



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



**INFLUENCIA DEL VIDRIO SOLUBLE EN SUELOS BLANDOS Y
COHESIVOS PARA MEJORAR LAS PROPIEDADES FÍSICAS Y
MECÁNICAS DE LA SUBRASANTE DE LA VÍA JULIACA –
CANCHI GRANDE**

TESIS

PRESENTADA POR:

BRYAN CRISTIAN CCALLA HUANCA

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO CIVIL

PUNO – PERÚ

2024



NOMBRE DEL TRABAJO

INFLUENCIA DEL VIDRIO SOLUBLE EN SUELOS BLANDOS Y COHESIVOS PARA MEJORAR LAS PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS DE LA SUBRASANTE DE LA VÍA JULIACA - CANCHI GRANDE

AUTOR

BRYAN CRISTIAN CCALLA HUANCA

RECUENTO DE PALABRAS

30820 Words

RECUENTO DE CARACTERES

148184 Characters

RECUENTO DE PÁGINAS

149 Pages

TAMAÑO DEL ARCHIVO

3.1MB

FECHA DE ENTREGA

Sep 24, 2024 12:35 PM GMT-5

FECHA DEL INFORME

Sep 24, 2024 12:37 PM GMT-5

● **15% de similitud general**

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

- 12% Base de datos de Internet
- Base de datos de Crossref
- 11% Base de datos de trabajos entregados
- 2% 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)

V O B O :



24/09/2024



Ing. Jaime Medina Leiva
DOCENTE UNIVERSITARIO
COD. UNA N° 910545
SUBDIRECTOR INVESTIG-EDIC



Ing. Emilio Castillo Aroni
DOCENTE UNIVERSITARIO
COD. UNA N° 920514

Resumen



DEDICATORIA

A mis padres Adela y Edgar, por su apoyo incondicional, sus valores y su fe en mí, que siempre han sido mi mayor motivación para seguir adelante.

A mis maestros y mentores de la Universidad Nacional del Altiplano, quienes con su sabiduría y paciencia me guiaron a lo largo de este camino de conocimiento.

A mi familia y amigos, que siempre me han apoyado y animado en mis momentos más difíciles, así como a todos los que me han ayudado a crecer tanto personal como profesionalmente.

Bryan Cristian Ccalla Huanca



AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios por permitirme adquirir todos los conocimientos a través de mi vida, y a medida de ello haberme guiado durante mi proceso de formación y educación.

A mis instructores y mentores de la Escuela Profesional de Ingeniería Civil perteneciente a la Universidad Nacional del Altiplano por permitirme aprender las lecciones que han dado forma a mi carrera profesional.

Agradezco a mi director y a mis jurados de tesis, quienes estuvieron presentes, por su paciencia y sus aportes en conocimientos que me guiaron en cada paso de esta investigación.

A mis padres, amigos, compañeros y seres queridos; por el apoyo moral, por su amistad compartiendo ideas y opiniones quienes fueron cruciales en mi crecimiento personal y académico.

Bryan Cristian Ccalla Huanca



ÍNDICE GENERAL

	Pag.
DEDICATORIA	
AGRADECIMIENTOS	
ÍNDICE GENERAL	
ÍNDICE DE TABLAS	
ÍNDICE DE FIGURAS	
ACRÓNIMOS	
RESUMEN	15
ABSTRACT.....	16
CAPÍTULO I	
INTRODUCCIÓN	
1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	17
1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	18
1.2.1. Problema general	18
1.2.2. Problemas específicos	18
1.3. JUSTIFICACIÓN DEL ESTUDIO.....	18
1.4. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN.....	20
1.4.1. Objetivo general.....	20
1.4.2. Objetivo específico	21
1.5. HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACIÓN	21
1.5.1. Hipótesis General.....	21
1.5.2. Hipótesis Específicas	21

CAPÍTULO II

REVISIÓN DE LITERATURA



2.1. ANTECEDENTES	23
2.1.1. Antecedentes internacionales.....	23
2.1.2. Antecedentes nacionales	29
2.2. MARCO TEÓRICO	32
2.2.1. Vidrio soluble	32
2.2.1.1. Definición.....	32
2.2.1.2. Tipos de vidrio soluble.....	33
2.2.1.3. Propiedades del vidrio soluble (neutro)	35
2.2.1.4. Aplicación del vidrio soluble	35
2.2.2. Estabilización de suelos	36
2.2.2.1. Estabilización química de suelos	37
2.2.2.2. Estabilización mecánica de suelos	38
2.2.2.3. Estabilización física de suelos.....	38
2.2.3. Suelos blandos y cohesivos.....	39
2.2.4. Propiedades físico-mecánicas del suelo.....	40
2.2.4.1. Propiedades de fracciones muy finas de los suelos.....	40
2.2.4.2. Propiedades físicas	40
2.2.4.3. Contenido de Humedad.....	41
2.2.4.4. Análisis granulométrico	42
2.2.4.5. Límites de consistencia	44
2.2.4.5.1. Límite líquido.	44
2.2.4.5.2. Límite plástico	46
2.2.4.6. Clasificación De Suelos SUCS	47
2.2.4.7. Clasificación de suelos AASHTO.....	49
2.2.4.8. Propiedades mecánicas de los suelos	51



2.2.4.9. Prueba de compactación Proctor modificado.....	51
2.2.4.10. Prueba de Valor de soporte de California (CBR)	53
2.2.4.11. Compresión no confinada	55
2.2.5. Sub rasante del camino	56

CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. MATERIALES.....	57
3.1.1. Muestra de suelo	57
3.1.2. Vidrio soluble.	58
3.2. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN	59
3.2.1. Tipo de investigación	59
3.2.2. Diseño de investigación	59
3.2.3. Nivel de investigación	60
3.2.4. Enfoque de la investigación	60
3.2.5. Población	61
3.2.6. Muestreo	61
3.2.7. Muestra	61
3.2.8. Variables	62
3.2.8.1. Variable independiente: vidrio soluble	62
3.2.8.2. Variable dependiente: Propiedades físicas y mecánicas de la subrasante	62
3.2.9. Técnicas	63
3.2.10. Instrumentos	63
3.3. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL	64
3.3.1. Estudios geotécnicos integrales para los suelos naturales	64



3.3.1.1. Contenido de humedad natural	64
3.3.1.2. Análisis granulométrico de suelos.	64
3.3.1.3. Límites de Consistencia.	68
3.3.1.3.1. Limite líquido.....	68
3.3.1.3.2. Limite plástico.....	70
3.3.1.3.3. Índice de plasticidad.....	72
3.3.1.4. Clasificación SUCS.....	72
3.3.1.5. Clasificación AASHTO	73
3.3.1.6. Compactación Proctor Modificado	74
3.3.1.7. Valor de soporte de California (CBR)	76
3.3.1.8. Compresión simple	80
3.3.2. Estudios geotécnicos con vidrio soluble.....	81
3.3.2.1. Límites de consistencia	81
3.3.2.2. Proctor modificado.....	90
3.3.2.3. Valor de Soporte de California (CBR).....	95
3.3.2.4. Compresión simple	108

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. RESULTADOS LÍMITES DE ATTERBERG.....	117
4.1.1. Muestra C-1	117
4.1.2. Muestra C-2.	118
4.2. RESULTADOS DE LA COMPACTACIÓN	121
4.2.1. Muestra C-1	121
4.2.2. Muestra C-2	121
4.3. RESULTADOS DEL VALOR CBR.	123



4.3.1. Muestra C-1	123
4.3.2. Muestra C-2	125
4.4. RESULTADOS DE LA RESISTENCIA ÚLTIMA (UCS)	127
4.4.1. Muestra C-1	128
4.4.2. Muestra C-2	129
4.5. DISCUSIÓN CON ANTECEDENTES.....	131
4.6. ANALISIS DE VARIANZA.....	136
4.7. ÓPTIMO CONTENIDO DE VIDRIO SOLUBLE	137
4.7.1. Muestra C-1	137
4.7.2. Muestra C-2	138
V. CONCLUSIONES	139
VI. RECOMENDACIONES.....	140
VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	141
ANEXOS.....	147

AREA: Transportes

TEMA: Infraestructura del transporte y medio ambiente

LÍNEA DE INVESTIGACIÓN: Transportes y Gestión Vial

FECHA DE SUSTENTACIÓN: 30 de septiembre del 2024



ÍNDICE DE TABLAS

	Pag.
Tabla 1 Tipos de silicato de sodio.....	34
Tabla 2 Tipos de productos – silicato de sodio.....	34
Tabla 3 Clasificación de suelos según su tamaño.....	43
Tabla 4 Tamaños de tamices.....	44
Tabla 5 Simbología principal de los suelos.....	47
Tabla 6 Modificadores de acuerdo a las condiciones indicadas por la clasificación	48
Tabla 7 Sistema de clasificación AASHTO.....	50
Tabla 8 Cargas patrón para las deformaciones reportadas.....	54
Tabla 9 Relación consistencia y esfuerzo de compresión simple.....	56
Tabla 10 Ubicación geográfica de las muestras de suelo.....	57
Tabla 11 Características del vidrio soluble empleado.....	58
Tabla 12 Granulometría de la muestra C-1.....	65
Tabla 13 Curva granulométrica de la muestra C-2.....	67
Tabla 14 Límite plástico, muestra natural C-1.....	71
Tabla 15 Límite plástico, muestra natural C-2.....	71
Tabla 16 Clasificación SUCS, muestras C-1 y C-2.....	73
Tabla 17 Clasificación AASHTO, muestras C-1 y C-2.....	74
Tabla 18 Expansión para muestra natural C-1.....	77
Tabla 19 Índice CBR natural C-1.....	77
Tabla 20 Expansión para muestra natural C-2.....	78
Tabla 21 Índice CBR natural C-2.....	79
Tabla 22 Límite plástico, muestra C-1 con 1% V.S.....	82
Tabla 23 Límite plástico, muestra C-1 con 3% V.S.....	83
Tabla 24 Límite plástico, muestra C-1 con 5% V.S.....	84
Tabla 25 Límite plástico, muestra C-1 con 7% V.S.....	85
Tabla 26 Límite plástico, muestra C-2 con 1% V.S.....	86
Tabla 27 Límite plástico, muestra C-2 con 3% V.S.....	87
Tabla 28 Límite plástico, muestra C-2 con 5% V.S.....	88
Tabla 29 Límite plástico, muestra C-2 con 7% V.S.....	89
Tabla 30 Expansión muestra C-1, 1% V.S.....	96



Tabla 31	Índices CBR, muestra C-1, 1% V.S.....	96
Tabla 32	Expansión muestra C-1, 3% V.S.....	97
Tabla 33	Índices CBR, muestra C-1, 3% V.S.....	98
Tabla 34	Expansión muestra C-1, 5% V.S.....	99
Tabla 35	Índices CBR, muestra C-1, 5% V.S.....	99
Tabla 36	Expansión muestra C-1, 7% V.S.....	100
Tabla 37	Índices CBR, muestra C-1, 7% V.S.....	101
Tabla 38	Expansión muestra C-2, 1% V.S.....	102
Tabla 39	Índices CBR, muestra C-2, 1% V.S.....	102
Tabla 40	Expansión muestra C-2, 3% V.S.....	103
Tabla 41	Índices CBR, muestra C-2, 3% V.S.....	104
Tabla 42	Expansión muestra C-2, 5% V.S.....	105
Tabla 43	Índices CBR, muestra C-2, 5% V.S.....	105
Tabla 44	Expansión muestra C-2, 7% V.S.....	107
Tabla 45	Índices CBR, muestra C-2, 7% V.S.....	107
Tabla 46	Resultados Límites de Atterberg, Muestra C-1.....	117
Tabla 47	Resultados Límites de Atterberg, muestra C-2.....	118
Tabla 48	Clasificación de suelos según su plasticidad.	119
Tabla 49	Resultados Compactación, muestra C-1.....	121
Tabla 50	Resultados Compactación, muestra C-2.....	121
Tabla 51	Resultados CBR, muestra C-1.....	123
Tabla 52	Resultados CBR, muestra C-2.....	125
Tabla 53	Categorías de Sub rasante.....	127
Tabla 54	Resultados compresión simple, muestra C-1.....	128
Tabla 55	Resultados compresión simple, muestra C-2.....	129
Tabla 56	Resumen análisis de varianza.....	136
Tabla 57	Análisis de varianza.....	136
Tabla 58	Valores CBR de la muestra C-1.....	137
Tabla 59	Valores CBR de la muestra C-1.....	138



ÍNDICE DE FIGURAS

	Pag.
Figura 1 Representación gráfica de la distribución granulométrica.....	42
Figura 2 Medidas estándar sobre el procedimiento para el ensayo de límite líquido.	46
Figura 3 Carta de plasticidad SUCS.....	48
Figura 4 Sistema de clasificación SUCS.....	49
Figura 5 Carta de plasticidad AASHTO.....	51
Figura 6 Grafico densidad seca vs Contenido de Humedad, ensayo Proctor.....	53
Figura 7 Ubicación geográfica de las muestras.....	57
Figura 8 Extracción de material arcilloso C-1 y C-2.....	58
Figura 9 Vidrio soluble (Silicato de sodio).....	59
Figura 10 Curva granulométrica de la muestra C-1.....	66
Figura 11 Curva granulométrica de la muestra C-2.....	68
Figura 12 Gráfica límite líquido, muestra natural C-1.....	69
Figura 13 Gráfica límite líquido, muestra natural C-2.....	70
Figura 14 Curva de compactación, muestra natural C-1.....	75
Figura 15 Curva de compactación, muestra natural C-2.....	76
Figura 16 Curva esfuerzo-deformación, muestra natural C-1.....	78
Figura 17 Curva esfuerzo-deformación, muestra natural C-2.....	79
Figura 18 Esfuerzo deformación para C-1 natural.....	80
Figura 19 Esfuerzo deformación para C-2 natural.....	81
Figura 20 Limite líquido, muestra C-1 con 1% V.S.....	82
Figura 21 Limite líquido, muestra C-1 con 3% V.S.....	83
Figura 22 Limite líquido, muestra C-1 con 5% V.S.....	84
Figura 23 Limite líquido, muestra C-1 con 7% V.S.....	85
Figura 24 Limite líquido, muestra C-2 con 1% V.S.....	86
Figura 25 Limite líquido, muestra C-2 con 3% V.S.....	87
Figura 26 Limite líquido, muestra C-2 con 5% V.S.....	88
Figura 27 Limite líquido, muestra C-2 con 7% V.S.....	89
Figura 28 Curva de compactación, muestra C-1, 1% V.S.....	90
Figura 29 Curva de compactación, muestra C-1, 3% V.S.....	91
Figura 30 Curva de compactación, muestra C-1, 5% V.S.....	91



Figura 31	Curva de compactación, muestra C-1, 7% V.S.....	92
Figura 32	Curva de compactación, muestra C-2, 1% V.S.....	93
Figura 33	Curva de compactación, muestra C-2, 3% V.S.....	93
Figura 34	Curva de compactación, muestra C-2, 5% V.S.....	94
Figura 35	Curva de compactación, muestra C-2, 7% V.S.....	95
Figura 36	Curva Esfuerzo – Deformación, muestra C-1, 1% V.S.	97
Figura 37	Curva Esfuerzo – Deformación, muestra C-1, 3% V.S.	98
Figura 38	Curva Esfuerzo – Deformación, muestra C-1, 5% V.S.	100
Figura 39	Curva Esfuerzo – Deformación, 7% V.S.	101
Figura 40	Curva Esfuerzo – Deformación, muestra C-2 1% V.S.	103
Figura 41	Curva Esfuerzo – Deformación, muestra C-2, 3% V.S.	104
Figura 42	Curva Esfuerzo – Deformación, muestra C-2, 5% V.S.	106
Figura 43	Curva Esfuerzo – Deformación, muestra C-2, 7% V.S.	108
Figura 44	Curva Esfuerzo-Deformación unitaria, muestra C-1, 1%V.S.....	109
Figura 45	Curva Esfuerzo-Deformación unitaria, muestra C-1, 3%V.S.....	110
Figura 46	Curva Esfuerzo-Deformación unitaria, muestra C-1, 5%V.S.....	111
Figura 47	Curva Esfuerzo-Deformación unitaria, muestra C-1, 7%V.S.....	112
Figura 48	Curva Esfuerzo-Deformación unitaria, muestra C-2, 1%V.S.....	113
Figura 49	Curva Esfuerzo-Deformación unitaria, muestra C-2, 3%V.S.....	114
Figura 50	Curva Esfuerzo-Deformación unitaria, muestra C-2, 5%V.S.....	115
Figura 51	Curva Esfuerzo-Deformación unitaria, muestra C-2, 7%V.S.....	116
Figura 52	Resultados Límites de Atterberg, muestra C-1	118
Figura 53	Resultados Límites de Atterberg, muestra C-2	119
Figura 54	Resultados MDS, muestra C-1 y C-2.....	122
Figura 55	Resultados CHO, muestra C-1 y C-2.....	122
Figura 56	Resultados CBR, muestra C-1	124
Figura 57	Resultados expansión, muestra C-1	124
Figura 58	Resultados CBR, muestra C-2	125
Figura 59	Resultados Expansión, muestra C-2.	126
Figura 60	Resultados compresión simple, muestra C-1	128
Figura 61	Resultados qu, muestra C-1, esfuerzo deformación.....	129
Figura 62	Resultados compresión simple, muestra C-2.	130
Figura 63	Resultados qu, muestra C-2, esfuerzo deformación.....	130



ACRÓNIMOS

UCS	: Resistencia a la compresión uniaxial
qu	: Carga última
Tf	: Resistencia media del suelo al corte
ASTM	: American Society for Testing Materials
CBR	: Relación de soporte California
MDS	: Máxima Densidad Seca
CHO	: Contenido de Humedad Óptimo
NTP	: Norma Técnica Peruana
MTC	: Ministerio de Transportes y Comunicaciones
LL	: Limite liquido
LP	: Limite plástico
IP	: Índice de plasticidad
UNA	: Universidad Nacional del Altiplano
AASHTO	: Asociación Americana de Funcionarios Estatales de Carreteras y Transporte
SUCS	: Sistema unificado de clasificación de suelos
CH	: Arcilla de alta plasticidad
COFOPRI	: Organismo de la formalización de la propiedad informal
V.S.	: Vidrio Soluble
IG	: Índice de grupo



RESUMEN

En cualquier proyecto de obras civiles, es preciso evaluar las cualidades del material sobre el que se va a llevar a cabo, ya que todo tipo de obra civil va a ser ejecutada sobre un terreno. Ya sean edificaciones, puentes o carreteras, estos van a ser evaluados según su calidad o índices para soportar las estructuras. En carreteras, es imperativo analizar la capacidad de soporte del material, en mayor parte a suelos que se constituyen de partículas finas, dado que estos tienden a indicar un comportamiento menos definido por las composiciones de mineral presentes. Frente a esto, se propone mejorar la calidad del material. Para el caso dado, esta investigación tiene por objeto evaluar el cambio de las propiedades mecánicas de suelos definidos como blandos y cohesivos. La muestra extraída proviene de la vía Juliaca – Canchi Grande, lugar que presencia poco desarrollo vial, y que está en pleno crecimiento poblacional. En este lugar se presencian suelos finos de alta cohesión que tienden a ser problemáticos, por su baja capacidad de soporte, donde se evaluará mediante ensayo la incorporación del aditivo químico de vidrio soluble, evaluando sus resultados en la factibilidad de su uso según la normativa peruana. Dicho esto, se propone evaluar las propiedades físicas y mecánicas del material con sus respectivas incorporaciones de vidrio soluble. Los porcentajes propuestos indican incorporaciones de 1%, 3%, 5% y 7%. Donde se indican resultados prometedores, dado su reducción del índice de plasticidad, indicando la pérdida de un comportamiento arcilloso, el aumento de su máxima seca, su incremento en su CBR y su capacidad de carga última, dado el resultado. Por lo tanto, se considera al silicato de sodio como una propuesta en la estabilización química, que es ecológicamente amigable, y permitiría un adecuado comportamiento del suelo.

Palabras Clave: Arcillas, CBR, Estabilización, Silicato de sodio, Vidrio soluble.



ABSTRACT

In any civil works project, it is necessary to evaluate the qualities of the material on which it will be carried out, since all types of civil works will be executed on land. Whether buildings, bridges, or roads, these will be evaluated according to their quality or indexes to support the structures. In roads, it is imperative to analyze the support capacity of the material, mostly in soils that are made up of fine particles, since these tend to indicate a less defined behavior due to the composition of minerals present. Faced with this, it is proposed to improve the quality of the material. For the given case, this research aims to evaluate the change in the mechanical properties of soils defined as soft and cohesive. The sample extracted comes from the Juliaca-Canchi Grande road, a place that has little road development and that is in full population growth. In this place, fine soils with high cohesion are present, which tend to be problematic due to their low support capacity, where the incorporation of the chemical additive of soluble glass will be evaluated by means of a test, evaluating its results in the feasibility of its use according to Peruvian regulations. That said, it is proposed to evaluate the physical and mechanical properties of the material with its respective incorporations of soluble glass. The proposed percentages indicate incorporations of 1%, 3%, 5%, and 7%. Where promising results are indicated, given its reduction in the plasticity index, indicating the loss of a clayey behavior, the increase in its maximum dry, its increase in its CBR, and its ultimate load capacity, given the result. Therefore, sodium silicate is considered a proposal in chemical stabilization, which is ecologically friendly and would allow an adequate behavior of the soil.

Keywords: Clay, CBR, Sodium silicate, Stabilization, Water glass.



CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El incremento del tránsito en las vías y la falta de mantenimiento existente hacen que estas sean insostenibles, resultando vías con diferentes fallas, lo que ocasiona que el traslado de la población sea más dificultoso. Además de ello, genera pérdidas de tiempo y de dinero en los vehículos de su transporte y durante el traslado a sus centros de trabajo o de estudio. Es por ello que existe la necesidad de mejorar las subrasantes y dar las vías para dar solución a la problemática existente. Según Larico (2021), hay varias formas de estabilizar o mejorar la subbase y la subrasante del material de cantera para aumentar la capacidad portante, que está relacionado con los proyectos de construcción a lo largo del tiempo. Las técnicas más utilizadas son la estabilización química y mecánica. Galindo & Avellaneda (2016) también mencionan que “estos requerimientos buscan en todos los casos generar un excelente comportamiento de la estructura que se construya sobre ellos, bien sea en la etapa de construcción y/o de servicio”.

Con frecuencia se estabilizan suelos de contextura fina con características geomecánicas indeseables. Como resultado, cuando estos suelos sufren fluctuaciones de humedad, es muy probable que se produzcan problemas de inestabilidad volumétrica. En la actualidad, estos tipos de suelos pueden estabilizarse de varias maneras, empleando diversos agentes estabilizadores, como sales, cal, cemento Portland, productos asfálticos, ácidos orgánicos, resinas y polímeros. Para mejorar los resultados, también pueden combinarse dos o más de estos estabilizantes.



1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

1.2.1. Problema general

- ¿Cuál es la influencia del vidrio soluble en suelos blandos y cohesivos para mejorar las propiedades de la subrasante de la vía Juliaca – Canchi Grande en la región Puno, 2022?

1.2.2. Problemas específicos

- ¿Cuáles son los valores estándar de las propiedades mecánicas del material de subrasante blando y cohesivo de la vía Juliaca – Canchi Grande?
- ¿Cuál es la influencia del vidrio soluble en diferentes porcentajes en las propiedades mecánicas del material de subrasante blando y cohesivo de la vía Juliaca – Canchi Grande?
- ¿Cuál es el porcentaje óptimo de incorporación de vidrio soluble para el mejoramiento de las propiedades mecánicas del material de subrasante blando y cohesivo de la vía Juliaca – Canchi Grande?

1.3. JUSTIFICACIÓN DEL ESTUDIO

En la zona departamental de Puno, el Ministerio de Transportes y Comunicaciones (2022) reporta que existen 2349.9 km de red vial, no pavimentada que asciende a 1476.9 km, entre ellos se encuentran, vías afirmadas, sin afirmar y trochas, los cuales necesitan mejorar su calidad de infraestructura haciendo fácil el acceso entre zonas rurales y zonas urbanas.

Según el (Gobierno Regional Puno, 2015) indica que la formación Ayabacas ubicada cerca de la ubicación de la presente investigación comprende lugares donde los suelos son arcillosos con algunas presencias de caliza, por lo tanto hay dificultad de



realizar infraestructuras, esto debido a que este tipo de suelo no cumple con los requerimientos mínimos, por lo que los suelos arcillosos no pueden soportar cargas de tráfico vehicular, presentando problemas de fallas o asentamientos. En vista de que este tipo de suelo se presenta en la vía Juliaca – Canchi Grande que según el MTC (2017) el tramo de la vía de estudio denominado como la vía PU-910, está clasificado como una red vial rural o vecinal, se plantea la presente investigación.

La vía o camino de análisis definida en la presente investigación denominada como vía Juliaca – Canchi Grande, catalogado por la Dirección General de Caminos y Ferrocarriles (2017) en su mapa vial de su inventario indicando una clasificación de red vial vecinal. Reclasificado temporalmente mediante la resolución ministerial N° 033-2021-MTC/01.02 como vía departamental o regional, está consolidada actualmente como afirmado y en los últimos años se vino realizando mantenimientos periódicos y rutinarios para un mejoramiento de vía, indicando un afirmado de 10-15 cm. El cual presenta un nivel freático de 4-5 metros aproximadamente bajo el nivel natural del terreno. La zona indica que se sufren algunas inundaciones y algunas zonas poco estables, las cuales requieren de mantenimiento o mejoramiento, por el desnivel presentado en base a su aspecto situacional de la vía. En base a ello (Valdivia, 2005) indica el círculo virtuoso de la vía propuesto por el sistema de mantenimiento por el Programa de Caminos Rurales (PCR) que comprende la construcción de la vía y ciclos repetidos de rehabilitación y mantenimiento rutinario y periódico, indicando una rehabilitación de camino rural que según el horizonte de evaluación recomendado por el (Ministerio de Economía y Finanzas, 2011) indica un periodo de vida o de operación recomendado de 10 años, que comprende la conformación de subrasante, lastrado y obras de arte, el mantenimiento rutinario indicando acciones rutinarias generalmente manuales previniendo el deterioro de la vía que se realiza según su emergencia permanentemente, y un mantenimiento



periódico cada 3 años que consiste en acciones preventivas con un uso intensivo de maquinaria y reposición de material de afirmado.

El objetivo de este proyecto de investigación es encontrar una solución a los problemas que plantea la construcción de infraestructuras viarias en los suelos blandos y cohesivos de la región. El proyecto se justifica por las aportaciones que realiza la incorporación de vidrio soluble en la estabilización química de suelos arcillosos para mejorar sus propiedades mecánicas y físicas.

Según el MTC (2014), se identifica a los limos y arcillas como material inadecuado para las sub rasantes, ya que presentan una capacidad de soporte y resistencia a la compresión simple muy baja. El fin del uso del vidrio, indica su uso como aglomerante, dado que va a representar una reacción química con los minerales del suelo y con el agua ayudando a consolidar y solidificar las partículas del suelo.

Con los resultados obtenidos durante los ensayos, se tiene por finalidad servir de base a una alternativa de tratamiento que se debe realizar a un suelo que se desee estabilizarlo químicamente con vidrio soluble, según las investigaciones de (Galindo & Avellaneda, 2016), que indica mejoras en suelos de este tipo, además de contrastar los resultados con otros autores en diversos tipos de suelos similares o diferentes.

1.4. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

1.4.1. Objetivo general

- Evaluar la influencia del vidrio soluble en suelos blandos y cohesivos para el mejoramiento de las propiedades físicas y mecánicas de la subrasante de la vía Juliaca – Canchi Grande.



1.4.2. Objetivo específico

- Determinar las propiedades físicas y mecánicas en estado natural del material de subrasante del camino Juliaca – Canchi Grande.
- Determinar las propiedades físicas y mecánicas con la incorporación de vidrio soluble del material de subrasante del camino Juliaca – Canchi Grande.
- Establecer el óptimo porcentaje de incorporación de vidrio soluble en base al mejoramiento de las propiedades mecánicas y físicas del material de subrasante del camino Juliaca – Canchi Grande.

1.5. HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACIÓN

1.5.1. Hipótesis General

- La incorporación del vidrio soluble en suelos blandos y cohesivos tiene un efecto significativo, mejorando las propiedades físicas y mecánicas de la subrasante de la vía Juliaca – Canchi Grande.

1.5.2. Hipótesis Específicas

- Las propiedades mecánicas y físicas en estado natural del material de subrasante del camino son deficientes y no cumplen con los requisitos necesarios para asegurar una adecuada estabilidad y soporte para la estructura del pavimento.
- El vidrio soluble en diferentes porcentajes influye disminuyendo el índice de plasticidad e incrementando el grado de compactación, la capacidad de soporte, y la resistencia a la compresión no confinada del material de subrasante del camino Juliaca – Canchi Grande.



- El vidrio soluble a cierto porcentaje es óptimo en cuanto al mejoramiento de las propiedades mecánicas y físicas del material de subrasante de la vía Juliaca – Canchi Grande.



CAPÍTULO II

REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. ANTECEDENTES

2.1.1. Antecedentes internacionales

Caballero (2017), en su tesis titulada “Estabilización química con silicato de sodio del material de préstamo de la vía La Primavera – Bonanza – La Venturosa en el departamento del Vichada” indica la metodología utilizada se desarrolló en tres etapas: exploración y caracterización física del material presente en el territorio, caracterización del suelo compactado y evaluación de los distintos estabilizantes. El objetivo de esta evaluación era determinar el impacto de la utilización de silicato sódico en los materiales de préstamo locales, con vistas a su aplicación en la construcción de carreteras y la mejora de las propiedades del suelo. Durante las pruebas físicas se encontró un contenido de humedad del 1,3% y un índice de plasticidad del 17%. Las resistencias a la compresión simple para las adiciones de 15, 25 y 50% de silicato sódico fueron de 924 kg/cm², 1.348 kg/cm² y 1.659 kg/cm², respectivamente. Los resultados muestran que la adición de vidrio soluble aumenta el módulo elástico, lo que indica que estos materiales funcionan bien cuando se utilizan para producir rellenos.

(Harianto, 2022) en el artículo denominado “Rendimiento de la capa de subbase con refuerzo de geomalla y estabilización con zeolita-vidrio soluble” de la revista de Ingeniería civil identifica estudios realizados en un suelo de clasificación MH o A-5, definiendo la fuerza de compresión en 97.1 kN/m² y un CBR del 19.0% sin sumergir; indica que con una incorporación de zeolita y vidrio



soluble, en combinaciones del 4%, 8%, 12%, 16% y 20% de zeolita, con 2%, 4%, 6% de vidrio soluble. Indica valores de UCS 300-2500 kN/m² y valores de CBR que aumentan hasta en 3.6 veces el valor original, todas las muestras expuestas a 7, 14 y 28 días de inmersión en agua.

Gobinath et.al. (2019), en el artículo denominado “Refuerzo con fibra de plátano de un suelo estabilizado con silicato de sodio”, indica que para un suelo de tipo SW, se hicieron incorporaciones de fibra de banana en contenidos de 0.0%, 0.1%, 0.2%, 0.3%, 0.4%, 0.5%, añadiendo a ello un contenido de 1% de silicato de sodio en peso. Se registraron características mecánicas en donde el UCS se incrementó en 445%, 0.36 Mpa a 1.83 Mpa, un incremento de la fuerza cortante del 80%, cuyos valores oscilan entre 0.10 Mpa y 0.18 Mpa, y un incremento de CBR del 1083%, de valores de 2.7% al 32% aproximadamente.

(Galindo & Avellaneda, 2016) en su tesis titulada “Análisis técnico del uso de silicato de sodio para estabilización química de suelos”, indica como objetivo verificar los resultados de laboratorio sobre una muestra químicamente estabilizada con silicato de sodio, para verificar el contenido óptimo que evidencie un mejoramiento en su capacidad de soporte, donde detalla la clasificación de suelo tipo CH con un CBR inicial del 8%, e indica incorporaciones de silicato de sodio de 0%, 2%, 4%, 6%, 8%, 10% y 12%, en donde indica un incremento en su peso unitario seco y una óptima dosificación del 6.4% aproximadamente, para CBR en inmersión y CBR en condición de humedad ambiente, con CBR de 14% y 22% respectivamente.

(Moayedi, Huat, Kazemian, & Daneshmand, 2011) en su artículo titulado “Estabilización de suelo orgánico mediante lechada del sistema de silicato de



sodio.” Analizan los ensayos de compresión no confinada, en donde muestran que en las pruebas por lotes de resistencia a la compresión libre (UCS), se pueden lograr aumentos de hasta un 220% de la resistencia base del suelo agregando 3 mol/L de Na_2SiO_3 , mientras que los resultados de la UCS mejoraron hasta un 270% con un activador CaCl_2 y/o aditivos $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$. Además, el uso de molaridades más altas de CaCl_2 (por ejemplo, 1 mol/L) no mostró ningún efecto notable en los resultados de la resistencia a la compresión no confinada.

Neeladharan et. Al. (2018), en su artículo denominado “Estabilización de suelos mediante el uso de polvo de mármol con silicato de sodio como aglutinante.” Refiere que los ensayos de laboratorio para los límites de consistencia, ensayos de compactación, resistencia al corte y CBR, donde indica incorporaciones de polvo de mármol con silicato de sodio, en combinaciones de 5%, 10%, 15% y 20% de polvo de mármol con 2.5%, 5%, 7.5% y 10% de silicato de sodio, donde realiza observaciones que indican variaciones de más del 15% en sus límites de Atterberg, indicando un cambio de comportamiento de la arcilla de una clasificación de CH a ML, la máxima densidad seca se incrementa en un 15% por el polvo de mármol y un 10% por el silicato de sodio, en cuanto a su CBR, indica un aumento de 1.51% en el suelo natural, al 16.24% con una combinación de 15% de polvo de mármol y 10% de silicato de sodio.

(Perret, 2015) en su tesis titulada “Estabilización de loess con silicato para uso vial” indica la realización de ensayos de límites de consistencia, Proctor y CBR, indicando que para un suelo de clasificación ML donde indica presencia de carbonato de calcio que indica una capacidad última de 1.07 kg/cm^2 y 0.84 kg/cm^2 , y un CBR de 2 %. Se indica que para las mezclas de 10:1:2, haciendo referencia a 10 de suelo, 1 de silicato y 2 de agua, indica una mejora del 617% y 803% a 4 y



11 días respectivamente; la mezcla 22:1:5 no presentaba variación entre los 4 y 11 días, con una mejora de 402%.

(Ferrero, 2023) en su tesis titulada «Estudio in-situ de estabilización de suelo vial: aplicación en campo “La Toma” Ruta N° 19 Córdoba» indica incorporaciones de 1SN:2C:2S, 1SN:4C:4S y 1SN:6C:6S, indicando combinaciones de cal hidratada y silicato de sodio para un tipo de suelo CL-ML, donde indica un valor de CBR natural del 2.5%, indicando mejoras en la dosificación de 1SN:4C:4S del 880% y una mejora del 800% para una dosificación de 1SN:2C:2S, es decir, con un CBR de 24.7% en la dosificación óptima.

(Mora & Rodriguez, 2017) en su tesis titulada “Análisis del efecto del silicato de sodio en bases granulares para contrarrestar la pérdida de capacidad de soporte por efecto de la saturación”, indica la incorporación de silicato de sodio 0%, 23%, 46%, 69%, 90%, del óptimo contenido de humedad, indicando que para un suelo de tipo GW indica un CBR del 75% y para una dosificación óptima del 46% indica un valor del 115% de CBR en estado sumergido y en estado no sumergido un CBR base del 100%, y una dosificación óptima del 46% un CBR del 180%.

