosamente la proporción del estabilizador.”</p> | <p>Porcentajes de ceniza de madera</p> | <p>- C0 = 0 % - C1 = 5 % - C2 = 12 % - C3 = 18 % - C4 = 25 %</p> | <p>- Hojas de Registro</p> |
| Variable dependiente: Estabilización de suelos arcillosos | <p>“La estabilización de un suelo implica la aplicación de técnicas o tratamientos específicos para potenciar sus características más favorables. Este proceso busca lograr una capa de base resistente, duradera y estable, capaz de soportar las cargas del tráfico y hacer frente a las condiciones climáticas más adversas. Así, garantizar geotécnicamente la resistencia de la explanada.”, (Fernández Loaiza, 1982).</p> | <p>“Es necesario supervisar el suelo a través de pruebas de sus características físicas y mecánicas para evaluar su estabilidad al emplear diversas proporciones de estabilizador de ceniza de madera. Estas propiedades se determinarán mediante ensayos de plasticidad del suelo, compactación y resistencia al esfuerzo.”</p> | <p>Propiedades mecánicas</p> | <p>- Plasticidad - Compactación - Resistencia al esfuerzo</p> | <p>- Límites de Consistencia - Ensayo de Proctor Modificado - Ensayo de CBR</p> |
| | | | <p>Comportamiento deformacional</p> | <p>- Deformación del suelo. (asentamiento)</p> | <p>- Ensayo de Consolidación</p> |

Nota. Elaboración propia

3.1.9. Prueba de hipótesis

Para Ñaupas Paitán et al., (2018), La prueba de hipótesis es un método estadístico - numérico para determinar la consistencia de hipótesis alternativas. En otras palabras, una prueba consiste en recolectar datos de la realidad para obtener evidencia empírica que apoye o rechace una hipótesis propuesta.

Por su parte Hernández & Mendoza, (2018), refieren que “existe 2 tipos de prueba: paramétrico y no paramétrico; para esta investigación se tiene una población con datos que tienden a la normalidad, por ello requiere de un análisis paramétrico.” Según Altman & Bland (2016), la técnica de análisis de varianza (ANOVA) se emplea para examinar el impacto de uno o varios factores sobre la media de una variable. Se puede generalizar esta técnica para examinar la posible influencia de factores en la variabilidad de una variable. La hipótesis nula se evalúa contrastando si el valor obtenido para la F-ratio es "notablemente grande" para ser característico de una F de Fisher. Esto se cuantifica mediante el correspondiente valor p, que representa la probabilidad $P(F_{2,27} > F_{ratio})$. Si dicho valor p es menor que el nivel de significancia α establecido (comúnmente $\alpha = 0.05$), es decir, si la F_{ratio} difiere en el valor crítico de un $F_{2,27}$ para dicho α , se concluye que el impacto del factor es estadísticamente significativo.

Tabla 11

Escala de interpretación F_ratio

| Rho | Grado de relación |
|-----------------------|---|
| $F_{ratio} \leq 0.05$ | El efecto del factor será significativo |
| $F_{ratio} > 0.05$ | hipótesis nula aceptable |

Nota. La tabla muestra valores del grado de aceptación. Tomado de (Altman & Bland, 2016).

Con respecto a la extracción de los volúmenes del material arcilloso se realizó a cielo abierto y la muestras de ceniza de madera (aserrín) mediante una extracción manual, ver figura 16 y figura 17.

Figura 16

Extracción del material arcilloso, C-1 y C-2



Nota. Se observa las calicatas excavadas y la toma de muestras. Elaboración propia

Figura 17

Procedencia de la muestra de ceniza



Nota. Se observa la procedencia de la ceniza. Elaboración propia



3.2.2. Granulometría de la muestra C-1, C-2 y Ceniza

De acuerdo al procedimiento de ensayo de acuerdo con la norma (ASTM D422-63, 2007), se realizó la granulometría para las partículas finas de las muestras de suelo del material C-1, C-2 y de la ceniza, los cálculos ver (Anexo 3).

Tabla 13

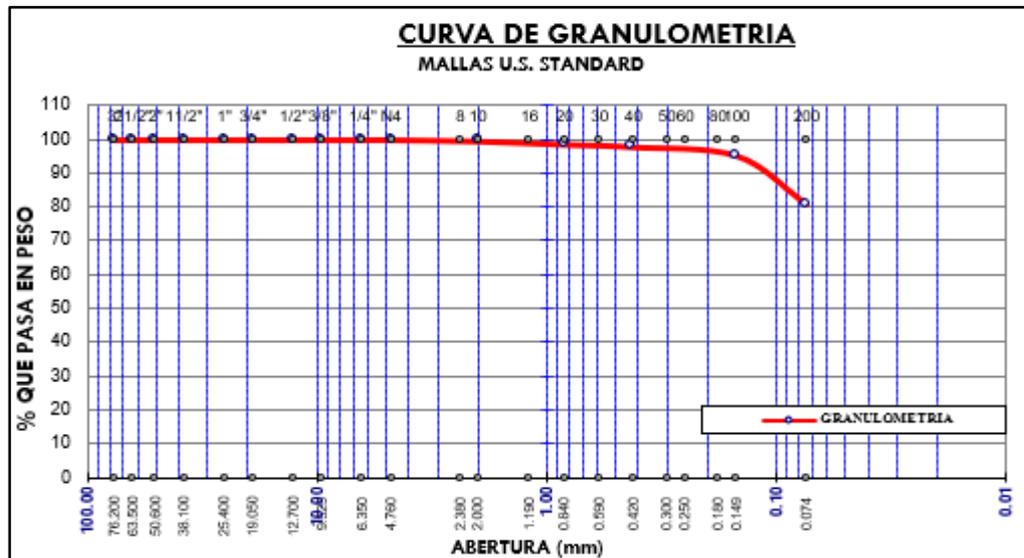
Granulometría del material arcilloso C-1

| N° de Tamiz | Abertura (Mm) | Peso Retenido | % Rete. Parcial | % Rete. Acumulad. | % Pasante |
|-------------|---------------|---------------|-----------------|-------------------|-----------|
| N° 4 | 4.760 | | 0.00 | 0.00 | 100.00 |
| N° 6 | 3.360 | | 0.00 | 0.00 | 100.00 |
| N° 8 | 2.380 | | 0.00 | 0.00 | 100.00 |
| N° 10 | 2.000 | 1.40 | 0.41 | 0.41 | 99.59 |
| N° 16 | 1.190 | 1.88 | 0.55 | 0.96 | 99.04 |
| N° 20 | 0.840 | 1.32 | 0.39 | 1.35 | 98.65 |
| N° 30 | 0.590 | | 0.00 | 1.35 | 98.65 |
| N° 40 | 0.426 | 2.57 | 0.75 | 2.10 | 97.90 |
| N° 60 | 0.297 | 1.67 | 0.49 | 2.59 | 97.41 |
| N° 80 | 0.177 | 3.03 | 0.89 | 3.48 | 96.52 |
| N° 100 | 0.149 | 4.16 | 1.22 | 4.69 | 95.31 |
| N° 200 | 0.074 | 49.13 | 14.38 | 19.08 | 80.92 |
| >200 | | 276.39 | 80.92 | 100.00 | 0.00 |

Nota. Elaboración propia

Figura 18

Gráfica de granulometría de la muestra de suelo C-1



Nota. Elaboración propia

Se observa que para la calicata C-1, el 80.92% de la muestra del material contienen partículas de un diámetro menor al tamiz N°200 (0.075mm).

Tabla 14

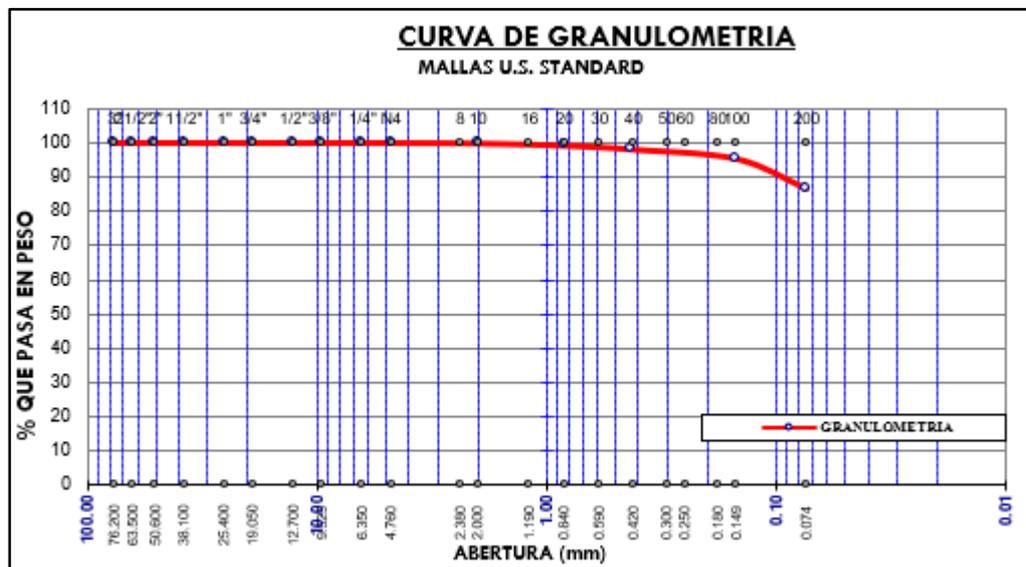
Granulometría de la muestra de suelo calicata C-2

| N° de Tamiz | Abertura (Mm) | Peso Retenido | % Rete. Parcial | % Rete. Acumulad. | % Pasante |
|-------------|---------------|---------------|-----------------|-------------------|-----------|
| N° 6 | 4.760 | | 0.00 | 0.00 | 100.00 |
| N° 10 | 2.000 | 0.48 | 0.15 | 0.15 | 99.85 |
| N° 16 | 1.190 | 1.06 | 0.33 | 0.48 | 99.52 |
| N° 20 | 0.840 | 1.04 | 0.32 | 0.80 | 99.20 |
| N° 30 | 0.590 | | 0.00 | 0.80 | 99.20 |
| N° 40 | 0.426 | 3.56 | 1.10 | 1.90 | 98.10 |
| N° 60 | 0.297 | 3.30 | 1.02 | 2.92 | 97.08 |
| N° 80 | 0.177 | 3.18 | 0.98 | 3.90 | 96.10 |
| N° 100 | 0.149 | 2.42 | 0.75 | 4.65 | 95.35 |
| N° 200 | 0.074 | 28.10 | 8.69 | 13.34 | 86.66 |
| >200 | | 280.20 | 86.66 | 100.00 | 0.00 |

Nota. Elaboración propia.

Figura 19

Gráfica de granulometría de la muestra de suelo C-2



Nota. Elaboración propia

Para la calicata C-2, se observa que el 86.66% de la muestra del material contienen partículas de un diámetro menor al del tamiz N°200 (0.075mm).

Tabla 15

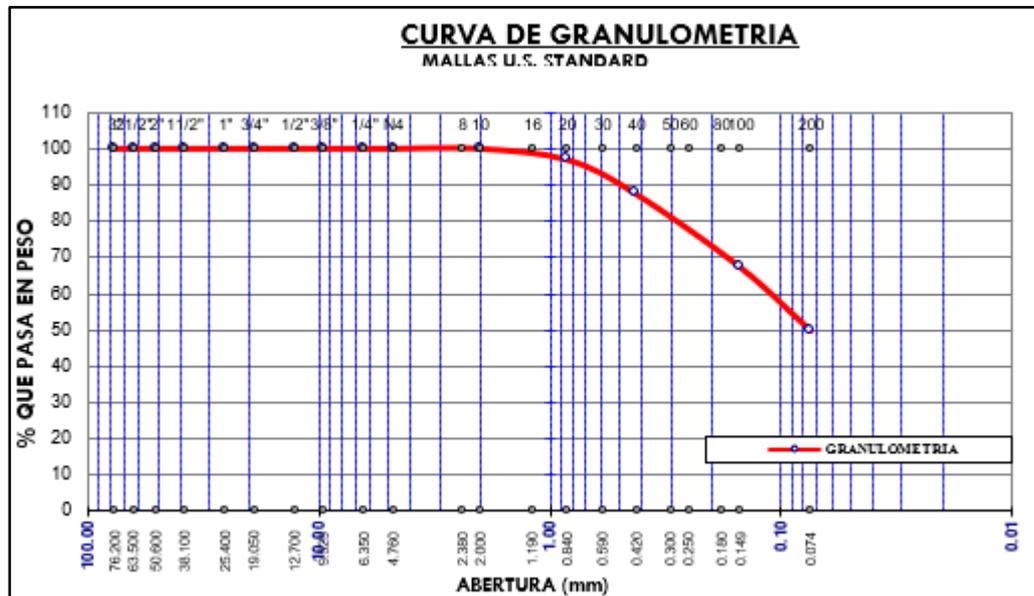
Granulometría de la ceniza de madera

| N° de Tamiz | Abertura (Mm) | Peso Retenido | % Rete. Parcial | % Rete. Acumulad. | % Pasante |
|-------------|---------------|---------------|-----------------|-------------------|-----------|
| N° 10 | 4.760 | | 0.00 | 0.00 | 100.00 |
| N° 16 | 1.190 | 1.62 | 0.45 | 0.45 | 99.55 |
| N° 20 | 0.840 | 9.12 | 2.55 | 3.01 | 96.99 |
| N° 30 | 0.590 | | 0.00 | 3.01 | 96.99 |
| N° 40 | 0.426 | 33.07 | 9.26 | 12.27 | 87.73 |
| N° 60 | 0.297 | 33.46 | 9.37 | 21.63 | 78.37 |
| N° 80 | 0.177 | 24.93 | 6.98 | 28.61 | 71.39 |
| N° 100 | 0.149 | 14.30 | 4.00 | 32.62 | 67.38 |
| N° 200 | 0.074 | 62.06 | 17.37 | 49.99 | 50.01 |
| >200 | | 178.62 | 50.01 | 100.00 | 0.00 |

Nota. Elaboración propia

Figura 20

Gráfica de granulometría de la ceniza de madera



Nota. Elaboración propia

Sin embargo, para la muestra de ceniza se observa que el 50.01% de la muestra de ceniza contienen partículas de un diámetro menor al del tamiz N°200 (0.075mm).

3.2.3. Límites de consistencia del material arcilloso.

En este análisis, se procedió a identificar los diferentes estados en los que la muestra de suelo podría hallarse, incluyendo el Límite Plástico (LP), Límite Líquido (LL), y la Plasticidad (IP), siguiendo la norma (ASTM D-4318, 2016).

Para determinar estos límites se desarrolló mediante el aparato de casagrande donde nos proporciona el límite líquido según la cantidad de agua requerida para un rango de golpes entre 15 y 35 aproximadamente, y para el límite plástico se realizó trozos elipsoidales a una consistencia plástica máxima.

a) **Muestra calicata C-1**, ver detalle (Anexo 4)

Tabla 16

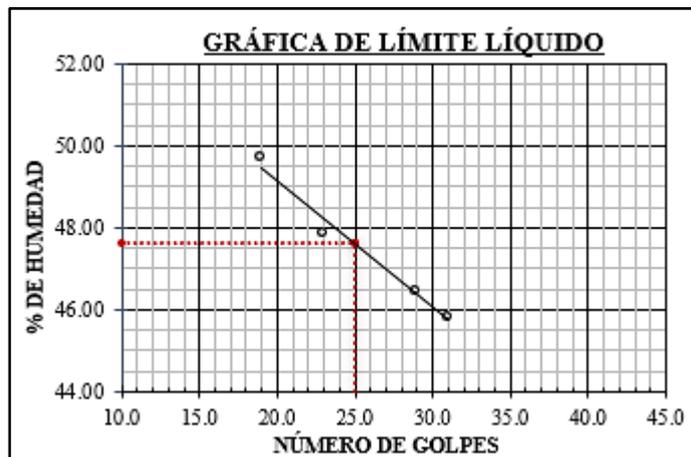
Límite líquido C-1, suelo natural

| # Tara | | B-08 | S-42 | S-03 | S-123 |
|----------------------|------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| Peso del envase | grs. | 14.03 | 18.13 | 12.95 | 17.83 |
| T. + Material Húmedo | grs. | 30.26 | 37.17 | 31.40 | 41.51 |
| T. + Material Seco | grs. | 25.16 | 31.13 | 25.43 | 33.65 |
| Cantidad de Agua | grs. | 5.10 | 6.04 | 5.97 | 7.86 |
| Suelo Seco | grs. | 11.13 | 13.00 | 12.48 | 15.82 |
| Humedad (%) | | 45.82 | 46.46 | 47.84 | 49.68 |
| Nº. de Golpes | | 31 | 29 | 23 | 19 |

Nota. Elaboración propia

Figura 21

Gráfica de límite líquido C-1, suelo natural



Nota. Elaboración propia

Reemplazando la ecuación e interpolando según la gráfica se tiene que:

$$\text{Límite líquido} = 47.62 \%$$

Tabla 17*Límite plástico C-1, suelo natural*

| # Tara | | S-41 | S-13 | S-115 |
|------------------------|------|--------------|--------------|--------------|
| Peso del envase | grs. | 18.06 | 15.59 | 16.66 |
| T. + Material Húmedo | grs. | 20.26 | 17.83 | 18.50 |
| T. + Material Seco | grs. | 19.86 | 17.39 | 18.17 |
| cantidad de Agua | grs. | 0.40 | 0.44 | 0.33 |
| Suelo Seco | grs. | 1.80 | 1.80 | 1.51 |
| Límite Plástico | | 22.22 | 24.44 | 21.85 |

Nota. Elaboración propia

$$\text{Límite plástico} = 22.84 \%$$

Finalmente, se halla el índice de plasticidad resultando:

$$\text{índice de plasticidad} = 24.78 \%$$

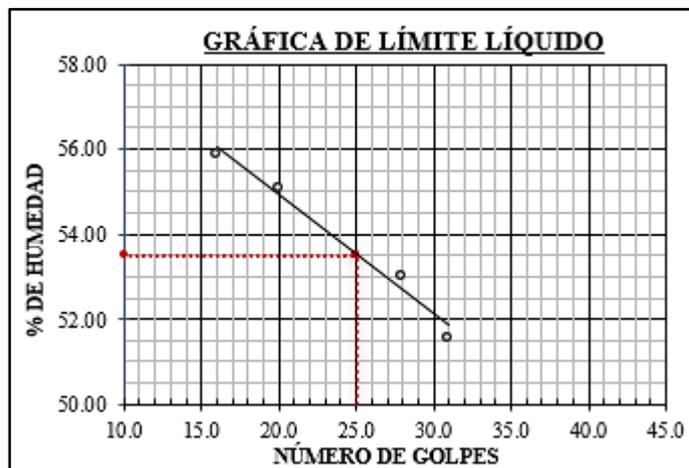
b) Muestra calicata C-2, ver detalle (Anexo 4)**Tabla 18***Limite liquido C-2, suelo natural*

| # Tara | | M-72 | S-05 | S-01 | Es-2 |
|----------------------|------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| Peso del envase | grs. | 10.57 | 12.96 | 9.97 | 21.63 |
| T. + Material Húmedo | grs. | 27.65 | 29.01 | 28.81 | 44.48 |
| T. + Material Seco | grs. | 21.84 | 23.45 | 22.12 | 36.29 |
| Cantidad de Agua | grs. | 5.81 | 5.56 | 6.69 | 8.19 |
| Suelo Seco | grs. | 11.27 | 10.49 | 12.15 | 14.66 |
| Humedad (%) | | 51.55 | 53.00 | 55.06 | 55.87 |
| Nº. de Golpes | | 31 | 28 | 20 | 16 |

Nota. Elaboración propia

Figura 22

Gráfica de límite líquido C-2, suelo natural



Nota. Elaboración propia

Reemplazando la ecuación e interpolando según la gráfica se tiene que:

$$\text{Límite líquido} = 53.50 \%$$

Tabla 19

Límite plástico C-2, suelo natural

| # Tara | | S-16 | S-19 | S-58 |
|------------------------|------|--------------|--------------|--------------|
| Peso del envase | grs. | 18.42 | 17.09 | 17.62 |
| T. + Material Húmedo | grs. | 20.25 | 19.32 | 19.45 |
| T. + Material Seco | grs. | 19.93 | 18.89 | 19.09 |
| Cantidad de Agua | grs. | 0.32 | 0.43 | 0.36 |
| Suelo Seco | grs. | 1.51 | 1.80 | 1.47 |
| Límite Plástico | | 21.19 | 23.89 | 24.49 |

Nota. Elaboración propia

$$\text{Límite plástico} = 23.19 \%$$

Finalmente, se halla el índice de plasticidad resultando:

$$\text{índice de plasticidad} = 30.31 \%$$

3.2.4. Clasificación de suelo de la muestra natural.

Para clasificar la muestra de suelo se realizó mediante la guía de la metodología AASHTO y SUCS.

a) Muestra de suelo calicata C-1, ver detalle (Anexo 3 y Anexo 4).

Para poder clasificar según el método AASHTO, se siguió el procedimiento de (ASTM D-3282, 1993), haciendo uso de la figura 23.

Figura 23

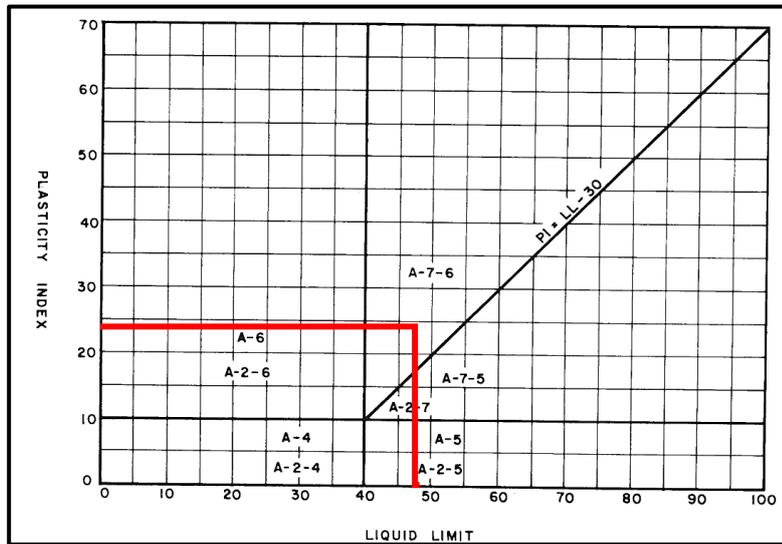
Clasificación de Suelo AASHTO muestra C-1, suelo natural

| Clasificación General | | Suelos Granulares ($\leq 35\%$ pasa por tamiz N°200) | | | | | | Suelos Granulares ($>35\%$ pasa por tamiz N°200) | | | | | | | | | | | | |
|-------------------------------|-------------|---|--------|------------|--------------------------------------|--------|-----------------------------------|---|----------------|--------|-------------------|----------|----------|---|--|--|--|--|--|--|
| | | A-1 | | A-3 | A-2 | | | A-4 | A-5 | A-6 | A-7 | | | | | | | | | |
| Sub - Grupo | | A-1a | A-1b | | A-2-4 | A-2-5 | A-2-6 * | A-2-7 * | | | | A-7-5 ** | A-7-6 ** | | | | | | | |
| % que pasa) | Tamiz N°10 | 50 max | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Tamiz N°40 | 30 max | 50 max | 51 min | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Tamiz N°200 | 15 max | 25 max | 10 max | 35 max | | | | 36 min | | | | | | | | | | | |
| Del Tamiz N°200 | LL | | | | 40 max | 41 min | 40 max | 41 min | 40 max | 41 min | 40 max | 41 min | 41 min | | | | | | | |
| | IP | 6 max | | NP | 10 max | 10 max | 11 min | 11 min | 10 max | 10 max | 11 min | 11 min | 11 min | | | | | | | |
| Tipo de material más común | | Fragmentos de Rocas, Gravas y Arenas | | Arena Fina | Gravas y arenas limosas o Arcillosas | | | | Suelos Limosos | | Suelos Arcillosos | | | | | | | | | |
| Calificación de la Subrasante | | Excelente a Buena | | | | | | Regular a pobre | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | ** Si: $IP \leq (LL-30)$ es A-7-5 | | | | | | | Si el Suelo es NP $\gg IG=0$; Si $IG<0 \gg IG=0$ | | | | | | |
| | | | | | | | ** Si: $IP > (LL-30)$ es A-7-6 | | | | | | | | | | | | | |

Nota. El gráfico muestra el procedimiento de clasificación de la muestra C-1 según el sistema AASHTO. Tomado del (MTC, 2016).

Figura 24

Carta de plasticidad – AASHTO muestra C-1, suelo natural



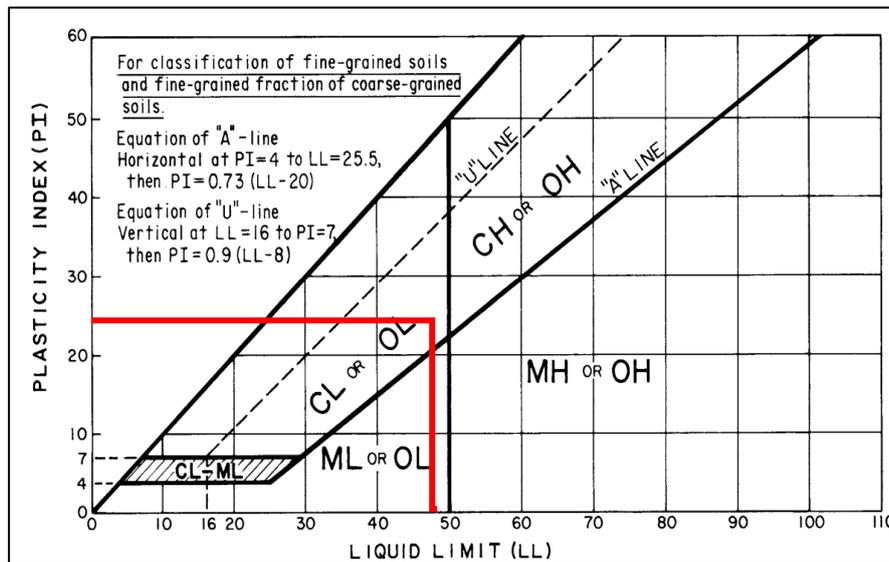
Nota. El gráfico hace referencia la relación del índice de plasticidad Vs el límite líquido, donde se identificó el tipo de suelo. Tomado de “The Preparation Of Subgrades” (O. J. Porter, 1938, p. 327)

Por lo indicado y de acuerdo a la interpretación de los gráficos se tiene que la muestra C-1, concierne al tipo de suelo: A-7-6 (15).

Para la metodología de clasificación SUCS, se siguió el procedimiento de (ASTM-D-2487, 2011), para ello según los resultados obtenidos del LL y la plasticidad, se representa de la siguiente manera:

Figura 25

Carta de plasticidad, muestra C-1, suelo natural



Nota. Representación gráfica del límite líquido vs el índice de plasticidad, las regiones separadas por líneas representan el tipo de suelo. Tomado de (ASTM D-2487, 2011, p. 13).

