UNIVERSIDAD CATÓLICA SANTO TORIBIO DE MOGROVEJO

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL

Evaluación de suelos arcillosos de alta plasticidad en subrasante adicionando porcentajes de Corchorus capsularis en La Despensa, José Leonardo Ortiz

TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE

INGENIERO CIVIL

AUTOR

Jaime William Hernandez Manay

ASESOR

Joaquin Hernan Rojas Oblitas

https://orcid.org/0000-0002-6521-0215

Chiclayo, 2026

Evaluación de suelos arcillosos de alta plasticidad en subrasante adicionando porcentajes de Corchorus capsularis en La Despensa, José Leonardo Ortiz

PRESENTADA POR

Jaime William Hernandez Manay

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

INGENIERO CIVIL

APROBADA POR

Roberto Carlos Castillo Velarde
PRESIDENTE

Luis Quiroz Quiñones
SECRETARIO

Joaquin Hernan Rojas Oblitas
VOCAL

Dedicatoria

A mis adorados padres, Arturo y Leslie, y a mis hermanos, Arturo y Luis Ángel: ustedes han sido el faro que iluminó cada paso de este viaje. Su amor inquebrantable y su entrega desinteresada han cimentado mis sueños y me han impulsado a crecer día tras día. Con todo mi amor, esta tesis es para ustedes.

Agradecimientos

Mi gratitud también va para toda mi familia, mi pilar inamovible en cada desafío. Su aliento constante me dio fuerzas para seguir adelante cuando todo parecía difícil. A mi asesor, por su dedicación y conocimiento. Su apoyo fue clave para el éxito de esta investigación. A mis queridos amigos: Walter Burga López, Marcelo De la Cruz Santa María, Juan Pablo Ugaz, gracias por estar siempre, con su apoyo firme e inspiración. Y, de manera muy especial, a Sabrina Alessandra Flores Diaz: tu paciencia infinita, tu amor sin condiciones y tu respaldo diario han sido el viento en mis velas.

Evaluación de suelos arcillosos de alta plasticidad en subrasante adicionando porcentajes de Corchorus Capsularis en La Despensa, José Leonardo Ortiz

INFORME DE ORIGINALIDAD

7%	7%	1%	3%
INDICE DE SIMILITUD	FUENTES DE INTERNET	PUBLICACIONES	TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1	tesis.usat.edu.pe Fuente de Internet	2%
2	hdl.handle.net Fuente de Internet	2%
3	repositorio.ucv.edu.pe Fuente de Internet	1%
4	Submitted to Universidad Cesar Vallejo Trabajo del estudiante	<1%
5	repositorio.upla.edu.pe Fuente de Internet	<1%
6	repositorio.uss.edu.pe Fuente de Internet	<1%

Índice

Resumen **11**

Abstract **12**

Introducción **13**

Revisión de literatura **18**

Materiales Y Métodos **51**

Resultados **82**

Conclusiones **119**

Recomendaciones **121**

Referencias **122**

Anexos **128**

Lista de Tablas

TABLA I TAMICES PARA ENSAYO GRANULOMÉTRICO..... 24

TABLA II FACTOR K EMPLEADO EN LA DETERMINACIÓN DEL LÍMITE LÍQUIDO DE SUELOS 28

TABLA III PARÁMETROS DE ÍNDICE DE PLASTICIDAD 43

TABLA IV Clasificación de la base estructural inferior según su capacidad de soporte 1 45

TABLA V TABLA DE PROPIEDADES DE FIBRA DE CORCHORUS CAPSULARIS ... 49

TABLA VI CRITERIO PARA DETERMINAR EL NÚMERO Y LA PROFUNDIDAD DE LAS CALICATAS 53

TABLA VII SELECCIÓN DE PORCENTAJES DE FIBRA. 54

TABLA VIII NÚMERO DE PUNTOS DE EXPLORACIÓN SEGÚN CE.010 56

TABLA IX CANTIDAD DE ENSAYOS EN LABORATORIO..... 58

TABLA X CANTIDAD DE ENSAYOS IN-SITU 58

TABLA XI MATRIZ DE OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES..... 61

