

**UNIVERSIDAD CATÓLICA SANTO TORIBIO DE MOGROVEJO**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA**  
**ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL**



**Análisis del comportamiento mecánico y de las propiedades químicas de  
los suelos arcillosos en caminos viales con silicato de sodio**

**TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE  
INGENIERO CIVIL**

**AUTOR**

**Nickolas Da Vinci Guzman Zuloeta**

**ASESOR**

**Manuel Alejandro Borja Suarez**

**<https://orcid.org/0000-0002-6532-4976>**

**Chiclayo, 2025**

**Análisis del comportamiento mecánico y de las propiedades químicas de los suelos arcillosos en caminos viales con silicato de sodio**

PRESENTADA POR

**Nickolas Da Vinci Guzman Zuloeta**

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

**INGENIERO CIVIL**

APROBADA POR

Anibal Teodoro Diaz Orrego

PRESIDENTE

Luis Quiroz Quiñones

SECRETARIO

Manuel Alejandro Borja Suarez

VOCAL

## **Dedicatoria**

A mis padres, por ser faro en cada tormenta; a mi hermana, por caminar a mi lado sin soltar mi mano; y a mi familia, por enseñarme que los sueños se alcanzan con amor, esfuerzo y fe.

Esta tesis es un reflejo de su constante aliento y del amor que me impulsa cada día.

## **Agradecimientos**

Agradezco profundamente a quienes, con sus palabras, gestos y enseñanzas, han dejado huella en mi formación académica y humana. A mis docentes, gracias por compartir no solo conocimientos, sino también pasión y entrega, guiando cada paso hacia mi crecimiento profesional.

# Análisis del comportamiento mecánico y de las propiedades químicas de los suelos arcillosos en caminos viales con silicato de sodio

## INFORME DE ORIGINALIDAD

|                     |                     |               |                         |
|---------------------|---------------------|---------------|-------------------------|
| <b>10%</b>          | <b>10%</b>          | <b>2%</b>     | <b>2%</b>               |
| INDICE DE SIMILITUD | FUENTES DE INTERNET | PUBLICACIONES | TRABAJOS DEL ESTUDIANTE |

## FUENTES PRIMARIAS

|          |  |               |
|----------|--|---------------|
| <b>1</b> | <b>hdl.handle.net</b><br>Fuente de Internet                                | <b>5%</b>     |
| <b>2</b> | <b>tesis.usat.edu.pe</b><br>Fuente de Internet                             | <b>2%</b>     |
| <b>3</b> | <b>repositorio.ucv.edu.pe</b><br>Fuente de Internet                        | <b>1%</b>     |
| <b>4</b> | <b>repositorio.unp.edu.pe</b><br>Fuente de Internet                        | <b>&lt;1%</b> |
| <b>5</b> | <b>Submitted to Universidad Cesar Vallejo</b><br>Trabajo del estudiante    | <b>&lt;1%</b> |
| <b>6</b> | <b>bdigital.unal.edu.co</b><br>Fuente de Internet                          | <b>&lt;1%</b> |
| <b>7</b> | <b>upc.aws.openrepository.com</b><br>Fuente de Internet                    | <b>&lt;1%</b> |
| <b>8</b> | <b>Submitted to Universidad Andina del Cusco</b><br>Trabajo del estudiante | <b>&lt;1%</b> |

## ÍNDICE

|                                |     |
|--------------------------------|-----|
| Resumen .....                  | 10  |
| Abstract.....                  | 11  |
| Introducción.....              | 12  |
| Revisión de la literatura..... | 17  |
| Materiales y métodos.....      | 36  |
| Resultados y discusión .....   | 60  |
| Conclusiones.....              | 111 |
| Recomendaciones .....          | 113 |
| Referencias .....              | 114 |
| Anexos .....                   | 124 |

## LISTA DE TABLAS

|  |    |
|--|----|
| <b>TABLA I</b> MUESTRAS A REALIZAR POR PORCENTAJE Y NÚMERO DE ENSAYOS .....                        | 39 |
| <b>TABLA II</b> NÚMERO DE ENSAYO DE MUESTRAS POR PROPIEDADES.....                                  | 40 |
| <b>TABLA III</b> RESUMEN DE PORCENTAJES EN ANTECEDENTES.....                                       | 41 |
| <b>TABLA IV</b> SIGNIFICANCIA DE LOS PORCENTAJES .....   | 44 |
| <b>TABLA V</b> OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES .....   | 47 |
| <b>TABLA VI</b> TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS .....                              | 48 |
| <b>TABLA VII</b> PLAN DE PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS DE DATOS .....                                   | 59 |
| <b>TABLA VIII</b> RESUMEN DE CONTENIDO DE HUMEDAD DE LAS MUESTRAS EN ESTADO NATURAL .....          | 60 |
| <b>TABLA IX</b> RESUMEN DE CLASIFICACIÓN DE SUELOS DE LAS MUESTRAS EN ESTADO NATURAL .....         | 61 |
| <b>TABLA X</b> RESUMEN DE LÍMITES DE CONSISTENCIA DE MUESTRAS NATURALES.....                       | 62 |
| <b>TABLA XI</b> RESUMEN DE LÍMITES DE CONSISTENCIA DE MUESTRAS EN LA C-01 .....                    | 63 |
| <b>TABLA XII</b> RESUMEN DE LÍMITES DE CONSISTENCIA DE MUESTRAS EN LA C-02 .....                   | 64 |
| <b>TABLA XIII</b> LÍMITES DE LÍMITES DE CONSISTENCIA DE MUESTRAS EN LA C-03 .....                  | 64 |
| <b>TABLA XIV</b> RESUMEN DE LA CLASIFICACIÓN AASHTO Y SUCS DE LAS MUESTRAS EN ESTADO NATURAL ..... | 65 |
| <b>TABLA XV</b> ÍNDICE DE GRUPO DE MUESTRAS NATURALES.....   | 65 |
| <b>TABLA XVI</b> RESUMEN DE LA CURVA DE COMPACTACIÓN DE LAS MUESTRAS EN ESTADO NATURAL.....        | 66 |
| <b>TABLA XVII</b> COH Y MDS DE LAS MUESTRAS DE LA CALICATA 01 .....                                | 67 |
| <b>TABLA XVIII</b> COH Y MDS DE LAS MUESTRAS DE LA CALICATA 02.....                                | 67 |
| <b>TABLA XIX</b> COH Y MDS DE LAS MUESTRAS DE LA CALICATA 03 .....                                 | 68 |
| <b>TABLA XX</b> RESUMEN DE LA CAPACIDAD DE SOPORTE DE LAS MUESTRAS NATURALES.....                  | 69 |
| <b>TABLA XXI</b> CBR (%) EN MUESTRAS EXPERIMENTALES C-01 .....                                     | 71 |
| <b>TABLA XXII</b> CBR (%) EN MUESTRAS EXPERIMENTALES C-02 .....                                    | 73 |

|  |     |
|--|-----|
| <b>TABLA XXIII</b> CBR (%) EN MUESTRAS EXPERIMENTALES C-03.....                                      | 75  |
| <b>TABLA XXIV</b> RESUMEN DEL PORCENTAJE DE MATERIA ORGÁNICA DE LAS MUESTRAS EN ESTADO NATURAL ..... | 77  |
| <b>TABLA XXV</b> RESUMEN DEL NIVEL DE PH DE LAS MUESTRAS EN ESTADO NATURAL .....                     | 77  |
| <b>TABLA XXVI</b> NIVEL DE PH EN MUESTRAS EXPERIMENTALES C-01 .....                                  | 78  |
| <b>TABLA XXVII</b> NIVEL DE PH EN MUESTRAS EXPERIMENTALES C-02 .....                                 | 78  |
| <b>TABLA XXVIII</b> RESUMEN DEL NIVEL DE PH DE LAS MUESTRAS ANALIZADAS .....                         | 79  |
| <b>TABLA XXIX</b> LÍMITE LÍQUIDO (%) EN TODAS LAS MUESTRAS ANALIZADAS                                | 84  |
| <b>TABLA XXX</b> .....   | 86  |
| <b>TABLA XXXI</b> ÍNDICE PLÁSTICO (%) EN TODAS LAS MUESTRAS ANALIZADAS .....                         | 89  |
| <b>TABLA XXXII</b> COH (%) EN TODAS LAS MUESTRAS ANALIZADAS.....                                     | 92  |
| <b>TABLA XXXIII</b> MDS (%) EN TODAS LAS MUESTRAS ANALIZADAS.....                                    | 94  |
| <b>TABLA XXXIV</b> CBR (%) EN TODAS LAS MUESTRAS ANALIZADAS AL 95% DE SU MDS .....                   | 98  |
| <b>TABLA XXXV</b> .....  | 101 |
| <b>TABLA XXXVI</b> NIVELES DE PH LAS MUESTRAS ANALIZADAS .....                                       | 105 |

## LISTA DE FIGURAS

|   |    |
|---|----|
| <b>Fig. 1.</b> Descripción cualitativa de depósitos granulares [33].              | 24 |
| <b>Fig. 2.</b> Clasificación según SUCS [33].                                     | 25 |
| <b>Fig. 3.</b> Clasificación según AASHTO [33].                                   | 25 |
| <b>Fig. 4.</b> Clasificación según análisis granulométrico [33].                  | 26 |
| <b>Fig. 5.</b> Análisis granulométrico en porcentaje [33].                        | 26 |
| <b>Fig. 6.</b> Estados de consistencia [33].                                      | 27 |
| <b>Fig. 7.</b> Clasificación según el índice de plasticidad [33].                 | 27 |
| <b>Fig. 8.</b> Clasificación según su materia orgánica [51].                      | 28 |
| <b>Fig. 9.</b> Tamices para el análisis granulométrico [34].                      | 30 |
| <b>Fig. 10.</b> Factor K para el límite líquido [34].                             | 31 |
| <b>Fig. 11.</b> Cuadro de probabilidad estadística para Proctor modificado.       | 38 |
| <b>Fig. 12.</b> Cuadro de probabilidad estadística para CBR y ph.                 | 39 |
| <b>Fig. 13.</b> Cuadro de probabilidad estadística para muestras experimentales.  | 43 |
| <b>Fig. 14.</b> Cuadro de Minitab para comparaciones de %.                        | 44 |
| <b>Fig. 15.</b> Selección de % por medio del método Tunkey.                       | 45 |
| <b>Fig. 16.</b> Proceso de demostración de la hipótesis.                          | 46 |
| <b>Fig. 17.</b> Coordenadas del lugar de estudio.                                 | 49 |
| <b>Fig. 18.</b> Realización de calicata C-01, C-02 y C-03.                        | 50 |
| <b>Fig. 19.</b> Perfil estratigráfico C-01.                                       | 50 |
| <b>Fig. 20.</b> Perfil estratigráfico C-02.                                       | 51 |
| <b>Fig. 21.</b> Perfil estratigráfico C-03.                                       | 51 |
| <b>Fig. 22.</b> Determinación del contenido de humedad del suelo.                 | 52 |
| <b>Fig. 23.</b> Procedimiento de tamizado para análisis granulométrico.           | 52 |
| <b>Fig. 24.</b> Evaluación de los límites de consistencia líquida.                | 53 |
| <b>Fig. 25.</b> Medición del límite plástico y cálculo del índice de plasticidad. | 53 |
| <b>Fig. 26.</b> Proceso del ensayo Proctor en su variante modificada.             | 54 |
| <b>Fig. 27.</b> Ensayo CBR aplicado a las muestras estudiadas.                    | 54 |
| <b>Fig. 28.</b> Ensayo de materia orgánica por ignición.                          | 55 |
| <b>Fig. 29.</b> Ensayo de ph en suelos.   | 56 |
| <b>Fig. 30.</b> Silicato de sodio en polvo presentación de 25 kg.                 | 56 |
| <b>Fig. 31.</b> Mezcla de muestra de C-03 con silicato de sodio.                  | 58 |
| <b>Fig. 32.</b> Porcentaje de humedad en estado natural.                          | 60 |

|   |    |
|---|----|
| <b>Fig. 33.</b> Curvas granulométricas de las muestras en estado natural.....       | 61 |
| <b>Fig. 34.</b> Distribución granulométrica natural mediante tamizado.....          | 62 |
| <b>Fig. 35.</b> Porcentaje de consistencia de las muestras originales.....          | 63 |
| <b>Fig. 36.</b> Porcentajes desglosados de límites de consistencia C-01.....        | 63 |
| <b>Fig. 37.</b> Porcentajes desglosados de límites de consistencia C-02.....        | 64 |
| <b>Fig. 38.</b> Porcentajes desglosados de límites de consistencia C-03.....        | 65 |
| <b>Fig. 39.</b> Gráfica de compactación de las subrasantes naturales.....           | 66 |
| <b>Fig. 40.</b> Comportamiento de compactación por tipo de muestra.....             | 67 |
| <b>Fig. 41.</b> Comportamiento de compactación por tipo de muestra.....             | 68 |
| <b>Fig. 42.</b> Comportamiento de compactación por tipo de muestra.....             | 68 |
| <b>Fig. 43.</b> Curvas CBR a 55 golpes en suelos naturales.....                     | 69 |
| <b>Fig. 44.</b> Curvas CBR a 26 golpes en suelos naturales.....                     | 70 |
| <b>Fig. 45.</b> Curvas CBR a 12 golpes en suelos naturales.....                     | 70 |
| <b>Fig. 46.</b> Curvas CBR de C-01 a 55 golpes.....                                 | 71 |
| <b>Fig. 47.</b> Curvas CBR de C-01 a 26 golpes.....                                 | 72 |
| <b>Fig. 48.</b> Curvas CBR de C-01 a 12 golpes.....                                 | 72 |
| <b>Fig. 49.</b> Curvas CBR de C-02 a 55 golpes.....                                 | 73 |
| <b>Fig. 50.</b> Curvas CBR de C-02 a 26 golpes.....                                 | 74 |
| <b>Fig. 51.</b> Curvas CBR de C-02 a 12 golpes.....                                 | 74 |
| <b>Fig. 52.</b> Curvas CBR de C-03 a 55 golpes.....                                 | 75 |
| <b>Fig. 53.</b> Curvas CBR de C-03 a 26 golpes.....                                 | 76 |
| <b>Fig. 54.</b> Curvas CBR de C-03 a 12 golpes.....                                 | 76 |
| <b>Fig. 55.</b> Niveles de ph de muestras naturales.....                            | 78 |
| <b>Fig. 56.</b> ACU - Trazo, Replanteo y Controles Topográficos.....                | 80 |
| <b>Fig. 57.</b> ACU - Excavación a nivel de subrasante.....                         | 80 |
| <b>Fig. 58.</b> ACU - Batido de material con cemento 12% $e=0.15m$ .....            | 80 |
| <b>Fig. 59.</b> ACU - Perfilado, nivelación y compactación.....                     | 80 |
| <b>Fig. 60.</b> ACU - Presupuesto de la estabilización del cemento 12%.....         | 81 |
| <b>Fig. 61.</b> ACU - Trazo, Replanteo y Controles Topográficos.....                | 81 |
| <b>Fig. 62.</b> ACU - Excavación a nivel de subrasante.....                         | 81 |
| <b>Fig. 63.</b> ACU - Batido de material con silicato de sodio 8% $e=0.15m$ .....   | 82 |
| <b>Fig. 64.</b> ACU - Perfilado, nivelación y compactación.....                     | 82 |
| <b>Fig. 65.</b> ACU - Presupuesto de la estabilización de silicato de sodio 8%..... | 82 |
| <b>Fig. 66.</b> Índice de plasticidad de muestras naturales.....                    | 83 |

|   |     |
|---|-----|
| <b>Fig. 67.</b> Valor del límite líquido en subrasante C-01.....                          | 84  |
| <b>Fig. 68.</b> Valor del límite líquido en subrasante C-02.....                          | 85  |
| <b>Fig. 69.</b> Valor del límite líquido en subrasante C-03.....                          | 85  |
| <b>Fig. 70.</b> Valor del límite plástico en subrasante C-01.....                         | 87  |
| <b>Fig. 71.</b> Valor del límite plástico en subrasante C-02.....                         | 87  |
| <b>Fig. 72.</b> Valor del límite plástico en subrasante C-03.....                         | 88  |
| <b>Fig. 73.</b> Valor del índice plástico en C-01. ....                                   | 89  |
| <b>Fig. 74.</b> Valor del índice plástico en C-02. ....                                   | 90  |
| <b>Fig. 75.</b> Valor del índice plástico en C-03. ....                                   | 90  |
| <b>Fig. 76.</b> Comparativa de índice de plasticidad entre C-01, C-02 y C-03. ....        | 91  |
| <b>Fig. 77.</b> Determinación del contenido óptimo de humedad C-01. ....                  | 92  |
| <b>Fig. 78.</b> Determinación del contenido óptimo de humedad C-02. ....                  | 93  |
| <b>Fig. 79.</b> Determinación del contenido óptimo de humedad C-03. ....                  | 93  |
| <b>Fig. 80.</b> Valores máximos de densidad seca C-01. ....                               | 95  |
| <b>Fig. 81.</b> Valores máximos de densidad seca C-02. ....                               | 95  |
| <b>Fig. 82.</b> Valores máximos de densidad seca C-03. ....                               | 96  |
| <b>Fig. 83.</b> Comparativa de densidad seca máxima entre C-01, C-02 y C-03. ....         | 97  |
| <b>Fig. 84.</b> Comparativa de contenido óptimo de humedad entre C-01, C-02 y C-03.....   | 97  |
| <b>Fig. 85.</b> CBR (95% de la MDS) en muestras de subrasante C-01.....                   | 98  |
| <b>Fig. 86.</b> CBR (95% de la MDS) en muestras de subrasante C-02.....                   | 99  |
| <b>Fig. 87.</b> CBR (95% de la MDS) en muestras de subrasante C-03.....                   | 99  |
| <b>Fig. 88.</b> Comparación de CBR (95%) en muestras de subrasante C-01, C-02 y C-03..... | 100 |
| <b>Fig. 89.</b> CBR (100% de la MDS) en muestras de subrasante C-01.....                  | 101 |
| <b>Fig. 90.</b> CBR (100% de la MDS) en muestras de subrasante C-02.....                  | 102 |
| <b>Fig. 91.</b> CBR (100% de la MDS) en muestras de subrasante C-03.....                  | 102 |
| <b>Fig. 92.</b> Comparación de CBR (100%) en muestras de subrasante C-01, C-02 y C-03.... | 103 |
| <b>Fig. 93.</b> Materia orgánica (%) de muestras naturales. ....                          | 104 |
| <b>Fig. 94.</b> Niveles de ph en muestras de subrasante C-01.....                         | 105 |
| <b>Fig. 95.</b> Niveles de ph en muestras de subrasante C-02.....                         | 106 |
| <b>Fig. 96.</b> Niveles de ph en muestras de subrasante C-03.....                         | 106 |
| <b>Fig. 97.</b> Niveles de ph en muestras de subrasante C-01, C-02 y C-03.....            | 107 |

## Resumen

La investigación tuvo como objetivo analizar el comportamiento mecánico y de las propiedades químicas de los suelos arcillosos en caminos viales con silicato de sodio. Metodológicamente la investigación presenta un enfoque cuantitativo, de tipo aplicada, y diseño cuasiexperimental. La muestra estuvo conformada por tres calicatas extraídas en la Urb. La Arboleda, distrito de Pimentel, Lambayeque: C-01 y C-02, clasificadas como arcillas de alta plasticidad (CH), y C-03 como (CL). Se realizaron 288 ensayos de laboratorio para determinar distintas propiedades del suelo incorporando silicato de sodio (SS) en proporciones de 4 %, 6 % y 8 % en peso seco. La técnica fue la observación experimental y el instrumento fue la ficha de registro del Manual de Ensayos de Materiales. Resultados: en estado natural, las MDS fueron 1,661 g/cm<sup>3</sup> (C-01), 1,700 g/cm<sup>3</sup> (C-02) y 1,672 g/cm<sup>3</sup> (C-03), con COH de 11,5 %, 10,30 % y 15,20 %, respectivamente. Tras la adición de 8 % de SS, el CBR-100 % se elevó a 11,73 % (C-01), 12,35 % (C-02) y 14,06 % (C-03), lo que representó incrementos de 3,66 a 3,69 veces sobre los valores iniciales y permite reclasificar las subrasantes como “buenas” según el Manual Peruano de Carreteras. Además, el pH aumentó hasta 11,91, generando un entorno fuertemente alcalino que favoreció la formación de enlaces beneficiosos para la compactación del suelo. Las MDS apenas se modificaron (1,660 g/cm<sup>3</sup> en C-01; 1,661 g/cm<sup>3</sup> y 1,560 g/cm<sup>3</sup> en C-02 y C-03) y, aunque el COH ascendió a 14,9 %, 15,0 % y 19,48 %, estos valores se mantienen dentro de rangos manejables para la construcción. Se concluye, que la dosificación de 8 % de silicato de sodio es la proporción óptima para mejorar el comportamiento mecánico y de las propiedades químicas de los suelos arcillosos en caminos viales.

**Palabras clave:** Estabilización de suelos, silicato de sodio, suelos arcillosos, capacidad de soporte, densidad seca máxima.

### Abstract

The objective of this research was to analyze the mechanical behavior and chemical properties of clayey soils on roads containing sodium silicate. Methodologically, the research presents a quantitative, applied approach, and a quasi-experimental design. The sample consisted of three test pits extracted from the La Arboleda Urbanization, Pimentel District, Lambayeque: C-01 and C-02, classified as high-plasticity clays (HC), and C-03 was (CL). A total of 288 laboratory tests were conducted to determine different soil properties, incorporating sodium silicate (SS) in proportions of 4%, 6%, and 8% by dry weight. The technique was experimental observation, and the instrument was the recording form from the Materials Testing Manual. Results: In their natural state, the MDS were 1.661 g/cm<sup>3</sup> (C-01), 1.700 g/cm<sup>3</sup> (C-02), and 1.672 g/cm<sup>3</sup> (C-03), with COH of 11.5%, 10.30%, and 15.20%, respectively. After the addition of 8% SS, the CBR-100% increased to 11.73% (C-01), 12.35% (C-02), and 14.06% (C-03), which represented increases of 3.66 to 3.69 times over the initial values and allowed the subgrades to be reclassified as “good” according to the Peruvian Highway Manual. In addition, the pH increased to 11.91, generating a strongly alkaline environment that favored the formation of bonds beneficial to soil compaction. The MDS barely changed (1,660 g/cm<sup>3</sup> in C-01; 1,661 g/cm<sup>3</sup> and 1,560 g/cm<sup>3</sup> in C-02 and C-03) and, although the COH rose to 14.9%, 15.0% and 19.48%, these values remain within manageable ranges for construction. It is concluded that the dosage of 8% sodium silicate is the optimal proportion to improve the mechanical behavior and chemical properties of clayey soils in roads.

**Keywords:** Soil stabilization, sodium silicate, clayey soils, bearing capacity, maximum dry density.

## Introducción

A nivel mundial, en el campo de la construcción los ingenieros civiles se enfrentan a distintos desafíos durante la ejecución de construcciones en suelos arcillosos, tal es el caso de alrededor de 75 países (Sudáfrica, Malasia, Irán, Tailandia, India, Estados Unidos, Italia, Australia y muchas otras regiones), tratándose de esta manera como un problema mundial [1]. Los suelos arcillosos han generado daños por un valor de 490.000 dólares a distintas infraestructuras pequeñas durante un período de 6 años [2], estimando un aproximado de 57 mil millones en daños a nivel general [3]. Por lo que se considera un problema económico debido a las pérdidas financieras que se generan por los daños dentro de las infraestructuras viales [4]. En el caso de Estados Unidos, se determinó que cada año el 60% de 250.000 infraestructuras viales recién construidas sufren daños menores y debido a la expansión del suelo [5]. Debido a que posee características de contracción e hinchamiento, las cuales causan aproximadamente \$2,3 miles de millones en daños anuales a construcciones pequeñas y superficies de las carreteras, siendo esta cantidad de daño el doble de la cantidad causado por inundaciones, terremotos y huracanes [6]. Así mismo, los daños que se ocasionan debido a la dilatación y contracción de los suelos, se ven influenciados por la deficiencia de las propiedades de los suelos arcillosos [7].

Los suelos arcillosos poseen propiedades las cuales retienen una alta cantidad de agua, siendo de carácter cohesivo, donde sus partículas se expanden y cuando se secan se encogen, por lo que incumple con todas las propiedades de resistencia, permeabilidad o compresibilidad [8]. Se determinó que el coeficiente de permeabilidad alcanza hasta el 240 %, demostrando que durante la compactación de partículas la fórmula experimental de Hazen otorga valores de  $K = 2,02 \times 10^{-3}$  cm/s de permeabilidad [9]. Siendo vulnerables a erosiones durante la temporada de lluvias, provocando hundimientos en las construcciones; sin embargo, se logra mitigar este tipo de problemas mediante distintas técnicas de mejoramiento del suelo [10]. Por lo cual Harun-ur-Rashid [9] observó pérdidas de permeabilidad entre 2,30 mm/día y 13,68 mm/día en zonas rurales de Bangladesh, mientras que Nguyen Huy Long [9] realizó experimentos de permeabilidad en Hanoi, revelando un coeficiente de permeabilidad entre  $10^{-3}$  a  $10^{-5}$  cm/s, determinando que estos suelos se vuelven inestables para realizar alguna construcción.

A pesar de las propiedades deficientes de los suelos arcillosos, los ingenieros civiles buscan la manera de construir infraestructuras viales en estos lugares, uno de estos casos se

da en la construcción de pavimentos de asfalto en subrasantes de baja resistencia, la cual genera una mayor degradación ambiental, ya que se necesitan capas más gruesas, incrementando el uso de recursos naturales y CO<sub>2</sub> [11]. Esto es debido a que los suelos arcillosos no logran soportar pavimentos con cargas vehiculares, por lo que se genera asentamientos e inestabilidad en las carreteras [12]. Este es el caso de la mayoría de los suelos in situ en el norte de la India, los cuales exhiben baja resistencia y rigidez, por lo que no cumplen con el criterio del CBR mínimo (CBR >5%) de la subrasante del suelo, recomendado por el Indian Road Congress (IRC): 37 [11]. Con la finalidad de mejorar las propiedades del suelo arcilloso se han empleado varios métodos, como la estabilización, la cual mejora las propiedades mecánicas del suelo arcilloso, agregando materiales adicionales conocidos como estabilizadores de suelos [13]. Para lo cual estos estabilizadores deben tener en cuenta la mejora de la densidad, el contenido de agua, plasticidad o resistencia al influir en el comportamiento de los diferentes tipos de suelos de mala calidad [14]. Los estabilizadores se pueden ser tanto tradicionales como el cemento o la cal, o estabilizadores no tradicionales de diferentes tipos, que incluyen sales, enzimas, polímeros, resinas, etc. [12]. Sin embargo, el uso del cemento como material estabilizante implica impactos ambientales negativos; CEM-Bureau indicó que, en el año 2017, la producción mundial de cemento alcanzó 4,1 mil millones de toneladas con un aumento anual de 6,3% [4]. Debido a que la estabilización con cemento es sobreexplotada para aumentar la resistencia de los suelos [11].

Se busca innovar empleando nuevos agentes estabilizantes, con la finalidad de obtener mejores resultados en las propiedades de los suelos arcillosos, mediante productos no tradicionales que reduzcan el espacio entre las partículas [7]. Por lo que el uso de aditivos tradicionales, como el cemento y la cal, está quedando de lado, para dar paso a subproductos más sostenibles (como el de humo de sílice, fibras o el silicato de sodio) [4]. En general, hay tres categorías en las que se pueden dividir los estabilizadores de productos químicos; los estabilizadores tradicionales como el cemento Portland o la cal hidratada, los estabilizadores no convencionales que incluyen polímeros o enzimas y los estabilizadores de subproductos, los cuales también contienen polvo de hornos de cal o cemento [13]. Perteneciendo a esta última categoría el silicato de sodio, que según la literatura disponible muestra resultados contradictorios. Tal es el caso que al realizar pruebas triaxiales y de hinchamiento libre en suelos tratados con un contenido de agua óptimo, los beneficios fueron menores incluso con cantidades más altas de líquido estabilizador. Mientras que, para otros investigadores el uso

de silicato de sodio mejoró la resistencia mostrada en la compresión libre y minimizó los límites líquidos e índices de plasticidad de los suelos analizados [15]. Gracias a distintos estudios, se observó que el uso de silicato de sodio influye en los porcentajes de los índices de plasticidad y los límites de consistencia en los suelos arcillosos [16]. Logrando concluir que existen diversas variaciones en los porcentajes óptimos, sin darnos una respuesta clara de la proporción adecuada para un tipo de suelo en específico.

Dentro del contexto nacional, la presencia de suelos arcillosos ha sido una problemática relevante para la construcción debido a su comportamiento complejo, por ello el MTC propuso mejorar los suelos defectuosos empleando técnicas, tales como la estabilización de suelos [17]. Ese es el caso del suelo en Chachapoyas, el cual posee una baja resistencia al corte y altas deformaciones, por lo que, su subrasante no asegura la estabilidad ni durabilidad de las estructuras viales [18]. En Trujillo, se observó que los suelos arcillosos debido a la gran absorción de agua, ven reducida su capacidad de soporte vehicular [19]. Mientras que en Moyobamba los caminos viales presentan suelos arcillosos, los cuales se van deteriorando por las intensas lluvias, causando incomunicaciones y enormes pérdidas económicas [17]. A nivel regional, en el Norte del Perú, según el MTC existen un total del 36% de caminos viales los cuales se componen de suelos arcillosos, de los cuales según el MTC del 2005 y el IGV de Lambayeque del 2008 determinaron un 3.6% y 2.3% pertenecen a Lambayeque [20]. Dando un coste anual estimado debido a los daños estructurales de las entradas de vehículos, aceras y suelos de sótanos agrietados construidos en suelos arcilloso de 16 mil millones de dólares, según AMEC [21]. Por lo que, el desarrollo económico y social de la población se ve afectado debido a la dificultad para la construcción de carreteras, debido a los obstáculos para el intercambio de mercancías o traslado de personas. Por lo que, para mejorar las propiedades de este tipo de suelos, se realiza una estabilización, empleando los materiales necesarios, aunque la mayoría de estos son cementantes, los cuales son muy poco ecológicos [8].

Dentro de Chiclayo; Pimentel posee distintos caminos los cuales presentan suelos arcillosos, siendo deteriorados por las intensas lluvias, causando enormes pérdidas económicas, y deja incomunicado a los pobladores; siendo esto una preocupación próxima debido a los fenómenos climatológicos que se acercan. Dentro de esta localidad podemos evidenciar que existen zonas rurales las cuales cada ven se van urbanizando a mayor medida, sin embargo, no poseen ingresos pavimentados o estables, debido a las pésimas

características que posee el suelo para realizar una pavimentación adecuada, las cuales cuentan con apariciones de charcos o desniveles, por lo que se evidencia la necesidad de incrementar la capacidad portante de la subrasante. La zona de estudio es la carretera de ingreso a la Urb. La Arboleda, altura de la Joyita, La Garita, Pimentel, la cual presenta esta gran problemática, desniveles en todo el tramo producto de las lluvias y el levantamiento del polvo al transitar los carros. Este tramo de ingreso a urbanizaciones como Las Villas de Pimentel, La Arboleda de los Portales, Chacupe Alto y Bajo y diversos lugares todavía agrícolas es bastante transitado por diversos tipos de transporte como mototaxis, taxis, camionetas, combis, camiones y volquetes que continuamente transportan material porque son urbanizaciones en crecimiento, los cuales ven sus costos de transporte aumentar en un 50% [22]. Es de entender que los huecos que presentan con el paso del tiempo continúan siendo más amplios y profundos por lo que los mismos pobladores tienden a rellenarlo con arena y piedras.

Por lo tanto, la mejora del comportamiento de los suelos arcillosos empleando agentes estabilizantes como el silicato de sodio nos permitiría adaptar el suelo a los requerimientos deseados con una fácil adquisición económica y con una reducción en el impacto ambiental. Además, al ser económico puede incentivar a las instituciones públicas encargadas del mantenimiento y supervisión de las vías, a otorgarles una mayor atención, debido a que no se le destina un presupuesto adecuado por lo que las estabilizaciones quedan incompletas, buscando así beneficiar a la población y comunidades. Así mismo la originalidad de este trabajo radica en el estudio de propiedades físicas, mecánicas y químicas del suelo luego de combinarse con distintas dosificaciones de silicato de sodio para determinar el porcentaje más adecuado para la mejora de los suelos arcillosos en la ciudad de Pimentel.

Ante la problemática expuesta, se pretende utilizar el silicato de sodio como material estabilizante. En base a todo lo antes mencionado, surge la siguiente interrogante: ¿Cuál será la medida óptima de aplicación de silicato de sodio para mejorar el comportamiento mecánico y de las propiedades químicas de los suelos arcillosos en caminos viales?

La justificación de investigación se describe empleando los siguientes aspectos: según el comportamiento técnico, la ingeniería civil busca abordar el desafío que presentan los suelos altamente expansivos y contráctiles en la construcción de infraestructuras y aunque existan distintos materiales tradicionales que mejoran su comportamiento mediante la formación de enlaces físicos y químicos, existen varios estabilizadores químicos que aumentan la

resistencia con menos tiempo de curado y mayor durabilidad en comparación con los estabilizadores tradicionales [10]. Sin embargo, el uso de estos materiales ha recibido una atención limitada a pesar de sus ventajas potenciales, lo cual estanca el avance tecnológico para la búsqueda de materiales que sean mucho más beneficiosos [4]; según su relevancia social, el silicato de sodio ha demostrado ser una solución prometedora para mejorar las propiedades mecánicas, físicas y químicas de estos suelos, y su estudio a fondo puede aportar valiosos conocimientos que beneficien tanto a la industria como a la sostenibilidad ambiental, siendo utilizada por las municipalidades y por los ingenieros de carreteras mejorar las características de las diversas subrasantes arcillosas. Lo cual beneficiaría a usuarios que transitan diariamente por estas zonas, reduciendo sus gastos y tiempos de traslado, dando un cómodo acceso a los servicios de salud, educación y centros laborales, evitando un desgaste acelerado de los vehículos que la usan. Dentro de su importancia ambiental, el uso de silicato de sodio como estabilizador de suelo es una forma efectiva de mitigar los impactos ambientales de la construcción y el mantenimiento de carreteras. Este material puede ayudar a reducir la erosión del suelo, mejorar la permeabilidad del suelo y reducir la contaminación del suelo, siendo el reemplazo adecuado para ciertos estabilizadores que provocan un alto impacto ambiental como el cemento [4]; según su relevancia económica, los daños causados por este tipo de suelo generan distintas pérdidas financieras o costos de seguros por los daños generados [4], por lo que para minimizar los daños que se ocasionan debido a la dilatación y contracción de los suelos, requiere una estabilización, mejorando así sus propiedades [7]. Por lo cual, al aplicar el uso de silicato de sodio como agente estabilizador, se busca mejorar el suelo y mitigar los daños que se ocasionen a los vehículos que circulan por este tipo de suelos. Además, que es mucho más económica, ya que en Ecuador se realizó un análisis de costos por km de la vía, para determinar el costo por kilómetro de vía con un promedio de ancho de calzada de 6 m [23]. La comparación del costo por km con estabilizante cementante es de \$ 34 558.75 y el realizado con estabilizante químico es \$ 3 460.56. Lo que se puede establecer como un costo de \$ 6 911.75 (Cementante) y \$ 3 460.56 (Químico) anuales, por lo que se puede evidenciar que el gasto del estabilizante cementante anualmente es aproximadamente el doble que el del estabilizante químico [23], por lo que teniendo en cuenta su relevancia práctica, debido a que su efectividad se ha visto en distintos tipos de suelo obteniendo distintas dosificaciones óptimas de silicato de sodio, por ejemplo, Moayedí (2011) determinó que la dosificación óptima en caolinitas naturales es de 5mol/L; Galindo & Avellaneda (2016) determinaron 6.3% en peso para las arcillas de Bogotá; y Latifi, Eisazadeh & Marto (2014) y un 9% para lateritas. En otras palabras, no solo se busca ampliar

la comprensión sobre la efectividad de este agente estabilizador, sino también proporcionar directrices que respalden las decisiones seleccionadas en los proyectos de ingeniería, contribuyendo así a la resiliencia y durabilidad de las infraestructuras y reduciendo los costos económicos y ambientales asociados con suelos problemáticos. La determinación del porcentaje óptimo se dará mediante la interpretación y análisis de los resultados de los ensayos de laboratorio donde se espera encontrar una mejora para las propiedades físicas, mecánicas y químicas del suelo investigado. Se definió como objetivo general: analizar el comportamiento mecánico y de las propiedades químicas de los suelos arcillosos en caminos viales con silicato de sodio. A su vez, como objetivos específicos los siguientes: caracterizar el suelo arcilloso en su estado natural, de acuerdo al método SUCS y AASHTO; obtener las curvas de compactación del suelo arcilloso en su estado natural y del suelo con tres concentraciones de silicato de sodio; determinar la capacidad portante del suelo en su estado natural y del suelo con las concentraciones de silicato de sodio; establecer los parámetros de materia orgánica del suelo en su estado natural; comparar el pH del suelo en su estado natural y del suelo con concentraciones de silicato de sodio y por último, evaluar costo y beneficio del uso de silicato de sodio en la mejora de los suelos.

## **Revisión de la literatura**

### **Antecedentes**

En el 2021 en Tamiyyah, Ahmed, et al. [15], probaron en un estudio la viabilidad de depender únicamente del silicato de sodio para estabilizar suelos hinchables. Para llegar a los resultados, analizó en el laboratorio una muestra de clorito expansivo. Los efectos fueron evaluados durante el período de pruebas para las muestras de referencia a las edades de 0, 7, 14, 30 y 90 días para determinar el hinchamiento. Los resultados determinaron que la durabilidad de la muestra junto al uso de silicato de sodio (en una proporción del 10%) logró mejorar los aspectos mecánicos del suelo y eliminar su potencial de hinchamiento. Además, mejoró el índice de CBR en un aproximado del 900 % en comparación con la muestra de inicial. Después de eso, gracias al ensayo de permeabilidad se determinó el coeficiente de cambio de volumen con un cambio de nivel de tensión de 25 a 63 kPa.

Yifan, et al. [24], en el 2023 en Shanghai, emplearon el silicato de sodio sólido para activar precursores binarios, para sintetizar un geo polímero de un solo componente para la estabilización de arcilla blanda. Empleando el período de curado (7, 14 y 28 días) y el contenido de aglutinante (0,20 y 0,25) sobre las propiedades mecánicas. Luego se evaluaron

las arcillas mediante pruebas UCS, MIP, DRX y SEM-EDS. Los resultados experimentales indicaron que se logró una proporción apropiada con una relación molar de silicato de 1,0 y una concentración molar de 3 mol/L.

En el 2023 dentro de Tamil Nadu, Dharini, et al. [25] analizó la resistencia de Proctor estándar y a la compresión libre, con la finalidad de conocer el porcentaje óptimo para estabilizar arcilla expansiva, adecuado de contenido para la estabilización del suelo de arcilla expansiva. Se emplearon porcentajes de 10%, 8%, 6%, 4%, 2% y la muestra natural para calcular la resistencia a compresión libre y la capacidad de carga del suelo. Los resultados demostraron que el porcentaje óptimo fue 10%, con lo que CBR de suelos tratados fue 7,86 veces el valor de los suelos no tratados.

Liuyang, et al., [26], en el 2021 en Gansu, estudiaron la influencia del silicato de sodio en las características de ingeniería del loess solidificado por geopolímeros, tales como el silicato de sodio con diferentes. A través de pruebas de resistencia a la compresión libre, corte directo, desintegración, absorción de agua y pruebas de adsorción física (BET). Las proporciones de silicato de sodio empleadas fueron ajustadas a 1,5, 2,0 y 3,2. Las muestras fueron preparadas mediante compactación ligera y después del curado natural en interiores a una temperatura de 20 °C y una humedad del 55 % durante 28 días. La densidad seca disminuyó en aproximadamente 0,15 g/cm<sup>3</sup> cuando el módulo del silicato de sodio aumentó de 1,5 a 3,2. El contenido de humedad óptimo aumenta cuando el módulo de silicato de sodio se encuentra en la sección 1.5-2.0. La variación del módulo entre 1.5 a 3.2 incremento los contenidos de humedad de 14,13% a 18,08%, 13,81% a 17,73% y 13,63% a 17,48%. La muestra con un módulo 1,5 de silicato de sodio tiene una resistencia a la compresión de 3,42 MPa. Los resultados describieron que cuanto menor sea el módulo y mayor el grado de Baume del silicato de sodio, menor será el contenido de humedad óptimo, mayor será su densidad seca máxima, su resistencia a la compresión libre y la cohesión del loess solidificado. Además, será más débil la desintegración y menor será la absorción de agua natural y saturada del loess solidificado.

En el 2016, Mohammad, et al. [27], en Australia Occidental realizaron un total de 84 pruebas de corte directo (DST) en composiciones de silicato de sodio para determinar cómo afecta las propiedades de la arcilla. Se mezcló un porcentaje constante de 2% (en peso) de arcilla con tres proporciones diferentes de silicato de sodio (1%, 1,5% y 2,5% en peso de suelo seco) en base a tiempos de curado de 7, 14 y 28 días bajo tres tipos de carga vertical,

siendo 50 kPa, 150 kPa y 250 kPa respectivamente. Los resultados indicaron que la resistencia al corte del suelo arcilloso no fue muy efectiva al agregar porcentajes de silicato de sodio (1% del peso en silicato de sodio) bajo una temperatura normal. Siendo confirmada por los patrones de difracción de rayos X de la composición final mediante técnicas de análisis de fase SEM/EDS y XRD.

En el 2015, Cong, et al. [28], investigaron la posibilidad de utilizar silicato de sodio mezclados para mejorar la resistencia de la arcilla blanda en Shanghai, China. Se probó la resistencia a la compresión libre de arcilla estabilizada a diferentes edades. Donde se empleó mecanismos que controlan el desarrollo de la resistencia mediante un análisis mineralógico (XRD) y un análisis microestructural (SEM). Los resultados determinaron que las muestras con 1 % a los 60 días presentan aumento de un 17 % con respecto a su resistencia. Se pudo observar un efecto relativamente grande sobre las resistencias a los 7 y 28 días en el caso se une una proporción de masa de 5:1:2. Al añadir un 16% a las edades de 7, 28 y 60 días, estos resultados fueron mayores que las de las muestras iniciales. Esto implica que el silicato de sodio, es un estabilizador de suelos más respetuoso con el medio ambiente.