Figura 26

Sistema de clasificación SUCS muestra C-1, suelo natural

| Criterios para la asignación de grupo y nombres de grupo con el uso de pruebas de laboratorio ^a | | | | Clasificación de suelos | | |
|--|---|--|--|--------------------------------------|---|----------------------------------|
| | | | | Símbolo | Nombre de Grupo ^b | |
| Suelos de partículas gruesas Más del 50 % retenido en la malla N°200. | Gravas Más del 50% de la fracción gruesa retenida en el tamiz N°4 | Gravas Limpias | $C_u \geq 4$ y $1 \leq C_c \leq 3$ ^e | GW | Grava bien graduada ^f | |
| | | Menos del 5% de finos ^c | $C_u < 4$ y/o $1 > C_c > 3$ ^e | GP | Grava mal graduada ^f | |
| | Arenas El 50% de la fracción gruesa pasa el tamiz N°4 | Gravas con finos | Más del 12% de finos ^c | Los finos se clasifican como ML o MH | GM | Grava limosa ^{g,h} |
| | | Menos del 5% de finos ^d | Más del 12% de finos ^c | Los finos se clasifican como CL o CH | GC | Grava arcillosa ^{g,h} |
| Suelos de partículas finas El 50 % o más pasa la malla N°200. | Limos y Arcillas Límite Líquido menor que 50 | Arenas Limpias | $C_u \geq 6$ y $1 \leq C_c \leq 3$ ^e | SW | Arena bien graduada ⁱ | |
| | | Menos del 5% de finos ^d | $C_u < 6$ y/o $1 > C_c > 3$ ^e | SP | Arena mal graduada ⁱ | |
| | Limos y Arcillas Límite Líquido 50 o más | Arenas con finos | Más del 12% de finos ^d | Los finos se clasifican como ML o MH | SM | Arena Limosa ^{g,h,j} |
| | | Menos del 5% de finos ^d | Más del 12% de finos ^d | Los finos se clasifican como CL o CH | SC | Arena Arcillosa ^{g,h,j} |
| Suelos altamente orgánicos | Limos y Arcillas Límite Líquido menor que 50 | Inorgánicos | IP > 7 y se grafica en o arriba de la línea "A" IP < 4 y se grafica en o arriba de la línea "A" | CL | Arcilla de baja plasticidad (ligera) ^{k,l,m} | |
| | | Orgánicos | $\frac{\text{Límite Líquido secado en horno}}{\text{Límite Líquido no secado}} < 0.75$ | OL | Arcilla Orgánica ^{k,l,m,n} Limo Orgánico ^{k,l,m,o} | |
| | Limos y Arcillas Límite Líquido 50 o más | Inorgánicos | IP se grafica en o arriba de la línea "A" IP se grafica debajo de la línea "A" | CH | Arcilla de alta plasticidad ^{k,l,m} | |
| | | Orgánicos | $\frac{\text{Límite Líquido secado en horno}}{\text{Límite Líquido no secado}} < 0.75$ | MH | Limo Orgánico ^{k,l,m} Arcilla Orgánica ^{k,l,m,p} Limo Orgánico ^{k,l,m,q} | |
| Suelos altamente orgánicos | | Principalmente materia inorgánica, de color oscuro y con olor orgánico | | PT | Turba | |

Nota. El gráfico muestra el procedimiento de clasificación del suelo mediante la clasificación SUCS. Tomado de (Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2016)

Por lo que según la clasificación SUCS el material de la muestra C-1 es de tipo: (CL) Arcilla de baja plasticidad.

b) Muestra de suelo calicata C-2, ver detalle (Anexo 3 y Anexo 4)

Para clasificar según el método AASHTO, se siguió el procedimiento de (ASTM D-3282, 1993), haciendo uso de la siguiente imagen:

Figura 27

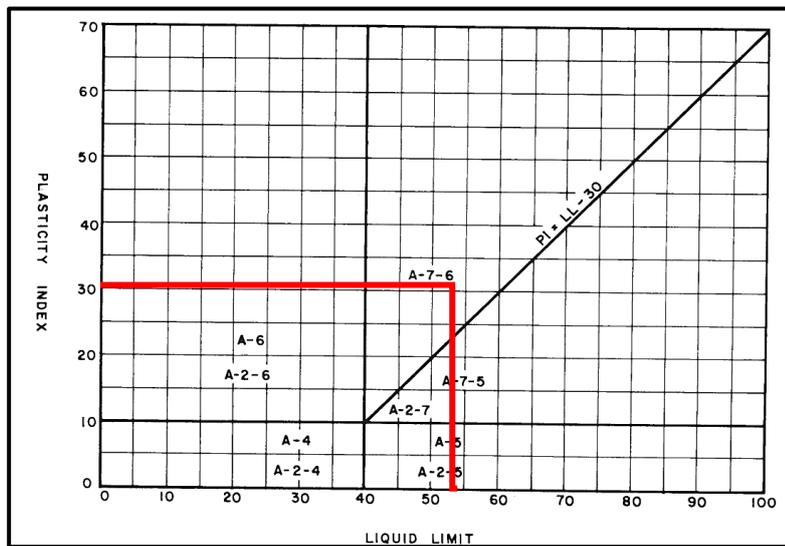
Clasificación de suelo AASHTO muestra C-2, suelo natural

| Clasificación General | | Suelos Granulares ($\leq 35\%$ pasa por tamiz N°200) | | | | | | Suelos Granulares ($>35\%$ pasa por tamiz N°200) | | | | | |
|-------------------------------|-------------|---|--------|------------|--------------------------------------|--------|---------|---|--------|-------------------|--------|----------|----------|
| | | A-1 | | A-3 | A-2 | | | A-4 | A-5 | A-6 | A-7 | | |
| Sub - Grupo | | A-1a | A-1b | | A-2-4 | A-2-5 | A-2-6 * | A-2-7 * | | | | A-7-5 ** | A-7-6 ** |
| (% que pasa) | Tamiz N°10 | 50 max | | | | | | | | | | | |
| | Tamiz N°40 | 30 max | 50 max | 51 min | | | | | | | | | |
| | Tamiz N°200 | 15 max | 25 max | 10 max | 35 max | | | 36 min | | | | | |
| Del Tamiz PASADO | LL | | | | 40 max | 41 min | 40 max | 41 min | 40 max | 41 min | 40 max | 41 min | 41 min |
| | IP | 6 max | | NP | 10 max | 10 max | 11 min | 11 min | 10 max | 10 max | 11 min | 11 min | 11 min |
| Tipo de material más común | | Fragmentos de Rocas, Gravas y Arenas | | Arena Fina | Gravas y arenas limosas o Arcillosas | | | Suelos Limosos | | Suelos Arcillosos | | | |
| Calificación de la Subrasante | | Excelente a Buena | | | | | | Regular a pobre | | | | | |
| | | | | | ** Si: $IP \leq (LL-30)$ es A-7-5 | | | Si el Suelo es NP $\gg IG=0$; Si $IG<0 \gg IG=0$ | | | | | |
| | | | | | ** Si: $IP > (LL-30)$ es A-7-6 | | | | | | | | |

Nota. El gráfico detalla el procedimiento de clasificación de la muestra C-2 según el sistema AASHTO. Tomado de (MTC, 2016)

Figura 28

Carta de plasticidad – AASHTO, muestra C-2, suelo natural



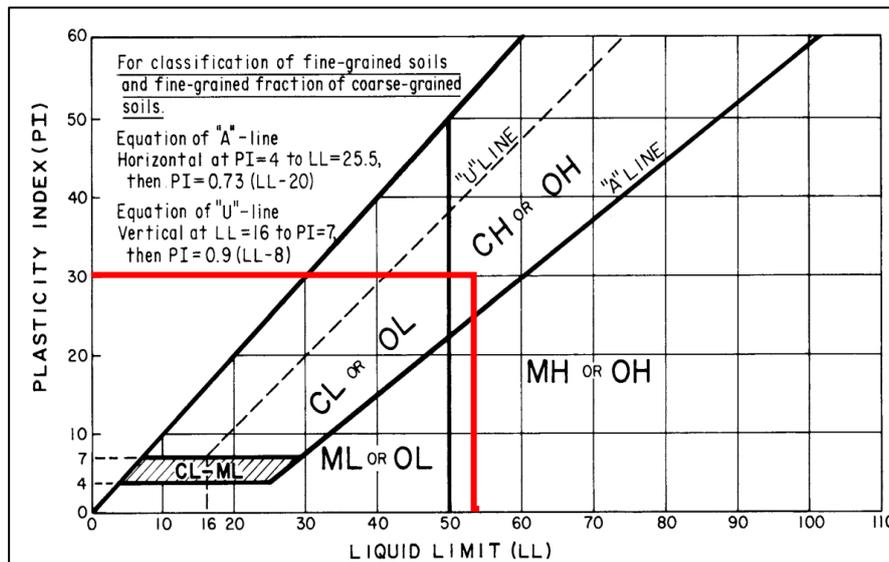
Nota. En el gráfico se observa el índice de plasticidad Vs el límite líquido, donde se identificó el tipo de suelo. Tomado de “The Preparation Of Subgrades” (O. J. Porter, 1938, p. 327)

Por lo indicado y de acuerdo a la interpretación de los gráficos se tiene que la muestra C-2, concierne al tipo de suelo: A-7-6 (19).

Para la metodología de clasificación SUCS, se siguió el procedimiento de la normatividad (ASTM-D-2487, 2011), para ello según los resultados obtenidos de LL y la plasticidad, se representa de la siguiente manera:

Figura 29

Carta de plasticidad muestra C-2, suelo natural



Nota. Representación gráfica del límite líquido vs índice de plasticidad, las regiones separadas por líneas representan el tipo de suelo. Tomado de (ASTM D-2487, 2011, p. 13).

Figura 30

Sistema de clasificación SUCS muestra C-2, suelo natural

| Criterios para la asignación de grupo y nombres de grupo con el uso de pruebas de laboratorio ^a | | | | Clasificación de suelos | |
|--|--|---|--|-------------------------|---|
| | | | | Símbolo | Nombre de Grupo ^b |
| Suelos de partículas gruesas Más del 50 % retenido en la malla N°200. | Gravas Más del 50% de la fracción gruesa retenida en el tamiz N°4 | Gravas Limpias Menos del 5% de finos ^c | $C_u \geq 4$ y $1 \leq C_c \leq 3$ ^e | GW | Grava bien graduada ^f |
| | | Gravas con finos Más del 12% de finos ^c | $C_u < 4$ y/o $1 > C_c > 3$ ^e Los finos se clasifican como ML o MH | GP | Grava mal graduada ^f |
| | Arenas El 50% de la fracción gruesa pasa el tamiz N°4 | Arenas Limpias Menos del 5% de finos ^d | $C_u \geq 6$ y $1 \leq C_c \leq 3$ ^e | SW | Arena bien graduada ^f |
| | | Arenas con finos Más del 12% de finos ^d | $C_u < 6$ y/o $1 > C_c > 3$ ^e Los finos se clasifican como ML o MH | SM | Arena Limosa ^{g,h,i} |
| Suelos de partículas finas El 50 % o más pasa la malla N°200. | Limos y Arcillas Límite Líquido menor que 50 | Inorgánicos IP > 7 y se grafica en o arriba de la línea ^j "A" | | CL | Arcilla de baja plasticidad (ligera) ^{k,l,m} |
| | | Orgánicos $\frac{\text{Límite Líquido secado en horno}}{\text{Límite Líquido no secado}} < 0.75$ | | OL | Arcilla Orgánica ^{k,l,m,n} Limo Orgánico ^{k,l,m,o} |
| | | Inorgánicos IP se grafica en o arriba de la línea "A" | | CH | Arcilla de alta plasticidad ^{k,l,m} |
| | Limos y Arcillas Límite Líquido 50 o más | Orgánicos IP se grafica debajo de la línea "A" | | MH | Limo Orgánico ^{k,l,m} |
| | | Orgánicos $\frac{\text{Límite Líquido secado en horno}}{\text{Límite Líquido no secado}} < 0.75$ | | OH | Arcilla Orgánica ^{k,l,m,p} Limo Orgánico ^{k,l,m,q} |
| | | Suelos altamente orgánicos | Principalmente materia inorgánica, de color oscuro y con olor orgánico | PT | Turba |

Nota. El gráfico muestra el procedimiento de clasificación del suelo mediante la clasificación SUCS. Tomado de (Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2016)

Por lo que según la clasificación SUCS el material de la muestra C-2 es de tipo: (CH) considerado una arcilla de alta plasticidad.

3.2.5. Límites de consistencia de las muestras combinadas con ceniza.

Mediante el procedimiento de esta prueba se llegó a establecer los diferentes estados al cual la muestra de suelo combinada con proporciones de ceniza, en 5%, 12%, 18% y 25% puedan encontrarse, siendo ellos el Límite plástico (LP), Límite líquido (LL) y la plasticidad (IP), siguiendo la norma (ASTM D 4318, 2016).

a) Muestra de suelo C-1 y C-2, con mezcla de ceniza 5%, ver (Anexo 5).

Tabla 20

Limite liquido C-1 con 5% de ceniza

| # Tara | S-08 | A-8 | S-62 | S-47 |
|----------------|-------|-------|-------|-------|
| % de Humedad | 42.92 | 43.79 | 45.36 | 45.96 |
| Nro. De Golpes | 31 | 28 | 22 | 18 |

Nota. Elaboración propia

Figura 31

Gráfica de limite liquido C-1 con 5% de ceniza



Nota. Elaboración propia



Reemplazando la ecuación e interpolando según la gráfica se tiene que:

$$\text{Límite líquido} = 44.45 \%$$

Tabla 21

Límite plástico C-1 con 5% de ceniza

| # Tara | | S-16 | S-19 | S-58 |
|------------------------|------|--------------|--------------|--------------|
| Peso del envase | grs. | 18.42 | 17.09 | 17.62 |
| T. + Material Húmedo | grs. | 20.26 | 19.33 | 19.45 |
| T. + Material Seco | grs. | 19.93 | 18.89 | 19.09 |
| Cantidad de Agua | grs. | 0.33 | 0.44 | 0.36 |
| Suelo Seco | grs. | 1.51 | 1.80 | 1.47 |
| Límite Plástico | | 21.85 | 24.44 | 24.49 |

Nota. Elaboración propia

$$\text{Límite plástico} = 23.60 \%$$

Finalmente, se halla el índice de plasticidad resultando:

$$\text{índice de plasticidad} = 20.85 \%$$

Tabla 22

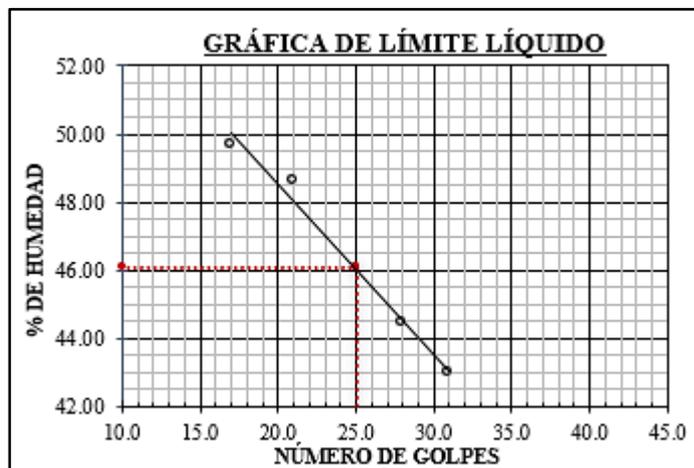
Límite líquido C-2 con 5% de ceniza

| # Tara | T-01 | S-50 | S-54 | E-04 |
|----------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| % de Humedad | 42.98 | 44.44 | 48.61 | 49.69 |
| Nro. De Golpes | 31 | 28 | 21 | 17 |

Nota. Elaboración propia de la tabla.

Figura 32

Gráfica del límite líquido C-2 con 5% de ceniza



Nota. Elaboración propia

Reemplazando la ecuación e interpolando según la gráfica se tiene que:

$$\text{Límite líquido} = 46.08 \%$$

Tabla 23

Límite plástico C-2 con 5% de ceniza

| # Tara | | S-41 | S-42 | A-02 |
|------------------------|------|--------------|--------------|--------------|
| Peso del recipiente | grs. | 18.06 | 18.13 | 18.38 |
| T. + Material Húmedo | grs. | 21.81 | 21.49 | 20.27 |
| T. + Material Seco | grs. | 21.15 | 20.86 | 19.92 |
| cantidad de Agua | grs. | 0.66 | 0.63 | 0.35 |
| Suelo Seco | grs. | 3.09 | 2.73 | 1.54 |
| Límite Plástico | | 21.36 | 23.08 | 22.73 |

Nota. Elaboración propia

$$\text{Límite plástico} = 22.39 \%$$

Finalmente, se halla el índice de plasticidad resultando:

$$\text{índice de plasticidad} = 23.69 \%$$

- b) **Muestra de suelo C-1 y C-2, con mezcla de ceniza 12%**, ver detalle en el
(Anexo 5).

Tabla 24

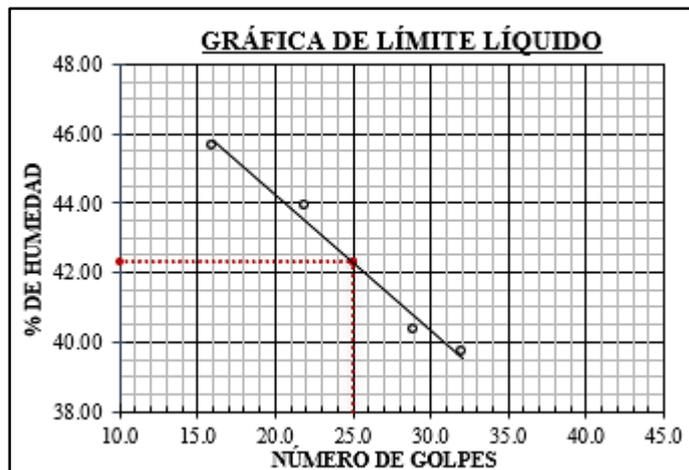
Límite líquido C-1 con 12% de ceniza

| # Tara | S-01 | E-02 | S-05 | E-04 |
|----------------|-------|-------|-------|-------|
| % de Humedad | 39.71 | 40.35 | 43.88 | 45.65 |
| Nro. De Golpes | 32 | 29 | 22 | 16 |

Nota. Elaboración propia

Figura 33

Gráfica del límite líquido C-1 con 12% de ceniza



Nota. Elaboración propia

Reemplazando la ecuación e interpolando según la gráfica se tiene que:

$$\text{Límite líquido} = 42.30 \%$$



Tabla 25

Límite plástico C-1 con 12% de ceniza

| # Tara | | A-02 | S-41 | S-13 |
|------------------------|------|--------------|--------------|--------------|
| Peso del envase | grs. | 18.38 | 18.06 | 15.59 |
| T. + Material Húmedo | grs. | 20.28 | 20.85 | 19.78 |
| T. + Material Seco | grs. | 19.92 | 20.32 | 18.98 |
| Cantidad de Agua | grs. | 0.36 | 0.53 | 0.80 |
| Suelo Seco | grs. | 1.54 | 2.26 | 3.39 |
| Límite Plástico | | 23.38 | 23.45 | 23.60 |

Nota. Elaboración propia

$$\text{Límite plástico} = 23.48 \%$$

Finalmente, se halla el índice de plasticidad resultando:

$$\text{índice de plasticidad} = 18.82 \%$$

Tabla 26

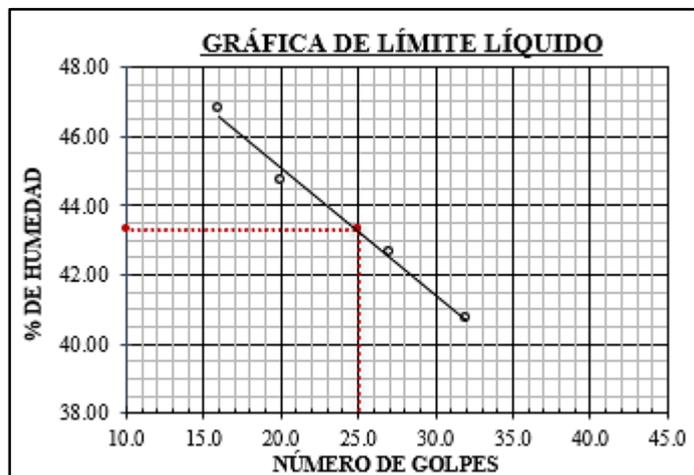
Límite líquido C-2 con 12% de ceniza

| # Tara | S-123 | Es-2 | S-08 | S-115 |
|----------------|--------------|-------------|-------------|--------------|
| % de Humedad | 40.70 | 42.63 | 44.70 | 46.80 |
| Nro. De Golpes | 32 | 27 | 20 | 16 |

Nota. Elaboración propia

Figura 34

Gráfica del límite líquido C-2 con 12% de ceniza



Nota. Elaboración propia

Reemplazando la ecuación e interpolando según la gráfica se tiene que:

$$\text{Límite líquido} = 43.30 \%$$

Tabla 27

Límite plástico C-2 con 12% de ceniza

| # Tara | | A-2 | S-18 | S-16 |
|------------------------|------|--------------|--------------|--------------|
| Peso del envase | grs. | 19.51 | 16.25 | 18.42 |
| T. + Material Húmedo | grs. | 34.54 | 32.17 | 20.26 |
| T. + Material Seco | grs. | 31.71 | 29.34 | 19.93 |
| Cantidad de Agua | grs. | 2.83 | 2.83 | 0.33 |
| Suelo Seco | grs. | 12.20 | 13.09 | 1.51 |
| Límite Plástico | | 23.20 | 21.62 | 21.85 |

Nota. Elaboración propia

$$\text{Límite plástico} = 22.22 \%$$

Finalmente, se halla el índice de plasticidad resultando:

$$\text{índice de plasticidad} = 21.08 \%$$

- c) **Muestra de suelo C-1 y C-2, con mezcla de ceniza 18%**, ver detalle en el
(Anexo 5).

Tabla 28

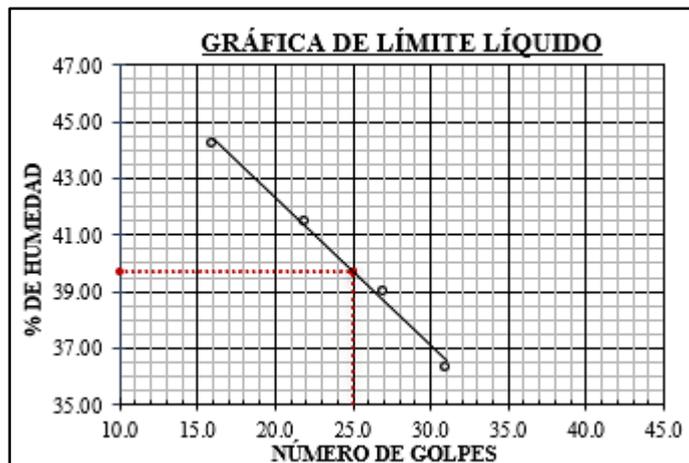
Límite líquido C-1 con 18% de ceniza

| # Tara | S-03 | S-123 | Es-2 | S-115 |
|----------------|-------|-------|-------|-------|
| % de Humedad | 36.32 | 38.95 | 41.47 | 44.21 |
| Nro. De Golpes | 31 | 27 | 22 | 16 |

Nota. Elaboración propia

Figura 35

Gráfica del límite líquido C-1 con 18% de ceniza



Nota. Elaboración propia

Reemplazando la ecuación e interpolando según la gráfica se tiene que:

$$\text{Límite líquido} = 39.70 \%$$



Tabla 29

Límite plástico C-1 con 18% de ceniza

| # Tara | | S-42 | B-08 | M-72 |
|------------------------|------|--------------|--------------|--------------|
| Peso del envase | grs. | 18.13 | 14.03 | 10.57 |
| T. + Material Húmedo | grs. | 21.57 | 18.48 | 16.50 |
| T. + Material Seco | grs. | 20.95 | 17.66 | 15.40 |
| Cantidad de Agua | grs. | 0.62 | 0.82 | 1.10 |
| Suelo Seco | grs. | 2.82 | 3.63 | 4.83 |
| Límite Plástico | | 21.99 | 22.59 | 22.77 |

Nota. Elaboración propia

$$\text{Límite plástico} = 22.45 \%$$

Finalmente, se halla el índice de plasticidad resultando:

$$\text{índice de plasticidad} = 17.25 \%$$

Tabla 30

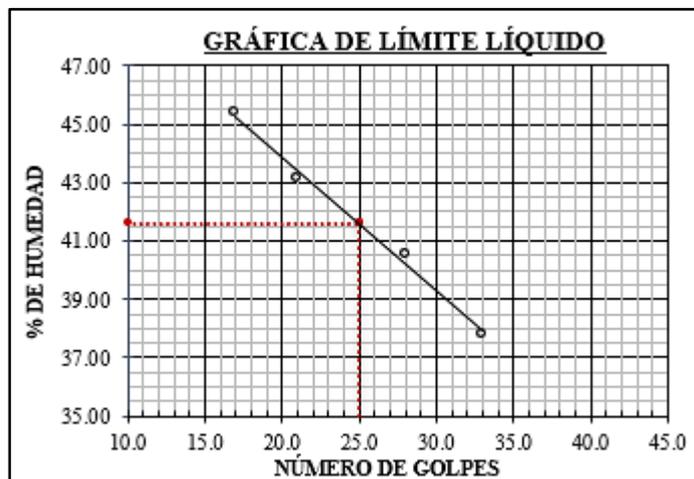
Límite líquido C-2 con 18% de ceniza

| # Tara | A-8 | E-02 | S-47 | S-62 |
|----------------|------------|-------------|-------------|-------------|
| % de Humedad | 37.77 | 40.49 | 43.15 | 45.36 |
| Nro. De Golpes | 33 | 28 | 21 | 17 |

Nota. Elaboración propia de la tabla

Figura 36

Grafica del límite líquido C-2 con 18% de ceniza



Nota. Elaboración propia

Reemplazando la ecuación e interpolando según la gráfica se tiene que:

$$\text{Límite líquido} = 41.60 \%$$

Tabla 31

Límite plástico C-2 con 18% de ceniza

| # Tara | | S-19 | M-72 | S-60 |
|------------------------|------|--------------|--------------|--------------|
| Peso del envase | grs. | 17.09 | 10.57 | 16.58 |
| T. + Material Húmedo | grs. | 19.27 | 16.41 | 28.73 |
| T. + Material Seco | grs. | 18.89 | 15.38 | 26.49 |
| Cantidad de Agua | grs. | 0.38 | 1.03 | 2.24 |
| Suelo Seco | grs. | 1.80 | 4.81 | 9.91 |
| Límite Plástico | | 21.11 | 21.41 | 22.60 |

Nota. Elaboración propia

$$\text{Límite plástico} = 21.71 \%$$

Finalmente, se halla el índice de plasticidad resultando:

$$\text{índice de plasticidad} = 19.89 \%$$

d) Muestra de suelo C-1 y C-2, con mezcla de ceniza 25%, ver detalle en el
(Anexo 5).

Tabla 32

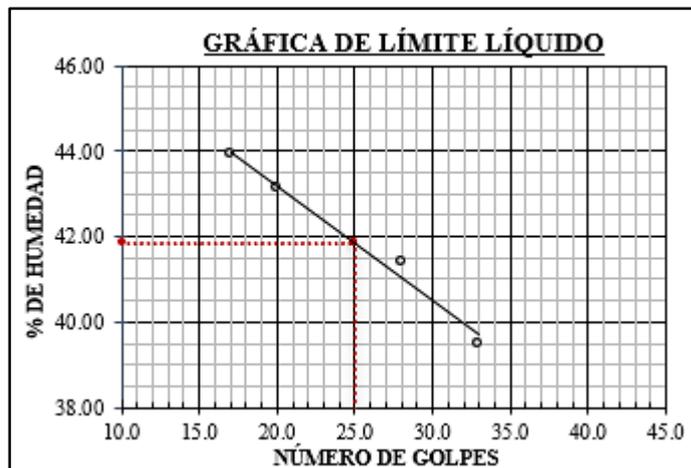
Límite líquido C-1 con 25% de ceniza

| # Tara | S-45 | T-01 | S-50 | S-54 |
|----------------|-------|-------|-------|-------|
| % de Humedad | 39.47 | 41.41 | 43.10 | 43.91 |
| Nro. De Golpes | 33 | 28 | 20 | 17 |

Nota. Elaboración propia

Figura 37

Gráfica del límite líquido C-1 con 25% de ceniza



Nota. Elaboración propia

Reemplazando la ecuación e interpolando según la gráfica se tiene que:

$$\text{Límite líquido} = 41.86 \%$$



Tabla 33

Límite plástico C-1 con 25% de ceniza

| # Tara | | S-60 | A-2 | S-18 |
|------------------------|------|--------------|--------------|--------------|
| Peso del envase | grs. | 16.58 | 19.51 | 16.25 |
| T. + Material Húmedo | grs. | 31.59 | 34.68 | 32.36 |
| T. + Material Seco | grs. | 28.51 | 31.71 | 29.23 |
| Cantidad de Agua | grs. | 2.65 | 2.97 | 3.13 |
| Suelo Seco | grs. | 11.93 | 12.20 | 12.98 |
| Límite Plástico | | 25.82 | 24.34 | 24.11 |

Nota. Elaboración propia

$$\text{Límite plástico} = 24.76 \%$$

Finalmente, se halla el índice de plasticidad resultando:

$$\text{índice de plasticidad} = 17.10 \%$$

Tabla 34

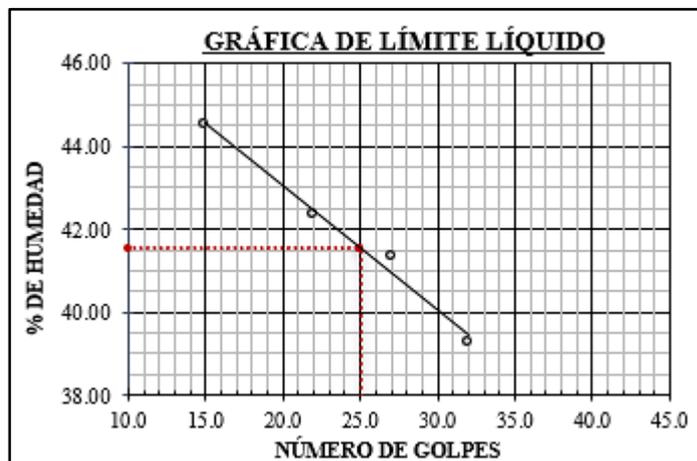
Límite líquido C-2 con 25% de ceniza

| # Tara | S-01 | S-03 | S-05 | S-45 |
|----------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| % de Humedad | 39.28 | 41.31 | 42.33 | 44.52 |
| Nro. De Golpes | 32 | 27 | 22 | 15 |

Nota. Elaboración propia

Figura 38

Gráfica del límite líquido C-2 con 25% de ceniza



Nota. Elaboración propia

Reemplazando la ecuación e interpolando según la gráfica se tiene que:

$$\text{Límite líquido} = 41.55 \%$$

Tabla 35

Límite plástico C-2 con 25% de ceniza

| # Tara | | S-13 | S-58 | B-08 |
|------------------------|------|--------------|--------------|--------------|
| Peso del envase | grs. | 15.59 | 17.62 | 14.03 |
| T. + Material Húmedo | grs. | 23.34 | 25.45 | 18.93 |
| T. + Material Seco | grs. | 21.85 | 24.09 | 18.05 |
| Cantidad de Agua | grs. | 1.49 | 1.36 | 0.88 |
| Suelo Seco | grs. | 6.26 | 6.47 | 4.02 |
| Límite Plástico | | 23.80 | 21.02 | 21.89 |

Nota. Elaboración propia

$$\text{Límite plástico} = 22.24 \%$$

Finalmente, se halla el índice de plasticidad resultando:

$$\text{índice de plasticidad} = 19.31 \%$$

3.2.6. Prueba de compactación – Proctor Modificado

Para esta Prueba de Proctor modificado se consideró en cuenta la normatividad (ASTM D1557-07, 2007), en ello se calculó la humedad óptimo y la densidad seca máxima. Durante todo el proceso de las pruebas se utilizó un solo molde de dimensiones específicas, ver tabla 36.