TABLA XII COMBINACIONES DE SUELO NATURAL + CORCHORUS CAPSULARIS CON LOS PORCENTAJES SELECCIONADOS..... 80

TABLA XIII CONTENIDO DE HUMEDAD DE SUELO NATURAL 82

TABLA XIV GRANULOMETRÍA POR ENSAYO DE TAMIZADO 83

TABLA XV GRANULOMETRÍA POR ENSAYO DE HIDROMETRÍA 86

TABLA XVI LÍMITES DE ATTERBERG DEL SUELO NATURAL PARA DESCARTE DE CALICATAS 89

TABLA XVII CLASIFICACIÓN DE PLASTICIDAD DE ACUERDO CON AL PARAMETRO DE PLASTICIDAD..... 90

TABLA XVIII CATEGORIZACIÓN DE SUELOS SEGÚN EL MÉTODO DE SUCS DEL SUELO NATURAL PARA DESCARTE DE CALICATAS..... 90

TABLA XIX CATEGORIZACIÓN DE SUELOS SEGÚN EL MÉTODO DE AASHTO DEL SUELO NATURAL PARA DESCARTE DE CALICATAS 91

TABLA XX TABLA DE PORCENTAJES DE SALES SOLUBLES DEL SUELO NATURAL..... 91

TABLA XXI PROCTOR MODIFICADO DE SUELO NATURAL PARA DESCARTE DE CALICATAS 92

TABLA XXII SÍNTESIS DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS DEL CBR DE SUELO NATURAL PARA DESCARTE DE CALICATAS 93

TABLA XXIII P. MODIF. DE LAS CALICATAS SELECCIONADAS 95

TABLA XXIV RESULTADOS DE CBR DE C-1 DE SUELO NATURAL 96

TABLA XXV RESULTADOS DE CBR DE C-2 DE SUELO NATURAL 97

TABLA XXVI RESULTADOS DE CBR DE C-3 DE SUELO NATURAL 97

TABLA XXVII RESULTADOS DE LÍMITES DE ATTERBERG C-01: SN+CC% 99

TABLA XXVIII RESULTADOS DE LÍMITES DE CONSISTENCIA: C-02: SN+CC% . 100

TABLA XXIX RESULTADOS DE LÍMITES DE CONSISTENCIA: C-03: SN+CC% 102

TABLA XXX RESULTADOS DE P. MODIF: C-01: SN+CC% 103

TABLA XXXI RESULTADOS DE P. MODIF: C-02: SN+CC% 104

TABLA XXXII RESULTADOS DE P. MODIF.: C-03: SN+CC% 105

TABLA XXXIII RESULTADOS DE CBR A 2.54 CM: C-01: SN+CC% 107

TABLA XXXIV RESULTADOS DE CBR A 2.54 CM: C-02: SN+CC% 108

TABLA XXXV RESULTADOS DE CBR A 2.54 CM: C-03: SN+CC% 109

TABLA XXXVI RESULTADOS DE DENSIDAD DE CAMPO-GRADO DE COMPACTACIÓN 110

TABLA XXXVII RESULTADOS DE ENSAYO DPC MUESTRA NATURAL 111

TABLA XXXVIII RESULTADOS DE ENSAYO DPC MUESTRA EXPERIMENTAL .. 112

TABLA XXXIX ANÁLISIS DE COSTOS UNITARIOS CON CAL 115

TABLA XL ANÁLISIS DE COSTOS UNITARIOS CON CC 115

Lista de Figuras

Fig. 1 Gráfico empleado para calcular el índice CBR Fuente: [31]. 32

Fig. 2 Componentes del equipo Fuente:[32]. 34

Fig. 3 Componentes del ensayo de cono de arena Fuente: [31]. 36

Fig. 4 Símbolos estándar para la representación de perfiles de calicatas. Fuente: [38]. 38

Fig. 5 Simbología convencionales para perfiles de calicatas Fuente: [35]. 39

Fig. 6 Límites de Atterberg *Fuente:* [42] 42

Fig. 7 Espacio geográfico bajo evaluación Fuente: Propia 57

Fig. 8 Procedimiento de comprobación de hipótesis. Fuente: Propia 60

Fig. 9 Sitio en el que se posicionaron las calicatas N°01, N°02 y N°03. Fuente: Propia 64

Fig. 10 Sitio en el que se posicionaron las calicatas N°04 y N°05. Fuente: Propia 64

Fig. 11 Calicata-01: Intersección de La Despensa y Manuel Duato Fuente: Propia 65

Fig. 12 Calicata-02: Intersección de La Despensa y Palmeras Fuente: Propia 66

Fig. 13 Calicata-03: Intersección de La Despensa y Av. Mexico Fuente: Propia 66

Fig. 14 Calicata-04: Intersección de La Despensa y Real. Fuente: Propia 67

Fig. 15 Calicata-04: Intersección de La Despensa y El Porvenir. Fuente: Propia 67

Fig. 16 Ensayo para determinar el porcentaje de humedad. Fuente: Propia 68

Fig. 17 Ensayo granulométrico por tamizado. Fuente: Propia 69

Fig. 18 Ensayo granulométrico por hidrómetro. Fuente: Propia 70

Fig. 19 Ensayo de límite líquido. Fuente: Propia 71

Fig. 20 Procedimiento para establecer el rango de plasticidad. Fuente: Propia 72

Fig. 21 Ensayo de P. Modif. Fuente: Propia 72

Fig. 22 Ensayo de CBR Fuente: Propia 74

Fig. 23 Método de ensayo CBR bajo condiciones de saturación o inmersión. Fuente: Propia 75