Aguilar y Cárdenas [29], en el 2023 en Chorrillos, analizaron y determinaron los porcentajes de la proporción adecuada del silicato de sodio considerando dosificaciones de 4%, 6%, 8% y 10%. La muestra se clasificó como una arena pobremente gradada, que de acuerdo a la clasificación SUCS es denominada SPSM. Se logró una mejora en el Proctor de la muestra del terreno natural, determinado un intervalo entre el 4% y 10% adecuado de silicato para adicionarle, con lo que se obtuvo un resultado de máxima densidad seca en el ensayo de Proctor. Además, el CBR incrementó de 5.5% (suelo incompetente) hasta 47.7% (suelo bueno), presentando una mejoría favorable.

En 2017 dentro de Vichada, Caballero [30] analizó las propiedades de resistencia y durabilidad de los suelos arcillosos de baja plasticidad con silicato de sodio. Se emplearon distintos porcentajes del aditivo para edades de 14, 7 y 0 días, las cuales fueron saturadas y secadas de manera inmersiva. La adición del estabilizante químico, incrementó los ángulos de fricción desde  $16^\circ$  hasta  $21^\circ$ , la cohesión pasó desde  $0.61 \text{ kg/cm}^2$  hasta  $0.12 \text{ kg/cm}^2$ , la  $C_u$  aumentó desde  $0.12 \text{ kg/cm}^2$  hasta  $0.45 \text{ kg/cm}^2$ , la resistencia del suelo llegó a  $12 \text{ kg/cm}^2$ , el índice de desleimiento sobrepasó los 70 %, al emplear únicamente un 3% de peso perteneciente a la muestra, pasando el módulo de elasticidad desde  $595 \text{ kg/cm}^2$  hasta  $1659$

kg/cm<sup>2</sup>. Al emplear 1.5 y 0.9% de silicato de sodio, la resistencia y rigidez aumento desde 595 kg/cm<sup>2</sup> hasta un intervalo de 924-1348 kg/cm<sup>2</sup>). Lo que concluyó que el 3% de silicato de sodio equiparó la resistencia otorgada por el uso de 7% de cemento como estabilizante.

En Piura en el 2021, Chávez [31] analizó la influencia de emplear el silicato de sodio en propiedades geomecánicas como agente estabilizante para los suelos arcillosos, con la finalidad de desarrollar plataformas de rodadura solidad con pocos alabeos y ondulaciones. Se usaron los ensayos de Proctor modificado, granulometría, CBR y límites de consistencia para las muestras con porcentajes de aditivo 10, 8, 6, 4 y natural, con lo que se buscó la cantidad adecuada de aplicación. Los resultados resaltaron que empleando un 7.77% de silicato de sodio el CBR perteneciente a la muestra natural incrementó desde 6% (suelo insuficiente o regular) hasta un 39.75% (> 30%) siendo adecuado para la construcción.

### **Bases legales**

#### **MTC 2014-MANUAL DE CARRETERAS, SECCIÓN SUELOS Y PAVIMENTOS**

Presenta información técnica las cuales son empleadas dentro de las estructuras de las subrasantes, los capítulos IV y IX ofrecen un amplio catálogo sobre la metodología y estabilización empleando diversas características para los distintos tipos de suelos [32].

#### **EG 2013-MANUAL DE ESPECIFICACIONES TÉCNICAS PARA CONSTRUCCIÓN**

Dentro del capítulo III, se describen distintos ensayos que se suelen realizar para el estudio de la influencia de los estabilizantes [32].

#### **NORMA E.050-SUELOS Y CIMENTACIONES**

Describe los criterios para la realización de los ensayos enfocados a la mecánica de suelo, con la finalidad de verificar algún inconveniente en los terrenos de construcción, por factores internos o externos [32].

#### **AASHTO M 145-CLASIFICACIÓN DE SUELO Y MEZCLAS PARA CONSTRUCCIÓN DE CARRETERAS**

Establece 7 grupos desde el A-1 hasta el A-7, basándose en los límites de consistencia y la distribución granulométrica, dentro de estas categorías los limos—arcillosos están comprendidos desde el grupo A-4 hasta el A-7 [33].

### NTP 339.134-SISTEMA UNIFICADO DE CLASIFICACIÓN (SUCS)

Para este sistema se emplean los resultados de límites de consistencia, índices de plasticidad y granulometría, con la finalidad de establecer a los suelos dentro de: orgánicos, gravas, arcillas, limos y arenas o cualquier combinación que se pueda dar [33].

### MTC E 108-CONTENIDO DE HUMEDAD

El contenido de humedad es determinado en porcentaje el cual varía entre los diferentes valores de los estados plástico y líquido [32].

### MTC E 107-GRANULOMETRIA DE SUELOS POR TAMIZADO

Determina la cantidad del tamaño de las partículas, calculando el peso del material pasante hasta llegar al tamiz N° 200 [32].

### MTC E 110-LÍMITE LIQUIDO

El contenido de humedad permite la clasificación dentro de los estados plástico y líquido, para lograr clasificar los granos finos pertenecientes a los suelos [32].

### MTC E 111-LÍMITE PLÁSTICO E ÍNDICE DE PLASTICIDAD

Conociendo el límite líquido se logra determinar tanto el límite plástico como el índice de plasticidad del suelo [32].

### MTC E 115-COMPACTACION EN LABORATORIO CON ENERGIA MODIFICADA

Se busca determinar la correlación del peso unitario seco y el contenido de agua, desarrollando la curva de compactación generada con energía modificada [32].

### MTC E 132- CBR EN LABORATORIO

El valor de soporte indica la resistencia del suelo a nivel de subbase, subrasante o base [32].

### MTC E 118- PERDIDA POR IGNICION DE MATERIA ORGANICA

Determina la oxidación de la materia orgánica con materia vegetal no descompuesta [32].

### MTC E 129-pH EN LOS SUELOS

Se determina los índices de alcalinidad dentro de los componentes del suelo, evitando alterar las propiedades naturales de los suelos [32].

## Bases teóricas

Con relación a las bases teóricas, éstas se encuentran fundamentadas de acuerdo a las variables de la investigación:

Respecto a la variable Dependiente: Comportamiento de suelos arcillosos

En el 2016, Galindo y Avellaneda [34] mencionaron que se pueden realizar modificaciones químicas o físicas aplicadas a las propiedades geotécnicas de los suelos respectivos, con la finalidad de mejorarlos para su posterior uso. Las distintas técnicas satisfacen los requisitos establecidos por las normas vigentes, mejorando las propiedades de los suelos como, por ejemplo, mediante el aumento su capacidad portante. Los agentes químicos son determinados como aglomerantes con los cuales se logra realizar las técnicas de estabilización. Por lo que en soluciones acuosas contienen características químicas, con lo que logra adherirse a suelos cohesivos y su dispersión.

Estos procesos son conjuntos de procedimientos físico-químicos, químicos y mecánicos-físicos, los cuales mejoran las propiedades de los suelos, volviendo adecuado al material. Dentro de los cuales se emplean distintos materiales mejoran principalmente las características mecánicas-físicas de los suelos los cuales no poseen suficiente capacidad portante o demasiada expansividad [35]. Además, se le puede denominar como estabilización, dentro de la cual existen los siguientes tipos:

- La estabilización física, en el cual se le agrega materiales con una granulometría adecuada [33].
- La estabilización química, emplea sustancias químicas, por lo que cambia las propiedades de los suelos [36].
  - Cemento Portland
  - Silicato de Sodio
  - Cloruro de sodio.
  - Cal
- La estabilización mecánica, mejora el suelo sin generar reacciones químicas de gran magnitud [37].

En conclusión, incrementa las propiedades físicas que contine el suelo empelando métodos mecánicos, físicos o químicos; siendo empleada cuando las subrasantes son insuficientes o pobres con un porcentaje de CBR menor al 6% [33].

Al realizar la estabilización de suelos se deberá tener en cuenta lo siguiente:

- Para las subrasantes que posean un CBR menor o igual a 6%, en suelos blandos, áreas húmedas, será necesario un mejoramiento, siendo responsabilidad y criterio del ingeniero [38].
- Para las subrasantes limosas o arcillosas, la presencia de agua podría afectar las capas de pavimento adyacente debido a su nivel de capilaridad [39].
- Se debe tener en cuenta el nivel freático de las subrasante para evitar inestabilidad al momento de realizar la estabilización [40].

### **Suelos Arcillosos**

Los suelos arcillosos son están compuestos de partículas las cuales pueden ser inorgánicas u orgánicas, debido a los procesos de desintegración química o mecánica. Para luego clasificar los materiales terrosos de los suelos, dependiendo de sus índices de sedimentación [41].

Los cuales se generan por la meteorización la cual puede ser bilógica, física o química, son trasladados por glaciares, corrientes de aire o incluso el agua. Los tipos de suelos se categorizan en dos [41]:

- Suelos residuales: Definidos como suelos antiguos conformados por residuos de las intemperizaciones de las rocas, mediante acciones biológicas, físicas o químicas [41].
- Suelos transportados: Denominados así debido a que fueron trasladados mediante el agua y el viento, en su mayoría son suelos sueltos o blandos, los cuales son inestables para las construcciones [37].

Gracias a la geología podemos determinar que los glaciares contribuyeron en la creación de los suelos, debió a la hipótesis que el clima en distintas partes del planeta era capaz de triturar rocas y expandirlas por los territorios [42].

Además, a niveles de subrasante suelen contener materia orgánica las cuales afectan las propiedades físicas. Permitiendo su clasificación gracias a sus propiedades físicas, las cuales

dependen de los estratos y de la profundidad en la cual fue extraída la muestra [42]. Estas pueden variar en:

- Textura y color: Según la textura logran ser, lisas, pulidas o rugosas, y el color dependerá de la habilidad del observador para determinar su composición química [43].
- Forma de las partículas: Son clasificadas como cantos vivos, rodados, chatas, entre otras. Están familiarizadas con la capacidad portante del suelo, resistiendo fuerzas verticales o desplazamientos horizontales [44].
- Porosidad: Es la relación del volumen total perteneciente al suelo y el volumen de vacíos, con valores de  $n$  entre 0 (sólido perfecto) y 100% (sólido irreal) [37].
- Índice de vacíos: El cual depende del grado de compactación que posee el suelo, siendo el enlace del volumen de partículas sólidas y el volumen de vacíos [45].

El MTC clasifica los suelos empleando los métodos de ASTM D-2487 (SUCS) y AASHTO M-145 Y); en donde el segundo es más usado en el desarrollo de vías [46].

Además de emplear la norma AASHTO M-145, la cual es empleada para categorizar los materiales de las obras viales de características granulares, incluyendo las subrasantes. Divididos en 7 grupos y en 2 subgrupos. La clasificación se debe realizar mediante ensayos granulométricos y los límites de Atterberg, del cual dependerá el porcentaje del suelo pasante mediante el tamiz N 200 ASTM [47].

| CLASIFICACIÓN GENERAL  | MATERIALES GRANULARES<br>(35% o menos pasa por el tamiz N°200) |        |            |                                  |        |        |        | MATERIALES LIMOSO ARCILLOSO<br>(más del 35% pasa el tamiz N°200) |        |                   |            |
|--|--|--------|------------|----------------------------------|--------|--------|--------|--|--------|-------------------|------------|
|  | A-1  |        | A-3        | A-2                              |        |        |        | A-4  | A-5    | A-6               | A-7        |
|  | A-1-a  | A-1-b  |            | A-2-4                            | A-2-5  | A-2-6  | A-2-7  |  |        |                   | A-7-5      |
| <b>Porcentaje que pasa</b>                                       |  |        |            |                                  |        |        |        |  |        |                   |            |
| N°10 (2 mm)  | 50 máx   | -      | -          | -                                |        |        |        | -  |        |                   |            |
| N°40 (0.425 mm)  | 30 máx   | 50 máx | 51 mín     | -                                |        |        |        | -  |        |                   |            |
| N° 200 (0.075 mm)  | 15 máx   | 25 máx | 10 máx     | 35 máx                           |        |        |        | 36 mín   |        |                   |            |
| <b>Características de la fracción que pasa por el tamiz N°40</b> |  |        |            |                                  |        |        |        |  |        |                   |            |
| Límite Líquido (LL)  | -  |        | -          | 40 máx                           | 41 mín | 40 máx | 41 mín | 40 máx   | 41 mín | 40 máx            | 41 mín (2) |
| Índice de Plasticidad (IP)                                       | 6 máx  |        | NP (1)     | 10 máx                           | 10 máx | 11 mín | 11 mín | 10 máx   | 10 máx | 11 mín            | 11 mín     |
| <b>Constituyentes Principales</b>                                | Fragmentos de piedra, grava y arena                            |        | Arena fina | Grava y arena arcillosa o limosa |        |        |        | Suelos limosos   |        | Suelos arcillosos |            |
| <b>Características como subgrado</b>                             | Excelente a bueno  |        |            |                                  |        |        |        | Pobre a malo   |        |                   |            |

Fig. 1. Descripción cualitativa de depósitos granulares [33].

La norma ASTM D-2487 (SUCS), clasifica de manera estandarizada empleando símbolos de grupo, con prefijos y sufijos según sus propiedades, siendo necesarios los límites de consistencia y el análisis granulométrico [37].

| DIVISIONES PRINCIPALES  |   | SÍMBOLOS   | NOMBRES TÍPICOS   | IDENTIFICACIÓN DE LABORATORIO                                  |  |   |  |
|---|---|--|---|--|--|---|--|
| SUELOS DE GRANO GRUESO<br>Más de la mitad del material retenido en el tamiz N°200 | GRAVAS<br>Más de la mitad de la fracción gruesa es retenida por el tamiz N°4 (4.76mm) | Gravas Limpias (sin o con pocos finos)           | GW  | Grava bien graduada, mezclas gravosas, poco o ningún fino.     | Determinar el porcentaje de grava y arena en la curva granulométrica.<br>Según el porcentaje de finos (fracción inferior al tamiz N° 200), los suelos de grano grueso se clasifican como sigue: 12% GM, GC, SM, SC 5 al 12% casos límite que requieren usar doble símbolo. | Cu>4, Cc entre 1 y 3.   |  |
|   |   |  | GP  | Grava mal graduada, mezclas grava - arena, poco o ningún fino. |  | No cumplen con las especificaciones de granulometría para GW.   |  |
|   |   | Gravas con Finos (apreciable cantidad de finos)  | GM  | Grava limosa, mezclas grava, arena, limo.                      |  | Límites de Atterberg debajo de la línea A o IP<4.   | Encima de la línea A con IP entre 4 y 7 son casos límite que requieren GC doble símbolo. |
|   |   |  | GC  | Grava arcillosa, mezclas grava - arena arcillosas              |  | Límites de Atterberg sobre la línea A con IP>7.   |  |
|   | ARENAS<br>Más de la mitad de la fracción gruesa pasa por el tamiz N°4 (4.76mm)        | Arenas Limpias (pocos o sin finos)               | SW  | Arena bien graduada.   | Cu>6, Cc entre 1 y 3.  |   |  |
|   |   |  | SP  | Arena mal graduada, arenas gravosas, poco o ningún fino.       | Cuando no se cumplen simultáneamente las condiciones para SW   |   |  |
|   |   | Arenas con Finos (apreciable cantidad de finos)  | SM  | Arenas limosas, mezclas arena y limo.                          | Límites de Atterberg debajo de la línea A o IP<4.  | Los límites situados en la zona rayada con IP entre 4 y 7 son casos de frontera que requieren de doble símbolo. |  |
|   |   |  | SC  | Arenas arcillosas, mezclas arena - arcilla.                    | Límites de Atterberg sobre la línea A con IP>7.  |   |  |
|   |   |  |   |  |  |   |  |
|   |   |  |   |  |  |   |  |
| SUELOS DE GRANO FINO<br>Más de la mitad del material pasa por el tamiz N° 200     | Limos y Arcillas<br>Límite Líquido menor de 50  | ML   | Limos inorgánicos y arenas muy finas, limos limpios, arenas finas, limosas o                              |  |  |   |  |
|   |   | CL   | Arcillas inorgánicas de plasticidad baja a media, arcillas con grava, arcillas arenosas, arcillas limosas |  |  |   |  |
|   |   | OL   | Limos orgánicos y arcillas orgánicas limosas de baja plasticidad.   |  |  |   |  |
|   | Limos y Arcillas<br>Límite Líquido mayor de 50  | MH   | Limos inorgánicos, suelos arenosos finos o limosos con mica o diatomeas, limos elásticos.                 |  |  |   |  |
|   |   | CH   | Arcillas inorgánicas de alta plasticidad, arcillas gruesas.   |  |  |   |  |
|   |   | OH   | Arcillas orgánicas de plasticidad media a alta, limos orgánicos.  |  |  |   |  |
|   |   |  |   |  |  |   |  |
| Suelos muy Orgánicos  | P   | Turba y otros suelos de alto contenido orgánico. |   |  |  |   |  |

Fig. 2. Clasificación según SUCS [33].

Para determinar el comportamiento de los suelos, se establece una correlación en la cual se determina sus similares entre las distintas clasificaciones desde una perspectiva geotécnica [46].

| Relación entre los sistemas de clasificación<br>AASHTO M-145 y ASTM D-24 |  |
|--|--|
| Clasificación de Suelos según AASHTO M-145                               | Clasificación de Suelos según ASTM D-2487 (SUCS) |
| A-1-a  | GW, GP, GM, SW, SP, SM                           |
| A-1-b  | GM, GP, SM, SP                                   |
| A-2  | GM, GC, SM, SC                                   |
| A-3  | SP   |
| A-4  | CL, ML   |
| A-5  | ML, MH, CH                                       |
| A-6  | CL, CH   |
| A-7  | OH, MH, CH                                       |

Fig. 3. Clasificación según AASHTO [33].

### Propiedades físicas:

- Contenido de humedad, emplea la normativa MTC E 108, en la cual la humedad es la relación porcentual del peso de agua presente dentro de la masa de suelo. Además

de relacionar la resistencia de los suelos subyacentes presentando condiciones de densidad y humedad [46].

- Análisis granulométrico por tamizado, emplea los tamices establecidos por la norma (MTC EM 107) para determinar la distribución granulométrica este ensayo, los tamices y componen de marcos rígidos sujetos con mallas con una distancia entre los hilos llamada abertura del tamiz, en el cual el suelo es filtrado [46].

| Tipo de Material |         | Tamaño de las partículas        |
|------------------|---------|---------------------------------|
| Grava            |         | 75 mm - 4.75 mm                 |
| Arena            |         | Arena gruesa: 4.75 mm - 2.00 mm |
|                  |         | Arena media: 2.00 mm - 0.425 mm |
|                  |         | Arena fina: 0.425 mm - 0.075 mm |
| Material fino    | Limo    | 0.075 mm - 0.005 mm             |
|                  | Arcilla | Menor a 0.005 mm                |

Fig. 4. Clasificación según análisis granulométrico [33].

Posterior al tamizado se determinan los porcentajes según la malla por la cual pasa, según la gráfica semilogarítmica presente:

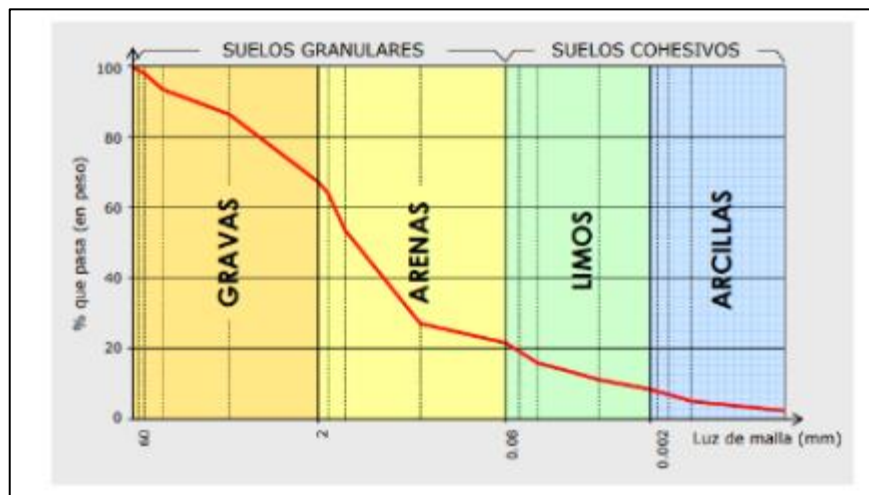


Fig. 5. Análisis granulométrico en porcentaje [33].

- Límite de Atterberg, identifica la sensibilidad del comportamiento perteneciente a los suelos teniendo en cuenta los contenidos de humedad, basándose en los distintos límites de los estados plástico, sólido y líquido [33].
  - Límite líquido (LL), posee la capacidad de moldearse al llegar a un estado plástico desde un estado líquido [42].

- Límite plástico (LP), suele quebrarse al pasar de estado plástico a semisólido [42].
- El índice de plasticidad, es determinado con la diferencia de los límites plásticos y líquidos del suelo [42].

La plasticidad de las arcillas posee distintos estados de consistencia los cuales se alteran con la ausencia o presencia de agua los cuales pueden pasar de carácter sólido a líquidos [33], según Atterberg son:

- Estado líquido.
- Estado semisólido.
- Estado semilíquido.
- Estado sólido.
- Estado plástico.

Además, se observan los distintos estados y los límites entre ellos.

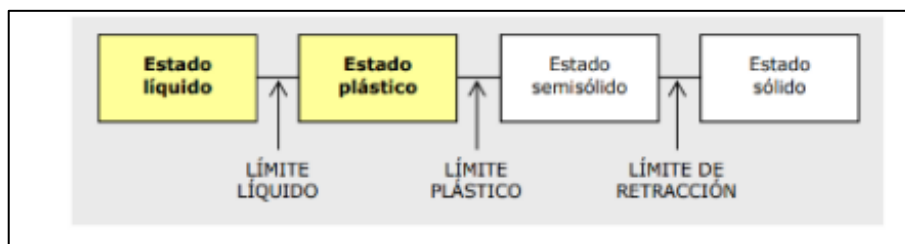


Fig. 6. Estados de consistencia [33].

Para determinar el índice de plasticidad perteneciente al suelo se deberán conocer los límites plásticos y líquidos con que se logrará clasificar al suelo.

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

Fig. 7. Clasificación según el índice de plasticidad [33].

### Propiedades mecánicas

Las propiedades que presenta los suelos arcillosos son:

- Proctor modificado, los cuales según la norma técnica del MTC E 115, determinan la humedad óptima para la compactación de los suelos [48]. Empleando la compactación de los laboratorios, con el objetivo de relacionar el peso unitario y el contenido de agua.
- CBR (El californian Bearing Ratio), es normado por el MTC EM 132, al clasificar el suelo se realiza el ensayo de CBR con el objetivo de determinar la capacidad de soporte, en el cual se observa una densidad seca del 95 % (MDS), junto con un 2.54 mm en obtenida gracias a la penetración de carga ejecutada en una pulgada, empleando la velocidad de carga de 1.27 mm/min; tenido relación directa entre la presión del pistón requerida para la penetración del suelo a la profundidad requerida [48]. El ensayo también permite determinar la expansión mediante sumergir la muestra durante 4 días, en la cual se aplica una carga con el uso de lecturas al inicio y final.

### Propiedades químicas

- El MTC 118 determina que la Materia Orgánica, establece la calidad ya que los suelos con altos porcentajes suelen ser menos resistentes y erosivos [49]. El silicato de sodio no se descompone a temperaturas de 1000 °C [50]. Por lo tanto, el silicato de sodio no interferirá con el ensayo de materia orgánica.

Dentro de este marco normativo, en el Manual Geotécnico [51], determinó la clasificación de los suelos mediante el porcentaje, dividiéndolos de la siguiente manera:

| Classification      | Percentage             |
|---------------------|------------------------|
| With Organic Matter | $4 < OC^* \leq 15$     |
| Organic Soil (A-8)  | $16 \leq OC^* \leq 30$ |
| Peat (A-8)          | $OC^* > 30$            |

\* Organic Content in Percentage

**Fig. 8.** Clasificación según su materia orgánica [51].

- Ph En Los Suelos, MTC E 129, determina si los suelos son más estables y duraderos, y si son menos susceptibles a la erosión [52]. Por lo que según las propiedades del ph, se recomienda que este valor logre acercarse al 12.4, recomendado para no interferir y mejorar la estructura del suelo [53].

Respecto a la variable Independiente: Incorporación del Silicato de sodio

Al cual también se le conoce como vidrio soluble, llegando a conformar los ácidos silícicos en las diversas soluciones acidas. Al momento de calentarse se genera un tipo de gel viscoso denominado "gel de sílice", el cual es empleado para distintas funciones debido a ser una sustancia dura. Entre las cuales podemos observar propiedades dispersantes, anticorrosivas, etc. Generado de la fusión de carbonato de sodio u arena sílice fundidas a altas temperaturas, con una nomenclatura  $\text{Na}_2\text{SiCO}_3$  [54].

Los aditivos fabricados con silicato, siendo más específicos los de la categoría de sodio no tienen relación directa con el fraguado ni los componentes compuestos de aluminio pertenecientes a la fase de hidratación. Gracias a sus propiedades logra aumentar la viscosidad del suelo, lo cual mejora su resistencia de una manera más rápida [50].

Actualmente los procesos para generar la síntesis de la  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  son procesos termoquímicos, en el cual el  $\text{SiO}_2$  es sometido a temperaturas altas que logran llegar hasta los  $1300\text{ }^\circ\text{C}$  para luego fusionarlo con hidróxido de sodio ( $\text{NaOH}$ ) [55].

Aunque la  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  sea capaz de ser sintetizada por la metodología sol-gel, predomina la materia prima sólida por lo que se opta por la síntesis termoquímica. Existen distintos tipos de métodos como el de estado sólido o cerámico, el cual requiere temperaturas muy altas en las cuales los periodos son entre 3 hasta 8 horas en una temperatura de  $1000\text{ }^\circ\text{C}$  [56]. La energía empleada en los distintos países, como México, es generada casi en su totalidad como derivados de petróleo y carbón, sin embargo, no se ha considerado que su uso genere altos índices de  $\text{CO}_2$  [57].

### **Ensayos de laboratorio:**

Granulometría por tamizado, MTC E 107 [32]: El ensayo establece los porcentajes relativos del tamaño de granos en el suelo, clasificándolos en diferentes rangos en función de sus dimensiones.

#### Equipos:

- Balanzas ( $\pm 0.01\text{ gr}$ )
- Estufa capaz ( $110 \pm 5\text{ }^\circ\text{C}$ )

Materiales:

| TAMICES | ABERTURA (mm) |
|---------|---------------|
| 3"      | 75,000        |
| 2"      | 50,800        |
| 1 ½"    | 38,100        |
| 1"      | 25,400        |
| ¾"      | 19,000        |
| ⅝"      | 9,500         |
| Nº 4    | 4,760         |
| Nº 10   | 2,000         |
| Nº 20   | 0,840         |
| Nº 40   | 0,425         |
| Nº 60   | 0,260         |
| Nº 140  | 0,106         |
| Nº 200  | 0,075         |

Fig. 9. Tamices para el análisis granulométrico [34].

Cálculos:

- El % que pasa la malla #200:

$$\%PasaN^{\circ}200 = \frac{\text{Peso total} - \text{Peso retenido en el tamiz N}^{\circ} 200}{\text{Peso total}} \times 100$$

- Porcentaje retenido en cada tamiz:

$$\%Retenido = \frac{\text{Peso retenido en el tamiz}}{\text{Peso total}} \times 100$$

- Porcentaje que pasa en cada tamiz:

$$\%Pasa = 100 - \%Retenido \text{ acumulado}$$

Límite líquido, MTC E 107 [32]: El límite líquido se refiere a la cantidad máxima de agua que un material puede tener mientras mantiene su plasticidad.

Equipos:

- Horno para temperaturas de  $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$
- Balanza, sensibilidad  $\pm 0.01\text{gr}$
- Calibrador, acanalador y copa de Casagrande

Materiales:

- Espátula

Cálculos:Donde:

$$LL = W^n \left(\frac{N}{25}\right)^{0.121} \quad \text{o} \quad LL = KW^n$$

- k = Factor según norma
- $W^n$  = Contenido de humedad
- N = Cantidad de golpe para juntar la ranura

| N (Numero de golpes) | K (Factor para limite liquido) |
|----------------------|--------------------------------|
| 20                   | 0,974                          |
| 21                   | 0,979                          |
| 22                   | 0,985                          |
| 23                   | 0,990                          |
| 24                   | 0,995                          |
| 25                   | 1,000                          |
| 26                   | 1,005                          |
| 27                   | 1,009                          |
| 28                   | 1,014                          |
| 29                   | 1,018                          |
| 30                   | 1,022                          |

**Fig. 10.** Factor K para el limite liquido [34].

Límite plástico e índice de plasticidad, MTC E 107 [32]: Se determina la mínima cantidad de agua que el material puede poseer sin perder su estado plástico. Por otro lado, el IP es la diferencia entre el LL y el LP.

Equipos:

- Superficie de vidrio y recipientes
- Tamiz #40

Materiales:

- Espátula

Cálculos:

$$\text{Limite Plastico} = \frac{\text{Peso de agua}}{\text{Peso de suelo secado al horno}} \times 100$$

$$I.P = L.L. - L.P.$$

Donde:

- L.P. = Limite plástico

- L.L. = Limite liquido

Contenido de humedad, MTC E 108 [32]: Es la correlación en porcentaje entre las partículas en estado sólido y el peso agua del suelo.

Equipos:

- Balanza ( $\pm 0.01$ gr)
- Horno ( $110 \pm 5^\circ\text{C}$ )

Materiales:

- Recipientes

Cálculos:

$$W = \frac{\text{Peso de agua}}{\text{Peso de suelo secado al horno}} \times 100$$

$$W = \frac{M_{cws} - M_{cs}}{M_{cs} - M_c} \times 100 = \frac{M_w}{M_s} \times 100$$

Donde:

- $M_s$  = Peso de las partículas en estado sólido (g)
- $M_w$  = Peso del agua (g)
- $M_c$  = Peso del recipiente (g)
- $M_{cs}$  = Peso del recipiente y suelo seco (g)
- $M_{cws}$  = Peso del recipiente y suelo húmedo (g)
- $W$  = % de Contenido de humedad

Compactación de suelos realizado en laboratorio empleando energía modificada, MTC E 115 [32]: Se busca determinar la relación entre el Peso unitario seco y el contenido de agua, desarrollando la curva de compactación con energía modificada.

Equipos:

- Horno ( $110 \pm 5^\circ\text{C}$ )
- Balanza ( $\pm 0.01$ gr)
- Pisón Manual
- Molde de 4 y 6 pulgadas

- Ensamblaje del Molde

Materiales:

- Regla
- Tamices o Mallas
- Herramientas de Mezcla

Cálculos:

- Contenido de humedad
- Peso Unitario Seco:

$$\rho_m = 1000 \times \frac{(M_t - M_{md})}{t}$$

Donde:

- V = Volumen del molde (m<sup>3</sup>)
- M<sub>md</sub> = Masa del molde (kg)
- M<sub>t</sub> = Masa del molde más la muestra húmeda (kg)
- ρ<sub>m</sub> = Densidad Húmeda (Mg/m<sup>3</sup>)

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

Donde:

- w = Porcentaje de contenido de agua
- ρ<sub>d</sub> = Densidad seca de la muestra compactada (Mg/m<sup>3</sup>)

$$\gamma_d = 62,43 \rho_d \text{ en lbf/pe}^3$$

$$\gamma_d = 9,807 \rho_d \text{ en kN/m}^3$$

Donde:

- γ<sub>d</sub> = peso unitario seco de la muestra compactada.

$$W_{sat} = \frac{(\gamma_w)(G_s) - \gamma_d}{(\gamma_d)(G_s)} \times 100$$

Donde:

- $G_s$  = Gravedad específica de la muestra
- $\gamma_d$  = Peso unitario seco de la muestra
- $\gamma_w$  = Peso unitario del agua
- $W_{sat}$  = Cantidad de agua para completar la saturación (%).

CBR realizado en laboratorio, MTC E 132 [32]: Determina el índice de resistencia de los suelos denominado valor de la relación de soporte, que es muy conocido, como CBR, que se usa para evaluar la resistencia potencial de subrasante, subbase y material de base.

Equipos:

- Molde, prensa y disco espaciador.
- Pisón de compactación y penetración.
- Aparato medidor de expansión, según lo especificado en la norma.
- Pesas y diales, según lo especificado en la norma
- Tanque y balanzas
- Estufa ( $110 \pm 5$  °C)
- Tamices #4, 3/4" y 2".

Cálculos:

$$\% \text{ de agua a añadir} = \frac{H - h}{100 - h} \times 100$$

Donde:

- $h$  = Humedad natural
- $H$  = Humedad prefijada

$$\% \text{ Expansión} = \frac{L2 - L1}{127} \times 100$$

Donde:

- L2 = Lectura inicial (mm)
- L1 = Lectura final (mm)

Pérdida por ignición de materia orgánica, MTC E 118 [32]: El cálculo de materia orgánica se refiere a la oxidación cuantitativa de materia vegetal no descompuesta luego de volatizarla dentro del material, sin que afecte a este mismo.

Equipos:

- Horno para temperaturas de  $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$
- Balanza, sensibilidad  $\pm 0.01\text{gr}$
- Crisoles o platos de evaporación
- Desecadores

Materiales:

- Recipientes, según lo especificado en la presenta norma.
- Suministros misceláneos, según lo especificado en la presenta norma.

Cálculos:

$$\% \text{ de materia orgánica} = \frac{A - B}{B - C} \times 100$$

Donde:

- A = Peso del crisol y suelo seco antes de la ignición.
- B = Peso del crisol y suelo seco luego de la ignición.
- C = Peso del crisol.

Determinación de pH en los suelos, MTC E 129 [32]: El cálculo de ph en los suelos busca denotar el grado de alcalinidad o acidez en las muestras del suelo, usando el método electrométrico, sin que las propiedades del suelo se vean afectadas.

Equipos:

- Aparato de método electrométrico para la determinación pH.
- Balanza, sensibilidad  $\pm 0.01\text{gr}$
- Bandeja no corrosiva.
- Tamiz #10

### Materiales:

- Dos frascos (500 mL)
- Tres vasos (100 mL).
- Un frasco plástico con agua destilada.

## **Materiales y métodos**

### **Tipo y nivel de investigación**

#### **Tipo de investigación**

La siguiente investigación es de tipo aplicada, la cual posee propósitos prácticos inmediatos correctamente definidos, en otras palabras, procede a investigar el transformar, producir cambios o modificar determinados sectores de la realidad [58], por lo que en esta investigación se busca modificar las propiedades mecánicas y las propiedades químicas con silicato de sodio para mejorar el suelo arcilloso en caminos viales.

#### **Nivel de investigación**

La investigación es de nivel causal, ya que determina características generadas de una variable hacia la otra [59]. Por lo tanto, la investigación busca analizar el porcentaje óptimo de silicato de sodio para mejorar las propiedades físicas, mecánicas y químicas del suelo arcilloso para desarrollar construcciones viales a futuro.

#### **Diseño de la Investigación**

El diseño fue determinado como experimental, ya que se modificó a voluntad la variable independiente para analizar los cambios generados sobre la variable dependiente [59].

#### **Enfoque de la investigación**

Posee un enfoque cuantitativo, ya que se emplearán ecuaciones para representar y analizar los diversos resultados [60]. Con lo cual se comparan los resultados obtenidos y la norma respectiva.

## Población, muestra y muestreo

### Población

La población es la agrupación de objetos o personas de los cuales se requiere averiguar alguna cosa determinada en una investigación, la cual está constituida por muestras [58], en este caso la población tomada en cuenta es el suelo arcilloso del camino vial perteneciente a La Joyita, del distrito de Pimentel. Mediante el trabajo de observación se identificó que existía presencia de arcilla en el suelo de este lugar, siendo una zona de estudio ideal para esta investigación.

### Muestra

La muestra es la parte de la población investigada [61], en este estudio se determinó el número de muestra haciendo uso de la siguiente fórmula [62]:

$$n = \left( \frac{z\sigma_o}{e} \right)^2$$

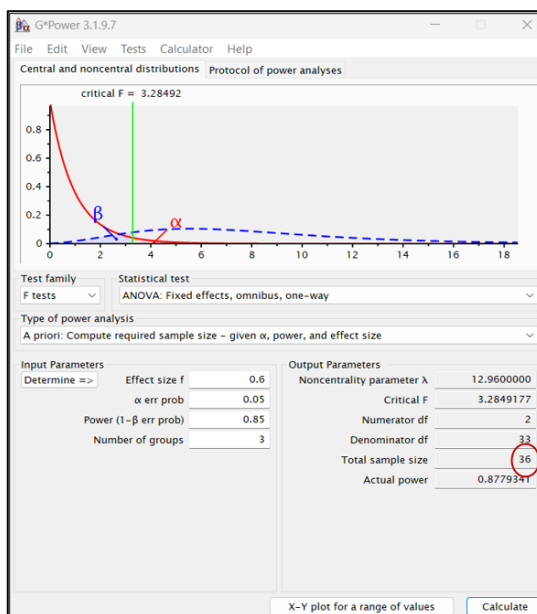
En donde el error es de 5% ( $e=0.05$ ) [62], el nivel de confianza de 99% ( $z=2.58$ ) [63] y una desviación estándar de 3.35% [64], relacionada con los parámetros de la humedad relativa promedio en Lambayeque.

$$n = \left( \frac{2.58(0.0335)}{0.05} \right)^2 = 2.988 \approx 3$$

Lo cual nos dio una muestra de 3 calicatas para la presente investigación.

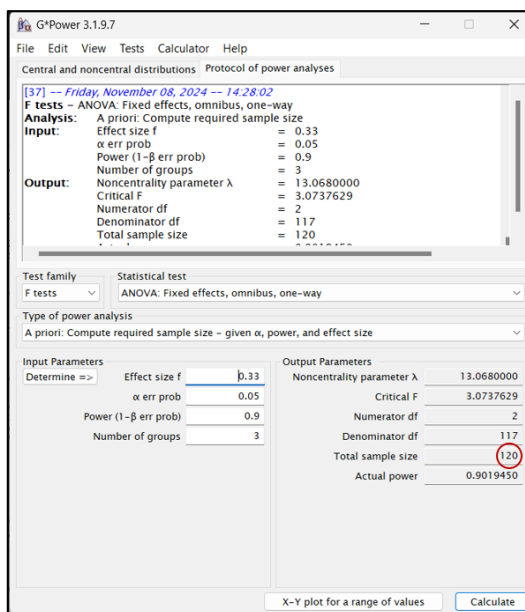
El marco muestral estuvo conformado por el tramo del camino vecinal perteneciente a la entrada a la Urb. La arboleda, del distrito de Pimentel, tramo con una distancia entre 0+000km hasta 1+000km, en la cual se realizaron 288 ensayos de laboratorio, teniendo en cuenta que para los ensayos con un cantidad de repeticiones mayor a uno, se tomará el valor promedio de los resultados de dicho ensayo para tener una mayor exactitud. Los ensayos estuvieron divididos para determinar distintas propiedades del suelo, las físicas estuvieron compuestas por: Granulometría, Límites de Atterberg y Contenido de humedad; las mecánicas: Proctor modificado y CBR; y las químicas: Materia Orgánica y ph en suelos.

Para los ensayos de propiedades físicas, se realizó una sola repetición, debido a que solo son necesarios para la clasificación del suelo en estado natural. Para los ensayos los cuales determinaron las alteraciones del suelo, se calculó el número de repeticiones por medio del programa G\*Power 3.1.9.7, en el cual tomó en consideración las variables independientes respectivas.



**Fig. 11.** Cuadro de probabilidad estadística para Proctor modificado.

Para el cálculo de repeticiones del Proctor modificado, se empleó el cálculo a priori para determinar el tamaño muestral, tomando un error de probabilidad de 5%, un efecto de 0.6 de tamaño largo ( $> 0.5$ ), una potencia 0.85 (rango estándar en ciencias) y la cantidad de grupos a comparar, siendo 3 grupos (calicatas), obteniendo 36 repeticiones. Estas 36 repeticiones se repartieron de manera equitativa para las tres calicatas pertenecientes al estudio. Siendo en total 12 repeticiones para cada calicata. Por lo que, estas 12 repeticiones se repartieron de manera equitativa para las 4 muestras con distintos porcentajes de silicato de sodio, siendo en total 3 repeticiones para cada muestra.



**Fig. 12.** Cuadro de probabilidad estadística para CBR y ph.

Para el cálculo de repeticiones de ph en suelos y CBR, se continuó usando el cálculo a priori, sin embargo, los valores fueron modificados para buscar una mayor exactitud, por lo que se tomó un error de probabilidad del 5%, un efecto de 0.33 de tamaño medio ( $> 0.3$ ), una potencia 0.90 (rango estándar) y la cantidad grupos a comparar, siendo 3 grupos, obteniendo 120 repeticiones, para cada uno de los ensayos. Estas 120 repeticiones se repartieron de manera equitativa para las tres calicatas pertenecientes al estudio. Siendo en total 40 repeticiones para cada calicata. Estas 40 repeticiones se repartieron de manera equitativa para las 4 muestras con distintos porcentajes de silicato de sodio, siendo en total 10 repeticiones para cada muestra.