(Molano & Leiton, 2017), en su tesis titulada “Análisis del comportamiento mecánico de los suelos limo arenosos estabilizados con silicato de sodio.” Detalla incorporaciones de 10%, 40%, 55%, 70% y 90% de silicato de sodio en base al contenido de humedad óptimo. Indica pruebas de compresión no confinada para el suelo limo arenoso, indicando mejora para un contenido de



humedad óptimo de 13% y un contenido de silicato de sodio del 70%, dando un resultado máximo en 8.5 KN/m².

(Hussain & Thaku, 2022), en su artículo titulado “Revisión sobre el efecto de la cal de reemplazo y el silicato de sodio en la estabilización del suelo”, indica que se incorporó cal y silicato de sodio en porcentajes de peso de 2.5%, 4.5% y 6.5% de cal y 1.5%, 2.5% y 3.5% de silicato de sodio, refiere que para un suelo de tipo arcilloso, con un UCS de 4.10 kg/cm² se incrementa a 9.73 kg/cm² con un contenido de 3.5% de silicato de sodio, en cuanto al CBR, indica un aumento de 6.2% y 3.2% para un suelo natural, a 15.6% y 5.4% con cal y 18.7% y 8.6% con silicato de sodio, sin inmersión y sumergido en agua respectivamente.

Wanare Et. Al. (2023), en su artículo denominado “Efecto de las cenizas volantes y el silicato de sodio en la estabilización del suelo” indica comparaciones de incorporación de ceniza volante y silicato de sodio donde se observan incorporaciones de 5%, 10%, 15%, 20% de ceniza volante y 2.5%, 5%, 7.5%, 10% y 12.5% de silicato de sodio, indicando que para el suelo natural presenta un UCS de 131.69 KN/m², una densidad seca máxima de 13.5 KN/m³ con 28 % de contenido de humedad óptimo y un CBR de 1.79%, para el suelo no tratado. Y comparaciones de 371.5 kN/m² para una adición del 15% de ceniza volante, y 170.98 kN/m² para una adición de 5% de silicato de sodio, con un CBR de 6.71% con 15% de ceniza volante, y 14.49% con 5% de silicato de sodio.

B. Jin & B. Chun (1984) en el artículo denominado “Mejora de la resistencia del suelo mediante inyección de lechada química de vidrio soluble” donde se planteó el objetivo de observar la influencia del vidrio soluble combinado con un cemento tipo IP en una relación del 25% de incorporación del



estabilizador, bajo el método de inyección del aditivo aumentando su resistencia de 2 a 3 veces la resistencia base del suelo, y adicionando cemento aumentó hasta 10 veces la resistencia. Incrementando la resistencia desde 0.53 kg/cm^2 hasta 4.9 kg/cm^2 con cemento y vidrio soluble, y hasta 1.65 kg/cm^2 solo con vidrio soluble.

Álvarez & Rojas (2020) en su proyecto de investigación titulado “Aplicación de temáticas en ingeniería civil: comparación de las alternativas de estabilización con cal, cemento, silicato de sodio y aceite sulfonado para vías terciarias con presencia de arcilla en la región de la Orinoquía”, donde se planteó el siguiente objetivo de con el objetivo de contrastar las opciones de estabilización con aceite sulfonado, cemento, cal y silicato de sodio para vías terciarias de la zona del Orinoco que contienen arcilla. Cuatro etapas componen la metodología: recolección de datos, estabilización y ensayos físico-mecánicos, muestreo y dosificación de silicato y análisis de resultados. Para adiciones de 0% y 3% de silicato, los ensayos demostraron las siguientes características: una densidad seca máxima de $1,423 \text{ g/cm}^3$ y $1,602 \text{ g/cm}^3$, un contenido de humedad de 22% y 9,9%, un índice de plasticidad de 6% y 1%, un contenido de humedad óptimo de 9.9% y 13.5%, y un CBR de 1.98% y 4.84%. Se determina que la adición de silicato sódico mejora las propiedades mecánicas y físicas del suelo de conformidad con los requisitos del INVIAS sobre la base de los resultados de las pruebas.

(Cruz, Ítalo, Arnaudo, & Vigilante, 2015) En el artículo “Estabilización de sub rasante loésica con silicato de sodio líquido” de la revista de Geología Aplicada a la Ingeniería y al Ambiente, Se evalúa el impacto de la adición de vidrio soluble líquido a suelos que contienen sales de calcio. La reacción da lugar a la producción de silicatos cálcicos insolubles que, al hidratarse, forman una cementación extremadamente resistente. La investigación está centrada en la red



vial Cordovesa, buscando estabilizar subrasantes erodables, caracterizadas en dos etapas de ensayos y buscando la dosificación óptima del silicato en combinación con el suelo loessico. Los valores de las dosificaciones se dieron en 1S:2A:10L, 1S:4A:18L, 1S:5A:22L, 1S:6A:28L, 1S:8A:38L, siendo la dosificación óptima 1S:2A:10L, mejorando el CBR de 1.48% a 16.06%, para 11 días de sumersión en agua.

2.1.2. Antecedentes nacionales

Aguilar & Cardenas (2023) en la tesis titulada “Estabilización De Suelos Arenosos Mediante La Adición De Silicato De Sodio En La Subrasante De La Alameda Sur De Chorrillos”. Cuyo objetivo es mejorar y dar proporciones que generen mayor capacidad de soporte al suelo, caracteriza, define y ejecuta los ensayos de suelos en su clasificación, su estratigrafía y en demás propiedades definidas por los ensayos de límites de consistencia, granulometría, Proctor modificado y CBR granulares con proporciones de 4, 6, 8 y 10 % de silicato de sodio. En comparación al suelo natural, mejora desde un CBR base de suelo natural del 5.5 % con densidades máximas de 1.837 g/cm³, 1.835 g/cm³ y 1.842 g/cm³ hasta un 47.7 % con densidades máximas de 1.916 g/cm³, 1.893 g/cm³ y 1.913, donde se evidencia una mejora favorable.

(Bonifaz & Gamarra, 2022) En su proyecto de investigación titulado “Comparación del silicato de sodio y cemento para la estabilización de la subrasante en la avenida los profesionales, ventanilla 2022” tesis elaborada con el objetivo de ver la influencia y comparar los usos del silicato de sodio y el cemento, teniendo como dosificaciones, 6%, 6.5% y 7% en silicato de sodio, y 2%, 4% y 6% en cemento, el cual para interés de esta investigación se obtuvo resultados de



mejora en la máxima densidad seca de 1.701 g/cm^3 a 1.751 g/cm^3 con el 6% de silicato de sodio, e incrementando el óptimo contenido de humedad, y su incremento en el CBR al 95% el cual aumento de 35.20% a 68.10%.

Chávez (2021) en su proyecto titulado “Silicato de sodio para la estabilización de suelos en la trocha La Menta km 00+000 - Garabato km 1+430 distrito de Las Lomas-provincia y departamento de Piura”, con el siguiente objetivo de evaluar los resultados de los experimentos de laboratorio con silicato sódico con el fin de determinar la proporción ideal para mejorar la aplicación del suelo estabilizado y las cualidades de la capa de rodadura. Se empleó un enfoque descriptivo con un diseño experimental. Para adiciones de 0%, 4%, 6%, 8% y 10% de silicato sódico, los ensayos produjeron los siguientes resultados: un índice de plasticidad de 23%, 22,6%, 20%, 20% y 18%, respectivamente. En el ensayo Proctor modificado se alcanzaron densidades secas máximas de $1,998 \text{ g/cm}^3$, $2,015 \text{ g/cm}^3$, $2,018 \text{ g/cm}^3$, $2,020 \text{ g/cm}^3$ y $2,025 \text{ g/cm}^3$, mientras que en el ensayo CBR para 56 golpes se obtuvieron valores de 7%, 29,3%, 39,7%, 45% y 35%. Estos resultados llevan a la conclusión de que el índice de plasticidad disminuye al aumentar el porcentaje de adición, mientras que el contenido óptimo de humedad y el CBR aumentan; la proporción ideal para mejorar el suelo es del 8% de vidrio soluble.

Larico (2021) En la presente investigación titulada “Mejoramiento de material de cantera para subbase incrementando el CBR por adición de vidrio soluble, distrito Callería, Ucayali 2021”, Se discuten las teorías pertinentes al tema, incluyendo la definición de suelo, los métodos de compactación, la categorización del suelo y las ideas de estabilidad y mejora. Además, se detallan las pruebas empleadas en este estudio, como el Proctor modificado, el límite



líquido, el límite plástico, el análisis granulométrico y las pruebas CBR. Estos estudios son parte del objetivo mayor, que es emplear vidrio soluble como subbase en la zona de Callería de Ucayali para aumentar la estabilidad del suelo. Se aplicó una metodología científica suficiente y los instrumentos utilizados para recopilar los datos se basaron en normas técnicas estandarizadas directas y fiables, como ASTM D-4318 (CBR), ASTM D 1883 y ASTM D-1557 (Proctor modificado), MTC E 107-2000 (granulometría), MTC E 108-2000 (contenido de humedad) y MTC E 110-2000 (límite líquido y plástico). Tras las pruebas pertinentes, la combinación del material de cantera categorizado y el vidrio soluble produjo resultados óptimos y ventajosos para el uso del material en la subbase convencional.

(Kusaka, 2020) en su tesis titulada “Influencia de la adición de sedimentos de clarificación de aguas de riego activadas alcalinamente con silicato de sodio en la estabilización ecológica de suelos arenosos en la provincia de Virú, La Libertad, 2019”, donde indica que para un suelo de clasificación SP realizó incorporaciones de silicato de sodio en porcentajes de 0%, 2%, 4%, 6%, 8%, donde indica que para el suelo natural posee un CBR del 14% y una resistencia a la compresión triaxial del 1071 Kpa, donde se obtiene una dosificación óptima para la compresión triaxial del 4% y una óptima para una dosificación de 8% donde obtiene un CBR de 111%.



2.2. MARCO TEÓRICO

2.2.1. Vidrio soluble

2.2.1.1. Definición

En el grado del requerimiento de estabilizar los suelos que presentan problemas al momento de la construcción, para la presente investigación se tomó como agente estabilizante el vidrio soluble; este compuesto químico en solución con el agua dota de propiedades para una estabilización química del terreno.

Conocido también como silicato de sodio, es una sustancia química (Na_2SiO_3), la cual tiene un amplio sector de aplicación como ligante, en productos de limpieza, cementos, capas de protección, anticorrosivo, etc. Gracias a sus características solubles puede ser empleada de una forma eficaz y su valor es muy accesible. Aparte de ello, es un producto con la capacidad de brindar soluciones ecológicas al no ser tóxico ni inflamable (Galindo & Avellaneda, 2016).

El vidrio soluble puede ser utilizado en aplicaciones de estabilización química de suelos como un agente aglomerante. El silicato de sodio o vidrio soluble es un compuesto químico que consiste en sílice (dióxido de silicio, SiO_2) y óxido de sodio (Na_2O), y es comúnmente conocido como "vidrio soluble" o "agua de vidrio". Se produce a través de la fusión de arena de sílice con carbonato de sodio (soda cáustica) en un horno a altas temperaturas. El producto resultante puede variar en proporción de sílice a soda, lo que da lugar a diferentes grados de solidez y alcalinidad.



El vidrio soluble tiene propiedades alcalinas, lo que lo hace útil en una variedad de aplicaciones industriales y comerciales. Sin embargo, su uso también puede tener ciertas limitaciones y consideraciones de seguridad, especialmente en términos de manejo y almacenamiento adecuados para evitar riesgos para la salud y el medio ambiente.

2.2.1.2. Tipos de vidrio soluble

Para Hurley & Thornburn (1972), dictamina que, en teoría, el álcali y la sílice se pueden combinar en cualquier parte, pero el contenido de no más de aproximadamente 4 a 1 en peso de relación sílice/álcali baja la solubilidad del silicato fundido más que esta tasa. Los silicatos se disuelven físicamente de forma diferente, desde vidrio simple y altamente fundido, hasta piezas de vidrio moderadamente opacas solubles en agua hirviendo y agua como jarabe de arce almíbar y de flujo espeso, fino y lento. Se indica la existencia de productos comerciales disponibles, comercializados por cualquier empresa. Suelen incluir de 15 a 30 soluciones de silicato y de 5 a 15 soluciones de silicatos anhidros.

Los silicatos con alcalinidades superiores a $\text{SiO}_2: \text{Na}_2\text{O} = 1,60$ son sales cristalinas definidas. Es una fórmula química constante y detectable, dispuesta en el orden

Se reducen los tipos de silicato según la alcalinidad de la siguiente manera:

Tabla 1*Tipos de silicato de sodio*

SiO ₂ :Na ₂ O	Nombre	Fórmula
1:2	Ortosilicato de sodio	Na ₄ SiO ₄
2:3	Sesquisilicato de sodio	Na ₆ Si ₂ O ₇
1:1	Metasilicato de sodio	Na ₂ SiO ₃
2:1	Disilicato de sodio	N ₂ Si ₂ O ₅

Nota: Extraído de “Estabilización de suelos con silicato de sodio: una revisión de la literatura” (Hurley & Thorburn, 1972, p.48).

El silicato más utilizado en el procesamiento de materiales de construcción es la solución conocida como vidrio soluble. Tiene una proporción de sílice: álcali de aproximadamente 3,22 y se vende en densidad alrededor de 41 B a 68 F o gravedad específica 1.394.

Debido a su alcalinidad, el vidrio soluble o silicato de sodio presenta diferentes soluciones, de las cuales se precisó el uso de silicato de sodio neutro viscoso.

Tabla 2*Tipos de productos – silicato de sodio*

Nombre del producto	Relación en peso SiO ₂ /Na ₂ O	% Na ₂ O	% SiO ₂	Densidad a 68°F (20 °C)		pH	Viscosidad en centipoises (20 °C)	Características
				Be	Gr/cm ³			
STIXO	3.25	9.2	29.9	42.5	1.41	11.3	200 a 6000	Líquido neutro viscoso
N	3.22	8.9	28.7	41.0	1.38	11.3		Líquido neutro
O	3.22	9.2	29.6	42.2	1.41	11.3		Más concentrado que N
K	2.88	11.1	31.9	47.0	1.47	11.5	650 a 3800	Líquido pesado
A-20	2.35	13.4	31.4	50.0	1.53	12.0		Líquido alcalino opalescente
RU	2.40	13.8	33.2	52.0	1.55	12.0	1150 a 4000	Líquido denso
D-50	2.00	14.7	29.5	50.5	1.53	12.7		Líquido alcalino
B-W	1.60	17.3	27.8	52.8	1.57	13.4		Líquido alcalino fluido

Nota. Extraído de “HOJA TECNICA DEL SILICATO DE SODIO TIPO N” (PRODUCTOS QUIMICOS SYDNEY, 2000)



2.2.1.3. Propiedades del vidrio soluble (neutro)

Para el presente caso de estudio se utilizó el silicato de sodio (vidrio soluble) con las siguientes características.

- Características sensoriales
 - Aspecto: Líquido viscoso
 - Olor: Sin olor
- Características físicas y químicas.
 - Fórmula química: $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot x\text{H}_2\text{O}$
 - Na_2O : 8.0% - 8.6%
 - SiO_2 : 28.0% - 29.0%
 - Rango 3.29-3.37
 - Densidad: 40.0°Bé – 40.7°Bé (1.38 gr/cm³ – 1.39 gr/cm³)
 - Viscosidad: 1000 cPs – 7000 cPs
 - pH solución acuosa al 1% (20°C): 10-12
 - Sólidos totales: 36.5% - 37.6%

2.2.1.4. Aplicación del vidrio soluble

De acuerdo con (Hurley & Thorburn, 1972), se presentan 4 formas de aplicación para el silicato en función del mejoramiento o estabilización del suelo; estos métodos comprenden: método por inyección para solidificación del suelo, silicato como estabilizador de suelo, impermeabilizante y aditivo secundario.

Método de aplicación por inyección para solidificación del suelo.

El procedimiento consiste en inyectar una solución de silicato sódico y agua a determinadas profundidades. Esta solución contiene



hidróxido de sodio y ácido silícico coloidal. El silicato puede reaccionar con los elementos químicos del suelo para generar un gel insoluble cuando se añaden sales o ácidos.

Método de estabilización por mezcla

Este es el método más común de uso del vidrio soluble, donde se mezcla el silicato con el suelo en proporciones establecidas para los ensayos de laboratorio. La mezcla se realiza con maquinaria para asegurar la uniformidad de la distribución del aditivo.

Como segundo aditivo

Este método indica que se presenta en combinación con otros estabilizadores, ya sea con cal o cemento, según las necesidades del proyecto.

Como impermeabilizante

Se indica que para aplicaciones de impermeabilización, el silicato de sodio que se aplica como recubrimiento superficial para la superficie de los suelos logra impermeabilizar el suelo o resulta ser a prueba de polvo.

2.2.2. Estabilización de suelos

Según el (Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2016), la mejora de las cualidades mecánicas, físicas y/o físico-químicas de un suelo mediante procesos mecánicos y/o físico-químicos se considera la idea general de estabilización del suelo.

Dar a los suelos resistencia mecánica y asegurarse de que estas características perduren en el tiempo, se conoce como estabilización del suelo. Añadir más tierra e incorporar uno o más productos químicos estabilizadores son



ejemplos de técnicas para estabilizar. Cualquier técnica de estabilización tiene lugar después del proceso de compactación.

Las estabilizaciones de suelos habitualmente se realizan sobre los suelos de sub rasante inadecuado o insuficiente. La estabilización de suelo debe dotar de mejoramiento en las propiedades y durabilidad de dichas propiedades con el paso del tiempo en la vía. Debido a su importancia, se suelen realizar distintos tipos de estabilizaciones; entre ellos tenemos.

2.2.2.1. Estabilización química de suelos

Según (Archibong, Sunday, Akudike, Okeke, & Amadi, 2020) La estabilización química implica la estabilización del suelo mediante la adición de diferentes productos químicos con la gran ventaja de controlar su tiempo de fraguado y de curado, aunque generalmente es más caro. Algunos de estos productos químicos utilizados con éxito son:

- Cloruro de calcio
- Cloruro de sodio
- Silicato de sodio
- Polímeros
- Cromo lignina
- Otros químicos

La estabilización química de suelos, por tanto, es el proceso de estabilización de suelos arcillosos mediante la aplicación de determinados productos químicos que, cuando se aplican en las cantidades adecuadas, tienen los efectos deseados de forma instantánea.



2.2.2.2. Estabilización mecánica de suelos

Según (Das, 2013), la estabilización mecánica de suelos se define como “metodologías que mejoran las propiedades de ingeniería de los suelos seleccionados sin la adición de agentes u otras energías de unión de partículas. En otras palabras, no hay efectos químicos o de unión incluidos en esta metodología”. Comprende, entre otros, los siguientes:

- Precarga
- Voladura o blasting
- Vibroflotación
- Compactación dinámica
- Compactación
- Drenes de arena

El término "estabilización mecánica" describe el proceso de compactación del suelo en un laboratorio o in situ para mejorar sus características mecánicas y físicas, incluidas la permeabilidad, la resistencia y la deformabilidad. Esta técnica se utiliza con frecuencia para reducir los asentamientos y aumentar la capacidad portante de los suelos de cimentación.

2.2.2.3. Estabilización física de suelos

(Nicholson, 2015) afirma que “las mejoras físicas se realizan alterando la gradación del suelo (o la distribución del tamaño de los granos del suelo), agregando o restando ciertos tamaños de granos del suelo o agregando materiales que unen físicamente las partículas del suelo sin



causar reacciones químicas o cambios en la estructura mineralógica del suelo”. Algunos de estos métodos son:

- Compactación
- Estabilización térmica
- Estabilización eléctrica
- Uso de geotextiles.

2.2.3. Suelos blandos y cohesivos

La identificación de suelos blandos y cohesivos tiene una fundamental práctica en la construcción, ya que toda obra civil se apoya en terreno firme.

Para (Nieto & Torentino, 2021) “Los suelos blandos están compuestos por minerales, aire, agua y materia orgánica. Sus estratos del terreno se han formado poco a poco, con el pasar de los años”.

En el aspecto práctico podríamos afirmar que los suelos blandos son aquellos que tienen cierto contenido de arcillas y limo, el cual presenta problemas en el momento de la construcción de cualquier tipo, ya que sus propiedades físicas y mecánicas indican susceptibilidad a las deformaciones, por lo que en la práctica se hace común dar un tratamiento para mejorar o estabilizar este tipo de suelo en lo que respecta a las primeras y principales fases de un procedimiento constructivo.

Los suelos cohesivos, como las arcillas, son aquellos que tienen una capacidad intrínseca para retener el agua entre sus partículas debido a las fuerzas de cohesión entre ellas. Esta capacidad de retención de agua confiere a los suelos cohesivos propiedades únicas, como la plasticidad y la compresibilidad, que los



distinguen de otros tipos de suelos. La presencia de agua entre las partículas de arcilla también puede hacer que el suelo se comporte de manera viscosa bajo carga, lo que influye en su estabilidad y en su respuesta ante cargas externas.

Según (Whitlow, 1998), “los suelos cohesivos son suelos que contienen partículas de arcilla y/o limo, que imparten cohesión y plasticidad”.

2.2.4. Propiedades físico-mecánicas del suelo

2.2.4.1. Propiedades de fracciones muy finas de los suelos

En función del análisis de Terzagui & Peck (1978), cuando un mineral se rompe y se desmenuza fraccionándolo en partes muy finas con granos de diferentes tamaños, para luego ser saturados, se encontró que las fracciones más finas presentan propiedades que están ausentes en las fracciones más gruesas; además de ello, observó que las propiedades dependen mayormente en la naturaleza del mineral.

Prácticamente todos los minerales de estructura foliada se pueden decir pertenecer a minerales arcillosos. Estos minerales pueden clasificarse en tres grupos: las caolinitas, las ilitas y las montmorillonitas. Cada uno caracterizado por la carga eléctrica en su superficie.

2.2.4.2. Propiedades físicas

De acuerdo con las observaciones de Terzagui & Peck (1978), Se puede concluir que el tamaño, la forma y la composición mineral o química de un suelo dictan sus características físicas., así como de las rocas de las cuales derivó.



Estas propiedades anticipan el comportamiento mecánico de los minerales de arcillas en conformación de las propiedades hidráulicas de estas mismas, indicando que el grado de contenido de agua afecta las propiedades índices de las partículas del suelo.

2.2.4.3. Contenido de Humedad

Según (Verrujit, 2017), el contenido de humedad o contenido de agua se infiere como un parámetro muy útil, especialmente en arcillas; por la definición, “El contenido de agua o humedad es la relación de peso o masa del agua y los sólidos. El parámetro definido como contenido de humedad no es un nuevo parámetro independiente”.

Dado que el contenido de humedad influye como parámetro, se indica que este factor influye tanto como la relación de vacíos, la porosidad y el grado de saturación que indica un contenido de humedad máximo del 100%. Estos factores influyen en el peso volumétrico del suelo, así como las propiedades físicas del suelo. Este valor se indica en porcentaje y se indica mediante la fórmula:

$$W = \frac{M_w}{M_s} * 100$$

Donde:

W : Contenido de humedad

M_w : Peso del agua (gr)

M_s : Peso del sólido secado al horno (gr)

2.2.4.4. Análisis granulométrico

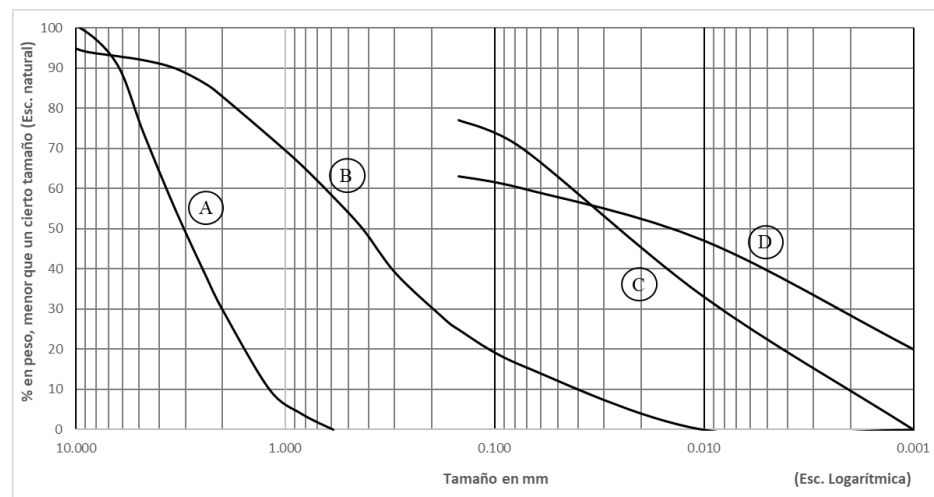
Según (Juárez & Rico, 2005), donde afirma que los previos estudios clasificaban a los suelos según su tamaño, en donde indicaban el comportamiento de los suelos, sin embargo, dichas clasificaciones se contradecían, donde la objeción más importante determinaba en las palabras limo y arcilla.

En consecuencia, ahora se entiende que las propiedades de la fracción más fina de la arcilla explican la mayoría de sus propiedades habituales.

Lo ideal es que la representación gráfica de la distribución granulométrica se exprese en tablas en lugar de cuantitativamente siempre que se disponga de una cantidad significativa de datos.

Figura 1

Representación gráfica de la distribución granulométrica.



Nota: Extraído de “Mecánica de suelos. Tomo I” Juárez & Rico, 2005. (p. 100).

Así mismo, se tiene la clasificación de suelo según el tamaño de sus partículas, bajo las normativas del AASHTO (Asociación Americana

de Funcionarios del Transporte y Carreteras Estatales), MIT (Instituto tecnológico de Massachusetts), SUCS (Sistema Unificado de Clasificación de Suelos), USDA (Departamento de Agricultura de Estados Unidos):

Tabla 3

Clasificación de suelos según su tamaño

	MIT	SUCS	AASHTO	USDA	Clasif. Alemana
Piedra	-	-	-	-	>70
Grava	>2	4.75 a 76.2	2-76.2	>2	2-70
Arena	0.06 - 2	0.075 – 4.75	0.075-2	0.05-2	0.1-2
Polvo	-	-	-	-	0.02-0.1
Limo	0.002-0.06		0.002-0.075	0.002-0.05	0.002-0.02
Arcilla	<0.002	<0.075	<0.002	<0.002	0.0002- 0.002
Ultra arcilla	-	-	-	-	0.00002- 0.0002

Nota: Clasificación de suelos según tamaño de sus partículas (medidas en mm).

Extraído de Das (2015), Therzagui & Peck (1978).

Por otra parte, se tiene una medida estandarizada de mallas, la cual nos va a permitir calcular los tamaños de partícula y clasificarlos según estos. Estas mallas se indican en la siguiente tabla:

Tabla 4

Tamaños de tamices

TAMIZ N°	ABERTURA (mm)
3"	75.000
2"	50.000
1 ½"	38.100
1"	25.400
¾"	19.000
⅜"	9.500
N° 4	4.760
N° 10	2.000
N° 20	0.840
N° 40	0.425
N° 60	0.260
N° 140	0.106
N° 200	0.075

Nota: Extraído de “Manual de ensayos de materiales” (Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2016, p. 44)

2.2.4.5. Límites de consistencia

Dicho por varios autores, los límites de plasticidad indican el comportamiento y las propiedades de las partículas finas en base a delimitaciones a su contenido de humedad; tales delimitaciones comprenden el límite de contracción, límite líquido y límite plástico. Refiriéndose así para evaluar los estados del suelo tales como sólido, semi-sólido, plástico y líquido.

2.2.4.5.1. Límite líquido.

Para (Verrujit, 2017), el límite líquido es la transición del estado líquido hacia el estado plástico. Este representa el contenido más bajo de

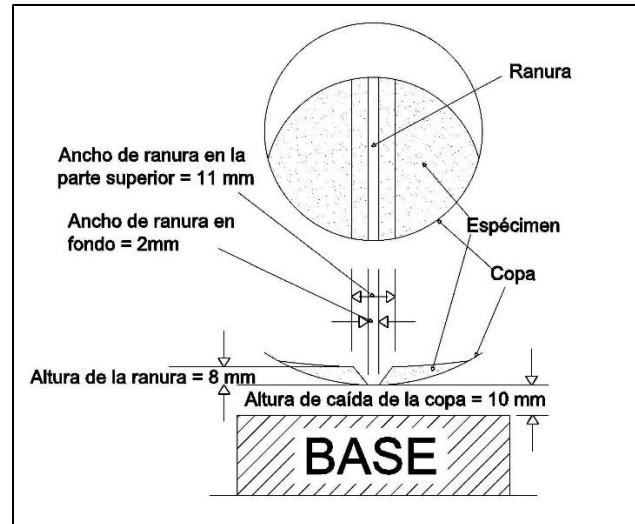


agua en donde el comportamiento del suelo sigue siendo principalmente líquido. Como el límite no es absoluto, este será determinado bajo la prueba de Casagrande; la prueba consiste en que dentro de un contenedor hueco, una pequeña muestra de suelo debe ser subida y bajada mediante un eje rotatorio. El contenido de humedad para una incisión típica en forma de V en el suelo, cuyas propiedades se basan en una caída de suelo cercana a 25 golpes, se conoce como límite líquido. Los valores cercanos del contenido de agua con las caídas a este valor deben utilizarse para calcular el contenido de agua a 25 golpes.

(Ishibashi & Hazarika, 2015), indican que La prueba de límite líquido estándar actual (ASTM D-4318) utiliza una pequeña copa semiesférica. Una parte de la tapa se llena con una muestra de arcilla húmeda bien mezclada y se hace una ranura. Se corta con una herramienta ranuradora especial en la parte central de la muestra. La manivela, que levanta y deja caer la taza, luego se gira con dos revoluciones por segundo hasta que la abertura de la ranura se cierre con 13 mm (1/2 pulg.) de longitud. Se registra el número de revoluciones (cuenta de golpes) y se mide el contenido de agua en esta etapa. Se realizan varias pruebas con muestras de contenido de agua ligeramente diferentes (normalmente unos pocos porcentajes). Una curva de flujo, que traza el recuento de golpes y prepara el correspondiente contenido de agua medido en escala semi-logarítmica. El límite líquido se define como el contenido de agua con 25 golpes en la curva de flujo

Figura 2

Medidas estándar sobre el procedimiento para el ensayo de límite líquido.



Nota: Extraído de “Fundamentos y aplicaciones de la mecánica de suelos, segunda edición.” Ishibashi & Hazarika (2015, p.42)

2.2.4.5.2. Límite plástico

Según los autores (Verrujit, 2017; Ishibashi & Hazarika, 2015; Das, 2015) se infiere al límite plástico como “La transición del estado plástico al estado sólido. El cual es definido como el contenido de humedad en el cual la arcilla puede ser enrollada en hilos de 3mm de espesor”.

Según la prueba de límite plástico se ejecuta de una forma más primitiva (ASTM D-4318, 2017). Una muestra más seca es enrollada en hilos por palmas humanas sobre una placa de vidrio. El límite plástico se define como el contenido de agua al cual un hilo enrollado apenas se desmorona con un diámetro de 3 mm (1/8 pulgadas). Se deben realizar varias pruebas para tomar el contenido promedio de agua en esa etapa para obtener el valor del límite plástico.

2.2.4.6. Clasificación De Suelos SUCS

Para (Ishibashi & Hazarika, 2015; Das, 2013), se indica que este sistema fue originalmente propuesto por Casagrande, actualmente muy usado por los ingenieros bajo la norma (ASTM, D-2487, 2017). Mediante ello indica que los suelos son clasificados por símbolos principales y sus modificadores, a los cuales se hace alusión al tamaño de partículas y su comportamiento frente a la humedad. Dichos símbolos se indican en las siguientes tablas:

Tabla 5

Simbología principal de los suelos

Simbolo Principal	Definición
G	Grava
S	Arena
M	Limo
C	Arcilla
O	Orgánico
Pt	Turba, lodo, y otros organicos

Nota: Extraído de “Fundamentos y aplicaciones de la mecánica de suelos, segunda edición.” (Ishibashi & Hazarika, 2015; Das, 2013)

Tabla 6

Modificadores de acuerdo a las condiciones indicadas por la clasificación

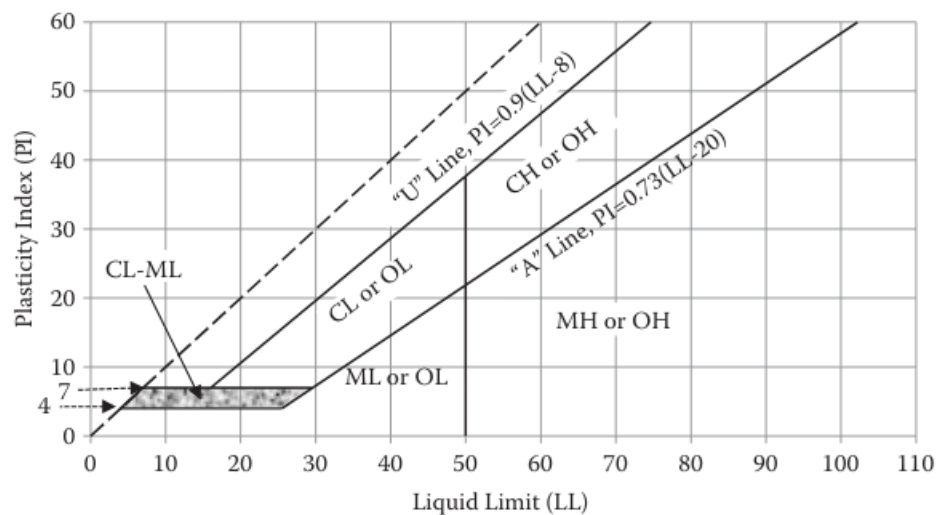
Modificador	Definición
W	Bien graduada (para gravas y arenas)
P	Mal graduada (para gravas y arenas)
H	Alta plasticidad (para limos, arcillas y organicos)
L	Baja plasticidad (para limos, arcillas y organicos)

Nota: Extraído de “Fundamentos y aplicaciones de la mecánica de suelos, segunda edición.” (Ishibashi & Hazarika, 2015; Das, 2013)

Teniendo en cuenta lo anterior, se puede concluir que los suelos pueden clasificarse como de grano grueso, donde más del 50% del peso se mantiene en la malla N° 200, o de grano fino, donde más del 50% del peso pasa la malla N° 200, que se clasifica según la siguiente gráfica:

Figura 3

Carta de plasticidad SUCS

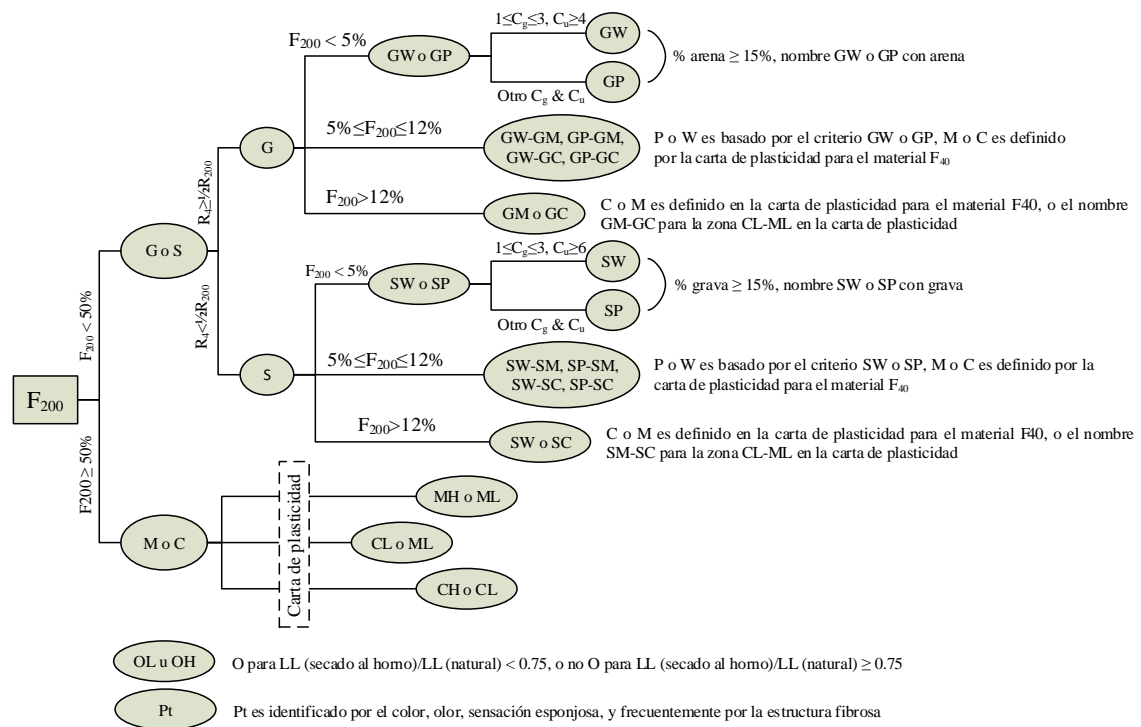


Nota: Extraído de “Fundamentos y aplicaciones de la mecánica de suelos, segunda edición.” (Ishibashi & Hazarika, 2015, p.56)

Para las condiciones de clasificación de suelos se presenta el siguiente diagrama:

Figura 4

Sistema de clasificación SUCS



Nota: Extraído de “Fundamentos y aplicaciones de la mecánica de suelos, segunda edición.” (Ishibashi & Hazarika, 2015, p.55)

2.2.4.7. Clasificación de suelos AASHTO

Para los autores (Ishibashi & Hazarika, 2015; Das, 2013) “el sistema de clasificación AASHTO refiere del uso de los límites de Atterberg (Límite Líquido y Límite Plástico) y la información del tamaño de partículas regidas por las mallas (10, 40, y 200)”, donde se proporciona la información del porcentaje pasante de dichas mallas.