Fig. 24 Ensayo de contenido de sales. Fuente: Propia 75

Fig. 25 Procedimiento empleado para calcular la densidad natural in situ. Fuente: Propia 77

Fig. 26 Ensayo de DCP. Fuente: Propia 77

Fig. 27 Cantidad de humedad contenida en el suelo sin intervención. Fuente: Propia 82

Fig. 28 Gráfica de distribución granulométrica de la excavación Número 1. Fuente: Propia . 84

Fig. 29 Gráfica de distribución granulométrica de la excavación Número 2. Fuente: Propia . 84

Fig. 30 Gráfica de distribución granulométrica de la excavación Número 3. Fuente: Propia . 85

Fig. 31 Gráfica de distribución granulométrica de la excavación Número 4 Fuente: Propia .. 85

Fig. 32 Gráfica de distribución granulométrica de la excavación Número 5 Fuente: Propia .. 86

Fig. 33 Curva granulométrica de calicata N°1 por medio del ensayo hidrométrico. Fuente: Propia 88

Fig. 34 Curva granulométrica de calicata N°2 por medio del ensayo hidrométrico. Fuente: Propia 88

Fig. 35 Curva granulométrica de calicata N°3 por medio del ensayo hidrométrico. Fuente: Propia 88

Fig. 36 Límites de Atterberg del suelo natural para descarte de calicatas. Fuente: Propia 90

Fig. 37 Curva de compactación correspondiente a suelos en estado natural. Fuente: Propia .. 93

Fig. 38 CBR al 100% de las 5 excavaciones. Fuente: Propia 94

Fig. 39 CBR al 95% de las 5 excavaciones. Fuente: Propia 95

Fig. 40 Curvas de compactación de excavaciones seleccionadas. Fuente: Propia..... 96

Fig. 41 Resultados del CBR al 100% de las 3 calicatas seleccionadas con un promedio de 5 vueltas. Fuente: Propia 98

Fig. 42 Resultados del CBR al 95% de las 3 calicatas seleccionadas con un promedio de 5 vueltas. Fuente: Propia 98

Fig. 43 Espectrometría por Fluorescencia (XRF) de CC. *Fuente: Propia*..... 99

Fig. 44 Parámetros obtenidos de los Límites de Atterberg: SN+CC% en C-01. Fuente: Propia 100

Fig. 45 Parámetros obtenidos de los Límites de Atterberg: SN+CC% en C-02. *Fuente: Propia* 101

Fig. 46 Parámetros obtenidos de los Límites de Consistencia (Atterberg): SN+CC% en C-03. Fuente: Propia 102

Fig. 47 Resultados de Proctor Modificado : SN+CC% en C-01. Fuente: Propia 104

Fig. 48 Resultados de P.M. : SN+CC% en C-02. Fuente: Propia 105

Fig. 49 Resultados de P.M : SN+CC% en C-03. Fuente: Propia 106

Fig. 50 Resultados de CBR a 2.54 cm : SN+CC% en C-01. Fuente: Propia 107

Fig. 51 Resultados de CBR a 2.54 cm : SN+CC% en C-02. Fuente: Propia 108

Fig. 52 Resultados de CBR a 2.54 cm : SN+CC% en C-03. Fuente: Propia 109

Fig. 53 Zona en la que se hicieron los ensayos de DPC y ensayo de Densidad (Cono de arena). Fuente: Propia 113

Fig. 54 Comparativa del análisis de costo del estabilizante propuesto vs Cal 116

Resumen

Esta investigación se centró en analizar las características físicas y mecánicas de suelos arcillosos con elevada plasticidad, incorporando fibras de Corchorus capsularis (CC), con el fin de mejorar su desempeño en aplicaciones de subrasante. A través de la adición de este material, se buscó potenciar la funcionalidad del suelo como capa base, evaluando cómo su estructura y resistencia pueden optimizarse para cumplir con los requerimientos técnicos necesarios. El estudio se desarrolló mediante un enfoque experimental, incorporando distintas proporciones de Corchorus capsularis (CC) 0.5%, 1.5%, 2.5% y 3.5% en muestras representativas del suelo. Para ello, se evaluó el impacto de estas concentraciones, con el objetivo de determinar cómo la variación en la cantidad de fibra influye en las características del material. A través de este método, se buscó establecer relaciones claras entre los porcentajes aplicados y las mejoras potenciales en la funcionalidad del suelo analizado. El estudio evaluó parámetros como la distribución granulométrica, los límites de Atterberg (plasticidad y consistencia), la humedad óptima, la densidad máxima seca y el índice CBR. Además, se analizó el grado de compactación y la resistencia con el ensayo DCP (penetrómetro dinámico de cono) en campo, combinando métodos de laboratorio y pruebas prácticas.