**TABLA I**

**MUESTRAS A REALIZAR POR PORCENTAJE Y NÚMERO DE ENSAYOS**

| MUESTRA          | PORCENTAJE |          | N° DE ENSAYOS |
|------------------|------------|----------|---------------|
|                  | SUELO      | SILICATO |               |
|                  | 100 %      | 0 %      | 81            |
| MUESTRA          | 96 %       | 4 %      | 69            |
| PATRÓN           | 94 %       | 6 %      | 69            |
|                  | 92 %       | 8 %      | 69            |
| TOTAL DE ENSAYOS |            |          | 288           |

**TABLA II**  
**NÚMERO DE ENSAYO DE MUESTRAS POR PROPIEDADES**

| Muestra              | Propiedades Físicas |              |            | Propiedades Mecánicas |     | Propiedades Químicas |              |
|----------------------|---------------------|--------------|------------|-----------------------|-----|----------------------|--------------|
|                      | Granulometría       | L. Atterberg | C. Humedad | Proctor Modificado    | CBR | M. Orgánica          | Ph en suelos |
| M-Patrón             | 3                   | 3            | 3          | 9                     | 30  | 3                    | 30           |
| Silicato de Sodio 4% | -                   | -            | -          | 9                     | 30  | -                    | 30           |
| Silicato de Sodio 6% | -                   | -            | -          | 9                     | 30  | -                    | 30           |
| Silicato de Sodio 8% | -                   | -            | -          | 9                     | 30  | -                    | 30           |

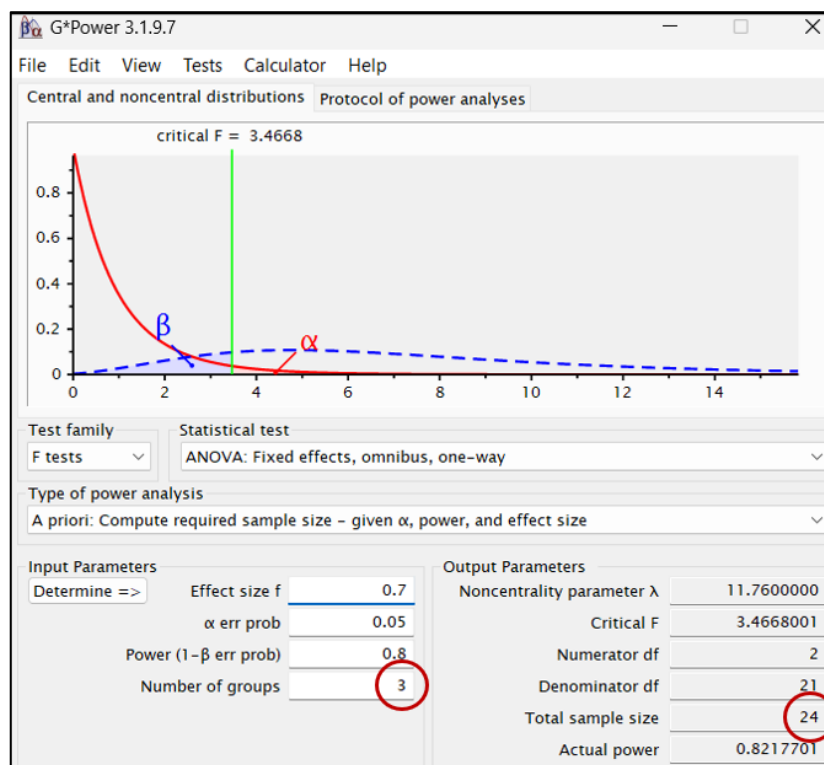
Con respecto a la selección de porcentajes se empleó el uso estadístico junto con el análisis de antecedentes para determinar los porcentajes que se emplearon en la investigación.

**TABLA III**  
**RESUMEN DE PORCENTAJES EN ANTECEDENTES**

| INVESTIGACIÓN | REF. | AUTOR (ES)      | TITULO   | ADITIVO                  | % MUESTRA       | METODOLOGÍA   | RESULTADOS   |
|---------------|------|-----------------|--|--------------------------|-----------------|---|--|
| A             | [15] | Ahmed, et al.   | Improvement of swelling chlorite soil using sodium silicate alkali activator   | Silicato de sodio        | 10              | El estudio se realizó en Tamiyyah, empleando silicato de sodio en una proporción del 10 sobre suelo de clorita expansiva. Se evaluaron los efectos del aditivo a los 0, 7, 14, 30 y 90 días mediante ensayos de hinchamiento y permeabilidad. | Con un 10 de silicato de sodio se logró eliminar el potencial de hinchamiento y se incrementó significativamente el índice CBR.                                      |
| B             | [24] | Yifan, et al.   | On the use of one-part geopolymer activated by solid sodium silicate in soft clay stabilization                                      | Silicato de sodio sólido | 0.2 y 0.25      | Realizado en Shanghai, se emplearon precursores binarios activados con silicato de sodio sólido en proporciones de 0.2 y 0.25. Se evaluaron mediante pruebas UCS, MIP, DRX y SEM-EDS.   | Con proporciones de 0.2 y 0.25, se obtuvieron mejoras en la resistencia mecánica del suelo.  |
| C             | [25] | Dharini, et al. | Enhancing the strength of expansive clayey soil using lime as soil stabilizing agent along with sodium silicate as grouting chemical | Silicato de sodio        | 2, 4, 6, 8 y 10 | Realizado en Tamil Nadu, se realizaron ensayos Proctor estándar y de compresión libre con porcentajes de silicato de sodio de 2, 4, 6, 8 y 10 sobre arcilla expansiva.  | Se evaluaron porcentajes de 2, 4, 6, 8 y 10, observándose un incremento progresivo en el CBR del suelo tratado.  |
| D             | [26] | Liuyang, et al. | Effect of sodium silicate on the properties of loess stabilized with alkali-activated fly ash-based                                  | Silicato de sodio        | 1.5, 2 y 3.2    | El estudio fue realizado en Gansu, evaluando módulos de silicato de sodio de 1.5, 2 y 3.2. Se aplicaron pruebas de compresión libre, corte directo, absorción de agua y desintegración sobre loess estabilizado.                              | Se utilizaron módulos de 1.5, 2 y 3.2, observándose variaciones en la densidad seca, contenido de humedad, resistencia a la compresión y cohesión del loess tratado. |

|   |      |                    |  |                   |              |   |   |
|---|------|--------------------|--|-------------------|--------------|---|---|
| E | [27] | Mohammad, et al.   | Investigation on shear strength of stabilised clay using cement, sodium silicate and slag  | Silicato de sodio | 1, 1.5 y 2.5 | En Australia Occidental se realizaron 84 ensayos de corte directo con silicato de sodio en proporciones de 1, 1.5 y 2.5, en tiempos de curado de 7, 14 y 28 días bajo cargas de 50, 150 y 250 kPa.                            | Se usaron proporciones de 1, 1.5 y 2.5, reportándose baja efectividad del 1% en condiciones normales.                           |
| F | [28] | Cong, et al.       | Influence of sodium silicate and promoters on unconfined compressive strength of Portland cement-stabilized clay   | Silicato de sodio | 16           | Realizado en Shanghai, se estabilizó arcilla blanda con proporciones de 16, evaluando la resistencia a compresión a los 7, 28 y 60 días mediante análisis SEM y XRD.  | Se utilizaron proporciones de 16, observándose aumentos en la resistencia a compresión con el tiempo.                           |
| G | [29] | Aguilar y Cárdenas | Estabilización de suelos arenosos mediante la adición de silicato de sodio en la subrasante de la alameda sur de Chorrillos                                    | Silicato de sodio | 4, 6, 8 y 10 | El estudio se llevó a cabo en Chorrillos con una muestra SPSM, aplicando silicato de sodio en proporciones de 4, 6, 8 y 10. Se realizaron ensayos Proctor y CBR para evaluar la mejora en densidad seca y capacidad portante. | Con dosificaciones de 4, 6, 8 y 10, se observó un incremento del CBR desde 5.5% hasta 47.7%.                                    |
| H | [30] | Caballero          | Estabilización química con silicato de sodio del material de préstamo de la vía La Primavera – Bonanza – La Venturosa en el departamento del Vichada           | Silicato de sodio | 3            | En Vichada se ensayaron suelos arcillosos con 3 de silicato de sodio a 0, 7 y 14 días, mediante pruebas de resistencia, cohesión, módulo de elasticidad y ángulo de fricción.   | Se aplicaron 3, reportándose aumentos en Cu, cohesión y módulo de elasticidad, así como disminución del índice de desleimiento. |
| I | [31] | Chávez             | 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 | Silicato de sodio | 4, 6, 8 y 10 | Realizado en Piura, se utilizó silicato de sodio en proporciones de 4, 6, 8 y 10, aplicando ensayos de Proctor modificado, granulometría, CBR y límites de consistencia.  | Con proporciones de 4, 6, 8 y 10, el CBR se incrementó de 6% hasta 39.75%, indicando mejora en capacidad portante.              |

Gracias a los antecedentes previamente estudiados se empleó una tabla resumen, destacando los porcentajes empleados en cada investigación. Teniendo en total 24 porcentajes para analizar. Por lo que, gracias al uso del programa G\*Power 3.1.9.7, se determinó la cantidad de porcentajes que fueron necesarios para la investigación. Para el cálculo del número de grupos se realizó un cálculo a priori, empleando un error de probabilidad de 5%, un efecto de 0.7 de tamaño largo ( $>5$ ) y una potencia 0.80 (rango estándar). Aplicando un cálculo inverso para determinar el número de grupos (porcentajes), sin contar la muestra patrón, a partir del total de porcentajes que han sido obtenido de los antecedentes.



**Fig. 13.** Cuadro de probabilidad estadística para muestras experimentales.

Se puede observar que el resultado fue de 3 grupos (porcentajes), sin contar la muestra patrón, que en total serían 4 grupos pertenecientes a este análisis. Teniendo en cuenta esto, se pasó a realizar la selección de porcentajes mediante el programa Minitab, el cual combinó de manera aleatoria los porcentajes para así determinar su significancia.

**TABLA IV**  
**SIGNIFICANCIA DE LOS PORCENTAJES**

| PORCENTAJES |      |
|-------------|------|
| A           | 10   |
| B           | 0.2  |
| B           | 0.25 |
| C           | 2    |
| C           | 4    |
| C           | 6    |
| C           | 8    |
| C           | 10   |
| C           | 1.5  |
| C           | 2    |
| C           | 3.2  |
| E           | 1    |
| E           | 1.5  |
| E           | 2.5  |
| F           | 16   |
| G           | 4    |
| G           | 6    |
| G           | 8    |
| G           | 10   |
| H           | 3    |
| I           | 4    |
| I           | 6    |
| I           | 8    |
| I           | 10   |
| TOTAL       | 24   |

| Comparaciones para % |       |        |       |
|----------------------|-------|--------|-------|
| +                    | C1-T  | C2-T   | C3    |
|                      | GRUPO | MEDIDA | %     |
| 1                    | A     | MIN    | 0.20  |
| 2                    | A     | MIN    | 0.25  |
| 3                    | A     | MED    | 3.00  |
| 4                    | A     | MED    | 3.20  |
| 5                    | A     | MAX    | 8.00  |
| 6                    | A     | MAX    | 8.00  |
| 7                    | B     | MIN    | 1.00  |
| 8                    | B     | MIN    | 1.50  |
| 9                    | B     | MED    | 4.00  |
| 10                   | B     | MED    | 4.00  |
| 11                   | B     | MAX    | 8.00  |
| 12                   | B     | MAX    | 10.00 |
| 13                   | C     | MIN    | 1.50  |
| 14                   | C     | MIN    | 2.00  |
| 15                   | C     | MED    | 4.00  |
| 16                   | C     | MED    | 6.00  |
| 17                   | C     | MAX    | 10.00 |
| 18                   | C     | MAX    | 10.00 |
| 19                   | D     | MIN    | 2.00  |
| 20                   | D     | MIN    | 2.50  |
| 21                   | D     | MED    | 6.00  |
| 22                   | D     | MED    | 6.00  |
| 23                   | D     | MAX    | 10.00 |
| 24                   | D     | MAX    | 16.00 |

**Fig. 14.** Cuadro de Minitab para comparaciones de %.

Luego que el programa se encargó de la distribución aleatoria, se procesaron los datos para encontrar la significación correspondiente a ellos, empleando la prueba Tukey con un 95% de confianza.

**Agrupar información utilizando el método de Tukey y una confianza de 95%**

| GRUPO*MEDIDA | N | Media  | Agrupación |
|--------------|---|--------|------------|
| D MAX        | 2 | 13.000 | A          |
| C MAX        | 2 | 10.000 | A B        |
| B MAX        | 2 | 9.000  | A B C      |
| A MAX        | 2 | 8.000  | A B C D    |
| D MED        | 2 | 6.000  | B C D E    |
| C MED        | 2 | 5.000  | B C D E F  |
| B MED        | 2 | 4.000  | C D E F    |
| A MED        | 2 | 3.100  | D E F      |
| D MIN        | 2 | 2.250  | E F        |
| C MIN        | 2 | 1.750  | E F        |
| B MIN        | 2 | 1.250  | E F        |
| A MIN        | 2 | 0.225  | F          |

*Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.*

**Fig. 15.** Selección de % por medio del método Tukey.

Para la selección de los porcentajes, se realizó, con los resultados que poseían un nivel de significancia común entre los más altos, se aceptaron los valores con 4 agrupaciones significantes, debido a su alto nivel de significancia y la similitud en sus agrupaciones, además que estos se encontraron dentro de los porcentajes analizados en los antecedentes. Los porcentajes fueron 4, 6 y 8%, generando las muestras de Suelo natural (S100%), S96%+SS4%, S94%+SS6%, S92%+SS8%.

### **Muestreo**

El muestreo fue probabilístico, este muestreo es empleado para seleccionar la cantidad de objetos de estudios dentro de una población [63].

### **Unidad de análisis**

La unidad de análisis es donde se realizará la aplicación del instrumento de medición [58]. En la investigación la unidad de análisis fueron 3 calicatas de 1.5 m. ubicadas en el tramo del camino vecinal perteneciente a la entrada a la Urb. La arboleda, del distrito de Pimentel, con una distancia entre 0+000km hasta 1+000km.

## Hipótesis

La aplicación de la medida óptima de silicato de sodio mejora el comportamiento mecánico y de las propiedades químicas de los suelos arcillosos en caminos viales; comparado con la aplicación de distintas cantidades del mismo producto.

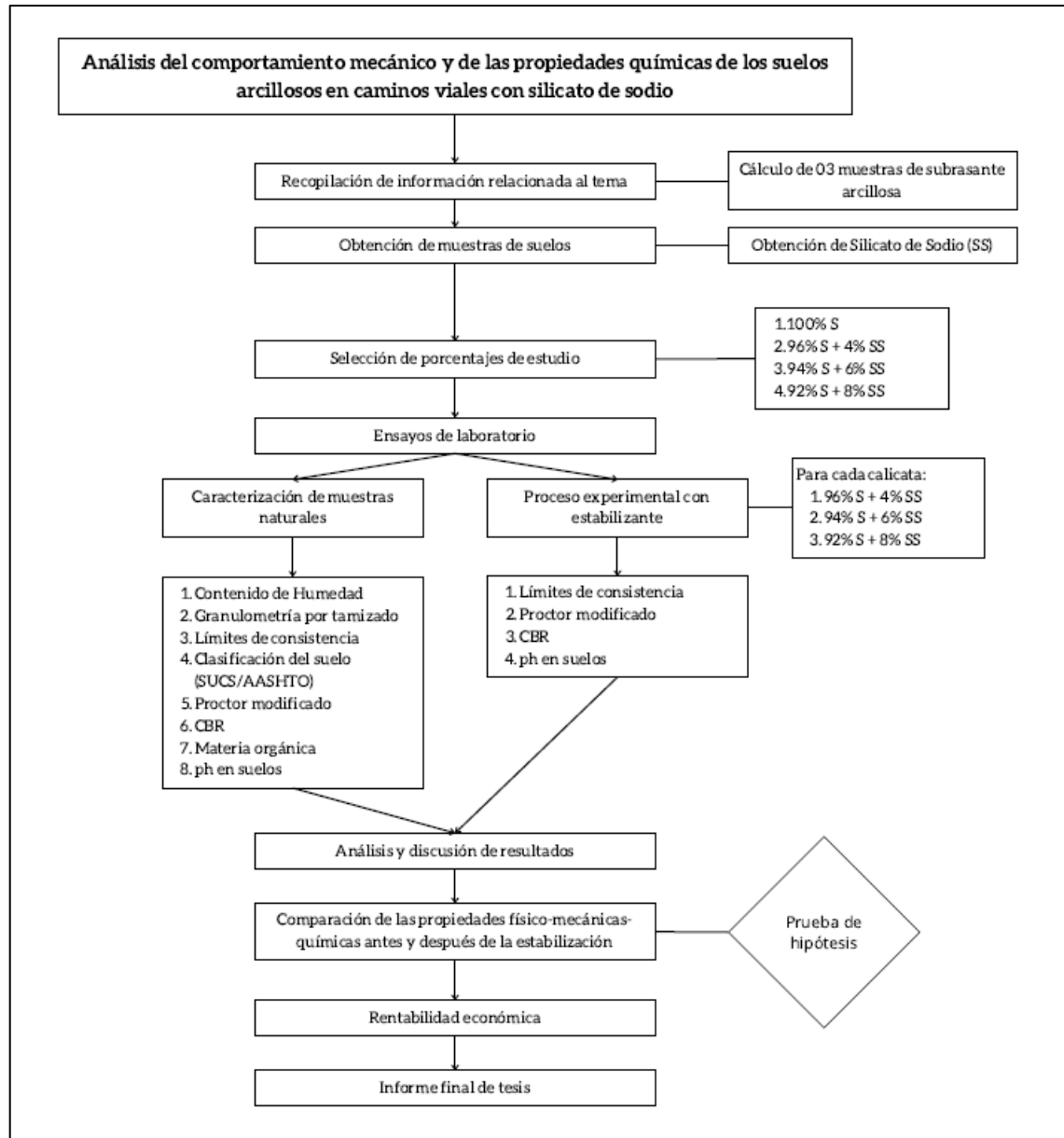


Fig. 16. Proceso de demostración de la hipótesis

## VARIABLES Y OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES

### VARIABLES

VARIABLES INDEPENDIENTE: Incorporación de silicato de sodio.

VARIABLES DEPENDIENTE: Comportamiento del suelo arcilloso.

### OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES

**TABLA V**  
OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES

| VARIABLE INDEPENDIENTE             | INDICADOR                                   | UNIDAD DE MEDIDA | RANGO DE APLICACIÓN | MÉTODO DE MEDICIÓN     |
|------------------------------------|---|------------------|---------------------|------------------------|
| Incorporación de Silicato de sodio | Porcentaje de Silicato de Sodio (% en peso) | %                | 0%, 4%, 6%, 8%      | Balanza (NMP 003:2009) |

| VARIABLE DEPENDIENTE                    | DIMENSIÓN             | INDICADOR                  | UNIDAD DE MEDIDA             | MÉTODO DE MEDICIÓN   |
|---|-----------------------|----------------------------|------------------------------|--|
| Comportamiento de los suelos arcillosos | Propiedades físicas   | Granulometría por tamizado | %                            | Análisis Granulométrico por tamizado (MTC E 107)                                 |
|   |                       | Límites de Atterberg       | %                            | Limite Plástico e Índice de Plasticidad (MTC E 111)                              |
|   |                       | Contenido de humedad       | %                            | Limite Líquido (MTC E 110)<br>Determinación del contenido de humedad (MTC E 108) |
|   | Propiedades mecánicas | Proctor modificado         | g/cm <sup>3</sup> -%         | Compactación de suelos (MTC E 115)   |
|   |                       | CBR                        | %                            | CBR en laboratorio (MTC E 132)   |
|   | Propiedades Químicas  | Materia Orgánica En Suelos | %                            | Materia Orgánica En Suelos (Perdida Por Ignición) (MTC E 118)                    |
|   | Ph En Los Suelos      | %                          | Ph En Los Suelos (MTC E 129) |  |

## Técnicas e instrumentos de recolección de datos

La técnica fue la observación experimental, debido al análisis del objeto de estudio, tomando en cuenta condiciones controladas, ya que la variable independiente fue manipulada por el investigador [65], teniendo en cuenta las propiedades físicas, mecánicas y químicas; empleando como instrumento fichas de registro del Manual de Ensayos de Materiales. Se utilizó el análisis documental para contrastar la información respectiva.

**TABLA VI**  
TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS

| TÉCNICA                  | INSTRUMENTO         | APLICACIÓN             |
|--------------------------|---------------------|------------------------|
| Observación experimental | Guía de observación | Ensayos de Laboratorio |
| Análisis de documentos   | Fichas de registro  | Fuentes de información |

### Validez

La validación de los ensayos fue certificada por el laboratorio respectivo, empleando la verificación y aprobación de un profesional experto al tema referente [66].

### Confiabilidad

La confiabilidad es el nivel de veracidad en el cual se miden o rigen las variables, en el cual se interpreta el manejo de los equipos o ensayos que mostrarán los datos de los resultados sin errores [66]. Con el objetivo de garantizar la confiabilidad de la investigación, se realizó la verificación y calibración de los instrumentos correspondientes antes de la realización de los ensayos, para proveer una eficiencia óptima durante su desarrollo, siendo avalados por un profesional.

### Procedimiento

#### Ejecución de calicatas

Como primer paso se visitó e identificó de manera preliminar el estado del camino vial, el cual estaba compuesto de una subrasante arcillosa. En donde se realizaron 03 calicatas a cielo abierto, obteniendo muestras de acuerdo a la norma MTC E-101 [48]. Las calicatas

fueron realizadas cerca al eje del camino vial, dentro de un horario poco transitado, mostrando su ubicación a continuación (vea figura 12):

- C-01: + 0.000 Km
  - E: 623318
  - N: 9247701
- C-02: + 0.500 Km.
  - E: 623528
  - N: 9247780
- C-03: + 1.000 Km.
  - E: 623709
  - N: 9247848

Las coordenadas fueron obtenidas gracias al sistema proporcionado por Google Earth Pro.



**Fig. 17.** Coordenadas del lugar de estudio.

Las calicatas fueron realizadas desde los 0.20m hasta una profundidad de 1.50 m [48], de las cuales se obtuvieron su perfil estratigráfico de suelo arcilloso correspondiente. Asimismo, no se encontró nivel freático, y se obtuvo 800.00 kg de muestra aproximadamente, para ser llevada al laboratorio de la universidad.



Fig. 18. Realización de calicata C-01, C-02 y C-03.

A continuación, se muestran los perfiles estratigráficos de cada calicata, detallando la profundidad, el tipo de estrato y sus características.

| Tesista  | : Guzmán Zuloeta, Nickolas Da Vinci  |               |                            |                              |  |
|--|--|---------------|----------------------------|------------------------------|--|
| Escuela  | : Escuela de Ingeniería Civil  |               |                            |                              |  |
| Tesis  | : Análisis del comportamiento mecánico y de las propiedades químicas de los suelos arcillosos en caminos viales con silicato de sodio. |               |                            |                              |  |
| Lugar  | : Dist. Pimentel, Prov. Lambayeque, Reg. Lambayeque.   |               |                            |                              |  |
| Calicata : 01<br>Nivel freático : No se encontro |  |               |                            |                              |  |
| <b>REGISTRO DE EXCAVACIÓN</b>                    |  |               |                            |                              |  |
| Profundidad<br>0.0<br>(cm)                       | Tipo de<br>Excavación  | Muestra<br>N° | Símbolo                    | Clasificación<br>SUCS/AASTHO | Descripción visual (IN-SITU)   |
| 0.20   | A<br>C<br>I<br>E<br>L<br>O<br><br>A<br>B<br>I<br>E<br>R<br>T<br>O  | M - 0%        | [Diagonal hatching symbol] | CH<br>A-7-6 (16)             | Arcilla de alta plasticidad<br>Limite liquido : 50.61%<br>Limite plástico : 25.83%<br>Índice de plasticidad : 24.78%<br>Humedad natural : 21.90% |
|  |  |               |                            |                              |  |
|  |  |               |                            |                              |  |
|  |  |               |                            |                              |  |
|  |  |               |                            |                              |  |
|  |  |               |                            |                              |  |
|  |  |               |                            |                              |  |
|  |  |               |                            |                              |  |
|  |  |               |                            |                              |  |
|  |  |               |                            |                              |  |
|  |  |               |                            |                              |  |
| 1.50   |  |               |                            |                              |  |

Fig. 19. Perfil estratigráfico C-01.



laboratorio de mecánica de suelos propio de la Universidad Santo Toribio de Mogrovejo, siendo los siguientes:

### Ensayo de contenido de humedad

Se realizó un cuarteo del material para posteriormente pesar una porción de la muestra, con lo seleccionado se procedió a colocar dentro del horno durante un día a  $110^{\circ}\text{C}$ . Luego se dejó enfriar y se registró el peso seco de la muestra [48].

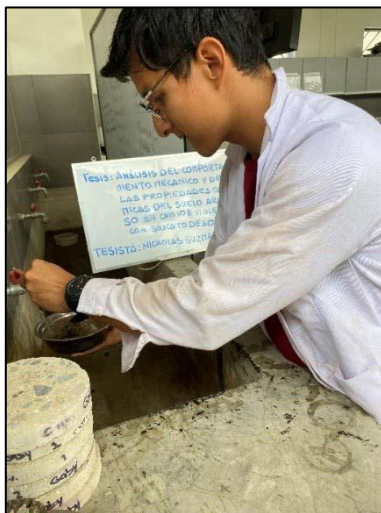


Fig. 22. Determinación del contenido de humedad del suelo.

### Ensayo de análisis granulométrico por tamizado

La norma MTC E-107, distribuye por tamaños cada muestra por calicata, y analiza los porcentajes retenidos en cada tamiz. Verificando el resultado igual la suma total con el peso inicial [48].



Fig. 23. Procedimiento de tamizado para análisis granulométrico.

### Ensayo de límite líquido

Según la norma MTC E-110, se utilizó la cuchara de Casagrande en la muestra saturada por un día y para cortar 13mm con apoyo de una ranura. Luego se giró la manivela, y golpeó hasta que cerró la muestra; dividiendo la cantidad de golpes en cuatro tiempos; el primero de 30 - 40, el segundo de 20 - 30, el tercero de 10 - 20 y el cuarto de 4 - 10. Luego se pesó y colocó la muestra en el horno durante un día a 110°C para conocer su humedad [48].



Fig. 24. Evaluación de los límites de consistencia líquida.

### Ensayo de límite plástico e índice de plasticidad

Para este ensayo se utilizaron cilindros pequeños con 3mm de diámetro, según la MTC E-111, que luego fueron pesados, e integrados al horno por un día a 110°C, y una vez concluido el tiempo se calculó su humedad [48].

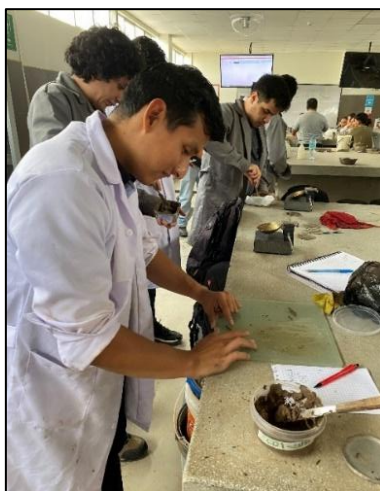


Fig. 25. Medición del límite plástico y cálculo del índice de plasticidad.

### Ensayo de proctor modificado

Se realizaron 3 muestras con distintas dosificaciones de humedad para cada repetición del ensayo y por cada calicata según la norma MTC E-115, con la finalidad de conseguir la M.D.S. y el C.O.H., cada uno fue rellenado por un molde de compactación mediante 5 capas compactadas por 25 golpes cada una [48].



Fig. 26. Proceso del ensayo Proctor en su variante modificada.

### Ensayo de relación de soporte de california (cbr)

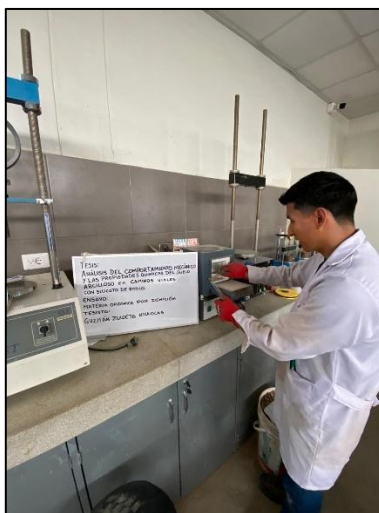
Se determinaron los porcentajes de densidad seca y expansión del suelo al realizar compactaciones a 55, 26 y 12 golpes, para las penetraciones de 0.1” y 0.2”, teniendo en cuenta la M.D.S. al 95 % y 100 %, según la norma MTC E-132 [48].



Fig. 27. Ensayo CBR aplicado a las muestras estudiadas.

### Ensayo de materia orgánica por ignición

Se determinó el porcentaje mediante la combustión a altas temperaturas, donde primero se hizo un secado a 105 °C, y posteriormente se procedió a someter a la ignición entre 550 °C a 440 °C por 4 horas, siendo el resultado la pérdida de peso, según la norma MTC E -118 [48].



**Fig. 28.** Ensayo de materia orgánica por ignición.

### Ensayo de pH en suelos

El ensayo de pH en suelos con pHmetros, según la MTC E -129, consistió en medir el pH de una suspensión de suelo en agua destilada. El procedimiento incluyó: pesar una cantidad específica de suelo seco (generalmente 50 g), mezclarlo con un volumen definido de agua destilada (250 mL), agitar la mezcla durante un tiempo determinado para homogeneizar, dejar reposar para estabilizar, y luego insertar el electrodo del pHmetro calibrado. Se registró el valor del pH cuando este se estabilizó en la lectura del equipo [48].



Fig. 29. Ensayo de ph en suelos.

### Aplicación de silicato de sodio

El uso del “Silicato de Sodio” dentro de las muestras extraídas para establecer los valores de densidad seca, humedad óptima, capacidad de soporte y niveles de ph. Este se obtuvo de la empresa “Química Industrial”, en formato de polvo sólido a pedido del investigador.



Fig. 30. Silicato de sodio en polvo presentación de 25 kg.

Según la ficha técnica proporcionada por [50], el silicato de sodio utilizado en esta investigación presentó una fórmula química de  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  y un peso molecular de 212,15 g/mol, caracterizándose por su estado físico sólido granular higroscópico, incoloro e inodoro. Desde el punto de vista químico, exhibió una alcalinidad elevada, con un contenido de  $\text{Na}_2\text{O}$  entre 26,7% y 30,0%, y un contenido de óxido de silicio ( $\text{SiO}_2$ ) entre 28,0% y

28,5%, elementos clave que explica su capacidad como agente estabilizante al formar estructuras tipo gel que cohesionan las partículas del suelo. Su pH en solución acuosa al 1% oscila entre 12,0 y 13,5, indicando una alta basicidad, lo que favorece la reducción del índice de plasticidad y la mejora en la compactación de suelos arcillosos. Además, posee una densidad aparente que varía entre 0,8 y 1,3 g/mL a 20 °C, lo cual permite su uso sin riesgo de cambios de fase bajo condiciones normales de almacenamiento y manipulación. Según los diversos antecedentes propuestos en esta investigación, la incorporación del silicato de sodio en porcentajes variables (entre 4% y 10%) ha demostrado mejoras notables en las propiedades mecánicas de los suelos arcillosos, la reducción del límite líquido y plástico, y un aumento considerable del CBR

### **Elaboración de muestras experimentales**

Se elaboraron muestras experimentales, para cada una de las subrasantes arcillosas (C-01, C-02 y C-03), dentro de las cuales se obtuvieron 4 muestras respectivamente, modificando el porcentaje de aditivo según la cantidad de muestra natural. El proceso se dio mediante el reemplazo según la dosificación definida, cambiando la cantidad según el ensayo a realizar.

En el ensayo Proctor Modificado realizado a tres calicatas distintas (Calicata 01, 02 y 03), se prepararon muestras con una cantidad normativa constante de 12 kg de suelo. Para cada calicata se elaboraron cuatro niveles de mezcla con diferentes porcentajes de aditivo de silicato de sodio: 0%, 4%, 6% y 8%. En el caso del 0% de aditivo, la cantidad de muestra fue 12 kg. Para las demás mezclas, se redujo proporcionalmente la cantidad de suelo para permitir la incorporación de 0.48, 0.72 y 0.96 kg de aditivo respectivamente. Cada combinación de porcentaje de aditivo fue ensayada con tres repeticiones para cada calicata lo que dio como resultado un total general de 19 kg de aditivo y 413 kg de suelo natural.

En el ensayo CBR, se prepararon muestras de 15 kg de suelo. Para cada calicata se elaboraron cuatro mezclas con diferentes porcentajes de aditivo de silicato de sodio: 0%, 4%, 6% y 8%. En el caso del 0% de aditivo, la cantidad de muestra fue 15 kg, para las demás mezclas, se redujo permitir la incorporación de 0.6, 0.9 y 1.2 kg de aditivo respectivamente. Cada combinación de porcentaje de aditivo fue ensayada con diez repeticiones para cada calicata lo que dio como resultado un total general de 81 kg de aditivo y 1.72 t de suelo natural.

En el ensayo de ph en suelos se prepararon muestras de 50 g de suelo. En el caso del 0% de aditivo, la cantidad de muestra fue 50 g. Para las demás mezclas, se redujo proporcionalmente la cantidad de suelo para permitir la incorporación de 2, 3 y 4 g de aditivo

respectivamente. Cada combinación de porcentaje de aditivo fue ensayada con diez repeticiones para cada calicata lo que dio como resultado un total general de 6 kg de aditivo y 0.27 kg de suelo natural.

En resumen, cada calicata contó con 712 kg de suelo natural y 33.5 kg de aditivo aproximadamente. Sin embargo, se tomó en cuenta que las cantidades asignadas son del material que se empleó, ya que para los ensayos de Proctor modificado y CBR, el material pasó por la malla # 04, mientras que para el ensayo de ph el material pasó por la malla # 10. Por lo que se empleó 2.13 t de material pasado por la malla # 04 y 5.7 kg por la malla # 10.



**Fig. 31.** Mezcla de muestra de C-03 con silicato de sodio.

## Plan de procesamiento y análisis de datos

**TABLA VII**  
PLAN DE PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS DE DATOS

| N° | Fases de estudio  | Fuente de información                             | Técnicas y herramientas         |   | Resultados esperados  |
|----|---|---|---------------------------------|---|---|
|    |   |   | Recopilación de información     | Tratamiento de información  |   |
| 1  | Análisis del comportamiento mecánico y de las propiedades químicas de los suelos arcillosos en caminos viales con silicato de sodio | Observación del problema.                         | Ficha de observación.           | Realizar el análisis con la aplicación de las pruebas.              | Contrastar los resultados con las normativas.   |
|    |   | Estudios de años anteriores.                      | Análisis de documentos.         |   |   |
| 2  | Ensayos en laboratorio  | Resultado del objetivo específico 1, 2, 3, 4 y 5. | Trabajo de campo y laboratorio. | Analizar el manual de ensayos de material del MTC.                  | Evaluación de los ensayos en laboratorio basándose en el manual de ensayos de material del MTC. |
|    |   |   |                                 | Realizar el análisis e interpretación con la aplicación de ensayos. | Contrastar los resultados de cada muestra con las normativas correspondientes.                  |
| 3  | Análisis de costos basado en las normativas   | Objetivo específico 6                             | Análisis de costos              | Análisis del costo y beneficio de la propuesta.                     | Determinar el costo unitario para realizar la estabilización de suelos arcillosos.              |

## Resultados y discusión

### Resultados

#### OE1: Caracterizar el suelo arcilloso en su estado natural, de acuerdo al método SUCS y AASHTO

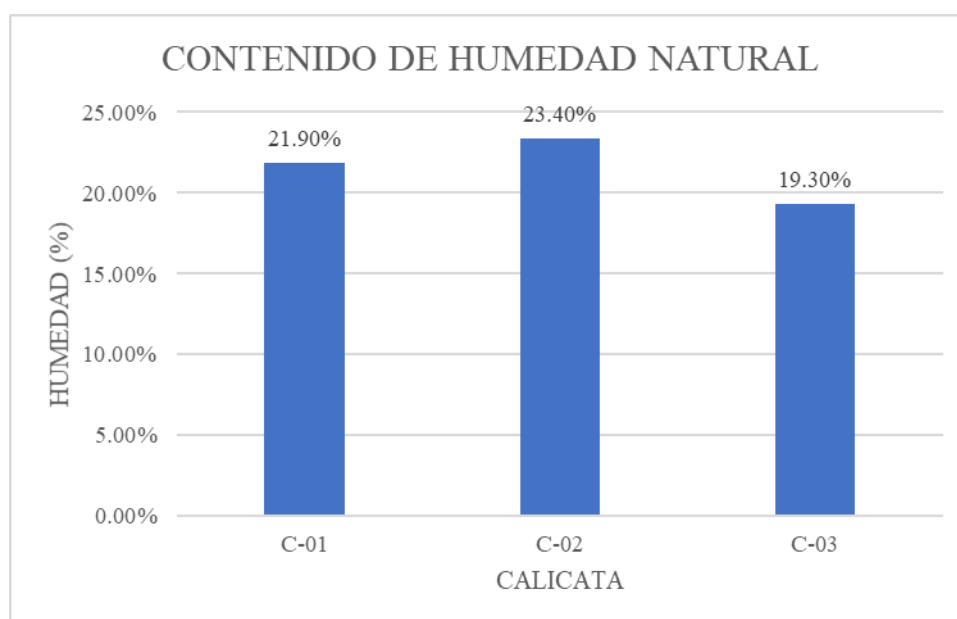
Se usaron muestras de las C-01, C-02 y C-03, sin modificar sus propiedades iniciales, en las cuales se evaluaron sus propiedades físicas, mediante los ensayos de CH, GT, LL, LP, IP; además de tener en cuenta las variaciones que se generan al integrar silicato de sodio, lo cual influyó en los límites de consistencia, los resultados obtenidos fueron:

#### Contenido de humedad - Muestras naturales

La norma MTC E-108, mide el peso del agua, los resultados de las muestras fueron los siguientes resultados:

**TABLA VIII**  
RESUMEN DE CONTENIDO DE HUMEDAD DE LAS MUESTRAS EN ESTADO NATURAL

| Calicata | Muestra | Prof. (m) | Humedad (%) |
|----------|---------|-----------|-------------|
| C-01     | M - 0%  | 0.20-1.50 | 21.9        |
| C-02     | M - 0%  | 0.20-1.50 | 23.4        |
| C-03     | M - 0%  | 0.20-1.50 | 19.3        |



**Fig. 32.** Porcentaje de humedad en estado natural.

La figura 32, presenta que la muestra 100%S de C-02 posee un porcentaje mayor 23.40%, mientras, la C-03 posee el menor porcentaje de 19.30%. Sin embargo, el ensayo Proctor modificado, define que cada calicata posee humedad natural superior a la óptima, es decir, que el suelo se encuentra sobresaturado [46], por lo cual para su mejora se propone que se intensifique la energía de compactación o se realice una sustitución del suelo de manera parcial con algún aditivo químico que podría ser el Silicato de Sodio, siendo esto último lo sugerido en la presente investigación.

### Distribución granulométrica - Muestras naturales

Dentro de este ensayo se emplearon los tamices para determinar la granulometría de las muestras usando la norma MTC E-107.

**TABLA IX**  
RESUMEN DE CLASIFICACIÓN DE SUELOS DE LAS MUESTRAS EN ESTADO NATURAL

| Calicata | Muestra | Grava (%)      | Arena (%)       | Limo/Arcilla (%) |
|----------|---------|----------------|-----------------|------------------|
|          |         | 75.00 -4.75 mm | 4.75 - 0.075 mm | < 0.075 mm       |
| C-01     | M - 0%  | 0.00%          | 14.90%          | 85.10%           |
| C-02     | M - 0%  | 0.00%          | 19.80%          | 80.20%           |
| C-03     | M - 0%  | 0.00%          | 16.20%          | 83.80%           |

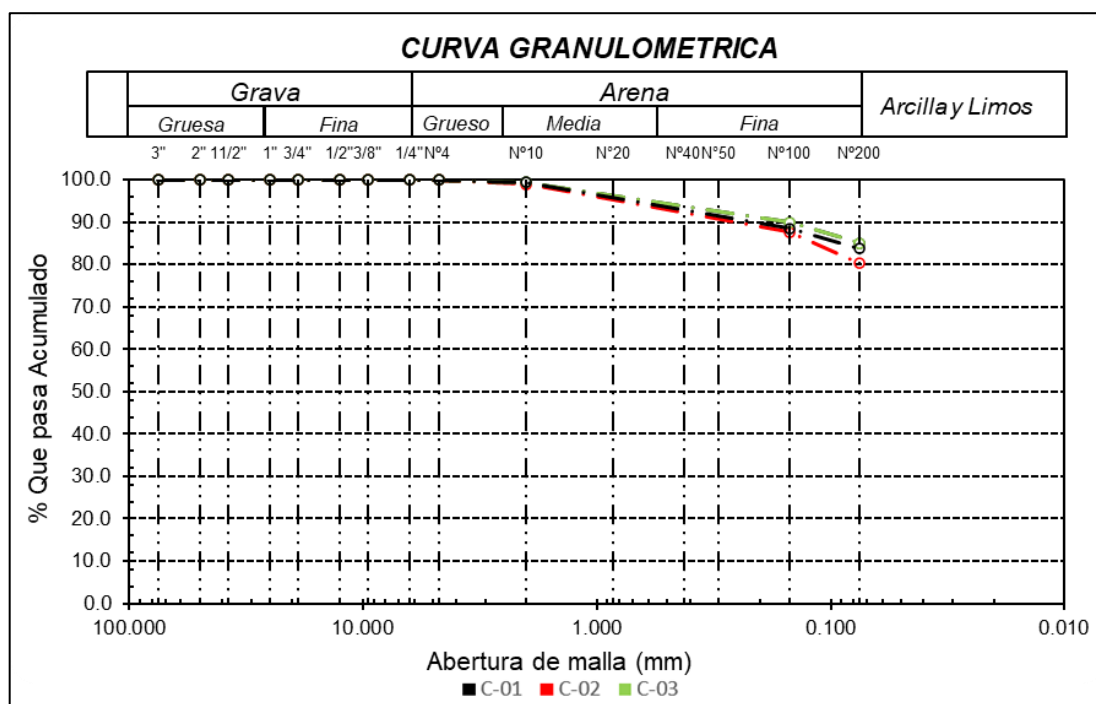
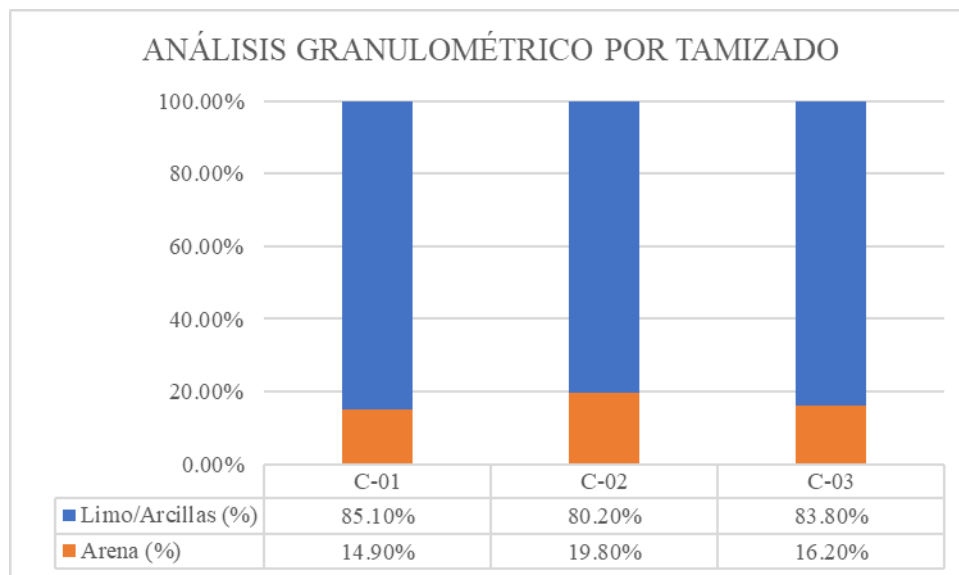


Fig. 33. Curvas granulométricas de las muestras en estado natural.