En adición a esto, el índice de grupo (IG), como se define a continuación, es calculado por la fórmula:

$$IG = (F_{200} - 35)[0.2 + 0.005(LL - 40)] + 0.01(F_{200} - 15)(PI - 10)$$

Las reglas para la ecuación anterior son:

1. Cuando el IG es calculado como valores negativos, se reporta que el $IG = 0$.
2. El IG es redondeado a números enteros; por ejemplo, $IG = 3.4$ debe ser reportado como 3 y si $IG = 4.5$ debe ser reportado como 5.
3. Para los subgrupos A-2-6, A-2-7, se usa solo la segunda parte de la ecuación, quedando la primera parte en 0, la cual es:

$$IG = 0.01(F_{200} - 15)(PI - 10)$$

Frente a lo anteriormente mencionado, tenemos la siguiente imagen donde indica la clasificación de suelos según el método AASHTO.

Tabla 7

Sistema de clasificación AASHTO

Clasificación general	Suelos Granulares ($\leq 35\%$ pasa 0.08 mm)						Suelos Finos ($> 35\%$ Bajo 0.08 mm)			
	A-1		A-3	A-2			A-4	A-5	A-6	A-7
Grupo	A-1		A-3	A-2			A-4	A-5	A-6	A-7
Subgrupo	A-1 ^a	A-1b	A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7				A-7-5 A-7-6
2 mm	≤ 50									
0.5 mm	≤ 30	≤ 50	≥ 51							
0.08 mm	≤ 15	≤ 25	≤ 10		≤ 35			36		
W _L			≤ 40	≥ 41	≤ 40	≥ 41	≤ 40	≥ 41	≤ 40	≥ 41
IP	≤ 6	NP	≤ 10	≤ 10	≥ 11	≥ 11	≤ 10	≤ 10	≥ 11	≥ 11
Descripción	Gravas y Arenas		Arena Fina	Gravas y Arenas Arcillosas			Suelos limosos		Suelos Arcillosos	
	A-7-5: $IP \leq (W_L - 30)$						A-7-6: $IP > (W_L - 30)$			

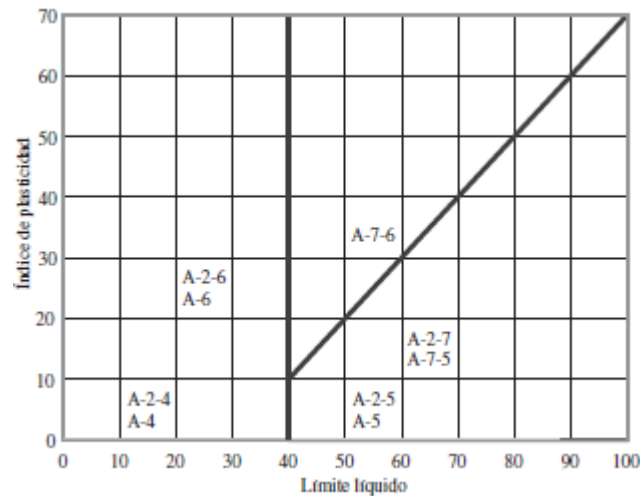
Si el suelo es NP $\rightarrow IG = 0$; Si $IG < 0 \rightarrow IG = 0$

Nota: Extraído de “Manual de ensayo de materiales” (Ministerio de transportes y Comunicaciones, 2016, p. 1159).

Para la clasificación de suelos, se presenta la siguiente carta de plasticidad:

Figura 5

Carta de plasticidad AASHTO



Nota: Extraído de “Fundamentos de Ingeniería Geotécnica” (Das, 2013, p. 80)

2.2.4.8. Propiedades mecánicas de los suelos

En las palabras de Terzaghi & Peck (1978) se infiere que las propiedades mecánicas de los suelos tratan esencialmente de las acciones mutuas entre el suelo y el agua, del estado de equilibrio límite de las masas de suelo y de las deformaciones producidas por las fuerzas externas, como la capacidad del suelo para el soporte de cargas, la estabilidad del terreno y su comportamiento.

2.2.4.9. Prueba de compactación Proctor modificado

Según Ishibashi & Hazarika (2015), “la compactación es un proceso físico mediante el cual reduce la presencia de vacíos del suelo mediante cargas estáticas o dinámicas. La capacidad de soporte del suelo, asentamiento, resistencia al corte, etc. depende del estado compactado del suelo”. La compactación produce cambios en las características del suelo, tales como incremento de capacidad de soporte y reducción de la



permeabilidad. Para de esta forma poder controlar las características de hinchazón, contracción y susceptibilidad a factores ambientales y climáticos.

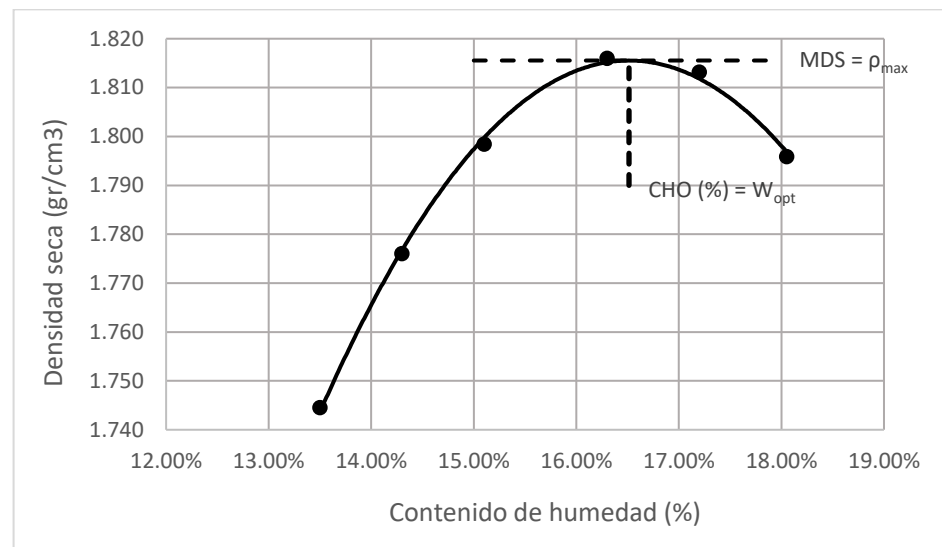
Para el cambio de estas características se emplea el método Proctor, y su versión estándar o modificado, regidos por las normas ASTM (D-698 y D-1557).

Para el Proctor modificado, se indica que presenta tres métodos, "A, B y C", los cuales serán determinados a usar bajo las condiciones granulométricas del suelo. Cuando el 20% o menos del peso del material es retenido en la malla N° 4 (4,75 mm), se utiliza el método A. Respecto al método B, está indicado su uso cuando más del 20% del peso del material pasa por la malla N° 4 y el 20% o menos del peso del material es retenido en la malla 3/8" (9,5 mm). Respecto al método C, está indicado su uso cuando más del 20% del material es re-atado en el tamiz 3/8" y menos del 30% del material es re-atado en el tamiz 3/4" (19,0 mm).

El ensayo para una muestra de suelo se realiza compactando el material debidamente establecido para diferentes contenidos de humedad, con una misma energía de compactación de 25 caídas del martillo en 5 capas para el método A y B, y 56 caídas para el método C, reportando el peso y la humedad respectiva del ensayo, para el cálculo de la máxima densidad seca y su óptimo contenido de humedad, como se muestra en la figura.

Figura 6

Grafico densidad seca vs Contenido de Humedad, ensayo Proctor



Nota: Elaboración propia.

2.2.4.10. Prueba de Valor de soporte de California (CBR)

Para (Ishibashi & Hazarika, 2015), la prueba de Valor de Soporte de California (CBR) es catalogada como una prueba de penetración para evaluar la fuerza de los materiales que componen la subrasante y la base. Regido bajo la norma ASTM D-1883 (2016), y por la norma AASHTO (T-193).

Esta prueba consta de usar los datos y la energía de compactación de 24.4 N o 44.5 N, según sea el método de compactación Proctor, ya sea estándar o modificado respectivamente. El método consiste en la compactación de una muestra que debe presentar una densidad seca específica, el cual simula la situación en campo.

El contenido de humedad podrá ser óptimo o seleccionado. Cuando es compactado en el molde, se aplica una carga adicional simulando la situación en campo; estas cargas son discos de metal debidamente

normados. El ensayo será realizado en la muestra, ya sea sumergida en 96 horas en un tanque de agua o no sumergida, dependiendo de la simulación in situ.

La prueba de penetración consiste en la aplicación de carga controlada para las deformaciones que sufrirá el suelo, por el cual esencialmente es preciso en las deformaciones de 0.1” (2.54 mm) y 0.2” (5.08 mm). Los esfuerzos calculados para las cargas previamente dichas serán comparados con la carga patrón de una piedra triturada y bien graduada, debidamente normalizada. Estas cargas patrón se indican en la siguiente tabla:

Tabla 8

Cargas patrón para las deformaciones reportadas

Penetración		Presión		
Mm	Pulgadas	Mn/m ²	Kgf/cm ²	Lb/plg ²
2.54	0.1	6.90	70.31	1000.00
5.08	0.2	10.35	105.46	1500.00

Nota: Extraído de “Manual de ensayo de Materiales”. (Ministerio de Transportes y comunicaciones, 2016, p. 255)

El cálculo de CBR será la relación porcentual entre el esfuerzo del suelo calculado, y la carga unitaria patrón. Normalmente se reporta el CBR para la penetración a 0.1”, sin embargo, si el CBR para la penetración a 0.2” es mayor, se repite el ensayo; si el resultado es similar, se reportará el valor para 0.2”.

$$CBR = \frac{\text{Carga unitaria del suelo}}{\text{Carga unitaria patrón}} * 100$$



2.2.4.11. Compresión no confinada

Según (Das, 2013), “la prueba de compresión simple o prueba de compresión no confinada: es el ensayo donde la muestra está sometida únicamente a una carga axial denominada σ_1 para provocar una falla. Esta prueba es usada comúnmente para muestras de arcilla”. Para esta prueba, la presión de confinamiento denominada σ_3 es 0. Además, se tiene que el esfuerzo menor es 0 y el esfuerzo mayor es σ_1 .

Como resultado, la presión de confinamiento no tiene efecto sobre la resistencia al corte no drenado. Como resultado, tenemos la siguiente ecuación:

$$T_f = \frac{\sigma_1}{2} = \frac{q_u}{2} = C_u$$

Donde:

T_f : es la resistencia media del suelo al corte

σ_1 : es el esfuerzo normal máximo.

q_u : es la carga ultima o resistencia a la compresión no confinada.

c_u : es la cohesión.

Según la (Norma Técnica Peruana, 2002), “Para muestras compactadas, para el caso de granos finos derivados de las condiciones de densidad y humedad establecidas para el ensayo Proctor, es posible realizar probetas de 72 mm o más de diámetro, la relación altura diámetro debe ser entre 2 y 2.5”.

La prueba debe ser realizada con una velocidad dentro del 0.5 al 2.0% de la altura por minuto. Tomando lecturas de carga cada 30 segundos. La consistencia del suelo es determinada por el ensayo.

Tabla 9

Relación consistencia y esfuerzo de compresión simple

CONSISTENCIA	qu (KN/M²)
Muy blanda	0-25
Blanda	25-50
Media	50-100
Firme	100-200
Muy Firme	200-400
Dura	>400

Nota: Extraído de “Fundamentos de Ingeniería Geotécnica” (Das, 2013, p. 257)

2.2.5. Sub rasante del camino

Según el (Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2014), “la subrasante es la superficie terminada de la carretera a nivel de movimiento de tierras (corte y relleno), sobre la cual se coloca la estructura del pavimento o afirmado”.

La sub rasante es el soporte directo de la estructura del pavimento y se construye sobre el terreno natural nivelado y por debajo de la estructura del pavimento. Siendo la capa que soportará la estructura del pavimento, es preciso decir que la capa debe estar formada por suelos seleccionados. Durante el proceso constructivo, la sub rasante debe ser compactada a los 30 cm de la parte superior de la capa al 95% de la densidad seca máxima obtenida en el ensayo Proctor modificado.

Los suelos ubicados a 60 cm por debajo de la parte superior de la sub rasante deben presentar valores de CBR $\geq 6\%$. En caso de que el valor de CBR sea menor al 6%, se considera una sub rasante inadecuada, por lo que se vuelve una necesidad la estabilización de dicho material.

CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

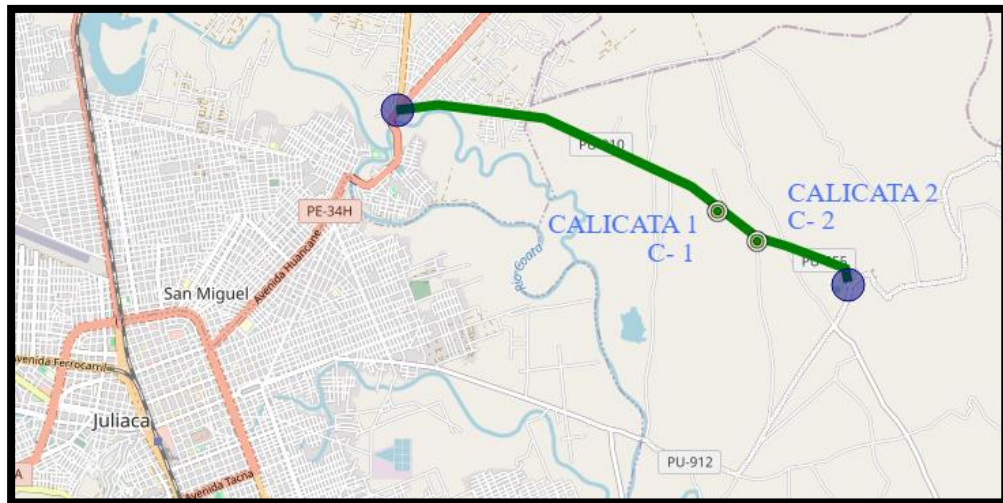
3.1. MATERIALES

3.1.1. Muestra de suelo

La muestra de suelo proviene de la vía Juliaca – Canchi Grande km 4 + 500 al km 5 +500, de la vía PU-910, tomando en consideración el estudio de 1 km de vía, y en base al (Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2014) se tomaron 2 calicatas indicado en la siguiente figura.

Figura 7

Ubicación geográfica de las muestras.



Nota: Ubicación de la vía PU-910, vía Juliaca – Canchi Grande. Extraído de (COFOPRI, 2024)

Tabla 10

Ubicación geográfica de las muestras de suelo

MUESTRA	LATITUD	LONGITUD
CALICATA C – 1	-15.468232	-70.060777
CALICATA C – 2	-15.472203	-70.055628

Nota: Elaboración propia.

Respecto a la muestra de suelo del estudio se realizó la extracción de la muestra a cielo abierto, realizando inicialmente una limpieza de 20 cm de las 2 calicatas, donde posteriormente se indican profundidades de 1.5m.

Figura 8

Extracción de material arcilloso C-1 y C-2



Nota: Elaboración propia.

3.1.2. Vidrio soluble.

Para la realización de esta investigación se tomó en consideración el aditivo meta silicato de sodio, del tipo vidrio soluble (silicato de sodio neutro). Este silicato posee una caracterización de gel soluble. Las características de este aditivo son:

Tabla 11

Características del vidrio soluble empleado

CARACTERÍSTICAS	DESCRIPCIÓN
Forma	Líquido viscoso
Color	Incoloro
Olor	Sin olor
Densidad	1.38gr/cm ³ - 1.39 gr/cm ³
Viscosidad	1000 Cps – 7000 Cps
Ph solución acuosa al 1%(20°C)	10-12

Nota: Elaboración propia.

La obtención del aditivo usado en esta investigación fue proporcionada por la empresa PROQUINSA S.A., distribuidor de productos químicos en el Perú.

Figura 9

Vidrio soluble (Silicato de sodio)



Nota: Elaboración propia.

3.2. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

3.2.1. Tipo de investigación

El diseño de la investigación de este estudio aplica la información a aplicaciones prácticas y ofrece respuestas a las dificultades, mejorando las cualidades del suelo de la subrasante mediante la incorporación de vidrio soluble. Según Álvarez (2020), “cuando la investigación se orienta a conseguir un nuevo conocimiento destinado que permita soluciones de problemas prácticos”.

3.2.2. Diseño de investigación

El diseño que se establece para el presente estudio es experimental por la manipulación de variables independientes como el uso del vidrio soluble con intenciones de manipular a la variable dependiente que es mejorar las propiedades



del suelo de sub rasante. Según Hernández (2018), “los diseños experimentales se utilizan cuando el investigador pretende establecer el posible efecto de una causa que se manipula”.

3.2.3. Nivel de investigación

Así mismo, el alcance que tiene el estudio es a nivel explicativo debido a que se establecerá la influencia del vidrio soluble en la capacidad de soporte y resistencia simple del suelo subrasante. Según Arias (2021), “este alcance tiene la característica de establecer causa – efecto entre sus variables; son más profundas y estructuradas, diferentes de los alcances previos. Existen las variables independientes (causas) y las variables dependientes (efectos)”.

3.2.4. Enfoque de la investigación

El enfoque al que se direcciona el presente estudio es cuantitativo por el uso de datos que se miden, como los ensayos experimentales que se realizarán en laboratorio de los suelos blandos y cohesivos naturales y modificados con el vidrio soluble, los cuales podrán ser analizados mediante la estadística en proporción a los porcentajes analizados para luego explicar los acontecimientos.

Según Sánchez (2019) indica que el enfoque cuantitativo utiliza herramientas estadísticas para analizar los datos obtenidos y trabaja con fenómenos que pueden cuantificarse, o a los que se puede dar un número, como el número de hijos, la edad, el peso, la altura, la aceleración, la masa, el nivel de hemoglobina y el cociente intelectual, entre otros. Sus objetivos principales son describir, explicar, prever y controlar objetivamente sus causas, así como pronosticar su ocurrencia a partir de la revelación de dichas causas. Basa sus conclusiones en la aplicación estricta de la métrica o cuantificación tanto para la



recogida de datos como para su tratamiento, análisis e interpretación mediante el método hipotético-deductivo.

3.2.5. Población

Para (Arias, Villasís, & Miranda, 2016) “la población es un conjunto de casos, definido, limitado y accesible, que formará el referente para la elección de la muestra, y que cumple con una serie de criterios predeterminados”

La población de estudio para la presente investigación está conformada por la vía Juliaca – Canchi Grande con una longitud de 6.7 kilómetros ubicada en la región Puno, de la cual se estudian los suelos a nivel de la sub rasante para mejorar su comportamiento con el vidrio soluble.

3.2.6. Muestreo

El muestreo por conveniencia según (Hernández O. , 2021) “se elige de acuerdo con la conveniencia del investigador; le permite elegir de manera arbitraria cuántos participantes puede haber en el estudio”.

Debido a que la muestra fue elegida para las pruebas de laboratorio de las dimensiones límites de consistencia, Proctor modificado, CBR y compresión no confinada a conveniencia para su correspondiente análisis, el muestreo para este estudio es no probabilístico.

3.2.7. Muestra

Para (Mosteiro & Porto, 2017, pág. 33) “la muestra es el subconjunto de individuos extraídos de la población que se selecciona a través de alguna técnica



de muestreo. Para que se puedan generalizar a la población los resultados obtenidos en la muestra, ésta ha de ser representativa”.

Una carretera de tercera clase con una IMDA de 200 a 400 vehículos al día es la referencia de estudio para la extracción de la muestra de 1,0 kilómetro, lo que se indica en dos calicatas por kilómetro de las que se tomarán muestras para pruebas mecánicas y físicas. Se realizarán 40 pruebas en el Proctor modificado, compresión no confinada, límites de Atterberg y CBR para cada calicata.

3.2.8. Variables

3.2.8.1. Variable independiente: vidrio soluble

Conocido también como silicato de sodio, es una sustancia química (Na_2Si) la cual tiene un amplio sector de aplicación como ligante, en productos de limpieza, cementos, capas de protección, anticorrosivo, etc. Gracias a sus características solubles puede ser empleada de una forma eficaz y su valor es muy accesible. Aparte de ello, es un producto con la capacidad de brindar soluciones ecológicas al no ser tóxico ni inflamable (Galindo & Avellaneda, 2016).

3.2.8.2. Variable dependiente: Propiedades físicas y mecánicas de la subrasante

La subrasante es definida como el suelo compactado y preparado de forma que soporte la estructura de los pavimentos. Estas características del suelo que forman la subrasante son las variables de gran importancia que deben considerarse al diseñar estructuralmente el pavimento. Las propiedades físicas no varían, aunque sean sometidas a tratamientos como



el compactado, homogenización, entre otros. Sin embargo, las propiedades físicas y mecánicas cambian cuando se realiza un proceso de estabilización, mezclándolo con otros materiales como cenizas, cemento, cal, entre otros o al mezclarlos con productos de origen químico.

3.2.9. Técnicas

Según (Hernández & Duana, 2020). “Las técnicas de recolección de datos comprenden procedimientos y actividades que le permiten al investigador obtener información necesaria para dar respuesta a su pregunta de investigación”.

Por lo tanto, en la presente investigación se aplica la técnica de observación directa, teniendo la participación del investigador en las que se realizará en diversas fases y estas son: recopilación de la Información Preliminar, revisión bibliográfica, fase de campo, fase de laboratorio, fase de gabinete.

3.2.10. Instrumentos

“Todo instrumento utilizado en la recolección de datos en una investigación científica debe ser confiable, objetivo y que tenga validez. Si alguno de estos elementos no se cumple, el instrumento no será útil y los resultados obtenidos no serán legítimos” (Hernández & Duana, 2020). Es por ello que se usan en el presente estudio las fichas de laboratorio, y formatos que sirven para la recolección de información de los ensayos a realizarse en laboratorio al usar vidrio soluble para estabilizar los suelos blandos y cohesivos.



3.3. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

3.3.1. Estudios geotécnicos integrales para los suelos naturales

3.3.1.1. Contenido de humedad natural

Para la realización de este ensayo se obtuvieron muestras en bolsas herméticas, para prever la pérdida de humedad de la muestra. Posteriormente ambas muestras fueron pesadas en balanzas con aproximación a 0.01 g para el peso húmedo, y posteriormente fueron enviadas en taras debidamente registradas en su peso, hacia un horno con una temperatura de 110 ± 5 °C. Donde finalmente se registró el peso seco, dando lugar a los cálculos.

Los cálculos del contenido de humedad natural del terreno se indican para las calicatas C-1 y C-2 en 22.89% y 22.95% respectivamente.

3.3.1.2. Análisis granulométrico de suelos.

Para la realización de este ensayo se siguió el procedimiento de acuerdo al manual de ensayo de materiales del MTC (2016) con referencia a las normas (ASTM D-421, 2002), que consiste en preparación de muestras para granulometría y las constantes de suelo, y la norma (ASTM D-422, 2002), que consiste en el procedimiento de análisis granulométrico por tamizado.



Tabla 12

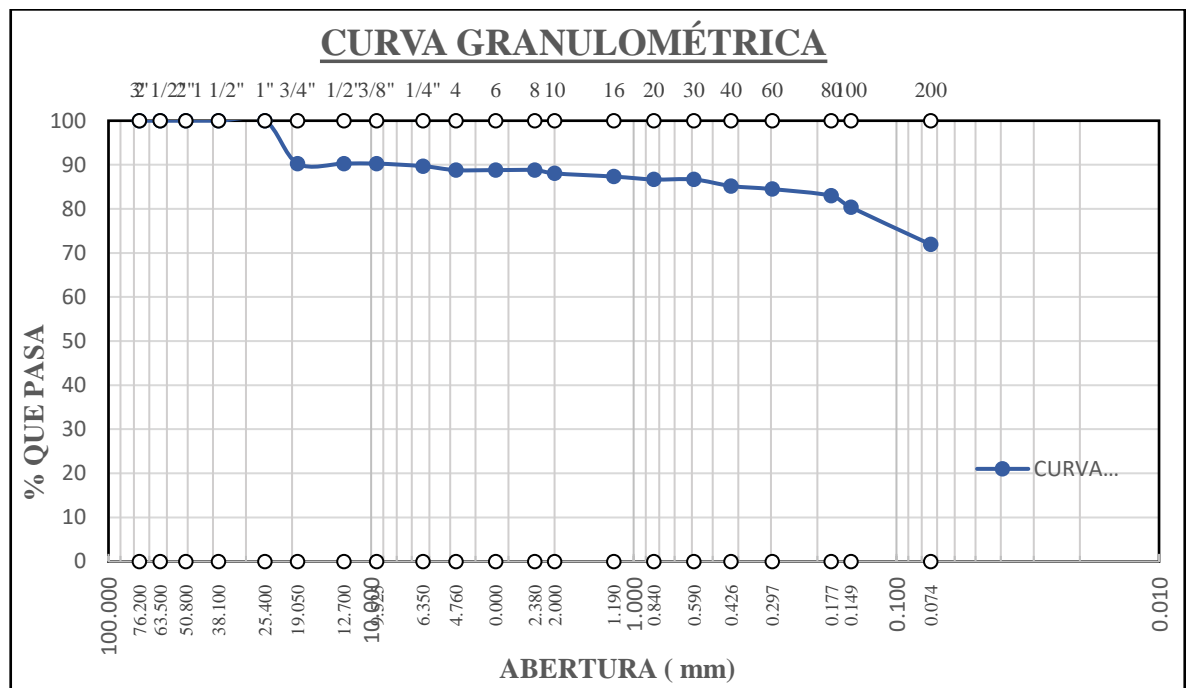
Granulometría de la muestra C-1

N° DE MALLA	ABERTURA (mm)	PESO RETENIDO	% RETENIDO PARCIAL	% RETENIDO ACUMULADO	% QUE PASA
3"	76.200		0	0	100
2 1/2"	63.500		0.00	0.00	100.00
2"	50.800		0.00	0.00	100.00
1 1/2"	38.100		0.00	0.00	100.00
1"	25.400		0.00	0.00	100.00
3/4"	19.050	19.64	9.72	9.72	90.28
1/2"	12.700		0.00	9.72	90.28
3/8"	9.525		0.00	9.72	90.28
1/4"	6.350	1.19	0.59	10.31	89.69
N° 4	4.760	1.81	0.90	11.20	88.80
N° 6	3.360		0.00	11.20	88.80
N° 8	2.380		0.00	11.20	88.80
N° 10	2.000	1.5	0.74	11.95	88.05
N° 16	1.190	1.47	0.73	12.67	87.33
N° 20	0.840	1.32	0.65	13.33	86.67
N° 30	0.590		0.00	13.33	86.67
N° 40	0.426	3	1.48	14.81	85.19
N° 60	0.297	1.42	0.70	15.51	84.49
N° 80	0.177	3.03	1.50	17.01	82.99
N° 100	0.149	5.3	2.62	19.64	80.36
N° 200	0.074	17.07	8.45	28.08	71.92
BASE		145.33	71.92	100.00	0.00

Nota: Elaboración propia.

Figura 10

Curva granulométrica de la muestra C-1



Nota: Elaboración propia.

En la calicata C-1 se presentaron pequeños porcentajes de conglomerados, y su distribución de partículas finas indica un 71.92 % que pasa la malla N° 200.



Tabla 13

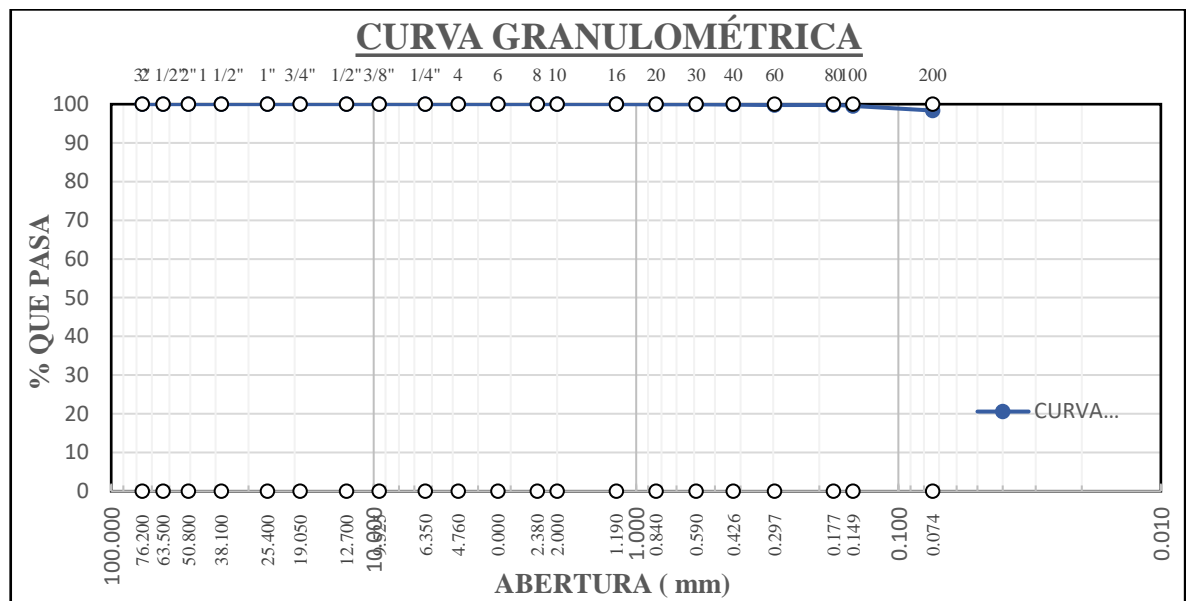
Curva granulométrica de la muestra C-2

N° DE MALLA	ABERTURA (mm)	PESO RETENIDO	% RETENIDO PARCIAL	% RETENIDO ACUMULADO	% QUE PASA
3"	76.200		0	0	100
2 1/2"	63.500		0.00	0.00	100.00
2"	50.800		0.00	0.00	100.00
1 1/2"	38.100		0.00	0.00	100.00
1"	25.400		0.00	0.00	100.00
3/4"	19.050		0.00	0.00	100.00
1/2"	12.700		0.00	0.00	100.00
3/8"	9.525		0.00	0.00	100.00
1/4"	6.350		0.00	0.00	100.00
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		0.00	0.00	100.00
N° 16	1.190		0.00	0.00	100.00
N° 20	0.840	0.1	0.05	0.05	99.95
N° 30	0.590		0.00	0.05	99.95
N° 40	0.426	0.17	0.08	0.13	99.87
N° 60	0.297	0.22	0.10	0.23	99.77
N° 80	0.177		0.00	0.23	99.77
N° 100	0.149	0.5	0.24	0.47	99.53
N° 200	0.074	2.52	1.19	1.65	98.35
BASE		209	98.35	100.00	0.00

Nota: Elaboración propia.

Figura 11

Curva granulométrica de la muestra C-2



Nota: Elaboración propia

En la calicata C-2 se observó una mayor presencia de partículas finas con un porcentaje total de 98.35% que pasan la malla 200.

3.3.1.3. Límites de Consistencia.

3.3.1.3.1. Límite líquido

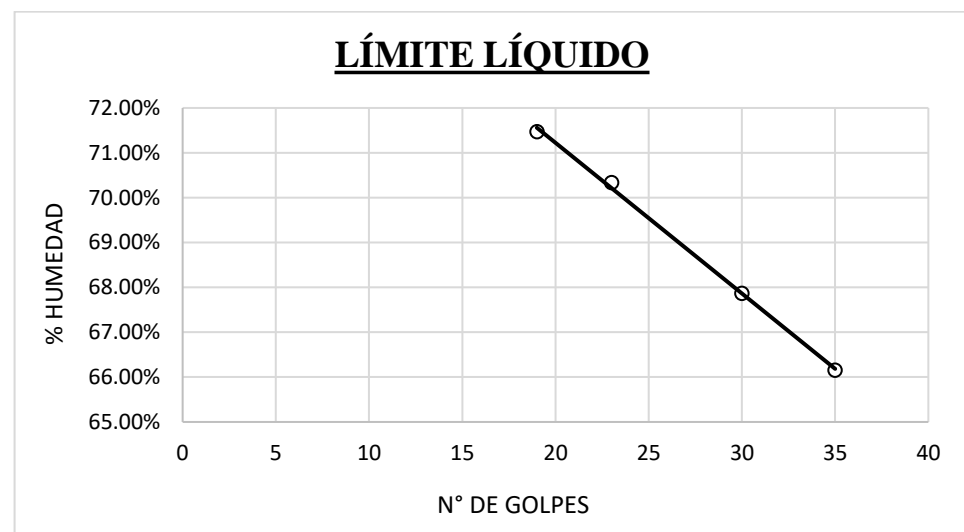
Como se indica en el manual de ensayo de materiales bajo la norma MTC E 111, donde hace referencia a la norma ASTM D-1241, y mediante la norma (ASTM D-4318, 2017) que indica el uso concurrente de los límites líquido, límites plásticos e índices de plasticidad, se procederá al cálculo del contenido de humedad que registra cada prueba en base al cambio de sus estados y su comportamiento.

Previamente para este ensayo se dejó en reposo 24 horas, una muestra de suelo, donde el suelo iniciará un proceso de saturación para la uniformidad del contenido de humedad en sus partículas.

Para este ensayo se utilizó la cuchara de Casagrande, que comprende un equipo donde se acciona una pequeña manivela impulsando golpes en la cuchara. La muestra de suelo preparado previamente que presente una consistencia pastosa, se depositó en la cuchara con 1 cm de profundidad, donde el suelo fue separado por la ranura normalizada. El número de golpes registrado comprende la unión del suelo bajo la acción de la pequeña manivela. Dichos golpes resultaron en registros de 15 a 35 golpes, esto para el cálculo a los 25 golpes mediante una regresión de los datos registrados.