La incorporación de CC generó un efecto favorable en las propiedades del suelo, según revelaron los análisis, optimizando así sus características físicas y mecánicas, con un 0.5% como el porcentaje más eficaz. A esta dosificación, se registró un incremento considerable del CBR, indicando una mayor capacidad portante del terreno (de 9.00% a 73.50%), un incremento en el grado de compactación (de 96.9% a 99.2%) y una disminución en el índice DCP, lo cual indica una mayor resistencia a la penetración. No obstante, el análisis de costos demostró que la utilización de CC implica un gasto superior en comparación con estabilizantes convencionales como la cal.

Se ha determinado que Corchorus capsularis posee potencial para actuar como estabilizante natural en suelos arcillosos, proporcionando mejoras significativas en su capacidad portante. No obstante, su viabilidad económica estará condicionada por su disponibilidad local y la optimización de costos. Se aconseja continuar con la realización de estudios de campo y el análisis de costo-beneficio en una escala más amplia.

Palabras clave: Corchorus capsularis, suelos arcillosos, estabilización, capacidad portante, índice CBR.

Abstract

This research focused on analyzing the physical and mechanical characteristics of high-plasticity clay soils by incorporating Corchorus capsularis (CC) fibers to enhance their performance in subgrade applications. By adding this material, the aim was to improve the soil's functionality as a base layer, assessing how its structure and strength could be optimized to meet the necessary technical requirements. The study followed an experimental approach, incorporating different proportions of Corchorus capsularis (CC) at 0.5%, 1.5%, 2.5%, and 3.5% into representative soil samples. The impact of these concentrations was evaluated to determine how variations in fiber content influenced the material's characteristics. Through this method, the study aimed to establish clear relationships between the applied percentages and the potential improvements in the functionality of the analyzed soil. Parameters such as grain size distribution, Atterberg limits (plasticity and consistency), optimum moisture content, maximum dry density, and CBR index were assessed. Additionally, the degree of compaction and strength were analyzed using the DCP (Dynamic Cone Penetrometer) test in the field, combining laboratory methods and practical tests. The incorporation of CC had a favorable effect on the soil properties, as revealed by the analyses, optimizing its physical and mechanical characteristics, with 0.5% being the most effective percentage. At this dosage, a significant increase in CBR was recorded, indicating a higher load-bearing capacity of the soil (from 9.00% to 73.50%), an increase in the degree of compaction (from 96.9% to 99.2%), and a decrease in the DCP index, indicating greater resistance to penetration. However, cost analysis showed that using CC involves higher expenses compared to conventional stabilizers such as lime. It was determined that Corchorus capsularis has the potential to act as a natural stabilizer in clay soils, providing significant improvements in their load-bearing capacity. However, its economic viability will depend on its local availability and cost optimization. Further field studies and cost-benefit analyses on a larger scale are recommended.

Keywords: Corchorus capsularis, clayey soils, stabilization, bearing capacity, CBR index.

Introducción

A nivel mundial, la infraestructura de transporte es esencial para las actividades sociales, dado que cada proyecto se edifica sobre la tierra. Es fundamental disponer de una estructura firme que ofrezca el soporte necesario. Un desafío frecuente es la baja capacidad portante del suelo, lo que puede generar costos extra y afectar la calidad de los pavimentos construidos sobre él [1]. Los suelos arcillosos se caracterizan por su limitada capacidad de soporte, lo que los hace propensos a deformaciones y les confiere una resistencia mecánica baja. Su elevado contenido de humedad representa un peligro para la longevidad del pavimento, pudiendo causar perjuicios tanto en la fase de construcción como a lo largo del tiempo que dure el proyecto [1].

Asimismo, se presenta una problemática dual. En primer lugar, se observa un rezago significativo en el mantenimiento y renovación de carreteras y caminos. En segundo lugar, existe una imperante necesidad de integrar innovaciones técnicas que aborden el incremento del tráfico, los efectos del cambio climático y el deterioro de los suelos en áreas de alta plasticidad. Se estima que los países de ingresos bajos y medios representan el 92 % de las muertes ocasionadas por siniestros viales a nivel mundial, a pesar de que solo disponen de aproximadamente el 10 % de las carreteras pavimentadas interurbanas[2].