Tabla 36

Dimensiones del molde de compactación

| MOLDE N.º M-2 | |
|-----------------------|--------------------------|
| Nº de capas | 5 |
| Nº de golpes por capa | 25 |
| Diámetro | 10.12 cm |
| Altura | 11.63 cm |
| Volumen | 935.47 cm ³ . |

Nota. Elaboración propia

a) **Muestra de suelo C-1 y C-2, suelo natural** ver detalle (Anexo 6 y Anexo 7).

Tabla 37

Resultado proctor modificado C-1, suelo natural

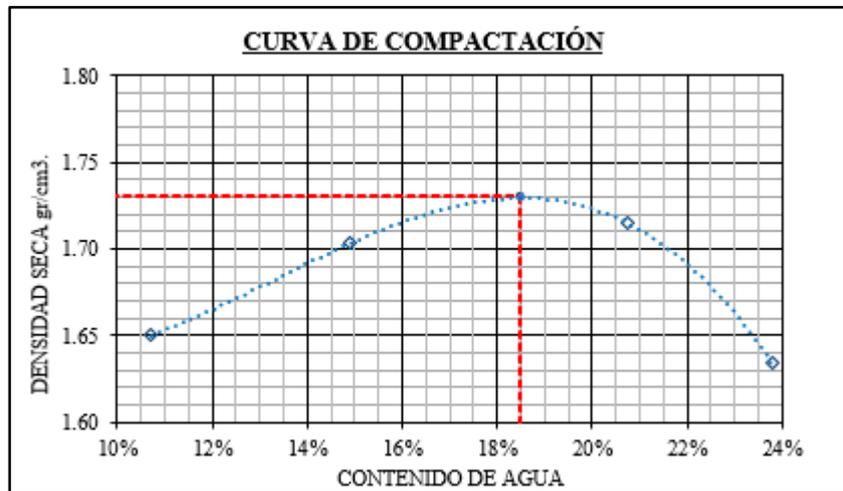
| | N.º de Ensayos | E-1 | E-2 | E-3 | E-4 |
|-------------------|----------------------|-------|-------|-------|-------|
| Contenido de agua | % | 23.80 | 20.73 | 14.92 | 10.72 |
| Densidad seca | grs/cms ³ | 1.63 | 1.72 | 1.70 | 1.65 |

Nota. Elaboración propia

De los datos hallados se grafica en un plano cartesiano la relación entre el contenido de agua vs la densidad seca:

Figura 39

Gráfica de compactación C-1, 100% suelo



Nota. Elaboración propia

Según la ecuación de la gráfica e interpolando se determina que:

Contenido de humedad óptima = 18.50 %

Máxima densidad seca = 1.73 $\frac{gr}{cm^3}$

Tabla 38

Resultado proctor modificado C-2, suelo natural

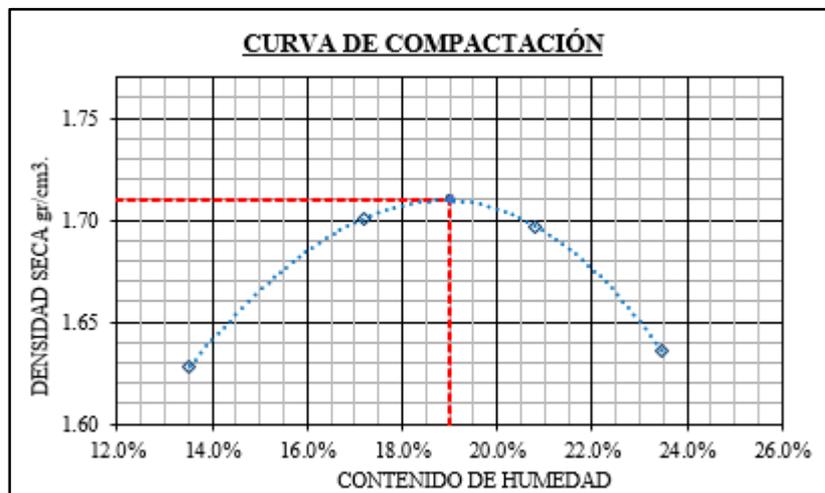
| N.º de Ensayos | | E-1 | E-2 | E-3 | E-4 |
|-------------------|----------|-------|-------|-------|-------|
| Contenido de agua | % | 23.47 | 20.81 | 17.20 | 13.52 |
| Densidad seca | grs/cms3 | 1.64 | 1.70 | 1.70 | 1.63 |

Nota. Elaboración propia

De los datos hallados se grafica en un plano cartesiano la relación entre el contenido de agua vs la densidad seca:

Figura 40

Gráfica de compactación C-2, 100% natural



Nota. Elaboración propia

De la ecuación e interpolando según la gráfica se determina que:

Contenido de humedad óptima = 19.00 %

Máxima densidad seca = 1.71 $\frac{gr}{cm^3}$

- b) **Muestra de suelo C-1 y C-2, con mezcla de ceniza 5%, ver detalle (Anexo 6 y Anexo 7).**

Tabla 39

Resultado proctor modificado C-1 con 5% de ceniza

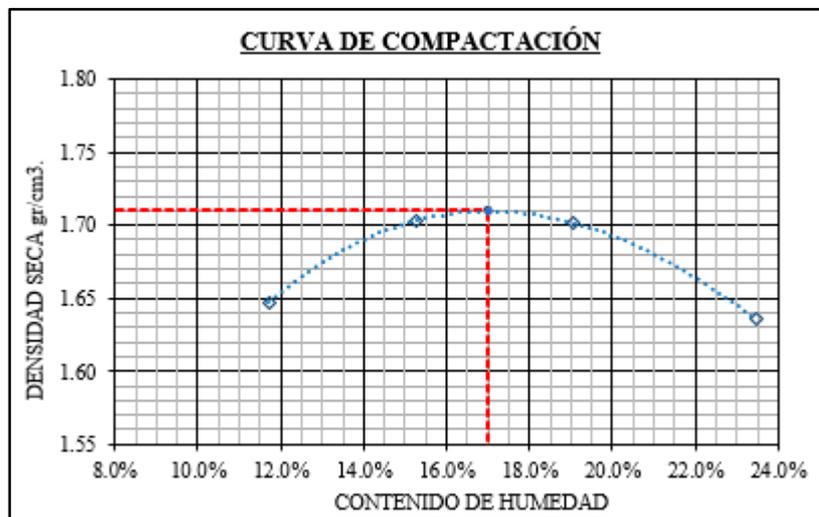
| | N.º de Ensayos | E-1 | E-2 | E-3 | E-4 |
|-------------------|-----------------------|-------|-------|-------|-------|
| Contenido de agua | % | 23.47 | 15.25 | 11.71 | 19.03 |
| Densidad seca | grs/cms3 | 1.64 | 1.70 | 1.65 | 1.70 |

Nota. Elaboración propia

De los datos hallados se grafica en un plano cartesiano entre el contenido de agua vs la densidad seca:

Figura 41

Gráfica de compactación C-1 con 5% de ceniza



Nota. Elaboración propia

De la ecuación e interpolando según la gráfica se determina que:

Contenido de humedad óptima = 17.00 %

Máxima densidad seca = 1.71 $\frac{gr}{cm^3}$

Tabla 40

Resultado proctor modificado C-2 con 5% de ceniza

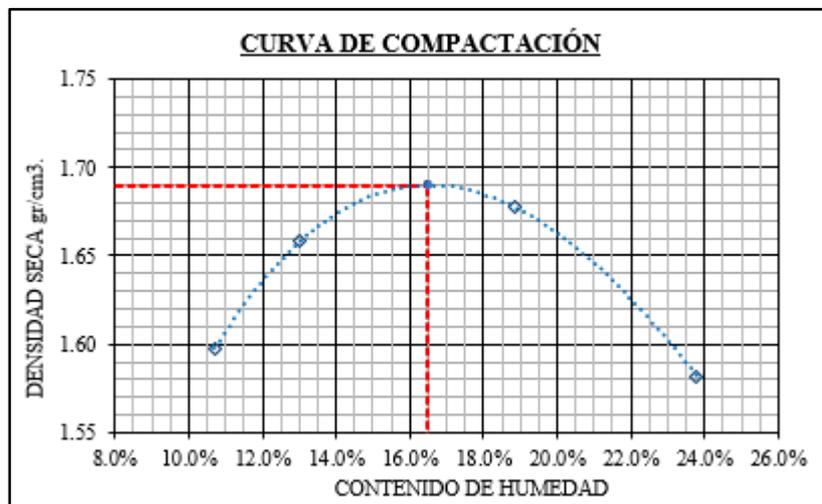
| | N.º de Ensayos | E-1 | E-2 | E-3 | E-4 |
|-------------------|----------------|-------|-------|-------|-------|
| Contenido de agua | % | 23.80 | 18.85 | 13.02 | 10.72 |
| Densidad seca | grs/cms3 | 1.58 | 1.68 | 1.66 | 1.60 |

Nota. Elaboración propia

De los datos hallados se grafica en un plano cartesiano entre el contenido de agua vs la densidad seca:

Figura 42

Gráfica de compactación C-2 con 5% de ceniza



Nota. Elaboración propia

De la ecuación e interpolando según la gráfica se determina que:

Contenido de humedad óptima = 16.50 %

Máxima densidad seca = 1.69 $\frac{gr}{cm^3}$

- c) **Muestra de suelo C-1 y C-2, con mezcla de ceniza 12%**, ver detalle (Anexo 6 y Anexo 7).

Tabla 41

Resultado proctor modificado C-1 con 12% de ceniza

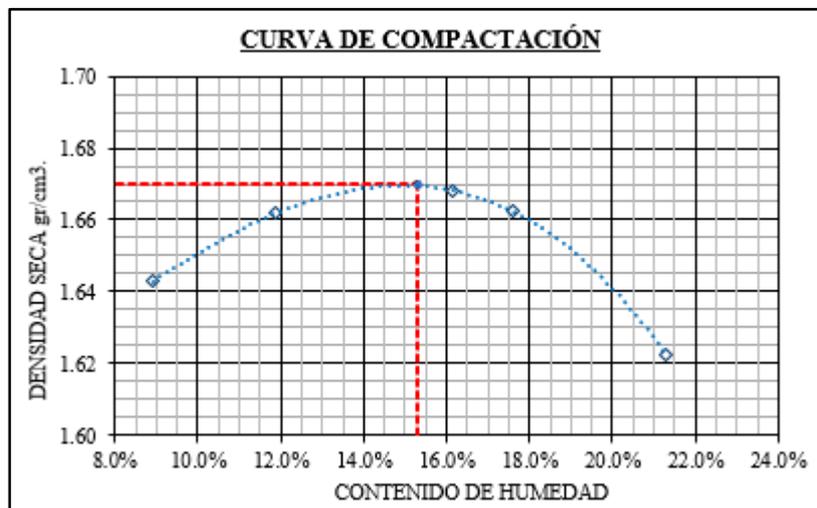
| | N.º de Ensayos | E-1 | E-2 | E-3 | E-4 | E-5 |
|-------------------|----------------|-------|-------|-------|-------|------|
| Contenido de agua | % | 21.31 | 17.62 | 16.13 | 11.87 | 8.92 |
| Densidad seca | grs/cms3 | 1.62 | 1.66 | 1.67 | 1.66 | 1.64 |

Nota. Elaboración propia

De los datos hallados se grafica en un plano cartesiano la relación entre el contenido de agua vs la densidad seca:

Figura 43

Gráfica de compactación C-1 con 12% de ceniza



Nota. Elaboración propia

De la ecuación e interpolando según la gráfica se determina que:

Contenido de humedad óptima = 15.30 %

Máxima densidad seca = 1.67 $\frac{gr}{cm^3}$

Tabla 42

Resultado proctor modificado C-2 con 12% de ceniza

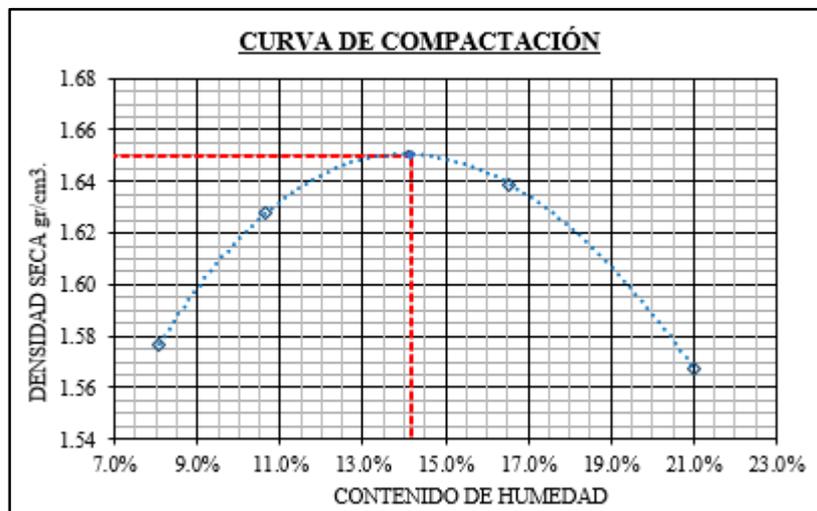
| | N.º de Ensayos | E-1 | E-2 | E-3 | E-4 |
|-------------------|-----------------------|-------|-------|-------|------|
| Contenido de agua | % | 21.02 | 16.55 | 10.66 | 8.07 |
| Densidad seca | grs/cms3 | 1.57 | 1.64 | 1.63 | 1.58 |

Nota. Elaboración propia

Con los datos hallados se grafica en un plano cartesiano entre el contenido de agua vs la densidad seca:

Figura 44

Gráfica de compactación C-2 con 12% de ceniza



Nota. Elaboración propia

De la ecuación e interpolando según la gráfica se determina que:

Contenido de humedad óptima = 14.15 %

Máxima densidad seca = 1.65 $\frac{gr}{cm^3}$

d) Muestra de suelo C-1 y C-2, con mezcla de ceniza 18%, ver detalle (Anexo 6 y Anexo 7).

Tabla 43

Resultado proctor modificado C-1 con 18% de ceniza

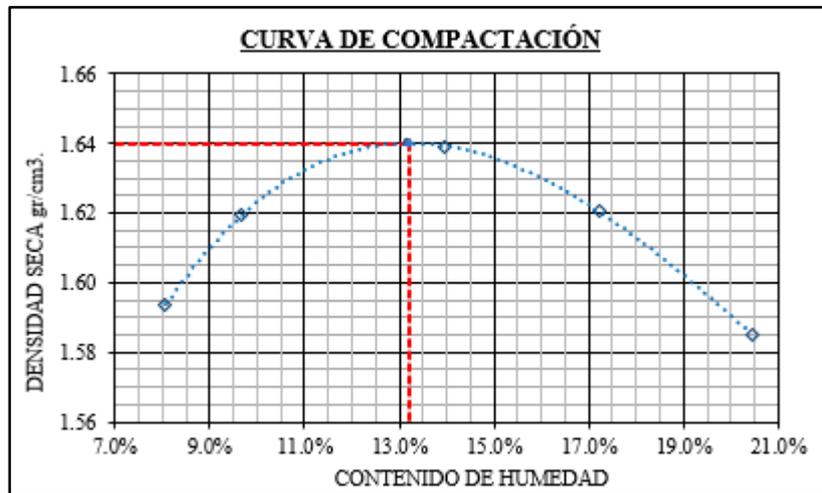
| | N.º de Ensayos | E-1 | E-2 | E-3 | E-4 | E-5 |
|-------------------|----------------|-------|-------|------|------|-------|
| Contenido de agua | % | 20.45 | 13.94 | 9.65 | 8.07 | 17.21 |
| Densidad seca | grs/cms3 | 1.59 | 1.64 | 1.62 | 1.59 | 1.62 |

Nota. Elaboración propia

De los datos hallados se grafica en un plano cartesiano la relación entre el contenido de agua vs la densidad seca:

Figura 45

Gráfica de compactación C-1 con 18% de ceniza



Nota. Elaboración propia

De la ecuación e interpolando según la gráfica se determina que:

Contenido de humedad óptima = 13.20 %

Máxima densidad seca = 1.64 $\frac{gr}{cm^3}$

Tabla 44

Resultado proctor modificado C-2 con 18% de ceniza

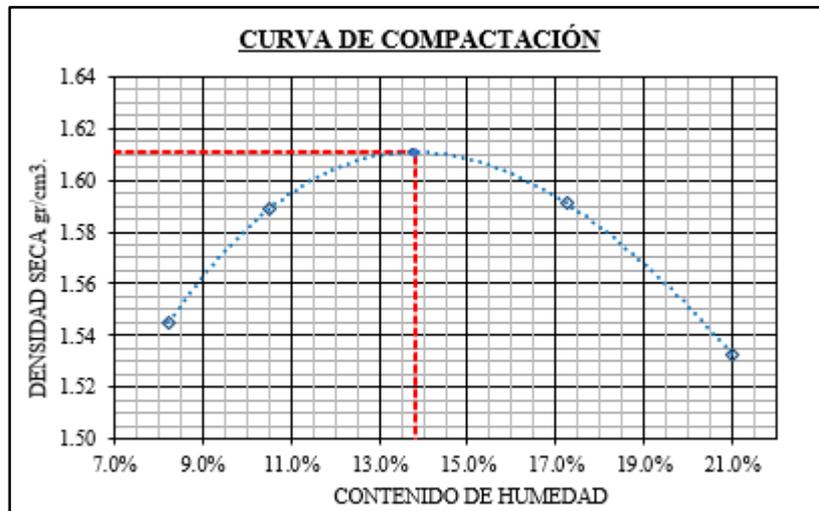
| | N.º de Ensayos | E-1 | E-2 | E-3 | E-4 |
|-------------------|----------------|-------|-------|-------|------|
| Contenido de agua | % | 21.00 | 17.26 | 10.52 | 8.22 |
| Densidad seca | grs/cms3 | 1.53 | 1.59 | 1.59 | 1.54 |

Nota. Elaboración propia

Con los datos hallados se grafica en un plano cartesiano entre el contenido de agua vs la densidad seca:

Figura 46

Gráfica de compactación C-2 con 18% de ceniza



Nota. Elaboración propia

De la ecuación e interpolando según la gráfica se determina que:

Contenido de humedad óptima = 13.80 %

Máxima densidad seca = 1.61 $\frac{gr}{cm^3}$

- e) **Muestra de suelo C-1 y C-2, con mezcla de ceniza 25%,** ver detalle (Anexo 6 y Anexo 7).

Tabla 45

Resultado proctor modificado C-1 con 25% de ceniza

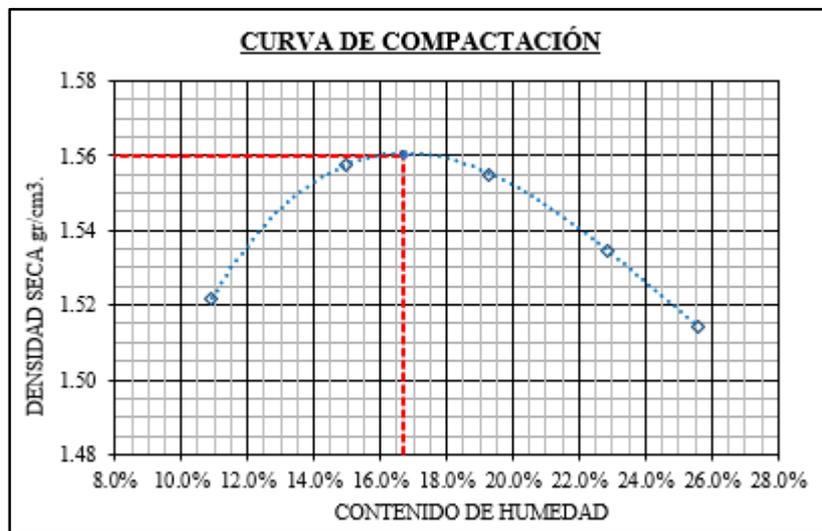
| N.º de Ensayos | | E-1 | E-2 | E-3 | E-4 | E-5 |
|----------------------|----------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Contenido de Humedad | % | 14.95 | 22.87 | 19.26 | 25.58 | 10.92 |
| Densidad seca | grs/cms3 | 1.56 | 1.53 | 1.56 | 1.51 | 1.52 |

Nota. Elaboración propia

Con los datos hallados se grafica en un plano cartesiano entre la densidad seca vs el contenido de agua.

Figura 47

Gráfica de compactación C-1 con 25% de ceniza



Nota. Elaboración propia

De la ecuación e interpolando según la gráfica se determina que:

$$\text{Contenido de humedad óptima} = 16.70 \%$$

$$\text{Máxima densidad seca} = 1.56 \frac{\text{gr}}{\text{cm}^3}$$

Tabla 46

Resultado proctor modificado C-2 con 25% de ceniza

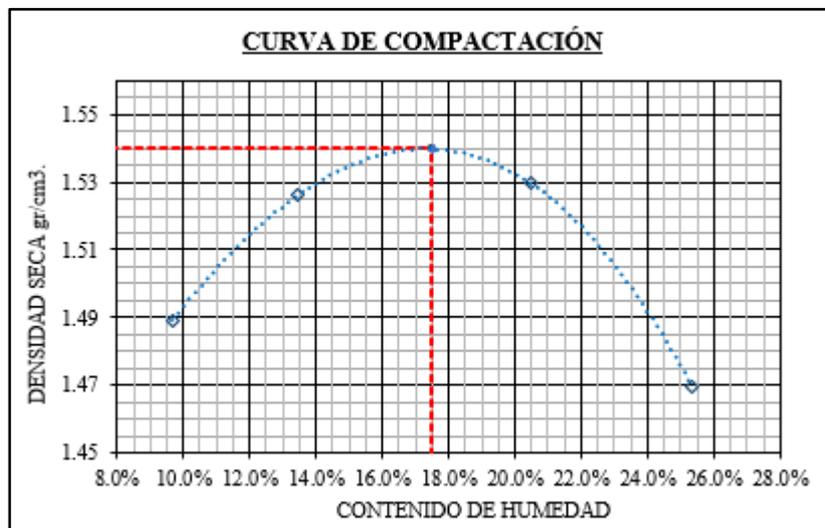
| | | N.º de Ensayos | E-1 | E-2 | E-3 | E-4 |
|-------------------|----------|----------------|-------|-------|-------|------|
| Contenido de agua | % | | 25.34 | 20.48 | 13.47 | 9.68 |
| Densidad seca | grs/cms3 | | 1.47 | 1.53 | 1.53 | 1.49 |

Nota. Elaboración propia

Con los datos hallados se grafica en un plano cartesiano la relación entre el contenido de agua vs la densidad seca.

Figura 48

Gráfica de compactación C-2 con 25% de ceniza



Nota. Elaboración propia

De la ecuación e interpolando según la gráfica se determina que:

Contenido de humedad óptima = 17.50 %

Máxima densidad seca = 1.54 $\frac{gr}{cm^3}$

3.2.7. California Bearing Ratio prueba de CBR

Durante el desarrollo del presente ensayo se tomó en cuenta la normatividad ASTM D-1883, (2007), para tal fin se determinó la expansión del suelo y la penetración para hallar la capacidad de resistencia del suelo (CBR), tanto en la muestra del material arcilloso y de las combinaciones con ceniza en mezclas de 5%, 12%, 18% y 25%.

a) Muestra de suelo C-1 y C-2, suelo natural ver detalle (Anexo 8 y Anexo 9).

Para la muestra C-1, se determinó el porcentaje de expansión para un tiempo de saturación de 5.5 días y los valores de índice de CBR tanto para 56, 25 y 12 golpes respectivamente.

Tabla 47

Expansión del suelo C-1, suelo natural

| Tiempo | N° G. 56 | | | N° G.25 | | | N° G. 12 | | |
|--------|----------|------------|------|---------|------------|------|----------|------------|------|
| | Lect. | Expansión1 | | Lect. | Expansión2 | | Lect. | Expansión3 | |
| | | m.m. | % | | m.m. | % | m.m. | % | % |
| 0 | 8.220 | | | 15.520 | | | 11.060 | | |
| 24h | 11.340 | 3.12 | 2.69 | 18.560 | 3.04 | 2.62 | 14.460 | 3.40 | 2.92 |
| 88h | 15.310 | 7.09 | 6.11 | 23.870 | 8.35 | 7.18 | 20.460 | 9.40 | 8.08 |
| 112h | 15.380 | 7.16 | 6.17 | 24.390 | 8.87 | 7.63 | 21.630 | 10.57 | 9.09 |
| 136h | 15.470 | 7.25 | 6.25 | 24.420 | 8.90 | 7.66 | 21.700 | 10.64 | 9.15 |

Nota. Elaboración propia

Tabla 48

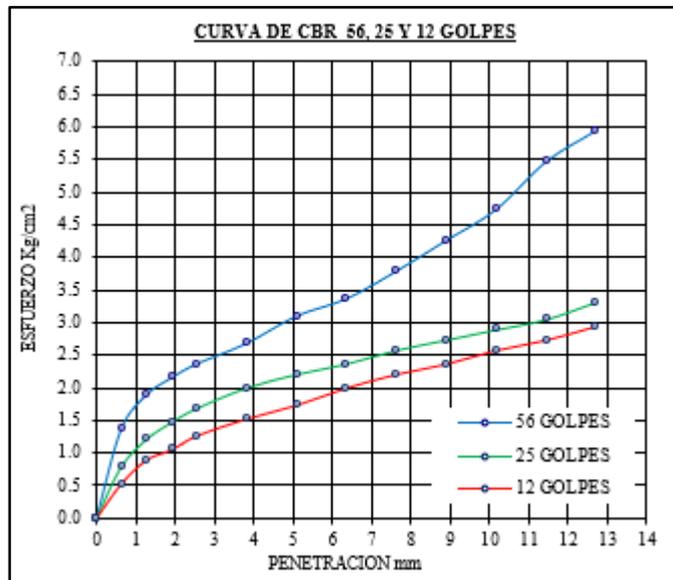
Índice de CBR C-1, suelo natural

| Pentr. (mm). | 56 Golpes | | | | 25 Golpes | | | | 12 Golpes | | | |
|-----------------|-----------|--------|-------|-------------|-----------|-------|-------|-------------|-----------|-------|-------|-------------|
| | Lect | Kgs | K/cm2 | %CBR | Lect | Kgs | K/cm2 | %CBR | Lect | Kgs | K/cm2 | %CBR |
| 0.00 | | | | | | | | | | | | |
| 0.63 | 0.26 | 26.50 | 1.37 | | 0.15 | 15.29 | 0.79 | | 0.10 | 10.19 | 0.53 | |
| 1.27 | 0.36 | 36.70 | 1.89 | | 0.23 | 23.45 | 1.21 | | 0.17 | 17.33 | 0.89 | |
| 1.91 | 0.41 | 41.79 | 2.15 | | 0.28 | 28.54 | 1.47 | | 0.20 | 20.39 | 1.05 | |
| 2.54 | 0.45 | 45.87 | 2.36 | 3.36 | 0.32 | 32.62 | 1.68 | 2.39 | 0.24 | 24.46 | 1.26 | 1.79 |
| 3.81 | 0.51 | 51.99 | 2.68 | | 0.38 | 38.74 | 2.00 | | 0.29 | 29.56 | 1.52 | |
| 5.09 | 0.59 | 60.14 | 3.10 | 2.95 | 0.42 | 42.81 | 2.21 | 2.10 | 0.33 | 33.64 | 1.73 | 1.65 |
| 6.35 | 0.64 | 65.24 | 3.36 | | 0.45 | 45.87 | 2.36 | | 0.38 | 38.74 | 2.00 | |
| 7.62 | 0.72 | 73.39 | 3.78 | | 0.49 | 49.95 | 2.57 | | 0.42 | 42.81 | 2.21 | |
| 8.89 | 0.81 | 82.57 | 4.26 | | 0.52 | 53.01 | 2.73 | | 0.45 | 45.87 | 2.36 | |
| 10.16 | 0.90 | 91.74 | 4.73 | | 0.55 | 56.07 | 2.89 | | 0.49 | 49.95 | 2.57 | |
| 11.44 | 1.04 | 106.01 | 5.46 | | 0.58 | 59.12 | 3.05 | | 0.52 | 53.01 | 2.73 | |
| 12.70 | 1.13 | 115.19 | 5.94 | | 0.63 | 64.22 | 3.31 | | 0.56 | 57.08 | 2.94 | |

Nota. Elaboración propia

Figura 49

Gráfica de CBR C-1, suelo natural



Nota. Elaboración propia

Del mismo modo para la muestra C-2, de se determinó el porcentaje de expansión para un tiempo de saturación de 5.5 días y los valores de índice de CBR tanto para 56, 25 y 12 golpes respectivamente.