Los resultados obtenidos muestran que el porcentaje pasante a la malla N°200 es mayor al 80%, lo que indica que el suelo posee una granulometría fina, en la cual predominan las arcillas o limos.



**Fig. 34.** Distribución granulométrica natural mediante tamizado.

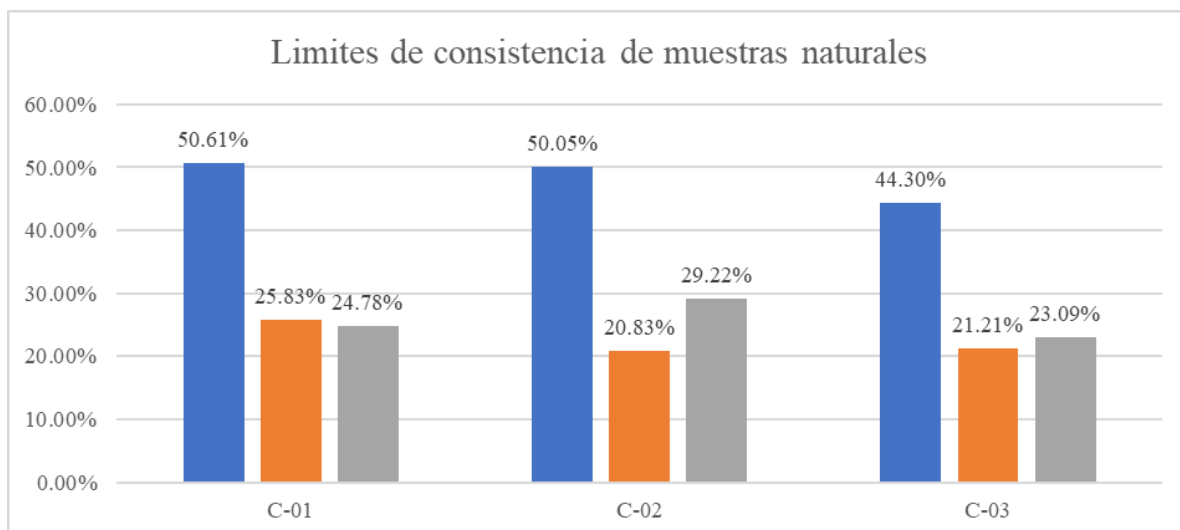
### Límites de consistencia - Muestras naturales

Se muestran las humedades críticas para que el suelo logre cambiar de consistencia, las cuales son realizadas según las normas MTC E- 110 y MTC E-111.

**TABLA X**

### RESUMEN DE LÍMITES DE CONSISTENCIA DE MUESTRAS NATURALES

| Calicata | Muestra | Prof. (m) | LL (%) | LP (%) | IP (%) |
|----------|---------|-----------|--------|--------|--------|
| C-01     | M - 0%  | 0.20-1.50 | 50.61% | 25.83% | 24.78% |
| C-02     | M - 0%  | 0.20-1.50 | 50.05% | 20.83% | 29.22% |
| C-03     | M - 0%  | 0.20-1.50 | 44.30% | 21.21% | 23.09% |



**Fig. 35.** Porcentaje de consistencia de las muestras originales.

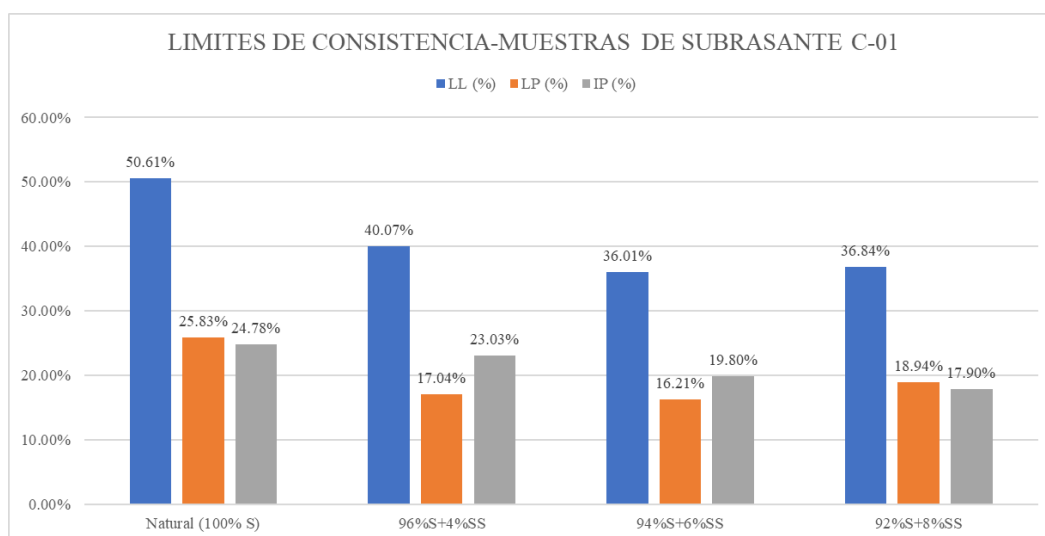
### Límites de consistencia - muestras experimentales C-01

La TABLA XI y la fig. 36 muestran los valores y cambios obtenidos en las muestras experimentales de la C-01.

**TABLA XI**

**RESUMEN DE LÍMITES DE CONSISTENCIA DE MUESTRAS EN LA C-01**

| Calicata | Muestra          | Prof. (m) | LL (%) | LP (%) | IP (%) |
|----------|------------------|-----------|--------|--------|--------|
| C-01     | Natural (100% S) | 0.20-1.50 | 50.61% | 25.83% | 24.78% |
| C-01     | 96%S+4%SS        | 0.20-1.50 | 40.07% | 17.04% | 23.03% |
| C-01     | 94%S+6%SS        | 0.20-1.50 | 36.01% | 16.21% | 19.80% |
| C-01     | 92%S+8%SS        | 0.20-1.50 | 36.84% | 18.94% | 17.90% |



**Fig. 36.** Porcentajes desglosados de límites de consistencia C-01

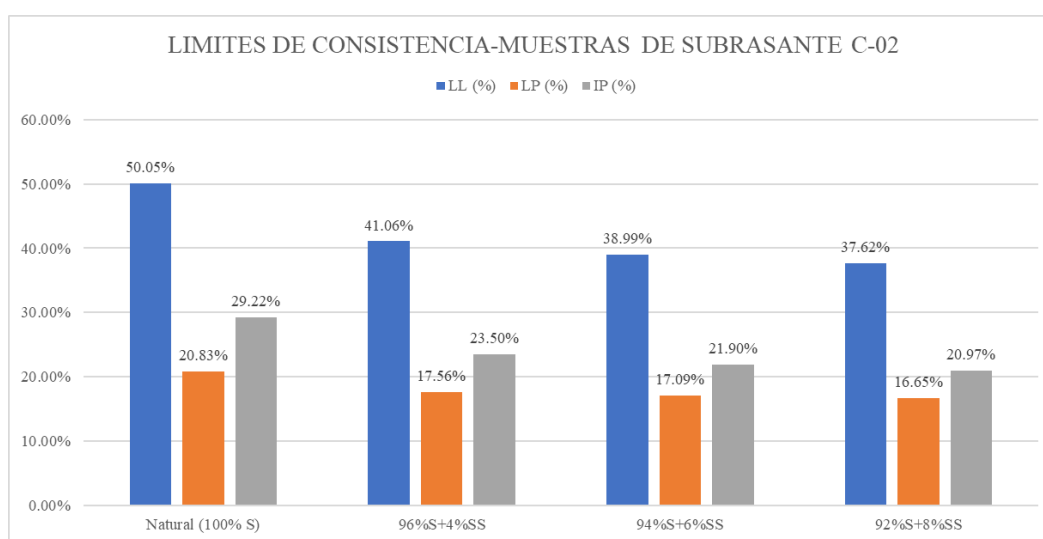
### Límites de consistencia - muestras experimentales C-02

La TABLA XII y la fig. 37 muestran los valores y cambios obtenidos en las muestras experimentales de la C-02.

**TABLA XII**

#### RESUMEN DE LÍMITES DE CONSISTENCIA DE MUESTRAS EN LA C-02

| Calicata | Muestra          | Prof. (m) | LL (%) | LP (%) | IP (%) |
|----------|------------------|-----------|--------|--------|--------|
| C-02     | Natural (100% S) | 0.20-1.50 | 50.05% | 20.83% | 29.22% |
| C-02     | 96%S+4%SS        | 0.20-1.50 | 41.06% | 17.56% | 23.50% |
| C-02     | 94%S+6%SS        | 0.20-1.50 | 38.99% | 17.09% | 21.90% |
| C-02     | 92%S+8%SS        | 0.20-1.50 | 37.62% | 16.65% | 20.97% |



**Fig. 37.** Porcentajes desglosados de límites de consistencia C-02

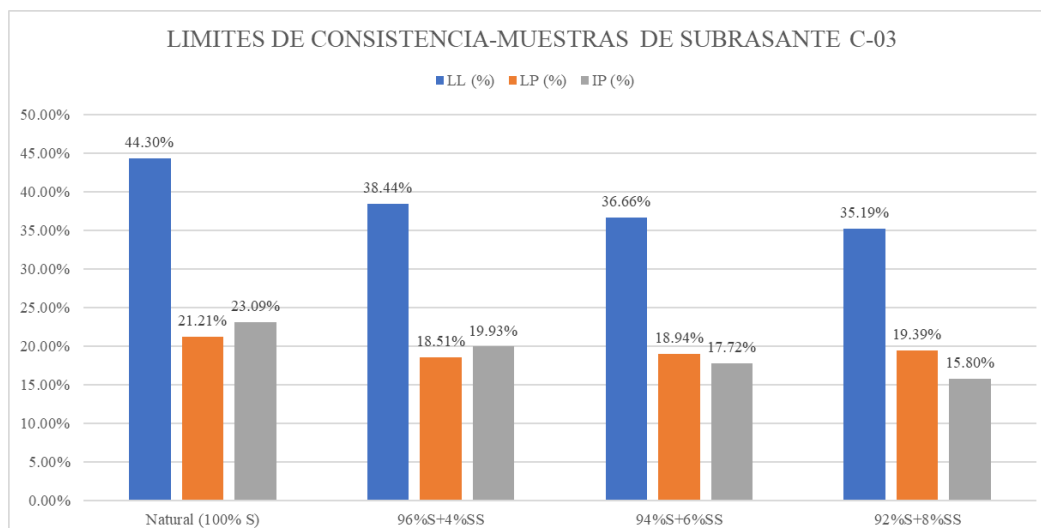
### Límites de consistencia - muestras experimentales C-03

La TABLA XIII y la fig. 38 muestran los valores y cambios obtenidos en las muestras experimentales de la C-03.

**TABLA XIII**

#### LÍMITES DE LÍMITES DE CONSISTENCIA DE MUESTRAS EN LA C-03

| Calicata | Muestra          | Prof. (m) | LL (%) | LP (%) | IP (%) |
|----------|------------------|-----------|--------|--------|--------|
| C-03     | Natural (100% S) | 0.20-1.50 | 44.30% | 21.21% | 23.09% |
| C-03     | 96%S+4%SS        | 0.20-1.50 | 38.44% | 18.51% | 19.93% |
| C-03     | 94%S+6%SS        | 0.20-1.50 | 36.66% | 18.94% | 17.72% |
| C-03     | 92%S+8%SS        | 0.20-1.50 | 35.19% | 19.39% | 15.80% |



**Fig. 38.** Porcentajes desglosados de límites de consistencia C-03

### Clasificación de suelo - Muestras naturales

Según los límites y el análisis granulométrico se permitió clasificar al tipo de suelo mediante el sistema SUCS y AASHTO, dando como resultado los mostrados en la TABLA XIV.

**TABLA XIV**

RESUMEN DE LA CLASIFICACIÓN AASHTO Y SUCS DE LAS MUESTRAS EN ESTADO NATURAL

| Calicata | Muestra | Prof. (m) | AASHTO     | SUCS |
|----------|---------|-----------|------------|------|
| C-01     | M - 0%  | 0.20-1.50 | A-7-6 (16) | CH   |
| C-02     | M - 0%  | 0.20-1.50 | A-7-6 (18) | CH   |
| C-03     | M - 0%  | 0.20-1.50 | A-7-6 (14) | CL   |

Las propiedades de granulometría y límites de consistencia empleadas para determinar el tipo de suelo según SUCS y AASTHO. La TABLA XIV, muestra que la C-01 es CH (alta plasticidad), la C-02 es CH con arena y la calicata C-03 CL (baja plasticidad).

**TABLA XV**

ÍNDICE DE GRUPO DE MUESTRAS NATURALES

| Calicata | IG | Clasificación |
|----------|----|---------------|
| C-01     | 16 | Inadecuada    |
| C-02     | 18 | Inadecuada    |
| C-03     | 14 | Inadecuada    |

Además, se determinó que las tres pertenecen al grupo A-7-6 con un IG mostrado en TABLA XV, según [46] mientras el IG sea mayor a 9, las subrasantes son clasificadas como inadecuadas.

### **OE2: Obtener las curvas de compactación del suelo arcilloso en su estado natural y del suelo con tres concentraciones de silicato de sodio**

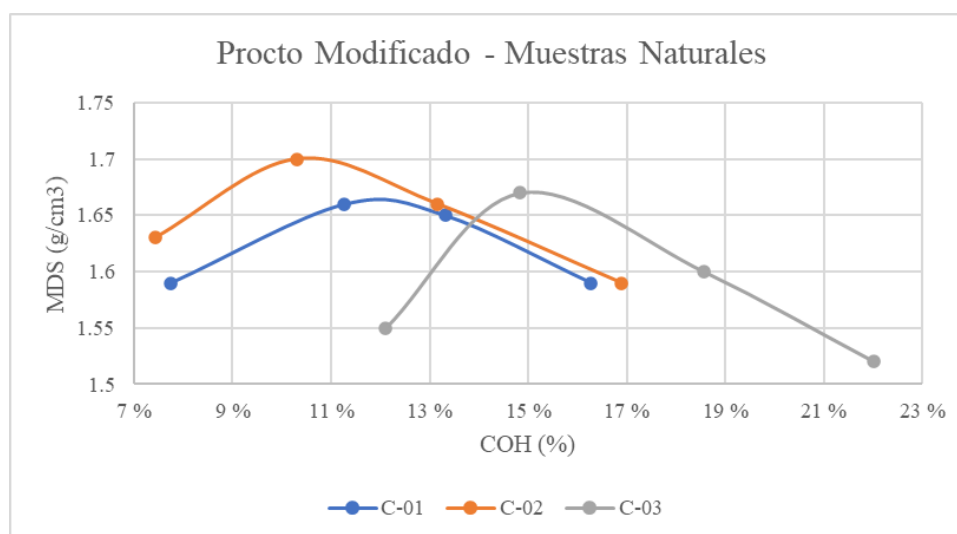
Para lograr obtener las curvas de compactación de la muestra natural y del suelo con distintos porcentajes de silicato de sodio, se determinó primero el COH y la MDS del suelo empleando el ensayo de Proctor modificado, también se empleó el método “A” de compactación de la norma MTC E-115, para determinar el C.O.H. y la M.D.S.

#### **Proctor modificado – Muestras naturales**

Se obtuvieron los siguientes resultados y curvas de compactación de las muestras naturales representados en la TABLA XVI y Fig. 39 respectivamente.

**TABLA XVI**  
RESUMEN DE LA CURVA DE COMPACTACIÓN DE LAS MUESTRAS EN  
ESTADO NATURAL

| Calicata | Muestra | Prof. (m) | Contenido Óptimo de Humedad (%) | Máxima Densidad Seca (g/cm <sup>3</sup> ) |
|----------|---------|-----------|---------------------------------|---|
| C-01     | M - 0%  | 0.20-1.50 | 11.50                           | 1.661                                     |
| C-02     | M - 0%  | 0.20-1.50 | 10.30                           | 1.700                                     |
| C-03     | M - 0%  | 0.20-1.50 | 15.20                           | 1.672                                     |



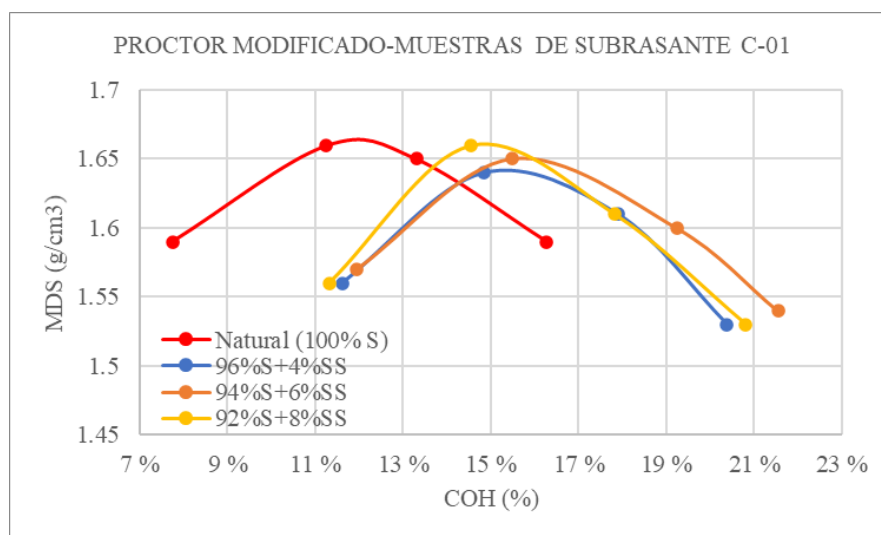
**Fig. 39.** Gráfica de compactación de las subrasantes naturales.

### Proctor modificado - Muestras experimentales C-01

La TABLA XVII y la fig. 40 muestran los valores y las curvas de compactación de las muestras experimentales de la C-01.

**TABLA XVII**  
COH Y MDS DE LAS MUESTRAS DE LA CALICATA 01

| Calicata | Muestra          | Prof. (m) | Contenido Óptimo de Humedad (%) | Máxima Densidad Seca (g/cm <sup>3</sup> ) |
|----------|------------------|-----------|---------------------------------|---|
| C-01     | Natural (100% S) | 0.20-1.50 | 11.50                           | 1.661                                     |
| C-01     | 96%S+4%SS        | 0.20-1.50 | 15.30                           | 1.642                                     |
| C-01     | 94%S+6%SS        | 0.20-1.50 | 15.68                           | 1.650                                     |
| C-01     | 92%S+8%SS        | 0.20-1.50 | 14.90                           | 1.660                                     |



**Fig. 40.** Comportamiento de compactación por tipo de muestra.

### Proctor modificado - Muestras experimentales C-02

La TABLA XVIII y la fig. 41 muestran los valores y las curvas de compactación de las muestras experimentales de la C-02.

**TABLA XVIII**  
COH Y MDS DE LAS MUESTRAS DE LA CALICATA 02

| Calicata | Muestra          | Prof. (m) | Contenido Óptimo de Humedad (%) | Máxima Densidad Seca (g/cm <sup>3</sup> ) |
|----------|------------------|-----------|---------------------------------|---|
| C-02     | Natural (100% S) | 0.20-1.50 | 10.30                           | 1.700                                     |
| C-02     | 96%S+4%SS        | 0.20-1.50 | 14.80                           | 1.740                                     |
| C-02     | 94%S+6%SS        | 0.20-1.50 | 15.60                           | 1.670                                     |
| C-02     | 92%S+8%SS        | 0.20-1.50 | 15.00                           | 1.661                                     |

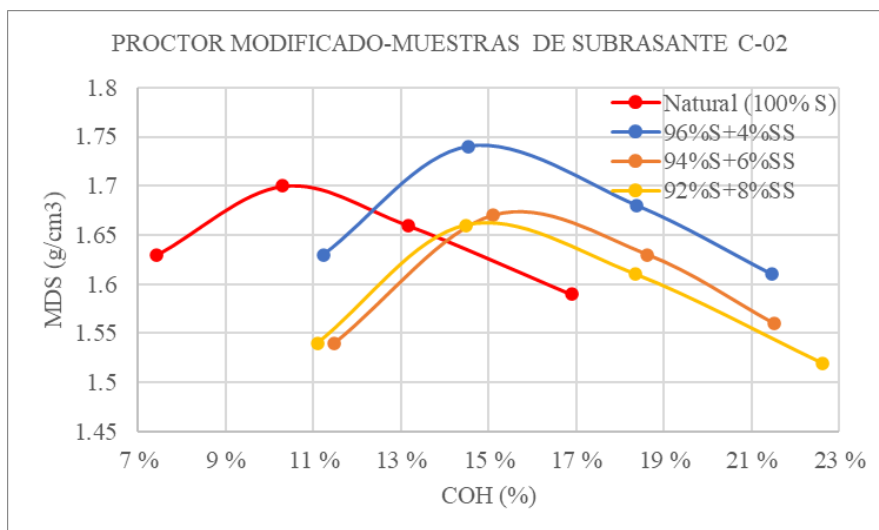


Fig. 41. Comportamiento de compactación por tipo de muestra.

### Proctor modificado - muestras experimentales C-03

La TABLA XIX y la fig. 42 muestran los valores y las curvas de compactación de las muestras experimentales de la C-03.

**TABLA XIX**

COH Y MDS DE LAS MUESTRAS DE LA CALICATA 03

| Calicata | Muestra          | Prof. (m) | Contenido Óptimo de Humedad (%) | Máxima Densidad Seca (g/cm <sup>3</sup> ) |
|----------|------------------|-----------|---------------------------------|---|
| C-03     | Natural (100% S) | 0.20-1.50 | 15.20                           | 1.672                                     |
| C-03     | 96%S+4%SS        | 0.20-1.50 | 18.00                           | 1.572                                     |
| C-03     | 94%S+6%SS        | 0.20-1.50 | 12.00                           | 1.661                                     |
| C-03     | 92%S+8%SS        | 0.20-1.50 | 19.48                           | 1.560                                     |

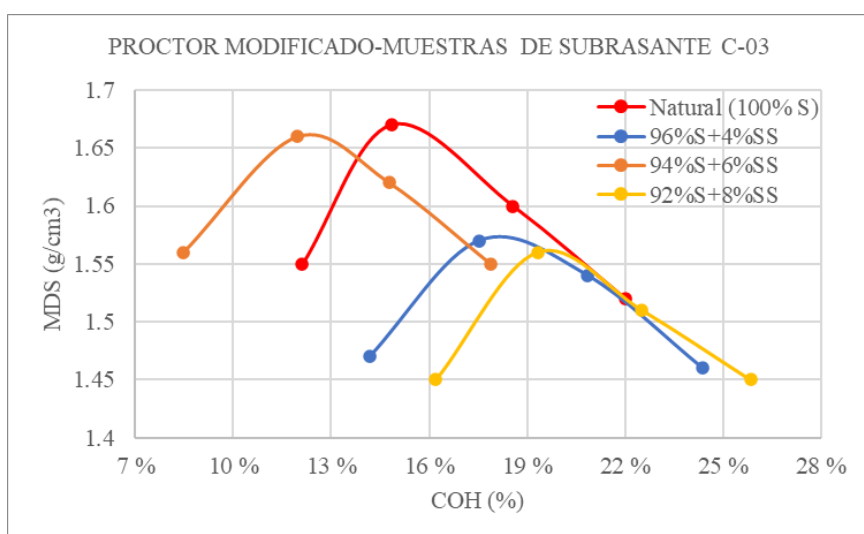


Fig. 42. Comportamiento de compactación por tipo de muestra.

### OE3: Determinar la capacidad portante del suelo en su estado natural y del suelo con las concentraciones de silicato de sodio

Para lograr determinar la capacidad portante de la muestra natural y del suelo con distintos porcentajes de silicato de sodio, se realizó el ensayo de CBR para penetraciones de 2.54mm (0.1”), siendo lo estipulado por la norma MTC E-132 [48].

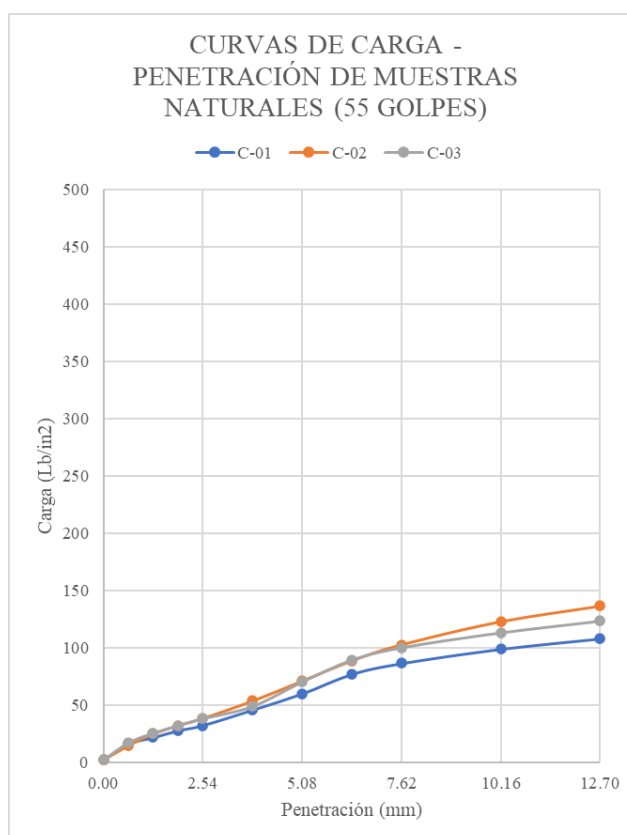
#### Capacidad de soporte (CBR) – Muestras naturales

Los resultados y las curvas de carga obtenidas de la muestra natural se muestran en la TABLA XX, y figuras 43, 44 y 45 respectivamente.

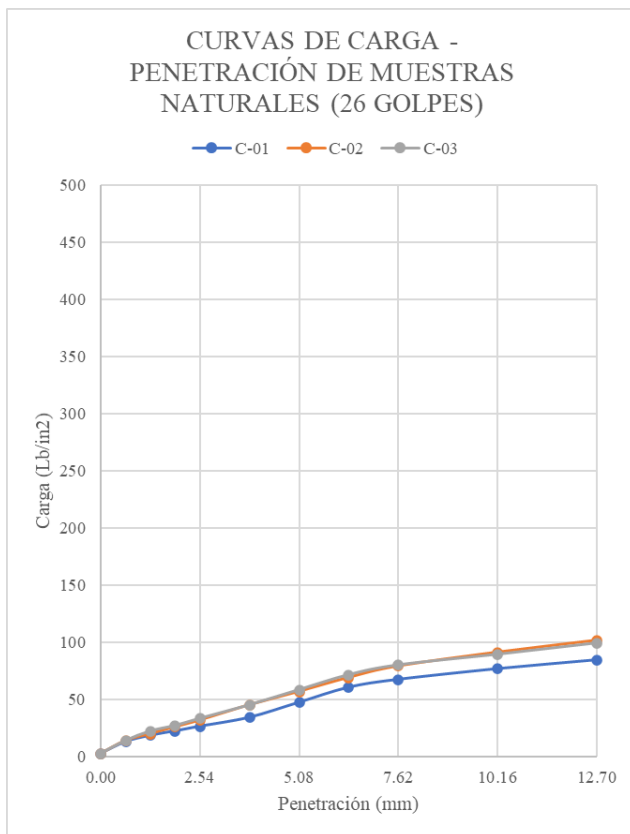
**TABLA XX**

RESUMEN DE LA CAPACIDAD DE SOPORTE DE LAS MUESTRAS NATURALES

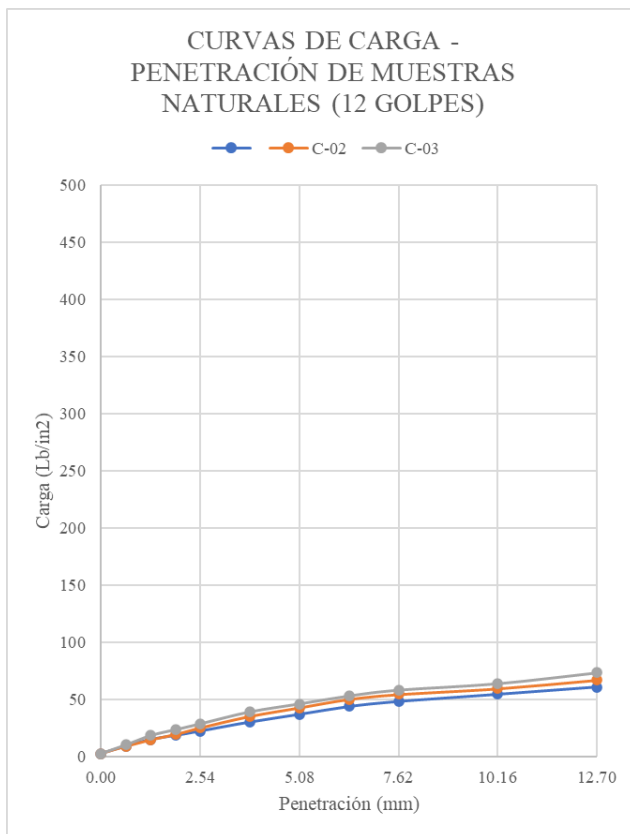
| Calicata | Muestra | Prof. (m) | CBR (%) al 95% (0.1") | CBR (%) al 100% (0.1") |
|----------|---------|-----------|-----------------------|------------------------|
| C-01     | M - 0%  | 0.20-1.50 | 2.67                  | 3.21                   |
| C-02     | M - 0%  | 0.20-1.50 | 3.32                  | 4.16                   |
| C-03     | M - 0%  | 0.20-1.50 | 3.45                  | 3.81                   |



**Fig. 43.** Curvas CBR a 55 golpes en suelos naturales.



**Fig. 44.** Curvas CBR a 26 golpes en suelos naturales.



**Fig. 45.** Curvas CBR a 12 golpes en suelos naturales.

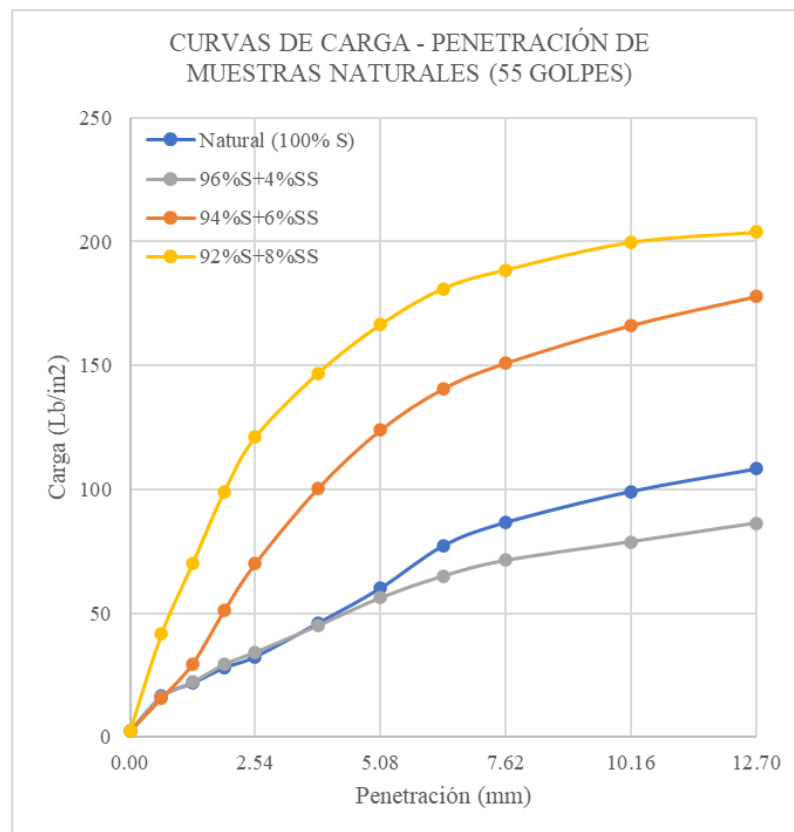
### Capacidad de soporte - Muestras experimentales C-01

La TABLA XXI y la figuras 46, 47 y 48 muestran los valores y las curvas de carga obtenidas en el CBR para una compactación al 95% y 100% de la M.D.S. de las muestras experimentales de la C-01.

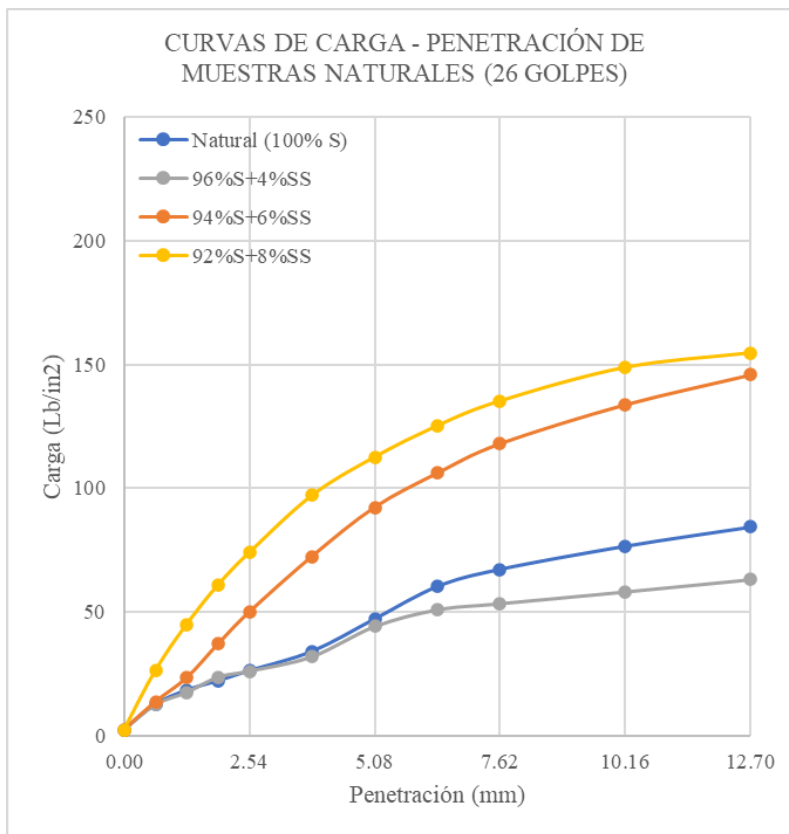
**TABLA XXI**

**CBR (%) EN MUESTRAS EXPERIMENTALES C-01**

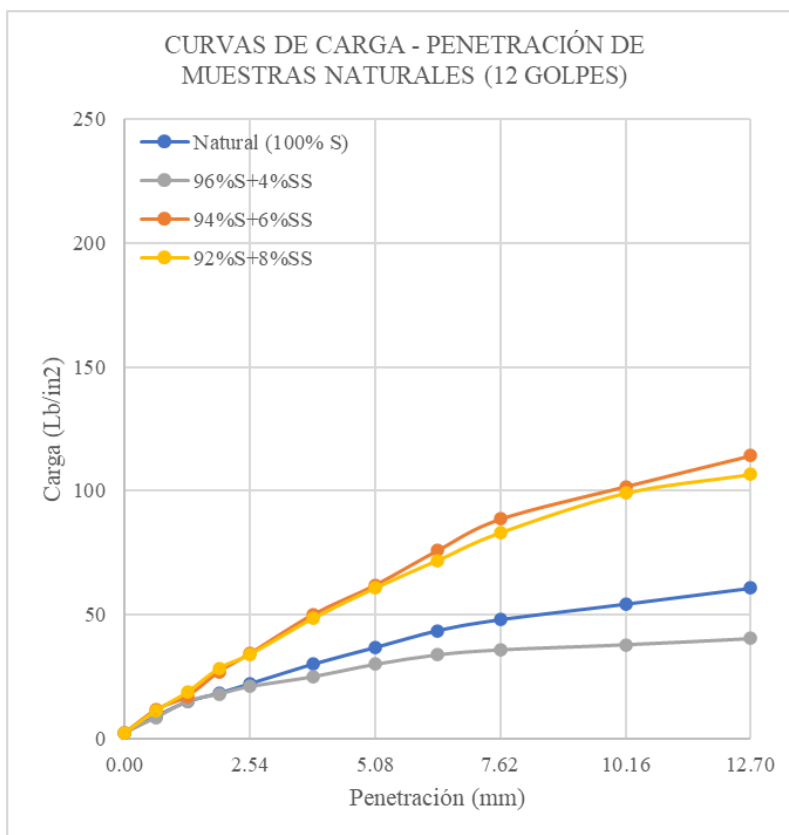
| Calicata | Muestra          | Prof. (m) | CBR (%) al 95% (0.1") | CBR (%) al 100% (0.1") |
|----------|------------------|-----------|-----------------------|------------------------|
| C-01     | Natural (100% S) | 0.20-1.50 | 2.67%                 | 3.21%                  |
| C-01     | 96%S+4%SS        | 0.20-1.50 | 2.62%                 | 3.16%                  |
| C-01     | 94%S+6%SS        | 0.20-1.50 | 5.79%                 | 6.97%                  |
| C-01     | 92%S+8%SS        | 0.20-1.51 | 8.77%                 | 11.73%                 |



**Fig. 46.** Curvas CBR de C-01 a 55 golpes.



**Fig. 47.** Curvas CBR de C-01 a 26 golpes.



**Fig. 48.** Curvas CBR de C-01 a 12 golpes.

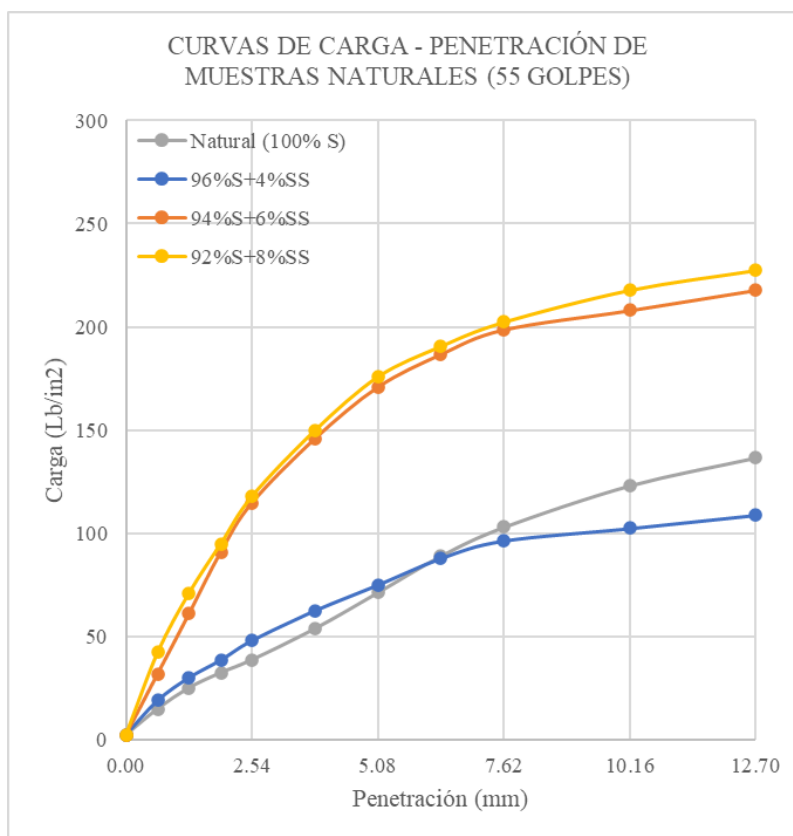
### Capacidad de soporte - Muestras experimentales C-02

La TABLA XXII y la figuras 49, 50 y 51 muestran los valores y las curvas de carga obtenidas en el CBR para una compactación al 95% y 100% de la M.D.S. de las muestras experimentales de la C-02.