Figura 12

Gráfica límite líquido, muestra natural C-1

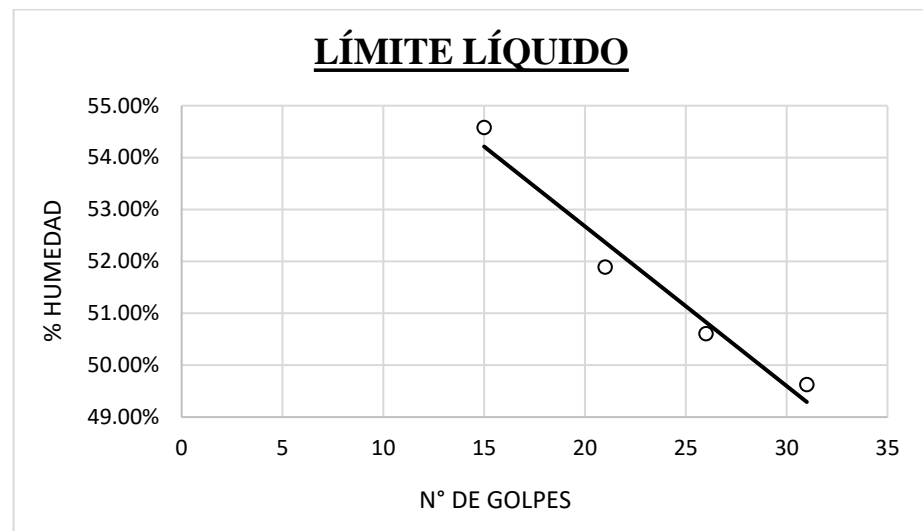


Nota: Elaboración propia

De la anterior imagen se observó que para los 25 golpes la muestra C-1 indicó un contenido de humedad de 69.54% que vendría a ser el límite líquido de la muestra C-1.

Figura 13

Gráfica límite líquido, muestra natural C-2



Nota: Elaboración propia

De igual manera, de la figura anterior se observó que el contenido de humedad para los 25 golpes indica un contenido de humedad de 51.14%, indicando el límite líquido de la calicata C-2.

3.3.1.3.2. Limite plástico

Para el límite plástico, se realizó con el material previo, con una consistencia un poco más sólida, posteriormente se realizó la formación de pequeñas muestras esféricas realizadas con la mano, donde se realizó la rodadura con la mano sobre una superficie vítrea plana hasta alcanzar muestras cilíndricas de 3 mm aproximadamente, en donde se aprecian pequeñas fisuras en dicha muestra.

Tabla 14*Límite plástico, muestra natural C-1.*

DESCRIPCIÓN	UND	1	2	3
TARA	N°	S-57	S-16	JH-20
TARA + SUELO HÚMEDO	gr	25.04	24.89	23.42
TARA + SUELO SECO	gr	23.21	23.31	21.78
AGUA	gr	1.83	1.58	1.64
PESO DE LA TARA	gr	17.78	18.4	16.95
PESO DEL SUELO SECO	gr	5.43	4.91	4.83
LÍMITE PLÁSTICO	%	33.70%	32.18%	33.95%

Nota: Elaboración propia.

De la tabla anterior, indicó un contenido de humedad promedio de 33.28%, infiriendo a este resultado como el límite plástico.

Tabla 15*Límite plástico, muestra natural C-2.*

DESCRIPCIÓN	UND	1	2	3
TARA	N°	S-49	T-06	ES-2
TARA + SUELO HÚMEDO	gr	27.36	31.39	25.02
TARA + SUELO SECO	gr	25.69	29.71	23.38
AGUA	gr	1.67	1.68	1.64
PESO DE LA TARA	gr	19.48	23.01	17.08
PESO DEL SUELO SECO	gr	6.21	6.7	6.3
LÍMITE PLÁSTICO	%	26.89%	25.07%	26.03%

Nota: Elaboración propia.

De la tabla anterior, del mismo modo, se calculó el promedio del contenido de humedad del límite plástico, resultando en 26.00%.



3.3.1.3.3. Índice de plasticidad.

Para la indicación del cálculo del índice de plasticidad, solo se siguió la fórmula establecida.

$$IP = LL - LP$$

Donde:

IP : Índice de plasticidad

LL : Limite liquido

LP : Limite plástico.

En la muestra de suelo C-1 se calculó un índice de plasticidad de 36.27%, y para la muestra de suelo C-2 se calculó un índice de plasticidad de 25.14%.

3.3.1.4. Clasificación SUCS

Para la clasificación, SUCS indica que tienen un nombre de grupo, ya sea G, S, M, C, O y Pt. Indicando una clasificación según el tamaño; y su modificador W, P, H y L, indicando el graduado de partículas gruesas y la plasticidad de las partículas más finas de acuerdo a la carta de plasticidad desarrollada por el método SUCS. En dado caso, se analizaron las calicatas C-1 y C-2.

Tabla 16

Clasificación SUCS, muestras C-1 y C-2

Descripción	Calicata C-1	Calicata C-2
% Grava	11.95 %	0.00 %
% Arena	16.14 %	1.65 %
% Que pasa N° 200	71.92 %	98.35 %
Límite Líquido	69.54 %	51.14 %
Límite Plástico	33.28 %	26.00 %
Índice de plasticidad	36.27 %	25.14 %
SUCS	CH (arcilla de alta plasticidad, arcilla densa con arena)	CH (arcilla de alta plasticidad, arcilla densa)

Nota: Elaboración propia

Dado que los límites líquidos de ambas muestras superan el 50%, lo que indica una alta plasticidad, y que más del 50% del material pasa la malla No. 200. Además de que la relación del índice de plasticidad con el límite líquido está por encima de la línea "A" del cuadro de plasticidad creado utilizando el método SUCS, es posible determinar una clasificación CH para ambas muestras a partir de la tabla anterior.

3.3.1.5. Clasificación AASHTO

Para la clasificación AASHTO que generalmente se usan para carreteras, se clasificó según el tamaño de partícula del suelo que está regido por grupos y sus límites de consistencia en relación con la carta de plasticidad establecida por el AASHTO.

Tabla 17

Clasificación AASHTO, muestras C-1 y C-2.

Descripción	Calicata C-1	Calicata C-2
% Que pasa N° 10	88.05 %	100.00 %
% Que pasa N° 40	85.19 %	99.87 %
% Que pasa N° 200	71.92 %	98.35 %
Límite Líquido	69.54 %	51.14 %
Límite Plástico	33.28 %	26.00 %
Índice de plasticidad	36.27 %	25.14 %
Clasificación AASHTO	A-7-6	A-7-6

Nota: Elaboración propia.

Como se puede observar en la tabla anterior, ambas muestras cumplieron con los requisitos del método AASHTO para clasificar como A-7-6. Esto se debe a que las muestras tenían límites líquidos mayores del 40%, índices de plasticidad mayores del 10% y más del 35% de ellas pasaron la malla N° 200.

3.3.1.6. Compactación Proctor Modificado

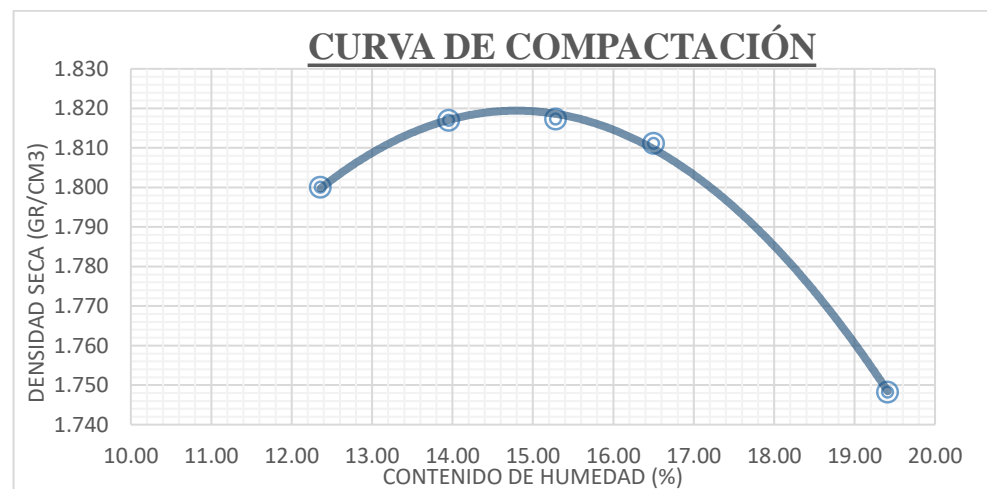
Previamente para la realización del ensayo se previó la preparación y posterior a ello la saturación del suelo por 24 horas para garantizar la uniformidad de la humedad en el suelo.

El método de ensayo sigue la norma (ASTM D-1557, 2012), mediante el método “A” dado que en ambos casos de las muestras C-1 y C-2, el material que pasa la malla N° 4 es más del 80%. Dado el método, se realizó la compactación del material ubicado dentro de un molde normalizado de aproximadamente 4 pulgadas, para el posterior cálculo de la densidad seca (MDS) y el óptimo contenido de humedad (CHO). Para

ello se hace el uso del material que pasa la malla N° 4 de aproximadamente 3 kg de material por porcentaje de contenido de humedad, procediendo a la compactación de 5 capas, que comprende 25 golpes por cada capa, con un pistón normalizado para la prueba de 4.54 kg aproximadamente de masa. El ensayo se realizó con una cantidad de 5 puntos para contenidos de humedad diferentes.

Figura 14

Curva de compactación, muestra natural C-1

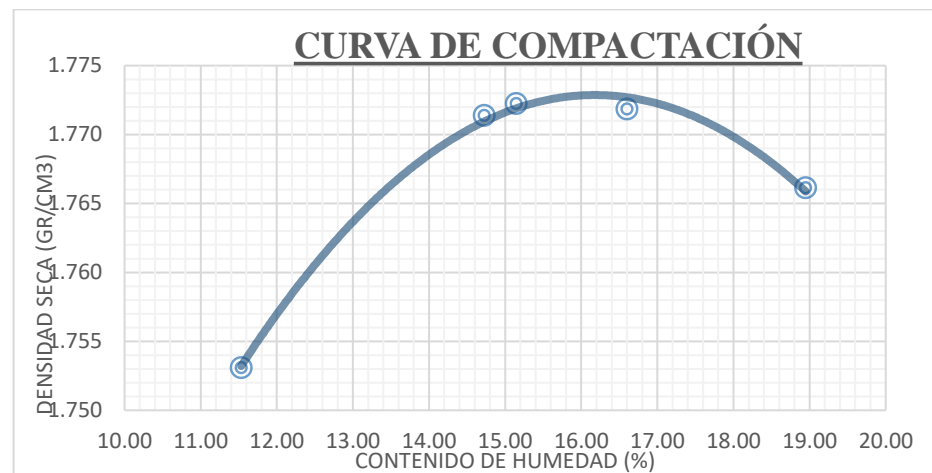


Nota: Elaboración propia

Para la anterior figura se observó que la curva de compactación mediante el cálculo de la densidad seca para cada punto indica una máxima densidad seca de 1.819 gr/cm³ y un contenido de humedad óptimo de 14.79%, para la calicata C-1.

Figura 15

Curva de compactación, muestra natural C-2



Nota: Elaboración propia

De la figura anterior se observó que la curva de compactación indica una máxima densidad seca de 1.773 gr/cm³, y un contenido de humedad óptimo de 16.18%.

3.3.1.7. Valor de soporte de California (CBR)

Siguiendo el procedimiento indicado para el desarrollo del ensayo CBR bajo la norma (ASTM D-1883, 2016), se prepararon previamente muestras de 5 kg aproximadamente, con una saturación de 24 horas previas al ensayo. El contenido de humedad fue fijado para el contenido de humedad óptimo calculado en el ensayo Proctor modificado.

El ensayo continuó con la preparación de las muestras que serán sometidas a la prueba de penetración; estas muestras fueron preparadas por compactación, se prepararon 3 muestras en moldes para 12, 25, y 56 golpes por capa, cada molde con 5 capas. Una vez compactadas, fueron puestas en inmersión por 96 horas, registrando su expansión.

Culminadas las 96 horas, las muestras fueron escurridas, y posteriormente sometidas a pruebas de penetración, donde se procedió a la lectura de la carga para las deformaciones correspondientes.

Tabla 18

Expansión para muestra natural C-1

Tiempo	12 GOLPES			25 GOLPES			56 GOLPES		
	Dial	Expansión		Dial	Expansión		Dial	0.00	
		mm	%		mm	%		mm	%
0	0.000	0.00	0.00	0.000	0.00	0.00	0.000	0.00	0.00
24 h	5.367	5.37	4.64	4.914	4.91	4.27	4.837	4.84	4.16
48 h	6.821	6.82	5.90	6.731	6.73	5.84	6.089	6.09	5.24
72 h	8.540	8.54	7.38	8.052	8.05	6.99	7.342	7.34	6.32
96 h	10.057	10.06	8.69	9.511	9.51	8.26	9.117	9.12	7.85

Nota: Elaboración propia.

Tabla 19

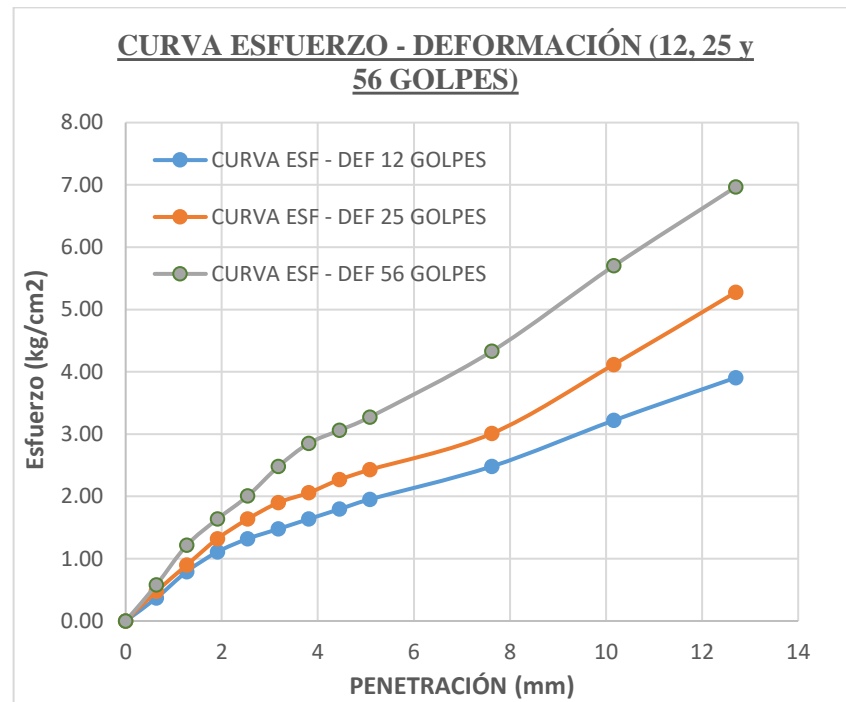
Índice CBR natural C-1.

Penetración mm	12 GOLPES				25 GOLPES				56 GOLPES			
	Dial	Kg	kg/cm2	%CBR	Dial	Kg	kg/cm2	%CBR	Dial	Kg	kg/cm2	%CBR
0	0.00	0.00	0.00		0.00	0.00	0.00		0.00	0.00	0.00	
0.64	0.07	7.14	0.37		0.09	9.18	0.47		0.11	11.22	0.58	
1.27	0.15	15.30	0.79		0.17	17.33	0.90		0.23	23.45	1.21	
1.91	0.21	21.41	1.11		0.25	25.49	1.32		0.31	31.61	1.64	
2.54	0.25	25.49	1.32	1.88	0.31	31.61	1.64	2.33	0.38	38.75	2.01	2.86
3.18	0.28	28.55	1.48		0.36	36.71	1.90		0.47	47.93	2.48	
3.81	0.31	31.61	1.64		0.39	39.77	2.06		0.54	55.06	2.85	
4.45	0.34	34.67	1.79		0.43	43.85	2.27		0.58	59.14	3.06	
5.08	0.37	37.73	1.95	1.85	0.46	46.91	2.43	2.30	0.62	63.22	3.27	3.10
7.62	0.47	47.93	2.48		0.57	58.12	3.01		0.82	83.62	4.33	
10.16	0.61	62.20	3.22		0.78	79.54	4.12		1.08	110.13	5.70	
12.7	0.74	75.46	3.91		1.00	101.97	5.28		1.32	134.60	6.97	

Nota: Elaboración propia.

Figura 16

Curva esfuerzo-deformación, muestra natural C-1.



Nota: Elaboración propia

De los datos precedentes se determinó que el CBR indica un valor de 3.10 % para el 100 % de la MDS del suelo natural de la muestra C-1 y un 2.68% de CBR para el 95% de la MDS

Tabla 20

Expansión para muestra natural C-2.

Tiempo	12 GOLPES			25 GOLPES			56 GOLPES		
	Dial	Expansión		Dial	Expansión		Dial	0.00	
		mm	%		mm	%		mm	%
0	0.000	0.00	0.00	0.000	0.00	0.00	0.000	0.00	0.00
24 h	3.880	3.88	3.33	3.150	3.15	2.71	3.085	3.09	2.66
48 h	5.901	5.90	5.07	5.541	5.54	4.77	5.350	5.35	4.61
72 h	7.958	7.96	6.83	7.257	7.26	6.25	7.019	7.02	6.05
96 h	9.541	9.54	8.19	8.951	8.95	7.70	8.731	8.73	7.52

Nota: Elaboración propia.

Tabla 21

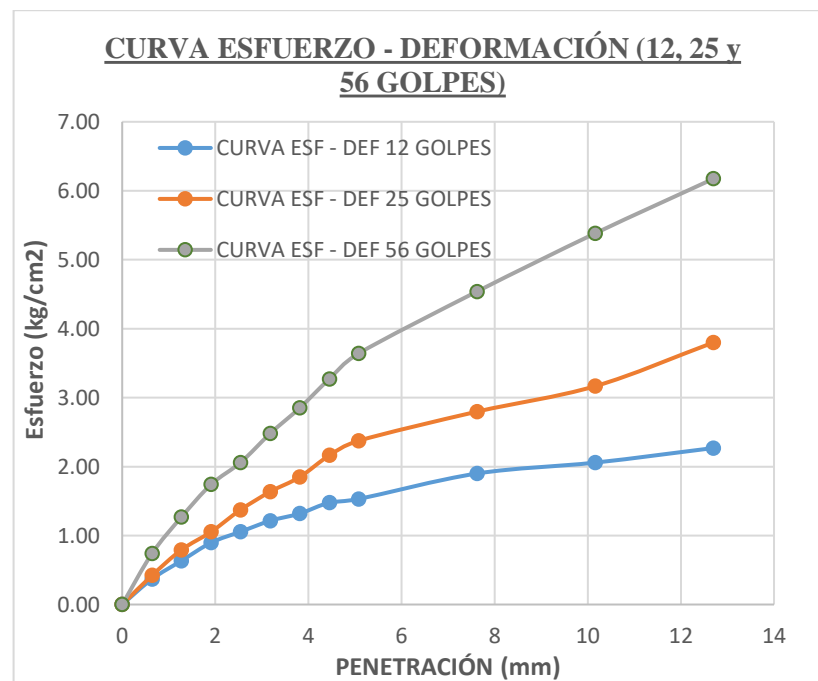
Índice CBR natural C-2.

Penetración mm	12 GOLPES				25 GOLPES				56 GOLPES			
	Dial	Kg	kg/cm2	%CBR	Dial	Kg	kg/cm2	%CBR	Dial	Kg	kg/cm2	%CBR
0	0.00	0.00	0.00		0.00	0.00	0.00		0.00	0.00	0.00	
0.64	0.07	7.14	0.37		0.08	8.16	0.42		0.14	14.28	0.74	
1.27	0.12	12.24	0.63		0.15	15.30	0.79		0.24	24.47	1.27	
1.91	0.17	17.33	0.90		0.20	20.39	1.06		0.33	33.65	1.74	
2.54	0.20	20.39	1.06	1.50	0.26	26.51	1.37	1.95	0.39	39.77	2.06	2.93
3.18	0.23	23.45	1.21		0.31	31.61	1.64		0.47	47.93	2.48	
3.81	0.25	25.49	1.32		0.35	35.69	1.85		0.54	55.06	2.85	
4.45	0.28	28.55	1.48		0.41	41.81	2.16		0.62	63.22	3.27	
5.08	0.29	29.57	1.53	1.45	0.45	45.89	2.37	2.25	0.69	70.36	3.64	3.45
7.62	0.36	36.71	1.90		0.53	54.04	2.80		0.86	87.69	4.54	
10.16	0.39	39.77	2.06		0.60	61.18	3.17		1.02	104.01	5.38	
12.7	0.43	43.85	2.27		0.72	73.42	3.80		1.17	119.30	6.17	

Nota: Elaboración propia.

Figura 17

Curva esfuerzo-deformación, muestra natural C-2.



Nota: Elaboración propia.

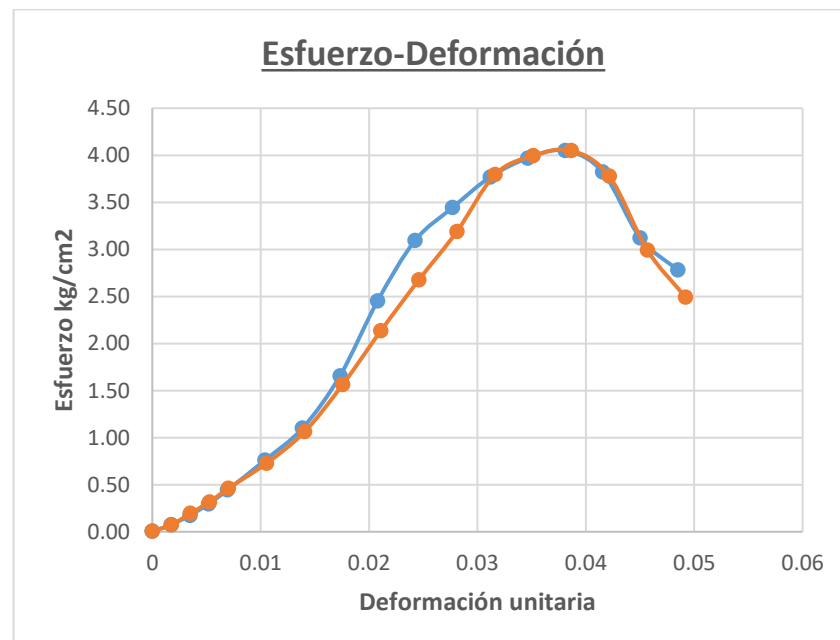
De los datos precedentes se determinó que el CBR calculado para el 100 % de la MDS es del 3.45%, y el CBR para el 95% de la MDS es 2.58%.

3.3.1.8. Compresión simple

Según lo planteado, se realizó la elaboración de probetas en relación al ensayo Proctor, por lo que se elaboraron muestras compactadas con aproximación al óptimo contenido de humedad (CHO) y la máxima densidad seca (MDS). Para lo cual se estableció una aproximación en peso para el contenido de la probeta que indica la norma NTP 339.167 (2002), por lo que se elaboraron probetas de aproximación de 7.20 cm de diámetro, y una altura que sea en relación de 2 a 2.5 respecto del diámetro.

Figura 18

Esfuerzo deformación para C-1 natural

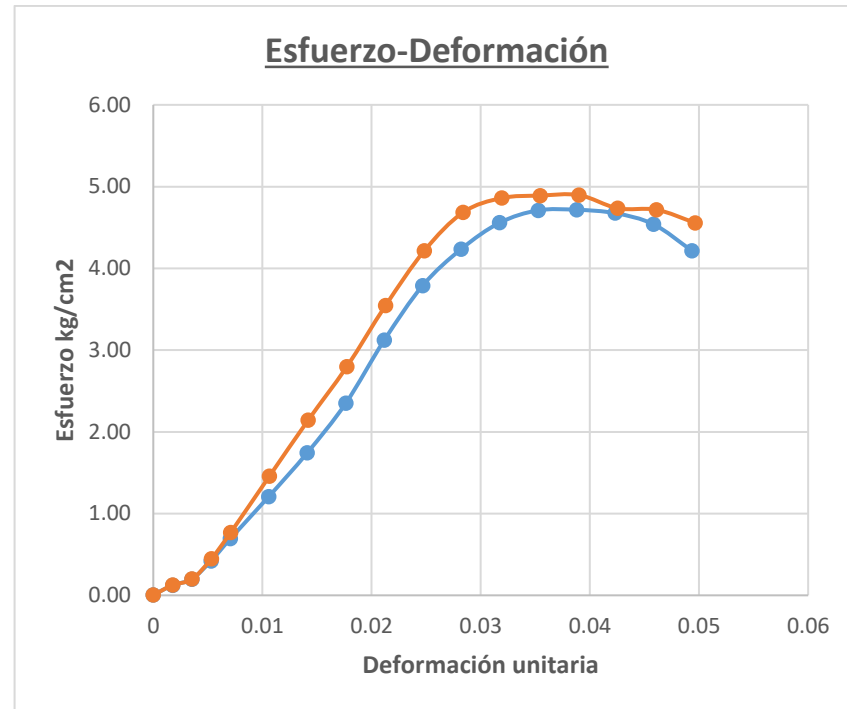


Nota: Elaboración propia.

Del gráfico anterior se presentó una carga última promedio que de 4.05 kg/cm²; dicho valor, además, indica una cohesión promedio de 2.03 kg/cm², en la muestra C-1.

Figura 19

Esfuerzo deformación para C-2 natural



Nota: Elaboración propia.

Según la figura 21, se observó una carga última promedio que de 4.81 kg/cm², valor que indica una cohesión promedio de 2.40 kg/cm².

3.3.2. Estudios geotécnicos con vidrio soluble.

3.3.2.1. Límites de consistencia

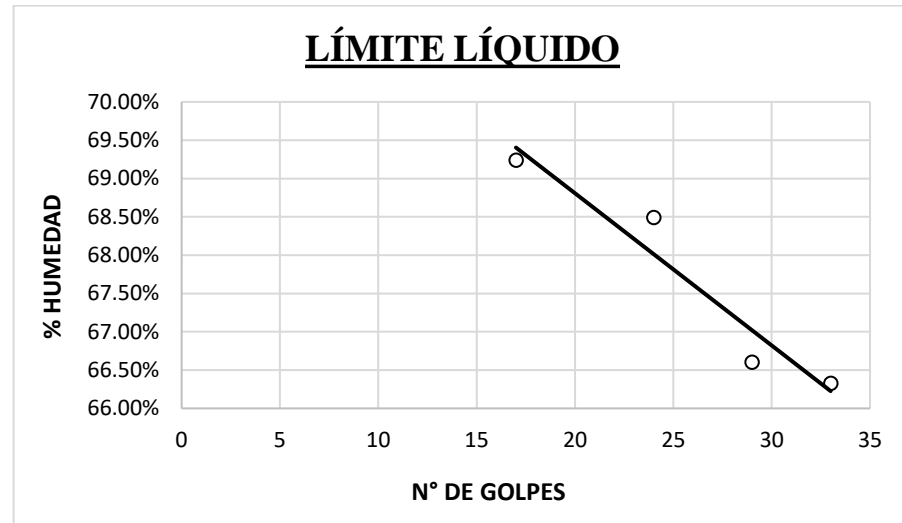
Para los límites de consistencia se prepararon varias muestras de suelo mezcladas con porcentajes en peso del 1%, 3%, 5% y 7% de vidrio soluble; en el procedimiento realizado se preparó una cierta cantidad de

muestra de suelo, que fue combinada con una solución de vidrio soluble con agua, esto para distribuir la solución de manera uniforme en el suelo.

MUESTRA C-1

Figura 20

Límite líquido, muestra C-1 con 1% V.S.



Nota: Elaboración propia

De la figura anterior se indica un límite líquido de 67.81%, definido para 25 golpes, para un contenido del 1% de silicato de sodio.

Tabla 22

Límite plástico, muestra C-1 con 1% V.S.

DESCRIPCIÓN	UND	1	2	3
TARA	Nº	JH-20	S-16	S-08
TARA + SUELO HÚMEDO	gr	29.05	32.28	29.62
TARA + SUELO SECO	gr	26.03	28.79	25.62
AGUA	gr	3.02	3.49	4
PESO DE LA TARA	gr	16.94	18.41	13.82
PESO DEL SUELO SECO	gr	9.09	10.38	11.8
LÍMITE PLÁSTICO	%	33.22%	33.62%	33.90%

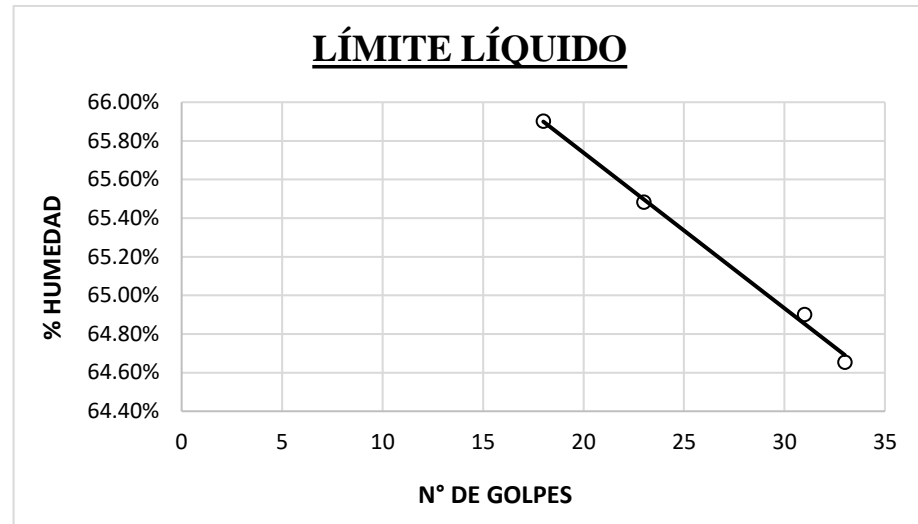
Nota: Elaboración propia.

De la tabla anterior, se indicó un límite plástico de 33.58% para un contenido del 1% de silicato de sodio.

Finalmente se computó un índice de plasticidad de 34.23%.

Figura 21

Límite líquido, muestra C-1 con 3% V.S.



Nota: Elaboración propia

De la figura anterior, se indica un límite líquido de 65.34%, definido para 25 golpes, para un contenido del 3% de silicato de sodio.

Tabla 23

Límite plástico, muestra C-1 con 3% V.S.

DESCRIPCIÓN	UND	1	2	3
TARA	N°	JH-04	JH-18	T-07-1
TARA + SUELO HÚMEDO	gr	26.09	26.52	34.56
TARA + SUELO SECO	gr	24.25	24.6	32.14
AGUA	gr	1.84	1.92	2.42
PESO DE LA TARA	gr	18.94	19.15	25.21
PESO DEL SUELO SECO	gr	5.31	5.45	6.93
LÍMITE PLÁSTICO	%	34.65%	35.23%	34.92%

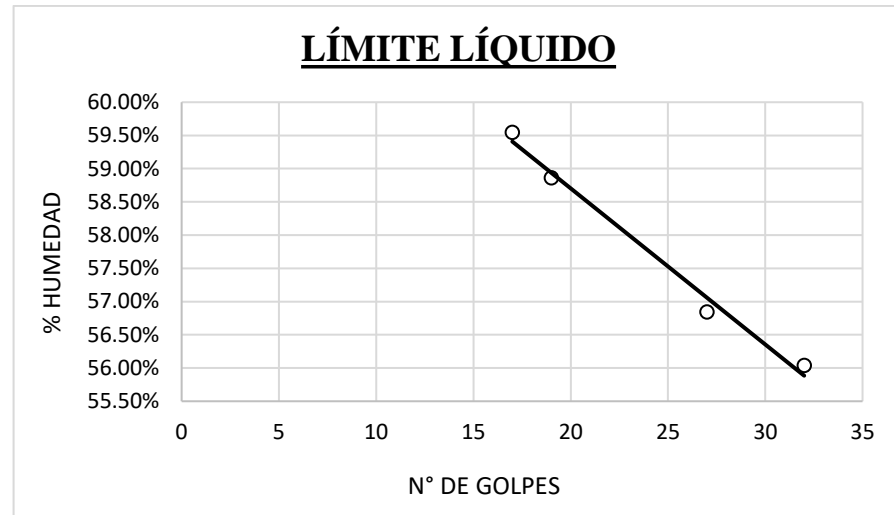
Nota: Elaboración propia.

De la tabla anterior, se indicó un límite plástico de 34.93% para un contenido del 3% de silicato de sodio.

Finalmente se computó un índice de plasticidad de 30.4%.

Figura 22

Límite líquido, muestra C-1 con 5% V.S.



Nota: Elaboración propia

De la figura anterior, se indica un límite líquido de 57.53%, definido para 25 golpes, para un contenido del 5% de silicato de sodio.

Tabla 24

Límite plástico, muestra C-1 con 5% V.S.

DESCRIPCIÓN	UND	1	2	3
TARA	Nº	A-07	A-03	JH-04
TARA + SUELO HÚMEDO	gr	20.96	21.6	27.18
TARA + SUELO SECO	gr	18.92	19.48	25.02
AGUA	gr	2.04	2.12	2.16
PESO DE LA TARA	gr	13.42	13.43	18.94
PESO DEL SUELO SECO	gr	5.5	6.05	6.08
LÍMITE PLÁSTICO	%	37.09%	35.04%	35.53%

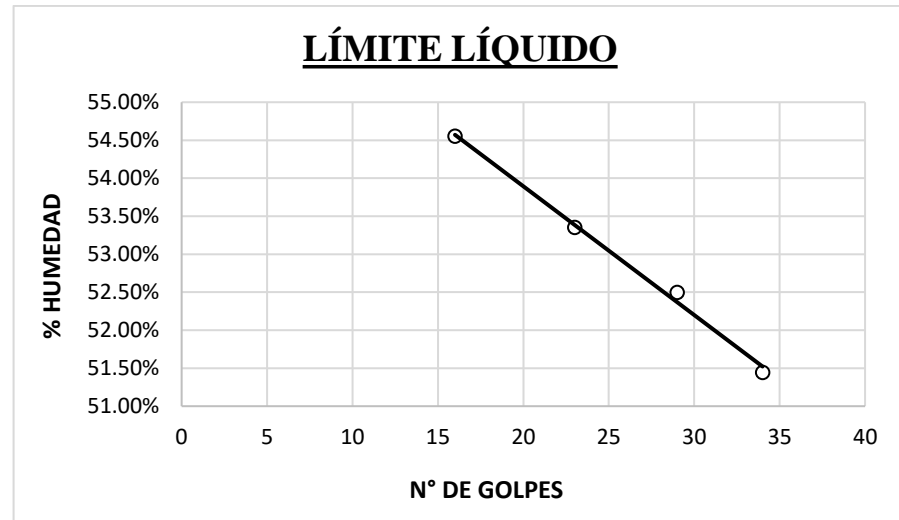
Nota: Elaboración propia.

De la tabla anterior, se indicó un límite plástico de 35.89% para un contenido del 5% de silicato de sodio.

Finalmente se computó un índice de plasticidad de 21.64%.

Figura 23

Límite líquido, muestra C-1 con 7% V.S.



Nota: Elaboración propia

De la figura anterior, se indica un límite líquido de 53.05%, definido para 25 golpes, para un contenido del 7% de silicato de sodio.

Tabla 25

Límite plástico, muestra C-1 con 7% V.S.

DESCRIPCIÓN	UND	1	2	3
TARA	Nº	T-07-2	DC-06	S-61
TARA + SUELO HÚMEDO	Gr	34.02	35.64	32.99
TARA + SUELO SECO	Gr	31.58	33.17	30.12
AGUA	Gr	2.44	2.47	2.87
PESO DE LA TARA	Gr	24.88	26.46	22.16
PESO DEL SUELO SECO	Gr	6.7	6.71	7.96
LÍMITE PLÁSTICO	%	36.42%	36.81%	36.06%

Nota: Elaboración propia.