Tabla 49

Expansión del suelo C-2, 100% suelo

| Tiempo | N° G. 56 | | N° G. 25 | | N° G. 12 | |
|--------|----------|----------------------|----------|----------------------|----------|----------------------|
| | Lect. | Expansión1 m.m. % | Lect. | Expansión2 m.m. % | Lect. | Expansión3 m.m. % |
| 0 | 14.350 | | 10.520 | | 15.060 | |
| 24h | 17.420 | 3.07 2.64 | 15.160 | 4.64 3.99 | 20.180 | 5.12 4.39 |
| 88h | 20.310 | 5.96 5.13 | 17.650 | 7.13 6.13 | 23.720 | 8.66 7.42 |
| 112h | 21.660 | 7.31 6.29 | 19.480 | 8.96 7.71 | 25.350 | 10.29 8.82 |
| 136h | 22.020 | 7.67 6.60 | 19.830 | 9.31 8.01 | 25.880 | 10.82 9.27 |

Nota. Elaboración propia

Tabla 50

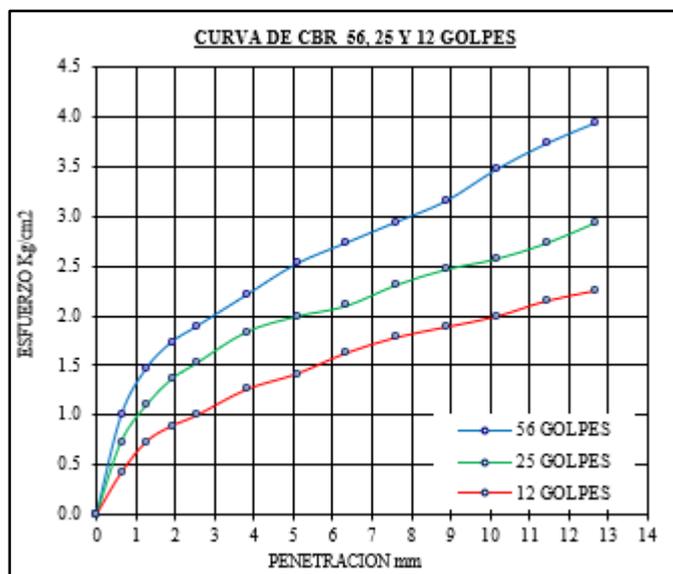
Índice de CBR C-2, suelo natural

| Pentr. (mm). | 56 Golpes | | | | 25 Golpes | | | | 12 Golpes | | | |
|-----------------|-----------|-------|-------|-------------|-----------|-------|-------|-------------|-----------|-------|-------|-------------|
| | Lect | Kgs | K/cm2 | %CBR | Lect | Kgs | K/cm2 | %CBR | Lect | Kgs | K/cm2 | %CBR |
| 0.00 | | | | | | | | | | | | |
| 0.63 | 0.19 | 19.37 | 1.00 | | 0.14 | 14.27 | 0.74 | | 0.08 | 8.15 | 0.42 | |
| 1.27 | 0.28 | 28.54 | 1.47 | | 0.21 | 21.41 | 1.10 | | 0.14 | 14.27 | 0.74 | |
| 1.91 | 0.33 | 33.64 | 1.73 | | 0.26 | 26.50 | 1.37 | | 0.17 | 17.33 | 0.89 | |
| 2.54 | 0.36 | 36.70 | 1.89 | 2.69 | 0.29 | 29.56 | 1.52 | 2.17 | 0.19 | 19.37 | 1.00 | 1.42 |
| 3.81 | 0.42 | 42.81 | 2.21 | | 0.35 | 35.68 | 1.84 | | 0.24 | 24.46 | 1.26 | |
| 5.09 | 0.48 | 48.93 | 2.52 | 2.40 | 0.38 | 38.74 | 2.00 | 1.90 | 0.27 | 27.52 | 1.42 | 1.35 |
| 6.35 | 0.52 | 53.01 | 2.73 | | 0.40 | 40.77 | 2.10 | | 0.31 | 31.60 | 1.63 | |
| 7.62 | 0.56 | 57.08 | 2.94 | | 0.44 | 44.85 | 2.31 | | 0.34 | 34.66 | 1.79 | |
| 8.89 | 0.60 | 61.16 | 3.15 | | 0.47 | 47.91 | 2.47 | | 0.36 | 36.70 | 1.89 | |
| 10.16 | 0.66 | 67.28 | 3.47 | | 0.49 | 49.95 | 2.57 | | 0.38 | 38.74 | 2.00 | |
| 11.44 | 0.71 | 72.38 | 3.73 | | 0.52 | 53.01 | 2.73 | | 0.41 | 41.79 | 2.15 | |
| 12.70 | 0.75 | 76.45 | 3.94 | | 0.56 | 57.08 | 2.94 | | 0.43 | 43.83 | 2.26 | |

Nota. Elaboración propia

Figura 50

Gráfica de CBR C-2, 100% suelo



Nota. Elaboración propia

b) **Muestra de suelo C-1 y C-2, con mezcla de ceniza 5%,** ver detalle (Anexo 8 y Anexo 9).

Para la muestra C-1 con mezcla 5% de ceniza, se determinó el porcentaje de expansión para un tiempo de saturación de 5.5 días y los valores de índice de CBR tanto para 56, 25 y 12 golpes respectivamente.

Tabla 51

Expansión del suelo C-1 con 5% de ceniza

| Tiempo | N° G. 56 | | N° G. 25 | | N° G. 12 | |
|--------|----------|----------------------|----------|----------------------|----------|----------------------|
| | Lect. | Expansión1 m.m. % | Lect. | Expansión2 m.m. % | Lect. | Expansión3 m.m. % |
| 0 | 7.230 | | 15.890 | | 14.060 | |
| 24h | 10.540 | 3.31 2.86 | 19.120 | 3.23 2.77 | 17.750 | 3.69 3.17 |
| 88h | 14.030 | 6.80 5.87 | 24.390 | 8.50 7.29 | 23.130 | 9.07 7.80 |
| 112h | 14.400 | 7.17 6.19 | 24.450 | 8.56 7.34 | 23.550 | 9.49 8.16 |
| 136h | 14.410 | 7.18 6.20 | 24.460 | 8.57 7.35 | 23.560 | 9.50 8.17 |

Nota. Elaboración propia

Tabla 52

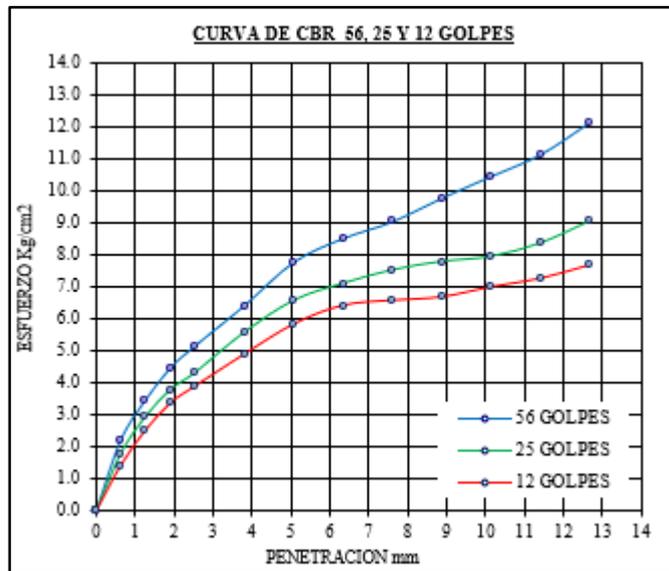
Índice de CBR C-1 con 5% de ceniza

| Pentr. (mm). | 56 Golpes | | | | 25 Golpes | | | | 12 Golpes | | | |
|-----------------|-----------|--------|-------|-------------|-----------|--------|-------|-------------|-----------|--------|-------|-------------|
| | Lect | Kgs | K/cm2 | %CBR | Lect | Kgs | K/cm2 | %CBR | Lect | Kgs | K/cm2 | %CBR |
| 0.00 | | | | | | | | | | | | |
| 0.63 | 0.42 | 42.81 | 2.21 | | 0.34 | 34.66 | 1.79 | | 0.27 | 27.52 | 1.42 | |
| 1.27 | 0.66 | 67.28 | 3.47 | | 0.56 | 57.08 | 2.94 | | 0.48 | 48.93 | 2.52 | |
| 1.91 | 0.85 | 86.65 | 4.47 | | 0.72 | 73.39 | 3.78 | | 0.64 | 65.24 | 3.36 | |
| 2.54 | 0.98 | 99.90 | 5.15 | 7.32 | 0.82 | 83.59 | 4.31 | 6.13 | 0.74 | 75.43 | 3.89 | 5.53 |
| 3.81 | 1.22 | 124.36 | 6.41 | | 1.06 | 108.05 | 5.57 | | 0.93 | 94.80 | 4.89 | |
| 5.09 | 1.48 | 150.87 | 7.78 | 7.41 | 1.25 | 127.42 | 6.57 | 6.26 | 1.11 | 113.15 | 5.83 | 5.55 |
| 6.35 | 1.62 | 165.14 | 8.51 | | 1.35 | 137.61 | 7.09 | | 1.22 | 124.36 | 6.41 | |
| 7.62 | 1.72 | 175.33 | 9.04 | | 1.43 | 145.77 | 7.51 | | 1.25 | 127.42 | 6.57 | |
| 8.89 | 1.86 | 189.60 | 9.77 | | 1.48 | 150.87 | 7.78 | | 1.27 | 129.46 | 6.67 | |
| 10.16 | 1.99 | 202.85 | 10.46 | | 1.51 | 153.92 | 7.93 | | 1.33 | 135.58 | 6.99 | |
| 11.44 | 2.12 | 216.11 | 11.14 | | 1.59 | 162.08 | 8.35 | | 1.38 | 140.67 | 7.25 | |
| 12.70 | 2.31 | 235.47 | 12.14 | | 1.72 | 175.33 | 9.04 | | 1.46 | 148.83 | 7.67 | |

Nota. Elaboración propia

Figura 51

Gráfica de CBR C-1 con 5% de ceniza



Nota. Elaboración propia

Del mismo modo para la muestra C-2 con mezcla 5% de ceniza, de se determinó el porcentaje de expansión para un tiempo de saturación de 5.5 días y los valores de índice de CBR tanto para 56, 25 y 12 golpes respectivamente.

Tabla 53

Expansión del suelo C-2 con 5% de ceniza

| Tiempo | N° G. 56 | | N° G. 25 | | N° G. 12 | |
|--------|----------|----------------------|----------|----------------------|----------|----------------------|
| | Lect. | Expansión1 m.m. % | Lect. | Expansión2 m.m. % | Lect. | Expansión3 m.m. % |
| 0 | 12.230 | | 10.890 | | 8.060 | |
| 24h | 15.540 | 3.31 2.88 | 14.520 | 3.63 3.12 | 12.350 | 4.29 3.70 |
| 88h | 18.030 | 5.80 5.05 | 17.390 | 6.50 5.59 | 15.130 | 7.07 6.09 |
| 112h | 19.180 | 6.95 6.05 | 19.450 | 8.56 7.36 | 17.080 | 9.02 7.77 |
| 136h | 19.670 | 7.44 6.48 | 19.810 | 8.92 7.67 | 17.460 | 9.40 8.10 |

Nota. Elaboración propia

Tabla 54

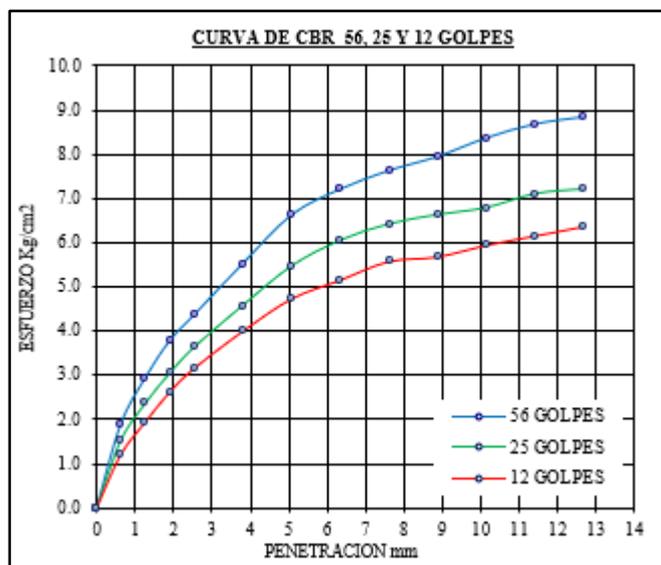
Índice de CBR C-2 con 5% de ceniza

| Pentr. (mm). | 56 Golpes | | | | 25 Golpes | | | | 12 Golpes | | | |
|-----------------|-----------|--------|-------|-------------|-----------|--------|-------|-------------|-----------|--------|-------|-------------|
| | Lect | Kgs | K/cm2 | %CBR | Lect | Kgs | K/cm2 | %CBR | Lect | Kgs | K/cm2 | %CBR |
| 0.00 | | | | | | | | | | | | |
| 0.63 | 0.36 | 36.70 | 1.89 | | 0.29 | 29.56 | 1.52 | | 0.23 | 23.45 | 1.21 | |
| 1.27 | 0.56 | 57.08 | 2.94 | | 0.45 | 45.87 | 2.36 | | 0.37 | 37.72 | 1.94 | |
| 1.91 | 0.72 | 73.39 | 3.78 | | 0.58 | 59.12 | 3.05 | | 0.50 | 50.97 | 2.63 | |
| 2.54 | 0.83 | 84.61 | 4.36 | 6.20 | 0.69 | 70.34 | 3.63 | 5.16 | 0.60 | 61.16 | 3.15 | 4.48 |
| 3.81 | 1.05 | 107.03 | 5.52 | | 0.87 | 88.69 | 4.57 | | 0.76 | 77.47 | 3.99 | |
| 5.09 | 1.26 | 128.44 | 6.62 | 6.31 | 1.04 | 106.01 | 5.46 | 5.20 | 0.90 | 91.74 | 4.73 | 4.50 |
| 6.35 | 1.37 | 139.65 | 7.20 | | 1.15 | 117.23 | 6.04 | | 0.98 | 99.90 | 5.15 | |
| 7.62 | 1.45 | 147.81 | 7.62 | | 1.22 | 124.36 | 6.41 | | 1.06 | 108.05 | 5.57 | |
| 8.89 | 1.51 | 153.92 | 7.93 | | 1.26 | 128.44 | 6.62 | | 1.08 | 110.09 | 5.67 | |
| 10.16 | 1.59 | 162.08 | 8.35 | | 1.29 | 131.50 | 6.78 | | 1.13 | 115.19 | 5.94 | |
| 11.44 | 1.65 | 168.20 | 8.67 | | 1.35 | 137.61 | 7.09 | | 1.17 | 119.27 | 6.15 | |
| 12.70 | 1.68 | 171.25 | 8.83 | | 1.37 | 139.65 | 7.20 | | 1.21 | 123.34 | 6.36 | |

Nota. Elaboración propia

Figura 52

Gráfica de CBR C-2 con 5% de ceniza



Nota. Elaboración propia

- c) **Muestra de suelo C-1 y C-2, con mezcla de ceniza 12%**, ver detalle (Anexo 8 y Anexo 9).

Para la muestra C-1 con mezcla 12% de ceniza, se determinó el porcentaje de expansión para un tiempo de saturación de 5.5 días y los valores de índice de CBR tanto para 56, 25 y 12 golpes respectivamente.

Tabla 55

Expansión del suelo C-1 con 12% de ceniza

| Tiempo | N° G. 56 | | | N° G. 25 | | | N° G. 12 | | |
|--------|----------|------------|------|----------|------------|------|----------|------------|------|
| | Lect. | Expansión1 | | Lect. | Expansión2 | | Lect. | Expansión3 | |
| | | m.m. | % | | m.m. | % | | m.m. | % |
| 0 | 7.700 | | | 5.110 | | | 13.330 | | |
| 24h | 11.050 | 3.35 | 2.92 | 10.130 | 5.02 | 4.32 | 19.110 | 5.78 | 4.98 |
| 88h | 12.270 | 4.57 | 3.98 | 11.580 | 6.47 | 5.56 | 20.250 | 6.92 | 5.96 |
| 112h | 12.950 | 5.25 | 4.57 | 12.500 | 7.39 | 6.35 | 21.340 | 8.01 | 6.90 |
| 136h | 13.790 | 6.09 | 5.30 | 13.110 | 8.00 | 6.88 | 22.240 | 8.91 | 7.68 |

Nota. Elaboración propia

Tabla 56

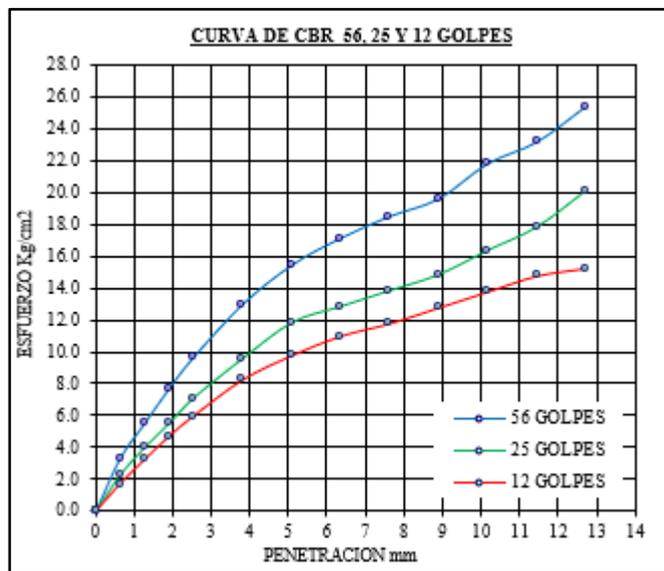
Índice de CBR C-1 con 12% de ceniza

| Pentr. (mm). | 56 Golpes | | | | 25 Golpes | | | | 12 Golpes | | | |
|-----------------|-----------|--------|-------|--------------|-----------|--------|-------|--------------|-----------|--------|-------|-------------|
| | Lect | Kgs | K/cm2 | %CBR | Lect | Kgs | K/cm2 | %CBR | Lect | Kgs | K/cm2 | %CBR |
| 0.00 | | | | | | | | | | | | |
| 0.63 | 0.63 | 64.22 | 3.31 | | 0.43 | 43.83 | 2.26 | | 0.33 | 33.64 | 1.73 | |
| 1.27 | 1.05 | 107.03 | 5.52 | | 0.76 | 77.47 | 3.99 | | 0.62 | 63.20 | 3.26 | |
| 1.91 | 1.47 | 149.85 | 7.72 | | 1.05 | 107.03 | 5.52 | | 0.90 | 91.74 | 4.73 | |
| 2.54 | 1.84 | 187.56 | 9.67 | 13.75 | 1.35 | 137.61 | 7.09 | 10.09 | 1.14 | 116.21 | 5.99 | 8.52 |
| 3.81 | 2.47 | 251.78 | 12.98 | | 1.82 | 185.52 | 9.56 | | 1.57 | 160.04 | 8.25 | |
| 5.09 | 2.94 | 299.69 | 15.45 | 14.71 | 2.25 | 229.36 | 11.82 | 11.26 | 1.86 | 189.60 | 9.77 | 9.31 |
| 6.35 | 3.26 | 332.31 | 17.13 | | 2.44 | 248.73 | 12.82 | | 2.09 | 213.05 | 10.98 | |
| 7.62 | 3.52 | 358.82 | 18.50 | | 2.63 | 268.09 | 13.82 | | 2.24 | 228.34 | 11.77 | |
| 8.89 | 3.73 | 380.22 | 19.60 | | 2.82 | 287.46 | 14.82 | | 2.43 | 247.71 | 12.77 | |
| 10.16 | 4.15 | 423.04 | 21.81 | | 3.11 | 317.02 | 16.34 | | 2.62 | 267.07 | 13.77 | |
| 11.44 | 4.41 | 449.54 | 23.17 | | 3.39 | 345.57 | 17.81 | | 2.81 | 286.44 | 14.77 | |
| 12.70 | 4.83 | 492.35 | 25.38 | | 3.82 | 389.40 | 20.07 | | 2.90 | 295.62 | 15.24 | |

Nota. Elaboración propia

Figura 53

Gráfica de CBR C-1 con 12% de ceniza



Nota. Elaboración propia

Del mismo modo para la muestra C-2 con mezcla 12% de ceniza, de se determinó el porcentaje de expansión para un tiempo de saturación de 5.5 días y los valores de índice de CBR tanto para 56, 25 y 12 golpes respectivamente.

Tabla 57

Expansión del suelo C-2 con 12% de ceniza

| Tiempo | N° G. 56 | | | N° G. 25 | | | N° G. 12 | | |
|--------|----------|--------------------|------|----------|--------------------|------|----------|--------------------|------|
| | Lect. | Expansión1 m.m. | % | Lect. | Expansión2 m.m. | % | Lect. | Expansión3 m.m. | % |
| 0 | 12.680 | | | 15.080 | | | 7.270 | | |
| 24h | 16.550 | 3.87 | 3.34 | 19.310 | 4.23 | 3.64 | 11.620 | 4.35 | 3.74 |
| 88h | 17.870 | 5.19 | 4.48 | 21.850 | 6.77 | 5.83 | 14.470 | 7.20 | 6.19 |
| 112h | 18.960 | 6.28 | 5.42 | 23.020 | 7.94 | 6.84 | 15.830 | 8.56 | 7.36 |
| 136h | 19.020 | 6.34 | 5.47 | 23.180 | 8.10 | 6.98 | 15.910 | 8.64 | 7.43 |

Nota. Elaboración propia

Tabla 58

Índice de CBR C-2 con 12% de ceniza

| Pentr. (mm). | 56 Golpes | | | | 25 Golpes | | | | 12 Golpes | | | |
|-----------------|-----------|--------|-------|--------------|-----------|--------|-------|--------------|-----------|--------|-------|-------------|
| | Lect | Kgs | K/cm2 | %CBR | Lect | Kgs | K/cm2 | %CBR | Lect | Kgs | K/cm2 | %CBR |
| 0.00 | | | | | | | | | | | | |
| 0.63 | 0.61 | 62.18 | 3.21 | | 0.41 | 41.79 | 2.15 | | 0.32 | 32.62 | 1.68 | |
| 1.27 | 1.01 | 102.96 | 5.31 | | 0.77 | 78.49 | 4.05 | | 0.59 | 60.14 | 3.10 | |
| 1.91 | 1.41 | 143.73 | 7.41 | | 1.05 | 107.03 | 5.52 | | 0.87 | 88.69 | 4.57 | |
| 2.54 | 1.77 | 180.43 | 9.30 | 13.23 | 1.32 | 134.56 | 6.94 | 9.86 | 1.03 | 104.99 | 5.41 | 7.70 |
| 3.81 | 2.27 | 231.40 | 11.93 | | 1.74 | 177.37 | 9.14 | | 1.50 | 152.91 | 7.88 | |
| 5.09 | 2.71 | 276.25 | 14.24 | 13.56 | 2.07 | 211.01 | 10.88 | 10.36 | 1.78 | 181.45 | 9.35 | 8.91 |
| 6.35 | 2.98 | 303.77 | 15.66 | | 2.34 | 238.53 | 12.30 | | 2.01 | 204.89 | 10.56 | |
| 7.62 | 3.25 | 331.29 | 17.08 | | 2.52 | 256.88 | 13.24 | | 2.14 | 218.14 | 11.24 | |
| 8.89 | 3.44 | 350.66 | 18.08 | | 2.67 | 272.17 | 14.03 | | 2.30 | 234.45 | 12.09 | |
| 10.16 | 3.72 | 379.20 | 19.55 | | 2.90 | 295.62 | 15.24 | | 2.47 | 251.78 | 12.98 | |
| 11.44 | 3.96 | 403.67 | 20.81 | | 3.10 | 316.00 | 16.29 | | 2.58 | 263.00 | 13.56 | |
| 12.70 | 4.07 | 414.88 | 21.39 | | 3.26 | 332.31 | 17.13 | | 2.68 | 273.19 | 14.08 | |

Nota. Elaboración propia

Figura 54

Gráfica de CBR C-2 con 12% de ceniza



Nota. Elaboración propia

d) **Muestra de suelo C-1 y C-2, con mezcla de ceniza 18%**, ver detalle (Anexo 8 y Anexo 9).

Para la muestra C-1 con mezcla 18% de ceniza, se determinó el porcentaje de expansión para un tiempo de saturación de 5.5 días y los valores de índice de CBR tanto para 56, 25 y 12 golpes respectivamente.

Tabla 59

Expansión del suelo C-1 con 18% de ceniza

| Tiempo | N° G. 56 | | | N° G. 25 | | | N° G. 12 | | |
|--------|----------|------------|------|----------|------------|------|----------|------------|------|
| | Lect. | Expansión1 | | Lect. | Expansión2 | | Lect. | Expansión3 | |
| | | m.m. | % | | m.m. | % | | m.m. | % |
| 0 | 16.570 | | | 12.830 | | | 15.520 | | |
| 24h | 17.320 | 0.75 | 0.65 | 16.430 | 3.60 | 3.09 | 19.650 | 4.13 | 3.55 |
| 88h | 18.570 | 2.00 | 1.75 | 19.540 | 6.71 | 5.75 | 21.740 | 6.22 | 5.35 |
| 112h | 19.380 | 2.81 | 2.45 | 19.940 | 7.11 | 6.10 | 22.120 | 6.60 | 5.68 |
| 136h | 19.540 | 2.97 | 2.59 | 19.970 | 7.14 | 6.12 | 23.830 | 8.31 | 7.15 |

Nota. Elaboración propia

Tabla 60

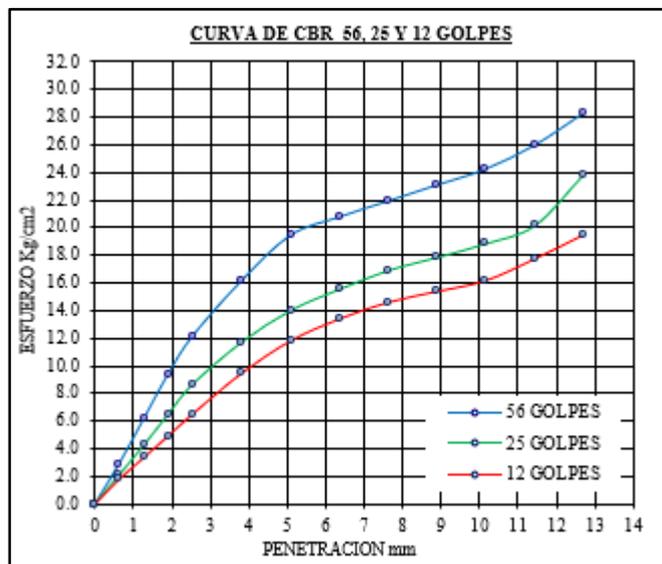
Índice de CBR C-1 con 18% de ceniza

| Pentr. (mm). | 56 Golpes | | | | 25 Golpes | | | | 12 Golpes | | | |
|-----------------|-----------|--------|-------|--------------|-----------|--------|-------|--------------|-----------|--------|-------|--------------|
| | Lect | Kgs | K/cm2 | %CBR | Lect | Kgs | K/cm2 | %CBR | Lect | Kgs | K/cm2 | %CBR |
| 0.00 | | | | | | | | | | | | |
| 0.63 | 0.55 | 56.07 | 2.89 | | 0.40 | 40.77 | 2.10 | | 0.34 | 34.66 | 1.79 | |
| 1.27 | 1.17 | 119.27 | 6.15 | | 0.81 | 82.57 | 4.26 | | 0.64 | 65.24 | 3.36 | |
| 1.91 | 1.79 | 182.47 | 9.41 | | 1.24 | 126.40 | 6.52 | | 0.94 | 95.82 | 4.94 | |
| 2.54 | 2.31 | 235.47 | 12.14 | 17.26 | 1.65 | 168.20 | 8.67 | 12.33 | 1.24 | 126.40 | 6.52 | 9.27 |
| 3.81 | 3.07 | 312.95 | 16.13 | | 2.23 | 227.32 | 11.72 | | 1.80 | 183.49 | 9.46 | |
| 5.09 | 3.70 | 377.17 | 19.44 | 18.52 | 2.67 | 272.17 | 14.03 | 13.36 | 2.25 | 229.36 | 11.82 | 11.26 |
| 6.35 | 3.95 | 402.65 | 20.76 | | 2.96 | 301.73 | 15.55 | | 2.55 | 259.94 | 13.40 | |
| 7.62 | 4.17 | 425.08 | 21.91 | | 3.22 | 328.24 | 16.92 | | 2.78 | 283.38 | 14.61 | |
| 8.89 | 4.39 | 447.50 | 23.07 | | 3.40 | 346.59 | 17.87 | | 2.93 | 298.67 | 15.40 | |
| 10.16 | 4.61 | 469.93 | 24.22 | | 3.59 | 365.95 | 18.86 | | 3.08 | 313.97 | 16.18 | |
| 11.44 | 4.94 | 503.57 | 25.96 | | 3.84 | 391.44 | 20.18 | | 3.38 | 344.55 | 17.76 | |
| 12.70 | 5.38 | 548.42 | 28.27 | | 4.54 | 462.79 | 23.86 | | 3.71 | 378.19 | 19.49 | |

Nota. Elaboración propia

Figura 55

Gráfica de CBR C-1 con 18% de ceniza



Nota. Elaboración propia

Del mismo modo para la muestra C-2 con mezcla 18% de ceniza, de se determinó el porcentaje de expansión para un tiempo de saturación de 5.5 días y los valores de índice de CBR tanto para 56, 25 y 12 golpes respectivamente.