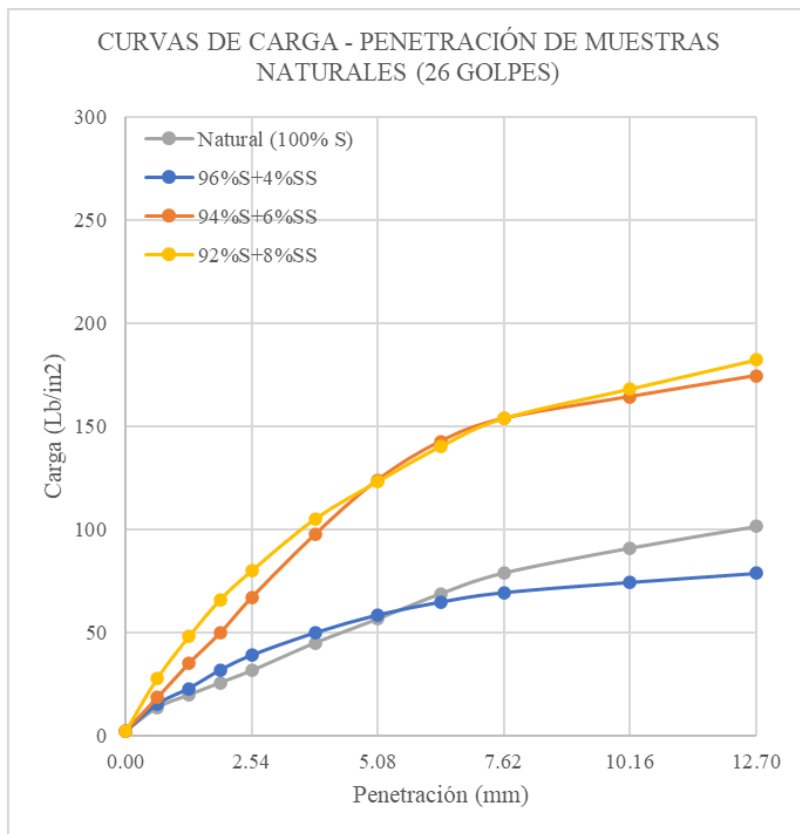
**TABLA XXII**

CBR (%) EN MUESTRAS EXPERIMENTALES C-02

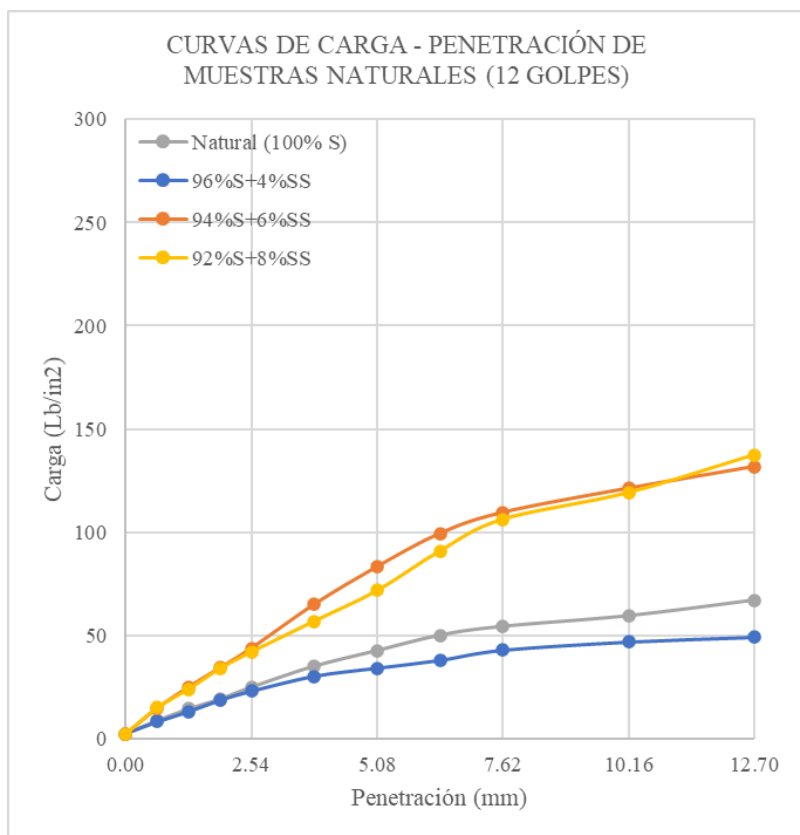
| Calicata | Muestra          | Prof. (m) | CBR (%) al 95% (0.1") | CBR (%) al 100% (0.1") |
|----------|------------------|-----------|-----------------------|------------------------|
| C-02     | Natural (100% S) | 0.20-1.50 | 3.32%                 | 4.16%                  |
| C-02     | 96%S+4%SS        | 0.20-1.50 | 3.85%                 | 5.40%                  |
| C-02     | 94%S+6%SS        | 0.20-1.50 | 6.67%                 | 9.26%                  |
| C-02     | 92%S+8%SS        | 0.20-1.51 | 8.61%                 | 12.35%                 |



**Fig. 49.** Curvas CBR de C-02 a 55 golpes.



**Fig. 50.** Curvas CBR de C-02 a 26 golpes.



**Fig. 51.** Curvas CBR de C-02 a 12 golpes.

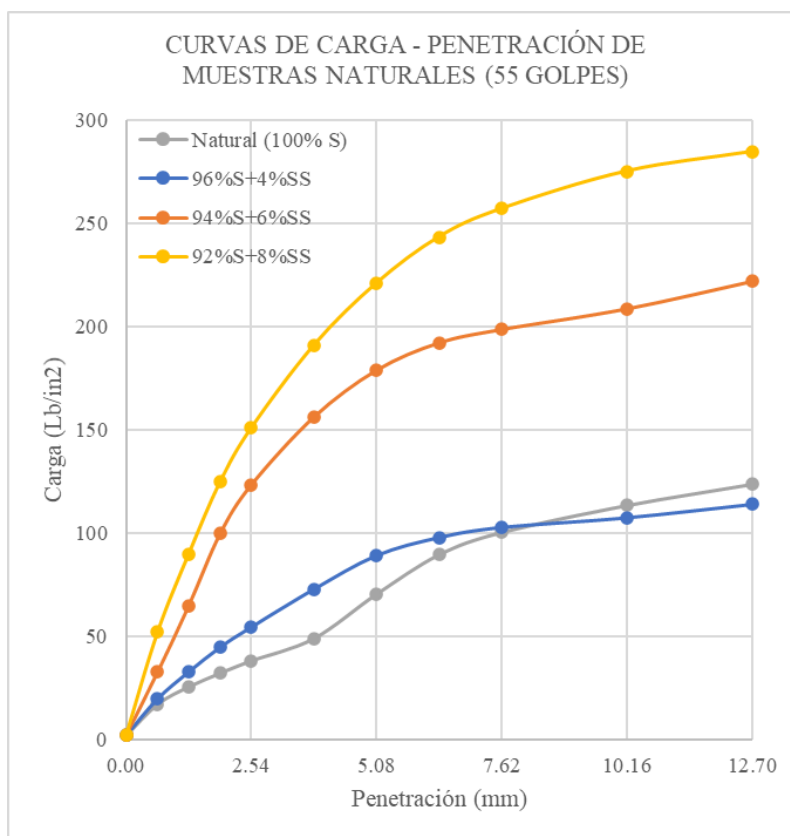
### Capacidad de soporte - Muestras experimentales C-03

La TABLA XXIII y la figuras 52, 53 y 54 muestran los valores y las curvas de carga obtenidas en el CBR para una compactación al 95% y 100% de la M.D.S. de las muestras experimentales de la C-03.

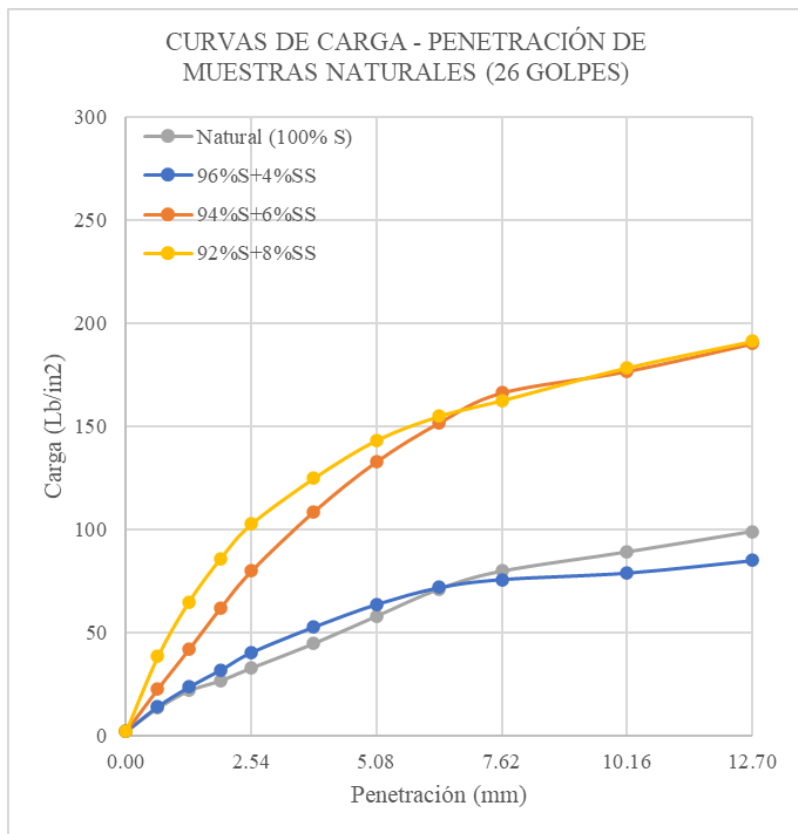
**TABLA XXIII**

**CBR (%) EN MUESTRAS EXPERIMENTALES C-03**

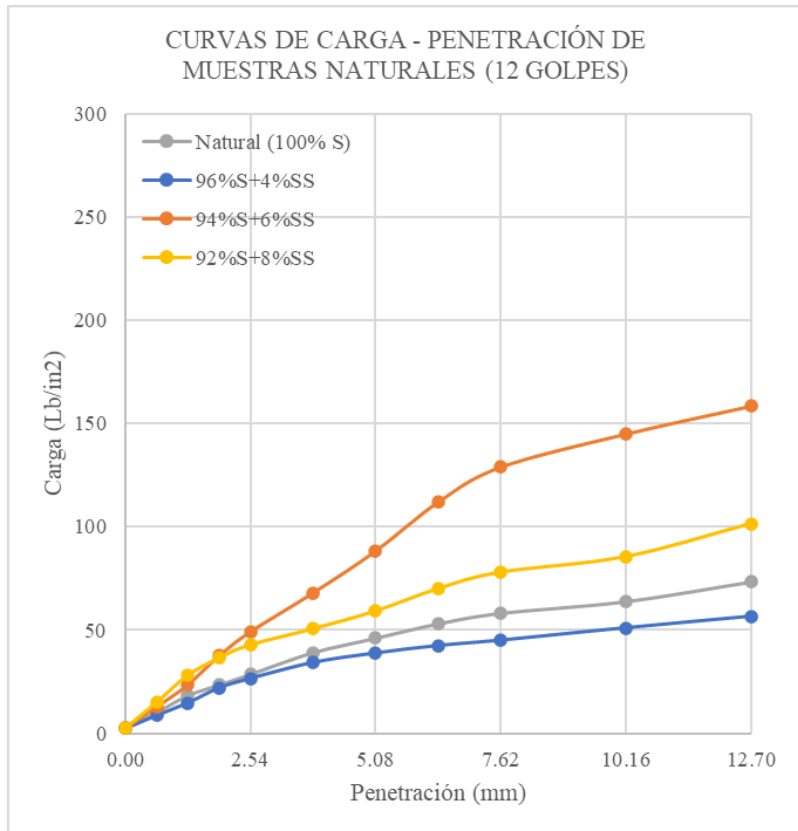
| Calicata | Muestra          | Prof. (m) | CBR (%) al 95% (0.1") | CBR (%) al 100% (0.1") |
|----------|------------------|-----------|-----------------------|------------------------|
| C-03     | Natural (100% S) | 0.20-1.50 | 3.45%                 | 3.81%                  |
| C-03     | 96%S+4%SS        | 0.20-1.50 | 3.94%                 | 5.07%                  |
| C-03     | 94%S+6%SS        | 0.20-1.50 | 7.97%                 | 11.11%                 |
| C-03     | 92%S+8%SS        | 0.20-1.51 | 8.56%                 | 14.06%                 |



**Fig. 52.** Curvas CBR de C-03 a 55 golpes.



**Fig. 53.** Curvas CBR de C-03 a 26 golpes.



**Fig. 54.** Curvas CBR de C-03 a 12 golpes.

#### **OE4: Establecer los parámetros de materia orgánica del suelo en su estado natural**

Para determinar la cantidad de materia orgánica presente en el suelo se realizó el ensayo de materia orgánica por ignición, según la norma MTC E-118, la materia orgánica fue quemada a alta temperatura y se calculó la pérdida de peso.

**TABLA XXIV**

RESUMEN DEL PORCENTAJE DE MATERIA ORGÁNICA DE LAS MUESTRAS EN ESTADO NATURAL

| Calicata | Muestra | Prof. (m) | M.O. (%) |
|----------|---------|-----------|----------|
| C-01     | M - 0%  | 0.20-1.50 | 12.98%   |
| C-02     | M - 0%  | 0.20-1.50 | 12.33%   |
| C-03     | M - 0%  | 0.20-1.50 | 14.83%   |

#### **OE5: Comparar el ph del suelo en su estado natural y del suelo con concentraciones de silicato de sodio**

Para lograr comprar los niveles de ph de la muestra natural y del suelo con distintos porcentajes de silicato de sodio se siguió el ensayo según la norma MTC E-129, el cual midió nivel de acidez o alcalinidad del suelo.

#### **ph en suelos – Muestras naturales**

La TABLA XXV muestra los resultados obtenidos en las muestras naturales:

**TABLA XXV**

RESUMEN DEL NIVEL DE PH DE LAS MUESTRAS EN ESTADO NATURAL

| Calicata | Muestra | Prof. (m) | pH   |
|----------|---------|-----------|------|
| C-01     | M - 0%  | 0.20-1.50 | 9.49 |
| C-02     | M - 0%  | 0.20-1.50 | 9.50 |
| C-03     | M - 0%  | 0.20-1.50 | 8.73 |

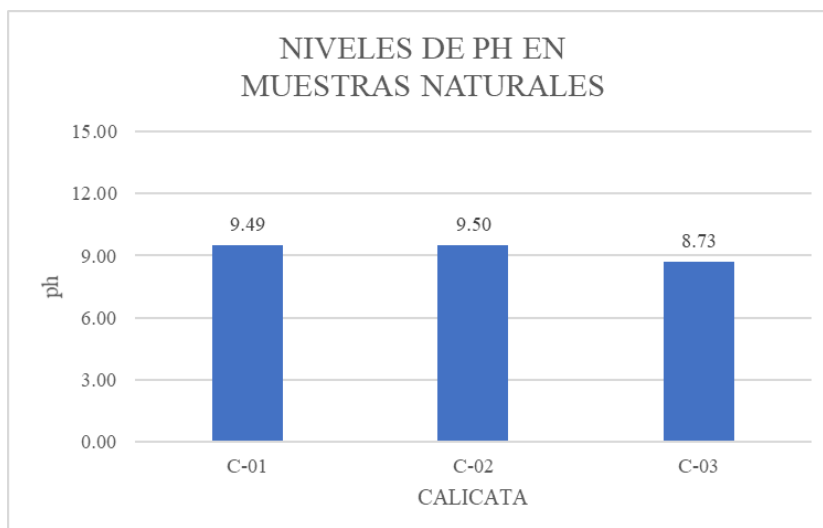


Fig. 55. Niveles de ph de muestras naturales.

### ph en suelos - Muestras experimentales C-01

La TABLA XXVI muestra los resultados obtenidos en las muestras experimentales C-01.

**TABLA XXVI**

NIVEL DE PH EN MUESTRAS EXPERIMENTALES C-01

| Calicata | Muestra          | Prof. (m) | pH    |
|----------|------------------|-----------|-------|
| C-01     | Natural (100% S) | 0.20-1.50 | 9.49  |
| C-01     | 96%S+4%SS        | 0.20-1.50 | 11.72 |
| C-01     | 94%S+6%SS        | 0.20-1.50 | 11.90 |
| C-01     | 92%S+8%SS        | 0.20-1.50 | 11.91 |

### ph en suelos - Muestras experimentales C-02

La TABLA XXVII muestra los resultados obtenidos en las muestras experimentales C-02.

**TABLA XXVII**

NIVEL DE PH EN MUESTRAS EXPERIMENTALES C-02

| Calicata | Muestra          | Prof. (m) | pH    |
|----------|------------------|-----------|-------|
| C-02     | Natural (100% S) | 0.20-1.50 | 9.50  |
| C-02     | 96%S+4%SS        | 0.20-1.50 | 11.70 |
| C-02     | 94%S+6%SS        | 0.20-1.50 | 11.89 |
| C-02     | 92%S+8%SS        | 0.20-1.50 | 11.90 |

### ph en suelos - Muestras experimentales C-03

La TABLA XXVIII muestra los resultados obtenidos en las muestras experimentales C-03.

**TABLA XXVIII****RESUMEN DEL NIVEL DE PH DE LAS MUESTRAS ANALIZADAS**

| Calicata | Muestra          | Prof. (m) | pH    |
|----------|------------------|-----------|-------|
| C-03     | Natural (100% S) | 0.20-1.50 | 8.73  |
| C-03     | 96%S+4%SS        | 0.20-1.50 | 11.80 |
| C-03     | 94%S+6%SS        | 0.20-1.50 | 11.82 |
| C-03     | 92%S+8%SS        | 0.20-1.50 | 11.91 |

**OE6: Evaluar costo y beneficio del uso de silicato de sodio en la mejora de los suelos**

En relación a este objetivo específico se analizó el costo de la estabilización con silicato de sodio propuesta en esta investigación, Además, el Manual de Carreteras [46] dentro del cuadro 9.2, muestra distintos tipo de estabilizantes, por lo que se creyó conveniente contrastar esta estabilización química con la estabilización con cemento (9-12%), por lo que para esta investigación se determinó un porcentaje de cemento de 12%.

$$\text{Vol.} = 1.00 * 1.00 * 0.15 = 0.15\text{m}^3$$

$$S_g = \frac{\gamma_{\text{sólido}}}{\gamma_{\text{agua}}} \rightarrow \gamma_{\text{sólido}} = S_g * \gamma_{\text{agua}}$$

$$\gamma_{\text{sólido}} = 2,428 * 1000 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} = 2428\text{Kg/m}^3$$

$$P. \text{ solido}_{\text{suelo}} = 2428 * 0.15 = 364.2\text{Kg}$$

$$\text{Cemento } 12\% = 12\% * P. \text{ solido}_{\text{suelo}} = 43.704\text{Kg}$$

$$\text{Silicato de sodio } 8\% = 8\% * P. \text{ solido}_{\text{suelo}} = 29.136\text{Kg}$$

El análisis de los ACU determinados para la investigación fueron adaptados de las investigaciones [67], los cuales se mostrarán a continuación:

## Análisis económico del cemento a 12%

| Partida                             | TRAZO, REPLANTEO Y CONTROLES TOPOGRÁFICOS |                  |                 | Jornada | 8.00          | Rend: | 1,100.00       | m2/DIA      |
|-------------------------------------|---|------------------|-----------------|---------|---------------|-------|----------------|-------------|
| <i>Descripción Insumo</i>           | <i>Unidad</i>                             | <i>Cuadrilla</i> | <i>Cantidad</i> |         | <i>Precio</i> |       | <i>Parcial</i> |             |
| <b>Mano de Obra</b>                 |   |                  |                 |         |               |       |                |             |
| TOPOGRAFO                           | HH  | 1.000            | 0.0070          |         | 26.150        |       | 0.18           |             |
| OFICIAL                             | HH  | 1.000            | 0.0070          |         | 20.570        |       | 0.14           |             |
| AYUDANTE DE TOPOGRAFIA              | HH  | 2.000            | 0.0150          |         | 18.600        |       | 0.28           |             |
|                                     |   |                  |                 |         |               |       | <b>0.60</b>    |             |
| <b>Materiales</b>                   |   |                  |                 |         |               |       |                |             |
| YESO (BOLSA DE 15KG)                | bis                                       |                  | 0.0500          |         | 8.200         |       | 0.41           |             |
|                                     |   |                  |                 |         |               |       | <b>0.41</b>    |             |
| <b>Equipo</b>                       |   |                  |                 |         |               |       |                |             |
| HERRAMIENTAS MANUALES               | %MO                                       |                  | 3.0000          |         | 0.600         |       | 0.02           |             |
| NIVEL TOPOGRAFICO (EQUIPO COMPLETO) | hm  | 1.000            | 0.0073          |         | 7.450         |       | 0.05           |             |
| ESTACIÓN TOTAL                      | hm  | 1.000            | 0.0073          |         | 11.350        |       | 0.08           |             |
| WINCHA DE 30m + CORDEL              | hm  | 1.000            | 0.0073          |         | 4.200         |       | 0.03           |             |
|                                     |   |                  |                 |         |               |       | <b>0.18</b>    |             |
|                                     |   |                  |                 |         |               |       |                | <b>1.19</b> |
| <b>Costo Unitario por m2 :</b>      |   |                  |                 |         |               |       |                | <b>1.19</b> |

Fig. 56. ACU - Trazo, Replanteo y Controles Topográficos.

| Partida                        | EXCAVACIÓN A NIVEL DE SUBRASANTE |                  |                 | Jornada | 8.00          | Rend: | 380.00         | m3/DIA      |
|--------------------------------|----------------------------------|------------------|-----------------|---------|---------------|-------|----------------|-------------|
| <i>Descripción Insumo</i>      | <i>Unidad</i>                    | <i>Cuadrilla</i> | <i>Cantidad</i> |         | <i>Precio</i> |       | <i>Parcial</i> |             |
| <b>Mano de Obra</b>            |                                  |                  |                 |         |               |       |                |             |
| OPERARIO                       | HH                               | 1.000            | 0.0211          |         | 26.150        |       | 0.55           |             |
| PEON                           | HH                               | 2.000            | 0.0421          |         | 18.600        |       | 0.78           |             |
|                                |                                  |                  |                 |         |               |       | <b>1.33</b>    |             |
| <b>Equipo</b>                  |                                  |                  |                 |         |               |       |                |             |
| HERRAMIENTAS MANUALES          | %MO                              |                  | 3.0000          |         | 1.334         |       | 0.04           |             |
| CARGADOR FRONTAL               | hm                               | 1.000            | 0.0211          |         | 186.660       |       | 3.92           |             |
| CAMIÓN VOLQUETE 15m3           | hm                               | 1.000            | 0.0211          |         | 150.400       |       | 3.16           |             |
|                                |                                  |                  |                 |         |               |       | <b>7.12</b>    |             |
|                                |                                  |                  |                 |         |               |       |                | <b>8.45</b> |
| <b>Costo Unitario por m3 :</b> |                                  |                  |                 |         |               |       |                | <b>8.45</b> |

Fig. 57. ACU - Excavación a nivel de subrasante.

| Partida                        | BATIDO DE MATERIAL CON CEMENTO 12% - SUBRASANTE |                  |                 | Jornada | 8.00          | Rend: | 830.00         | m2/DIA       |
|--------------------------------|---|------------------|-----------------|---------|---------------|-------|----------------|--------------|
| <i>Descripción Insumo</i>      | <i>Unidad</i>                                   | <i>Cuadrilla</i> | <i>Cantidad</i> |         | <i>Precio</i> |       | <i>Parcial</i> |              |
| <b>Mano de Obra</b>            |   |                  |                 |         |               |       |                |              |
| ASISTENTE OBRA                 | HH  | 1.000            | 0.0096          |         | 26.150        |       | 0.26           |              |
| OPERARIO                       | HH  | 1.000            | 0.0096          |         | 26.150        |       | 0.26           |              |
| PEON                           | HH  | 1.000            | 0.0096          |         | 15.560        |       | 0.16           |              |
|                                |   |                  |                 |         |               |       | <b>0.68</b>    |              |
| <b>Materiales</b>              |   |                  |                 |         |               |       |                |              |
| CEMENTO 12%                    | m2  |                  | 1.0000          |         | 36.610        |       | 36.61          |              |
|                                |   |                  |                 |         |               |       | <b>36.61</b>   |              |
| <b>Equipo</b>                  |   |                  |                 |         |               |       |                |              |
| HERRAMIENTAS MANUALES          | %MO   |                  | 3.0000          |         | 0.680         |       | 0.02           |              |
| MOTONIVELADORA 130-135HP       | hm  | 1.000            | 0.0096          |         | 253.740       |       | 2.54           |              |
|                                |   |                  |                 |         |               |       | <b>2.56</b>    |              |
|                                |   |                  |                 |         |               |       |                | <b>39.85</b> |
| <b>Costo Unitario por m2 :</b> |   |                  |                 |         |               |       |                | <b>39.85</b> |

Fig. 58. ACU - Batido de material con cemento 12% e=0.15m.

| Partida                                | PERFILADO, NIVELACIÓN Y COMPACTACIÓN DE LA SUBRASANTE |                  |                 | Jornada | 8.00          | Rend: | 800.00         | m2/DIA      |
|--|---|------------------|-----------------|---------|---------------|-------|----------------|-------------|
| <i>Descripción Insumo</i>              | <i>Unidad</i>   | <i>Cuadrilla</i> | <i>Cantidad</i> |         | <i>Precio</i> |       | <i>Parcial</i> |             |
| <b>Mano de Obra</b>                    |   |                  |                 |         |               |       |                |             |
| OPERARIO                               | HH  | 1.000            | 0.0100          |         | 26.150        |       | 0.26           |             |
| OFICIAL                                | HH  | 1.000            | 0.0100          |         | 20.570        |       | 0.21           |             |
| PEON                                   | HH  | 2.000            | 0.0200          |         | 18.600        |       | 0.37           |             |
|  |   |                  |                 |         |               |       | <b>0.84</b>    |             |
| <b>Materiales</b>                      |   |                  |                 |         |               |       |                |             |
| AGUA                                   | m3  |                  | 0.0500          |         | 5.000         |       | 0.25           |             |
|  |   |                  |                 |         |               |       | <b>0.25</b>    |             |
| <b>Equipo</b>                          |   |                  |                 |         |               |       |                |             |
| HERRAMIENTAS MANUALES                  | %MO   |                  | 3.0000          |         | 0.839         |       | 0.03           |             |
| CAMIÓN CISTERNA (1500 Glns.)           | HM  | 1.000            | 0.0100          |         | 171.580       |       | 1.72           |             |
| RODILLO LISO VIBRATORIO AUTOP. 7-9 Ton | HM  | 1.000            | 0.0100          |         | 141.180       |       | 1.41           |             |
| MOTONIVELADORA 130-135 HP              | HM  | 1.000            | 0.0100          |         | 253.740       |       | 2.54           |             |
|  |   |                  |                 |         |               |       | <b>5.70</b>    |             |
|  |   |                  |                 |         |               |       |                | <b>6.79</b> |
| <b>Costo Unitario por m2 :</b>         |   |                  |                 |         |               |       |                | <b>6.79</b> |

Fig. 59. ACU - Perfilado, nivelación y compactación.

| Presupuesto para mejoramiento de suelo arcilloso con cemento 12% |   |      |          |                 |               |                  |
|--|---|------|----------|-----------------|---------------|------------------|
| Proyecto:  | Análisis del comportamiento mecánico y de las propiedades químicas de los suelos arcillosos en caminos viales con silicato de sodio |      | Fecha:   |                 |               |                  |
| Especialidad:  | Ingeniería Civil  |      |          |                 |               |                  |
| Item   | Descripción   | Und. | Cantidad | Precio Unitario | Costo Parcial | Totales          |
| <b>01</b>  | <b>OBRAS PROVISIONALES, TRABAJOS PRELIMINARES, SEGURIDAD Y SALUD</b>  |      |          |                 |               | <b>S/ 1.190</b>  |
| 01.01.00   | TRAZO, REPLANTEO Y CONTROLES TOPOGRAFICOS   | m2   | 1.00     | 1.19            | 1.19          |                  |
| <b>02</b>  | <b>MOVIMIENTO DE TIERRAS</b>  |      |          |                 |               | <b>S/ 47.908</b> |
| 02.01.01   | EXCAVACIÓN NIVEL DE SUBRASANTE  | m3   | 0.15     | 8.45            | 1.27          |                  |
| 02.01.02   | BATIDO DE MATERIAL CON CEMENTO-SUBRASANTE e=0.15  | m2   | 1.00     | 39.85           | 39.85         |                  |
| 02.01.03   | PERFILADO, NIVELACIÓN Y COMPACTACIÓN DE LA SUBRASANTE   | m2   | 1.00     | 6.79            | 6.79          |                  |
| SUBTOTAL:  |   |      |          |                 |               | S/ 49.098        |
| IGV:   |   |      |          |                 |               | S/ 8.838         |
| COSTO TOTAL:   |   |      |          |                 |               | S/ 57.938        |

Fig. 60. ACU - Presupuesto de la estabilización del cemento 12%.

### Análisis económico del silicato de sodio a 8%

| Partida                        | TRAZO, REPLANTEO Y CONTROLES TOPOGRÁFICOS |        | Jornada   | 8.00     | Rend:  | 1,100.00    | m2/DIA |
|--------------------------------|---|--------|-----------|----------|--------|-------------|--------|
|                                | Descripción Insumo                        | Unidad | Cuadrilla | Cantidad | Precio | Parcial     |        |
| <b>Mano de Obra</b>            |   |        |           |          |        |             |        |
|                                | TOPOGRAFO                                 | HH     | 1.000     | 0.0070   | 26.150 | 0.18        |        |
|                                | OFICIAL                                   | HH     | 1.000     | 0.0070   | 20.570 | 0.14        |        |
|                                | AYUDANTE DE TOPOGRAFIA                    | HH     | 2.000     | 0.0150   | 18.600 | 0.28        |        |
|                                |   |        |           |          |        | <b>0.60</b> |        |
| <b>Materiales</b>              |   |        |           |          |        |             |        |
|                                | YESO (BOLSA DE 15KG)                      | bis    |           | 0.0500   | 8.200  | 0.41        |        |
|                                |   |        |           |          |        | <b>0.41</b> |        |
| <b>Equipo</b>                  |   |        |           |          |        |             |        |
|                                | HERRAMIENTAS MANUALES                     | %MO    |           | 3.0000   | 0.600  | 0.02        |        |
|                                | NIVEL TOPOGRAFICO (EQUIPO COMPLETO)       | hm     | 1.000     | 0.0073   | 7.450  | 0.05        |        |
|                                | ESTACIÓN TOTAL                            | hm     | 1.000     | 0.0073   | 11.350 | 0.08        |        |
|                                | WINCHA DE 30m + CORDEL                    | hm     | 1.000     | 0.0073   | 4.200  | 0.03        |        |
|                                |   |        |           |          |        | <b>0.18</b> |        |
| <b>Costo Unitario por m2 :</b> |   |        |           |          |        | <b>1.19</b> |        |

Fig. 61. ACU - Trazo, Replanteo y Controles Topográficos.

| Partida                        | EXCAVACIÓN A NIVEL DE SUBRASANTE |        | Jornada   | 8.00     | Rend:   | 380.00      | m3/DIA |
|--------------------------------|----------------------------------|--------|-----------|----------|---------|-------------|--------|
|                                | Descripción Insumo               | Unidad | Cuadrilla | Cantidad | Precio  | Parcial     |        |
| <b>Mano de Obra</b>            |                                  |        |           |          |         |             |        |
|                                | OPERARIO                         | HH     | 1.000     | 0.0211   | 26.150  | 0.55        |        |
|                                | PEON                             | HH     | 2.000     | 0.0421   | 18.600  | 0.78        |        |
|                                |                                  |        |           |          |         | <b>1.33</b> |        |
| <b>Equipo</b>                  |                                  |        |           |          |         |             |        |
|                                | HERRAMIENTAS MANUALES            | %MO    |           | 3.0000   | 1.334   | 0.04        |        |
|                                | CARGADOR FRONTAL                 | hm     | 1.000     | 0.0211   | 186.660 | 3.92        |        |
|                                | CAMIÓN VOLQUETE 15m3             | hm     | 1.000     | 0.0211   | 150.400 | 3.16        |        |
|                                |                                  |        |           |          |         | <b>7.12</b> |        |
| <b>Costo Unitario por m3 :</b> |                                  |        |           |          |         | <b>8.45</b> |        |

Fig. 62. ACU - Excavación a nivel de subrasante.

| Partida                        | BATIDO DE MATERIAL CON SILICATO DE SODIO 8% - SUBRASANTE |        | Jornada   | 8.00     | Rend:   | 830.00 m2/DIA |
|--------------------------------|--|--------|-----------|----------|---------|---------------|
|                                | Descripción Insumo                                       | Unidad | Cuadrilla | Cantidad | Precio  | Parcial       |
| <b>Mano de Obra</b>            |  |        |           |          |         |               |
|                                | ASISTENTE OBRA   | HH     | 1.000     | 0.0096   | 26.150  | 0.26          |
|                                | OPERARIO   | HH     | 1.000     | 0.0096   | 26.150  | 0.26          |
|                                | PEON   | HH     | 1.000     | 0.0096   | 15.560  | 0.16          |
|                                |  |        |           |          |         | <b>0.68</b>   |
| <b>Materiales</b>              |  |        |           |          |         |               |
|                                | SILICATO DE SODIO 8%                                     | m2     |           | 1.0000   | 33.330  | 33.33         |
|                                |  |        |           |          |         | <b>33.33</b>  |
| <b>Equipo</b>                  |  |        |           |          |         |               |
|                                | HERRAMIENTAS MANUALES                                    | %MO    |           | 3.0000   | 0.680   | 0.02          |
|                                | MOTONIVELADORA 130-135HP                                 | hm     | 1.000     | 0.0096   | 253.740 | 2.54          |
|                                |  |        |           |          |         | <b>2.56</b>   |
| <b>Costo Unitario por m2 :</b> |  |        |           |          |         | <b>36.57</b>  |

Fig. 63. ACU - Batido de material con silicato de sodio 8% e=0.15m

| Partida                        | PERFILADO, NIVELACIÓN Y COMPACTACIÓN DE LA SUBRASANTE |        | Jornada   | 8.00     | Rend:   | 800.00 m2/DIA |
|--------------------------------|---|--------|-----------|----------|---------|---------------|
|                                | Descripción Insumo                                    | Unidad | Cuadrilla | Cantidad | Precio  | Parcial       |
| <b>Mano de Obra</b>            |   |        |           |          |         |               |
|                                | OPERARIO  | HH     | 1.000     | 0.0100   | 26.150  | 0.26          |
|                                | OFICIAL   | HH     | 1.000     | 0.0100   | 20.570  | 0.21          |
|                                | PEON  | HH     | 2.000     | 0.0200   | 18.600  | 0.37          |
|                                |   |        |           |          |         | <b>0.84</b>   |
| <b>Materiales</b>              |   |        |           |          |         |               |
|                                | AGUA  | m3     |           | 0.0500   | 5.000   | 0.25          |
|                                |   |        |           |          |         | <b>0.25</b>   |
| <b>Equipo</b>                  |   |        |           |          |         |               |
|                                | HERRAMIENTAS MANUALES                                 | %MO    |           | 3.0000   | 0.839   | 0.03          |
|                                | CAMIÓN CISTERNA (1500 Glns.)                          | HM     | 1.000     | 0.0100   | 171.580 | 1.72          |
|                                | RODILLO LISO VIBRATORIO AUTOP. 7-9 Ton                | HM     | 1.000     | 0.0100   | 141.180 | 1.41          |
|                                | MOTONIVELADORA 130-135 HP                             | HM     | 1.000     | 0.0100   | 253.740 | 2.54          |
|                                |   |        |           |          |         | <b>5.70</b>   |
| <b>Costo Unitario por m2 :</b> |   |        |           |          |         | <b>6.79</b>   |

Fig. 64. ACU - Perfilado, nivelación y compactación.

| Presupuesto para mejoramiento de suelo arcilloso con silicato de sodio 8% |   |      |          |                 |               |                  |
|---|---|------|----------|-----------------|---------------|------------------|
| Proyecto:   | Análisis del comportamiento mecánico y de las propiedades químicas de los suelos arcillosos en caminos viales con silicato de sodio |      | Fecha:   |                 |               |                  |
| Especialidad:   | Ingeniería Civil  |      |          |                 |               |                  |
| Item  | Descripción   | Und. | Cantidad | Precio Unitario | Costo Parcial | Totales          |
| <b>01</b>   | <b>OBRAS PROVISIONALES, TRABAJOS PRELIMINARES, SEGURIDAD Y SALUD</b>  |      |          |                 |               | <b>S/ 1.190</b>  |
| 01.01.00  | TRAZO, REPLANTEO Y CONTROLES TOPOGRAFICOS   | m2   | 1.00     | 1.19            | 1.19          |                  |
| <b>02</b>   | <b>MOVIMIENTO DE TIERRAS</b>  |      |          |                 |               | <b>S/ 44.628</b> |
| 02.01.01  | EXCAVACIÓN NIVEL DE SUBRASANTE  | m3   | 0.15     | 8.45            | 1.27          |                  |
| 02.01.02  | BATIDO DE MATERIAL CON SILICATO DE SODIO-SUBRASANTE e=0.15  | m2   | 1.00     | 36.57           | 36.57         |                  |
| 02.01.03  | PERFILADO, NIVELACIÓN Y COMPACTACIÓN DE LA SUBRASANTE   | m2   | 1.00     | 6.79            | 6.79          |                  |
| SUBTOTAL:   |   |      |          |                 | S/ 45.818     |                  |
| IGV:  |   |      |          |                 | S/ 8.247      |                  |
| COSTO TOTAL:  |   |      |          |                 | S/ 54.065     |                  |

Fig. 65. ACU - Presupuesto de la estabilización de silicato de sodio 8%.

Se observa en la fig. 60 y 65, el costo total para la ejecución de estabilización a nivel subrasante con silicato de sodio de un 1.00 m2 con espesor de 15 cm según lo estipulado en el MTC es S/ 54.07, en la cual el silicato de sodio como material costó S/ 33.33, mientras

que la estabilización con cemento tuvo un costo de S/ 57.94, con un costo de material de cemento de S/ 36.61. Siendo considerada alternativa como una opción eficaz y económica para proyectos viales.

**OG: Analizar el comportamiento mecánico y de las propiedades químicas de los suelos arcillosos en caminos viales con silicato de sodio.**

Para analizar el comportamiento mecánico y químico del suelo debido a la influencia del Silicato de Sodio, se procedió a interpretar y analizar los resultados de los ensayos de laboratorio realizados sobre las calicatas C-01, C-02 y C-03. Se evaluaron las propiedades físicas, mecánicas y químicas mediante los ensayos de límites de consistencia, Proctor modificado, CBR y pH, con el fin de comprender las características del suelo investigado y las variaciones que experimenta frente al tratamiento con el estabilizante, además de seleccionar el porcentaje óptimo de aplicación.

**Límites de consistencia - Muestras naturales**

Los límites son los puntos en los cuales se generan variaciones que pueden modificar la estabilidad de suelo debido a efectos de humedad [68]. Los resultados obtenidos se muestran en la TABLA X, así mismo, dentro de la figura 61 se muestran en qué categoría entra cada muestra, en la cual las calicatas (C-01, C-02 y C-03) poseen plasticidad alta según [46].

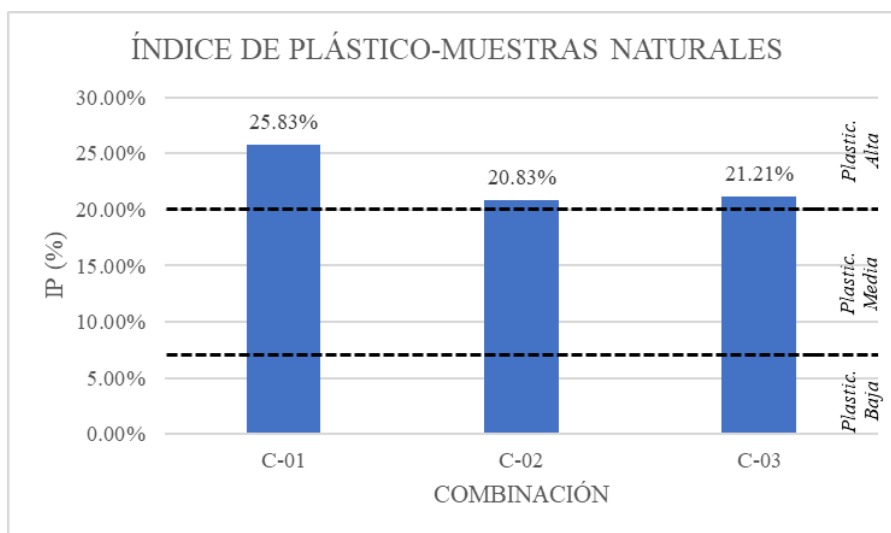


Fig. 66. Índice de plasticidad de muestras naturales.

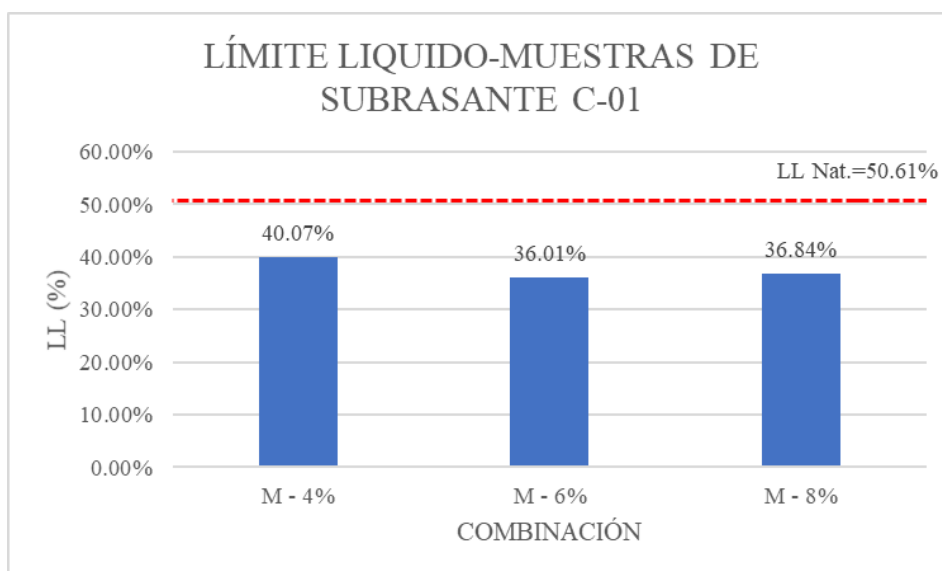
**Límite líquido – Muestras experimentales**

La TABLA XXIX muestra los resultados para cada una de las cuatro muestras de las 3 calicatas.