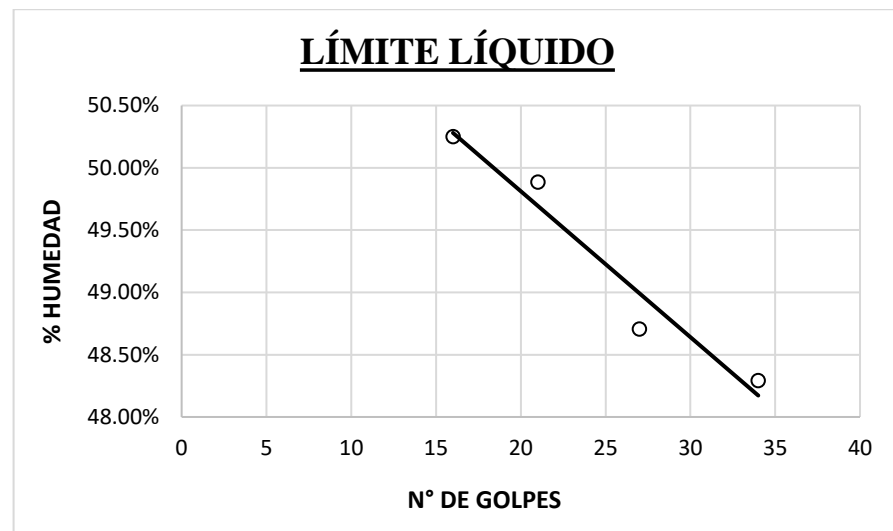
De la tabla anterior, se indicó un límite plástico de 36.43% para un contenido del 7% de silicato de sodio.

Finalmente se computó un índice de plasticidad de 16.62%

MUESTRA C-2

Figura 24

Límite líquido, muestra C-2 con 1% V.S.



Nota: Elaboración propia

De la figura, anterior se indica un límite líquido de 49.23%, definido para 25 golpes, para un contenido del 1% de silicato de sodio.

Tabla 26

Límite plástico, muestra C-2 con 1% V.S.

DESCRIPCIÓN	UND	1	2	3
TARA	N°	S-19	S-57	B-07
TARA + SUELO HÚMEDO	gr	29.37	29.89	23.45
TARA + SUELO SECO	gr	26.78	27.34	21.45
AGUA	gr	2.59	2.55	2
PESO DE LA TARA	gr	17.08	17.77	13.99
PESO DEL SUELO SECO	gr	9.7	9.57	7.46
LÍMITE PLÁSTICO	%	26.70%	26.65%	26.81%

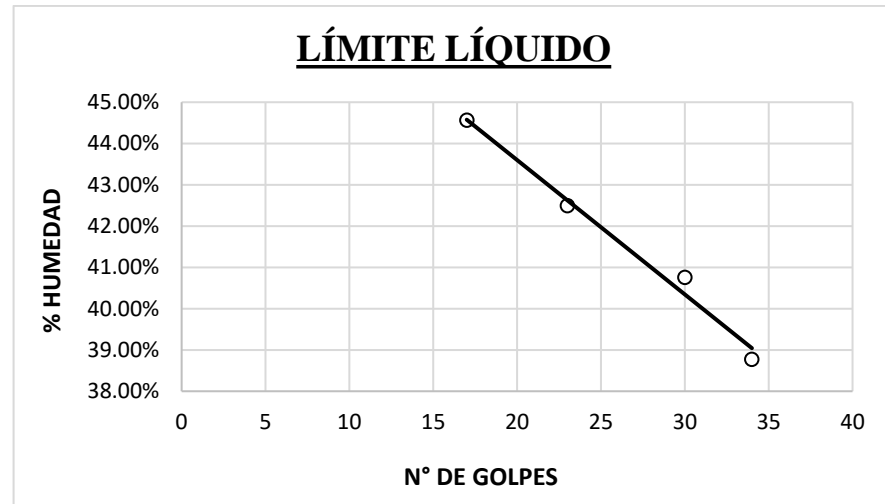
Nota: Elaboración propia.

De la tabla anterior, se indicó un límite plástico de 26.72% para un contenido del 1% de silicato de sodio.

Finalmente se computó un índice de plasticidad de 22.51%.

Figura 25

Límite líquido, muestra C-2 con 3% V.S.



Nota: Elaboración propia

De la figura anterior, se indica un límite líquido de 41.97%, definido para 25 golpes, para un contenido del 3% de silicato de sodio.

Tabla 27

Límite plástico, muestra C-2 con 3% V.S.

DESCRIPCIÓN	UND	1	2	3
TARA	Nº	S-28	S-41	S-54
TARA + SUELO HÚMEDO	gr	26.67	26.51	26.07
TARA + SUELO SECO	gr	25.13	24.69	24.46
AGUA	gr	1.54	1.82	1.61
PESO DE LA TARA	gr	19.43	18.03	18.56
PESO DEL SUELO SECO	gr	5.7	6.66	5.9
LÍMITE PLÁSTICO	%	27.02%	27.33%	27.29%

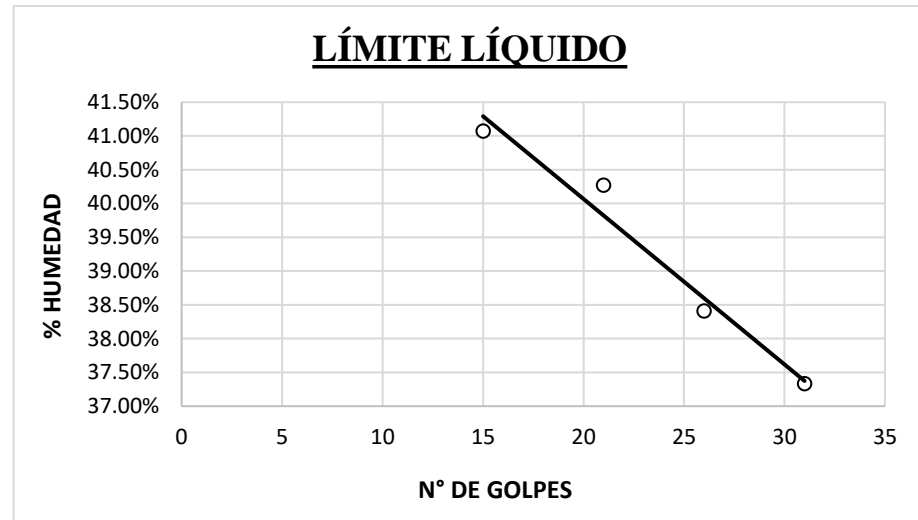
Nota: Elaboración propia.

De la tabla anterior, se indicó un límite plástico de 27.21% para un contenido del 3% de silicato de sodio.

Finalmente se computó un índice de plasticidad de 14.76%.

Figura 26

Límite líquido, muestra C-2 con 5% V.S.



Nota: Elaboración propia

De la figura anterior, se indica un límite líquido de 38.84%, definido para 25 golpes, para un contenido del 5% de silicato de sodio.

Tabla 28

Límite plástico, muestra C-2 con 5% V.S.

DESCRIPCIÓN	UND	1	2	3
TARA	N°	S-41	S-28	JH-18
TARA + SUELO HÚMEDO	gr	25.61	27.02	25.94
TARA + SUELO SECO	gr	23.96	25.36	24.45
AGUA	gr	1.65	1.66	1.49
PESO DE LA TARA	gr	18.04	19.44	19.15
PESO DEL SUELO SECO	gr	5.92	5.92	5.3
LÍMITE PLÁSTICO	%	27.87%	28.04%	28.11%

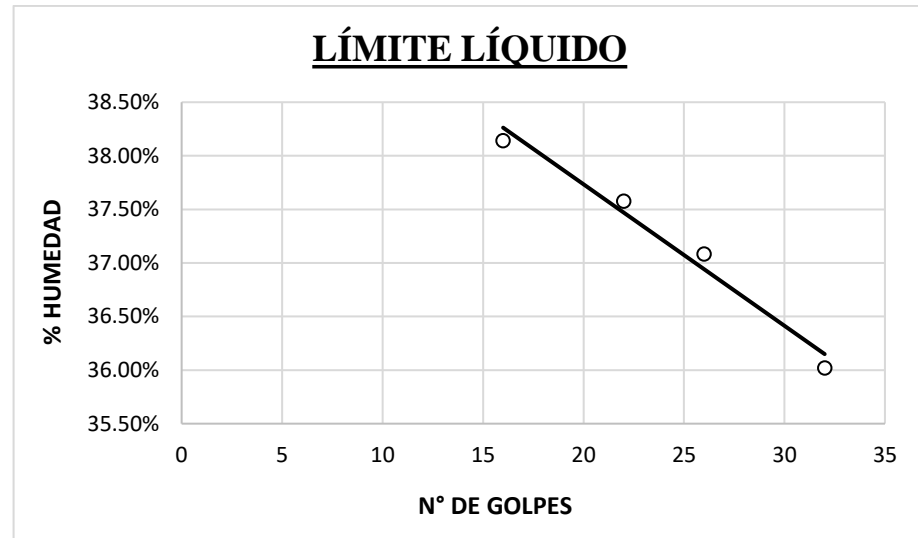
Nota: Elaboración propia.

De la tabla anterior, se indicó un límite plástico de 28.01% para un contenido del 5% de silicato de sodio.

Finalmente se computó un índice de plasticidad de 10.83%.

Figura 27

Límite líquido, muestra C-2 con 7% V.S.



Nota: Elaboración propia

De la figura anterior, se indica un límite líquido de 37.07%, definido para 25 golpes, para un contenido del 7% de silicato de sodio.

Tabla 29

Límite plástico, muestra C-2 con 7% V.S.

DESCRIPCIÓN	UND	1	2	3
TARA	Nº	A-2	S-54	T-06
TARA + SUELO HÚMEDO	gr	32.54	30.07	32.59
TARA + SUELO SECO	gr	29.66	27.54	29.73
AGUA	gr	2.88	2.53	2.86
PESO DE LA TARA	gr	19.52	18.57	19.64
PESO DEL SUELO SECO	gr	10.14	8.97	10.09
LÍMITE PLÁSTICO	%	28.40%	28.21%	28.34%

Nota: Elaboración propia.

De la tabla anterior, se indicó un límite plástico de 28.32% para un contenido del 7% de silicato de sodio.

Finalmente se computó un índice de plasticidad de 8.76%.

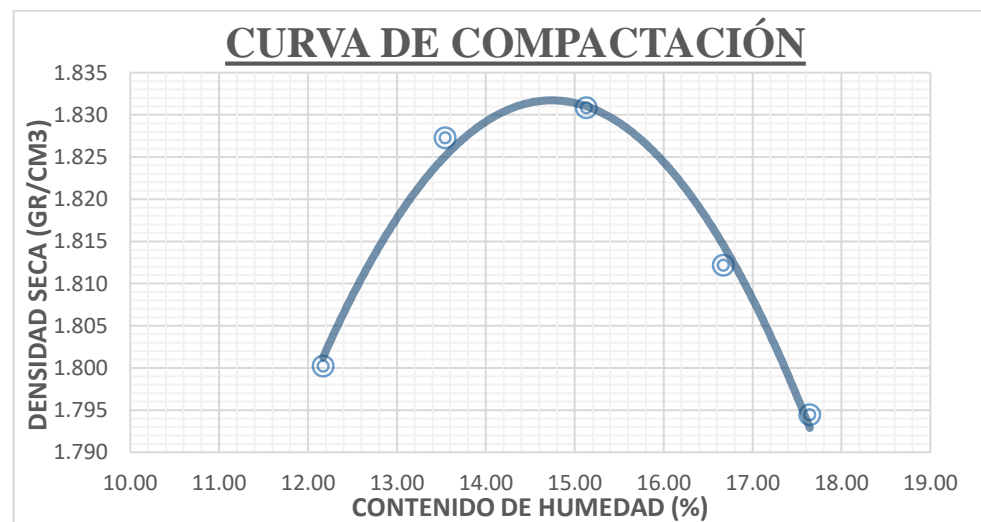
3.3.2.2. Proctor modificado

Siguiendo las consideraciones previas. Se prepararon muestras de suelo en peso, con una saturación de 24 horas. Se realizaron las pruebas de Proctor modificado para los porcentajes de 1%, 3%, 5% y 7%. Posterior a ello se computaron los cálculos respectivos, evaluando el CHO y la MDS.

MUESTRA C-1

Figura 28

Curva de compactación, muestra C-1, 1% V.S.

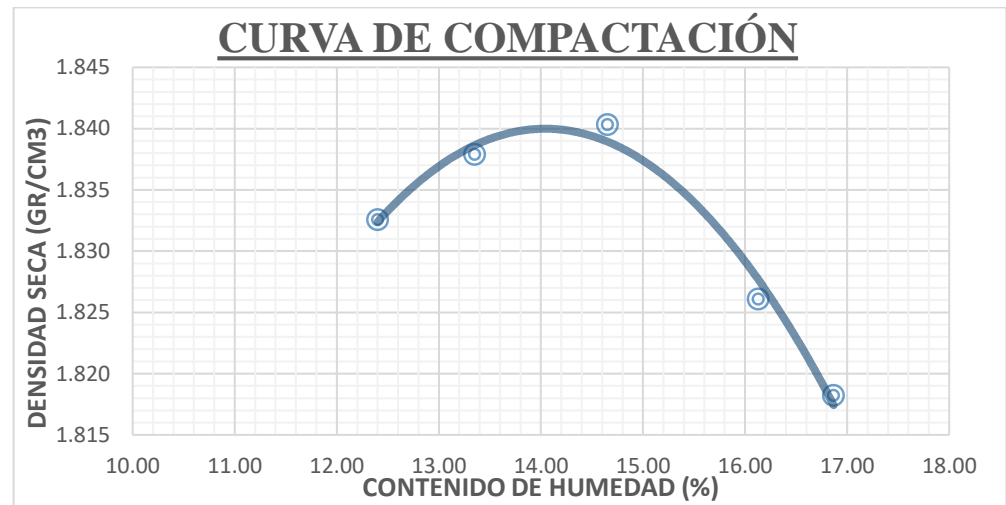


Nota: Elaboración propia.

De los cálculos previos, mostrados en la figura previa, se tiene que para un 1% de adición de vidrio soluble se computó 1.833 gr/cm³ de MDS y un 14.66% de CHO.

Figura 29

Curva de compactación, muestra C-1, 3% V.S.

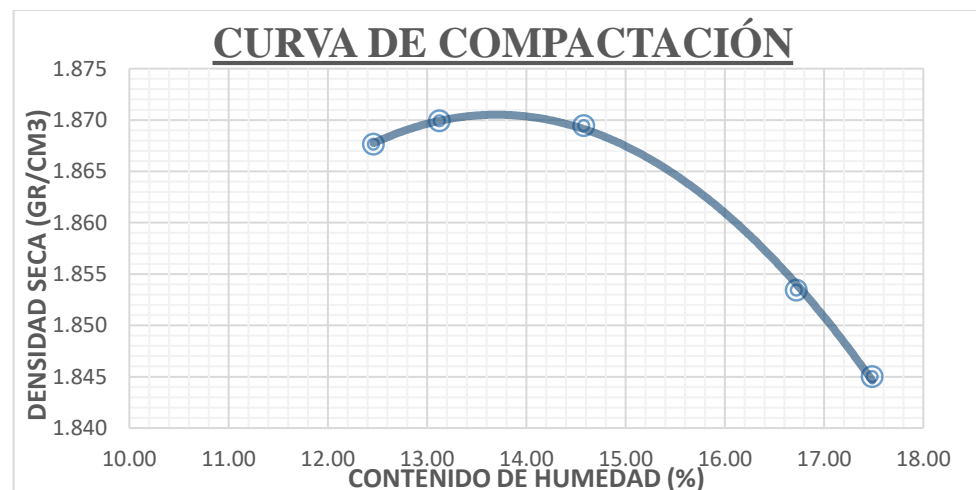


Nota: Elaboración propia.

De los cálculos previos, mostrados en la figura previa, se tiene que para un 3% de adición de vidrio soluble se computó 1.840 gr/cm³ de MDS y un 14.04 % de CHO.

Figura 30

Curva de compactación, muestra C-1, 5% V.S.

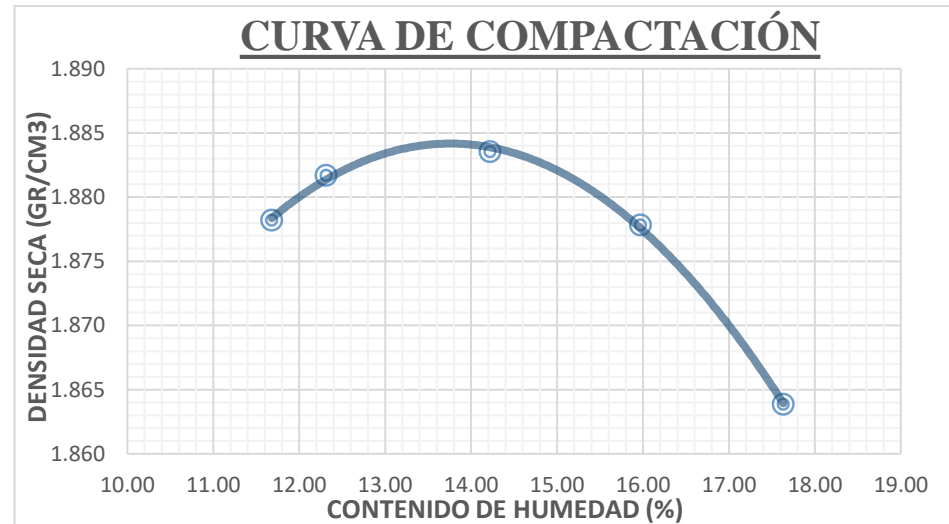


Nota: Elaboración propia.

De los cálculos previos, mostrados en la figura previa, se tiene que para un 5% de adición de vidrio soluble se computó 1.871 gr/cm³ de MDS y un 13.70% de CHO.

Figura 31

Curva de compactación, muestra C-1, 7% V.S.



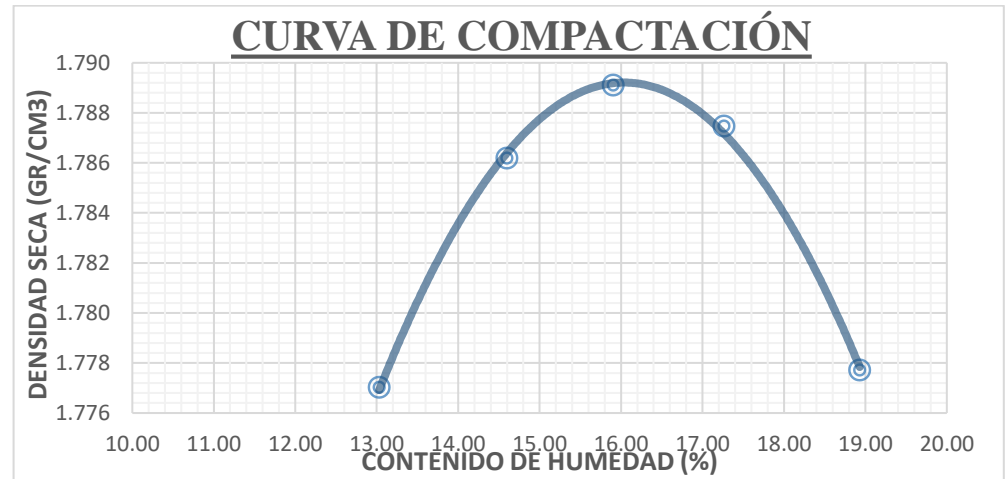
Nota: Elaboración propia.

De los cálculos previos, mostrados en la figura previa, se tiene que para un 7% de adición de vidrio soluble se computó 1.884 gr/cm³ de MDS y un 13.76 % de CHO.

MUESTRA C-2

Figura 32

Curva de compactación, muestra C-2, 1% V.S.

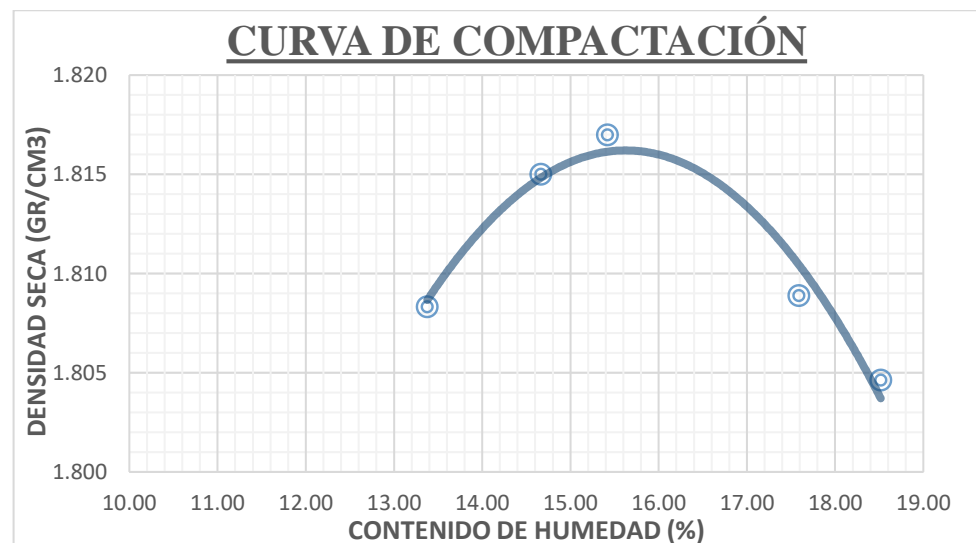


Nota: Elaboración propia.

De los cálculos previos, mostrados en la figura previa, se tiene que para un 1% de adición de vidrio soluble se computó 1.789 gr/cm³ de MDS y un 16.04 % de CHO.

Figura 33

Curva de compactación, muestra C-2, 3% V.S.

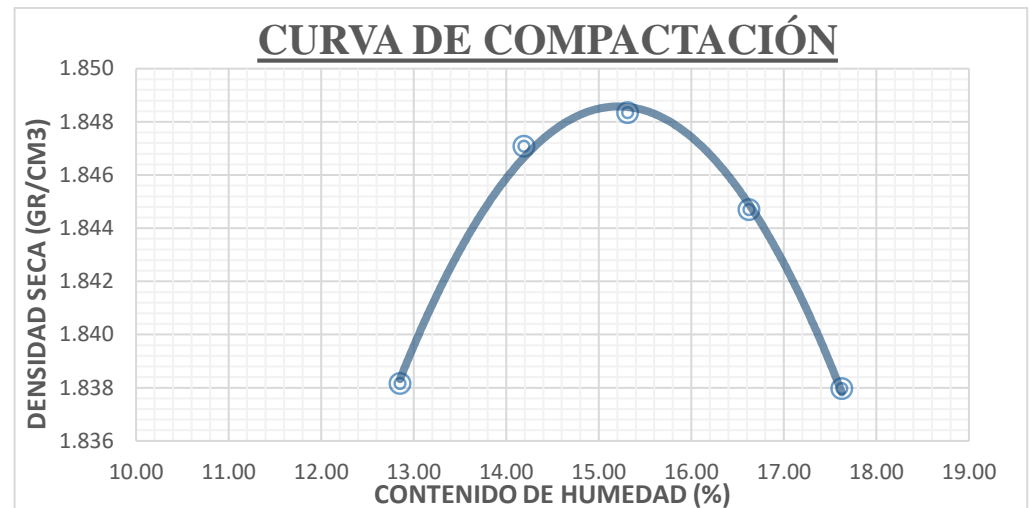


Nota: Elaboración propia.

De los cálculos previos, mostrados en la figura previa, se tiene que para un 3% de adición de vidrio soluble se computó 1.816 gr/cm³ de MDS y un 15.63 % de CHO.

Figura 34

Curva de compactación, muestra C-2, 5% V.S.

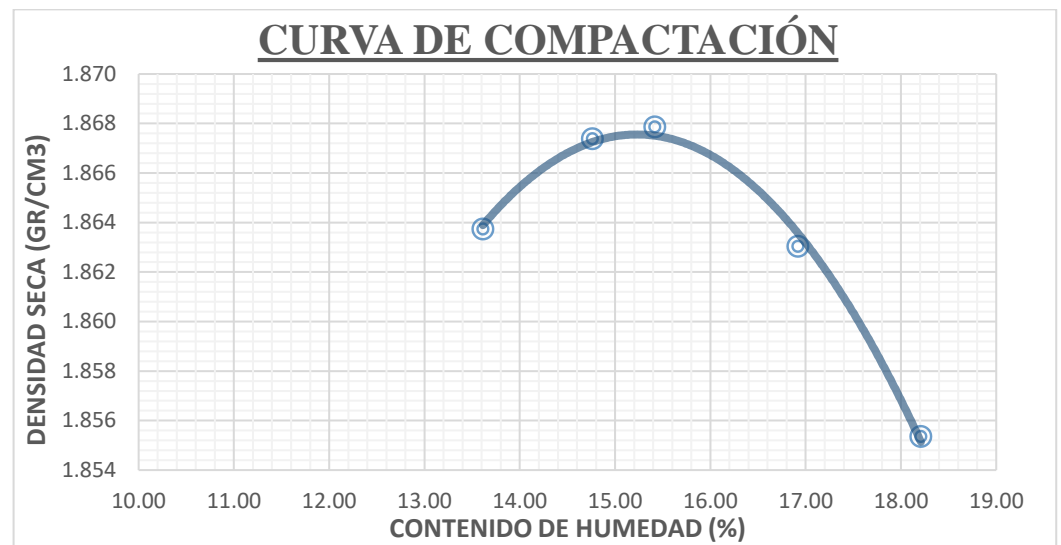


Nota: Elaboración propia.

De los cálculos previos, mostrados en la figura previa, se tiene que para un 5% de adición de vidrio soluble se computó 1.849 gr/cm³ de MDS y un 15.21 % de CHO.

Figura 35

Curva de compactación, muestra C-2, 7% V.S.



Nota: Elaboración propia.

De los cálculos previos, mostrados en la figura previa, se tiene que para un 7% de adición de vidrio soluble se computó 1.868 gr/cm³ de MDS y un 15.23% de CHO.

3.3.2.3. Valor de Soporte de California (CBR)

Prosiguiendo al ensayo CBR se procedió de la misma forma de preparación de las muestras con los datos obtenidos en los ensayos Proctor. Para dichos contenidos de humedad óptima (CHO) y máximas densidades secas (MDS), según la incorporación del vidrio soluble.

Tabla 30

Expansión muestra C-1, 1% V.S.

Tiempo	12 GOLPES			25 GOLPES			56 GOLPES		
	Dial	Expansión		Dial	Expansión		Dial	0.00	
		mm	%		mm	%		Mm	%
0	0.000	0.00	0.00	0.001	0.00	0.00	1.230	0.00	0.00
24 h	4.917	4.92	4.25	4.819	4.82	4.15	5.124	3.89	3.32
48 h	7.080	7.08	6.11	5.614	5.61	4.83	6.519	5.29	4.51
72 h	8.005	8.01	6.91	7.362	7.36	6.33	7.800	6.57	5.60
96 h	9.145	9.15	7.90	8.510	8.51	7.32	9.120	7.89	6.73

Nota: Elaboración propia.

Tabla 31

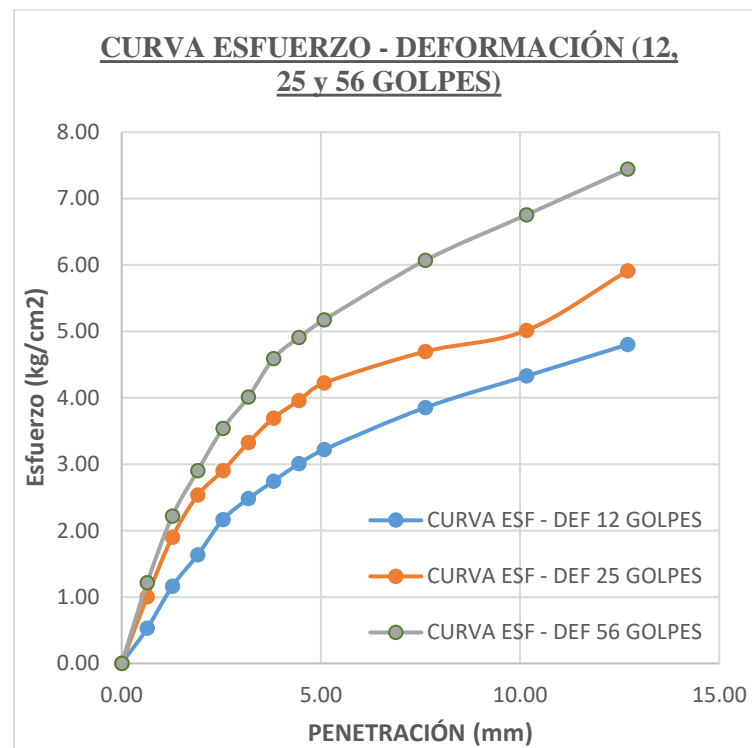
Índices CBR, muestra C-1, 1% V.S.

Penetración mm	12 GOLPES				25 GOLPES				56 GOLPES			
	Dial	Kg	kg/cm2	%CBR	Dial	Kg	kg/cm2	%CBR	Dial	Kg	kg/cm2	%CBR
0.00	0.00	0.00	0.00		0.00	0.00	0.00		0.00	0.00	0.00	
0.64	0.10	10.20	0.53		0.19	19.37	1.00		0.23	23.45	1.21	
1.27	0.22	22.43	1.16		0.36	36.71	1.90		0.42	42.83	2.22	
1.91	0.31	31.61	1.64		0.48	48.95	2.53		0.55	56.08	2.90	
2.54	0.41	41.81	2.16	3.08	0.55	56.08	2.90	4.13	0.67	68.32	3.54	5.04
3.18	0.47	47.93	2.48		0.63	64.24	3.32		0.76	77.50	4.01	
3.81	0.52	53.02	2.74		0.70	71.38	3.69		0.87	88.71	4.59	
4.45	0.57	58.12	3.01		0.75	76.48	3.96		0.93	94.83	4.91	
5.08	0.61	62.20	3.22	3.05	0.80	81.58	4.22	4.01	0.98	99.93	5.17	4.91
7.62	0.73	74.44	3.85		0.89	90.75	4.70		1.15	117.27	6.07	
10.16	0.82	83.62	4.33		0.95	96.87	5.01		1.28	130.52	6.76	
12.70	0.91	92.79	4.80		1.12	114.21	5.91		1.41	143.78	7.44	

Nota: Elaboración propia.

Figura 36

Curva Esfuerzo – Deformación, muestra C-1, 1% V.S.



Nota: Elaboración propia.

De los datos precedentes, se computaron los siguientes resultados para una incorporación del 1% de vidrio soluble.

CBR al 100% de la MDS: 5.04%.

CBR al 95% de la MDS: 4.33%.

Tabla 32

Expansión muestra C-1, 3% V.S.

Tiempo	12 GOLPES			25 GOLPES			56 GOLPES		
	Dial	Expansión		Dial	Expansión		Dial	0.00	
		mm	%		Mm	%		Mm	%
0	0.000	0.00	0.00	0.000	0.00	0.00	0.330	0.00	0.00
24 h	3.737	3.74	3.16	3.127	3.13	2.70	2.605	2.28	1.94
48 h	4.560	4.56	3.86	4.226	4.23	3.65	3.527	3.20	2.73
72 h	5.904	5.90	4.99	5.198	5.20	4.48	4.165	3.84	3.28
96 h	7.103	7.10	6.01	6.045	6.05	5.22	4.871	4.54	3.88

Nota: Elaboración propia.

Tabla 33

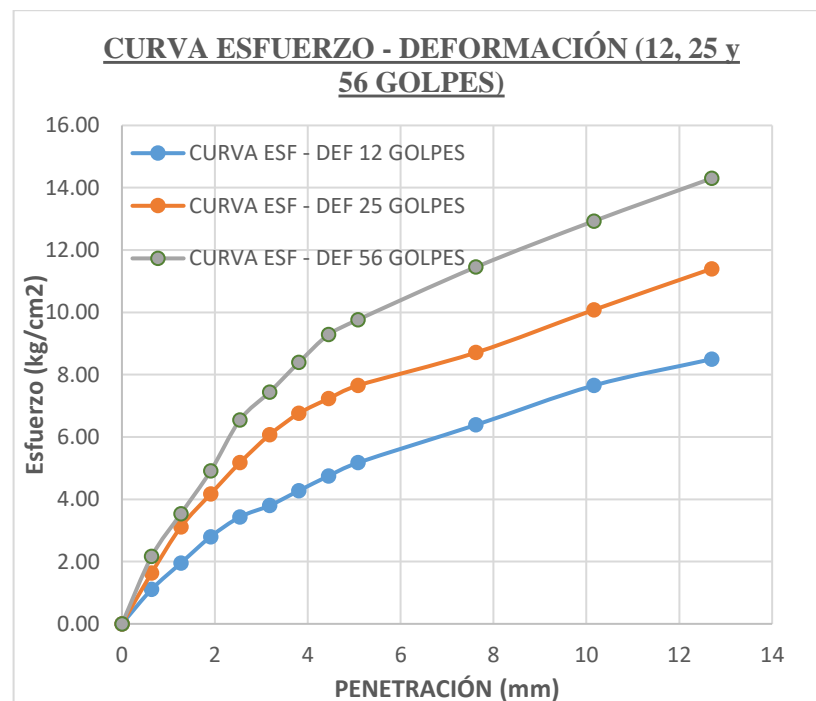
Índices CBR, muestra C-1, 3% V.S.

Penetración mm	12 GOLPES				25 GOLPES				56 GOLPES			
	Dial	Kg	kg/cm2	%CBR	Dial	Kg	kg/cm2	%CBR	Dial	Kg	kg/cm2	%CBR
0	0.00	0.00	0.00		0.00	0.00	0.00		0.00	0.00	0.00	
0.64	0.21	21.41	1.11		0.31	31.61	1.64		0.41	41.81	2.16	
1.27	0.37	37.73	1.95		0.59	60.16	3.11		0.67	68.32	3.54	
1.91	0.53	54.04	2.80		0.79	80.56	4.17		0.93	94.83	4.91	
2.54	0.65	66.28	3.43	4.89	0.98	99.93	5.17	7.37	1.24	126.44	6.54	9.32
3.18	0.72	73.42	3.80		1.15	117.27	6.07		1.41	143.78	7.44	
3.81	0.81	82.60	4.27		1.28	130.52	6.76		1.59	162.13	8.39	
4.45	0.90	91.77	4.75		1.37	139.70	7.23		1.76	179.47	9.29	
5.08	0.98	99.93	5.17	4.91	1.45	147.86	7.65	7.26	1.85	188.64	9.76	9.26
7.62	1.21	123.38	6.39		1.65	168.25	8.71		2.17	221.27	11.45	
10.16	1.45	147.86	7.65		1.91	194.76	10.08		2.45	249.83	12.93	
12.7	1.61	164.17	8.50		2.16	220.26	11.40		2.71	276.34	14.30	

Nota: Elaboración propia.

Figura 37

Curva Esfuerzo – Deformación, muestra C-1, 3% V.S.



Nota: Elaboración propia.

De los datos precedentes, se computaron los siguientes resultados para una incorporación del 1% de vidrio soluble.

CBR al 100% de la MDS: 9.32%.

CBR al 95% de la MDS: 7.52 %.

Tabla 34

Expansión muestra C-1, 5% V.S.

Tiempo	12 GOLPES			25 GOLPES			56 GOLPES		
	Dial	Expansión		Dial	Expansión		Dial	0.00	
		mm	%		mm	%		mm	%
0	0.000	0.00	0.00	0.100	0.00	0.00	0.000	0.00	0.00
24 h	1.918	1.92	1.64	2.213	2.11	1.85	0.657	0.66	0.58
48 h	3.279	3.28	2.80	2.810	2.71	2.37	1.394	1.39	1.22
72 h	4.538	4.54	3.87	3.602	3.50	3.07	2.165	2.17	1.89
96 h	5.050	5.05	4.31	4.132	4.03	3.53	2.512	2.51	2.20

Nota: Elaboración propia.