De acuerdo con [3] en China, este señala que la reacción del suelo a la presencia de humedad induce cambios de volumen, los cuales pueden resultar en daños severos a la estructura, asimismo en la India [4], considera que las características inadecuadas de un terreno expansible constituyen un reto considerable para los ingenieros civiles que tienen la intención de proyectar y edificar en dichas parcelas. Estos suelos presentan desafíos significativos debido a su elevada deformabilidad, baja resistencia y alta expansibilidad, lo que complica tanto el proceso constructivo como su rendimiento a largo plazo en el pavimento.[5]

En el estudio realizado en Bangladesh, para asegurar un desempeño óptimo del terreno, resulta esencial realizar mejoras en estos suelos que permitan incrementar su capacidad portante y resistencia compresiva, reduciendo simultáneamente su vulnerabilidad a la compactación, así como su permeabilidad y los asentamientos [6].

Desde su perspectiva [7] en Perú, sostiene que los suelos con propiedades mecánicas, permeabilidad, compresibilidad, durabilidad y plasticidad insuficientes, plantean un problema al momento de construir infraestructuras. Además, menciona que el cemento es el material más

común para estabilizar suelos, pero su producción contribuye a la emisión de gases que dañan el medio ambiente. Según [7], cada año, solo en los países de la UE, se generan 855 millones de toneladas de desechos del sector constructivo, evidenciando un impacto significativo en la gestión de recursos. Podría representar una alternativa interesante, sustituir los componentes derivados del cemento Portland mediante el uso de restos de edificación y hebras nativas para mejorar el suelo.

De acuerdo con el Instituto Nacional de Defensa Civil (INDECI), en el año 2023 se documentó un total de 605,284 kilómetros de caminos rurales impactados por el fenómeno de las lluvias intensas[8]. La situación se encuentra influenciada por la existencia de suelos arcillosos, los cuales presentan considerables dificultades para la construcción de pavimentos. El incremento volumétrico de estos suelos no se presenta de manera uniforme, sino que se manifiesta de forma desigual en diversas áreas. Esta expansión desigual genera asentamientos que pueden ocasionar daños significativos en el pavimento, así como afectar las viviendas adyacentes. Como consecuencia, se producen dificultades tales como desniveles en la superficie de las vías[9].

Por otro lado [10] en Lima, sostiene que para que una nación alcance un verdadero progreso, el crecimiento económico no basta por sí solo; es fundamental una infraestructura vial robusta que permita una conexión rápida entre sus habitantes y fomente un comercio eficiente. La razón por la que nuestro país no tiene carreteras de alta calidad se debe a la falta de resistencia adecuada de los suelos subyacentes, especialmente por la presencia de arcillas y limos, [11] en Huancavelica, señala que los suelos arcillosos, conocidos por sus retos durante la construcción, causan complicaciones en las rutas de transporte de nuestro país. La baja capacidad portante y la inestabilidad del suelo son las causas principales de este fenómeno, el cual se manifiesta a través de la expansión y contracción de sus partículas cuando interactúan con el agua, generando cambios volumétricos críticos.

El departamento de Lambayeque presenta la situación más crítica, con un total de 127,748 km de caminos rurales afectados y 54,390 km de caminos rurales destruidos en el año 2023, como resultado de las intensas precipitaciones. En la ciudad de Chiclayo, se documentaron 10,906 km de caminos rurales afectados y 22,806 km de caminos rurales destruidos, lo que resalta la necesidad de abordar esta problemática de manera urgente[8].

Según el análisis geotécnico realizado por los ingenieros D. Luna Durán y J. Alba Hurtado en Chiclayo, se establece que el distrito de JLO, donde está ubicada la zona de análisis, es particularmente sensible a la existencia de terrenos ricos en partículas arcillosas. Se ha identificado que dichos suelos tienen arcillas con niveles de plasticidad media y alta, representando el 17% y el 76% respectivamente. Además, la humedad presente en estos suelos es considerablemente alta, oscilando entre el 70% y el 90% de saturación [12], lo que repercute negativamente en la condición de los pavimentos de la zona.

De igual manera, la microzonificación de Chiclayo [13], indica que, además de las arcillas previamente mencionadas con niveles medios y altos de plasticidad, los tipos de suelo más frecuentes en esta zona incluyen arenas con contenido de arcilla, limos y suelos de mala graduación . Estos suelos tienen un nivel de expansión de medio a alto y una capacidad de carga menor, con valores promedio que varían alrededor de 0.50 & 1.00 kg/cm².

A pesar del incremento en la inversión pública destinada a infraestructura en años recientes, persiste una brecha en la ejecución que impacta negativamente en la conservación, entendida como el mantenimiento rutinario y la rehabilitación de las obras. En este contexto, se vuelve imperativo considerar alternativas técnicas locales y económicas para la mejora de subrasantes. Estas estrategias son fundamentales para optimizar el gasto y minimizar la frecuencia de intervenciones necesarias [14].