**TABLA XXIX**  
LÍMITE LÍQUIDO (%) EN TODAS LAS MUESTRAS ANALIZADAS

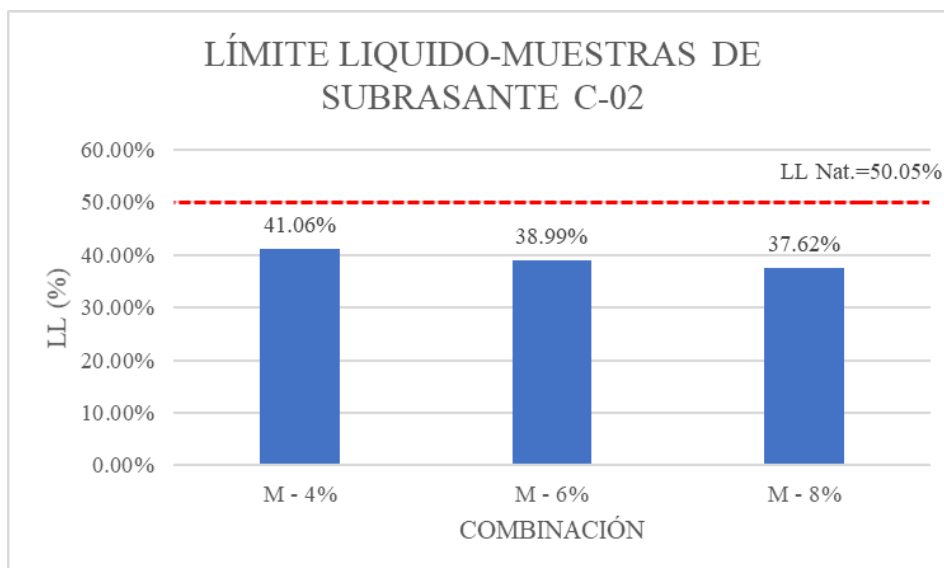
| Combinación      | Límite Líquido (%) |        |        |
|------------------|--------------------|--------|--------|
|                  | C-01               | C-02   | C-03   |
| Natural (100% S) | 50.61%             | 50.05% | 44.30% |
| 96%S+4%SS        | 40.07%             | 41.06% | 38.44% |
| 94%S+6%SS        | 36.01%             | 38.99% | 36.66% |
| 92%S+8%SS        | 36.84%             | 37.62% | 35.19% |

Las figuras 67, 68 y 69, muestran las variaciones obtenidas comparándolas con la muestra natural.



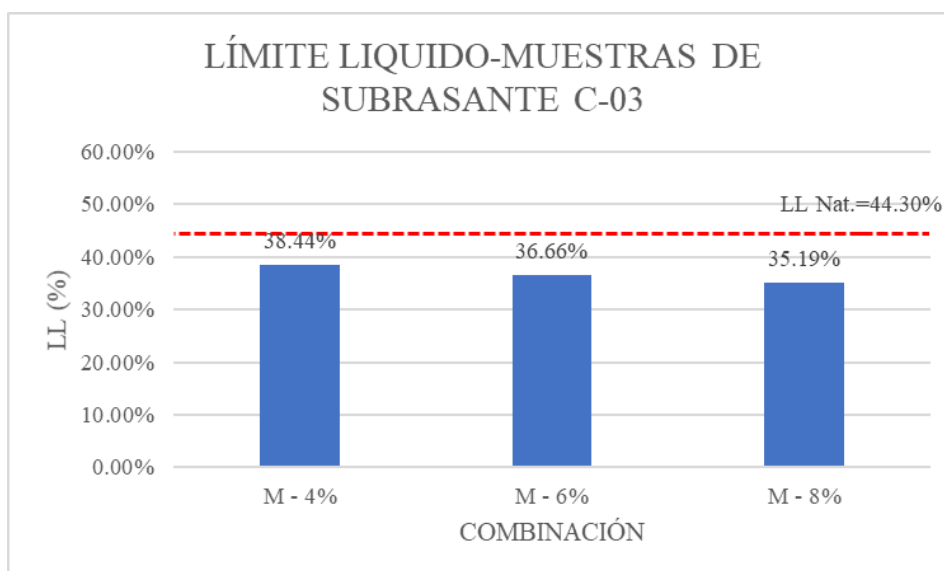
**Fig. 67.** Valor del límite líquido en subrasante C-01.

- ✓ Modificación cuantificada en la mezcla de 96%S + 4%SS: el LL (%) disminuyó 0.79 veces en comparación con la muestra 100%S.
- ✓ Modificación cuantificada en la mezcla de 94%S + 6%SS: el LL (%) disminuyó 0.71 veces en comparación con la muestra 100%S.
- ✓ Modificación cuantificada en la mezcla de 92%S + 8%SS: el LL (%) disminuyó 0.73 veces en comparación con la muestra 100%S.



**Fig. 68.** Valor del límite líquido en subrasante C-02.

- ✓ Modificación cuantificada en la mezcla de 96%S + 4%SS: el LL (%) disminuyó 0.82 veces en comparación con la muestra 100%S.
- ✓ Modificación cuantificada en la mezcla de 94%S + 6%SS: el LL (%) disminuyó 0.78 veces en comparación con la muestra 100%S.
- ✓ Modificación cuantificada en la mezcla de 92%S + 8%SS: el LL (%) disminuyó 0.75 veces en comparación con la muestra 100%S.



**Fig. 69.** Valor del límite líquido en subrasante C-03.

- ✓ Modificación cuantificada en la mezcla de 96%S + 4%SS: el LL (%) disminuyó 0.87 veces en comparación con la muestra 100%S.

- ✓ Modificación cuantificada en la mezcla de 94%S + 6%SS: el LL (%) disminuyó 0.83 veces en comparación con la muestra 100%S.
- ✓ Modificación cuantificada en la mezcla de 92%S + 8%SS: el LL (%) disminuyó 0.79 veces en comparación con la muestra 100%S.

Como se observa en las gráficas 67, 68 y 69, correspondientes a las muestras de subrasante C-01, C-02 y C-03, el incremento progresivo del contenido de silicato de sodio (SS) de 4% a 8% genera, generales, una disminución del límite líquido (LL). No obstante, dicha reducción no sigue una tendencia completamente constante en todas las muestras. En particular, la muestra C-01 muestra una leve inversión en la tendencia al pasar de 6% (0.71 veces) a 8% (0.73 veces) respecto al valor original. En contraste, las muestras C-02 y C-03 presentan una disminución progresiva y continua del LL (%) conforme se incrementa el contenido del estabilizante.

### Límite plástico – Muestras experimentales

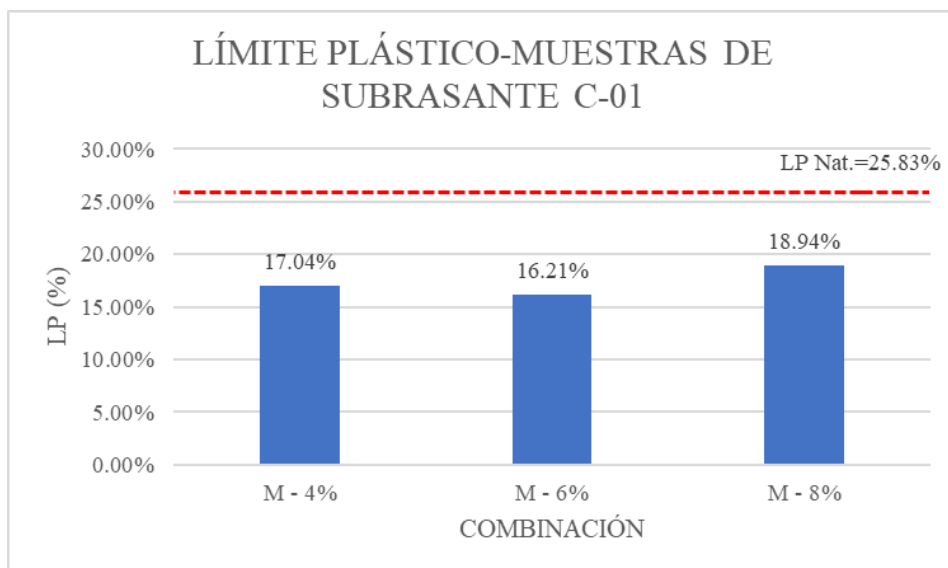
La TABLA XXX muestra los resultados de los límites plásticos de cada muestra realizada.

**TABLA XXX**

LÍMITE PLÁSTICO (%) EN TODAS LAS MUESTRAS ANALIZADAS

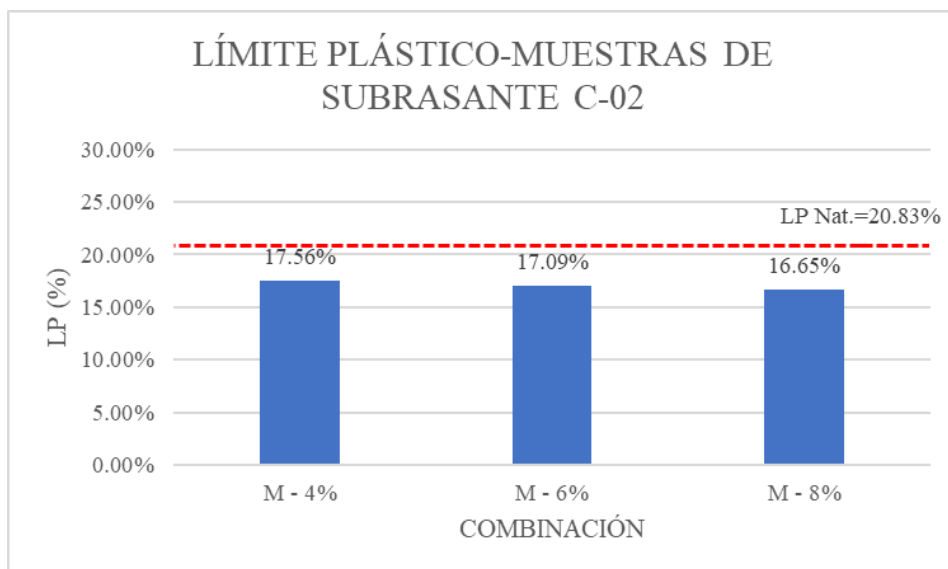
| Combinación      | Límite Plástico (%) |        |        |
|------------------|---------------------|--------|--------|
|                  | C-01                | C-02   | C-03   |
| Natural (100% S) | 25.83%              | 20.83% | 21.21% |
| 96%S+4%SS        | 17.04%              | 17.56% | 18.51% |
| 94%S+6%SS        | 16.21%              | 17.09% | 18.94% |
| 92%S+8%SS        | 18.94%              | 16.65% | 19.39% |

Las figuras 70, 71 y 72, muestran las variaciones obtenidas comparándolas con la muestra natural.



**Fig. 70.** Valor del límite plástico en subrasante C-01.

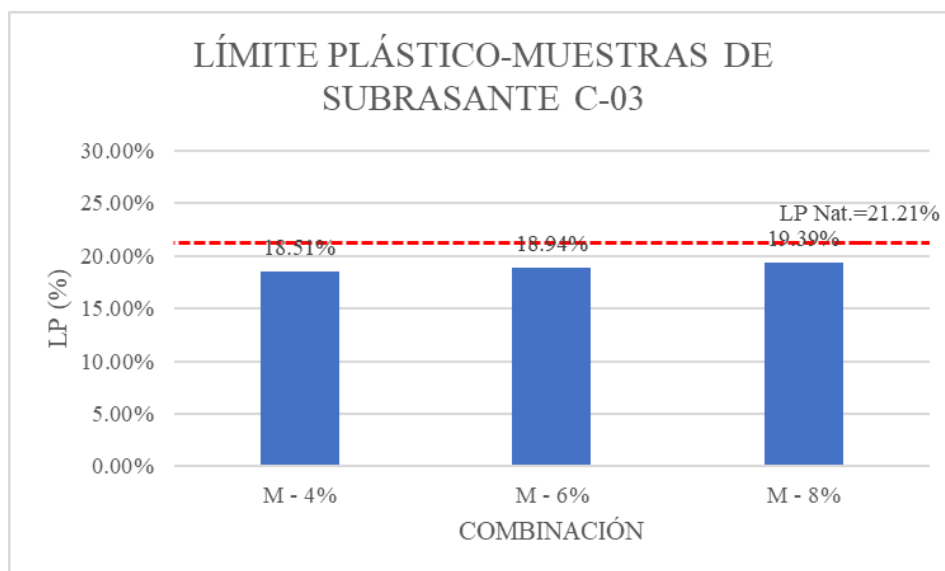
- ✓ Modificación cuantificada en la mezcla de 96%S + 4%SS: el LP (%) disminuyó 0.66 veces en comparación con la muestra 100%S.
- ✓ Modificación cuantificada en la mezcla de 94%S + 6%SS: el LP (%) disminuyó 0.63 veces en comparación con la muestra 100%S.
- ✓ Modificación cuantificada en la mezcla de 92%S + 8%SS: el LP (%) disminuyó 0.73 veces en comparación con la muestra 100%S.



**Fig. 71.** Valor del límite plástico en subrasante C-02.

- ✓ Modificación cuantificada en la mezcla de 96%S + 4%SS: el LP (%) disminuyó 0.84 veces en comparación con la muestra 100%S.

- ✓ Modificación cuantificada en la mezcla de 94%S + 6%SS: el LP (%) disminuyó 0.82 veces en comparación con la muestra 100%S.
- ✓ Modificación cuantificada en la mezcla de 92%S + 8%SS: el LP (%) disminuyó 0.80 veces en comparación con la muestra 100%S.



**Fig. 72.** Valor del límite plástico en subrasante C-03.

- ✓ Modificación cuantificada en la mezcla de 96%S + 4%SS: el LP (%) disminuyó 0.87 veces en comparación con la muestra 100%S.
- ✓ Modificación cuantificada en la mezcla de 94%S + 6%SS: el LP (%) disminuyó 0.89 veces en comparación con la muestra 100%S.
- ✓ Modificación cuantificada en la mezcla de 92%S + 8%SS: el LP (%) disminuyó 0.91 veces en comparación con la muestra 100%S.

Las figuras 70, 71 y 72, correspondientes a las muestras C-01, C-02 y C-03, el comportamiento del límite plástico (LP) ante el incremento del contenido de silicato de sodio (SS) de 4% a 8% no es uniforme. En la muestra C-01, el LP disminuye inicialmente y luego aumenta; en C-02, se observa una disminución progresiva; mientras que en C-03, el LP (%) se incrementa de manera continua.

### Índice de plasticidad

La TABLA XXXI muestra los resultados de los índices de plasticidad de cada muestra realizada.

TABLA XXXI

ÍNDICE PLÁSTICO (%) EN TODAS LAS MUESTRAS ANALIZADAS

| Combinación      | Índice de plasticidad (%) |        |        |
|------------------|---------------------------|--------|--------|
|                  | C-01                      | C-02   | C-03   |
| Natural (100% S) | 24.78%                    | 29.22% | 23.09% |
| 96%S+4%SS        | 23.03%                    | 23.50% | 19.93% |
| 94%S+6%SS        | 19.80%                    | 21.90% | 17.72% |
| 92%S+8%SS        | 17.90%                    | 20.97% | 15.80% |

Las figuras 73, 74 y 75, muestran las variaciones obtenidas comparándolas con la muestra natural.

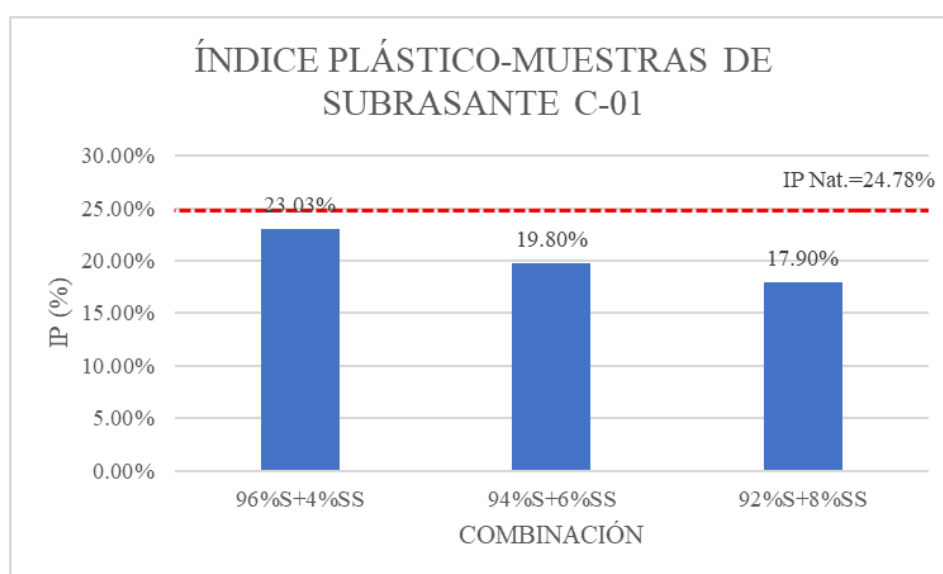
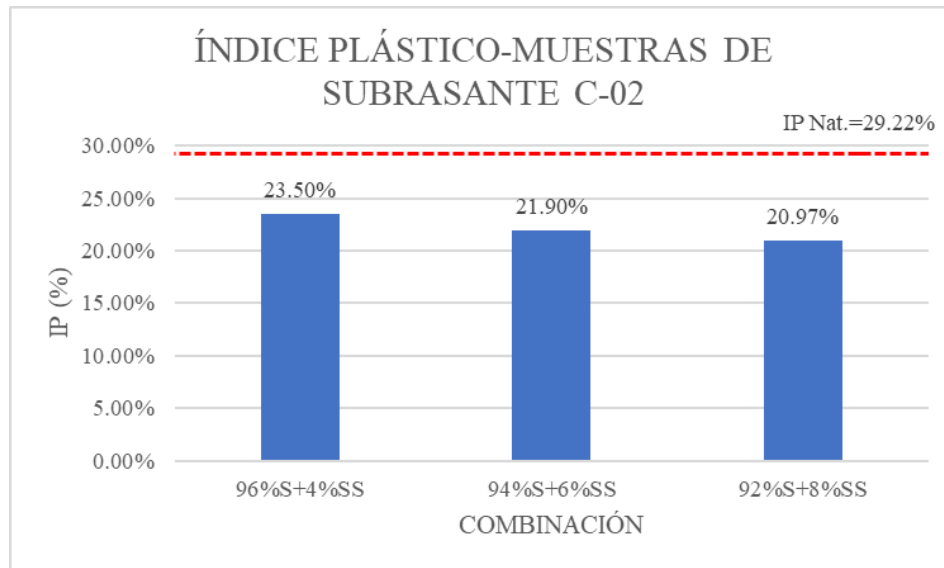


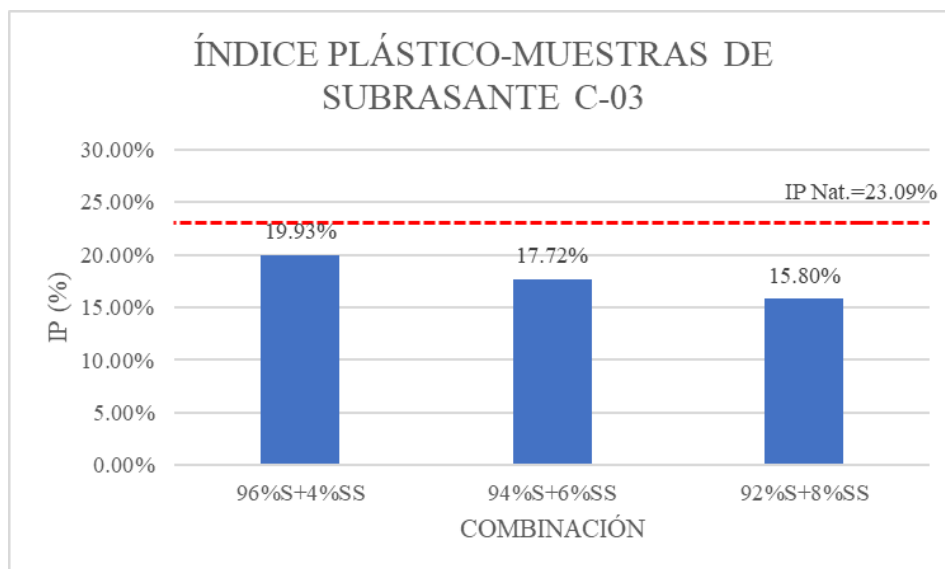
Fig. 73. Valor del índice plástico en C-01.

- ✓ Modificación cuantificada en la mezcla de 96%S + 4%SS: el IP (%) disminuyó 0.93 veces en comparación con la muestra 100%S.
- ✓ Modificación cuantificada en la mezcla de 94%S + 6%SS: el IP (%) disminuyó 0.80 veces en comparación con la muestra 100%S.
- ✓ Modificación cuantificada en la mezcla de 92%S + 8%SS: el IP (%) disminuyó 0.72 veces en comparación con la muestra 100%S.



**Fig. 74.** Valor del índice plástico en C-02.

- ✓ Modificación cuantificada en la mezcla de 96%S + 4%SS: el IP (%) disminuyó 0.80 veces en comparación con la muestra 100%S.
- ✓ Modificación cuantificada en la mezcla de 94%S + 6%SS: el IP (%) disminuyó 0.75 veces en comparación con la muestra 100%S.
- ✓ Modificación cuantificada en la mezcla de 92%S + 8%SS: el IP (%) disminuyó 0.72 veces en comparación con la muestra 100%S.

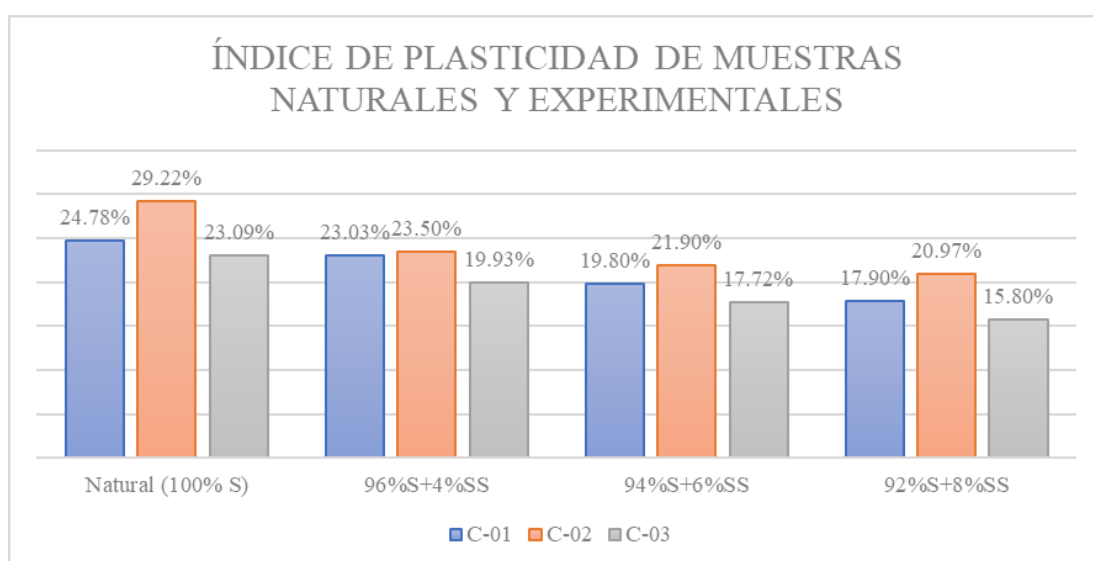


**Fig. 75.** Valor del índice plástico en C-03.

- ✓ Modificación cuantificada en la mezcla de 96%S + 4%SS: el IP (%) disminuyó 0.86 veces en comparación con la muestra 100%S.

- ✓ Modificación cuantificada en la mezcla de 94%S + 6%SS: el IP (%) disminuyó 0.77 veces en comparación con la muestra 100%S.
- ✓ Modificación cuantificada en la mezcla de 92%S + 8%SS: el IP (%) disminuyó 0.68 veces en comparación con la muestra 100%S.

Las figuras 73, 74 y 75, correspondientes a las muestras experimentales C-01, C-02 y C-03, el índice plástico (IP) presenta una reducción progresiva conforme se incrementa el contenido de silicato de sodio (SS) del 4% al 8%. Este comportamiento indica que el estabilizante es efectivo para disminuir la plasticidad de los suelos, siendo consistente tanto en suelos de alta plasticidad como en aquellos con presencia de arena.



**Fig. 76.** Comparativa de índice de plasticidad entre C-01, C-02 y C-03.

Según [46] se busca minimizar el índice de plasticidad para disminuir la sensibilidad de la subrasante frente al agua mejorando su estabilidad, la figura 76 muestra que el porcentaje de Silicato de Sodio óptimo es del 8% para las muestras C-01, C-02 y C-03, ya que el IP (%) de las muestras C-01 y C-03 llegaron a un grado medio ( $7.00 < IP \leq 20$ ) y la muestra C-02 al límite del grado alto ( $20 < IP$ ), generando una estabilidad mayor [46].

## Ensayo Proctor – Muestras experimentales

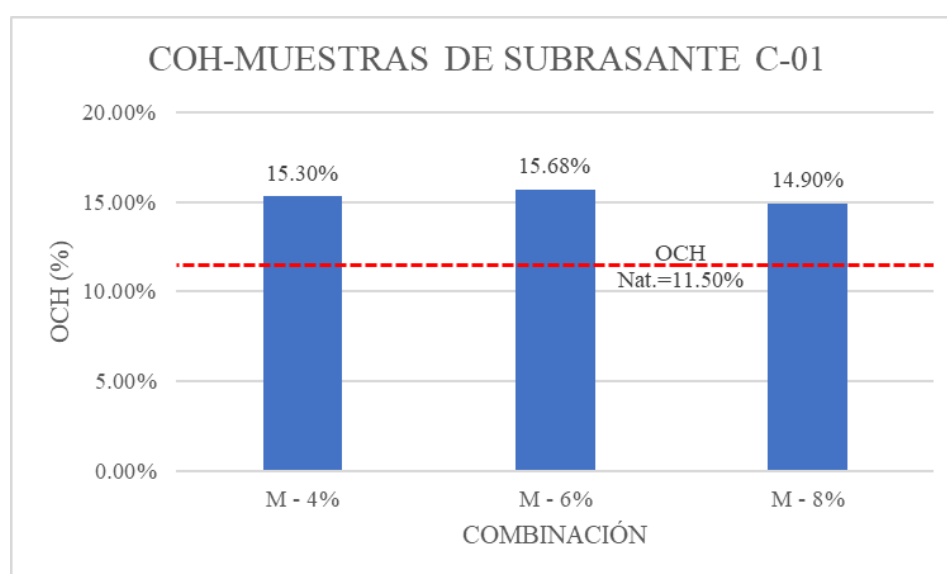
### Óptimo contenido de humedad

La TABLA XXXII muestra los resultados del contenido de humedad de cada muestra realizada.

**TABLA XXXII**  
COH (%) EN TODAS LAS MUESTRAS ANALIZADAS

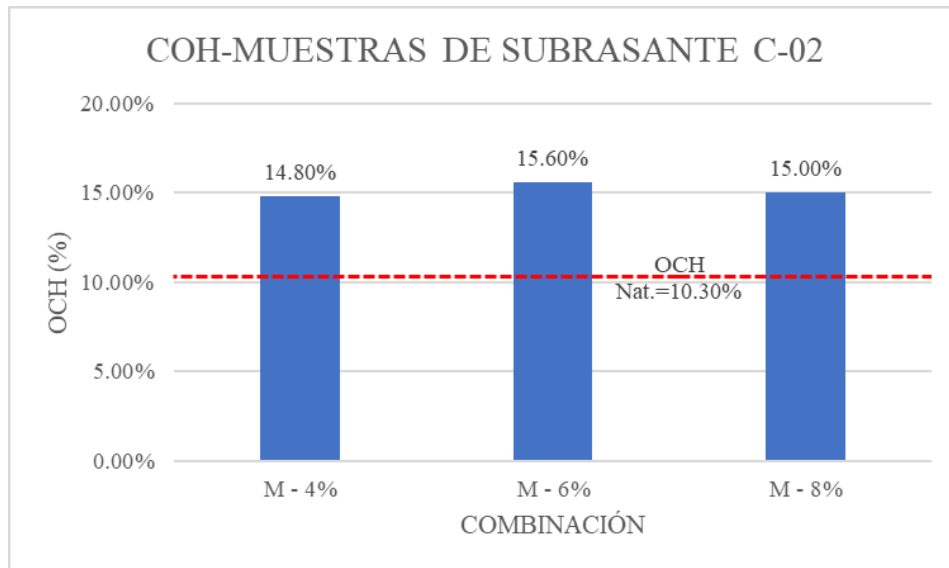
| Combinación      | Contenido Óptimo de Humedad (%) |       |       |
|------------------|---------------------------------|-------|-------|
|                  | C-01                            | C-02  | C-03  |
| Natural (100% S) | 11.50                           | 10.30 | 15.20 |
| 96%S+4%SS        | 15.30                           | 14.80 | 18.00 |
| 94%S+6%SS        | 15.68                           | 15.60 | 12.00 |
| 92%S+8%SS        | 14.90                           | 15.00 | 19.48 |

Las figuras 77, 78 y 79, muestran las variaciones obtenidas comparándolas con la muestra natural.



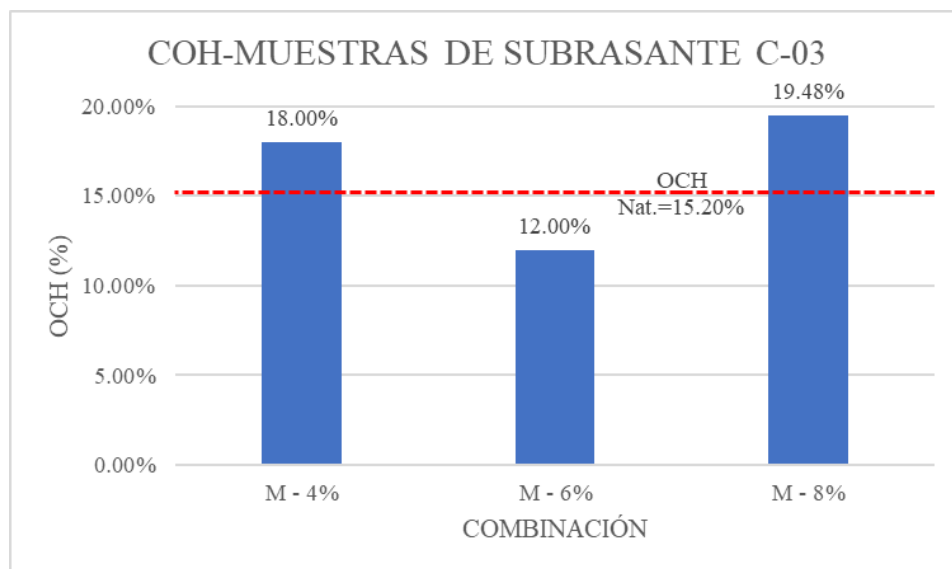
**Fig. 77.** Determinación del contenido óptimo de humedad C-01.

- ✓ Modificación cuantificada en la mezcla de 96%S + 4%SS: el OCH (%) incrementó 1.33 veces en comparación con la muestra 100%S.
- ✓ Modificación cuantificada en la mezcla de 94%S + 6%SS: el OCH (%) incrementó 1.36 veces en comparación con la muestra 100%S.
- ✓ Modificación cuantificada en la mezcla de 92%S + 8%SS: el OCH (%) incrementó 1.30 veces en comparación con la muestra 100%S.



**Fig. 78.** Determinación del contenido óptimo de humedad C-02.

- ✓ Modificación cuantificada en la mezcla de 96%S + 4%SS: el OCH (%) incrementó 1.44 veces en comparación con la muestra 100%S.
- ✓ Modificación cuantificada en la mezcla de 94%S + 6%SS: el OCH (%) incrementó 1.51 veces en comparación con la muestra 100%S.
- ✓ Modificación cuantificada en la mezcla de 92%S + 8%SS: el OCH (%) incrementó 1.46 veces en comparación con la muestra 100%S.



**Fig. 79.** Determinación del contenido óptimo de humedad C-03.

- ✓ Modificación cuantificada en la mezcla de 96%S + 4%SS: el OCH (%) incrementó 1.18 veces en comparación con la muestra 100%S.

- ✓ Modificación cuantificada en la mezcla de 94%S + 6%SS: el OCH (%) disminuyó 0.79 veces en comparación con la muestra 100%S.
- ✓ Modificación cuantificada en la mezcla de 92%S + 8%SS: el OCH (%) incrementó 1.28 veces en comparación con la muestra 100%S.

Las figuras 77, 78 y 79 correspondientes a las muestras C-01, C-02 y C-03, los cambios en el óptimo contenido de humedad (OCH%) frente al incremento del contenido de silicato de sodio (SS) son variables según el tipo de suelo. En las muestras C-01 y C-02, el OCH tiende a incrementarse ligeramente hasta el 6% de SS, con una leve disminución al 8%. En cambio, en la muestra C-03, se observa un comportamiento no lineal, con una disminución a 6% y un aumento posterior a 8%.

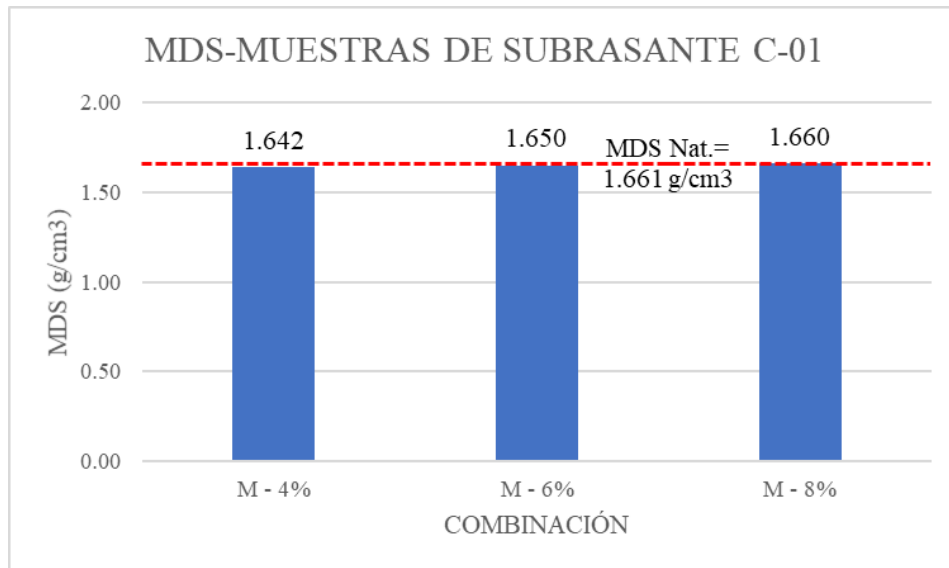
### **Máxima densidad seca**

La TABLA XXXIII muestra los resultados de la máxima densidad seca de cada muestra realizada.

**TABLA XXXIII**  
MDS (%) EN TODAS LAS MUESTRAS ANALIZADAS

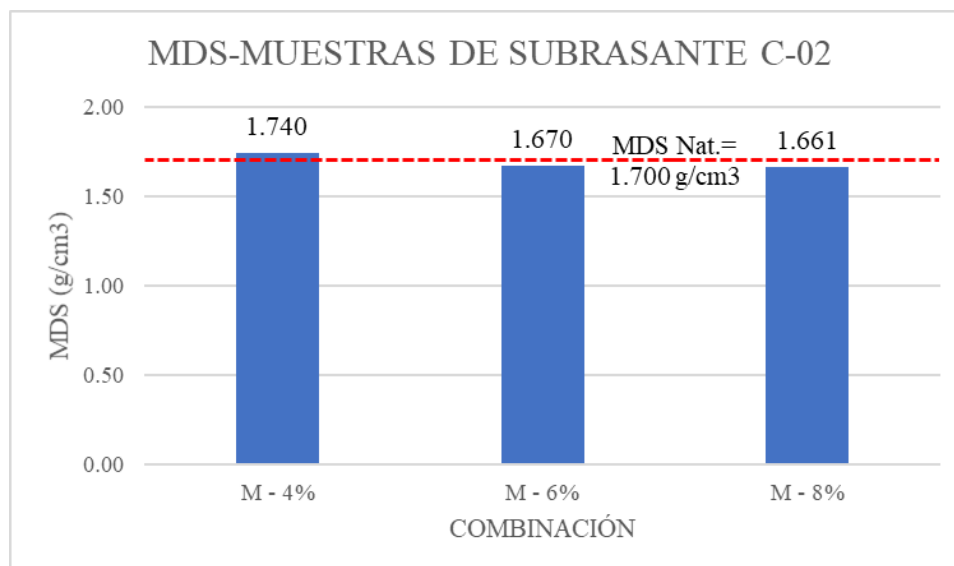
| <b>Combinación</b> | <b>Máxima Densidad Seca (g/cm<sup>3</sup>)</b> |             |             |
|--------------------|--|-------------|-------------|
|                    | <b>C-01</b>                                    | <b>C-02</b> | <b>C-03</b> |
| Natural (100% S)   | 1.66   | 1.70        | 1.67        |
| 96%S+4%SS          | 1.64   | 1.74        | 1.57        |
| 94%S+6%SS          | 1.65   | 1.67        | 1.66        |
| 92%S+8%SS          | 1.66   | 1.66        | 1.56        |

Las figuras 80, 81 y 82, muestran las variaciones obtenidas comparándolas con la muestra natural.



**Fig. 80.** Valores máximos de densidad seca C-01.

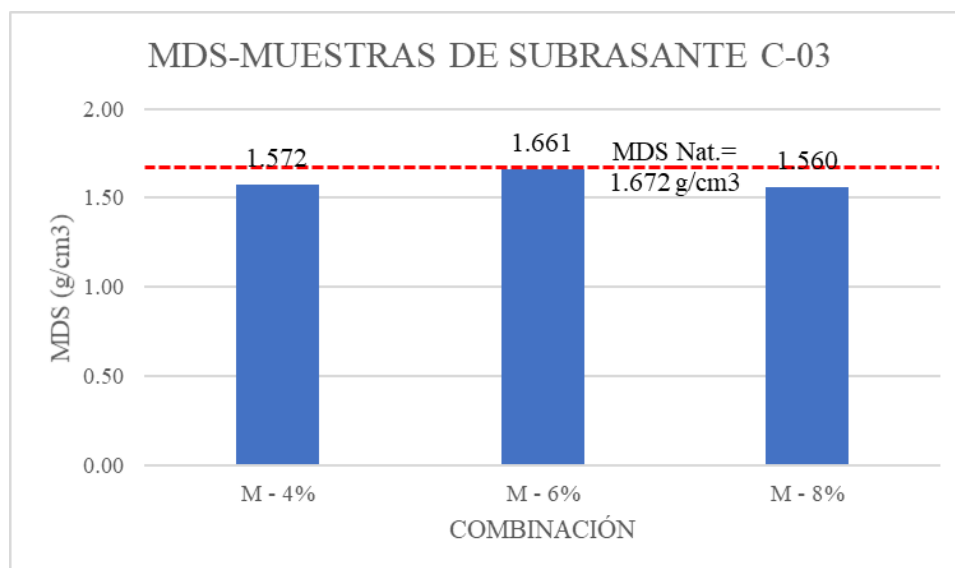
- ✓ Modificación cuantificada en la mezcla de 96%S + 4%SS: el OCH (%) disminuyó 0.98 veces en comparación con la muestra 100%S.
- ✓ Modificación cuantificada en la mezcla de 94%S + 6%SS: el OCH (%) disminuyó 0.99 veces en comparación con la muestra 100%S.
- ✓ Modificación cuantificada en la mezcla de 92%S + 8%SS: el OCH (%) disminuyó 0.99 veces en comparación con la muestra 100%S.



**Fig. 81.** Valores máximos de densidad seca C-02.

- ✓ Modificación cuantificada en la mezcla de 96%S + 4%SS: el OCH (%) incrementó 1.02 veces en comparación con la muestra 100%S.

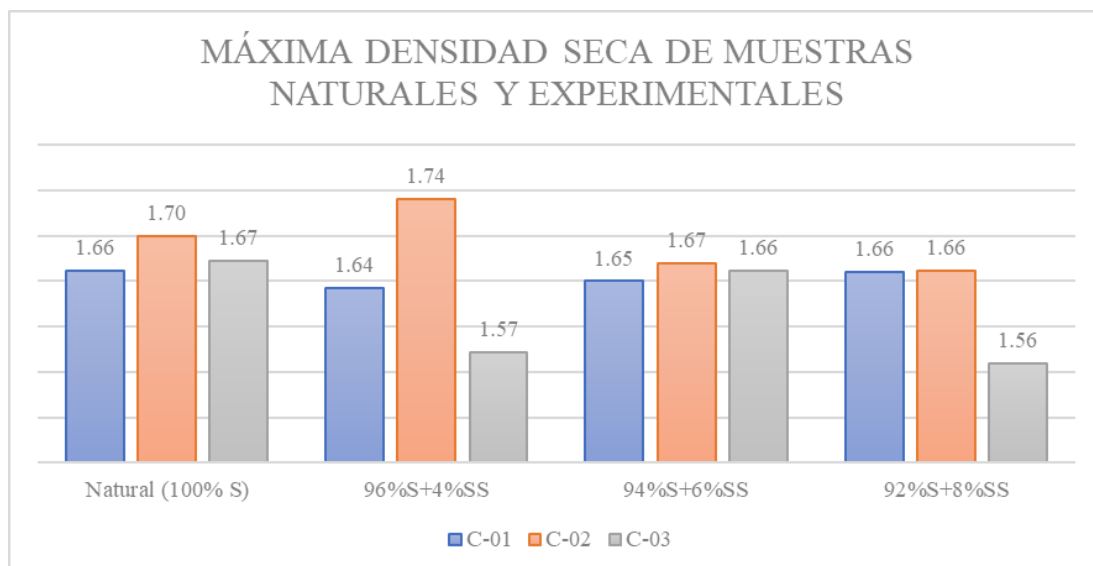
- ✓ Modificación cuantificada en la mezcla de 94%S + 6%SS: el OCH (%) disminuyó 0.98 veces en comparación con la muestra 100%S.
- ✓ Modificación cuantificada en la mezcla de 92%S + 8%SS: el OCH (%) disminuyó 0.98 veces en comparación con la muestra 100%S.