Tabla 35

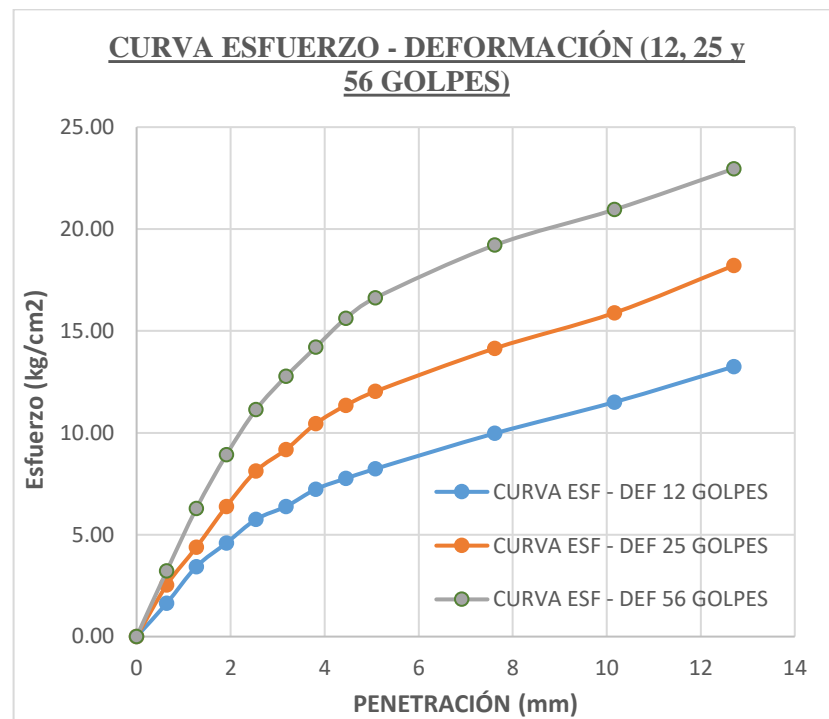
Índices CBR, muestra C-1, 5% V.S.

Penetración mm	12 GOLPES				25 GOLPES				56 GOLPES			
	Dial	Kg	kg/cm2	%CBR	Dial	Kg	kg/cm2	%CBR	Dial	Kg	kg/cm2	%CBR
0	0.00	0.00	0.00		0.00	0.00	0.00		0.00	0.00	0.00	
0.64	0.31	31.61	1.64		0.48	48.95	2.53		0.61	62.20	3.22	
1.27	0.65	66.28	3.43		0.83	84.64	4.38		1.19	121.34	6.28	
1.91	0.87	88.71	4.59		1.21	123.38	6.39		1.69	172.33	8.92	
2.54	1.09	111.15	5.75	8.19	1.54	157.03	8.13	11.58	2.11	215.16	11.14	15.86
3.18	1.21	123.38	6.39		1.74	177.43	9.18		2.42	246.77	12.77	
3.81	1.37	139.70	7.23		1.98	201.90	10.45		2.69	274.30	14.20	
4.45	1.47	149.90	7.76		2.15	219.24	11.35		2.96	301.83	15.62	
5.08	1.56	159.07	8.23	7.81	2.28	232.49	12.03	11.42	3.15	321.21	16.62	15.77
7.62	1.89	192.72	9.97		2.68	273.28	14.14		3.64	371.17	19.21	
10.16	2.18	222.29	11.50		3.01	306.93	15.88		3.97	404.82	20.95	
12.7	2.51	255.94	13.25		3.45	351.80	18.21		4.35	443.57	22.96	

Nota: Elaboración propia.

Figura 38

Curva Esfuerzo – Deformación, muestra C-1, 5% V.S.



Nota: Elaboración propia.

De los datos precedentes, se computaron los siguientes resultados para una incorporación del 5% de vidrio soluble.

CBR al 100% de la MDS: 15.86.

CBR al 95% de la MDS: 12.43.

Tabla 36

Expansión muestra C-1, 7% V.S.

Tiempo	12 GOLPES			25 GOLPES			56 GOLPES		
	Dial	Expansión		Dial	Expansión		Dial	Expansión	
		mm	%		Mm	%		Mm	%
0	0.005	0.00	0.00	0.010	0.00	0.00	0.001	0.00	0.00
24 h	1.725	1.72	1.47	2.345	2.34	2.04	2.001	2.00	1.75
48 h	2.950	2.95	2.51	2.350	2.34	2.05	2.482	2.48	2.17
72 h	4.265	4.26	3.63	3.235	3.23	2.82	2.890	2.89	2.53
96 h	5.190	5.19	4.42	4.210	4.20	3.68	3.145	3.14	2.75

Nota: Elaboración propia.

Tabla 37

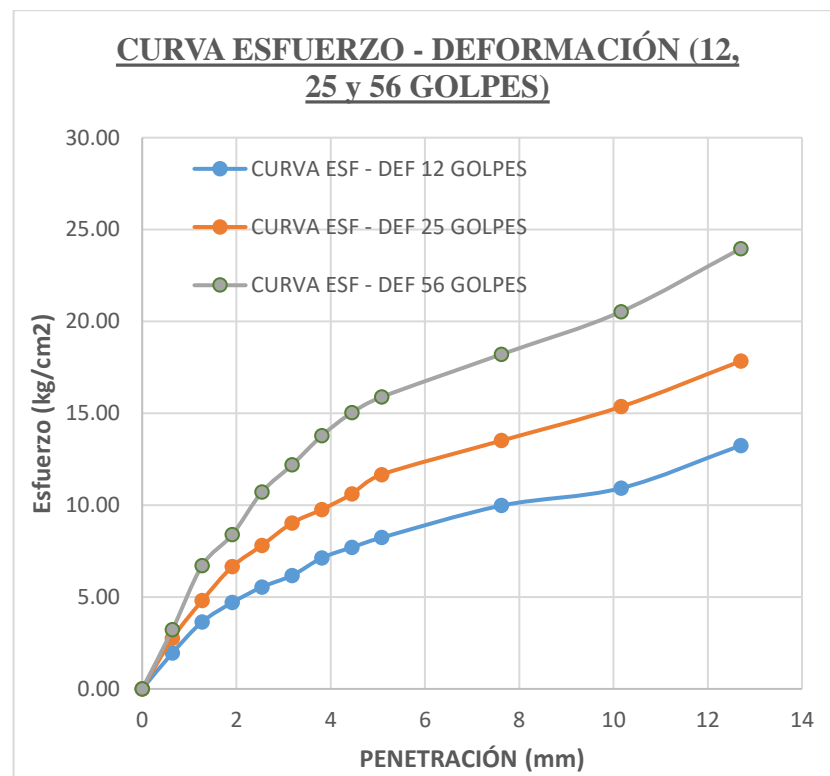
Índices CBR, muestra C-1, 7% V.S.

Penetración mm	12 GOLPES				25 GOLPES				56 GOLPES			
	Dial	Kg	kg/cm2	%CBR	Dial	Kg	kg/cm2	%CBR	Dial	Kg	kg/cm2	%CBR
0	0.00	0.00	0.00		0.00	0.00	0.00		0.00	0.00	0.00	
0.64	0.37	37.73	1.95		0.52	53.02	2.74		0.61	62.20	3.22	
1.27	0.69	70.36	3.64		0.91	92.79	4.80		1.27	129.50	6.70	
1.91	0.89	90.75	4.70		1.26	128.48	6.65		1.59	162.13	8.39	
2.54	1.05	107.07	5.54	7.89	1.48	150.92	7.81	11.13	2.03	207.00	10.71	15.26
3.18	1.17	119.30	6.17		1.71	174.47	9.03		2.31	235.55	12.19	
3.81	1.35	137.66	7.12		1.85	188.64	9.76		2.61	266.14	13.77	
4.45	1.46	148.88	7.70		2.01	204.96	10.61		2.85	290.61	15.04	
5.08	1.56	159.07	8.23	7.81	2.21	225.35	11.66	11.07	3.01	306.93	15.88	15.07
7.62	1.89	192.72	9.97		2.56	261.04	13.51		3.45	351.80	18.21	
10.16	2.07	211.08	10.92		2.91	296.73	15.36		3.89	396.66	20.53	
12.7	2.51	255.94	13.25		3.38	344.66	17.84		4.54	462.94	23.96	

Nota: Elaboración propia.

Figura 39

Curva Esfuerzo – Deformación, 7% V.S.



Nota: Elaboración propia.

De los datos precedentes, se computaron los siguientes resultados para una incorporación del 7% de vidrio soluble.

CBR al 100% de la MDS: 15.26%.

CBR al 95% de la MDS: 12.32%.

MUESTRA C-2

Tabla 38

Expansión muestra C-2, 1% V.S.

Tiempo	12 GOLPES			25 GOLPES			56 GOLPES		
	Dial	Expansión		Dial	Expansión		Dial	0.00	
		mm	%		mm	%		Mm	%
0	0.000	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000	0.00	0.00
24 h	4.545	4.55	3.98	3.80	3.80	3.36	3.310	3.31	2.91
48 h	5.575	5.58	4.88	5.37	5.37	4.74	4.270	4.27	3.75
72 h	7.710	7.71	6.75	7.04	7.04	6.22	6.105	6.11	5.37
96 h	8.365	8.37	7.32	8.18	8.18	7.22	7.545	7.55	6.63

Nota: Elaboración propia.

Tabla 39

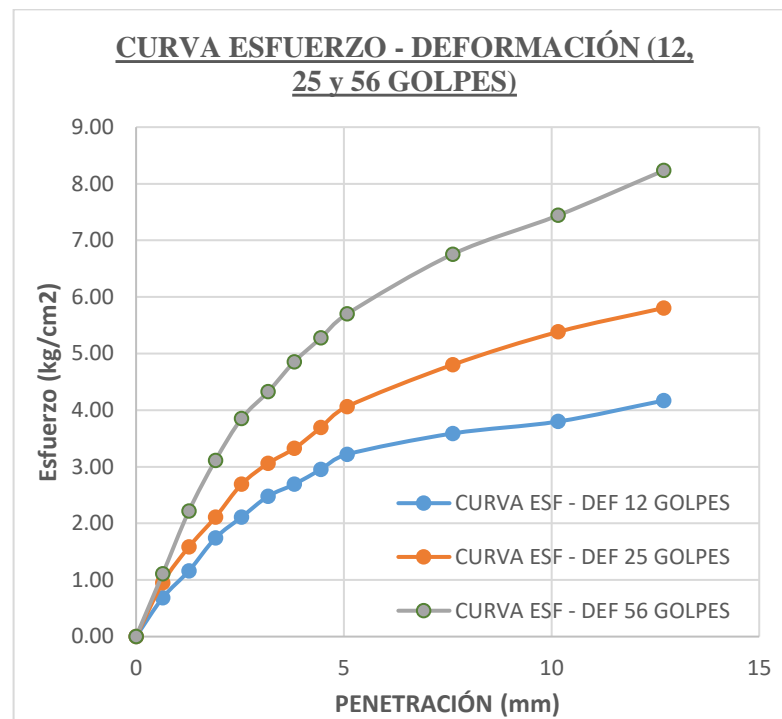
Índices CBR, muestra C-2, 1% V.S.

Penetración mm	12 GOLPES				25 GOLPES				56 GOLPES			
	Dial	Kg	kg/cm2	%CBR	Dial	Kg	kg/cm2	%CBR	Dial	Kg	kg/cm2	%CBR
0	0.00	0.00	0.00		0.00	0.00	0.00		0.00	0.00	0.00	
0.64	0.13	13.26	0.69		0.18	18.35	0.95		0.21	21.41	1.11	
1.27	0.22	22.43	1.16		0.30	30.59	1.58		0.42	42.83	2.22	
1.91	0.33	33.65	1.74		0.40	40.79	2.11		0.59	60.16	3.11	
2.54	0.40	40.79	2.11	3.01	0.51	52.00	2.69	3.83	0.73	74.44	3.85	5.49
3.18	0.47	47.93	2.48		0.58	59.14	3.06		0.82	83.62	4.33	
3.81	0.51	52.00	2.69		0.63	64.24	3.32		0.92	93.81	4.86	
4.45	0.56	57.10	2.96		0.70	71.38	3.69		1.00	101.97	5.28	
5.08	0.61	62.20	3.22	3.05	0.77	78.52	4.06	3.86	1.08	110.13	5.70	5.41
7.62	0.68	69.34	3.59		0.91	92.79	4.80		1.28	130.52	6.76	
10.16	0.72	73.42	3.80		1.02	104.01	5.38		1.41	143.78	7.44	
12.7	0.79	80.56	4.17		1.10	112.17	5.81		1.56	159.07	8.23	

Nota: Elaboración propia.

Figura 40

Curva Esfuerzo – Deformación, muestra C-2 1% V.S.



Nota: Elaboración propia.

De los datos precedentes, se computaron los siguientes resultados para una incorporación del 1% de vidrio soluble.

CBR al 100% de la MDS: 5.49%.

CBR al 95% de la MDS: 4.56%.

Tabla 40

Expansión muestra C-2, 3% V.S.

Tiempo	12 GOLPES			25 GOLPES			56 GOLPES		
	Dial	Expansión		Dial	Expansión		Dial	0.00	
		mm	%		Mm	%		Mm	%
0	0.000	0.00	0.00	0.000	0.00	0.00	0.000	0.00	0.00
24 h	2.809	2.81	2.42	2.709	2.71	2.33	2.599	2.60	2.23
48 h	4.127	4.13	3.55	4.020	4.02	3.46	3.668	3.67	3.15
72 h	5.302	5.30	4.56	5.075	5.08	4.37	4.105	4.11	3.52
96 h	6.450	6.45	5.55	5.735	5.74	4.94	4.709	4.71	4.04

Nota: Elaboración propia.

Tabla 41

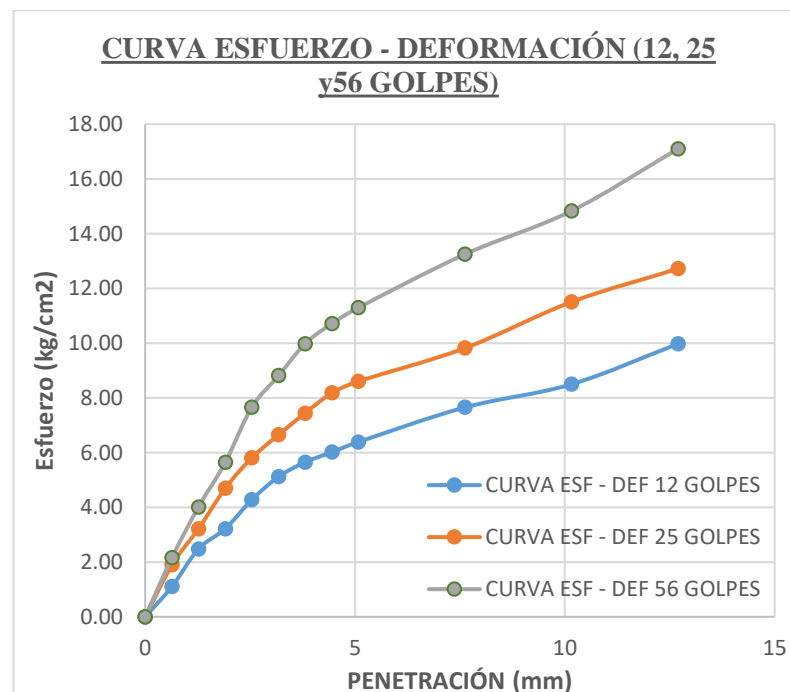
Índices CBR, muestra C-2, 3% V.S.

Penetración mm	12 GOLPES				25 GOLPES				56 GOLPES			
	Dial	Kg	kg/cm2	%CBR	Dial	Kg	kg/cm2	%CBR	Dial	Kg	kg/cm2	%CBR
0	0.00	0.00	0.00		0.00	0.00	0.00		0.00	0.00	0.00	
0.64	0.21	21.41	1.11		0.36	36.71	1.90		0.41	41.81	2.16	
1.27	0.47	47.93	2.48		0.61	62.20	3.22		0.76	77.50	4.01	
1.91	0.61	62.20	3.22		0.89	90.75	4.70		1.07	109.11	5.65	
2.54	0.81	82.60	4.27	6.09	1.10	112.17	5.81	8.27	1.45	147.86	7.65	10.90
3.18	0.97	98.91	5.12		1.26	128.48	6.65		1.67	170.29	8.81	
3.81	1.07	109.11	5.65		1.41	143.78	7.44		1.89	192.72	9.97	
4.45	1.14	116.25	6.02		1.55	158.05	8.18		2.03	207.00	10.71	
5.08	1.21	123.38	6.39	6.06	1.63	166.21	8.60	8.16	2.14	218.22	11.29	10.72
7.62	1.45	147.86	7.65		1.86	189.66	9.82		2.51	255.94	13.25	
10.16	1.61	164.17	8.50		2.18	222.29	11.50		2.81	286.54	14.83	
12.7	1.89	192.72	9.97		2.41	245.75	12.72		3.24	330.38	17.10	

Nota: Elaboración propia.

Figura 41

Curva Esfuerzo – Deformación, muestra C-2, 3% V.S.



Nota: Elaboración propia.

De los datos precedentes, se computaron los siguientes resultados para una incorporación del 3% de vidrio soluble.

CBR al 100% de la MDS: 10.90%.

CBR al 95% de la MDS: 8.83%.

Tabla 42

Expansión muestra C-2, 5% V.S.

Tiempo	12 GOLPES			25 GOLPES			56 GOLPES		
	Dial	Expansión		Dial	Expansión		Dial	0.00	
		mm	%		Mm	%		Mm	%
0	0.000	0.00	0.00	0.000	0.00	0.00	0.000	0.00	0.00
24 h	1.891	1.89	1.62	1.785	1.79	1.53	1.698	1.70	1.56
48 h	2.410	2.41	2.07	2.366	2.37	2.03	1.870	1.87	1.72
72 h	2.874	2.87	2.46	2.705	2.71	2.33	2.052	2.05	1.89
96 h	4.512	4.51	3.87	4.057	4.06	3.49	2.305	2.31	2.12

Nota: Elaboración propia.

Tabla 43

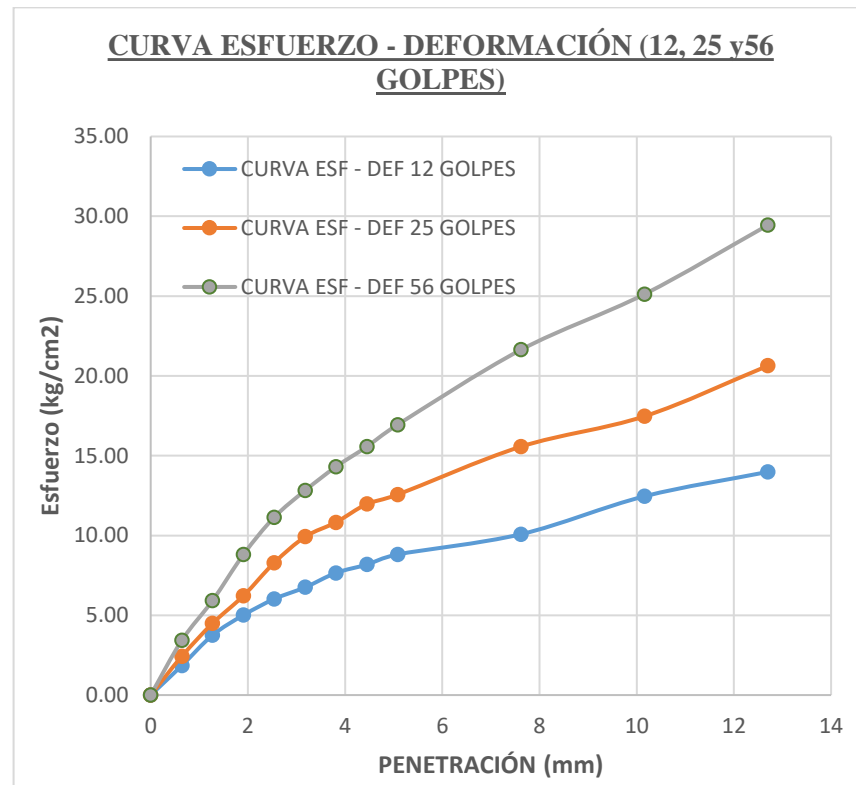
Índices CBR, muestra C-2, 5% V.S.

Penetración mm	12 GOLPES				25 GOLPES				56 GOLPES			
	Dial	Kg	kg/cm2	%CBR	Dial	Kg	kg/cm2	%CBR	Dial	Kg	kg/cm2	%CBR
0	0.00	0.00	0.00		0.00	0.00	0.00		0.00	0.00	0.00	
0.64	0.35	35.69	1.85		0.46	46.91	2.43		0.65	66.28	3.43	
1.27	0.71	72.40	3.75		0.85	86.67	4.49		1.12	114.21	5.91	
1.91	0.95	96.87	5.01		1.18	120.32	6.23		1.67	170.29	8.81	
2.54	1.14	116.25	6.02	8.57	1.57	160.09	8.29	11.80	2.11	215.16	11.14	15.86
3.18	1.28	130.52	6.76		1.88	191.70	9.92		2.43	247.79	12.82	
3.81	1.45	147.86	7.65		2.05	209.04	10.82		2.71	276.34	14.30	
4.45	1.55	158.05	8.18		2.27	231.47	11.98		2.95	300.81	15.57	
5.08	1.67	170.29	8.81	8.36	2.38	242.69	12.56	11.92	3.21	327.32	16.94	16.07
7.62	1.91	194.76	10.08		2.95	300.81	15.57		4.10	418.08	21.64	
10.16	2.36	240.65	12.45		3.31	337.52	17.47		4.76	485.38	25.12	
12.7	2.65	270.22	13.99		3.91	398.70	20.63		5.58	568.99	29.45	

Nota: Elaboración propia.

Figura 42

Curva Esfuerzo – Deformación, muestra C-2, 5% V.S.



Nota: Elaboración propia.

De los datos precedentes, se computaron los siguientes resultados para una incorporación del 5% de vidrio soluble.

CBR al 100% de la MDS: 16.07%.

CBR al 95% de la MDS: 13.12%.

Tabla 44

Expansión muestra C-2, 7% V.S.

Tiempo	12 GOLPES			25 GOLPES			56 GOLPES		
	Dial	Expansión		Dial	Expansión		Dial	0.00	
		mm	%		mm	%		Mm	%
0	0.000	0.00	0.00	0.000	0.00	0.00	0.000	0.00	0.00
24 h	1.875	1.88	1.60	1.565	1.57	1.37	1.145	1.15	1.01
48 h	2.695	2.70	2.30	2.310	2.31	2.02	1.360	1.36	1.20
72 h	4.025	4.03	3.43	3.215	3.22	2.81	1.680	1.68	1.48
96 h	5.030	5.03	4.29	4.212	4.21	3.69	2.675	2.68	2.35

Nota: Elaboración propia.

Tabla 45

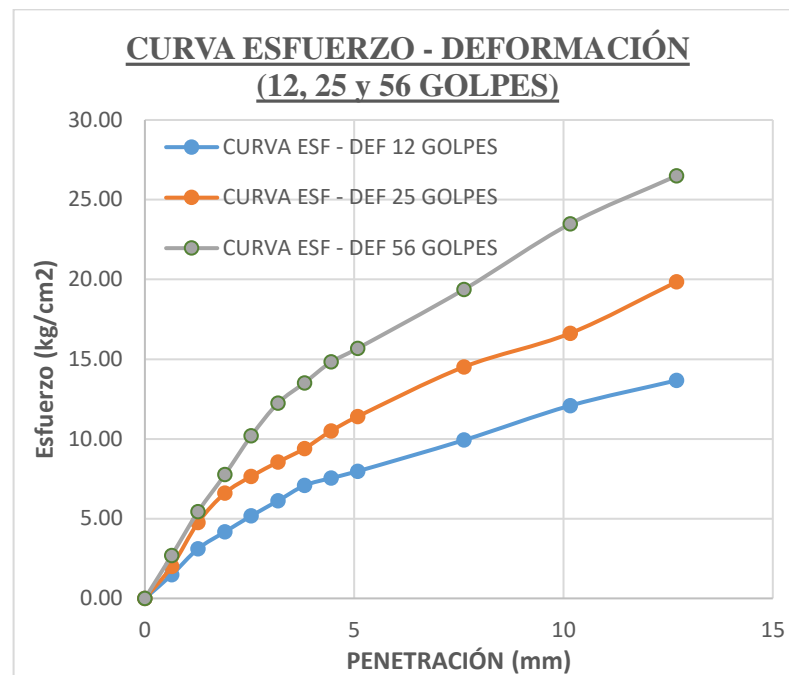
Índices CBR, muestra C-2, 7% V.S.

Penetración mm	12 GOLPES				25 GOLPES				56 GOLPES			
	Dial	Kg	kg/cm2	%CBR	Dial	Kg	kg/cm2	%CBR	Dial	Kg	kg/cm2	%CBR
0	0.00	0.00	0.00		0.00	0.00	0.00		0.00	0.00	0.00	
0.64	0.28	28.55	1.48		0.38	38.75	2.01		0.51	52.00	2.69	
1.27	0.59	60.16	3.11		0.90	91.77	4.75		1.03	105.03	5.44	
1.91	0.79	80.56	4.17		1.25	127.46	6.60		1.47	149.90	7.76	
2.54	0.98	99.93	5.17	7.37	1.45	147.86	7.65	10.90	1.93	196.80	10.19	14.51
3.18	1.16	118.29	6.12		1.62	165.19	8.55		2.32	236.57	12.24	
3.81	1.34	136.64	7.07		1.78	181.51	9.39		2.56	261.04	13.51	
4.45	1.43	145.82	7.55		1.99	202.92	10.50		2.81	286.54	14.83	
5.08	1.51	153.97	7.97	7.56	2.16	220.26	11.40	10.82	2.97	302.85	15.67	14.87
7.62	1.88	191.70	9.92		2.75	280.42	14.51		3.67	374.23	19.37	
10.16	2.29	233.51	12.09		3.15	321.21	16.62		4.45	453.77	23.48	
12.7	2.59	264.10	13.67		3.76	383.41	19.84		5.02	511.89	26.49	

Nota: Elaboración propia.

Figura 43

Curva Esfuerzo – Deformación, muestra C-2, 7% V.S.



Nota: Elaboración propia.

De los datos precedentes, se computaron los siguientes resultados para una incorporación del 7% de vidrio soluble.

CBR al 100% de la MDS: 14.87%.

CBR al 95% de la MDS: 11.82%.

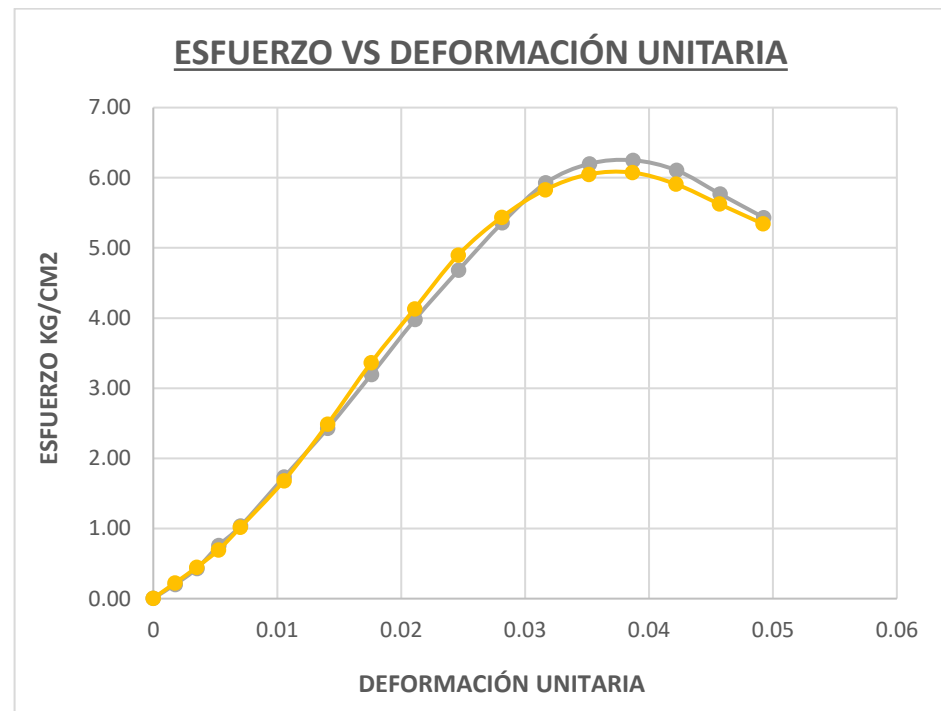
3.3.2.4. Compresión simple

Para el ensayo de compresión simple se hizo la respectiva preparación de la muestra, con saturación de 24 horas, cabe recalcar que se hizo el cálculo en peso de la cantidad de vidrio soluble, para posteriormente crear la solución entre el químico y el agua. La fabricación de las probetas de suelo con vidrio soluble ha sido indicada asemejando al ensayo Proctor modificado.

MUESTRA C-1

Figura 44

Curva Esfuerzo-Deformación unitaria, muestra C-1, 1%V.S.



Nota: Elaboración propia

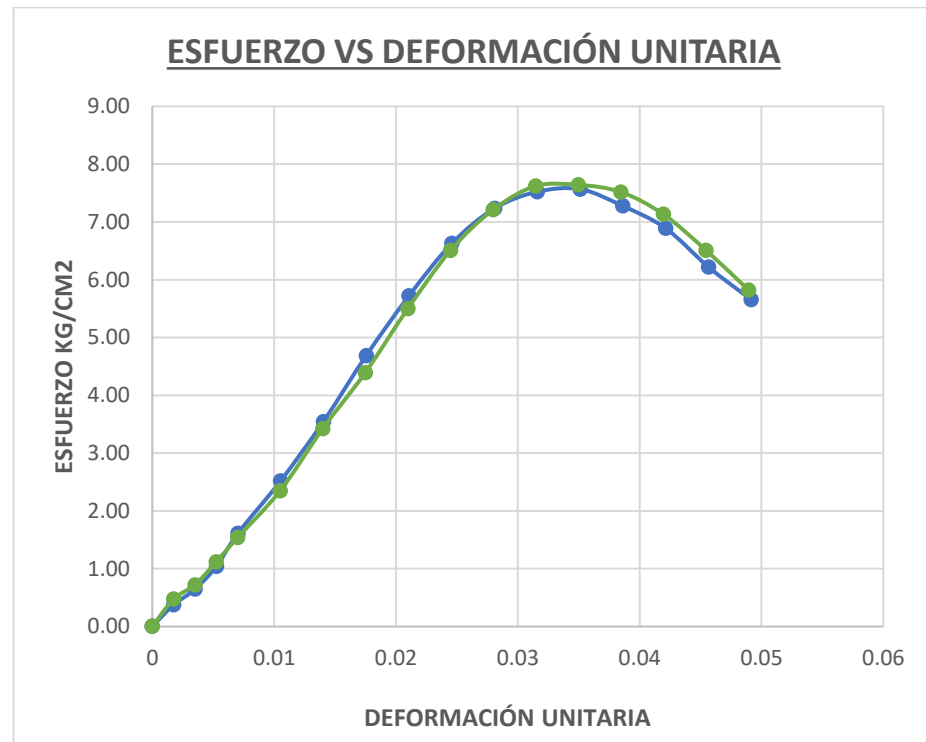
De la figura previa se computaron los cálculos promedio para un contenido de 1% de vidrio soluble, indicando:

Capacidad última : 6.16 kg/cm².

Cohesión : 3.08 kg/cm².

Figura 45

Curva Esfuerzo-Deformación unitaria, muestra C-1, 3%V.S.



Nota: Elaboración propia

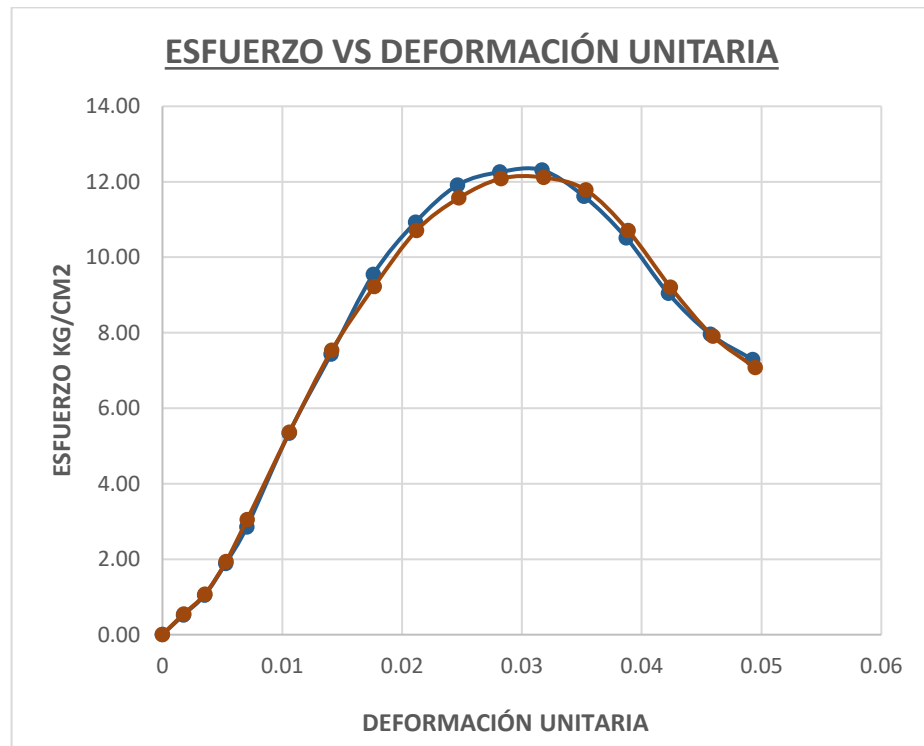
De la figura previa se computaron los cálculos promedio para un contenido de 3% de vidrio soluble, indicando:

Capacidad ultima : 7.60 kg/cm².

Cohesión : 3.80 kg/cm².

Figura 46

Curva Esfuerzo-Deformación unitaria, muestra C-1, 5%V.S.



Nota: Elaboración propia

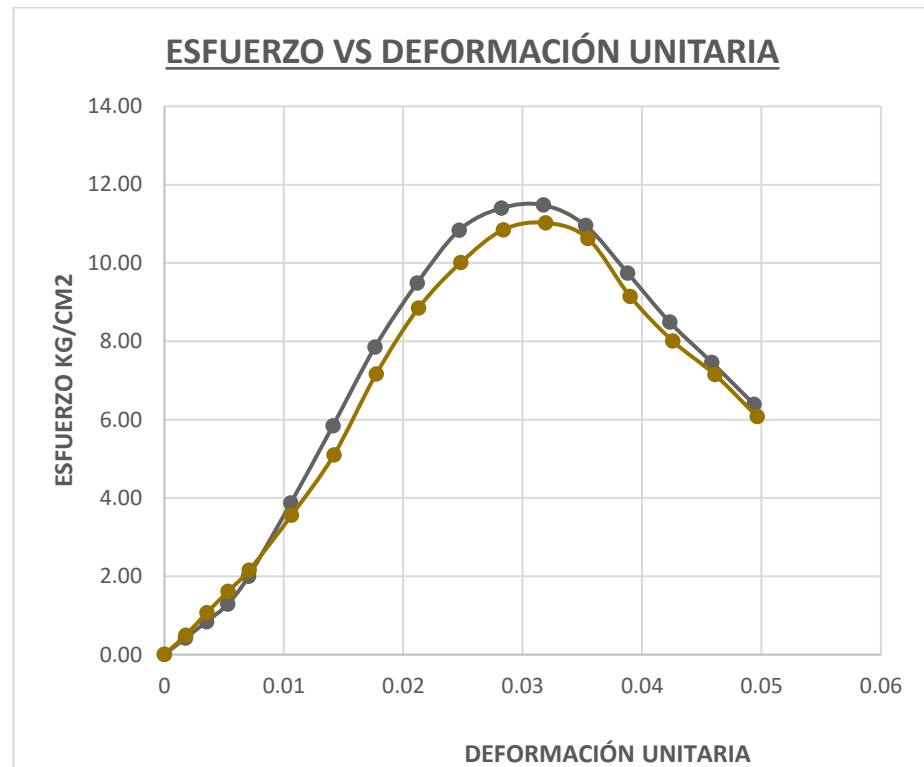
De la figura previa se computaron los cálculos promedio para un contenido de 5% de vidrio soluble, indicando:

Capacidad última : 12.21 kg/cm².