A nivel local, este distrito enfrenta desafíos con respecto a la condición de sus calles. De acuerdo con la Contraloría de la República en 2017, se identificó que el 95% de todas sus carreteras requerían una rehabilitación inmediata [15]. Según el GRL [16], aproximadamente el 21.7% de las caminos en la región están pavimentadas con un total de 693 km, mientras que el 78.3% no lo están, con un total de 2494 km. Estas muestran una condición de mantenimiento que va desde regular hasta deficiente. Los planes de mejora vial podrían recomendar optimizar la subrasante actual mediante el uso de fibra de Corchorus Capsularis (yute) como material estabilizante, aportando mejoras en su resistencia y desempeño, obteniendo una disminución de costos y dándole mejores propiedades al terreno.

Por otro lado, desafortunadamente, la investigación sobre suelos estabilizados con fibras no ha recibido suficiente atención académica, limitando así su aplicación en diversas construcciones civiles. La incorporación de fibras en suelos con baja capacidad portante puede optimizar sus propiedades mecánicas, disminuyendo así su propensión a fracturarse y

reforzando su estabilidad estructural [17].Asimismo, también señala que las fibras de yute son materiales de fácil acceso, sostenibles y económicos. Su uso en la estabilización de suelos contribuye a elevar los índices de CBR y a disminuir el espesor requerido para las capas de pavimento, representando así una alternativa de bajo costo frente a los métodos convencionales.

De acuerdo con [18], la incorporación de fibras naturales al suelo es considerada un método de refuerzo efectivo. La razón es que las fibras, al incorporarse y mezclarse con la tierra, actúan de forma parecida a otros aditivos como las cenizas volantes, cal o el cemento mismo. Inspirado en el mecanismo de las raíces vegetales, este método transforma las propiedades físicas del suelo, preservando su resistencia intrínseca y asegurando la sostenibilidad ambiental al evitar alteraciones en el ecosistema. Como indican [19], la adición de fibras naturales mejora las propiedades mecánicas del suelo mediante la interacción entre las partículas del terreno y las fibras, donde el contacto y la fricción actúan como mecanismos clave de refuerzo. Según [20], el yute, una fibra natural que se destaca por su suavidad, brillo y longitud, se obtiene de la planta del yute. Es la segunda planta más producida después del algodón y tiene una amplia gama de aplicaciones. Además, ofrece resistencia a la tracción, lo que la hace útil como geotextil o para reforzar suelos de manera controlada.

Debido a la problemática expuesta, se determinó que, este estudio se ejecutó mediante métodos sistemáticos, abarcando recolección de datos, experimentación, fue necesario examinar una amplia lista de referencias de investigaciones experimentales que abordan la estabilización de muestras de suelo mediante la inclusión de distintas proporciones de corchorus capsularis. El estudio definió la dosis óptima de Corchorus capsularis para mejorar las propiedades geotécnicas de arcillas plásticas. De este modo, la interrogante de investigación se formula así: ¿Cómo afecta la adición de corchorus capsularis a las cualidades físicas y mecánicas en terrenos de base con elevada proporción de arcilla, procedentes de la vía denominada La Despensa, ubicada en José Leonardo Ortiz? La inclusión de corchorus capsularis contribuirá a la mejora de las características físicas y mecánicas de los terrenos. de elevada plasticidad utilizados en las subrasantes de la calle "La Despensa" en José Leonardo Ortiz, Chiclayo.

El estudio se propuso como objetivo general, evaluar las propiedades mecánicas y físicas de los suelos arcillosos de alta plasticidad presentes en subrasantes, integrando distintos porcentajes de Corchorus capsularis como material de estabilización. Para alcanzar este propósito general, se establecieron objetivos específicos que guiaron la investigación. En primer lugar, se buscó

determinar las características físicas y mecánicas de los suelos arcillosos, analizando parámetros como su composición, consistencia y resistencia. Paralelamente, se planteó determinar las propiedades químicas del Corchorus capsularis, con el fin de comprender su interacción con el suelo. Además, mediante ensayos de Proctor modificado y CBR, se definió la humedad óptima y la densidad seca máxima del suelo al incorporar este material orgánico, así como su impacto en el índice de capacidad de carga (CBR). También se evaluó el grado de compactación alcanzado al utilizar el porcentaje óptimo de Corchorus capsularis, asegurando la eficiencia técnica del proceso. Para validar los resultados de laboratorio, se realizaron ensayos DCP in situ, estableciendo una correlación entre los datos teóricos y prácticos. Finalmente, el estudio incluyó un análisis comparativo de costos entre los estabilizantes convencionales y el uso de Corchorus capsularis, con el objetivo de determinar la viabilidad económica de esta alternativa sostenible.