Tabla 61

Expansión del suelo C-2 con 18% de ceniza

| Tiempo | N° G. 56 | | N° G. 25 | | N° G. 12 | |
|--------|----------|----------------------|----------|----------------------|----------|----------------------|
| | Lect. | Expansión1 m.m. % | Lect. | Expansión2 m.m. % | Lect. | Expansión3 m.m. % |
| 0 | 8.390 | | 15.330 | | 9.820 | |
| 24h | 10.440 | 2.05 1.76 | 17.610 | 2.28 1.97 | 13.170 | 3.35 2.88 |
| 88h | 11.650 | 3.26 2.79 | 20.550 | 5.22 4.51 | 15.220 | 5.40 4.65 |
| 112h | 12.080 | 3.69 3.16 | 21.760 | 6.43 5.55 | 16.940 | 7.12 6.13 |
| 136h | 12.130 | 3.74 3.21 | 21.950 | 6.62 5.71 | 17.350 | 7.53 6.48 |

Nota. Elaboración propia

Tabla 62

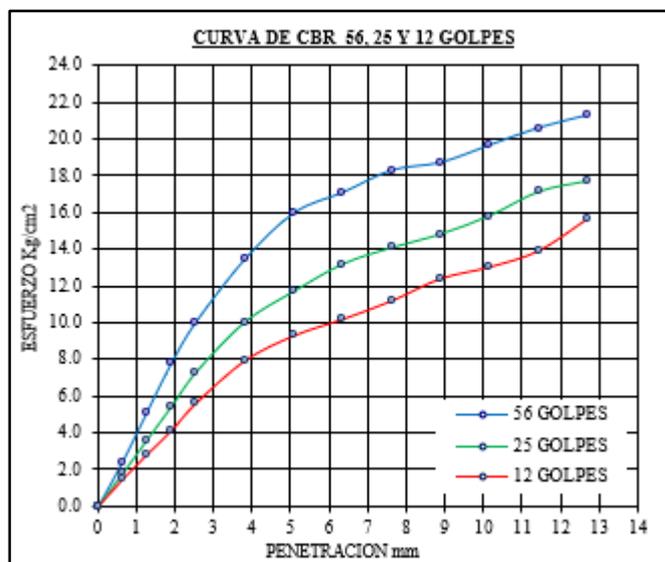
Índice de CBR C-2 con 18% de ceniza

| Pentr. (mm). | 56 Golpes | | | | 25 Golpes | | | | 12 Golpes | | | |
|-----------------|-----------|--------|-------|--------------|-----------|--------|-------|--------------|-----------|--------|-------|-------------|
| | Lect | Kgs | K/cm2 | %CBR | Lect | Kgs | K/cm2 | %CBR | Lect | Kgs | K/cm2 | %CBR |
| 0.00 | | | | | | | | | | | | |
| 0.63 | 0.46 | 46.89 | 2.42 | | 0.34 | 34.66 | 1.79 | | 0.28 | 28.54 | 1.47 | |
| 1.27 | 0.98 | 99.90 | 5.15 | | 0.69 | 70.34 | 3.63 | | 0.54 | 55.05 | 2.84 | |
| 1.91 | 1.49 | 151.89 | 7.83 | | 1.04 | 106.01 | 5.46 | | 0.79 | 80.53 | 4.15 | |
| 2.54 | 1.91 | 194.70 | 10.04 | 14.27 | 1.39 | 141.69 | 7.30 | 10.39 | 1.07 | 109.07 | 5.62 | 8.00 |
| 3.81 | 2.56 | 260.96 | 13.45 | | 1.91 | 194.70 | 10.04 | | 1.51 | 153.92 | 7.93 | |
| 5.09 | 3.04 | 309.89 | 15.97 | 15.21 | 2.23 | 227.32 | 11.72 | 11.16 | 1.77 | 180.43 | 9.30 | 8.86 |
| 6.35 | 3.25 | 331.29 | 17.08 | | 2.51 | 255.86 | 13.19 | | 1.94 | 197.76 | 10.19 | |
| 7.62 | 3.48 | 354.74 | 18.29 | | 2.68 | 273.19 | 14.08 | | 2.13 | 217.13 | 11.19 | |
| 8.89 | 3.56 | 362.90 | 18.71 | | 2.82 | 287.46 | 14.82 | | 2.36 | 240.57 | 12.40 | |
| 10.16 | 3.74 | 381.24 | 19.65 | | 3.01 | 306.83 | 15.82 | | 2.48 | 252.80 | 13.03 | |
| 11.44 | 3.92 | 399.59 | 20.60 | | 3.26 | 332.31 | 17.13 | | 2.65 | 270.13 | 13.92 | |
| 12.70 | 4.05 | 412.84 | 21.28 | | 3.37 | 343.53 | 17.71 | | 2.98 | 303.77 | 15.66 | |

Nota. Elaboración propia

Figura 56

Gráfica de CBR C-2 con 18% de ceniza



Nota. Elaboración propia

- e) **Muestra de suelo C-1 y C-2, con mezcla de ceniza 25%**, ver detalle (Anexo 8 y Anexo 9).

Para la muestra C-1 con mezcla 25% de ceniza, se determinó el porcentaje de expansión para un tiempo de saturación de 5.5 días y los valores de índice de CBR tanto para 56, 25 y 12 golpes respectivamente.

Tabla 63

Expansión del suelo C-1 con 25% de ceniza

| Tiempo | N° G. 56 | | | N° G. 25 | | | N° G. 12 | | |
|--------|----------|------------|------|----------|------------|------|----------|------------|------|
| | Lect. | Expansión1 | | Lect. | Expansión2 | | Lect. | Expansión3 | |
| | | m.m. | % | | m.m. | % | | m.m. | % |
| 0 | 9.530 | | | 6.810 | | | 8.060 | | |
| 24h | 11.250 | 1.72 | 1.47 | 8.820 | 2.01 | 1.73 | 10.790 | 2.73 | 2.35 |
| 88h | 15.720 | 6.19 | 5.31 | 13.860 | 7.05 | 6.08 | 16.590 | 8.53 | 7.33 |
| 112h | 16.430 | 6.90 | 5.91 | 13.880 | 7.07 | 6.10 | 16.630 | 8.57 | 7.37 |
| 136h | 16.440 | 6.91 | 5.92 | 13.890 | 7.08 | 6.11 | 16.650 | 8.59 | 7.38 |

Nota. Elaboración propia

Tabla 64

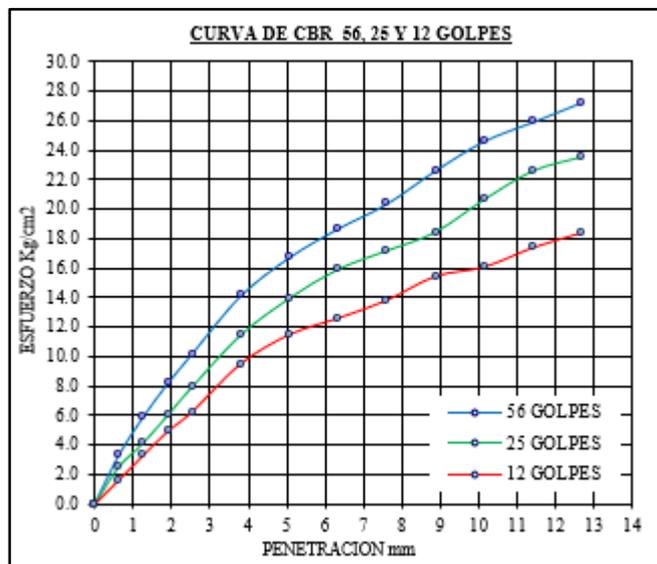
Índice de CBR C-1 con 25% de ceniza

| Pentr. (mm). | 56 Golpes | | | | 25 Golpes | | | | 12 Golpes | | | |
|-----------------|-----------|--------|-------|--------------|-----------|--------|-------|--------------|-----------|--------|-------|--------------|
| | Lect | Kgs | K/cm2 | %CBR | Lect | Kgs | K/cm2 | %CBR | Lect | Kgs | K/cm2 | %CBR |
| 0.00 | | | | | | | | | | | | |
| 0.63 | 0.63 | 64.22 | 3.31 | | 0.48 | 48.93 | 2.52 | | 0.31 | 31.60 | 1.63 | |
| 1.27 | 1.13 | 115.19 | 5.94 | | 0.79 | 80.53 | 4.15 | | 0.63 | 64.22 | 3.31 | |
| 1.91 | 1.56 | 159.02 | 8.20 | | 1.15 | 117.23 | 6.04 | | 0.94 | 95.82 | 4.94 | |
| 2.54 | 1.94 | 197.76 | 10.19 | 14.50 | 1.51 | 153.92 | 7.93 | 11.28 | 1.19 | 121.30 | 6.25 | 8.89 |
| 3.81 | 2.69 | 274.21 | 14.13 | | 2.18 | 222.22 | 11.45 | | 1.81 | 184.51 | 9.51 | |
| 5.09 | 3.19 | 325.18 | 16.76 | 15.96 | 2.66 | 271.15 | 13.98 | 13.31 | 2.19 | 223.24 | 11.51 | 10.96 |
| 6.35 | 3.56 | 362.90 | 18.71 | | 3.03 | 308.87 | 15.92 | | 2.40 | 244.65 | 12.61 | |
| 7.62 | 3.88 | 395.51 | 20.39 | | 3.27 | 333.33 | 17.18 | | 2.63 | 268.09 | 13.82 | |
| 8.89 | 4.31 | 439.35 | 22.65 | | 3.51 | 357.80 | 18.44 | | 2.94 | 299.69 | 15.45 | |
| 10.16 | 4.69 | 478.08 | 24.64 | | 3.93 | 400.61 | 20.65 | | 3.06 | 311.93 | 16.08 | |
| 11.44 | 4.94 | 503.57 | 25.96 | | 4.30 | 438.33 | 22.59 | | 3.31 | 337.41 | 17.39 | |
| 12.70 | 5.19 | 529.05 | 27.27 | | 4.48 | 456.68 | 23.54 | | 3.50 | 356.78 | 18.39 | |

Nota. Elaboración propia

Figura 57

Gráfica de CBR C-1 con 25% de ceniza



Nota. Elaboración propia

Del mismo modo para la muestra C-2 con mezcla 25% de ceniza, de se determinó el porcentaje de expansión para un tiempo de saturación de 5.5 días y los valores de índice de CBR tanto para 56, 25 y 12 golpes respectivamente.

Tabla 65

Expansión del suelo C-2 con 25% de ceniza

| Tiempo | N° G. 56 | | N° G. 25 | | N° G. 12 | |
|--------|----------|----------------------|----------|----------------------|----------|----------------------|
| | Lect. | Expansión1 m.m. % | Lect. | Expansión2 m.m. % | Lect. | Expansión3 m.m. % |
| 0 | 10.130 | | 12.250 | | 7.340 | |
| 24h | 12.740 | 2.61 2.24 | 15.240 | 2.99 2.57 | 10.820 | 3.48 3.00 |
| 88h | 15.280 | 5.15 4.43 | 16.950 | 4.70 4.04 | 13.210 | 5.87 5.06 |
| 112h | 16.180 | 6.05 5.20 | 18.370 | 6.12 5.27 | 15.350 | 8.01 6.90 |
| 136h | 16.370 | 6.24 5.36 | 18.860 | 6.61 5.69 | 15.960 | 8.62 7.43 |

Nota. Elaboración propia

Tabla 66

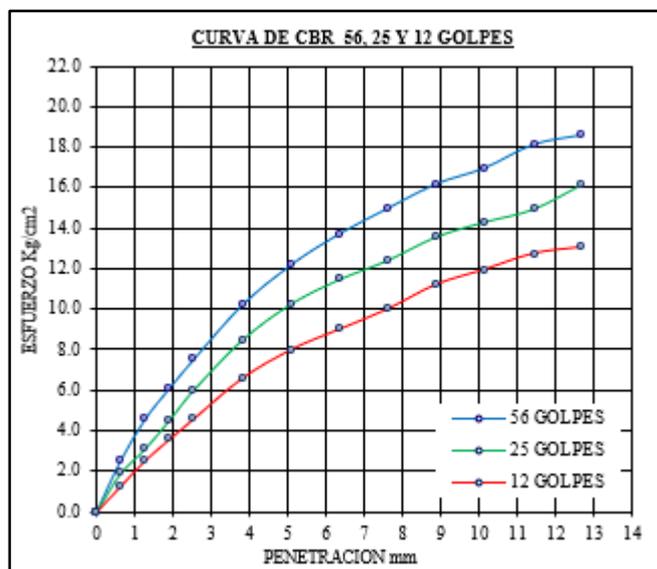
Índice de CBR C-2 con 25% de ceniza

| Pentr. (mm). | 56 Golpes | | | | 25 Golpes | | | | 12 Golpes | | | |
|-----------------|-----------|--------|-------|--------------|-----------|--------|-------|-------------|-----------|--------|-------|-------------|
| | Lect | Kgs | K/cm2 | %CBR | Lect | Kgs | K/cm2 | %CBR | Lect | Kgs | K/cm2 | %CBR |
| 0.00 | | | | | | | | | | | | |
| 0.63 | 0.48 | 48.93 | 2.52 | | 0.36 | 36.70 | 1.89 | | 0.24 | 24.46 | 1.26 | |
| 1.27 | 0.87 | 88.69 | 4.57 | | 0.59 | 60.14 | 3.10 | | 0.48 | 48.93 | 2.52 | |
| 1.91 | 1.16 | 118.25 | 6.10 | | 0.86 | 87.67 | 4.52 | | 0.68 | 69.32 | 3.57 | |
| 2.54 | 1.43 | 145.77 | 7.51 | 10.69 | 1.14 | 116.21 | 5.99 | 8.52 | 0.87 | 88.69 | 4.57 | 6.50 |
| 3.81 | 1.94 | 197.76 | 10.19 | | 1.61 | 164.12 | 8.46 | | 1.25 | 127.42 | 6.57 | |
| 5.09 | 2.32 | 236.49 | 12.19 | 11.61 | 1.95 | 198.78 | 10.25 | 9.76 | 1.52 | 154.94 | 7.99 | 7.61 |
| 6.35 | 2.61 | 266.06 | 13.71 | | 2.18 | 222.22 | 11.45 | | 1.71 | 174.31 | 8.99 | |
| 7.62 | 2.85 | 290.52 | 14.98 | | 2.36 | 240.57 | 12.40 | | 1.90 | 193.68 | 9.98 | |
| 8.89 | 3.08 | 313.97 | 16.18 | | 2.58 | 263.00 | 13.56 | | 2.13 | 217.13 | 11.19 | |
| 10.16 | 3.23 | 329.26 | 16.97 | | 2.72 | 277.27 | 14.29 | | 2.27 | 231.40 | 11.93 | |
| 11.44 | 3.45 | 351.68 | 18.13 | | 2.84 | 289.50 | 14.92 | | 2.42 | 246.69 | 12.72 | |
| 12.70 | 3.54 | 360.86 | 18.60 | | 3.07 | 312.95 | 16.13 | | 2.48 | 252.80 | 13.03 | |

Nota. Elaboración propia

Figura 58

Gráfica de CBR C-2 con 25% de ceniza



Nota. Elaboración propia

3.2.8. Ensayo de Consolidación Unidimensional

Durante el transcurso del procedimiento de la prueba, se consideraron aspectos como de la normatividad (ASTM D-2435, 2011), para tal efecto se

determinó: los porcentajes de deformación, la relación de vacíos y los coeficientes de consolidación tomando como muestra de suelo la C-2, en su estado natural y con la incorporación de ceniza en las proporciones de 5%, 12%, 18% y 25%.

a) Muestra de suelo natural, ver detalle (Anexo 10).

Para el desarrollo de la prueba se realizó un remoldeado de la muestra en las condiciones de humedad óptima y densidad seca máxima, determinado en la prueba de proctor modificado, para tal efecto se muestra el siguiente resultado.

Tabla 67

Resultado etapa de carga, 100% suelo

| Carg. Aplicad. (kg/cm ²) | Lect. final (m.m.) | Asentamiento (m.m.) | Final (m.m.) | Altura Promedio (m.m.) | Drenada (m.m.) | Relación de vacíos (e) | Deformación vertical (%) | t ₅₀ (min) | Coefficiente consolidación Cv |
|--------------------------------------|--------------------|---------------------|--------------|------------------------|----------------|------------------------|--------------------------|-----------------------|-------------------------------|
| 1 | 4.0540 | 0.7335 | 19.600 | 19.600 | 9.800 | 0.921 | 3.742 | 4.500 | 0.0420 |
| 2 | 4.4430 | 1.1225 | 18.478 | 19.039 | 9.519 | 0.811 | 5.727 | 9.000 | 0.0198 |
| 4 | 5.0235 | 1.7030 | 17.897 | 18.187 | 9.094 | 0.754 | 8.689 | 11.000 | 0.0148 |
| 8 | 5.8855 | 2.5650 | 17.035 | 17.466 | 8.733 | 0.669 | 13.087 | 12.000 | 0.0125 |
| 16 | 6.9340 | 3.6135 | 15.987 | 16.511 | 8.255 | 0.567 | 18.436 | 16.000 | 0.0084 |
| 32 | 7.9660 | 4.6455 | 14.955 | 15.471 | 7.735 | 0.465 | 23.702 | 17.000 | 0.0069 |
| 64 | 9.1650 | 5.8445 | 13.756 | 14.355 | 7.178 | 0.348 | 29.819 | 20.000 | 0.0051 |

Nota. Elaboración propia

Tabla 68

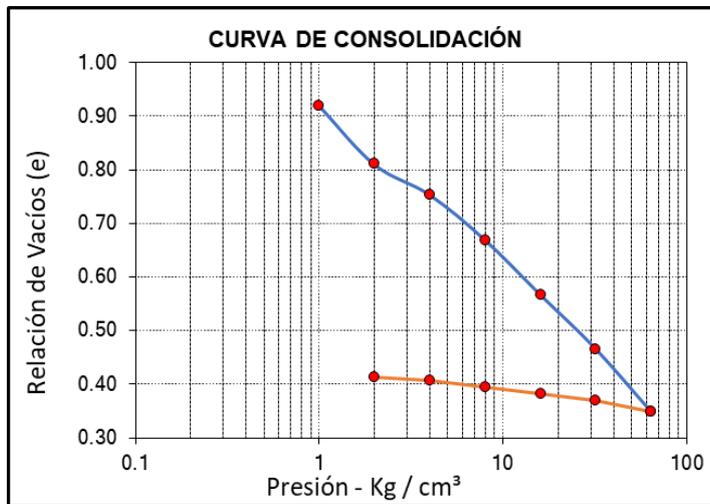
Resultados etapa de descarga, 100% suelo

| Carg. Aplicad. (kg/cm ²) | Lect. final (m.m.) | Asentamiento (m.m.) | Final (m.m.) | Altura Promedio (m.m.) | Drenada (m.m.) | Relación de vacíos (e) | Densidad seca (g/cm ²) | Deformación vertical (%) |
|--------------------------------------|--------------------|---------------------|--------------|------------------------|----------------|------------------------|------------------------------------|--------------------------|
| 64 | 9.1650 | 5.8445 | 13.756 | 13.756 | 6.878 | 0.348 | 2.060 | 29.819 |
| 32 | 8.9435 | 5.6230 | 13.977 | 13.866 | 6.933 | 0.370 | 2.027 | 28.689 |
| 16 | 8.8095 | 5.4890 | 14.111 | 14.044 | 7.022 | 0.383 | 2.008 | 28.005 |
| 8 | 8.6890 | 5.3685 | 14.232 | 14.171 | 7.086 | 0.395 | 1.991 | 27.390 |
| 4 | 8.5710 | 5.2505 | 14.350 | 14.291 | 7.145 | 0.406 | 1.975 | 26.788 |
| 2 | 8.4890 | 5.1685 | 14.432 | 14.391 | 7.195 | 0.414 | 1.963 | 26.370 |

Nota. Elaboración propia

Figura 59

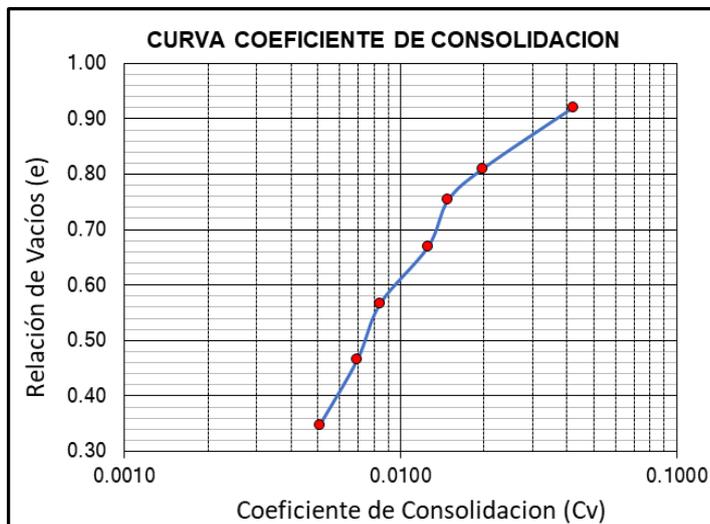
Gráfica de consolidación, suelo natural



Nota. Elaboración propia

Figura 60

Gráfica coeficiente de consolidación, suelo natural



Nota. Elaboración propia

b) Muestra de suelo con 5% de ceniza, ver detalle (Anexo 10).

Para el desarrollo de la prueba se realizó un remoldeado de la muestra de suelo con mezcla de 5% de ceniza en las condiciones de humedad óptima y densidad seca, determinado en la prueba de proctor modificado, para tal efecto se muestra el siguiente resultado.

Tabla 69

Resultado etapa de carga, suelo con 5% de ceniza

| Carg. Aplicad. (kg/cm ²) | Lect. final (m.m.) | Asentamiento (m.m.) | Final (m.m.) | Altura Promedio (m.m.) | Drenada (m.m.) | Relación de vacíos (e) | Deformación vertical (%) | t ₅₀ (min) | Coefficiente consolidación Cv |
|--------------------------------------|--------------------|---------------------|--------------|------------------------|----------------|------------------------|--------------------------|-----------------------|-------------------------------|
| 1 | 3.7025 | 0.6700 | 19.700 | 19.700 | 9.850 | 0.909 | 3.401 | 5.500 | 0.0348 |
| 2 | 4.0575 | 1.0250 | 18.675 | 19.188 | 9.594 | 0.810 | 5.203 | 12.000 | 0.0151 |
| 4 | 4.5875 | 1.5550 | 18.145 | 18.410 | 9.205 | 0.758 | 7.893 | 12.000 | 0.0139 |
| 8 | 5.3750 | 2.3425 | 17.358 | 17.751 | 8.876 | 0.682 | 11.891 | 13.000 | 0.0119 |
| 16 | 6.3325 | 3.3000 | 16.400 | 16.879 | 8.439 | 0.589 | 16.751 | 18.000 | 0.0078 |
| 32 | 7.2750 | 4.2425 | 15.458 | 15.929 | 7.964 | 0.498 | 21.536 | 20.000 | 0.0062 |
| 64 | 8.3655 | 5.3330 | 14.367 | 14.912 | 7.456 | 0.392 | 27.071 | 22.000 | 0.0050 |

Nota. Elaboración propia

Tabla 70

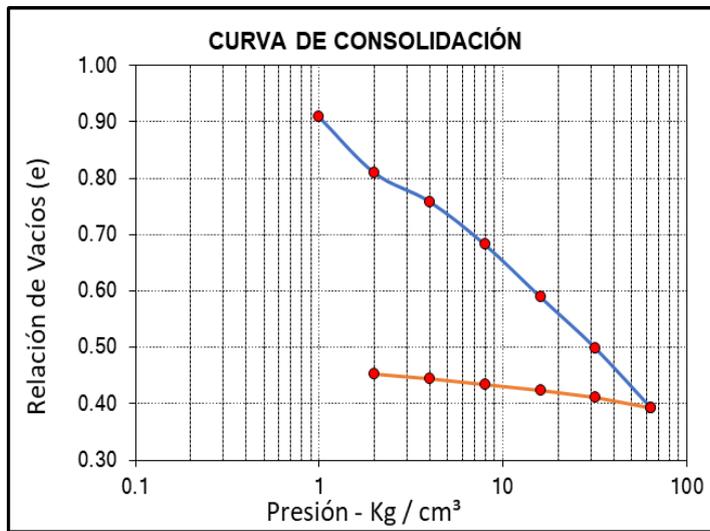
Resultados etapa de descarga, suelo con 5% de ceniza

| Carg. Aplicad. (kg/cm ²) | Lect. final (m.m.) | Asentamiento (m.m.) | Final (m.m.) | Altura Promedio (m.m.) | Drenada (m.m.) | Relación de vacíos (e) | Densidad seca (g/cm ²) | Deformación vertical (%) |
|--------------------------------------|--------------------|---------------------|--------------|------------------------|----------------|------------------------|------------------------------------|--------------------------|
| 64 | 8.3655 | 5.3330 | 14.367 | 14.367 | 7.184 | 0.392 | 1.993 | 27.071 |
| 32 | 8.1675 | 5.1350 | 14.565 | 14.466 | 7.233 | 0.411 | 1.966 | 26.066 |
| 16 | 8.0450 | 5.0125 | 14.688 | 14.626 | 7.313 | 0.423 | 1.950 | 25.444 |
| 8 | 7.9350 | 4.9025 | 14.798 | 14.743 | 7.371 | 0.434 | 1.935 | 24.886 |
| 4 | 7.8275 | 4.7950 | 14.905 | 14.851 | 7.426 | 0.444 | 1.921 | 24.340 |
| 2 | 7.7525 | 4.7200 | 14.980 | 14.943 | 7.471 | 0.452 | 1.912 | 23.959 |

Nota. Elaboración propia

Figura 61

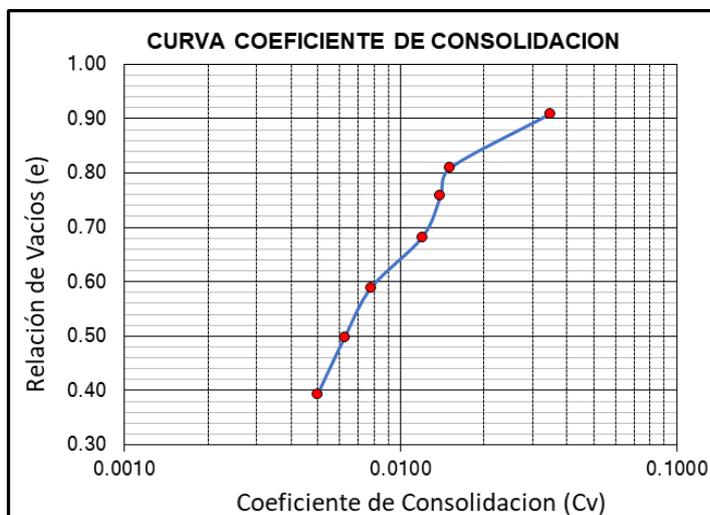
Gráfica de consolidación suelo con 5% de ceniza



Nota. Elaboración propia

Figura 62

Gráfica coeficiente de consolidación, suelo con 5% de ceniza



Nota. Elaboración propia

c) **Muestra de suelo con 12% de ceniza**, ver detalle (Anexo 10).

Para el desarrollo de la prueba se realizó un remoldeado de la muestra de suelo con mezcla de 12% de ceniza en las condiciones de humedad óptima y densidad seca, determinado en la prueba de proctor modificado, para tal efecto se muestra el siguiente resultado.

Tabla 71

Resultado etapa de carga, suelo con 12% de ceniza

| Carg. Aplicad. (kg/cm ²) | Lect. final (m.m.) | Asentamiento (m.m.) | Final (m.m.) | Altura Promedio (m.m.) | Drenada (m.m.) | Relación de vacíos (e) | Deformación vertical (%) | t ₅₀ (min) | Coefficiente consolidación Cv |
|--------------------------------------|--------------------|---------------------|--------------|------------------------|----------------|------------------------|--------------------------|-----------------------|-------------------------------|
| 1 | 3.2215 | 0.5830 | 18.900 | 18.900 | 9.450 | 0.905 | 3.085 | 6.000 | 0.0293 |
| 2 | 3.5300 | 0.8915 | 18.009 | 18.454 | 9.227 | 0.815 | 4.717 | 12.000 | 0.0140 |
| 4 | 3.9910 | 1.3525 | 17.548 | 17.778 | 8.889 | 0.769 | 7.156 | 15.000 | 0.0104 |
| 8 | 4.6765 | 2.0380 | 16.862 | 17.205 | 8.602 | 0.700 | 10.783 | 17.000 | 0.0086 |
| 16 | 5.5095 | 2.8710 | 16.029 | 16.446 | 8.223 | 0.616 | 15.190 | 19.000 | 0.0070 |
| 32 | 6.3295 | 3.6910 | 15.209 | 15.619 | 7.810 | 0.533 | 19.529 | 20.000 | 0.0060 |
| 64 | 7.2620 | 4.6235 | 14.277 | 14.743 | 7.371 | 0.439 | 24.463 | 23.000 | 0.0047 |

Nota. Elaboración propia

Tabla 72

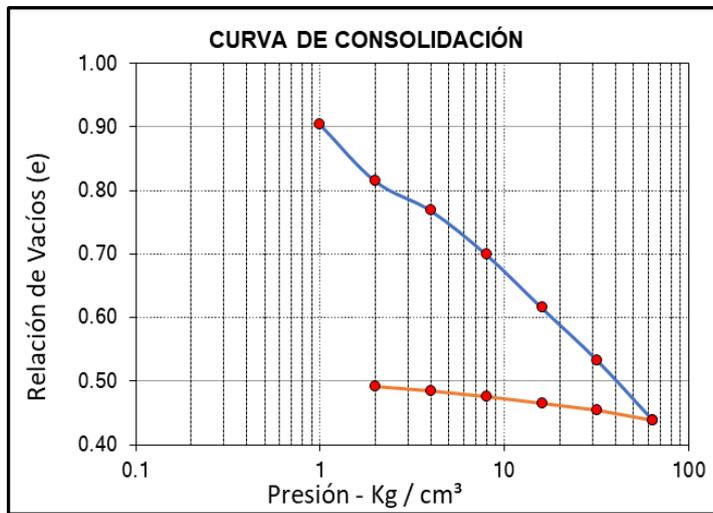
Resultados etapa de descarga, suelo con 12% de ceniza

| Carg. Aplicad. (kg/cm ²) | Lect. final (m.m.) | Asentamiento (m.m.) | Final (m.m.) | Altura Promedio (m.m.) | Drenada (m.m.) | Relación de vacíos (e) | Densidad seca (g/cm ²) | Deformación vertical (%) |
|--------------------------------------|--------------------|---------------------|--------------|------------------------|----------------|------------------------|------------------------------------|--------------------------|
| 64 | 7.2620 | 4.6235 | 14.277 | 14.277 | 7.138 | 0.439 | 1.914 | 24.463 |
| 32 | 7.1055 | 4.4670 | 14.433 | 14.355 | 7.177 | 0.455 | 1.893 | 23.635 |
| 16 | 6.9990 | 4.3605 | 14.540 | 14.486 | 7.243 | 0.466 | 1.879 | 23.071 |
| 8 | 6.9035 | 4.2650 | 14.635 | 14.587 | 7.294 | 0.475 | 1.867 | 22.566 |
| 4 | 6.8100 | 4.1715 | 14.729 | 14.682 | 7.341 | 0.485 | 1.855 | 22.071 |
| 2 | 6.7445 | 4.1060 | 14.794 | 14.761 | 7.381 | 0.491 | 1.847 | 21.725 |

Nota. Elaboración propia

Figura 63

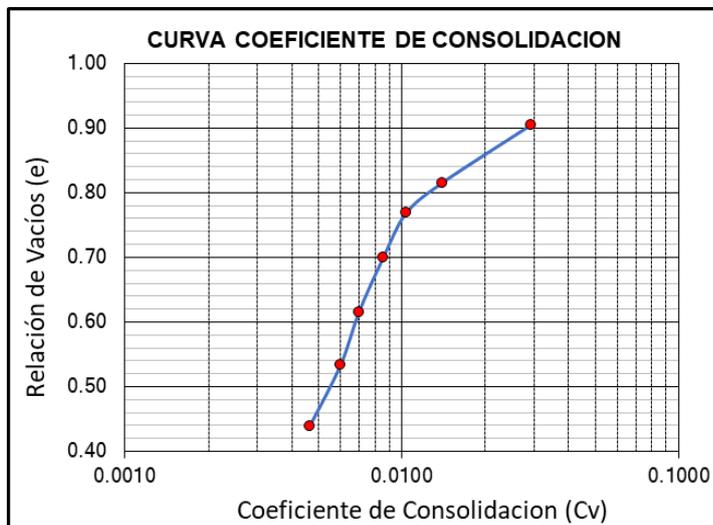
Gráfica de consolidación suelo con 12% de ceniza



Nota. Elaboración propia

Figura 64

Gráfica coeficiente de consolidación, suelo con 12% de ceniza



Nota. Elaboración propia

d) Muestra de suelo con 18% de ceniza, ver detalle (Anexo 10).