Cohesión : 6.11 kg/cm².

Figura 47

Curva Esfuerzo-Deformación unitaria, muestra C-1, 7%V.S.



Nota: Elaboración propia

De la figura previa se computaron los cálculos promedio para un contenido de 7% de vidrio soluble, indicando:

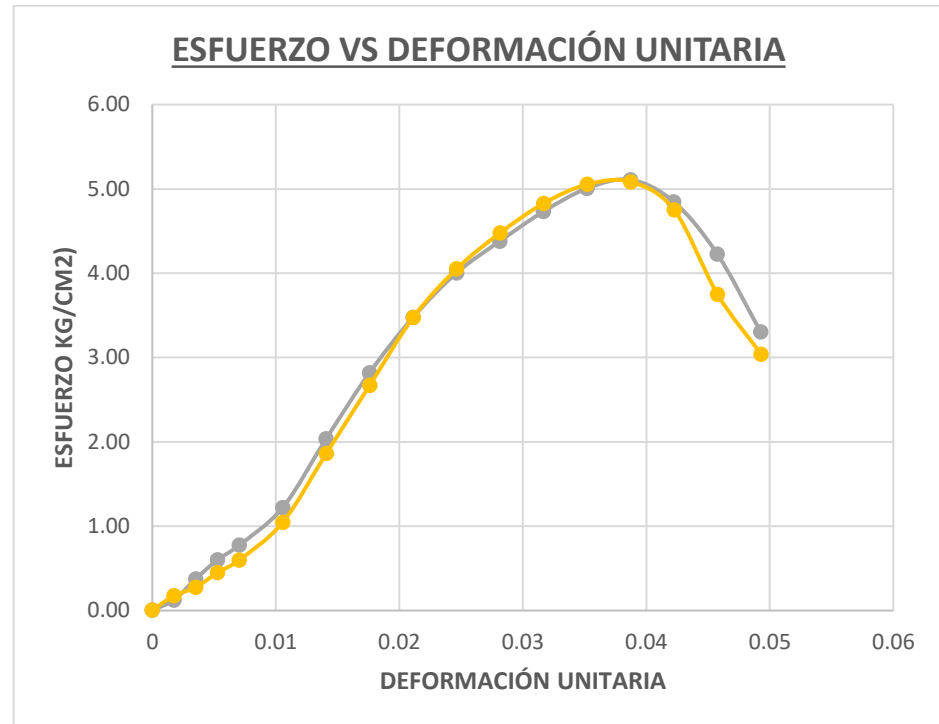
Capacidad última : 11.25 kg/cm².

Cohesión : 5.63 kg/cm².

MUESTRA C-2

Figura 48

Curva Esfuerzo-Deformación unitaria, muestra C-2, 1%V.S.



Nota: Elaboración propia

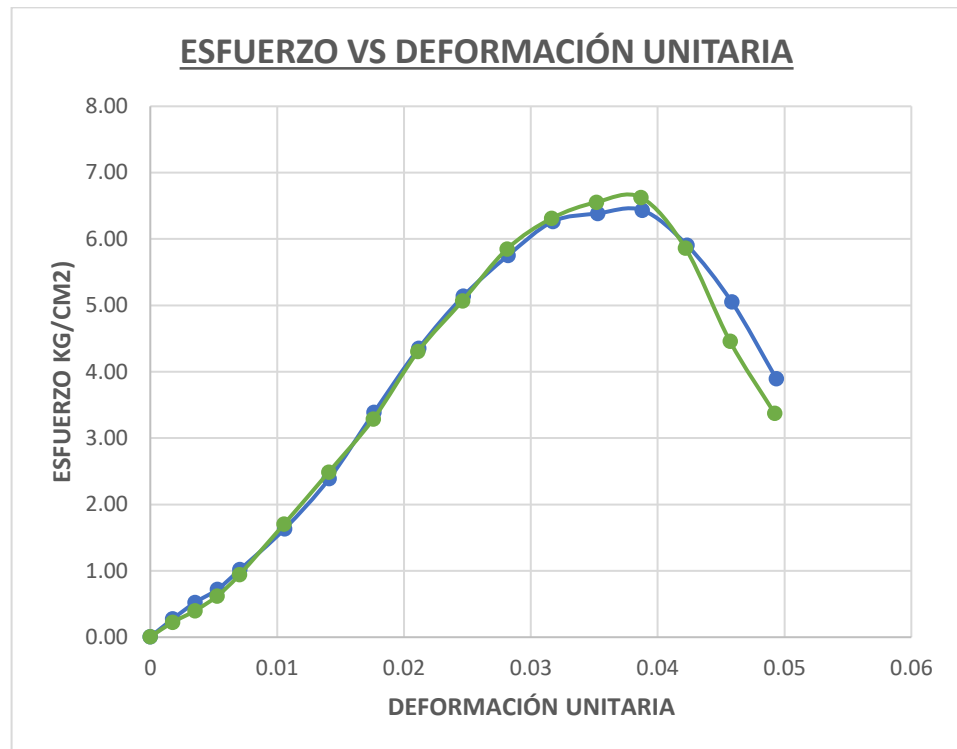
De la figura previa se computaron los cálculos promedio para un contenido de 1% de vidrio soluble, indicando:

Capacidad última : 5.10 kg/cm².

Cohesión : 2.55 kg/cm².

Figura 49

Curva Esfuerzo-Deformación unitaria, muestra C-2, 3%V.S.



Nota: Elaboración propia

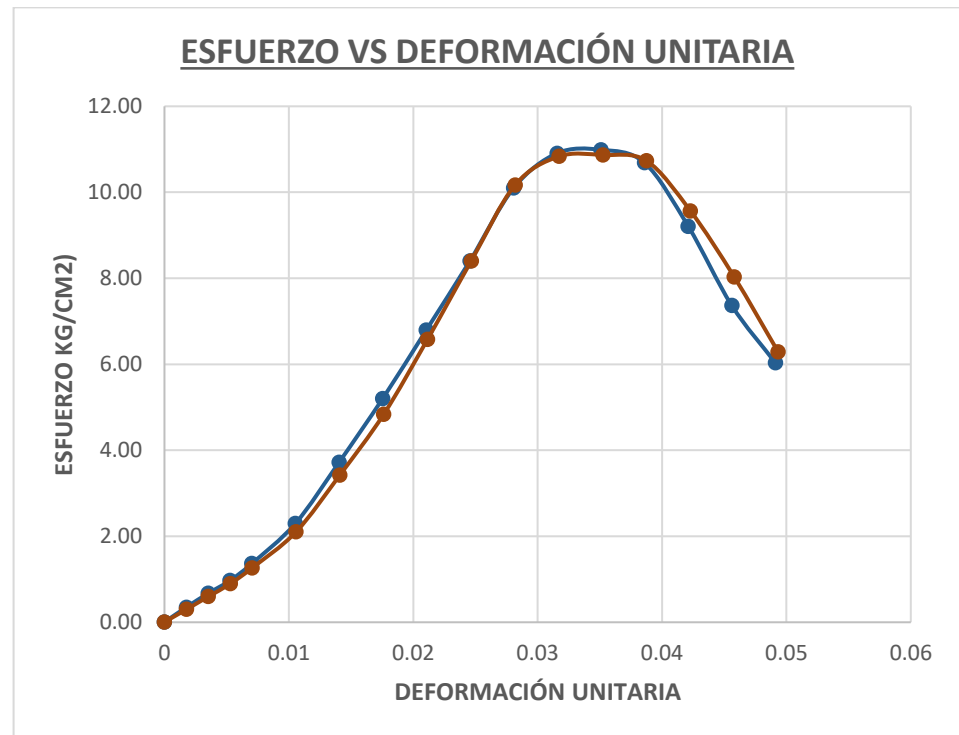
De la figura previa se computaron los cálculos promedio para un contenido de 3% de vidrio soluble, indicando:

Capacidad última : 6.53 kg/cm².

Cohesión : 3.27 kg/cm².

Figura 50

Curva Esfuerzo-Deformación unitaria, muestra C-2, 5%V.S.



Nota: Elaboración propia

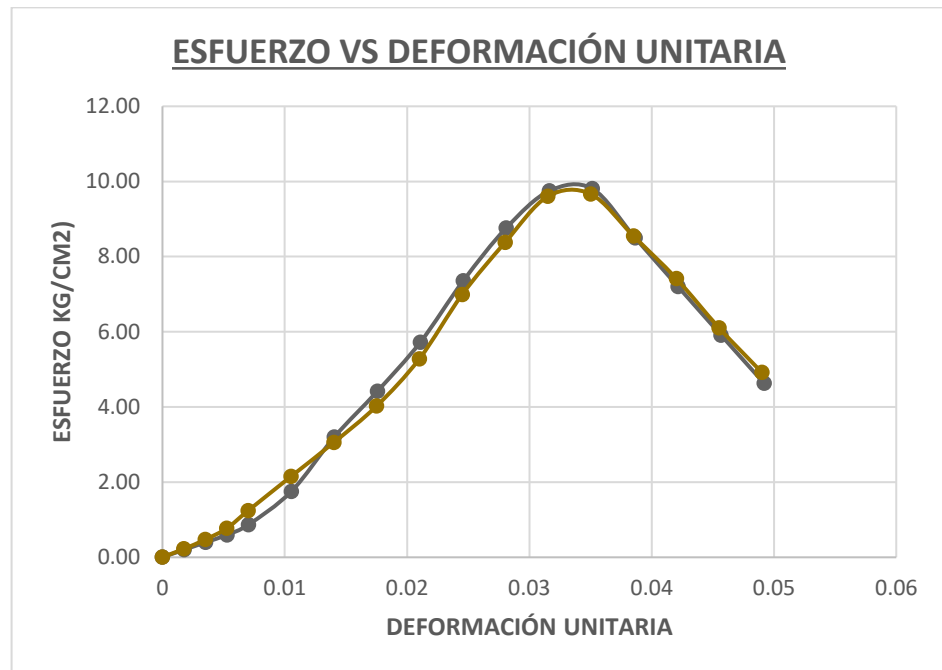
De la figura previa se computaron los cálculos promedio para un contenido de 5% de vidrio soluble, indicando:

Capacidad última : 10.93 kg/cm².

Cohesión : 5.46 kg/cm².

Figura 51

Curva Esfuerzo-Deformación unitaria, muestra C-2, 7%V.S.



Nota: Elaboración propia

De la figura previa se computaron los cálculos promedio para un contenido de 7% de vidrio soluble, indicando:

Capacidad última : 9.74 kg/cm².

Cohesión : 4.87 kg/cm².



CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. RESULTADOS LÍMITES DE ATTERBERG

En resumen, los límites de consistencia que influyen en las propiedades índices del suelo y en las incorporaciones de vidrio soluble para dosificaciones de 0%, 1%, 3%, 5%, 7% se indican en la siguiente tabla.

4.1.1. Muestra C-1

Los resultados obtenidos ejecutando los ensayos para la muestra C-1 son:

Tabla 46

Resultados Límites de Atterberg, Muestra C-1

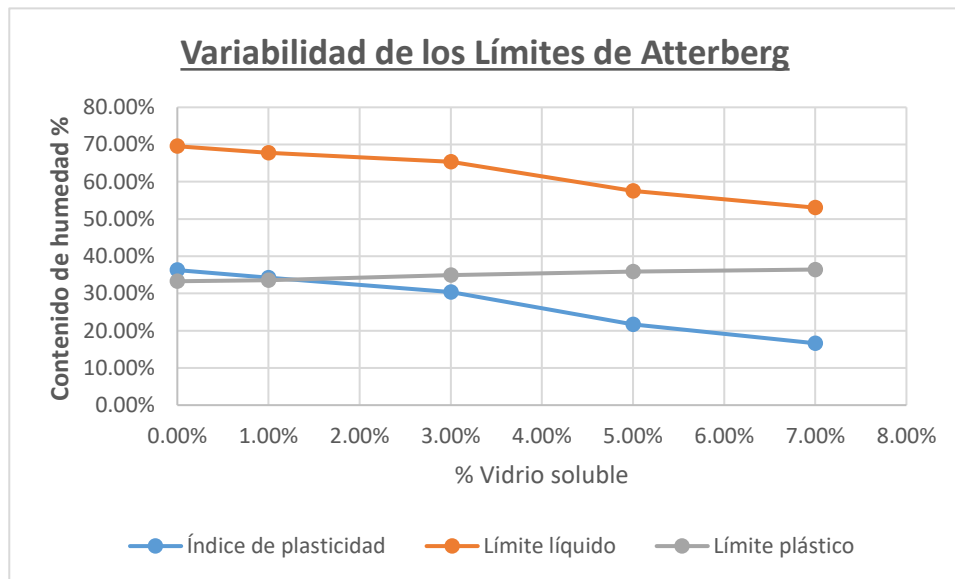
V.S. (%)	IP	LL	LP
0%	36.27%	69.54%	33.28%
1%	34.23%	67.81%	33.58%
3%	30.40%	65.34%	34.93%
5%	21.64%	57.53%	35.89%
7%	16.62%	53.05%	36.43%

Nota: Elaboración propia.

Para visualizar mejor la variación según la incorporación de los límites de Atterberg se indica la siguiente figura.

Figura 52

Resultados Límites de Atterberg, muestra C-1



Nota: Elaboración propia

4.1.2. Muestra C-2.

Los resultados obtenidos ejecutando los ensayos para la muestra C-2 son los siguientes.

Tabla 47

Resultados Límites de Atterberg, muestra C-2

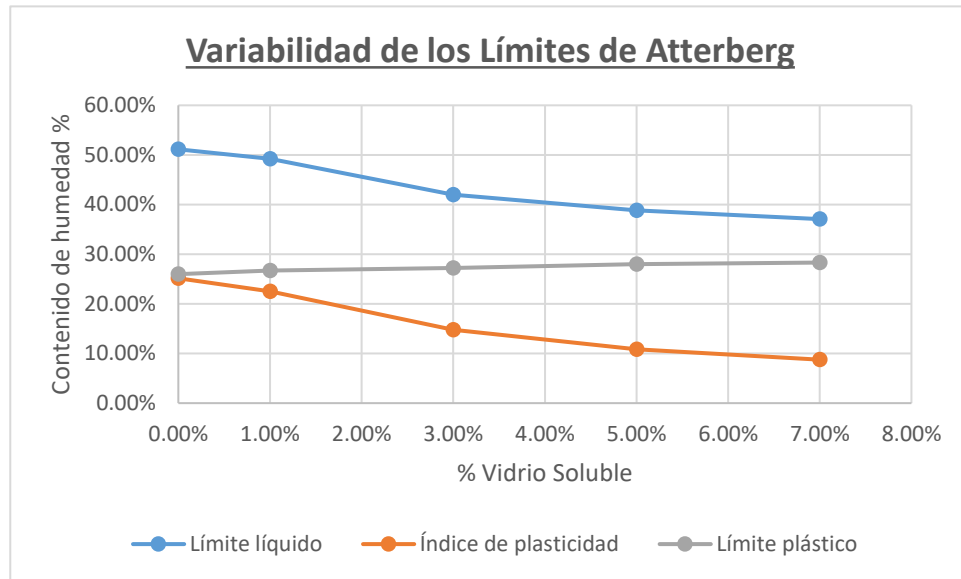
V.S.	LL	IP	LP
0	51.14%	25.15%	25.98%
1%	49.23%	22.51%	26.72%
3%	41.97%	14.76%	27.21%
5%	38.84%	10.83%	28.01%
7%	37.07%	8.76%	28.32%

Nota: Elaboración propia.

Indicando la incorporación para la gráfica de los resultados, determinando la variación, se puede visualizar en la siguiente figura.

Figura 53

Resultados Límites de Atterberg, muestra C-2



Nota: Elaboración propia

Según el MTC (2014), en el manual de carreteras del 2014, indica que según la sensibilidad del suelo con el agua se presenta un IP elevado, determinado a continuación por la siguiente tabla.

Tabla 48

Clasificación de suelos según su plasticidad.

Índice de plasticidad	Plasticidad	Características
$IP > 20$	Alta	Suelos muy arcillosos
$IP \leq 20$	Media	Suelos arcillosos
$IP > 7$		
$IP < 7$	Baja	Suelos poco arcillosos
$IP = 0$	No plástico (NP)	Suelos exentos de arcilla

Nota: Extraído de “Manual de Carreteras, Suelos, Geotécnia y pavimentos”, (Ministerio de Transportes y comunicaciones, 2014, p.34).



Según la tabla precedente para la muestra C-1, se indica una reducción del índice de plasticidad de 37.27% para el suelo natural, indicando una reducción del índice de plasticidad, con valores de 34.23% para una incorporación del 1%, 30.40% para una incorporación del 3%, 21.64% para una incorporación del 5% y 16.62% para una incorporación del 7% de vidrio soluble, para lo cual se ubica un intervalo de mejora en su índice de plasticidad para valores mayores del 3% de incorporación, indicando una plasticidad media, esto define la reducción del comportamiento arcilloso. Según el (Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2014) se indica que para valores menores al 12% del índice de plasticidad en vías afirmadas es aceptable el material. En cuanto a su límite líquido se evidencia valores de 69.54%, 67.81%, 65.34%, 57.53%, 53.05%, respectivamente, indicando valores mayores al 35%, por lo que es conveniente evaluar el uso o adicionar en conjunto con otro aditivo para la muestra 1.

De la misma forma, para la muestra C-2, se indica una reducción del índice de plasticidad de 25.15% en la muestra natural, y una reducción de este con valores de 22.51% para una incorporación de 1%, 14.76% para una incorporación de 3%, 10.83% para una incorporación de 5%, y 8.76% indicando una adición del 7% de vidrio soluble. Por lo que la cantidad de incorporación de vidrio soluble según su plasticidad es variable para valores mayores al 3% de incorporación, siendo un valor menor al 12% es correcto indicar que el empleo del químico vidrio soluble es factible, en cumplimiento de las normativas catalogadas como aceptables para uso de subrasante y afirmados. Además de evaluar los límites líquidos de valores de 51.14%, 49.23%, 41.97%, 38.84%, 37.07%, indicando valores mayores al 35% lo que comprende valores a evaluar en la subrasante.

4.2. RESULTADOS DE LA COMPACTACIÓN

Respecto de la variación de la máxima densidad seca, se pueden inferir los resultados de los ensayos Proctor ejecutados en los porcentajes indicados; dicho esto, los resultados a obtener son el Contenido de Humedad Óptimo (CHO), y la máxima densidad seca (MDS).

4.2.1. Muestra C-1

Tabla 49

Resultados Compactación, muestra C-1

% V.S.	DENSIDAD SECA MÁXIMA	% C. HUMEDAD ÓPTIMO
0%	1.819	14.792
1%	1.833	14.662
3%	1.840	14.041
5%	1.871	13.701
7%	1.884	13.757

Nota: Elaboración propia.

4.2.2. Muestra C-2

Tabla 50

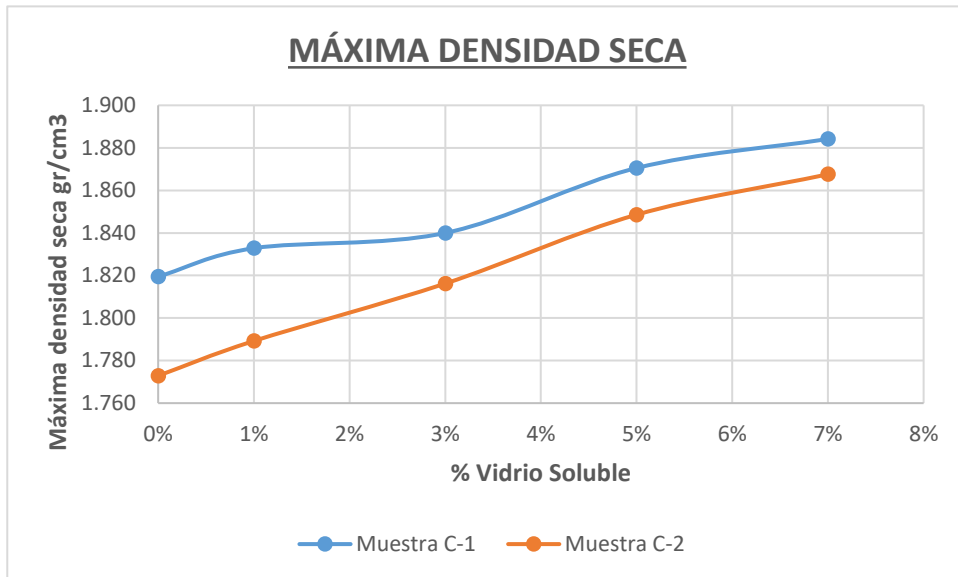
Resultados Compactación, muestra C-2

% V.S.	DENSIDAD SECA MÁXIMA	% C. HUMEDAD ÓPTIMO
0%	1.773	16.177
1%	1.789	16.038
3%	1.816	15.625
5%	1.849	15.211
7%	1.868	15.231

Nota: Elaboración propia.

Figura 54

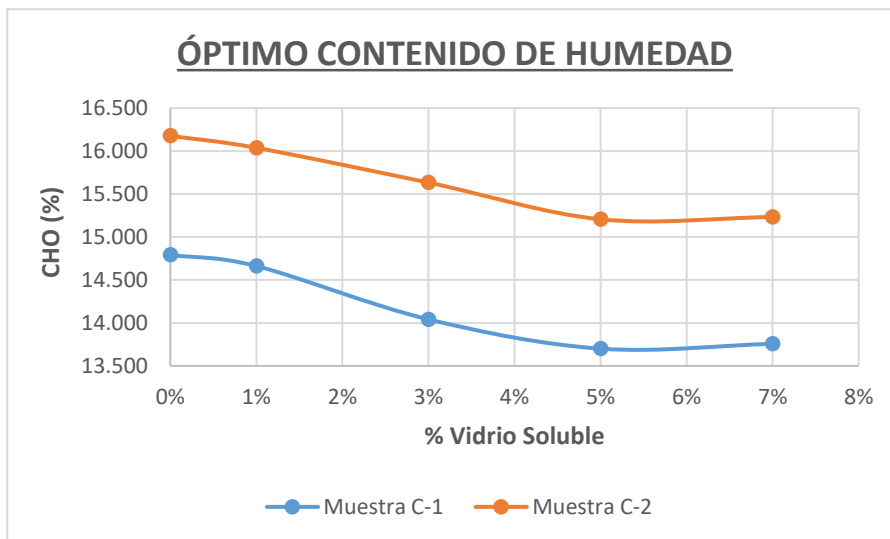
Resultados MDS, muestra C-1 y C-2.



Nota: Elaboración propia.

Figura 55

Resultados CHO, muestra C-1 y C-2.



Nota: Elaboración propia

Se puede observar que para ambas muestras de suelo se incrementa la máxima densidad seca y disminuye el óptimo contenido de humedad. Se indica además que la muestra C-2, tiende a reaccionar más densamente que la muestra



C-1. Esto puede indicar una diferente reacción química respecto de la densidad entre las partículas de suelo. Por otro lado, se indica una disminución del contenido de humedad óptimo; esto se infiere como una variación en su comportamiento mecánico, indicando que en un 7% de la incorporación del químico tiende a disminuir su efectividad.

4.3. RESULTADOS DEL VALOR CBR.

Para la comparación en mejora del valor CBR se indican los resultados del valor CBR, y su expansión, en conformidad con su comportamiento mecánico.

4.3.1. Muestra C-1

Tabla 51

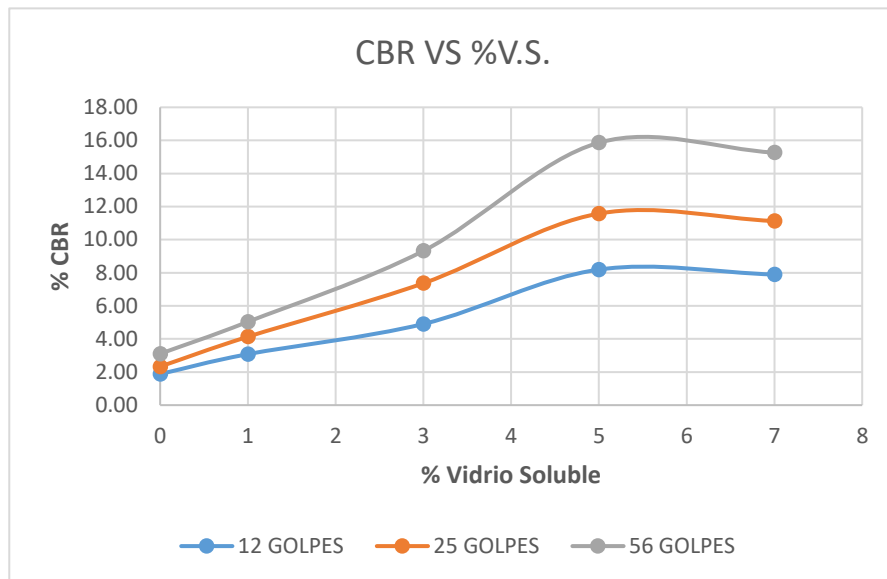
Resultados CBR, muestra C-1.

% V.S.	CBR		
	12 GOLPES	25 GOLPES	56 GOLPES
0	1.88	2.33	3.10
1	3.08	4.13	5.04
3	4.91	7.37	9.32
5	8.19	11.58	15.86
7	7.89	11.13	15.26

Nota: Elaboración propia.

Figura 56

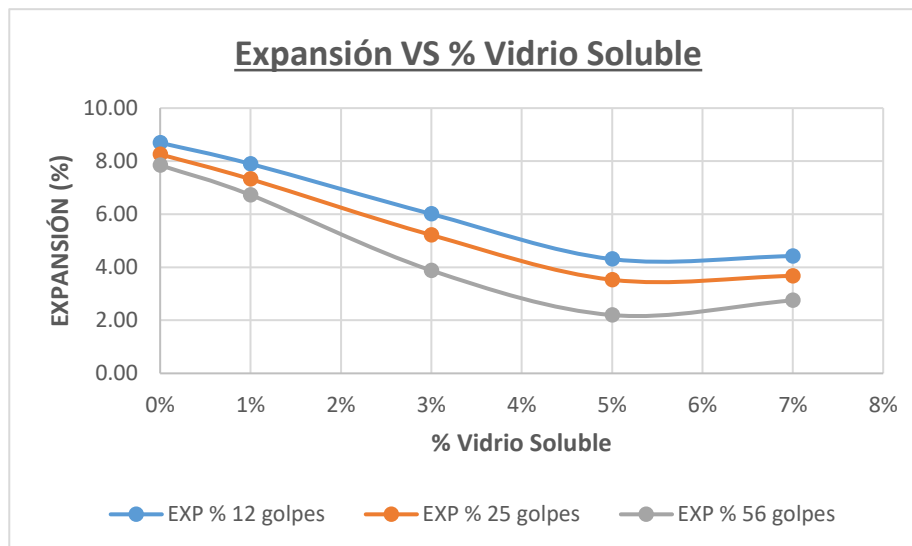
Resultados CBR, muestra C-1



Nota: Elaboración propia.

Figura 57

Resultados expansión, muestra C-1



Nota: Elaboración propia

Según los resultados reportados de la expansión de la muestra C-1, indica que aproximadamente al 5% o en rango del 3% al 7% indica una incorporación

óptima de Vidrio Soluble. Dichos valores coinciden gráficamente en los valores CBR reportados.

4.3.2. Muestra C-2

Tabla 52

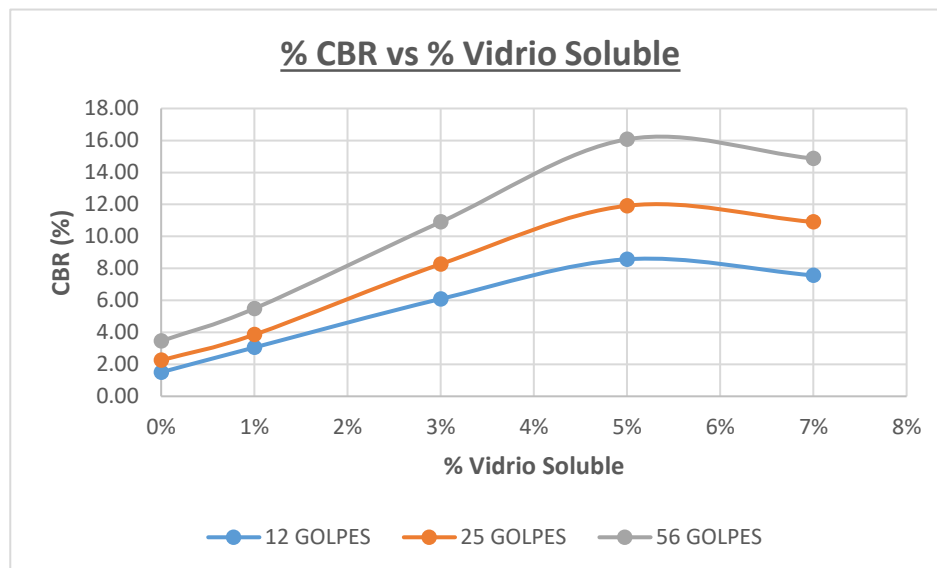
Resultados CBR, muestra C-2

% Vidrio Soluble	CBR		
	12 GOLPES	25 GOLPES	56 GOLPES
0%	1.50	2.25	3.45
1%	3.05	3.86	5.49
3%	6.09	8.27	10.90
5%	8.57	11.92	16.07
7%	7.56	10.90	14.87

Nota: Elaboración propia.

Figura 58

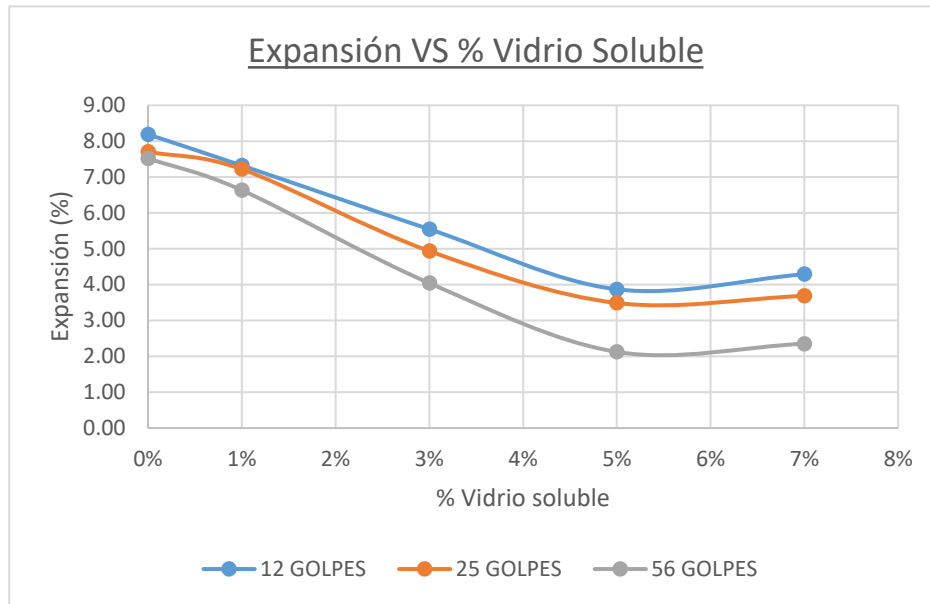
Resultados CBR, muestra C-2



Nota: Elaboración propia.

Figura 59

Resultados Expansión, muestra C-2.



Nota: Elaboración propia.

Del mismo modo que el anterior, se indica una mayor capacidad de soporte CBR y una menor expansión del suelo para las incorporaciones del 5% al 7%, indicando mejor comportamiento mecánico. Por otro lado, siguiendo las indicaciones del MTC (2014), se deben tener presente los valores admisibles de subrasante.

Tabla 53*Categorías de Sub rasante*

Categorías de sub rasante	CBR
S0: Sub rasante inadecuada	CBR < 3%
S1: Sub rasante insuficiente	De CBR \geq 3% al CBR < 6%
S2: Sub rasante regular	De CBR \geq 6% al CBR < 10%
S3: Sub rasante buena	De CBR \geq 10% al CBR < 20%
S4: Sub rasante Muy buena	De CBR \geq 20% al CBR < 30%
S5: Sub rasante Excelente	CBR \geq 30%

Nota: Extraído de “Manual de carreteras, suelos, geología, geotecnia y pavimentos” (Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2014, p.37)

En base a esto tenemos que, para la muestra C-1 y C-2 se debe indicar una incorporación de más del 3% de Vidrio Soluble en peso, dado que al 3% se indican valores CBR de más del 6%, e incorporaciones de menos del 7%, dado a que agregar más del 7% de Vidrio Soluble tiende una menor eficiencia en su comportamiento mecánico.

4.4. RESULTADOS DE LA RESISTENCIA ÚLTIMA (UCS)

Para indicar las comparativas de los resultados de compresión simple o compresión no confinada, es preciso señalar la capacidad última de carga, tanto del suelo natural como del suelo estabilizado, bajo estas indicaciones, se indican dos pruebas para cada porcentaje de incorporación de vidrio soluble.

4.4.1. Muestra C-1

Tabla 54

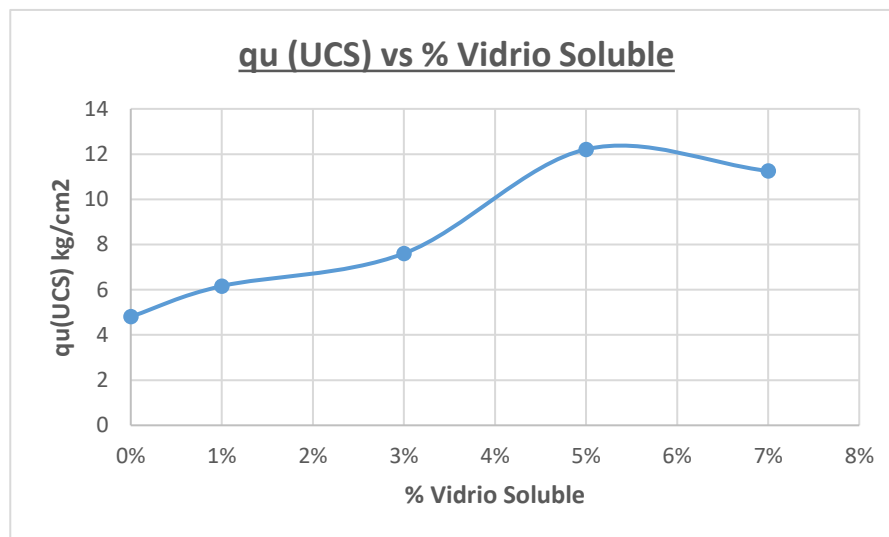
Resultados compresión simple, muestra C-1

% Vidrio Soluble	Prueba	qu (kg/cm ²)	Cohesión (kg/cm ²)	Promedio Qu	Promedio Cohesión
0%	1	4.72	2.36	4.81	2.41
	2	4.90	2.45		
1%	3	6.25	3.13	6.17	3.08
	4	6.08	3.04		
3%	5	7.57	3.79	7.61	3.80
	6	7.64	3.82		
5%	7	12.32	6.16	12.22	6.11
	8	12.12	6.06		
7%	9	11.49	5.74	11.26	5.63
	10	11.03	5.52		

Nota: Elaboración propia.