La justificación de esta investigación se sustenta en diversos aspectos interrelacionados que destacan su pertinencia teórica, ambiental, práctica y social. En primer lugar, el marco teórico se construye a partir de datos recopilados de estudios previos, publicaciones científicas, normativas vigentes y protocolos de laboratorio, con el propósito de avanzar en la optimización de los atributos mecánicos y estructurales de los suelos arcillosos de alta plasticidad por medio de la adición controlada de Corchorus capsularis en distintas proporciones. Este enfoque busca ofrecer una propuesta disruptiva con potencial para transformar prácticas tradicionales, sostenible y económica para el acondicionamiento de suelos problemáticos, proporciona fundamentos clave para futuros avances en estabilización de suelos con recursos naturales. Desde una perspectiva ambiental, el uso de fibras de yute derivadas del Corchorus capsularis en la consolidación de suelos se presenta como una solución ecológica y rentable, particularmente en proyectos de ingeniería geotécnica. Al ser un recurso biodegradable y renovable, su aplicación fortalece las propiedades estructurales del terreno y, simultáneamente, mitiga la dependencia de insumos convencionales de alto impacto ambiental y económico, estableciendo un equilibrio entre eficiencia y sostenibilidad. Adicionalmente, al ser un recurso disponible localmente en diversas regiones, su empleo disminuye los costos logísticos asociados al transporte de materiales y promueve la economía circular y el desarrollo local. Esta integración de tecnologías sostenibles en la ingeniería civil contribuye directamente a la conservación del medio ambiente. En el ámbito práctico, la investigación adquiere relevancia al buscar la obtención de suelos de mayor calidad para su uso en bases de carreteras. Con dosis óptimas de Corchorus capsularis, se mejoran las propiedades físico-mecánicas del suelo, potenciando la resistencia y durabilidad de las capas de pavimento. Este desarrollo no solamente

asegura la estabilidad de las estructuras, sino que además incrementa la durabilidad de las vías, lo que se traduce en una reducción significativa de los gastos de mantenimiento tanto a mediano como a largo plazo.

Finalmente, el estudio adquiere una dimensión social al mejorar la calidad de las subrasantes arcillosas en las carreteras. Una base más sólida y bien consolidada se traduce en pavimentos más seguros y funcionales, beneficiando tanto a conductores como a peatones al ofrecer superficies de circulación más uniformes y resistentes. De este modo, el estudio no solamente ofrece respuestas tecnológicas innovadoras, sino que también contribuye al mejoramiento de las condiciones de vida en las poblaciones y a la prevención de accidentes viales, fortaleciendo así la conexión entre los desarrollos ingenieriles y el bien común.

Revisión de literatura

Antecedentes

Zang et. al. (2021) [20], en su exploración nombrada " Enhancing mechanical behavior of micaceous soil with jute fibers and lime additives" se dedicó a investigar el comportamiento de suelos micáceos reforzados mediante la mezcla de fibras naturales de Corchorus capsularis, hidróxido de calcio y residuos de calcinación, se logra un material compuesto con propiedades reforzadas, ideal para aplicaciones de estabilización de suelos. Como metodología explicativa y cuantitativa, se elaboraron un total de 28 grupos de muestras con distintas dosis. En las muestras sometidas a un periodo de curado de 7 y 28 días, respectivamente, se realizaron ensayos de resistencia a la compresión uniaxial, con el objetivo de evaluar su comportamiento mecánico bajo cargas progresivas. El análisis demostró que la inclusión de fibras en proporciones ≤1% optimizó la UCS y la rigidez, pero concentraciones mayores redujeron drásticamente estos parámetros, evidenciando un punto crítico en la dosificación. La ductilidad del material mejoró gradualmente hasta un 1.5% de fibras, y su integración con cal o subproductos calcáreos potenció adicionalmente la capacidad estructural del suelo micáceo, siendo las mejoras proporcionales a las concentraciones utilizadas. Se concluyó que en las dosis examinadas, en términos de ductilidad, las fibras de yute superaron a la cal y escoria, y se identificó que el porcentaje óptimo de fibra es del 1%, tomando en cuenta tanto la fortaleza estructural como la capacidad para deformarse sin fracturarse.

Kumar et. al. (2020) [21], en su investigación titulada " Influence of Jute Fibre on CBR Value of Expansive Soil" se planteó como meta fundamental indagar al implementar métodos de mejora de terrenos, específicamente mediante la utilización de fibras de yute para potenciar

suelos expansivo y con una metodología experimental. Tuvieron como metodología tipo aplicada y un diseño experimental, donde emplearon fibras de yute de 10 a 30 mm en proporciones de 0.25% a 1.50% del peso seco del suelo. Los ensayos CBR demostraron que la incorporación de fibras potenció notablemente la resistencia del suelo, registrándose un incremento del 226.92% en el valor de CBR al utilizar un 1.25% de fibra. Concluyeron que, utilizando un subproducto agrícola, propone una solución económicamente accesible y ambientalmente responsable para el mejoramiento de suelos arcillosos en el ámbito de la ingeniería civil.