Para el desarrollo de la prueba se realizó un remoldeado de la muestra de suelo con mezcla de 18% de ceniza en las condiciones de humedad óptima y densidad seca, determinado en la prueba de proctor modificado, para tal efecto se muestra el siguiente resultado.

Tabla 73*Resultado etapa de carga, suelo con 18% de ceniza*

| Carg. Aplicad. (kg/cm ²) | Lect. final (m.m.) | Asentamiento (m.m.) | Final (m.m.) | Altura Promedio (m.m.) | Drenada (m.m.) | Relación de vacíos (e) | Deformación vertical (%) | t ₅₀ (min) | Coefficiente consolidación Cv |
|--------------------------------------|--------------------|---------------------|--------------|------------------------|----------------|------------------------|--------------------------|-----------------------|-------------------------------|
| 1 | 2.8710 | 0.5360 | 18.900 | 18.900 | 9.450 | 0.931 | 2.836 | 6.500 | 0.0271 |
| 2 | 3.1245 | 0.7895 | 18.111 | 18.505 | 9.253 | 0.851 | 4.177 | 14.000 | 0.0120 |
| 4 | 3.5325 | 1.1975 | 17.703 | 17.907 | 8.953 | 0.809 | 6.336 | 17.000 | 0.0093 |
| 8 | 4.1390 | 1.8040 | 17.096 | 17.399 | 8.700 | 0.747 | 9.545 | 18.000 | 0.0083 |
| 16 | 4.8760 | 2.5410 | 16.359 | 16.728 | 8.364 | 0.672 | 13.444 | 21.000 | 0.0066 |
| 32 | 5.6020 | 3.2670 | 15.633 | 15.996 | 7.998 | 0.598 | 17.286 | 20.000 | 0.0063 |
| 64 | 6.4450 | 4.1100 | 14.790 | 15.212 | 7.606 | 0.511 | 21.746 | 26.000 | 0.0044 |

Nota. Elaboración propia

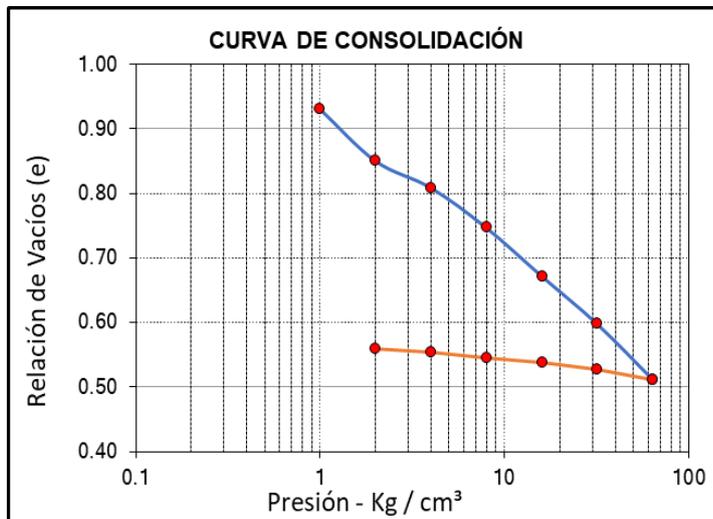
Tabla 74*Resultados etapa de descarga, suelo con 18% de ceniza*

| Carg. Aplicad. (kg/cm ²) | Lect. final (m.m.) | Asentamiento (m.m.) | Final (m.m.) | Altura Promedio (m.m.) | Drenada (m.m.) | Relación de vacíos (e) | Densidad seca (g/cm ²) | Deformación vertical (%) |
|--------------------------------------|--------------------|---------------------|--------------|------------------------|----------------|------------------------|------------------------------------|--------------------------|
| 64 | 6.4450 | 4.1100 | 14.790 | 14.790 | 7.395 | 0.511 | 1.801 | 21.746 |
| 32 | 6.2890 | 3.9540 | 14.946 | 14.868 | 7.434 | 0.527 | 1.782 | 20.921 |
| 16 | 6.1945 | 3.8595 | 15.041 | 14.993 | 7.497 | 0.537 | 1.771 | 20.421 |
| 8 | 6.1100 | 3.7750 | 15.125 | 15.083 | 7.541 | 0.546 | 1.761 | 19.974 |
| 4 | 6.0270 | 3.6920 | 15.208 | 15.167 | 7.583 | 0.554 | 1.751 | 19.534 |
| 2 | 5.9695 | 3.6345 | 15.266 | 15.237 | 7.618 | 0.560 | 1.745 | 19.230 |

Nota. Elaboración propia

Figura 65

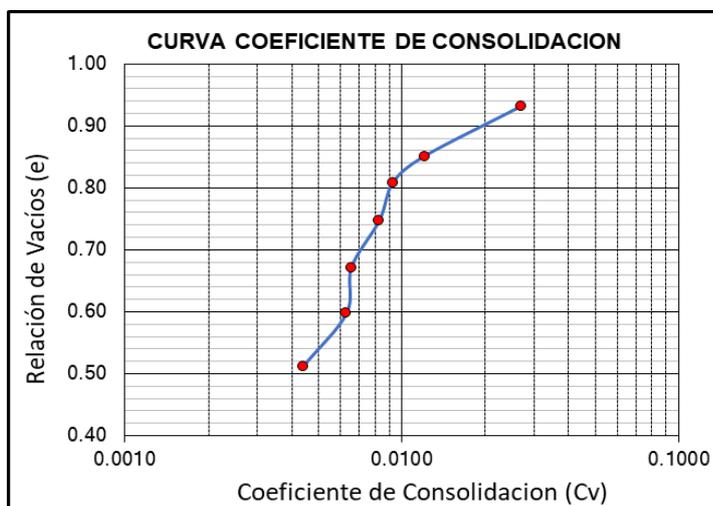
Gráfica de consolidación suelo con 18% de ceniza



Nota. Elaboración propia

Figura 66

Gráfica coeficiente de consolidación, suelo con 18% de ceniza



Nota. Elaboración propia

e) Muestra de suelo con 25% de ceniza, ver detalle (Anexo 10).

Para el desarrollo de la prueba se realizó un remoldeado de la muestra de suelo con mezcla de 25% de ceniza en las condiciones de humedad óptima y densidad seca, determinado en la prueba de proctor modificado, para tal efecto se muestra el siguiente resultado.

Tabla 75*Resultado etapa de carga, suelo con 25% de ceniza*

| Carg. Aplicad. (kg/cm ²) | Lect. final (m.m.) | Asentamiento (m.m.) | Final (m.m.) | Altura Promedio (m.m.) | Drenada (m.m.) | Relación de vacíos (e) | Deformación vertical (%) | t ₅₀ (min) | Coefficiente consolidación Cv |
|--------------------------------------|--------------------|---------------------|--------------|------------------------|----------------|------------------------|--------------------------|-----------------------|-------------------------------|
| 1 | 2.9990 | 0.5425 | 19.600 | 19.600 | 9.800 | 1.038 | 2.768 | 5.000 | 0.0378 |
| 2 | 3.2865 | 0.8300 | 18.770 | 19.185 | 9.593 | 0.952 | 4.235 | 12.000 | 0.0151 |
| 4 | 3.7160 | 1.2595 | 18.341 | 18.555 | 9.278 | 0.907 | 6.426 | 15.000 | 0.0113 |
| 8 | 4.3540 | 1.8975 | 17.703 | 18.022 | 9.011 | 0.841 | 9.681 | 18.000 | 0.0089 |
| 16 | 5.1295 | 2.6730 | 16.927 | 17.315 | 8.657 | 0.760 | 13.638 | 20.000 | 0.0074 |
| 32 | 5.8930 | 3.4365 | 16.164 | 16.545 | 8.273 | 0.681 | 17.533 | 19.000 | 0.0071 |
| 64 | 6.7795 | 4.3230 | 15.277 | 15.720 | 7.860 | 0.588 | 22.056 | 23.000 | 0.0053 |

Nota. Elaboración propia

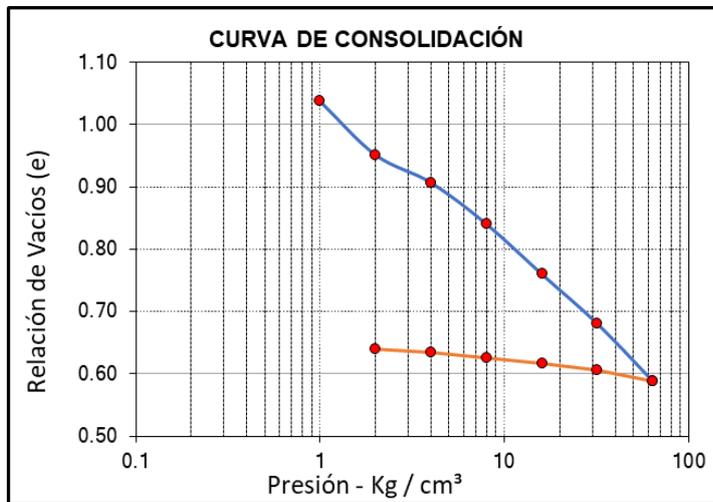
Tabla 76*Resultados etapa de descarga, suelo con 25% de ceniza*

| Carg. Aplicad. (kg/cm ²) | Lect. final (m.m.) | Asentamiento (m.m.) | Final (m.m.) | Altura Promedio (m.m.) | Drenada (m.m.) | Relación de vacíos (e) | Densidad seca (g/cm ²) | Deformación vertical (%) |
|--------------------------------------|--------------------|---------------------|--------------|------------------------|----------------|------------------------|------------------------------------|--------------------------|
| 64 | 6.7795 | 4.3230 | 15.277 | 15.277 | 7.639 | 0.588 | 1.705 | 22.056 |
| 32 | 6.6155 | 4.1590 | 15.441 | 15.359 | 7.680 | 0.605 | 1.687 | 21.219 |
| 16 | 6.5165 | 4.0600 | 15.540 | 15.491 | 7.745 | 0.616 | 1.676 | 20.714 |
| 8 | 6.4275 | 3.9710 | 15.629 | 15.585 | 7.792 | 0.625 | 1.667 | 20.260 |
| 4 | 6.3405 | 3.8840 | 15.716 | 15.673 | 7.836 | 0.634 | 1.657 | 19.816 |
| 2 | 6.2795 | 3.8230 | 15.777 | 15.747 | 7.873 | 0.640 | 1.651 | 19.505 |

Nota. Elaboración propia

Figura 67

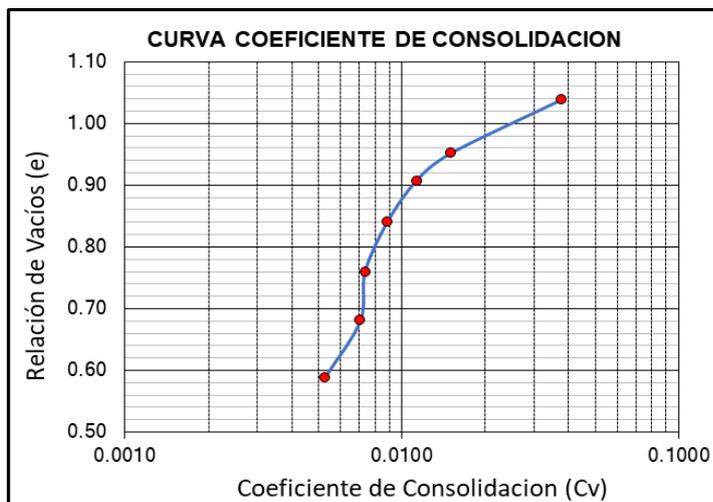
Gráfica de consolidación suelo con 25% de ceniza



Nota. Elaboración propia

Figura 68

Gráfica coeficiente de consolidación, suelo con 25% de ceniza



Nota. Elaboración propia

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. HIPÓTESIS GENERAL

Como hipótesis general se planteó que: “La estabilización de suelos arcillosos incorporando cenizas de madera (aserrín), mejora de manera positiva el comportamiento mecánico - deformacional en el mejoramiento de la subrasante de las vías de la urbanización las gardenias de la ciudad de Juliaca”. Los resultados son los siguientes:

4.1.1. Composición química de la Ceniza (aserrín)

La constitución química de la ceniza de madera (aserrín), se realizó mediante análisis de soluciones químicas, obteniéndose los siguientes resultados, ver tabla 77.

Tabla 77

Resultados de la constitución química de la ceniza y aserrín en crudo

| Composición química | Ceniza | Aserrín |
|------------------------------|------------|------------|
| Potencial de hidrogeno (PH) | 8.73 | 7.19 |
| Conductividad eléctrica (CE) | 3.42 mS/cm | 2.20 mS/cm |
| Cloruros (Cl) | 496.44 ppm | 155.02 ppm |
| Sulfatos (SO ₄) | 360.00 ppm | 308.00 ppm |
| Dióxido de silicio | 7.958 % | 3.151 % |
| Oxido de magnesio | 2.68 % | 1.739 % |
| Oxido de manganeso | 0.88 % | 0.009 % |
| Trióxido de aluminio | 0.66 % | 0.195 % |
| Trióxido de hierro | 0.32 % | 0.086 % |
| Oxido de zinc | 0.012 % | 0.004 % |

Nota. Elaboración propia

En la tabla 77 se observa que dentro de la composición química de la ceniza se tiene el contenido de propiedades puzolánicas como el dióxido de silicio y el trióxido de aluminio que son considerados compuestos cementantes.

4.1.2. Comportamiento mecánico (resistencia al esfuerzo)

Los resultados para verificar la mejora del comportamiento mecánico lo realizamos a través de la determinación de la capacidad de resistencia (índice de CBR).

Tabla 78

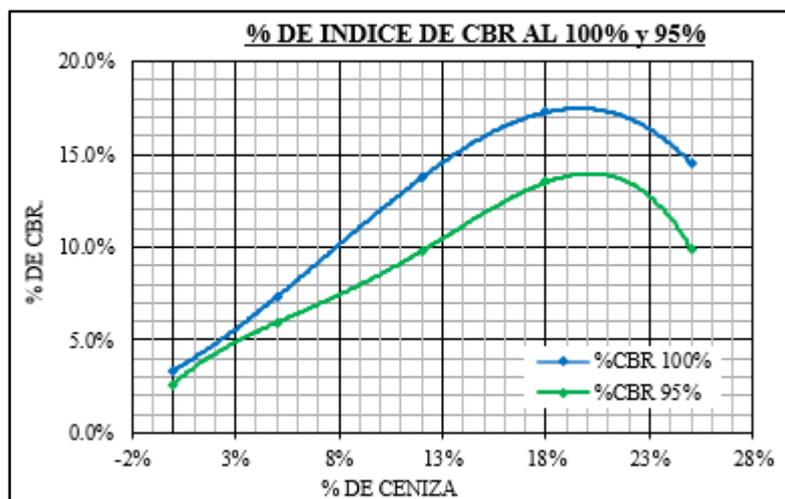
Índice de CBR, muestra C-1

| | | | | | | |
|-----------------------|---|-------------|-------------|--------------|--------------|--------------|
| Porcentaje de Arcilla | % | 100% | 95% | 88% | 82% | 75% |
| Porcentaje de Ceniza | % | 0.00 | 5.00 | 12.00 | 18.00 | 25.00 |
| CBR - 100 % | % | 3.36 | 7.32 | 13.75 | 17.26 | 14.50 |
| CBR - 95 % | % | 2.62 | 5.95 | 9.80 | 13.50 | 9.90 |

Nota. Elaboración propia

Figura 69

CBR al 100% y 95%, muestra C-1



Nota. Elaboración propia

Teniendo los datos hallados de la resistencia al esfuerzo de la muestra C-1, se verifica que los valores de CBR en proporciones de 5%, 12%, 18% con mezcla de ceniza se incrementan de manera positiva en 7.32%, 13.75% y 17.26%, mientras en la proporción de mezcla del 25 % baja a un valor de CBR de 14.50%, lo que indica que a mayor proporción de ceniza, la resistencia del suelo disminuya. En tal sentido la estabilización de un suelo arcilloso con la incorporación de cenizas de madera (aserrín) mejora de manera significativa el comportamiento mecánico llegando a un CBR entre el 10% y 20% considerándose como una subrasante buena.

Tabla 79

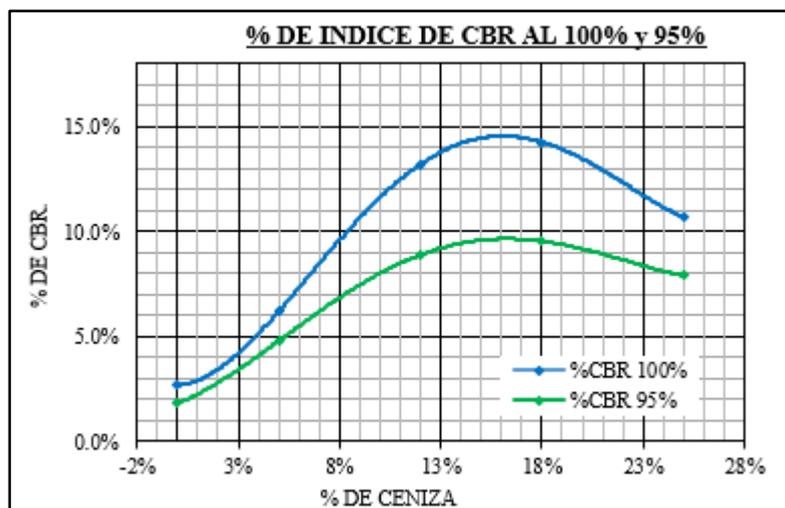
Índice de CBR, muestra C-2

| | | | | | | |
|-----------------------|---|-------------|-------------|--------------|--------------|--------------|
| Porcentaje de Arcilla | % | 100% | 95% | 88% | 82% | 75% |
| Porcentaje de Ceniza | % | 0.00 | 5.00 | 12.00 | 18.00 | 25.00 |
| CBR - 100 % | % | 2.69 | 6.20 | 13.23 | 14.27 | 10.69 |
| CBR - 95 % | % | 1.82 | 4.80 | 8.90 | 9.55 | 7.90 |

Nota. Elaboración propia

Figura 70

CBR al 100% y 95%, muestra C-2



Nota. Elaboración propia



Teniendo los datos hallados de la resistencia al esfuerzo de la muestra C-2, se verifica que los valores de CBR en proporciones de 5%, 12%, 18% con mezcla de ceniza se incrementan de manera positiva en 6.20%, 13.23% y 14.27%, mientras en la proporción de mezcla del 25 % baja el valor de CBR en 10.69%, lo que indica que a mayor proporción de ceniza, la resistencia del suelo disminuya. en efecto la estabilización de un suelo arcilloso con la incorporación de cenizas de madera (aserrín) mejora de manera significativa el comportamiento mecánico llegando a un CBR entre el 10 y 20% considerándose como una subrasante buena.

4.1.3. Comportamiento deformacional

Los resultados para verificar la mejora del comportamiento deformacional se realizó mediante el ensayo de consolidación unidimensional.

Tabla 80

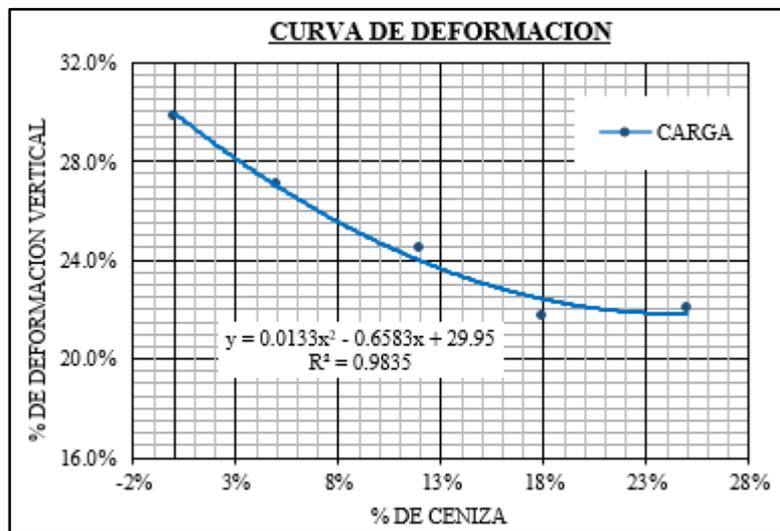
Resultados de deformación

| | | | | | | |
|---------------------------------|----|-------------|-------------|--------------|--------------|--------------|
| Porcentaje de Arcilla | % | 100% | 95% | 88% | 82% | 75% |
| Porcentaje de Ceniza | % | 0.00 | 5.00 | 12.00 | 18.00 | 25.00 |
| Asentamiento | mm | 5.84 | 5.33 | 4.62 | 4.11 | 4.32 |
| Porcentaje deformación vertical | % | 29.82 | 27.07 | 24.46 | 21.75 | 22.06 |

Nota. Elaboración propia

Figura 71

Curva de deformaciones



Nota. Elaboración propia

Respecto a los resultados de deformabilidad se verifica una disminución del porcentaje de deformación vertical en las combinaciones de 5%, 12% y 18%, mientras que en la proporción del 25% se observa un ligero incremento de la deformación o tiende a ser constante.

4.2. HIPÓTESIS ESPECÍFICA 1

“La incorporación de cenizas de madera (aserrín), en porcentajes de 5%, 12%, 18% y 25% mejora significativamente su comportamiento mecánico de un suelo arcilloso, en el mejoramiento de la subrasante, de las vías de la urbanización las gardenias de la ciudad de Juliaca”. Teniendo como resultados lo siguiente:

4.2.1. Plasticidad del suelo

Para determinar a plasticidad de los suelos se desarrolló a través del ensayo de límites de consistencia.

Tabla 81*Resultados del índice de plasticidad muestra C-1*

| | | | | | |
|---------------------------|---------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| Suelo (%) | 100.00 | 95.00 | 88.00 | 82.00 | 75.00 |
| Ceniza (%) | 0.00 | 5.00 | 12.00 | 18.00 | 25.00 |
| Límite Líquido (%) | 47.62 | 44.45 | 42.30 | 39.70 | 41.86 |
| Límite Plástico (%) | 22.84 | 23.60 | 23.48 | 22.45 | 24.76 |
| Índice de plasticidad (%) | 24.78 | 20.85 | 18.82 | 17.25 | 17.10 |

Nota. Elaboración propia

Tabla 82*Resultados del índice de plasticidad muestra C-2*

| | | | | | |
|---------------------------|---------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| Suelo (%) | 100.00 | 95.00 | 88.00 | 82.00 | 75.00 |
| Ceniza (%) | 0.00 | 5.00 | 12.00 | 18.00 | 25.00 |
| Límite Líquido (%) | 53.50 | 46.08 | 43.30 | 41.60 | 41.55 |
| Límite Plástico (%) | 23.19 | 22.39 | 22.22 | 21.71 | 22.24 |
| Índice de plasticidad (%) | 30.31 | 23.69 | 21.08 | 19.89 | 19.31 |

Nota. Elaboración propia

Los resultados verifican una disminución de la plasticidad con respecto a la inicial hasta en un 31% para la muestra C-1 y en la muestra C-2 disminuye hasta en un 36.29% respecto al inicial.

4.2.2. Compactación

Los resultados de la compactación se realizaron mediante la prueba de proctor modificado, donde se determinó la humedad óptima y la densidad seca máxima.

Tabla 83

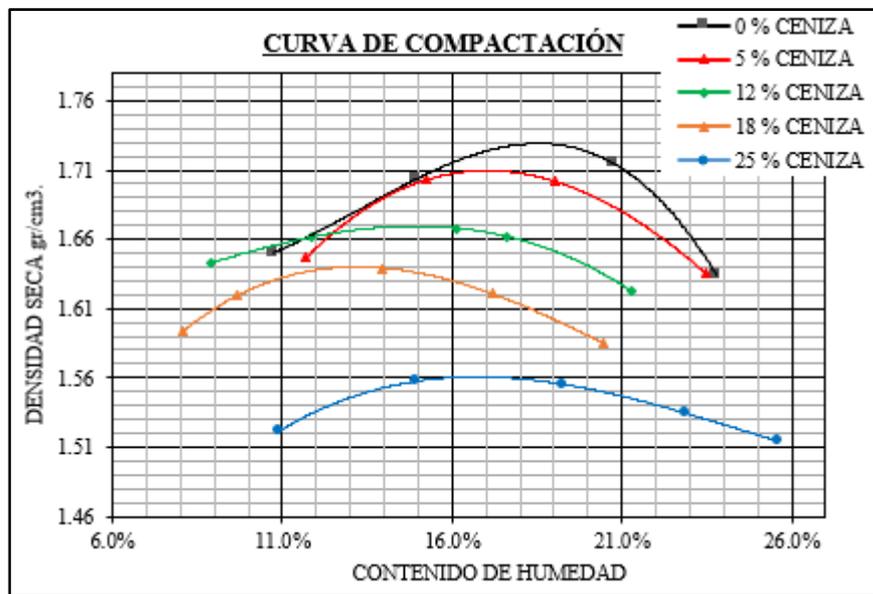
Resultados proctor modificado, muestra C-1

| | | | | | | |
|-----------------------|---------------------|-------------|-------------|--------------|--------------|--------------|
| Porcentaje de arcilla | % | 100% | 95% | 88% | 82% | 75% |
| Porcentaje de ceniza | % | 0.00 | 5.00 | 12.00 | 18.00 | 25.00 |
| Densidad seca máxima | grs/cm ³ | 1.73 | 1.71 | 1.67 | 1.63 | 1.55 |
| Humedad optima | % | 18.50 | 17.00 | 15.30 | 13.20 | 16.70 |

Nota. Elaboración propia

Figura 72

Gráfica de compactación, muestra C-1



Nota. Elaboración propia

Tabla 84

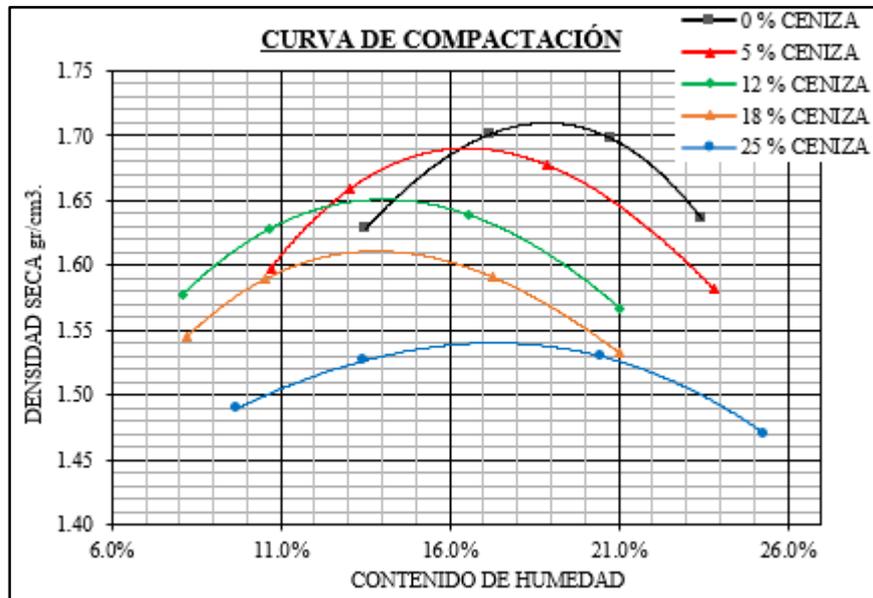
Resultados proctor modificado, muestra C-2

| | | | | | | |
|-----------------------|---------------------|-------------|-------------|--------------|--------------|--------------|
| Porcentaje de arcilla | % | 100% | 95% | 88% | 82% | 75% |
| Porcentaje de ceniza | % | 0.00 | 5.00 | 12.00 | 18.00 | 25.00 |
| Densidad seca máxima | grs/cm ³ | 1.71 | 1.69 | 1.65 | 1.60 | 1.55 |
| Humedad Optima | % | 19.00 | 16.50 | 14.15 | 13.80 | 17.50 |

Nota. Elaboración propia

Figura 73

Gráfica de compactación, muestra C-2



Nota. Elaboración propia

Como se puede apreciar los resultados tanto de la muestra C-1 y C-2 en las proporciones de mezcla de 5%, 12% y 18% con ceniza, los contenidos de humedad óptima disminuyen respecto al suelo natural, así como las densidades secas máximas, sin embargo, en la proporción de mezcla del 25% de ceniza incrementa el contenido de humedad, pero la densidad seca sigue disminuyendo.