Figura 60

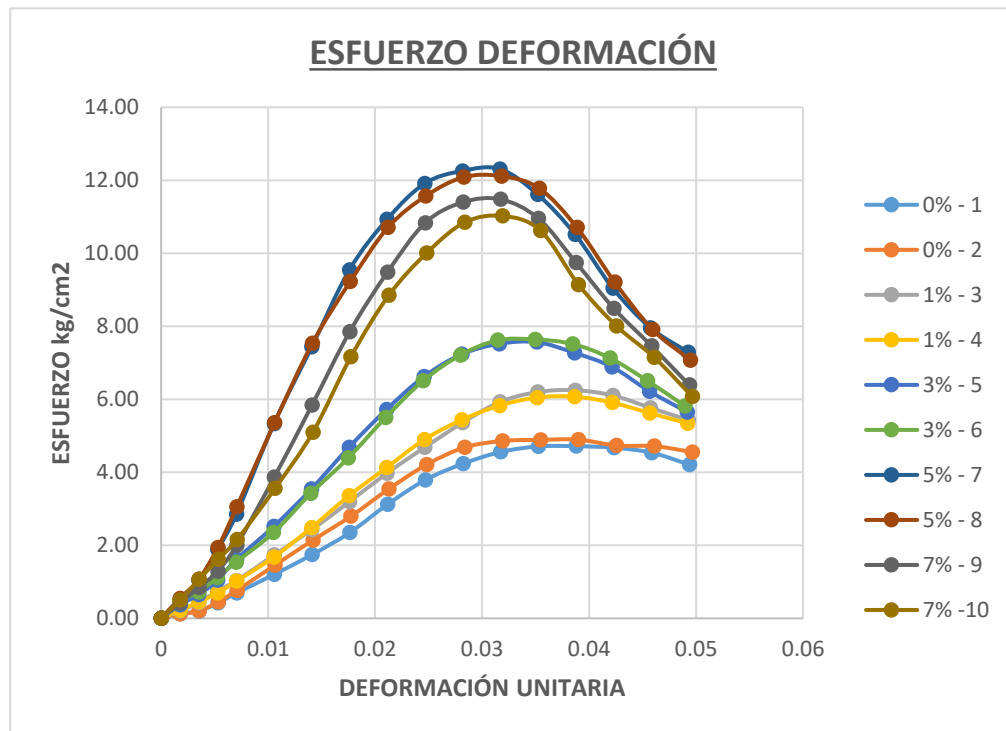
Resultados compresión simple, muestra C-1



Nota: Elaboración propia

Figura 61

Resultados q_u , muestra C-1, esfuerzo deformación.



Nota: Elaboración propia.

4.4.2. Muestra C-2

Tabla 55

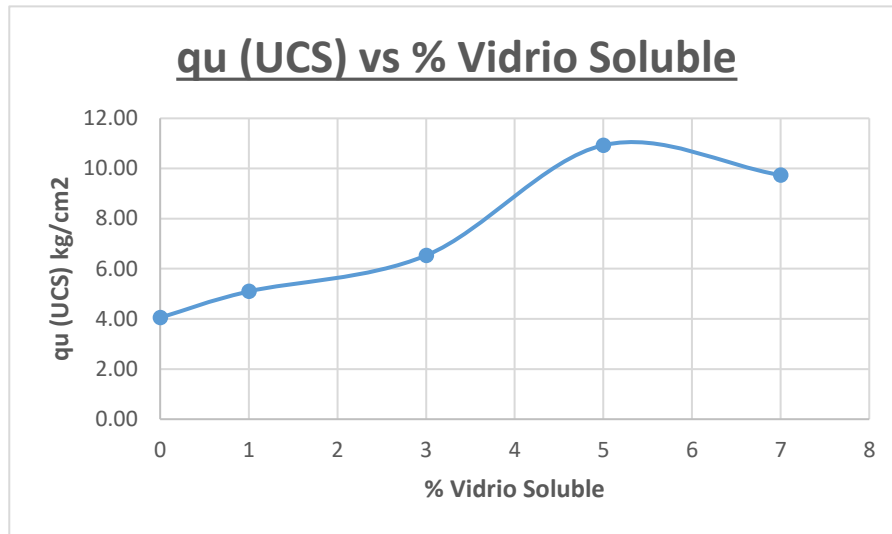
Resultados compresión simple, muestra C-2

% Vidrio Soluble	Prueba	q_u (kg/cm ²)	Cohesión (kg/cm ²)	q_u promedio	Cohesión promedio
0%	1	4.050	2.025	4.05	2.026
	2	4.053	2.026		
1%	3	5.111	2.556	5.10	2.549
	4	5.087	2.543		
3%	5	6.439	3.220	6.53	3.267
	6	6.630	3.315		
5%	7	10.995	5.497	10.93	5.467
	8	10.873	5.436		
7%	9	9.813	4.906	9.74	4.869
	10	9.664	4.832		

Nota: Elaboración propia

Figura 62

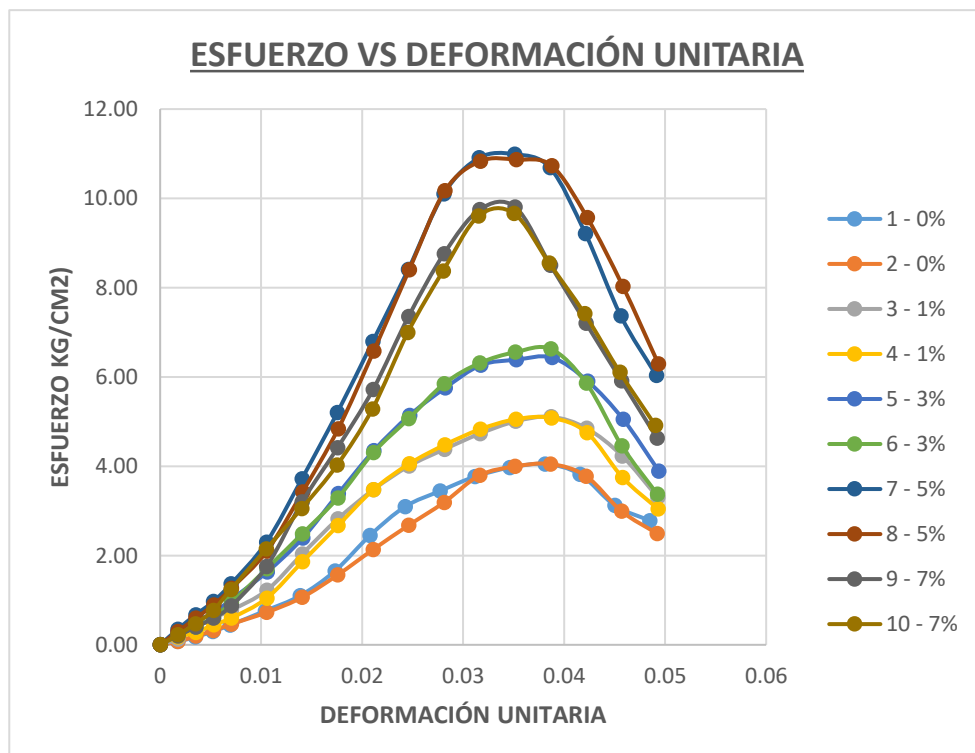
Resultados compresión simple, muestra C-2.



Nota: Elaboración propia

Figura 63

Resultados qu, muestra C-2, esfuerzo deformación.



Nota: Elaboración propia.



De la figura anterior y relacionando con la consistencia de suelo como se indica en el manual de materiales del MTC, se indican valores para cuya consistencia se considera “dura”, tanto en la muestra C-1 y la muestra C-2, en ambos casos se indica una mayor resistencia a la compresión para cantidades en 5% de incorporación de vidrio soluble y una tendencia a decaer en 7%.

En los valores indicados es imperativo evaluar los valores obtenidos a partir de la resistencia a compresión no confinada para de este modo determinar el contenido a usarse de vidrio soluble, en conformidad de la norma CE-020 que indica la realización y ensayo de las probetas de suelo cal para estabilización de suelos de tipo arcilloso. Siendo variaciones máximas obtenidas mediante ensayos de la muestra 1 de 7.41 kg/cm² y de la muestra 2 de 6.48 kg/cm².

4.5. DISCUSIÓN CON ANTECEDENTES.

Se evidencia la evaluación de dos muestras con clasificación CH, donde, para la muestra C-1, indica un valor de 36.27% de IP, 69.54% de límite líquido y 33.28% de límite plástico, con una densidad máxima seca de 1.819 gr/cm³ y 14.79% de contenido de humedad óptimo, con un CBR de 3.10%, y una resistencia a la compresión de 4.81 kg/cm². Donde se evidencia un incremento máximo para el CBR de 15.86% para un 5% y 12.22 kg/cm² al 5% de incorporación de Vidrio Soluble

Para la muestra C-2, indica valores naturales de 25.15% de IP, 51.14% de LL, 25.98% de LP, con una densidad seca máxima de 1.773 g/cm³ y un óptimo contenido de humedad de 16.18%, además de un CBR de 3.45% y una resistencia a la compresión de 4.05 kg/cm² en su estado natural. Alcanzando máximos valores en una incorporación del 5% de vidrio soluble, con un CBR de 15.86% y una resistencia a la compresión de 10.93 kg/cm².



En base a esto, la investigación presente evidencia la mejora del comportamiento mecánico y físico de la arcilla de alta plasticidad, indicando que las adiciones del 1%, 3%, 5% y 7% en peso del material influyen en la reducción del índice de plasticidad hasta un máximo de 19.65%, en base al suelo natural. Añadiendo a esto que, para Caballero (2017), indica una reducción del índice de plasticidad, entre 13% y 19%, para un suelo con clasificación de arcilla de baja plasticidad (CL), esto se debe a la composición mineral de la arcilla, la cual va a variar el comportamiento en su reacción química al integrar el silicato de sodio. Por otro lado, (Gobinath, y otros, 2019) indican un aumento en el índice de plasticidad para un suelo de clasificación arena bien graduada con grava (SW), indicando variaciones de 19% a 23%. Esto podría indicar que al incorporar un aditivo natural de origen vegetal con el silicato de sodio puede incidir en su incremento del índice de plasticidad. En base a esto, se indica que el silicato de sodio tiene diferente comportamiento debido a la reacción química producida. De igual manera, en ambos casos se indican mejoras en sus propiedades físicas y mecánicas en comparación al estado natural, y cumplen el objetivo de demostrar que la incorporación del silicato de sodio como estabilizante logra el cometido de influir positivamente en el comportamiento mecánico del suelo.

En comparación con Galindo & Avellana (2016) hace una estimación del 6.4% del contenido óptimo de silicato de sodio con un CBR inicial del 5% aproximadamente hasta un 14% de CBR sumergido y 22% sin sumergir, para una arcilla de tipo CH (arcilla de alta plasticidad). En comparación con los resultados obtenidos, se indica que la arcilla de alta plasticidad varía en cuanto al contenido óptimo de silicato de sodio o vidrio soluble. Esto se debe a que la incorporación de vidrio soluble es influida por el tipo de producto con el cual se estabiliza, como se indica en el marco teórico, además de ello,



que cada tipo de suelo presenta composición química o mineral diferente, resultando de estos diferentes densidades máximas secas, contenidos de humedad óptimos.

(Cruz, Ítalo, Arnaudo, & Vigilante, 2015), indica un mejoramiento para arcillas de 1.51% a 16.24% en relación del aumento de CBR, indicando el uso de silicato de sodio líquido, con dosificaciones que indican incorporación del 1S:2A:10L indicando proporciones de silicato de sodio, agua, loess; respectivamente, según los antecedentes del uso del silicato indica que en combinación con el loess forma sales de silicato de calcio insoluble, esto es contrastado con (Perret, 2015), que indica el cual indica la aplicación de vidrio soluble a dos muestras de clasificación de tipo ML y CL indicando una plasticidad relativamente baja, con valores menores al 6%, además que presentan densidades de 1.60 y 1.70 gr/cm³ con un contenido de humedad óptimo del 16%, indicando valores de CBR naturales del 2%, y que añadiendo el vidrio soluble aumento el valor CBR en 617% y 803% a los 4 y 11 días respectivamente . Esto indica que la composición del suelo es variable en cuanto al tipo de arcilla y su comportamiento en relación a su influencia por la incorporación de silicato de sodio es variable; ambos trabajos indican una mejora en el comportamiento del suelo, por lo que indican una variedad en su eficacia del producto químico.

Prosiguiendo en la investigación, (Harianto, 2022) indica aumentos del valor CBR de hasta 3.6 veces del valor base de 19% del suelo natural, esto indicando incorporaciones de silicato de sodio y zeolita, y el aumento de la resistencia a la compresión simple con valores de 300-2500 kN/m² para un suelo con clasificación de tipo MH. Indicando al silicato de sodio como activador de la zeolita en la mejora del suelo, lo cual aporta resultados positivos en la investigación. Del mismo modo (Neeladharan, y otros, 2018) indica que se usa al silicato de sodio como medio de reacción química entre el suelo y el polvo de mármol, indicando combinaciones del 5% - 20% de mármol con 2.5% - 10% de



vidrio soluble, para un suelo con clasificación CH, indicando una variación del CBR, teniendo como valor base 1.51%, hasta alcanzar un valor del 16.24% con una adición del 15% de polvo de mármol y 10% de silicato de sodio. (Hussain & Thaku, 2022) También indican una mejora de suelos de tipo arcilloso, para una dosificación más baja de lo habitual con un valor del 3.5%, indicando una variación positiva de 5.63 kg/cm^2 y un incremento del CBR de 12.5% y 5.6% no saturado y saturado, respectivamente, indicando que el silicato no solamente se ciñe a sus propiedades índice, sino a su interacción química o mineral con el suelo y el agua.

(Wanare, y otros, 2023), indica que para un suelo de tipo CL denominado tierra de algodón negro, para una incorporación del 5% de silicato de sodio hay un incremento del 12.7% del CBR indicando mejora en su capacidad de soporte y una variación de 39.29 kN/m^2 en la resistencia a la compresión no confinada. Del mismo modo (Byung & Byung, 1984) indican una mejora de 1.12 kg/cm^2 , dando a conocer que para ambos casos el incremento de la resistencia a la compresión incrementa. Asimismo, (Álvarez & Rojas, 2020) indican una mejora para un mismo tipo de suelo, indicando una mejora positiva con la adición del silicato de sodio.

Para suelos de tipo arenoso (Aguilar & Cardenas, 2023) indica una variación del 42.2% de CBR, indicando una influencia positiva, además de que (Bonifaz & Gamarra, 2022), también indican un incremento de 32.9% en el CBR, en ambos casos se indica un incremento de la máxima densidad seca y una variación del óptimo contenido de humedad, la mejora realizada para estos casos es en una proporción relativamente baja, esto debido a que los estudios realizados se hicieron en porcentajes del óptimo contenido de humedad, añadiendo a esto que la arena es más susceptible a mejorar con pocas cantidades de silicato de sodio. Añadiendo a esto, (Chávez, 2021) indica mejoras con un óptimo contenido de silicato de sodio del 8%, en reemplazo del óptimo contenido de



humedad. De la misma forma (Larico, 2021), indica mejoras en las mismas proporciones para un material de cantera.

Añadiendo a lo anterior (Ferrero, 2023) realizó una investigación en donde utilizó como segundo aditivo al silicato de sodio, apoyando a la cal hidratada, con una mejora de hasta el 880% de CBR, es decir, para un CBR natural de 2.5% indica una mejora de hasta 24.7% para una dosificación óptima, indicando un suelo de tipo CL-ML, haciendo hincapié en que la incorporación de vidrio soluble en suelo de arcilla o limo de baja plasticidad es recomendable. A esto (Molano & Leiton, 2017) indica mejoras en cuanto a pruebas de resistencia para suelos de tipo limo-arenosos, indicando una mejora de 6.747 kN/m² de variación positiva. Alegando la mejora inducida por el vidrio soluble.

(Mora & Rodriguez, 2017) refiere ensayos de CBR del silicato de sodio como material para base, enfatizando la durabilidad del aditivo, lo cual refiere buenos resultados debido a su incremento en su CBR, haciendo una distinción en el estado sumergido y no sumergido con variaciones del CBR de 40% y 80% respectivamente, influyendo positivamente en las propiedades de la base.

Prosiguiendo (Kusaka, 2020) indica una estabilización de suelos en donde analizó la influencia del silicato de sodio en presencia de suelos arenosos. Indica una mejora en el CBR alcanzando un valor del 111% cuando se añade 8% de silicato de sodio a una mezcla de 40% arena - 60% suelo arenoso, indicando un mejor desempeño del silicato de sodio en suelos arenosos, bajo las condiciones alcalinas.

Para los estudios realizados por (Moayedi, Huat, Kazemian, & Daneshmand, 2011) indican ensayos realizados para evaluar la resistencia a la compresión no confinada (UCS) para un suelo orgánico, indicando mejoras de hasta 220% de la resistencia a la compresión no confinada natural del suelo. Esto implica un valor base de 10 kpa

aproximadamente. En dicho caso, la mejora de la resistencia es menor en porcentaje dado a que se indican valores elevados de resistencia base del suelo.

4.6. ANALISIS DE VARIANZA

Para determinar si se realizará un óptimo contenido de silicato de sodio para cada muestra y si ambas muestras presentan el mismo nivel de significancia en el tratamiento de suelo, se indica que se tiene que verificar si ambas muestras tienen relación en base a la media de su tratamiento; dicho esto se realiza un análisis de datos en función de los valores CBR obtenidos en las dosificaciones establecidas.

Tabla 56

Resumen análisis de varianza

Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza
Columna 1	2	6.559	3.280	0.061
Columna 2	2	10.525	5.262	0.102
Columna 3	2	20.222	10.111	1.246
Columna 4	2	31.935	15.967	0.022
Columna 5	2	30.132	15.066	0.076

Nota. Elaboración propia

Tabla 57

Análisis de varianza

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	257.748	64.437	213.727	0.000009	5.192
Dentro de los grupos	1.507	0.301			
Total	259.255				

Nota. Elaboración propia

La hipótesis nula (H0) indica que la media de los tratamientos de la muestra C-1 y la media de los tratamientos de la muestra C-2 son iguales. Por otro lado, la hipótesis

alterna (H1) indica que las medias de los tratamientos de las muestras C-1 y C-2 son diferentes.

Se tiene que si el F calculado es mayor al F de tabla se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alterna, del mismo modo si el F calculado es menor que el F de tabla se acepta la hipótesis nula. El nivel de significancia tiene un valor de 0.05.

Como se aprecia, F calculado es mayor que F de la tabla, por lo que indica que las medias de los tratamientos son diferentes; en este caso se calculará un óptimo para cada muestra de suelo. Además de indicar que se rechaza la hipótesis nula, y se debe interpretar que el tratamiento con el silicato de sodio o vidrio soluble presenta diferencias entre la muestra C-1 y la muestra C-2. Dado que el valor p (probabilidad) es menor que el nivel de significancia, se tiene que hay diferencias significativas entre las medias de los grupos.

4.7. ÓPTIMO CONTENIDO DE VIDRIO SOLUBLE

4.7.1. Muestra C-1

Para la muestra C-1, tomamos los valores de CBR

Tabla 58

Valores CBR de la muestra C-1

%V.S.	CBR
0%	3.10
1%	5.04
3%	9.32
5%	15.86
7%	15.26

Nota. Elaboración propia

Dichos datos se acomodan a una regresión polinómica de cuarto grado definido por:



$$y = -3E+06x^4 + 348573x^3 - 8819.9x^2 + 249.99x + 3.1043$$

De dicha ecuación se calcula que % óptimo de vidrio soluble es 6.1%

4.7.2. Muestra C-2

Para la muestra C-1, tomamos los valores de CBR

Tabla 59

Valores CBR de la muestra C-1

%V.S.	CBR
0%	3.45
1%	5.49
3%	10.90
5%	16.07
7%	14.87

Nota. Elaboración propia

Dichos datos se acomodan a una regresión polinómica de cuarto grado definido por:

$$y = -1E+06x^4 + 47913x^3 + 1755.2x^2 + 182.06x + 3.4548$$

De dicha ecuación se calcula que % óptimo de vidrio soluble es 5.89%



V. CONCLUSIONES

- En la presente investigación se ha comprobado la influencia positiva al adicionar vidrio soluble o silicato de sodio en proporciones de peso de las muestras de suelo, indicando una estabilización acorde a los requerimientos bajo la normativa del MTC, modificando el suelo de subrasantes inadecuadas naturalmente a subrasantes buenas con incorporaciones óptimas de vidrio soluble.
- Se ha hecho el estudio de dos muestras naturales C-1 y C-2 de la vía Juliaca – Canchi Grande, indicando clasificaciones de arcilla de alta plasticidad, las cuales presentan índices de plasticidad de 36.27% y 25.14%, con CBR naturales de 3.10% y 3.45 %, y valores de compresión no confinada de 4.81 kg/cm² y 4.05 kg/cm², respectivamente; los cuales indican una subrasante insuficiente que se ha de mejorar, según el MTC.
- Se han detallado los datos con incorporaciones de 1%, 3%, 5% y 7%, indicando una reducción en el índice de plasticidad de un máximo de 19.65% para la muestra C-1 y de 16.38% para la muestra C-2, ambas muestras indican una mayor densidad seca máxima con un menor contenido de humedad óptimo, con valores CBR máximos de 15.86% para la muestra C-1 y 16.07% para la muestra C-2, además de alcanzar valores máximos UCS de 12.21 kg/cm² y 10.93 kg/cm².
- Se ha indicado una dosificación óptima del 5% de vidrio soluble experimentalmente, a través de pruebas, indicando variaciones en los gráficos de ambas muestras, logrando mejorar las propiedades físicas y mecánicas de las muestras de suelo, indicando experimentalmente que para un uso del 7% el silicato de sodio ya no presenta efecto en la mejora indicando una reducción de su efectividad en su dosificación óptima.



VI. RECOMENDACIONES

- Debido al comportamiento del aditivo químico se recomienda evaluar los resultados, en función de su reacción y de la composición química del suelo.
- Se recomienda evaluar las propiedades del suelo en función de sus diversas aplicaciones del aditivo, como impermeabilizante, o segundo aditivo y evaluar cual aplicación es mejor en función de su factor económico y su factor ingenieril.
- Se recomienda analizar otras propiedades ingenieriles en la aplicación del aditivo, para diversos tipos de suelo, ya sea su consolidación, su resistencia al corte por otro ensayo, y realizar comparaciones, en su entorno en cuanto a la humedad
- Se recomienda evaluar las condiciones ambientales en la aplicación del producto, como la gestión ambiental, en control de emisión de polvos y la influencia del aditivo, así como su gestión de riesgos



VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aguilar, A., & Cardenas, P. (2023). *ESTABILIZACIÓN DE SUELOS ARENOSOS MEDIANTE LA ADICIÓN DE SILICATO DE SODIO EN LA SUBRASANTE DE LA ALAMEDA SUR DE CHORRILLOS*. Lima: Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas.
- Álvarez, A. (2020). *Clasificación de las Investigaciones*. Universidad de Lima . Lima: ULima. Obtenido de <https://repositorio.ulima.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12724/10818/Nota%20Acad%C3%A9mica%202020%2818.04.2021%29%20-%20Clasificaci%C3%B3n%20de%20Investigaciones.pdf?sequence=4&isAllowed=y>
- Álvarez, B., & Rojas, L. (2020). *Aplicación de temáticas en ingeniería civil comparación de las alternativas de estabilización con cal, cemento, silicato de sodio y aceite sulfonado para vías terciarias con presencia de arcilla en la región de la Orinoquía*. Universidad Santo Tomás. Villavicencio: USTA. Obtenido de <https://repository.usta.edu.co/bitstream/handle/11634/32040/2021brianalvarez.pdf?sequence=14&isAllowed=y>
- Archibong, G., Sunday, E., Akudike, J., Okeke, O., & Amadi, C. (Marzo de 2020). *A REVIEW OF THE PRINCIPLES AND METHODS OF SOIL STABILIZATION*. Obtenido de ResearchGate: https://www.researchgate.net/publication/342448451_A_REVIEW_OF_THE_PRINCIPLES_AND_METHODS_OF_SOIL_STABILIZATION
- Arias, J. (2021). *Diseño y metodología de la investigación* (Primera ed.). Arequipa: Enfoques Consulting EIRL.
- Arias, J., Villasís, M. Á., & Miranda, M. G. (2016). El protocolo de investigación III: la población de estudio. *Revista Alergia México*, 63(2), 201-206.
- ASTM D-1557. (2012). *Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Modified Effort*. Obtenido de <https://doi.org/10.1520/D1557-12>.Edición



- ASTM D-1883. (2016). *Standard Test Method for California Bearing Ratio*. Obtenido de <https://doi.org/10.1520/D1883-16>
- ASTM D-3282. (2004). *Standard Practice for Classification of Soils and Soil-Aggregate Mixtures for Highway Construction Purposes*. Obtenido de https://scetcivil.weebly.com/uploads/5/3/9/5/5395830/d_3282_-_93_r04__rdmyodi_.pdf
- ASTM D-421. (2002). *Standard Practice for Dry Preparation of Soil Samples for Particle-Size Analysis and Determination of Soil Constants*. Obtenido de https://kashanu.ac.ir/Files/D%20421%20%E2%80%93%2085%20R02%20%20_RDQYMQ_.pdf
- ASTM D-422. (2002). *Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils*. Obtenido de <https://civillabs.kashanu.ac.ir/file/download/page/1593845138-d-422-63-r02-rdqymg-.pdf>
- ASTM D-4318. (2017). *Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils*. Obtenido de <https://cdn.standards.iteh.ai/samples/97738/1d8af61b310945cd8cb529c7b03a0707/ASTM-D4318-17.pdf>
- ASTM, D-2487. (2017). *Práctica estándar para la clasificación de suelos para la Clasificación de Suelos para Propósitos de Ingeniería (SUCS)*. Obtenido de <https://doi.org/10.1520/D2487-17>
- Bonifaz, J., & Gamarra, R. (2022). *Comparación del silicato de sodio y cemento para la estabilización de la subrasante en la avenida los profesionales, ventanilla 2022*. Lima: Universidad Cesar Vallejo.
- Byung, J., & Byung, C. (1984). *Improvement of Soil Strength by Injection of Water-Glass Chemical Grout*. Corea del Sur: Universidad de Hanyang.
- Caballero, O. (2017). *Estabilización química con silicato de sodio del material de préstamo de la vía La Primavera – Bonanza – La Venturosa en el departamento del Vichada*. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá: UNAL. Obtenido de <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/63517>



- Chávez, A. (2021). *Silicato de sodio para la estabilización de suelos en la trocha La Menta km 00+000 - Garabato km 1+430 distrito de Las Lomas-provincia y departamento de Piura*. Universidad Nacional de Piura. Piura: UNP. Obtenido de <https://repositorio.unp.edu.pe/handle/20.500.12676/2704>
- COFOPRI. (28 de Marzo de 2024). *GEO LLAQTA*. Obtenido de <http://catastro.cofopri.gob.pe/geollaqta/>
- Cruz, M., Ítalo, M., Arnaudo, C., & Vigilante, N. (2015). Estabilización de subrasante loésica con silicato de sodio líquido. *Revista de Geología Aplicada a la Ingeniería y al Ambiente*, 5.
- Das, B. M. (2013). *Fundamentos de Ingeniería Geotécnica (4th ed)*. Cengage Learning.
- Ferrero, M. (2023). *Estudio in-situ de estabilización de suelo vial: aplicación en campo "La Toma" Ruta N° 19 Córdoba*. Obtenido de https://pa.bibdigital.ucc.edu.ar/3641/1/TF_Ferrero.pdf
- Galindo, J., & Avellaneda, E. (2016). *Análisis técnico del uso de silicato de sodio para estabilización química de suelos*. Universidad Distrital Francisco José De Caldas, Bogotá.
- Gobierno Regional Puno. (2015). *INFORME FINAL DEL ÁREA DE GEOLOGÍA REGIÓN PUNO*. Obtenido de https://drive.google.com/file/d/1xurZEJq0Eg40naw9k_tEB-f8aj9JzvCU/view
- Gobinath, R., Ibukun, I., Diran, O., Karthikeyan, S., Manojkumar, M., Gowtham, S., & Manikandan, A. (2019). Banana Fibre-Reinforcement of a Soil Stabilized with Sodium Silicate. *Silicon. Springer*.
- Hariato, T. (2022). Performance of Subbase Layer with Geogrid Reinforcement and Zeolite-Waterglass Stabilization. *Civil Engineering Journal*, 251-262.
- Hernández, O. (2021). Aproximación a los distintos tipos de muestreo no probabilístico que existen. *Revista Cubana de Medicina General Integral*, 37(3), 1-3.
- Hernández, R. (2018). *Metodología de investigación: las rutas cuantitativa, cualitativa y mixta*. Ciudad de México: MCGRAW-HILL INTERAMERICANA.



- Hernández, S. L., & Duana, D. (2020). Técnicas e instrumentos de recolección de datos. *Boletín Científico de las Ciencias Económico Administrativas del ICEA*, 9(17), 51-53.
- Hurley, C., & Thorburn, T. (1972). SODIUM SILICATE STABILIZATION OF SOILS: A REVIEW OF THE LITERATURE. *Chemical Stabilization of Foundations*, 46-79.
- Hussain, S., & Thaku, S. (2022). Review on Effect of Replacement Lime and Sodium Silicate on The Stabilization OF Soil. *International Journal of Scientific & Technical Development*, 24-27.
- Ishibashi, I., & Hazarika, H. (2015). *Soil Mechanics Fundamentals and Applications. Segunda Edición*. Taylor & Francis Group.
- Juárez, E., & Rico, A. (2005). *Fundamentos de la mecánica de suelos. Tomo I*. Limusa.
- Kusaka, C. (2020). *INFLUENCIA DE LA ADICIÓN DE SEDIMENTOS DE CLARIFICACIÓN DE AGUAS DE RIEGO ACTIVADAS ALCALINAMENTE CON SILICATO DE SODIO EN LA ESTABILIZACIÓN ECOLÓGICA DE SUELOS ARENOSOS EN LA PROVINCIA DE VIRÚ, LA LIBERTAD, 2019*. Obtenido de <http://repositorio.uprit.edu.pe/bitstream/handle/UPRIT/249/KUSAKA%20LOZANO%20CIRO%20YNOKI.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Larico, R. (2021). *Mejoramiento de material de cantera para sub base incrementando el CBR por adición de vidrio soluble, distrito Callería, Ucayali 2021*. Universidad Cesar Vallejo. Callao: UCV. Obtenido de https://repositorio.ucv.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12692/83979/Larico_GR-SD.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Ministerio de Economía y Finanzas. (2011). *Guía Simplificada para la Identificación, Formulación y Evaluación Social de Proyectos de Rehabilitación y Mejoramiento de Caminos Vecinales, a Nivel de Perfil*. Obtenido de https://www.mef.gob.pe/contenidos/inv_publica/docs/instrumentos_metod/transporte/guiacaminos1.pdf



- Ministerio de Transportes y Comunicaciones. (2014). *Manual de carreteras, suelos geología, geotecnia y pavimentos. Sección suelos y pavimentos*. Obtenido de https://portal.mtc.gob.pe/transportes/caminos/normas_carreteras/MTC%20NORMAS/ARCH_PDF/MAN_7%20SGGP-2014.pdf
- Ministerio de Transportes y Comunicaciones. (2016). *Manual de Ensayo de Materiales*. Lima.
- Moayed, H., Huat, B., Kazemian, S., & Daneshmand, S. (2011). Stabilization of organic soil using sodium silicate. *International Journal of Physical Sciences Vol. 7*, 1395 - 1402.
- Molano, M., & Leiton, G. (2017). *ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE LOS SUELOS LIMO ARENOSOS ESTABILIZADOS CON SILICATO DE SODIO*. Bogotá: UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSE DE CALDAS.
- Mora, N., & Rodríguez, J. (2017). *Análisis del efecto del silicato de sodio en bases granulares para contrarrestar la pérdida de capacidad de soporte por efecto de la saturación*. Bogotá: Universidad Distrital Francisco José de Caldas.
- Mosteiro, M. J., & Porto, A. M. (2017). La investigación en educación. *SciELO Books*, 13-40.
- Neeladharan, C., Sathish, P., Nandhini, A., Priya, R., Sadiqua, I., & Srimathi, J. (2018). Stabilization of Soil by using Marble dust with Sodium silicate as binder. *International Journal of Advanced Research Trends in Engineering and Technology (IJARTET)*. Vol. 5., 45-49.
- Nicholson, P. (2015). *Soil improvement and ground modification methods*. Butterworth Heinemann.
- Nieto, J., & Torentino, M. (12 de Enero de 2021). *ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DE LOS SUELOS BLANDOS APLICANDO LA TÉCNICA DE INCLUSIONES RÍGIDAS POR LOS MÉTODOS NUMÉRICO Y ANALÍTICO*. Obtenido de https://repositorioacademico.upc.edu.pe/bitstream/handle/10757/654720/NietoF_J.pdf?sequence=3&isAllowed=y



- Norma Técnica Peruana. (2002). SUELOS, Método de ensayo estandar para la resistencia a la compresión no confinada de suelos cohesivos. *NTP 339.167*. Lima, Perú.
- Perret, H. (Julio de 2015). *Estabilización de loess con silicato para uso vial*. Obtenido de https://pa.bibdigital.ucc.edu.ar/660/1/TF_Perret.pdf
- Sánchez, F. A. (2019). Fundamentos epistémicos de la investigación cualitativa y cuantitativa: consensos y disensos. *Revista digital de investigación en docencia universitaria*, 13(1), 102-122.
- Valdivia, G. (2005). EXPERIENCIA DEL MANTENIMIENTO VIAL RUTINARIO MEDIANTE PROCESOS PARTICIPATIVOS. *VII ENCUENTRO LATINOAMERICANO DE UNIDADES AMBIENTALES DEL SECTOR TRANSPORTE*. Lima, Lima.
- Verrujit, A. (2017). *An Introduction to Soil Mechanics*. Springer.
- Wanare, S., Chavhan, M., Waghmare, V., Meshram, H., Dewari, R., & Gulve, T. (2023). Effect of Fly Ash and Sodium Silicate on Soil Stabilization. *International Journal of Advances in Engineering and Management (IJAEM)*, 1133-1139.
- Whitlow, R. (1998). *Fundamentos de Mecánica de Suelos*. México: COMPAÑIA EDITORIAL CONTINENTAL S.A. DE C.V.



ANEXOS

ANEXO 01: Matriz de consistencia

ANEXO 02: Constancia de uso de laboratorio

ANEXO 03: Análisis granulométrico muestra C-1 y C-2

ANEXO 04: Límites de Atterberg natural muestra C-1 y C-2

ANEXO 05: Ensayos Proctor modificado natural muestra C-1 y C-2

ANEXO 06: Ensayos CBR natural muestra C-1 y C-2

ANEXO 07: Ensayo compresión no confinada natural muestra C-1 y C-2

ANEXO 08: Ensayos con incorporaciones de 1%, 3%, 5% y 7% de vidrio soluble de límites de consistencia, muestra C-1 y C-2

ANEXO 09: Ensayos con incorporaciones de 1%, 3%, 5% y 7% de vidrio soluble de Proctor modificado, muestra C-1 y C-2

ANEXO 10: Ensayos con incorporaciones de 1%, 3%, 5% y 7% de vidrio soluble de CBR, muestra C-1 y C-2

ANEXO 11: Ensayos con incorporaciones de 1%, 3%, 5% y 7% de vidrio soluble de compresión no confinada, muestra C-1 y C-2

ANEXO 12: Ficha técnica de silicato de sodio

ANEXO 13: Panel Fotográfico



DECLARACIÓN JURADA DE AUTENTICIDAD DE TESIS

Por el presente documento, Yo BRYAN CRISTIAN CCALLA HUANCA,
identificado con DNI 76428191 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:

“INFLUENCIA DEL VIDRIO SOLUBLE EN SUELOS BLANDOS Y COHESIVOS
PARA MEJORAR LAS PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS DE LA SUBRASANTE
DE LA VÍA JULIACA - CANCHI GRANDE”

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 18 de SEPTIEMBRE del 20 24

FIRMA (obligatoria)



Huella



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

Por el presente documento, Yo BRYAN CRISTIAN CCALLA HUANCA,
identificado con DNI 76428191 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:

“ INFLUENCIA DEL VIDRIO SOLUBLE EN SUELOS BLANDOS Y COHESIVOS
PARA MEJORAR LAS PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS DE LA SUBRASANTE
DE LA VÍA JULIACA - CANCHI GRANDE ”

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 18 de SEPTIEMBRE del 2024

FIRMA (obligatoria)



Huella