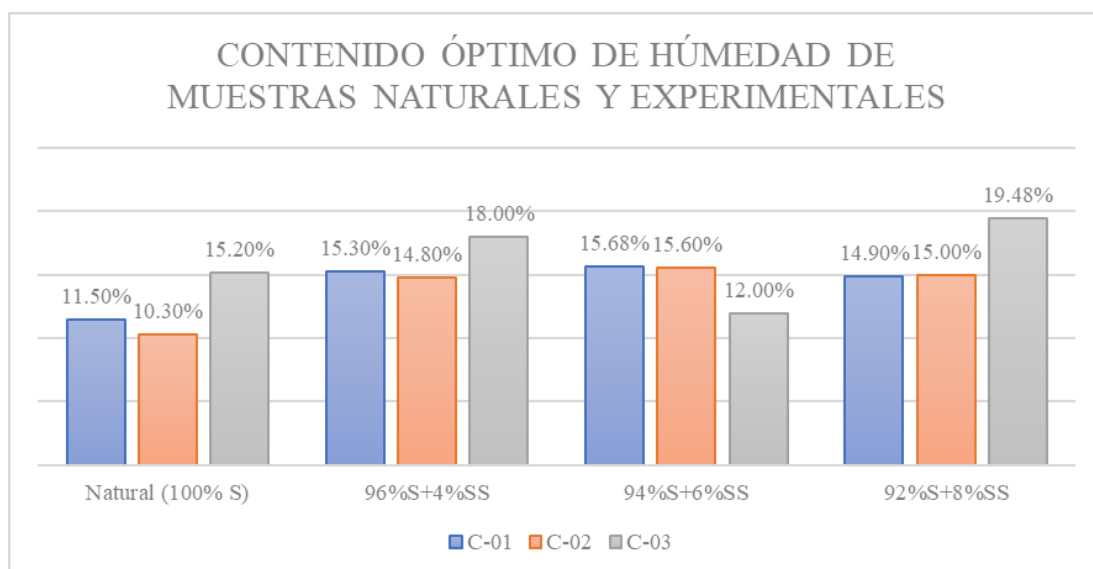
**Fig. 82.** Valores máximos de densidad seca C-03.

- ✓ Modificación cuantificada en la mezcla de 96%S + 4%SS: el OCH (%) disminuyó 0.94 veces en comparación con la muestra 100%S.
- ✓ Modificación cuantificada en la mezcla de 94%S + 6%SS: el OCH (%) disminuyó 0.99 veces en comparación con la muestra 100%S.
- ✓ Modificación cuantificada en la mezcla de 92%S + 8%SS: el OCH (%) disminuyó 0.93 veces en comparación con la muestra 100%S.

Las figuras 80, 81 y 82, correspondientes a las muestras C-01, C-02 y C-03, los cambios en la máxima densidad seca (MDS) frente al incremento del contenido de silicato de sodio (SS) son variables y no presentan una tendencia claramente ascendente. En algunos casos, como en C-02, se observa un ligero aumento inicial, seguido de una disminución, mientras que en las demás muestras los cambios son mínimos o decrecientes.



**Fig. 83.** Comparativa de densidad seca máxima entre C-01, C-02 y C-03.



**Fig. 84.** Comparativa de contenido óptimo de humedad entre C-01, C-02 y C-03.

De acuerdo con las figuras 83 y 84, la dosificación del 8% de silicato de sodio se perfila como la más adecuada, ya que, aunque los incrementos en la máxima densidad seca (MDS) no son significativos, se mantiene o mejora levemente respecto al suelo natural. A su vez, el COH aumenta con respecto al estabilizante, sobre todo en los suelos de alta plasticidad, tal como se esperaba al incorporar un aditivo [68].

### **CBR – Muestras experimentales**

#### **Capacidad de soporte al 95% de la M.D.S.**

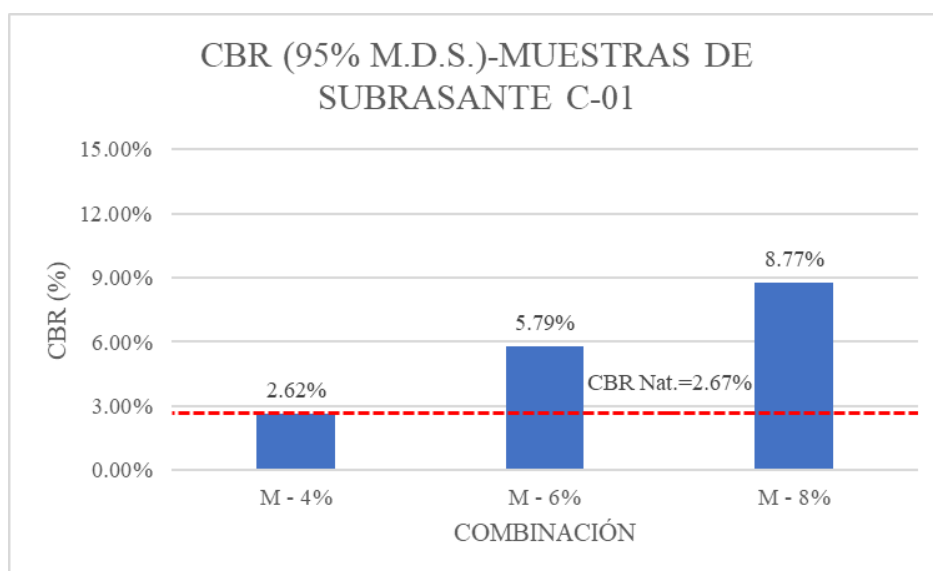
La capacidad de soporte emplea una penetración de 2.54mm (0.1”) para el análisis de las subrasantes según [46], la TABLA XXXIV muestra los resultados del CBR al 95% de cada muestra realizada.

**TABLA XXXIV**

**CBR (%) EN TODAS LAS MUESTRAS ANALIZADAS AL 95% DE SU MDS**

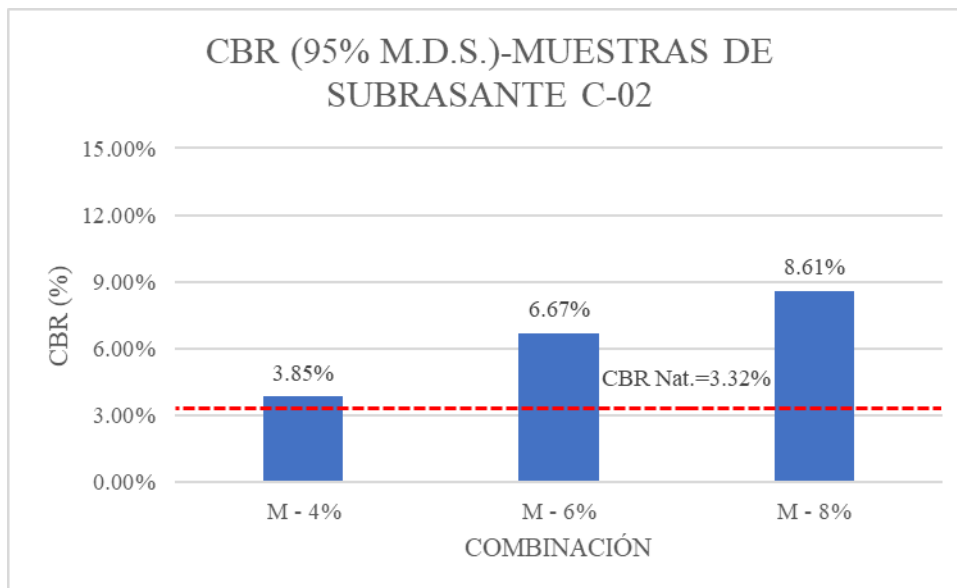
| Combinación      | CBR (%) al 95% de MDS |       |       |
|------------------|-----------------------|-------|-------|
|                  | C-01                  | C-02  | C-03  |
| Natural (100% S) | 2.67%                 | 3.32% | 3.45% |
| 96% S+4% SS      | 2.62%                 | 3.85% | 3.94% |
| 94% S+6% SS      | 5.79%                 | 6.67% | 7.97% |
| 92% S+8% SS      | 8.77%                 | 8.61% | 8.56% |

Las figuras 85, 86 y 87, muestran las variaciones obtenidas comparándolas con la muestra natural.



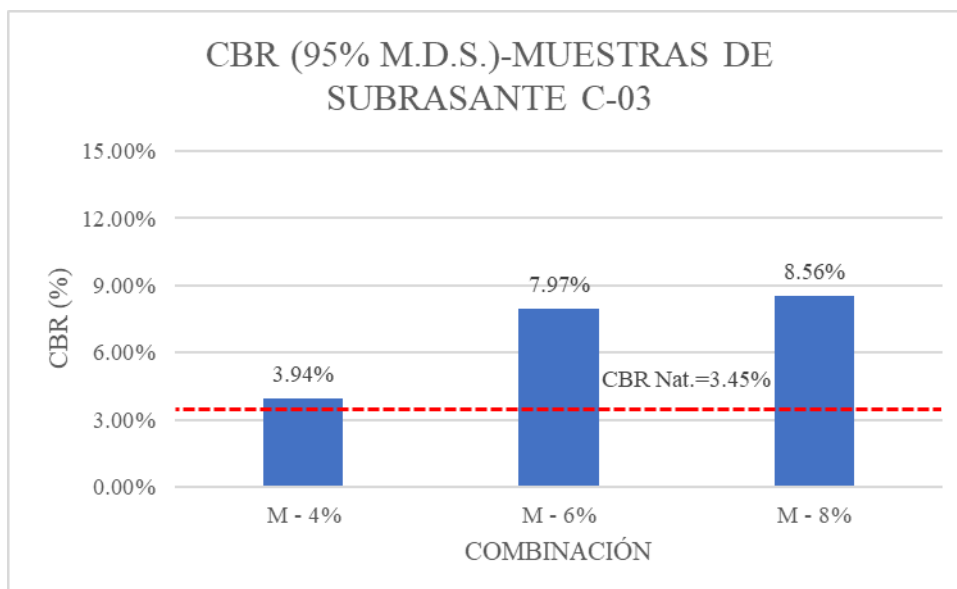
**Fig. 85.** CBR (95% de la MDS) en muestras de subrasante C-01.

- ✓ Modificación cuantificada en la mezcla de 96% S + 4% SS: el CBR (95% MDS) disminuyó 0.98 en comparación con la muestra 100% S.
- ✓ Modificación cuantificada en la mezcla de 94% S + 6% SS: el CBR (95% MDS) incrementó 2.17 en comparación con la muestra 100% S.
- ✓ Modificación cuantificada en la mezcla de 92% S + 8% SS: el CBR (95% MDS) incrementó 3.29 en comparación con la muestra 100% S.



**Fig. 86.** CBR (95% de la MDS) en muestras de subrasante C-02.

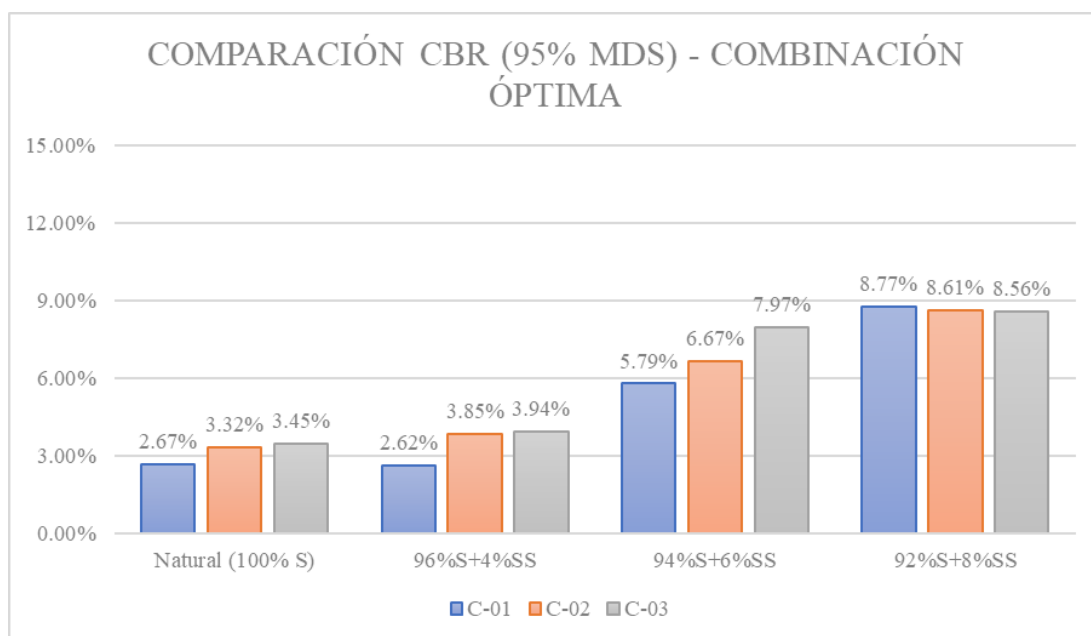
- ✓ Modificación cuantificada en la mezcla de 96%S + 4%SS: el CBR (95% MDS) incrementó 1.16 en comparación con la muestra 100%S.
- ✓ Modificación cuantificada en la mezcla de 94%S + 6%SS: el CBR (95% MDS) incrementó 2.01 en comparación con la muestra 100%S.
- ✓ Modificación cuantificada en la mezcla de 92%S + 8%SS: el CBR (95% MDS) incrementó 2.60 en comparación con la muestra 100%S.



**Fig. 87.** CBR (95% de la MDS) en muestras de subrasante C-03.

- ✓ Modificación cuantificada en la mezcla de 96%S + 4%SS: el CBR (95% MDS) incrementó 1.14 en comparación con la muestra 100%S.
- ✓ Modificación cuantificada en la mezcla de 94%S + 6%SS: el CBR (95% MDS) incrementó 2.31 en comparación con la muestra 100%S.
- ✓ Modificación cuantificada en la mezcla de 92%S + 8%SS: el CBR (95% MDS) incrementó 2.48 en comparación con la muestra 100%S.

Las figuras 85, 86 y 87, el incremento del contenido de silicato de sodio (SS) genera un aumento progresivo en la capacidad de soporte del suelo (CBR) para todas las muestras experimentales (C-01, C-02 y C-03). Si bien en la muestra C-01 se observa una leve disminución inicial al 4% de SS, los valores aumentan significativamente con mayores dosificaciones. Este comportamiento indica que el uso de este estabilizante resulta favorable.



**Fig. 88.** Comparación de CBR (95%) en muestras de subrasante C-01, C-02 y C-03.

Según [46] el CBR es una propiedad fundamental para analizar las subrasantes, los valores de las muestras se pueden apreciar en la figura 88; correspondientes al CBR al 95% de la MDS, se evidencia que dentro de las muestras naturales la C-01 dispone de un CBR <3%, siendo clasificada como subrasante inadecuada, mientras que las calicatas C-02 y C-03 poseen un  $3\% \leq \text{CBR} < 6\%$ , clasificándose como subrasantes insuficientes según [46]. Así mismo, se observa un incremento progresivo del CBR a medida que aumenta el contenido de silicato de sodio (SS). Aunque se evidencia que los mejores resultados se dan al usar 8%

de Silicato de Sodio, se procederá a analizar la capacidad de soporte al 100% de la M.D.S. para tener mucha más certeza para la elección del porcentaje.

### Capacidad de soporte al 100% de la M.D.S.

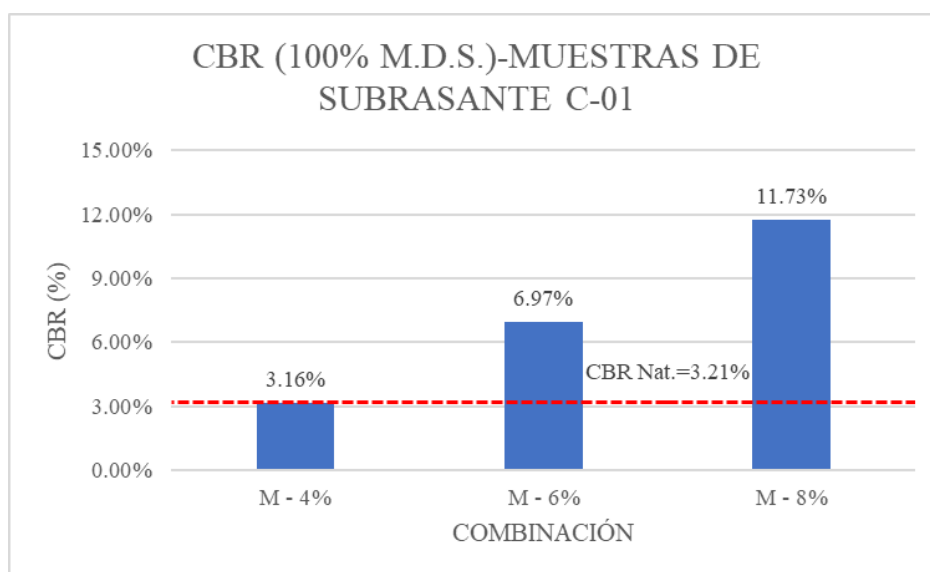
La capacidad de soporte será analizada para una penetración de 0.1” según [46], por lo que la TABLA XXXV muestra los resultados del CBR al 100% de cada muestra realizada.

**TABLA XXXV**

CBR (%) EN TODAS LAS MUESTRAS ANALIZADAS AL 100% DE SU MDS

| Combinación      | CBR (%) al 100% de MDS |        |        |
|------------------|------------------------|--------|--------|
|                  | C-01                   | C-02   | C-03   |
| Natural (100% S) | 3.21%                  | 4.16%  | 3.81%  |
| 96%S+4%SS        | 3.16%                  | 5.40%  | 5.07%  |
| 94%S+6%SS        | 6.97%                  | 9.26%  | 11.11% |
| 92%S+8%SS        | 11.73%                 | 12.35% | 14.06% |

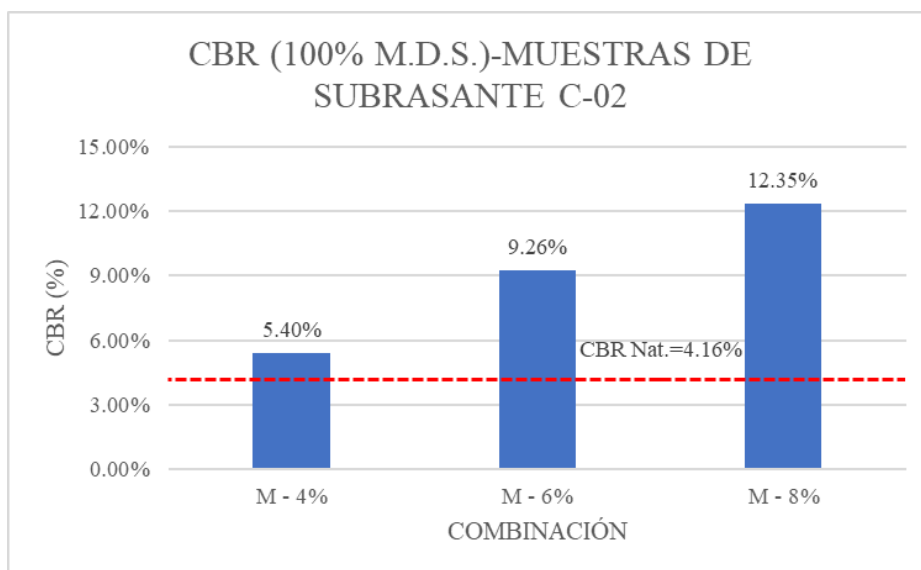
Las figuras 89, 90 y 91, muestran las variaciones obtenidas comparándolas con la muestra natural.



**Fig. 89.** CBR (100% de la MDS) en muestras de subrasante C-01.

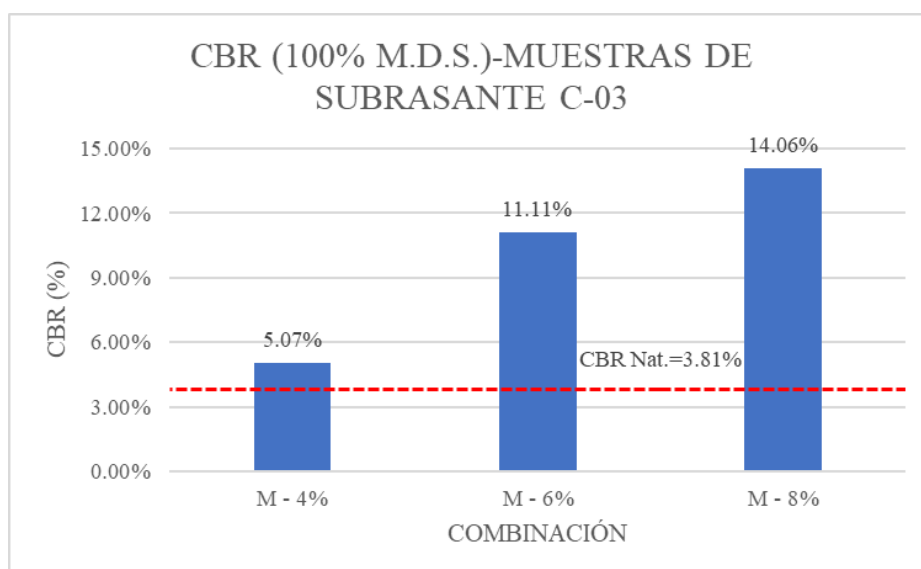
- ✓ Modificación cuantificada en la mezcla de 96%S + 4%SS: el CBR (100% MDS) disminuyó 0.98 veces en comparación con la muestra 100%S.
- ✓ Modificación cuantificada en la mezcla de 94%S + 6%SS: el CBR (100% MDS) incrementó 2.17 en comparación con la muestra 100%S.

- ✓ Modificación cuantificada en la mezcla de 92%S + 8%SS: el CBR (100% MDS) incrementó 3.66 en comparación con la muestra 100%S.



**Fig. 90.** CBR (100% de la MDS) en muestras de subrasante C-02.

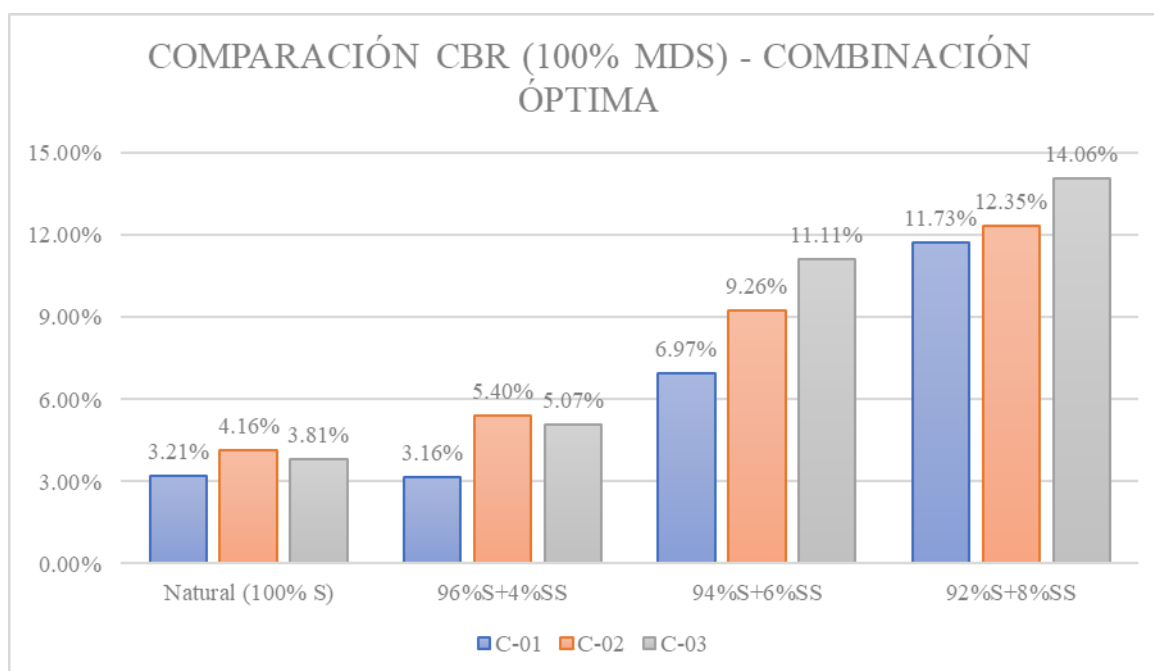
- ✓ Modificación cuantificada en la mezcla de 96%S + 4%SS: el CBR (100% MDS) incrementó 1.30 veces en comparación con la muestra 100%S.
- ✓ Modificación cuantificada en la mezcla de 94%S + 6%SS: el CBR (100% MDS) incrementó 2.23 veces en comparación con la muestra 100%S.
- ✓ Modificación cuantificada en la mezcla de 92%S + 8%SS: el CBR (100% MDS) incrementó 2.97 veces en comparación con la muestra 100%S.



**Fig. 91.** CBR (100% de la MDS) en muestras de subrasante C-03.

- ✓ Modificación cuantificada en la mezcla de 96%S + 4%SS: el CBR (100% MDS) incrementó 1.33 veces en comparación con la muestra 100%S.
- ✓ Modificación cuantificada en la mezcla de 94%S + 6%SS: el CBR (100% MDS) incrementó 2.91 veces en comparación con la muestra 100%S.
- ✓ Modificación cuantificada en la mezcla de 92%S + 8%SS: el CBR (100% MDS) incrementó 3.69 veces en comparación con la muestra 100%S.

Como se aprecia en las gráficas 89, 90 y 91, al incrementar el contenido de silicato de sodio (SS), se observa una mejora significativa en la capacidad de soporte del suelo (CBR) para todas las muestras experimentales (C-01, C-02 y C-03). Aunque en la muestra C-01 se registra una leve reducción con el 4% de SS, a partir de dosificaciones superiores, el CBR aumenta de forma notable. Este comportamiento evidencia que el estabilizante tiene un efecto favorable sobre el CBR, especialmente al alcanzar mayores concentraciones.



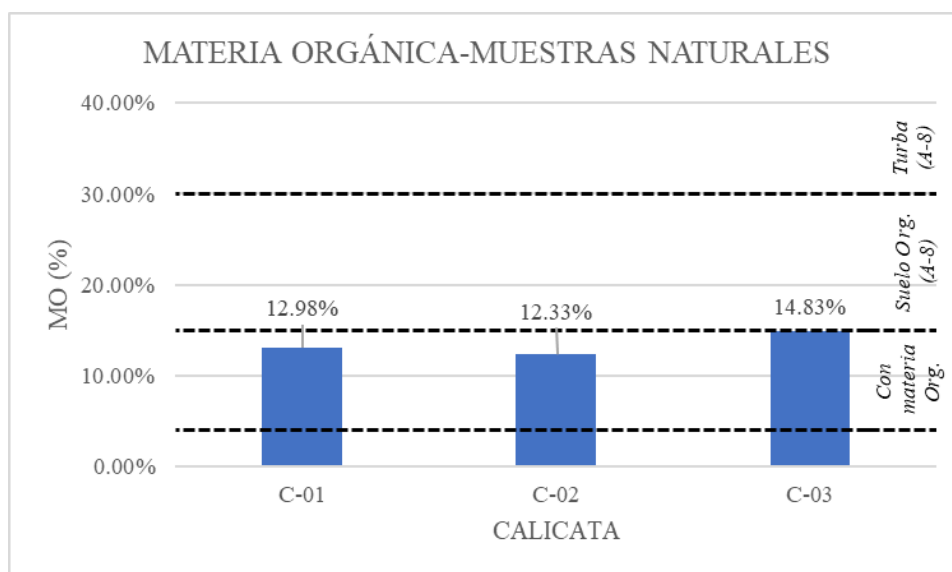
**Fig. 92.** Comparación de CBR (100%) en muestras de subrasante C-01, C-02 y C-03.

Dentro del análisis de resultados correspondientes al CBR de 100% de la MDS, se evidencia que las muestras naturales disponen de un  $3\% \leq \text{CBR} < 6\%$ , lo cual según [46] son subrasantes insuficientes. Así mismo, en la figura 92 se muestra el análisis del CBR al 100% de la MDS, donde se identifica que las combinaciones con 92% de suelo natural y 8% de silicato de sodio generan los mejores resultados, logrando incrementos superiores a 2.9 veces el valor natural del CBR en todas las muestras (C-01, C-02 y C-03). En consecuencia, esta

dosificación se considera la más adecuada para optimizar la capacidad de soporte de las subrasantes analizadas. Por lo que se determinó que las subrasantes que inicialmente estaban clasificadas como inadecuadas o insuficientes, debido a sus valores de  $CBR_{95\%MDS} < 3.5\%$  y  $CBR_{100\%MDS} < 4.2\%$ , con ayuda de la adición del porcentaje óptimo fueron clasificadas como regulares ( $6\% \leq CBR_{95\%} < 10\%$ ) gracias a su  $CBR_{95\%MDS} > 6\%$  y  $CBR_{100\%MDS} > 10\%$ , según [46].

### Materia orgánica - Muestras naturales

Según [51], los suelos pueden categorizarse en tres rangos: aquellos con materia orgánica ( $4\% < OC \leq 15\%$ ), suelos orgánicos clasificados como A-8 ( $16\% \leq OC \leq 30\%$ ), y turba ( $OC > 30\%$ ). Los porcentajes elevados tienden a ser generalmente inadecuados para su uso sin estabilización, por lo que el porcentaje de materia orgánica de las muestras naturales analizadas son los siguientes:



**Fig. 93.** Materia orgánica (%) de muestras naturales.

La figura 93 clasifica los porcentajes según [51], lo que establece que las muestras naturales de las calicatas C-01, C-02 y C-03, se ubican dentro de los suelos con materia orgánica. Si bien no alcanzan los valores propios de suelos orgánicos o turbosos, los resultados sugieren que se podría requerir una estabilización para un mejor desempeño estructural.

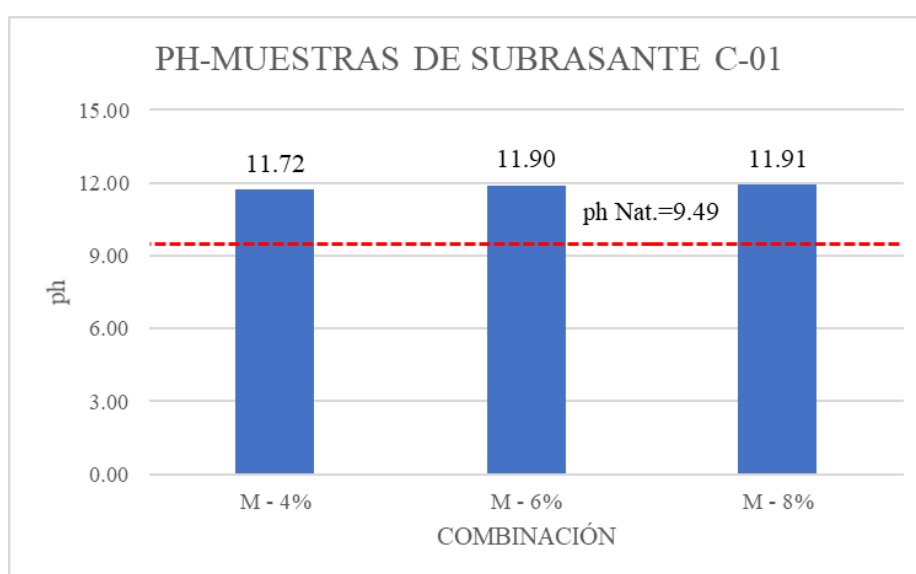
### ph en suelos – Muestras experimentales

La TABLA XXXVI muestra los resultados del nivel de ph de cada muestra realizada.

**TABLA XXXVI**  
NIVELES DE PH LAS MUESTRAS ANALIZADAS

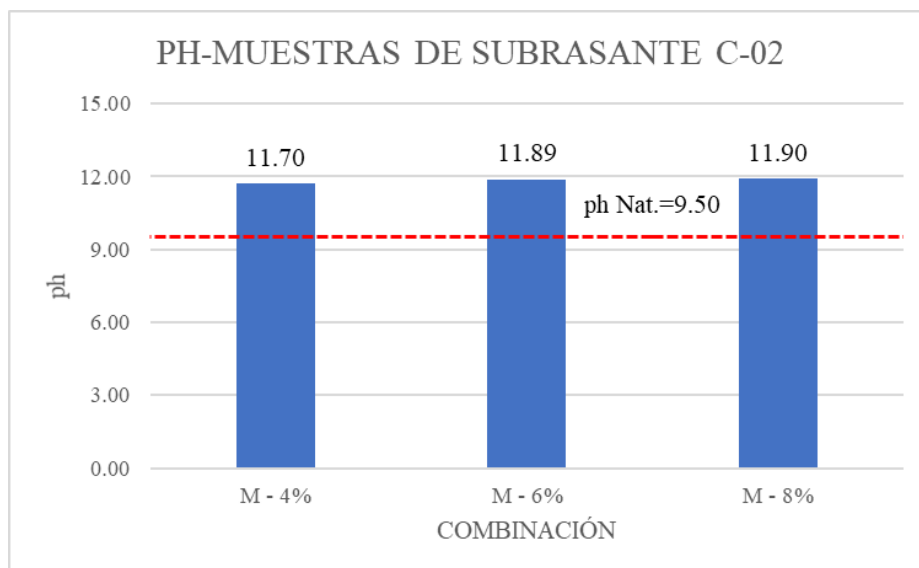
| Combinación      | ph en suelos |       |       |
|------------------|--------------|-------|-------|
|                  | C-01         | C-02  | C-03  |
| Natural (100% S) | 9.49         | 9.50  | 8.73  |
| 96%S+4%SS        | 11.72        | 11.70 | 11.80 |
| 94%S+6%SS        | 11.90        | 11.89 | 11.82 |
| 92%S+8%SS        | 11.91        | 11.90 | 11.91 |

Las figuras 94, 95 y 96, muestran las variaciones obtenidas comparándolas con la muestra natural.



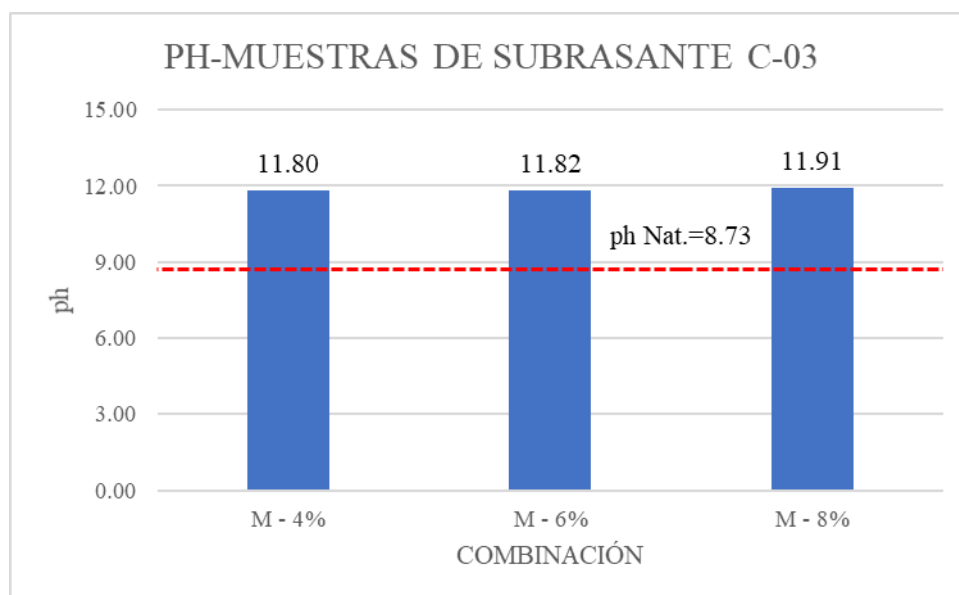
**Fig. 94.** Niveles de ph en muestras de subrasante C-01.

- ✓ Modificación cuantificada en la mezcla de 96%S + 4%SS: el nivel de ph incrementó 1.23 veces en comparación con la muestra 100%S.
- ✓ Modificación cuantificada en la mezcla de 94%S + 6%SS: el nivel de ph incrementó 1.25 veces en comparación con la muestra 100%S.
- ✓ Modificación cuantificada en la mezcla de 92%S + 8%SS: el nivel de ph incrementó 1.26 veces en comparación con la muestra 100%S.



**Fig. 95.** Niveles de ph en muestras de subrasante C-02.

- ✓ Modificación cuantificada en la mezcla de 96%S + 4%SS: el nivel de ph incrementó 1.23 veces en comparación con la muestra 100%S.
- ✓ Modificación cuantificada en la mezcla de 94%S + 6%SS: el nivel de ph incrementó 1.25 veces en comparación con la muestra 100%S.
- ✓ Modificación cuantificada en la mezcla de 92%S + 8%SS: el nivel de ph incrementó 1.25 veces en comparación con la muestra 100%S.

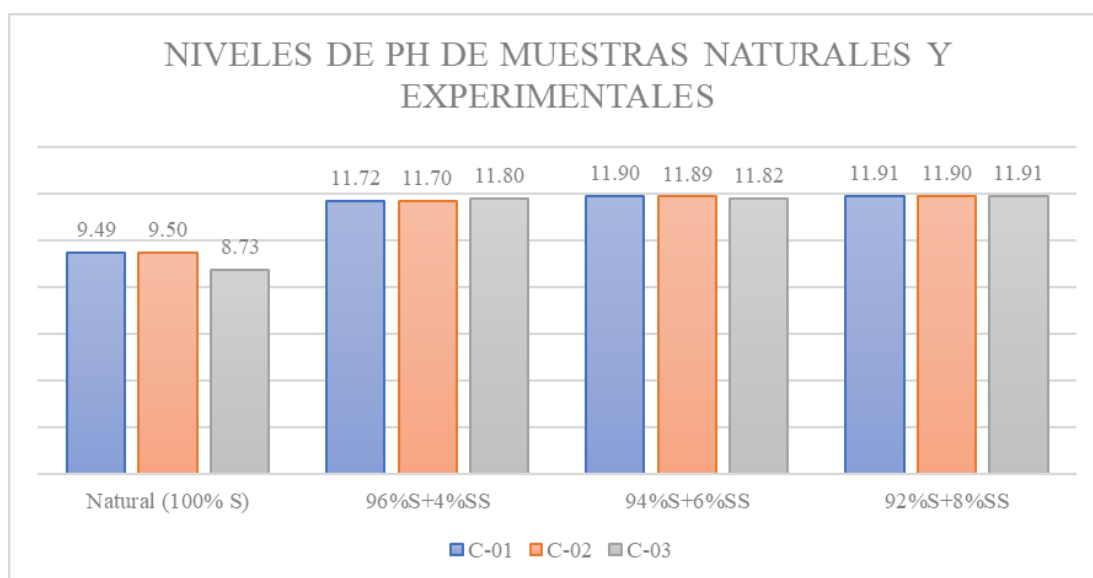


**Fig. 96.** Niveles de ph en muestras de subrasante C-03.

- ✓ Modificación cuantificada en la mezcla de 96%S + 4%SS: el nivel de ph incrementó 1.35 veces en comparación con la muestra 100%S.

- ✓ Modificación cuantificada en la mezcla de 94%S + 6%SS: el nivel de ph incrementó 1.35 veces en comparación con la muestra 100%S.
- ✓ Modificación cuantificada en la mezcla de 92%S + 8%SS: el nivel de ph incrementó 1.36 veces en comparación con la muestra 100%S.

Como se observa en las gráficas 94, 95 y 96, correspondientes a las muestras C-01, C-02 y C-03, el incremento del contenido de silicato de sodio (SS) genera un aumento progresivo en los niveles de pH del suelo. Este comportamiento es más notorio en la muestra C-03, donde se alcanzan los valores más altos. Estos resultados reflejan un efecto alcalinizante del estabilizante, lo cual es favorable para la activación de procesos de estabilización química, especialmente en suelos arcillosos [53].



**Fig. 97.** Niveles de ph en muestras de subrasante C-01, C-02 y C-03.

Según el análisis de la figura 97, la dosificación del 8% de silicato de sodio alcanza los valores de pH más altos, evidenciando una alcalinización eficiente del sistema suelo-estabilizante. Aunque no se llegue al valor ideal de 12.4, los niveles obtenidos son suficientes para favorecer reacciones químicas beneficiosas, por lo que esta dosificación se considera la más adecuada para la estabilización del suelo [53].

## Discusión

El análisis del comportamiento mecánico y las propiedades químicas de los suelos arcillosos tratados con silicato de sodio presenta resultados que requieren una interpretación integral desde múltiples perspectivas técnicas y científicas. Los hallazgos obtenidos en esta investigación no solo confirman tendencias esperadas en el mejoramiento de suelos, sino que también revelan aspectos novedosos sobre los mecanismos de interacción entre el silicato de sodio y las partículas arcillosas.

Respecto al objetivo específico, caracterizar el suelo arcilloso en su estado natural de acuerdo al método SUCS y AASHTO, los resultados obtenidos indicaron que las muestras C-01 y C-02 fueron clasificadas como arcillas de alta plasticidad (CH) y la muestra C-03 como arcilla de baja plasticidad (CL), mientras que bajo el sistema AASHTO las tres muestras fueron clasificadas como A-7-6. Por lo que según el MTC (2013) se evidencia que los suelos presentan alta fracción fina y elevada plasticidad, condiciones desfavorables para su desempeño como subrasante sin estabilización, estos resultados se asemejan a los encontrados por Ahmed, et al. [16], quien clasificó suelos similares como CH y A-7-5, identificándolos como suelos de baja capacidad portante en estado natural, además, Aguilar y Cárdenas [29] resaltaron la importancia de realizar la caracterización previa del suelo, clasificándolo como SP-SM, ya que este diagnóstico permite determinar la estrategia de estabilización adecuada para mejorar el comportamiento estructural, ya que según el MTC (2013), la clasificación mediante los sistemas SUCS y AASHTO permite comprender el comportamiento de los suelos según su plasticidad y granulometría, siendo que los suelos A-7-6 y CH presentan altos riesgos de deformación volumétrica y baja resistencia mecánica, justificando la necesidad de procesos de estabilización química como el propuesto en la presente investigación.