En efecto, en una mezcla mayor al 25 % de ceniza las propiedades mecanizas tienden a disminuir por el incremento de la humedad y la disminución de la densidad seca, puesto que se aleja de la línea de saturación.

4.2.3. Resistencia al esfuerzo

Para calcular la resistencia de los suelos (índice de CBR), se realizó a través del ensayo de CBR, mostrando el siguiente resultado:

Tabla 85

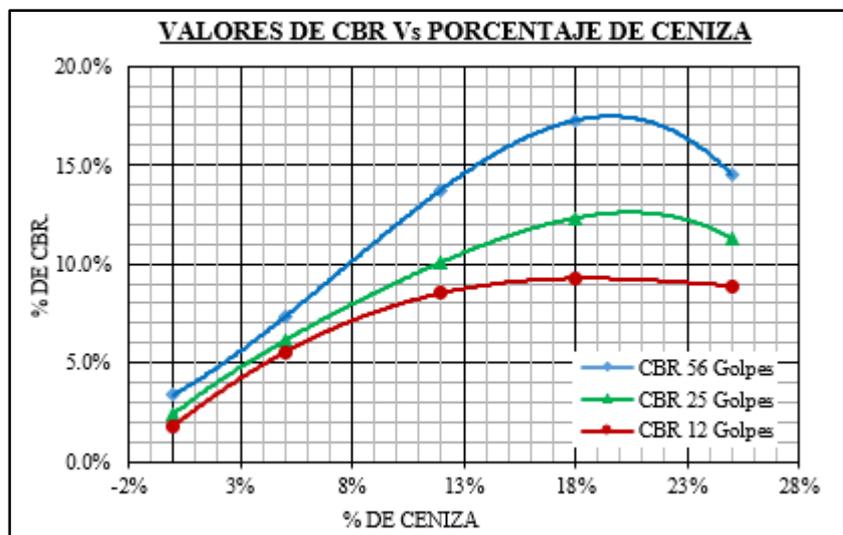
Resultados de CBR, muestra C-1

| | | | | | | |
|-----------------------|---|-------------|-------------|--------------|--------------|--------------|
| Porcentaje de Arcilla | % | 100% | 95% | 88% | 82% | 75% |
| Porcentaje de Ceniza | % | 0.00 | 5.00 | 12.00 | 18.00 | 25.00 |
| CBR - 56 Glp. | % | 3.36 | 7.32 | 13.75 | 17.26 | 14.50 |
| CBR - 25 Glp. | % | 2.39 | 6.13 | 10.09 | 12.33 | 11.28 |
| CBR - 12 Glp. | % | 1.79 | 5.53 | 8.52 | 9.27 | 8.89 |
| CBR - 100 % | % | 3.36 | 7.32 | 13.75 | 17.26 | 14.50 |
| CBR - 95 % | % | 2.62 | 5.95 | 9.80 | 13.50 | 9.90 |

Nota. Elaboración propia

Figura 74

Gráfica de CBR vs % de ceniza, muestra C-1



Nota. Elaboración propia

Tabla 86

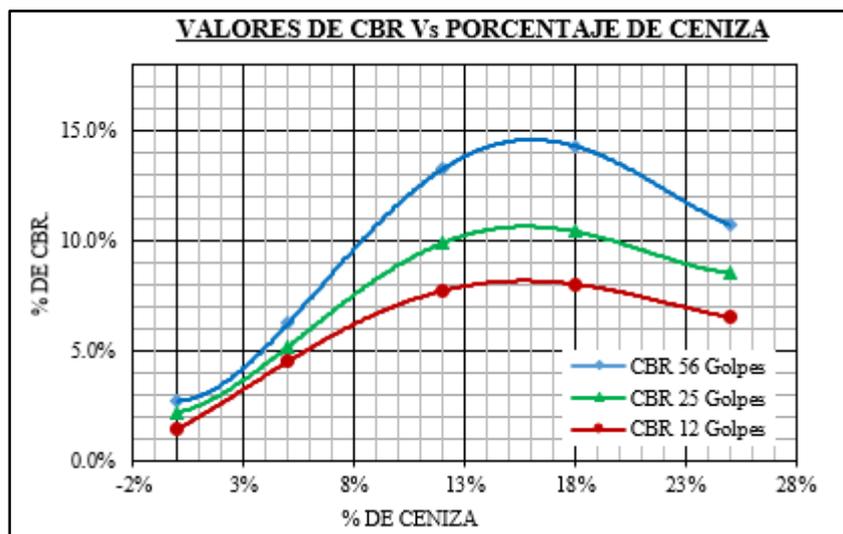
Resultados de CBR, muestra C-2

| | | | | | | |
|-----------------------|---|-------------|-------------|--------------|--------------|--------------|
| Porcentaje de Arcilla | % | 100% | 95% | 88% | 82% | 75% |
| Porcentaje de Ceniza | % | 0.00 | 5.00 | 12.00 | 18.00 | 25.00 |
| CBR - 56 Glp. | % | 2.69 | 6.20 | 13.23 | 14.27 | 10.69 |
| CBR - 25 Glp. | % | 2.17 | 5.16 | 9.86 | 10.39 | 8.52 |
| CBR - 12 Glp. | % | 1.42 | 4.48 | 7.70 | 8.00 | 6.50 |
| CBR - 100 % | % | 2.69 | 6.20 | 13.23 | 14.27 | 10.69 |
| CBR - 95 % | % | 1.82 | 4.80 | 8.90 | 9.55 | 7.90 |

Nota. Elaboración propia

Figura 75

Gráfica de CBR vs % de ceniza, muestra C-2



Nota. Elaboración propia

“Los resultados son semejantes tanto para la muestra C-1 y C-2, en donde la resistencia del CBR incrementan en las mezclas de ceniza de 5%, 12% y 18%, sin embargo, en la combinación del 25 % el CBR disminuye similarmente en las 3 energías de compactación 12, 25, 56 golpes”.

Realizando el análisis de la estadística para validar la hipótesis específica 1, mediante el análisis de la varianza, se tiene lo siguiente:

Si $F > 0.05$, se acepta la H_0 (la incorporación de cenizas de madera aserrín no mejora el comportamiento mecánico); pero si $F \leq 0.05$, se acepta la H_a (la incorporación de cenizas de madera aserrín mejora significativamente su comportamiento mecánico).

Tabla 87

Análisis de varianza para el % de CBR según concentración de ceniza

| Rango de variación | G.L. | Σ de cuadrado | Cuadrado de la media | Valor F | > F |
|--------------------|------|----------------------|----------------------|---------|--------|
| CENIZA | 4 | 221.52586 | 55.381465 | 21.78 | 0.0023 |
| Error | 5 | 12.71495 | 2.54299 | | |
| Total, corregido | 9 | 234.24081 | | | |

Nota. Elaboración propia

En la tabla 87 observamos que el cambio de concentraciones de cenizas resulto altamente significativo, puesto que el valor ($F \leq 0.05$), lo que indica que las concentraciones de mezcla tienen un valor de CBR diferentes en términos estadísticos, por lo cual aceptamos la hipótesis alterna y rechazamos la nula.

Tabla 88

Comparación de medias de Dunnett CBR vs concentración de ceniza

| Diferencia mínima significativa | 5.54 | Error de cuadrado medio | 2.54 | | | |
|---------------------------------|--------|-------------------------|----------------------|---------------------------------------|-------|-----|
| Valor crítico de t de Dunnett | 3.48 | | | | | |
| Testigo | ceniza | Media | Diferencia de Medias | Límite de confianza al 95% Simultáneo | | |
| - | 18 | 15.765 | 12.74 | 7.20 | 18.28 | *** |
| - | 12 | 13.490 | 10.47 | 4.92 | 16.01 | *** |
| - | 25 | 12.595 | 9.57 | 4.03 | 15.11 | *** |
| - | 5 | 6.760 | 3.74 | -1.81 | 9.28 | - |
| - | 0 | 3.025 | - | - | - | - |

Nota. Elaboración propia



En la tabla 88 se muestra la comparación de medias de Dunnett para las concentraciones de ceniza, en donde se observa que las concentraciones de 18, 12 y 25% son diferentes al testigo (sin ceniza) y a la concentración 5%, estas dos últimas son similares.

En consecuencia, el planteamiento de la hipótesis específica 1 se valida de manera positiva, puesto que las proporciones de ceniza en 12%, 18% y 25%, mejoran de manera significativa el comportamiento mecánico del suelo muestra obteniéndose valores de CBR de 17.26% en la muestra C-1 y en la muestra C-2 un valor de CBR de 14.27%.

4.3. HIPÓTESIS ESPECÍFICA 2

“La incorporación de cenizas de madera (aserrín), en mezclas de 5%, 12%, 18% y 25% mejora de manera positiva su comportamiento deformacional de un suelo arcilloso, en el mejoramiento de la subrasante, de las vías de la urbanización las gardenias de la ciudad de Juliaca”, en el cual los resultados se verificaron mediante el ensayo de consolidación unidimensional.

4.3.1. Comportamiento deformacional

Para determinar el comportamiento de deformacional se desarrolló mediante el ensayo de consolidación unidimensional. Para ello se consideraron las etapas de pre-consolidación, consolidación primaria y la consolidación secundaria, los resultados obtenidos son mediante la curva tiempo vs deformación, (logaritmo de tiempo) y la grafica del coeficiente de consolidación entre la relación de vacíos.

Tabla 89

Resultados de deformación etapa de carga

| | | | | | | |
|---------------------------------|----------------------|-------------|-------------|--------------|--------------|--------------|
| Porcentaje de Arcilla | % | 100% | 95% | 88% | 82% | 75% |
| Porcentaje de Ceniza | % | 0.00 | 5.00 | 12.00 | 18.00 | 25.00 |
| Asentamiento | mm | 5.84 | 5.33 | 4.62 | 4.11 | 4.32 |
| Porcentaje deformación vertical | % | 29.82 | 27.07 | 24.46 | 21.75 | 22.06 |
| Relación de vacíos (e) | | 0.348 | 0.392 | 0.439 | 0.511 | 0.588 |
| Coeficiente consolidación (Cv) | cm ² /min | 0.0051 | 0.0050 | 0.0047 | 0.0044 | 0.0053 |

Nota. Elaboración propia

Tabla 90

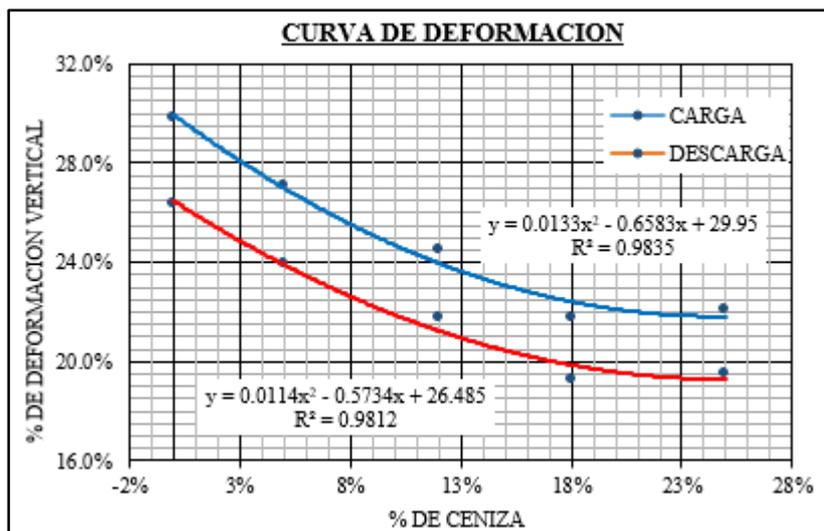
Resultados de deformación etapa de descarga

| | | | | | | |
|---------------------------------|----|-------------|-------------|--------------|--------------|--------------|
| Porcentaje de Arcilla | % | 100% | 95% | 88% | 82% | 75% |
| Porcentaje de Ceniza | % | 0.00 | 5.00 | 12.00 | 18.00 | 25.00 |
| Asentamiento | mm | 5.17 | 4.72 | 4.11 | 3.63 | 3.82 |
| Porcentaje deformación vertical | % | 26.37 | 23.96 | 21.72 | 19.23 | 19.51 |
| Relación de vacíos (e) | | 0.414 | 0.452 | 0.491 | 0.560 | 0.640 |

Nota. Elaboración propia

Figura 76

Curva de deformaciones carga y descarga

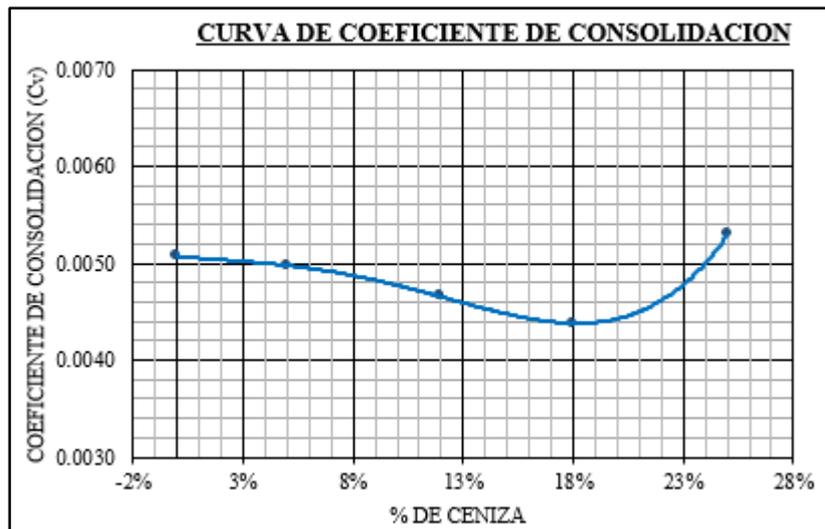


Nota. Elaboración propia

En la figura 76 se aprecia las gráficas que se aproximan a una regresión de una ecuación de segundo orden, en el cual resulta una razón de 0.98 lo que significa a una aproximación de radio 1.

Figura 77

Curva del coeficiente de consolidación



Nota. Elaboración propia

Los resultados respecto a la deformación vertical disminuyen de 29.82% a 21.75% respecto al suelo natural esto en la proporción del 18% de ceniza, sin embargo, en la proporción de mezcla del 25 % el porcentaje de deformación disminuye al 22.06%, esto indica que a mayor porcentaje que el 25%, la deformación vertical aumenta y con respecto al coeficiente de consolidación los valores son directamente proporcionales a los valores de la deformación vertical, variando de 0.0051 a 0.0044 como se indica en la tabla 76.

Realizando el análisis de la estadística para validar la hipótesis específica 2, mediante el análisis de la varianza, se tiene lo siguiente:



Si $F > 0.05$, se acepta la H_0 (la incorporación de cenizas de madera aserrín no mejora el comportamiento deformacional); pero si $F \leq 0.05$, se acepta la H_a (la incorporación de cenizas de madera aserrín mejora de manera positiva su comportamiento deformacional).

Tabla 91

Análisis de varianza para la deformación según concentración de ceniza

| Rango de variación | G.L. | Σ de cuadrado | Cuadrado de la media | Valor F | > F |
|--------------------|------|----------------------|----------------------|---------|--------|
| CENIZA | 4 | 86.3505 | 21.5876 | 36.52 | 0.0007 |
| Error | 5 | 2.9560 | 0.5912 | | |
| Total, corregido | 9 | 89.3065 | | | |

Nota. Elaboración propia

En la tabla 91 observamos que el cambio de concentraciones de cenizas resulto altamente significativo, puesto que ($F \leq 0.05$), lo que indica que las concentraciones de mezcla tienen un porcentaje de deformación diferentes en términos estadísticos, por lo cual aceptamos la hipótesis alterna y rechazamos la nula. En tal sentido se comprueba que “la adición de cenizas de madera (aserrín), en porcentajes de 5%, 12%, 18% y 25% mejora de manera positiva su comportamiento deformacional de un suelo arcilloso, en el mejoramiento de la subrasante, de las vías de la urbanización las gardenias de la ciudad de Juliaca”.

Tabla 92*Comparación de medias de Dunnett deformación vs concentración de ceniza*

| Testigo | ceniza | Media | Diferencia de Medias | Límite de confianza al 95% Simultáneo | | |
|---------|--------|---------|----------------------|---------------------------------------|---------|-----|
| - | 0 | 28.9850 | - | - | - | - |
| - | 5 | 26.6400 | -2.345 | -5.0176 | 0.3276 | *** |
| - | 12 | 24.1250 | -4.860 | -7.5326 | -2.1874 | *** |
| - | 25 | 21.9400 | -7.045 | -9.7176 | -4.3724 | *** |
| - | 18 | 21.0650 | -7.920 | -10.5926 | -5.2474 | *** |

Nota. Elaboración propia

La tabla 92 hace referencia la comparación de medias de Dunnett del porcentaje de deformación para las concentraciones de ceniza, en donde se observa que las concentraciones de 5, 12, 25 y 18% son diferentes al testigo (sin ceniza), puesto que la diferencia de medias es menor a la diferencia mínima significativa.

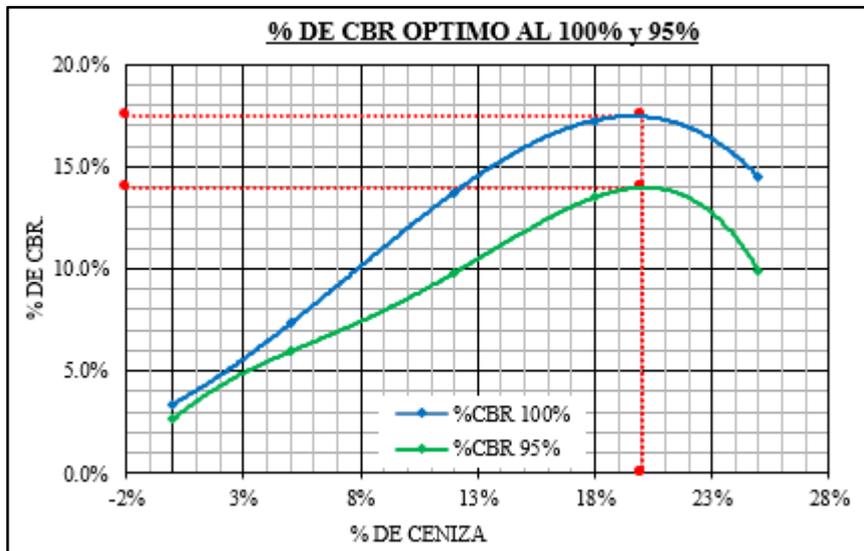
4.4. HIPÓTESIS ESPECÍFICA 3

“La proporción óptima de ceniza de madera (aserrín) y la factibilidad técnica de estabilizar un suelo arcilloso, incide de manera positiva en el mejoramiento de la subrasante, de las vías de la urbanización las gardenias de la ciudad de Juliaca”.

De acuerdo a los resultados de la resistencia al esfuerzo, se verifica y se grafica una curva de los valores de CBR en las proporciones indicadas, de acuerdo a ello se observa una gráfica modelo campana de Gauss. Donde se determinan el valor máximo de CBR, el cual sería el óptimo para un mejoramiento de un suelo arcilloso en la capa de subrasante.

Figura 78

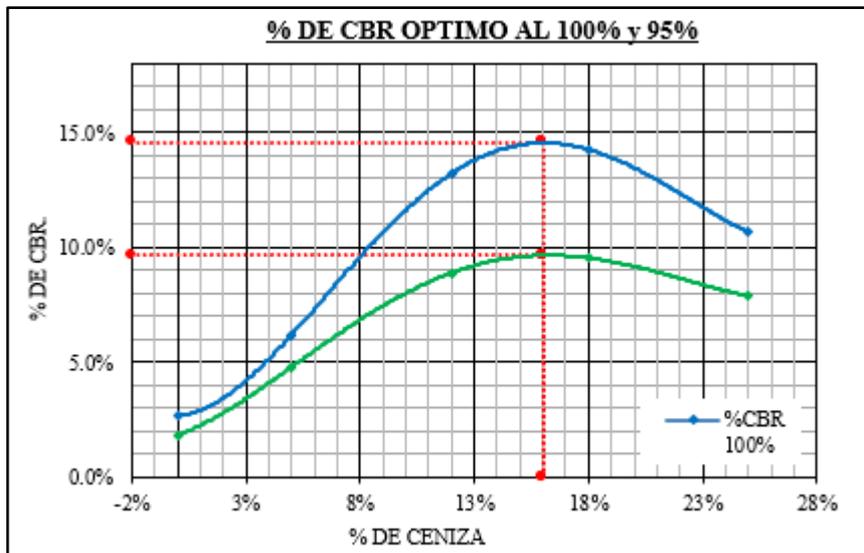
Porcentaje de CBR optimo, muestra C-1



Nota. Elaboración propia

Figura 79

Porcentaje de CBR optimo, muestra C-2



Nota. Elaboración propia

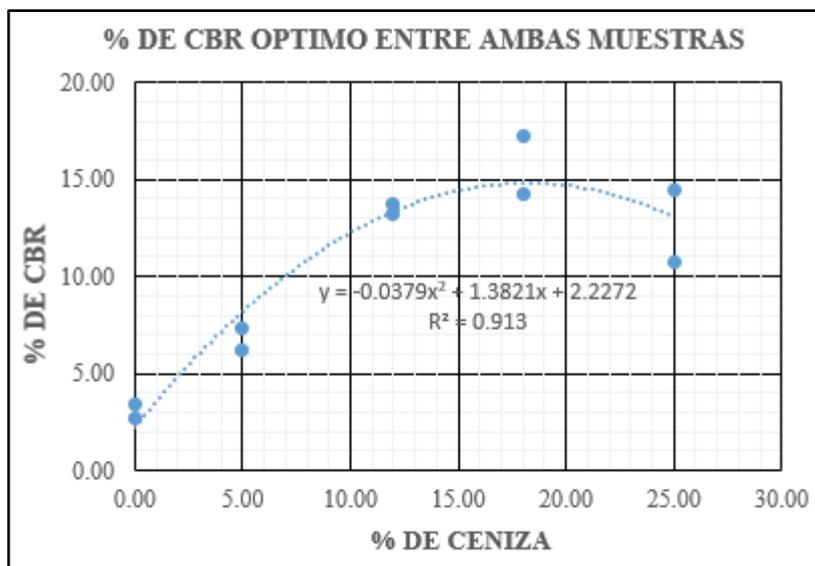
Interpolando los resultados y según la gráfica obtenemos la proporción óptima del porcentaje de ceniza a un valor de CBR máximo, en el cual para la muestra C-1 se tiene

un CBR máximo de 17.50% para una proporción de 20% de ceniza y para la muestra C-2 se tiene un CBR máximo de 14.60% para una proporción de ceniza de 16%.

Sin embargo, Para determinar el porcentaje óptimo de CBR de ambas muestras se realizó una medida de regresión que se ajusta más a los resultados hallados, el cual fue una regresión polinómica de 2 grado.

Figura 80

Porcentaje de CBR optimo, entre ambas muestras



Nota. Elaboración propia

De esta manera los resultados de los valores de CBR se obtiene un coeficiente de determinación de 1, por lo que se demuestra que la regresión se ajusta completamente a los resultados, resultado el porcentaje optimo en una proporción de 18.23% para un valor de CBR de 14.83%.

Realizando el análisis estadístico para validar la hipótesis específica 3, mediante el análisis de la varianza, se tiene lo siguiente:

Si $F > 0.05$, se acepta la H_0 (la proporción optima de ceniza de madera aserrín y la factibilidad técnica de estabilizar un suelo arcilloso, no incide en el mejoramiento de

la subrasante); pero si $F \leq 0.05$, se acepta la H_a (la proporción óptima de ceniza de madera aserrín y la factibilidad técnica de estabilizar un suelo arcilloso, incide de manera positiva en el mejoramiento de la subrasante).

Tabla 93

Regresión cuadrática para la optimización del contenido de la ceniza

| Rango de variación | G.L. | Σ de cuadrado | Cuadrado de la media | Valor F | > F |
|--------------------|------|----------------------|----------------------|---------|--------|
| Modelo | 2 | 213.86728 | 106.9336 | 36.74 | 0.0002 |
| Error | 7 | 20.37353 | 2.9105 | | |
| Total, corregido | 9 | 234.24081 | | | |

Nota. La tabla hace referencia a un análisis de la varianza. Elaboración propia

En la tabla 93 se aprecia el análisis de varianza de la regresión cuadrática para la optimización del contenido de ceniza para la lograr una eficiencia del CBR, en la cual el modelo resultó que es altamente significativo. Puesto que el valor F es menor a 0.05 y donde se comprueba que la proporción óptima de ceniza de madera (aserrín) y la factibilidad técnica de estabilizar un suelo arcilloso, incide de manera positiva en el mejoramiento de la subrasante.

Tabla 94

Estimadores de parámetros para la optimización de la ceniza

| Variable | DF | Estimador del parámetro | Error estándar | Valor t | Pr > t |
|---------------|----|-------------------------|----------------|---------|---------|
| Intercepto | 1 | 2.22545 | 1.09728 | 2.03 | 0.0821 |
| Ceniza | 1 | 1.38196 | 0.2155 | 6.41 | 0.0004 |
| Ceniza*Ceniza | 1 | -0.03793 | 0.00832 | -4.56 | 0.0026 |

Nota. Elaboración propia

En la tabla 94 hace referencia los estimadores de parámetros para el modelo de regresión cuadrática para la optimización del contenido de ceniza. el modelo de regresión cuadrática estimable resultante es:



$$y = -0.03793X^2 + 1.38196X + 2.22545$$

Y para obtener el punto óptimo, se realiza según la primera derivada, resultando un contenido de ceniza de 18.23%.

Respecto a la factibilidad técnica de estabilizar un suelo arcilloso con cenizas de madera (aserrín), producto de las ladrilleras artesanales de la ciudad de Juliaca, se evaluó lo siguiente:

- Según el MTC, indica que para una subrasante de carretera o vía la capacidad portante de los suelos o sea el CBR debe ser mayor a 6%. En tal sentido según los resultados obtenidos se tiene valores de CBR que se encuentran entre el 10% y 20%, donde conforme al Manual del MTC es considerado para una categoría de subrasante buena. En efecto cumple la normatividad establecida.
- La estabilización de suelos implica un costo de acuerdo al tipo de aditivo estabilizante a utilizar, por ende, se realizó una comparación de costos de estabilización de suelos arcillosos con cemento y cal con referencia a la ceniza de madera (aserrín).
 - Según Farfán (2022), indica que el costo de estabilizar con cemento por metro cubico para una subrasante es de 26.50 soles, esto para una resistencia al esfuerzo de un valor de CBR del 16%.

Tabla 95

Costos por m³ al estabilizar con cemento

| Insumos | Und. | Cantidad | Precio (s/) | Parcial (s/) |
|---------|----------------|----------|-------------|--------------|
| Cemento | Bolsa | 1 | 25.00 | 25.00 |
| Agua | m ³ | 0.10 | 15.00 | 1.50 |
| | | | Total | 26.50 |

Nota. Extraído de (Farfán, 2022).

- Por otra parte según CYPE Ingenieros (2023) , indica que los costos de estabilizar con cal hidráulica natural asciende a un costo de 20.52 soles por metro cuadrado , para una profundidad de tratamiento de 30 cm. En tal sentido el costo por metro cubico es de 68.40 soles.
- En nuestro caso el tratamiento con ceniza de madera (aserrín) producto de las ladrilleras artesanales solo implica el costo de transporte. En tal sentido realizamos el cálculo de costo de maquinaria para una distancia de 3km.

Tabla 96

Costos por m3 al estabilizar con ceniza

| Equipos | Und. | Cantidad | Precio (s/) | Parcial (s/) |
|--------------------|------|----------|-------------|--------------|
| Volquete 15 m3 | HM | 0.0023 | 110.00 | 1.00 |
| Cargador S/llantas | HM | 0.0091 | 1800 | 0.41 |
| Combustible | Gal | 0.0400 | 18.00 | 0.72 |
| | | | Total | 2.13 |

Nota. Elaboración propia.

En consecuencia, el costo de estabilizar un suelo arcilloso con cenizas de madera (aserrín) de las ladrilleras artesanales resulta 12.44 veces menor que el costo de estabilización con cemento y 32.10 veces menor que la estabilización con cal. A su vez se daría un adecuado uso a la ceniza ya en la actualidad este residuo es desechado en los botaderos de manera inadecuada.