En relación con el objetivo específico, obtener las curvas de compactación del suelo arcilloso en su estado natural y del suelo tratado con silicato de sodio, los resultados mostraron que al aplicar un 8% de silicato de sodio se incrementó el contenido óptimo de humedad (COH) en todas las muestras, pasando de 11.5% a 14.9% en C-01, de 10.3% a 15.0% en C-02 y de 15.2% a 19.48% en C-03, mientras que la densidad seca máxima (MDS) se mantuvo prácticamente constante en C-01 ( $1.661 \rightarrow 1.660 \text{ g/cm}^3$ ), disminuyó ligeramente en C-02 ( $1.700 \rightarrow 1.661 \text{ g/cm}^3$ ) y mostró una reducción más notoria en C-03 ( $1.672 \rightarrow 1.560 \text{ g/cm}^3$ ), lo que indica que la adición de silicato de sodio aumentó la demanda hídrica para la

compactación óptima pero no incrementó la densidad máxima alcanzable, estos hallazgos contrastan con los reportados por Liuyang, et al. [26], quienes observaron que la curva Proctor de un loess tratado con silicato se desplazaba a menor humedad y mayor densidad, lo cual resalta la influencia del tipo de suelo sobre el efecto del estabilizante. Por su parte, Aguilar y Cárdenas [29], informaron un aumento progresivo en la MDS al incrementar la dosis de silicato, lo que puede atribuirse a diferencias en la mineralogía y cohesividad de los suelos analizados. No obstante, ambos estudios coinciden en que la aplicación del silicato modifica la estructura interna del suelo, promoviendo la formación de enlaces que aumentan la cohesión. Estos procesos, según [16], incrementan la resistencia mecánica del suelo estabilizado, aunque es necesario analizar la capacidad portante para comprobar si dichas mejoras se reflejan en un mejor desempeño estructural de la subrasante.

Según el objetivo específico, determinar la capacidad portante del suelo en su estado natural y del suelo tratado con concentraciones de silicato de sodio, los resultados mostraron que las muestras C-01, C-02 y C-03 presentaron valores de CBR al 100% de 3.21%, 4.16% y 3.81% respectivamente en su estado natural, ubicándose todas en la categoría de subrasante insuficiente ( $S_1$ ) de acuerdo con la clasificación del MTC, que considera suelos insuficientes aquellos con valores entre 3% y 6%, mientras que al aplicar una dosificación de 8% de silicato de sodio, los valores de CBR mejoraron significativamente alcanzando 11.73% para C-01, 12.35% para C-02 y 14.06% para C-03, reubicándolos dentro de la categoría de subrasante buena ( $S_3$ ), lo cual evidencia un efecto positivo en la resistencia mecánica; este comportamiento es similar al reportado por Aguilar y Cárdenas [29], quienes hallaron un aumento de CBR de aproximadamente 5.5% a 47.7% tras estabilizar un suelo natural con silicato de sodio, y a lo encontrado por Chávez [31], que incrementaron el CBR de 6% a 39.8% al emplear una concentración de 7.8% de silicato, reforzando la evidencia de que el aditivo mejora la capacidad portante, mientras que Dharini, et al. [25], demostraron que el CBR de suelos arcillosos puede aumentar hasta 7.86 veces cuando se combina silicato de sodio con cal, validando la capacidad del estabilizante para transformar suelos débiles en materiales estructuralmente viables; por lo que según lo analizado, se está de acuerdo con lo estipulado en el MTC (2013), el mejoramiento de la capacidad portante mediante aditivos se da gracias al incremento de la rigidez y reducción de la plasticidad, permitiendo clasificar a suelos antes insuficientes como subrasantes buenas o excelentes.

En relación con el objetivo específico, establecer los parámetros de materia orgánica del suelo en su estado natural, se determinó que las muestras C-01, C-02 y C-03 presentaron porcentajes de materia orgánica de 12.98%, 12.33% y 14.83% respectivamente, ubicándolas dentro del rango de suelos con materia orgánica moderada ( $4\% < OC \leq 15\%$ ), lo cual indica que, aunque los valores no superan el umbral para ser considerados suelos orgánicos A-8 ni turbas ( $>16\%$ ), según la clasificación establecida por [51]. Este comportamiento es similar al observado por Ahmed, et al. [16], quienes trabajaron con suelos de baja materia orgánica y comprobaron que respondían favorablemente al tratamiento con silicato de sodio, mientras que Mohammad, et al. [27], señalaron que un suelo con 57% de materia orgánica mostró una muy baja ganancia de resistencia ( $0.05\text{--}0.22 \text{ kg/cm}^2$ ) tras ser tratado demostrando que un contenido elevado de materia orgánica interfiere en la estabilización; los suelos con moderado contenido de materia orgánica, favorece a la estabilización siempre que la dosificación del aditivo sea adecuada y la dispersión de los compuestos orgánicos no inhiba las reacciones de activación química.

En cuanto al objetivo específico, comparar el pH del suelo en su estado natural y del suelo tratado con concentraciones de silicato de sodio, los resultados mostraron que las muestras C-01, C-02 y C-03 presentaban inicialmente valores de pH de 9.49, 9.50 y 8.73 respectivamente, indicando una alcalinidad moderada, mientras que al aplicar un 8% de silicato de sodio, el pH de todas las muestras se incrementó hasta 11.91, 11.90 y 11.91, acercándose al valor umbral determinado por [53] de 12.4 considerado ideal para procesos de activación geoquímica, este comportamiento es consistente con el hallazgo de Ahmed, et al. [16], quienes documentaron que la aplicación de silicato de sodio eleva el pH de suelos naturales de aproximadamente 6.3 hasta valores cercanos a 11.3, favoreciendo la formación de compuestos estabilizantes, estando de acuerdo con [16] debido a que el incremento del pH es fundamental para desencadenar los procesos de disolución, responsables del aumento de la resistencia y cohesión del suelo tratado.

## Conclusiones

- Respecto al objetivo general, se concluye que la adición de un 8% de silicato de sodio con suelo arcilloso mejoró en forma más óptima el comportamiento mecánico y químico, en relación a los demás porcentajes adicionados, evidenciado un aumento del CBR, la modificación de los parámetros de compactación, el incremento del pH y el establecimiento de condiciones químicas para la estabilización de caminos viales.
- Respecto a la caracterización de las muestras naturales de suelo arcilloso se concluyó que C-01 y C-02 son arcillas de alta plasticidad (CH) y C-03 como arcilla de baja plasticidad (CL) según el sistema SUCS, mientras que bajo el sistema AASHTO todas fueron tipificadas como suelos A-7-6, lo cual indicó alta plasticidad y baja capacidad portante, condición que justificó la necesidad de estabilizar los suelos para mejorar su desempeño estructural en infraestructura vial.
- Al obtener las curvas de compactación, se llegó a la conclusión que el contenido óptimo de humedad (COH) aumentó 1.29 veces más de 11.5% a 14.9% en C-01, 1.45 veces de 10.3% a 15.0% en C-02 y 1.28 veces de 15.2% a 19.48% en C-03 tras la aplicación del silicato de sodio, mientras que la densidad seca máxima (MDS) se mantuvo constante en C-01 (1.66 → 1.66 g/cm<sup>3</sup>), disminuyó 0.97 veces en C-02 (1.70 → 1.66 g/cm<sup>3</sup>) y disminuyó 0.93 veces en C-03 (1.67 → 1.56 g/cm<sup>3</sup>).
- En la determinación de la capacidad portante, los valores de CBR al 100% de las muestras naturales fueron bajos (C-01: 3.21%, C-02: 4.16%, C-03: 3.81%), clasificándolas como subrasantes insuficientes (S<sub>1</sub>), sin embargo, tras el tratamiento con el 8% de silicato de sodio, los CBR mejoraron significativamente 3.65 veces (11.73%) en C-01, 2.97 veces (12.35%) en C-02 y 3.69 veces (14.06%) en C-03, clasificándolas como subrasantes buenas (S<sub>3</sub>), lo cual demuestra que el aditivo potenció notablemente la resistencia mecánica del suelo, haciéndolo apto para capas de soporte vial.
- El análisis de materia orgánica reveló que las muestras C-01, C-02 y C-03 presentaban porcentajes de 12.98%, 12.33% y 14.83% respectivamente, ubicándose dentro del rango de materia orgánica moderada (4% < OC ≤ 15%), condición favorable que permitió que las reacciones de estabilización con silicato de sodio se

desarrollaran adecuadamente sin interferencias químicas significativas, contribuyendo a la mejora de las propiedades mecánicas y químicas del suelo.

- Al comparar el pH de las muestras naturales y tratadas, se constató que el pH inicial (C-01: 9.49, C-02: 9.50, C-03: 8.73) se incrementó 1.26 veces (11.91) en la C-01, 1.25 veces (11.90) en la C-02 y 1.36 veces (11.91) en la C-03, luego del tratamiento con silicato de sodio, teniendo valores cercanos al 12.4 óptimo para el aumento de resistencia y cohesión interna, y validando que el silicato favorece eficazmente la estabilización química de suelos arcillosos.
- El análisis de costo-beneficio realizado por metro cuadrado ( $m^2$ ) a un espesor de 0.15 m. se concluye, que el costo de estabilización es de S/ 54.07/ $m^2$  usando silicato de sodio siendo menor al costo de estabilización con cemento de S/ 57.94/ $m^2$ .

## Recomendaciones

- Se recomienda continuar evaluando la aplicación del silicato de sodio en suelos de distinta clasificación (por ejemplo, ML o MH) para ampliar el rango de su aplicabilidad en estabilización de caminos viales.
- Se sugiere realizar ensayos con otras dosificaciones de silicato de sodio superiores o inferiores a 4, 6 y 8%, a fin de determinar la dosis óptima económica y técnica según cada tipo de suelo.
- Para futuros estudios, se aconseja comparar el desempeño del silicato de sodio frente a otros aditivos químicos alternativos, como polímeros o geopolímeros sólidos.
- Se plantea realizar una evaluación económica integral que considere no solo el costo inicial por m<sup>2</sup>, sino también el ahorro en costos de mantenimiento y rehabilitación en el ciclo de vida de la infraestructura vial.
- Se sugiere continuar promoviendo el uso del silicato de sodio como una alternativa eficiente y técnicamente viable para la estabilización de suelos arcillosos en caminos viales, considerando su capacidad de mejorar la resistencia y durabilidad del terreno, así como su potencial para optimizar los recursos en proyectos de infraestructura que requieran suelos de mejor calidad.

## Referencias

- [1] A. H. Vakili, M. Salimi, İ. Keskin y M. Jamalimoghadam, «A systematic review of strategies for identifying and stabilizing dispersive clay soils for sustainable infrastructure,» 2024. [En línea]. Available: <https://www-sciencedirect-com.usat.lookproxy.com/science/article/pii/S0167198724000370>. [Último acceso: 2024].
- [2] S. J. Krohn JP, «Assessment of expansive soils in the United States,» 1980. [En línea]. Available: <https://archive.org/details/proceedingsoffou0001inte>.
- [3] N. Ural, «The Importance of Clay in Geotechnical Engineering,» 2018. [En línea]. Available: <https://www.intechopen.com/chapters/60931>.
- [4] S. J. Abbey, E. U. Eyo, C. A. Okeke y S. Ngambi, «Experimental study on the use of RoadCem blended with by-product cementitious materials for stabilisation of clay soils,» 2021. [En línea]. Available: <https://www-sciencedirect-com.usat.lookproxy.com/science/article/pii/S0950061821002361>. [Último acceso: 2024].
- [5] H. S. Holtz WG, «Home construction on shrinking and swelling soils,» 1978. [En línea]. Available: <https://coloradogeologicalsurvey.org/publications/home-construction-shrinking-swelling-soils/>.
- [6] J. DE y H. WG., «Expansive soils-the hidden disaster,» 1973. [En línea]. Available: <https://trid.trb.org/View/133235#:~:text=Each%20year%2C%20shrinking%20or%20swelling,hurricanes%2C%20tornadoes%2C%20and%20earthquakes..>
- [7] P. Kulanthaivel, B. Soundara, S. Velmurugan y V. Naveenraj, «Experimental investigation on stabilization of clay soil using nano-materials and white cement,» 2021. [En línea]. Available: <https://www-sciencedirect-com.usat.lookproxy.com/science/article/pii/S2214785320308531>.
- [8] W. Safi y S. Singh, «Efficient & effective improvement and stabilization of clay soil with waste materials,» 2022. [En línea]. Available: <https://www->

sciencedirect-com.usat.lookproxy.com/science/article/pii/S221478532104726X.

[Último acceso: 2024].

- [9] P. T. Khanh, S. Pramanik y T. T. H. Ngoc, «Soil Permeability of Sandy Loam and Clay Loam Soil in the Paddy Fields in An Giang Province in Vietnam,» 2024. [En línea]. Available: <https://www-sciencedirect-com.usat.lookproxy.com/science/article/pii/S2667010024000738>.
- [10] M. Mirzababaei, A. Arulrajá y M. O. c, «Polymers for Stabilization of Soft Clay Soils,» 2017. [En línea]. Available: <https://www-sciencedirect-com.usat.lookproxy.com/science/article/pii/S1877705817321264>. [Último acceso: 2024].
- [11] G. Gaurav, S. Hemant y G. Pardeep, «Economic and environmental assessment of industrial wastes stabilized clay and sand soil subgrades using experimental and theoretical approaches,» 2024. [En línea]. Available: <https://www-sciencedirect-com.usat.lookproxy.com/science/article/pii/S0950061824009280>. [Último acceso: 2024].
- [12] Y. Luan, X. Ma, Y. Ma, X. Liu, S. Jiang y J. Zhang, «Research on strength improvement and stabilization mechanism of organic polymer stabilizer for clay soil of subgrade,» Diciembre 2023. [En línea]. Available: <https://www-sciencedirect-com.usat.lookproxy.com/science/article/pii/S2214509523005776>. [Último acceso: 2024].
- [13] S. H. Mohammed, K. A. Saeed y H. I. A. Shaikhli, «Evaluation of the strength and microstructural characteristics of stabilized organic clay soil,» 2024. [En línea]. Available: <https://www-sciencedirect-com.usat.lookproxy.com/science/article/pii/S2666016424000410>. [Último acceso: 2024].
- [14] M. Deepak, S. Rohini, B. Harini y G. B. G. Ananthi, «Influence of fly-ash on the engineering characteristics of stabilised clay soil,» 2021. [En línea]. Available: <https://www-sciencedirect-com.usat.lookproxy.com/science/article/pii/S2214785320356078>. [Último acceso: 2024].

- [15] A. S. Elmannacy, H. E. Fouad y Y. G. Youssef, «Improvement of swelling chlorite soil using sodium silicate alkali activator,» Junio 2021. [En línea]. Available: <https://www-sciencedirect-com.usat.lookproxy.com/science/article/pii/S2090447921000149>. [Último acceso: 2024].
- [16] B. Zhuo, R. Zhang, Y. Fang, Y. Wang y Y. Yao, «A study on soil conditioning for cohesive soils with high content of clay minerals: Microscopic simulation and laboratory experiment,» Octubre 2023. [En línea]. Available: <https://www-sciencedirect-com.usat.lookproxy.com/science/article/pii/S0886779823003541#b0075>. [Último acceso: 2024].
- [17] J. López Barbarán, «Estabilización de suelos arcillosos aplicando ceniza de cáscara de arroz para el mejoramiento de subrasante, en la localidad de Moyobamba – departamento de San Martín,» 11 Enero 2021. [En línea]. Available: <https://repositorioacademico.upc.edu.pe/handle/10757/654616>. [Último acceso: 2024].
- [18] R. L. Chavez, M. A. Rojas y E. R. D. L. Puente, «Revista de Investigación Científica UNTRM: Ciencias Naturales e Ingeniería,» 10 Agosto 2020. [En línea]. Available: <https://revistas.untrm.edu.pe/index.php/CNI/article/view/612/764>. [Último acceso: 2024].
- [19] A. T. Terrones Cruz, «Estabilización de suelos arcillosos adicionando cenizas de bagazo de caña para el mejoramiento de subrasante en el sector Barraza, Trujillo – 2018,» 20 Febrero 2019. [En línea]. Available: <https://repositorio.upn.edu.pe/handle/11537/14971>. [Último acceso: 2024].
- [20] Municipalidad provincial de Lambayeque, «Proviasdes,» Julio 2008. [En línea]. Available: [https://www.proviasdes.gob.pe/planes/lambayeque/pvpp/PVPP\\_Lambayeque.pdf](https://www.proviasdes.gob.pe/planes/lambayeque/pvpp/PVPP_Lambayeque.pdf). [Último acceso: 2024].

- [21] AMEC Earth and Environmental, «Jackson County Multi-Hazard Mitigation Plan,» 2021. [En línea]. Available: <https://greateregyp.org/wp-content/uploads/2021/06/Jackson-County-MHMP-Meeting-1-All-Slides.pdf>.
- [22] Municipalidad Distrital de Pimentel, «Municipalidad Distrital de Pimentel,» 07 Junio 2023. [En línea]. Available: <https://www.munipimentel.gob.pe/noticias/noticiasmdp.php?cnotcodigo=noti-mdpwSDEKp>. [Último acceso: 2024].
- [23] F. D. Quevedo-Pesántez, M. B. Álvarez-Calle y C. J. Calle-Castro, «Revista Científica Dominio de las Ciencias,» 2021. [En línea]. Available: <https://dominiodelasciencias.com/ojs/index.php/es/article/view/1678>. [Último acceso: 2024].
- [24] Y. Min, M. Gao, C. Yao, J. Wu y X. Wei, «On the use of one-part geopolymer activated by solid sodium silicate in soft clay stabilization,» 26 Octubre 2023. [En línea]. Available: <https://www-sciencedirect-com.usat.lookproxy.com/science/article/pii/S0950061823026740>. [Último acceso: 2024].
- [25] V.Dharini, M. Balamaheswari y A. N. Presentia, «Enhancing the strength of expansive clayey soil using lime as soil stabilizing agent along with sodium silicate as grouting chemical,» 18 Mayo 2023. [En línea]. Available: <https://www-sciencedirect-com.usat.lookproxy.com/science/article/pii/S2214785323027797>. [Último acceso: 2024].
- [26] L. Gu, Q. Lv, S. Wang, J. Xiang, L. Guo y J. Jiang, «Effect of sodium silicate on the properties of loess stabilized with alkali-activated fly ash-based,» 19 Abril 2021. [En línea]. Available: <https://www-sciencedirect-com.usat.lookproxy.com/science/article/pii/S0950061821002750>. [Último acceso: 2024].
- [27] M. V. Vakili, A. Chegenizadeh, H. Nikraz y M. Keramatikerman, «Investigation on shear strength of stabilised clay using cement, sodium silicate and slag,» Mayo 2016. [En línea]. Available: <https://www-sciencedirect-com.usat.lookproxy.com/science/article/pii/S0950061816000000>.

- com.usat.lookproxy.com/science/article/pii/S0169131716300746. [Último acceso: 2024].
- [28] C. Ma, Z. Qin, Y. Zhuang, L. Chen y B. Chen, «Influence of sodium silicate and promoters on unconfined compressive strength of Portland cement-stabilized clay,» Octubre 2015. [En línea]. Available: <https://www-sciencedirect-com.usat.lookproxy.com/science/article/pii/S0038080615001237>. [Último acceso: 2024].
- [29] A. Aguilar Zambrano y P. A. Cardenas Diego, «Estabilización de suelos arenosos mediante la adición de silicato de sodio en la subrasante de la alameda sur de Chorrillos,» Marzo 2023. [En línea]. Available: <https://repositorioacademico.upc.edu.pe/handle/10757/667624>. [Último acceso: 2024].
- [30] Ó. J. Caballero Chaves, «Estabilización química con silicato de sodio del material de préstamo de la vía La Primavera – Bonanza – La Venturosa en el departamento del Vichada,» 12 2017. [En línea]. Available: <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/63517>. [Último acceso: 2024].
- [31] A. D. Chávez López, «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,» 2021. [En línea]. Available: [https://alicia.concytec.gob.pe/vufind/Record/RUMP\\_328c584f0e88c83324afd2a82e800dc5](https://alicia.concytec.gob.pe/vufind/Record/RUMP_328c584f0e88c83324afd2a82e800dc5). [Último acceso: 2024].
- [32] Ministerio de Transportes y Comunicaciones, «Ministerio de Transportes y Comunicaciones,» Mayo 2016. [En línea]. Available: [https://portal.mtc.gob.pe/transportes/caminos/normas\\_carreteras/documentos/manuales/Manual%20Ensayo%20de%20Materiales.pdf](https://portal.mtc.gob.pe/transportes/caminos/normas_carreteras/documentos/manuales/Manual%20Ensayo%20de%20Materiales.pdf). [Último acceso: 2024].
- [33] M. d. T. y. C. Ministerio de Transportes y Comunicaciones, «Manual de carreteras: suelos geología, geotécnia y pavimentos,» 2014. [En línea]. Available: [http://transparencia.mtc.gob.pe/idm\\_docs/P\\_recientes/4515.pdf](http://transparencia.mtc.gob.pe/idm_docs/P_recientes/4515.pdf).

- [34] J. C. Galindo Torres y E. A. Avellaneda Moreno, «Análisis técnico del uso de silicato de sodio para estabilización química de suelos,» 2016. [En línea]. Available: <https://repository.udistrital.edu.co/items/c9201509-3dba-4997-9c0f-67307537e857>.
- [35] J. R. García Toro, «Estudio de la técnica de Suelo-Cemento para la estabilización,» 2019. [En línea]. Available: <https://repository.ucatolica.edu.co/server/api/core/bitstreams/140c5ce1-5c92-4735-a9fd-69ed64b95d9e/content>.
- [36] J. Junco del Pino y E. Tejada Piusseaut, «Aditivo químico obtenido de sales cuaternarias empleado para la estabilización de suelos arcillosos de subrasantes de carreteras,» 2011. [En línea]. Available: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=3711821>.
- [37] ASTM International, «Práctica Estándar para la Clasificación de Suelos para Propósitos de Ingeniería,» 2011. [En línea]. Available: [https://www.cesmec.cl/medios/DIC/normas/ASTM\\_D2487\\_11\\_.pdf](https://www.cesmec.cl/medios/DIC/normas/ASTM_D2487_11_.pdf).
- [38] R. D. P. Bustamante Sánchez, «Estabilización de un suelo arcilloso para carreteras no pavimentadas incorporando PET en 2%, 4% y 6%,» 07 Septiembre 2021. [En línea]. Available: <https://repositorio.upn.edu.pe/handle/11537/29254#:~:text=Los%20suelos%20con%20CBR%20menores,%3B%20arcillas%2C%20limos%20y%20org%C3%A1nicos..>
- [39] J. J. Escobar Sulca, G. D. Quispe Sánchez, F. R. Quispe Salazar, J. B. Arana Soto y R. B. Huarcaya Quiquia, «Estabilización de una subrasante arcillosa de baja plasticidad con cenizas de cáscara de arroz,» 15 Febrero 2021. [En línea]. Available: <https://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/handle/20.500.12404/18221>.
- [40] J. E. Alva Hurtado, «INFLUENCIA DEL PARAMETRO A Y LA GEOMETRIA EN EL ASENTAMIENTO FINAL DE CONSOLIDACIÓN TRIDIMENSIONAL VS UNIDIMENSIONAL,» 1972. [En línea]. Available: [https://www.jorgealvahurtado.com/files/labgeo26\\_a.pdf](https://www.jorgealvahurtado.com/files/labgeo26_a.pdf).

- [41] Y. Maldonado, «Origen y formación de los suelos,» Geologíaweb, setiembre 2021. [En línea]. Available: <https://geologiaweb.com/ingenieria-geologica/origen-formacion-suelos/>. [Último acceso: 4 noviembre 2023].
- [42] FAO, «Consistencia del suelo,» 2024. [En línea]. Available: [https://www.fao.org/fishery/docs/CDrom/FAO\\_Training/FAO\\_Training/General/x6706s/x6706s08.htm#:~:text=L%C3%ADmite%20pl%C3%A1stico%20\(LP\),l%C3%ADmite%20inferior%20del%20estado%20pl%C3%A1stico..](https://www.fao.org/fishery/docs/CDrom/FAO_Training/FAO_Training/General/x6706s/x6706s08.htm#:~:text=L%C3%ADmite%20pl%C3%A1stico%20(LP),l%C3%ADmite%20inferior%20del%20estado%20pl%C3%A1stico..)
- [43] FAO, «Textura del suelo,» 2024. [En línea]. Available: [https://www.fao.org/fishery/static/FAO\\_Training/FAO\\_Training/General/x6706s/x6706s06.htm](https://www.fao.org/fishery/static/FAO_Training/FAO_Training/General/x6706s/x6706s06.htm).
- [44] Cybertesis, «Clasificación de los suelos,» 2024. [En línea]. Available: <http://cybertesis.uach.cl/tesis/uach/2003/bmfcia662a/xhtml/TH.5.xml#:~:text=Las%20part%C3%ADculas%20pueden%20ser%20angulares,suelo%20propiedades%20mec%C3%A1nicas%20poco%20comunes..>
- [45] G. Duque Escobar y C.E. Escobar Potes, «Mecánica de los suelos,» 2002. [En línea]. Available: <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/3375>.
- [46] M. d. T. y. Comunicaciones, «Manual de Carreteras – suelos, geología, geotecnia y pavimentos.,» 2013. [En línea]. Available: [https://portal.mtc.gob.pe/transportes/caminos/normas\\_carreteras/documentos/manuales/MANUALES%20DE%20CARRETERAS%202019/MC-05-14%20Seccion%20Suelos%20y%20Pavimentos\\_Manual\\_de\\_Carreteras\\_OK.pdf](https://portal.mtc.gob.pe/transportes/caminos/normas_carreteras/documentos/manuales/MANUALES%20DE%20CARRETERAS%202019/MC-05-14%20Seccion%20Suelos%20y%20Pavimentos_Manual_de_Carreteras_OK.pdf).
- [47] AASHTO, «Standard Practice for Classification of Soils and Soil-Aggregate Mixtures for Highway Construction Purposes,» [En línea]. Available: <https://tajhizkala.ir/doc/ASTM/D3282-15.pdf>.
- [48] Comunicaciones, Ministerio de Transportes y Comunicaciones, «Manual de ensayo de materiales,» 2017. [En línea]. Available: [https://portal.mtc.gob.pe/transportes/caminos/normas\\_carreteras/documentos/manuales/MANUALES%20DE%20CARRETERAS%202019/MC-06-](https://portal.mtc.gob.pe/transportes/caminos/normas_carreteras/documentos/manuales/MANUALES%20DE%20CARRETERAS%202019/MC-06-)

- 16%20Manual%20Ensayo%20de%20Materiales.pdf. [Último acceso: 5 Noviembre 2023].
- [49] Universidad Distrital Francisco José de Caldas, «GUÍA DE LABORATORIO PARA ENSAYO CONTENIDO DE MATERIA,» 2017. [En línea]. Available: <https://ftecnologica.udistrital.edu.co/laboratorios/civiles/sites/lab-civiles/files/practica/2023-06/CONTENIDO%20ORGANICO%20EN%20SUELOS%20MEDIANTE%20PERDIDA%20POR%20IGNICI%C3%93N.pdf>.
- [50] Proquinsa, «Productos Químicos Industriales S.A.,» 2021. [En línea]. Available: <https://proquinsa.com/productos/silicato-de-sodio/>.
- [51] S. o. Indiana, «Geotechnical Manual,» 2019. [En línea]. Available: [https://www.in.gov/indot/engineering/files/geotech\\_design\\_manual\\_ch05-lab\\_testing.pdf](https://www.in.gov/indot/engineering/files/geotech_design_manual_ch05-lab_testing.pdf). [Último acceso: 2025].
- [52] Proain, «Tecnología agrícola,» 2024. [En línea]. Available: <https://proain.com/blogs/notas-tecnicas/como-interpretar-el-resultado-de-ph-del-suelo#:~:text=%C2%BFC%C3%B3mo%20medir%20el%20pH%3F,de%20la%20nutrici%C3%B3n%20de%20cultivos..>
- [53] S. A. J. O. E. E. A. J. S. N. T. A. M. U. Chukwueloka Okeke, «Appropriate Use of Lime in the Study of the Physicochemical Behaviour of Stabilised Lateritic Soil under Continuous Water Ingress,» 2021. [En línea]. Available: <https://www.mdpi.com/2071-1050/13/1/257>.
- [54] J. S. Gonzales Gomez, «Adición del Silicato de Sodio en un concreto F'c 210 kg/cm<sup>2</sup> para mejorar el comportamiento físico y mecánico, Callao 2023,» 2023. [En línea]. Available: [https://repositorio.ucv.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12692/125500/Gonzales\\_GJS-SD.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repositorio.ucv.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12692/125500/Gonzales_GJS-SD.pdf?sequence=1&isAllowed=y).
- [55] Vinai R. y Soutsos, M., «Cement and Concrete Research Production of sodium silicate powder from waste glass cullet for alkali activation of alternative binders,

- Cem Concr Res. 116,» 2019. [En línea]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.11.008..>
- [56] M. Fawer, M. Concannon, W. Rieber, «Life cycle inventories for the production of sodium silicates, International Journal of Life Cycle Assessment.,» 1999. [En línea]. Available: <https://doi.org/10.1007/BF02979498..>
- [57] L. de J. Ramos Gutiérrez, M. Montelongo Fragoso,, «Generation of electric energy in Mexico, Tecnología y Ciencias Del Agua.,» 2012. [En línea]. Available: [https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S2007-24222012000400012&script=sci\\_abstract&tlng=en](https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S2007-24222012000400012&script=sci_abstract&tlng=en).
- [58] P. L. López, «Población, muestra y muestreo,» 2004. [En línea]. Available: [http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1815-02762004000100012#:~:text=a\)%20Poblaci%C3%B3n.,los%20accidentes%20viales%20entre%20otros%22..](http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1815-02762004000100012#:~:text=a)%20Poblaci%C3%B3n.,los%20accidentes%20viales%20entre%20otros%22..)
- [59] R. Hernández Sampieri, C. Fernández Collado y M. d. P. Baptista Lucio, «Metodología de la investigación,» 2014. [En línea]. Available: <https://www.esup.edu.pe/wp-content/uploads/2020/12/2.%20Hernandez,%20Fernandez%20y%20Baptista-Metodolog%C3%ADa%20Investigacion%20Cientifica%206ta%20ed.pdf>.
- [60] S. F. A. Faneite, «Los enfoques de investigación en las Ciencias Sociales,» 2023. [En línea]. Available: <https://doi.org/10.53595/rlo.v3.i8.084>.
- [61] POLITANO, Michael, WALTON, Robert y PARRISH, Audrey., «Statistics and research methodology.,» 2018. [En línea]. Available: <https://books.google.com.pe/books?id=pcZqDwAAQBAJ&printsec=frontcover&>. [Último acceso: 4 Noviembre 2023].
- [62] T. Gutiérrez Ruiz, «LABORATORIO NACIONAL DE MATERIALES,» 2003. [En línea]. Available: <https://www.lanamme.ucr.ac.cr/repositorio/bitstream/handle/50625112500/1444/C%C3%A1culo%20del%20n%C3%BAmero%20de%20muestras.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. [Último acceso: 2024].

- [63] «ArcGis Pro,» [En línea]. Available: <https://pro.arcgis.com/es/pro-app/latest/tool-reference/spatial-statistics/what-is-a-z-score-what-is-a-p-value.htm>. [Último acceso: 2024].
- [64] J. Lozano Alvarado, «Modelo de series de tiempo para describir la humedad,» 2023. [En línea]. Available: <https://repositorio.unprg.edu.pe/handle/20.500.12893/12134>.
- [65] J. L. Caivano, «Observación y experimentación,» [En línea]. Available: <https://materiainvestigacion.wordpress.com/wp-content/uploads/2016/05/apunte-inexperimental.pdf>.
- [66] M. Á. Villasís-Keever, H. Márquez-González, J. N. Zurita-Cruz, G. Miranda-Navales y A. Escamilla-Núñez., «El protocolo de investigación VII. Validez y confiabilidad de las mediciones,» Revista alergia México, 2018. [En línea]. Available: [https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S2448-91902018000400414](https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2448-91902018000400414).
- [67] J. A. Llatas Contreras, «Utilización de la escoria siderúrgica para el mejoramiento de las propiedades mecánicas de subrasantes en suelos arcillosos,» 2023. [En línea]. Available: <https://tesis.usat.edu.pe/handle/20.500.12423/6262>. [Último acceso: 2025].
- [68] C. Villalaz, «Mecánica De Suelos Y Cimentaciones,» 2004. [En línea]. Available: <https://stehven.wordpress.com/wp-content/uploads/2015/06/mecanica-desuelos-y-cimentaciones-crespo-villalaz.pdf>. [Último acceso: 2025].

## Anexos

### Anexo 1: Panel Fotográfico



Excavación de la calicata C-01



Obtención de Muestras en estado Natural C-02



Medida de profundidad C-02



Profundidad ce la C-03



Muestras naturales secado al aire libre



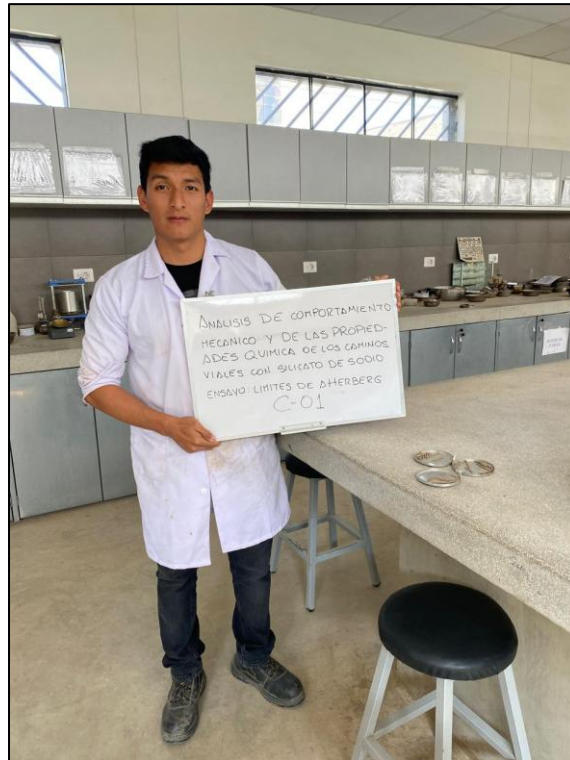
Saturación de muestras para ensayo de Contenido de Humedad



Secado en horno de las muestras naturales



Tamices usados para el ensayo de Granulometría



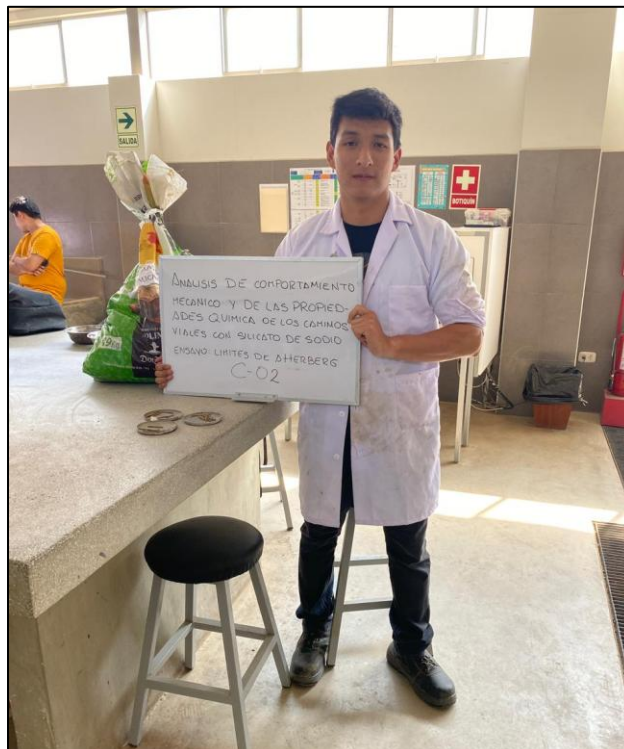
Límites de consistencia C-01



Preparación de Límites de Consistencia C-01



Preparación de Límites de Consistencia C-01



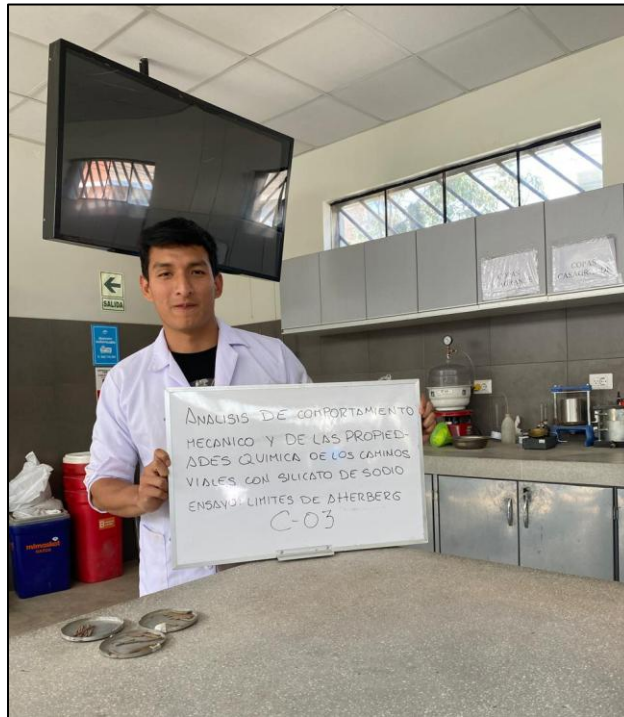
Límites de consistencia C-02



Preparación de Límites de Consistencia C-02



Límites de Consistencia Muestras con Silicato de Sodio C-02



Límites de Consistencia C-03



Preparación de Límites de consistencia con Silicato de Sodio



Límites de Consistencia Muestras con Silicato de Sodio C-03



Preparación de molde para el ensayo de Proctor Modificado



Medida del molde de Proctor Modificado



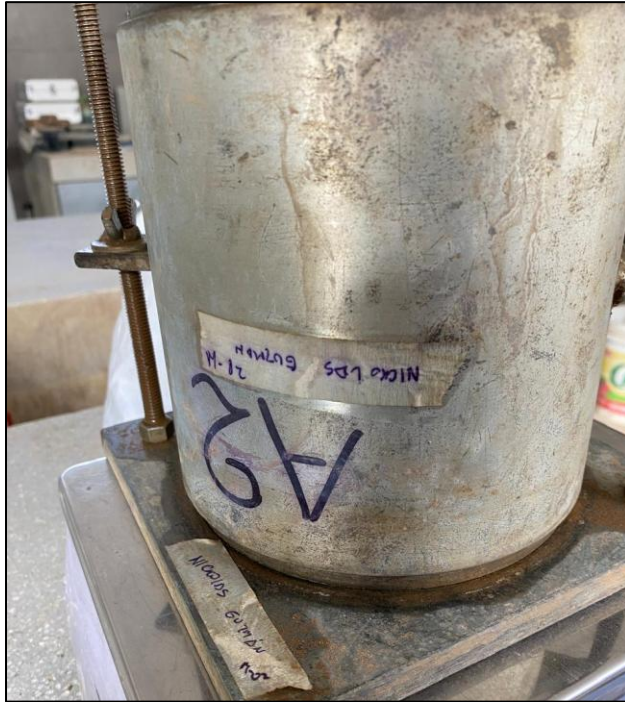
Muestras Natural y con Silicato de Sodio saturadas



Muestras con Silicato de Sodio para el ensayo de Proctor Modificado



Penetración CBR de muestras con Silicato de Sodio C-03



Molde CBR perteneciente a las muestras con Silicato de Sodio



Medidas del molde de CBR



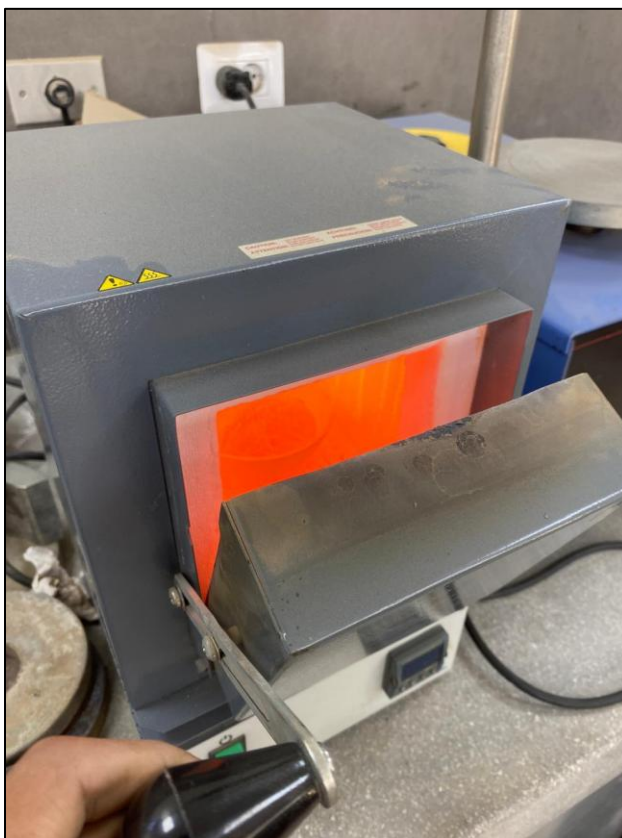
Saturación de la muestra para el ensayo CBR



Molde y Muestras naturales para el ensayo de CBR



Tamizado por malla #40 para los ensayos químicos



Proceso de ignición de la muestra



Máquina de ignición perteneciente al laboratorio de suelos



Uso del phmetro para el cálculo del nivel de ph



Phmetro, agua destilada, muestras naturales y con Silicato de Sodio



Muestras natural y con Silicato de Sodio para ph C-03

**Anexo 2: Ensayos de laboratorio**

<https://drive.google.com/file/d/1GV2HOGiHRp85q9I6UsblZxSfZzpvIxC/1GV2HOGiHRp85q9I6UsblZxSfZzpvIxC/view?usp=sharing>