Por otra parte, la cantidad de ceniza de madera (aserrín) para un uso practico como material estabilizante, se tiene que en la región de Puno existen un aproximado de 435 plantas ladrilleras hasta el año 2019, la mayor concentración se encuentra en la provincia de San Román-Juliaca (salida Arequipa), con 300 hornos artesanales generando aproximadamente cada horno 26.75 toneladas de ceniza al año, en consecuencia se tiene



una disponibilidad de ceniza generado de 8,025 toneladas al año; esto según el Programa Regional de Aire Limpio y el Ministerio de la Producción (PRAL, 2019).

4.5. DISCUSIÓN

Luego de haber realizado las pruebas de laboratorio al material arcilloso extraído de las vías de no pavimentadas de la urbanización las gardenias de la ciudad de Juliaca, se evidencio que el suelo estudiado C-1 es una arcilla (CL) de baja plasticidad y la muestra C-2 una arcilla con alta plasticidad (CH), esto conforme a la clasificación de suelo SUCS, en tanto que según el método AASHTO, se determinó la presencia de suelos de clase A-7-6 en ambos casos, esto realizando el empleo de los resultados encontrados en las pruebas de limite plástico, líquido y la plasticidad. De esta forma se determinó que las muestras de suelo poseen una plasticidad media de 24.78% y 30.31% respectivamente. De la misma forma mediante la prueba de compactación (proctor modificado), se determinó la humedad optima y la máxima densidad seca, con los cuales se evaluó para el ensayo de CBR, resultado que las muestras C-1 y C-2 tienen un valor de capacidad de soporte de 3.36% y 2.69% de CBR, lo que implica que son considerados como una subrasante insuficiente y una subrasante inadecuada.

En la presente investigación se logra mejorar el comportamiento mecánico del suelo extraído (arcilla de alta y baja plasticidad), puesto que en referencia a la plasticidad del suelo la adición de ceniza en proporciones de 5%, 12%, 18% y 25% reduce el índice de plasticidad hasta en un 31% respecto al suelo natural, sin embargo (Mamani & Yataco, 2017) “lograron una disminución del 43% de plasticidad respecto a la muestra natural, esta diferencia se debe a una distinta composición química de la ceniza puesto que los insumos para la combustión en las ladrilleras artesanales son mezclados con otros materiales diferentes a la madera”. Por otra parte Aguilar & Bravo, (2020), refieren que



“al adicionar cenizas de fondo en la estabilización de suelos arcillosos mejora las características mecánicas de la subrasante y que cumplen adecuadamente los parámetros de la normativa peruana”. En el presente estudio se concuerda con lo antes mencionado por los autores, puesto que en el presente estudio se logra demostrar que la adición de ceniza tiene gran influencia de manera positiva en el mejoramiento del comportamiento mecánico de un suelo arcilloso.

Con respecto a la capacidad portante del suelo las muestras C-1 y C-2 tuvieron un valor de CBR menor al 6%, lo que implica que no es apto para la utilización de una subrasante; estudios realizados por Mamanchura (2022), refiere que la estabilización con cenizas volantes para suelos arcillosos con una adición del 22% se logra elevar el CBR a 18,92% , representando un aumento considerable en la resistencia del suelo. sin embargo en la presente investigación al añadir ceniza en las proporciones de 5%, 12% y 18% presentaron un aumento significativo en la resistencia al esfuerzo en: muestra C-1 valores de CBR de 7.35%, 13.75%, y 17.26% y en la muestra C-2 valores de CBR de 6.20%, 13.23% y 14.27% viendo en estas últimas una disminución ligera en la resistencia al esfuerzo, esta diferencia se debe por el tipo de suelo, ya que la muestra C-1 fue una arcilla de baja plasticidad y la C-2 una arcilla de alta plasticidad; en referencia a ello Ayala et al., (2019), menciona que “a razón que se aumenta la proporción de ceniza, se observa un aumento significativo en la resistencia del suelo arcilloso, elevando el CBR desde un 2.2% inicial hasta un 9.5%”. Sin embargo, para porcentajes de ceniza superiores al 20%, se observa una disminución en el valor del CBR. Lo que implica que mientras el suelo sea más plástico las propiedades mecánicas también disminuyen en las proporciones dadas. Por otra parte, en el presente estudio se determinó que al añadir ceniza en un 25% o mayores tienden a disminuir los valores de CBR lo que implica que a mayor porcentaje de ceniza el material se asemeja a suelos con características de limo, lo que origina una



disminución del CBR. En consecuencia, al adicionar ceniza en las proporciones establecidas mejora el comportamiento mecánico en un suelo arcilloso ya que sus valores de CBR son mayores al 6%, a su vez el valor máximo valor de CBR encontrado en las proporciones establecidas fue de 17.26% considerado como buena para la utilización de una subrasante. Sin embargo Apolinarez (2018), en su investigación con ceniza vegetal “obtuvo un incremento en la capacidad de soporte llegando a un CBR de 23.7%, consiguiendo un incremento hasta en un 27.11% para una mezcla del 25% de ceniza vegetal, lo que resulta que a mayor proporción de ceniza vegetal aumenta el CBR”; sin embargo en nuestra investigación en las proporciones de 5%, 12% y 18% el CBR se incrementa llegando a un máximo, posteriormente la resistencia tiende a disminuir, es así como se verifica en la proporción del 25 %, en efecto el valor máximo de CBR se encuentra entre la proporción del 18% y 25 %.

De la misma forma en este trabajo de investigación se logra mejorar el comportamiento deformacional del suelo, mediante la prueba de consolidación se logra determinar las deformaciones presentadas por la muestra. Donde se puede apreciar que la deformación en estado natural del suelo es de 5.84mm, sin embargo, al añadir ceniza de madera (aserrín) en porcentajes de 5%, 12%, 18% y 25% muestran una disminución en las deformaciones teniendo como resultados de 5.33mm, 4.62mm, 4.11mm y 4.32mm respectivamente, por su parte Quispe (2019), en su estudio menciona que “si verdaderamente al incorporar cenizas de madera en un suelo arcilloso difieren las deformaciones y que son similares a las deformaciones en una mezcla de arcilla con cal. En esta investigación se logra determinar que efectivamente al añadir cenizas en un suelo arcilloso tiene una influencia positivo, ya que se logra reducir las deformaciones hasta de un 29.82% a un 21.75%. por otra parte González et al., (2019), refiere que “con la adición de escoria blanca se logró mejorar los parámetros de deformación consiguiendo un



incremento positivo en las reducciones de las deformaciones y que se mantienen en el tiempo”. En la presente investigación se determinó que con respecto al coeficiente de consolidación se aprecia una variación decreciente, para un 5% de ceniza se obtiene un coeficiente de consolidación de 0.0050 cm²/min, para el 12% un valor de 0.0047 cm²/min, para 18% de ceniza un coeficiente de 0.0044 cm²/min y mientras que para una mezcla del 25% se tiene un coeficiente de consolidación de 0.0053 cm²/min. Lo que implica que la tendencia entre el 18% y 25% el coeficiente de consolidación llega a un valor mínimo posteriormente llega a incrementando de manera ligera, de esta manera para comprender el comportamiento del coeficiente de consolidación, se empleó una medida de regresión altamente congruente con los resultados obtenidos, la cual consistió en una regresión polinómica de cuarto grado. Este procedimiento se ilustra detalladamente en la figura 77. Al aplicar esta regresión a los datos de los coeficientes de consolidación, se logró un coeficiente de determinación de 1, lo que evidencia que la regresión se adapta de manera completa a los resultados. Por consiguiente, es posible estimar el valor del coeficiente de consolidación ante variaciones en la adición de ceniza, ya sea en mayor o menor cantidad en un suelo arcilloso.

Finalmente, estudios realizados por Alanya (2020), indica que “la mejora significativa de la propiedades del suelo arcilloso es con la inclusión del 25% de ceniza de madera, llegando a obtener un capacidad portante de 24.35%”. por otra parte Apolinarez (2018), refiere que para una adecuada subrasante estabilizado con ceniza vegetal se requiere de un 35% de ceniza para lograr alcanzar un 24.7% de CBR para un suelo de arena limosa, los cuales satisfacen con la normatividad del manual de carreteras. En este trabajo de investigación se llegó a determinar que el óptimo porcentaje de adición de ceniza para estabilizar el suelo arcillo de la urbanización las gardenias de la ciudad de Juliaca, en donde se determinó que para la muestra C-1 (arcilla de baja plasticidad) el



porcentaje óptimo de ceniza es de 20% y un valor de CBR de 15.5%, mientras que en la muestra C-2 (arcilla de alta plasticidad) se tiene a un óptimo de 16% de adición de ceniza para un resistencia de CBR de 14.60%; sin embargo para ambas muestras de arcilla de alta y baja plasticidad se determinó que la cantidad adecuado de la adición de ceniza es la proporción de 18.23% para un valor de CBR de 14.83%, esto según el ajuste de una regresión de 2 grado. En tal sentido los resultados de CBR son mayores al 6%, lo cual dentro de las categorías se considera una subrasante buena. Por otra parte, el costo de estabilizar un suelo arcilloso con ceniza de madera (aserrín) de las ladrilleras artesanales resulta 12.44 veces menor que el costo de estabilización con cemento y 32.10 veces menor que estabilizar con cal. A su vez al utilizar las cenizas como material estabilizante, se daría un uso adecuado y mejoraría las condiciones medioambientales puesto que ya no serían desechados en lo rellenos sanitarios de manera inadecuado sino utilizados como material estabilizante dentro de la construcción vial.



V. CONCLUSIONES

- En esta investigación se logró demostrar que la incidencia de estabilizar un suelo arcilloso incorporando cenizas de madera (aserrín), mejora de manera positiva su comportamiento mecánico - deformacional, para el uso en el mejoramiento de la subrasante de las vías de la urbanización las gardenias de la ciudad de Juliaca. Ya que se concluye que las 2 muestras de suelo en estudio al incorporar cenizas de madera (aserrín) cumplen con los parámetros de la normatividad peruana un CBR mayor al 6% y que pueden ser usadas como material de subrasante.
- Se demostró que al adicionar ceniza de madera (aserrín) en proporciones de 5%, 12%, 18% y 25% mejoran significativamente su comportamiento mecánico del suelo arcilloso, ya que debido a la edición de ceniza en dichas proporciones disminuye la plasticidad hasta en un 31% y en relación a la capacidad portante se tiene un incremento en la resistencia del suelo, obteniendo valores de CBR de 7.32, 13.75, 17.26 y 14.50% en la muestra C-1 y para la muestra C-2 valores de 6.20, 13.23, 14.27, y 10.69% de CBR.
- La investigación también concluye que al incorporar ceniza de madera (aserrín), en porcentajes de 5%, 12%, 18% y 25% mejora de manera positiva su comportamiento deformacional del suelo arcilloso, puesto que según el ensayo de consolidación el porcentaje de deformación disminuye de un 29.82% a un 21.75% y respecto al coeficiente de consolidación se logra reducir de un valor de 0.0051 cm²/min a 0.0044cm²/min, lo que indica que el suelo estabilizado con ceniza mejora la deformabilidad respecto al tiempo.



- Finalmente en la investigación se determinó la proporción óptima de la ceniza de madera (aserrín) , resultando para una proporción de 18.23% para una resistencia al esfuerzo de un valor de CBR de 14.83%, a su vez al utilizar como un material estabilizante resulta menos costosa que una estabilización con cemento o cal, en tal sentido las cenizas de madera se presenta como una opción rentable, sostenible y con beneficios medioambientales al emplearse como aditivo estabilizante para mejorar las características de la subrasante de las vías aun no pavimentadas de la urbanización las gardenias de la ciudad de Juliaca.



VI. RECOMENDACIONES

- Se sugiere proseguir con investigaciones futuras que abarquen diversas tipologías de suelos, con la finalidad de ampliar el conocimiento respecto a este tipo de estudios, donde se utilicen la ceniza de madera (aserrín) generado de las ladrilleras artesanales y con mayor cantidad de pruebas de laboratorio, esto con el fin de dar mayor fiabilidad a los resultados.
- Se recomienda realizar mayor cantidad de dosificaciones y en otras proporciones diferentes al de esta investigación para obtener respuestas utilizando muestras diversas, ya que al tratarse de una investigación experimental se necesita la precisión de los resultados.
- Se sugiere realizar una evaluación a mayor escala sobre el análisis químico de la composición de la cenizas de madera (aserrín), producto de las ladrilleras artesanales, con el fin de determinar con exactitud la composición química de este material al ser usado como estabilizante.
- Se sugiere la valoración de otros tipos de cenizas con el fin de explorar su potencial como aditivos estabilizadores ya que la mayoría de estos residuos son desechados inadecuadamente produciendo efectos negativos al medio ambiente.
- Se recomienda el empleo de esta investigación, puesto que ayudara como un antecedente en estudios de material estabilizante con cenizas de madera para futuras investigaciones.



VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aguilar, H., & Bravo, J. (2020). *Evaluación de la ceniza de fondo para la estabilización de suelos arcillosos provenientes de la zona ladrillera del distrito de San Jerónimo - Cusco*. <http://repositorio.ucv.edu.pe/bitstream/handle>
- Alanya, C. (2020). *Estabilización de suelos arcillosos incorporando cenizas de madera, originadas por ladrilleras artesanales, en la red vial vecinal Antarumi – Macachacra, Ayacucho*.
- Alarcón, J., Jiménez, M., & Benítez, R. (2020). Estabilización de suelos mediante el uso de lodos aceitoso. *Revista Ingeniería de Construcción*, 35(1), 5–20. <https://doi.org/10.4067/S0718-50732020000100005>
- Altman, D., & Bland, J. (2016). *Método Anova para experimentos*.
- Apolinarez, A. E. (2018). Estabilización de la sub-rasante con la incorporación de ceniza vegetal, Jauja. *Tesis*, 1–161.
- Aponte, J., Gálvez, J., & Durán, G. (2019). *Estudio experimental del comportamiento geotécnico de suelo arenoso con ceniza de madera y carbón proveniente de ladrilleras artesanales. I*, 24–26. <https://doi.org/10.18687/LACCEI2019.1.1.116>
- ASTM-D-2487. (2011). Práctica Estándar para la Clasificación de Suelos para Propósitos de Ingeniería (SUCS). *Astm International*, i(C). <https://doi.org/10.1520/D2487->
- ASTM D-1883. (2007). Standard Test Method for CBR (California Bearing Ratio) of Laboratory-Compacted Soils. *Astm International*.
- ASTM D-2435. (2011). Standard Test Methods for One-Dimensional Consolidation Properties of Soils Using Incremental Loading. *ASTM Internacional*, 14. www.astm.org
- ASTM D-3282. (1993). Standard Practice for Classification of Soils and Soil-Aggregate Mixtures for. *Current*, 93(November 1993), 1–6.
- ASTM D-4318. (2016). Límite Líquido, Límite de plástico, y el índice de plasticidad de los suelos. *Applied Clay Science*, 29(2).



- ASTM D1557-07. (2007). Standar Test Method for Laboratory Compaction Charecteristics of Soil Using Modified Effort. In *Standard test methods for Laboratory Compaction characteristics of Soil Using Modified Effort* (pp. 1–13).
- ASTM D422-63. (2007). Método de Ensayo Estándar para el Análisis Granulométrico. *ASTM Internacional*, 63, 1–15.
- ASTM D422. (1998). Método de análisis del tamaño de las partículas de suelo. *ASTM*, 63.
- Ayala, G., Rosadio, A., & Durán, G. (2019). Estudio del efecto de adición de ceniza proveniente de ladrilleras artesanales en la estabilización de suelos arcillosos para pavimentos. *Proceedings of the LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education and Technology, 2019-July*(July 2019), 24–26.
- Badillo, E., & Rico, A. (2005). *Mecánica de suelos Tomo I: Fundamentos de la Mecánica de Suelos* (Vol. 1). LIMUSA.
- Cruz, M. (2001). *Mejoramiento de suelos con aplicación a un caso práctico*. Universidad Nacional Autónoma de México. <https://repositorio.unam.mx/contenidos/>
- Cubas, K., & Falen, J. (2016). Evaluación De Las Cenizas De Carbón Para La Estabilización De Suelos Mediante Activación Alcalina Y Aplicación En Carreteras No Pavimentadas. (Tesis) *Universidad Señor de Sipan, Perú*, 1–219.
- CYPE Ingenieros, S. A. (2023). *Estabilización de caminos y senderos, mediante tratamiento del suelo con aporte de cal hidráulica natural*. <http://www.peru.generadordeprecios.info/>
- Das, B. M. (2001). *Fundamentos de ingeniería geotécnica*. Thomson Learning.
- Das, B. M. (2013). *Fundamentos de la ingeniería geotécnica*. (4^a. ed.).
- Espinoza, T., & Honores, R. (2018). *Estabilización de suelos arcilloso con conchas de abanico y cenizas de carbon con fines de pavimentación*. 0–104.
- Fajardo, H., & Vásquez, M. (2014). *Estabilización de suelos*. <https://prezi.com/gczcgri9n2np/estabilizacion-de-suelos/>



- Farfán, L. G. (2022). Estabilización de subrasante en suelo arcilloso aplicando cemento en la Av. Los Naranjos Unidad Vecinal Ccehuarpampa, provincia Andahuaylas – Apurímac 2022. *Tesis*.
- Fernández Loaiza, C. (1982). *Mejoramiento y estabilización de suelos*. <https://books.google.com/books/about/>
- Florez, C., Caicedo, Z., Zárate, R., & Contreras, B. (2008). Estabilización química de suelos expansivos de San José de Cúcuta (Colombia) usando cenizas volantes. *ISSN 0122-820X, ISSN-e 2422-5053, Vol. 13, N°. 2, 2008, Págs. 19-31*. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5461214&info=resumen&idoma=ENG>
- García, E., & Suárez, M. (2005). *Las arcillas: Propiedades y sus usos*. 25.
- Goñas, O. (2019). *Estabilización de suelos con cenizas de carbón para uso como subrasante mejorada*. <http://repositorio.untrm.edu.pe/bitstream/handle/>
- González, R., Cooper, J., & Lapeña, P. (2019). Parámetros resistentes y de deformación en mezclas de suelo y esconia blanca obtenidos por medio de ensayos de corte directo y comprensión simple. *UCSC*, 1–26. <http://repositoriodigital.ucsc.cl/handle/25022009/2740>
- Hernández, J., Mejía, D., & Zelaya, C. (2016). *Propuesta de estabilización de suelos arcillosos para su aplicación en pavimentos rígidos*.
- Hernandez, R., Fernandez, C., & Baptista, M. del pilar. (2014). Metodología de la Investigación. In *McGRAW-HILL* (Sexta, Vol. 58, Issue 12).
- Hernández, R., & Mendoza, C. (2018). Metodología de la investigación. In *Mc Graw Hill* (Vol. 1, Issue Mexico).
- Karim, H., Al-Recaby, M., & Nsaif, M. (2018). Stabilization of soft clayey soils with sawdust ashes. *MATEC Web of Conferences*, 162, 1–7. <https://doi.org/10.1051/matecconf/201816201006>
- Mamanchura, E. (2022). *Influencia del uso de cenizas volantes en la estabilización de suelos para la pavimentación en la Av. Alfonso Ugarte, distrito de San Antonio –*



Moquegua, 2021. 1–132.

- Mamani, L., & Yataco, A. (2017). Estabilización de suelos arcillosos aplicando ceniza de madera de fondo, producto de ladrilleras artesanales en el departamento de Ayacucho. *Tesis*, 198.
- Ministerio de Transportes y Comunicaciones. (2014). Manual de Carreteras - Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos. In *Ministerio de Obras Públicas* (Vol. 3, Issue Instrucciones y criterios de diseño). Dirección de Normatividad Vial.
- Ministerio de Transportes y Comunicaciones. (2016). Manual de Ensayo de Materiales. *Manual*, 1264.
[https://portal.mtc.gob.pe/transportes/caminos/normas_carreteras/documentos/manuales/Manual Ensayo de Materiales.pdf](https://portal.mtc.gob.pe/transportes/caminos/normas_carreteras/documentos/manuales/Manual%20Ensayo%20de%20Materiales.pdf)
- Morales Zuluaga, D. (2015). Valoración de las cenizas de carbón para la estabilización de suelos mediante activación alcalina y su uso en vías no pavimentadas. *Tesis Universidad de Medellin*, 80.
- Nath, B. D., Sarkar, G., Siddiqua, S., Rokunuzzaman, M., & Islam, M. R. (2018). Geotechnical Properties of Wood Ash-Based Composite Fine-Grained Soil. *Advances in Civil Engineering, 2018*. <https://doi.org/10.1155/2018/9456019>
- Ñaupas Paitán, H., Valdivia Dueñas, M. R., Palacios Vilela, J. J., & Romero Delgado, H. E. (2018). Metodología de la investigación cuantitativa-cualitativa y redacción de la tesis. In E. de la U (Ed.), *Journal of Chemical Information and Modeling* (5a. Edición, Vol. 53, Issue 9). Ediciones de la U. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Parra, M. (2018). *Estabilización de un suelo con cal y ceniza volante*.
- Petermann, J., & Saeed, A. (2010). *Alkali-Activated Geopolymers*. Panama, A Literature Review. <https://www.semanticscholar.org/paper/>
- Pontificia Universidad Católica del Perú. (2012). *Guía de laboratorio de mecánica de suelos*. PUCP. <https://www.studocu.com/pe/document/pontificia-universidad-catolica-del-peru/laboratorio-de-mecanica-de-suelos/pucp-guia-de-laboratorio-de-mecanica-de-suelos-2013-1/59882954>



- Porter, B. O. J. (1938). The Preparation of Subgrades. *Proc. Highm. Res. Bd., Wash., 1938*, 324–331.
- Porter, O. J. (1938). The Preparation of Subgrades. *Proc. Highm. Res. Bd., Wash., 1938*, 324–331.
- PRAL. (2019). *Estudio diagnóstico sobre las ladrilleras artesanales en el Perú*. Programa Regional de Aire Limpio y el Ministerio de Producción. <https://www.academia.edu/es/35241054/>
- Quispe, R. A. (2019). Estudio experimental y numérico del comportamiento mecánico de una arcilla mejorada con métodos tradicionales y ceniza de madera. *Tesis*, 1–101. <http://hdl.handle.net/10757/626409>
- Soriano Giraldo, C. (2012). Diagnóstico Nacional del sector ladrillero artesanal. *Mercadeando S.A.*, 103. <http://www.redladrilleras.net/assets/files/692ecaa0a857372af35a529441387778.pdf>
- Swisscontact. (2012). *Programa de Eficiencia Energética en Ladrilleras de América Latina para Mitigar el Cambio Climático*. Colección: EELA. Lima Peru. https://www.flickr.com/photos/cosude_en_peru/collections/72157635281415972/
- Tacca, J. (2021). *Estabilización de suelo arcilloso con adición de cal para el mejoramiento de la subrasante, Vía de evitamiento, Abancay – Apurímac, 2021*. https://repositorio.ucv.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12692/58189/Tacca_HJA-SD.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Terrones, A. (2018). *Estabilización de suelos arcillosos adicionando cenizas de bagazo de caña para el mejoramiento de subrasante en el sector Barraza, Trujillo – 2018*. [https://repositorio.upn.edu.pe/bitstream/handle/11537/13679/Llanos Jave Katherine Mayely.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repositorio.upn.edu.pe/bitstream/handle/11537/13679/Llanos%20Jave%20Katherine%20Mayely.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Thenoux, G., & Carrillo, H. (2008). Estudio para la utilización de cenizas provenientes de la caldera cogeneradora petropower en la estabilización de suelos. *Artículo Pontificia Universidad Católica de Chile*.



ANEXOS

ANEXO 1: Matriz de consistencia.

ANEXO 2: Constancia del uso de equipos de laboratorio.

ANEXO 3: Granulometría de la muestra C-1, C-2 y Ceniza.

ANEXO 4: Límites de consistencia de la muestra natural C-1 y C-2.

ANEXO 5: Límites de consistencia de la muestra C-1 y C-2 con combinaciones de ceniza de 5%, 12%, 18% y 25%.

ANEXO 6: Ensayo de Proctor modificado de la muestra C-1, natural y con combinaciones de ceniza de 5%, 12%, 18% y 25%.

ANEXO 7: Ensayo de Proctor modificado de la muestra C-2, natural y con combinaciones de ceniza de 5%, 12%, 18% y 25%.

ANEXO 8: Ensayo de CBR (California Bearing Ratio) de la muestra C-1, natural y con combinaciones de ceniza de 5%, 12%, 18% y 25%.

ANEXO 9: Ensayo de CBR (California Bearing Ratio) de la muestra C-2, natural y con combinaciones de ceniza de 5%, 12%, 18% y 25%.

ANEXO 10: Ensayo de Consolidación Unidimensional de la muestra natural y con combinaciones de ceniza de 5%, 12%, 18% y 25%.

ANEXO 11: Panel fotográfico.

ANEXO 12: Resultados de análisis químico de la ceniza y aserrín en crudo



DECLARACIÓN JURADA DE AUTENTICIDAD DE TESIS

Por el presente documento, Yo JUAN ARCADIO JARA HANCCO
identificado con DNI 73764153 en mi condición de egresado de:

Escuela Profesional, Programa de Segunda Especialidad, Programa de Maestría o Doctorado

INGENIERÍA CIVIL

informo que he elaborado el/la Tesis o Trabajo de Investigación denominada:

"ESTABILIZACIÓN DE SUELOS ARCILLOSOS INCORPORANDO CENIZAS DE MADERA (ASERRÍN),
EN SU COMPORTAMIENTO MECÁNICO - DEFORMACIONAL PARA EL MEJORAMIENTO DE LA
SUBRASANTE, DE LAS VÍAS DE LA URBANIZACIÓN LAS GARDENIAS DE LA CIUDAD DE JULIACA"

Es un tema original.

Declaro que el presente trabajo de tesis es elaborado por mi persona y no existe plagio/copia de ninguna naturaleza, en especial de otro documento de investigación (tesis, revista, texto, congreso, o similar) presentado por persona natural o jurídica alguna ante instituciones académicas, profesionales, de investigación o similares, en el país o en el extranjero.

Dejo constancia que las citas de otros autores han sido debidamente identificadas en el trabajo de investigación, por lo que no asumiré como tuyas las opiniones vertidas por terceros, ya sea de fuentes encontradas en medios escritos, digitales o Internet.

Asimismo, ratifico que soy plenamente consciente de todo el contenido de la tesis y asumo la responsabilidad de cualquier error u omisión en el documento, así como de las connotaciones éticas y legales involucradas.

En caso de incumplimiento de esta declaración, me someto a las disposiciones legales vigentes y a las sanciones correspondientes de igual forma me someto a las sanciones establecidas en las Directivas y otras normas internas, así como las que me alcancen del Código Civil y Normas Legales conexas por el incumplimiento del presente compromiso

Puno 04 de Enero del 2024

FIRMA (obligatoria)



Huella



AUTORIZACIÓN PARA EL DEPÓSITO DE TESIS O TRABAJO DE INVESTIGACIÓN EN EL REPOSITORIO INSTITUCIONAL

Por el presente documento, Yo JUAN ARCADIO JARA HANCCO
identificado con DNI 73764153 en mi condición de egresado de:

Escuela Profesional, Programa de Segunda Especialidad, Programa de Maestría o Doctorado

INGENIERÍA CIVIL

informo que he elaborado el/la Tesis o Trabajo de Investigación denominada:

"ESTABILIZACIÓN DE SUELOS ARCILLOSOS INCORPORANDO CENIZAS DE MADERA (ASERRÍN) EN SU COMPORTAMIENTO MECÁNICO DEFORMACIONAL PARA EL MEJORAMIENTO DE LA SUBRASANTE DE LAS VÍAS DE LA URB. LOS GARDENIAS DE LA CIUDAD JUJUYA"
para la obtención de Grado, Título Profesional o Segunda Especialidad.

Por medio del presente documento, afirmo y garantizo ser el legítimo, único y exclusivo titular de todos los derechos de propiedad intelectual sobre los documentos arriba mencionados, las obras, los contenidos, los productos y/o las creaciones en general (en adelante, los "Contenidos") que serán incluidos en el repositorio institucional de la Universidad Nacional del Altiplano de Puno.

También, doy seguridad de que los contenidos entregados se encuentran libres de toda contraseña, restricción o medida tecnológica de protección, con la finalidad de permitir que se puedan leer, descargar, reproducir, distribuir, imprimir, buscar y enlazar los textos completos, sin limitación alguna.

Autorizo a la Universidad Nacional del Altiplano de Puno a publicar los Contenidos en el Repositorio Institucional y, en consecuencia, en el Repositorio Nacional Digital de Ciencia, Tecnología e Innovación de Acceso Abierto, sobre la base de lo establecido en la Ley N° 30035, sus normas reglamentarias, modificatorias, sustitutorias y conexas, y de acuerdo con las políticas de acceso abierto que la Universidad aplique en relación con sus Repositorios Institucionales. Autorizo expresamente toda consulta y uso de los Contenidos, por parte de cualquier persona, por el tiempo de duración de los derechos patrimoniales de autor y derechos conexos, a título gratuito y a nivel mundial.

En consecuencia, la Universidad tendrá la posibilidad de divulgar y difundir los Contenidos, de manera total o parcial, sin limitación alguna y sin derecho a pago de contraprestación, remuneración ni regalía alguna a favor mío; en los medios, canales y plataformas que la Universidad y/o el Estado de la República del Perú determinen, a nivel mundial, sin restricción geográfica alguna y de manera indefinida, pudiendo crear y/o extraer los metadatos sobre los Contenidos, e incluir los Contenidos en los índices y buscadores que estimen necesarios para promover su difusión.

Autorizo que los Contenidos sean puestos a disposición del público a través de la siguiente licencia: Creative

Commons Reconocimiento-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional. Para ver una copia de esta licencia, visita: <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

En señal de conformidad, suscribo el presente documento.

Puno 04 de Enero del 2024

FIRMA (obligatoria)



Huella