Silva (2025) [22], en su investigación titulada "Estabilización de suelos arcillosos mediante uso del polímero lignosulfonato de calcio" tuvo como objetivo principal mejorar las propiedades físicas y mecánicas en subrasantes arcillosos incorporando calcio. Emplearon una metodología de un diseño experimental. Para tal fin, se llevaron a cabo ensayos de caracterización y resistencia de los suelos conforme a las normativas del Manual de Ensayos del Ministerio de Transportes y Comunicaciones (MTC), incluyendo análisis granulométrico, clasificación SUCS y AASHTO, límites de Atterberg (LL, LP, IP), Proctor Modificado y CBR. El lignosulfonato de calcio fue adicionado en proporciones de 1.5%, 2.0% y 2.5%. Los resultados demostraron que la adición del 1.5% de lignosulfonato de calcio generó una mejora significativa en la resistencia del suelo, evidenciada por un aumento del valor CBR de aproximadamente tres veces en comparación con la muestra patrón, evaluado a partir de tres calicatas distintas. Además de los ensayos de laboratorio, se realizó el ensayo DPC (Control Dinámico de Placa) tanto en la muestra natural como en la muestra experimental estabilizada. En la muestra natural se obtuvo un valor de CBR aproximado de 5.75%, resultado que guarda correspondencia con los valores obtenidos en laboratorio. Por su parte, la muestra experimental con la adición del 1.5% de lignosulfonato de calcio mostró un valor de CBR aproximado de 14.56%, lo que confirma en campo la mejora registrada en las pruebas de laboratorio. Asimismo, se realizó un análisis comparativo entre el lignosulfonato de calcio y otros estabilizantes comúnmente utilizados, como la cal y el cemento, observándose ventajas técnicas y ambientales en el uso del primero. Finalmente, se planteó la ejecución de un tramo de prueba como parte del proceso de validación de los resultados obtenidos en laboratorio, con el fin de evaluar el comportamiento del suelo estabilizado en condiciones reales de servicio.

Ashfak (2019) [23], en su investigación titulada " Enhancement of Bearing Properties of Black Cotton Soil by Optimal Blending Of Jute and Coir Fibres as a Reinforcement" tuvo como objetivo principal investigar la capacidad de las hebras de corchorus capsularis para aumentar el nivel de CBR y potencialmente disminuir el grosor del pavimento. El diseño empleando fue la de uno experimental, mediante la aplicación de fibras de corchorus capsularis en diferentes cantidades que oscilaron entre el 0.5% y el 2.0%Los resultados encontrados fueron que se logró estabilizar suelos expansivos, evaluando su resistencia a través del ensayo de CBR, utilizando una metodología experimental. Con los datos se concluyó que la inclusión del 1.5% de hebras aumentó el CBR del 1.75% al 5.41%, lo que corrobora la eficiencia del uso de fibras de yute en el fortalecimiento de terrenos expansivos.

Aguirre et. al. (2021) [24], en su investigación titulada "Mejoramiento de las propiedades mecánicas de los suelos finos mediante la adición de residuos sólidos provenientes de fibras vegetales" tuvo como objetivo principal establecer la proporción óptima de residuos de fibras vegetales de fique para potenciar las propiedades mecánica de los suelos de textura fina como base para carreteras, empleó una metodología de investigación aplicada con un método centrado en las características y un esquema de estudio con enfoque experimental. Los hallazgos evidenciaron que la incorporación de distintos porcentajes de fibras produjo diferentes niveles de resistencia y humedad en los suelos finos, teniendo en cuenta los criterios del MTC correspondiente a cada ensayo. Se determinó que la incorporar 1.5% al 2.0% de fibra se logran los porcentajes ideales Para incrementar las propiedades mecánicas clave, el material alcanzó valores de resistencia de 7.82 k/cm² y 8.41 k/cm², respectivamente, demostrando así una mejora proporcional a las estrategias de refuerzo aplicadas.

Silva (2020) [7], en su investigación titulada "Optimization of a reinforced geopolymer composite using natural fibers and construction wastes" tuvo como objetivo principal el desarrollo de elementos para edificaciones sostenibles con características mecánicas avanzadas mediante la utilización de residuos industriales. Emplearon como metodología un diseño experimental. Done utilizaron una matriz geo polimérica elaborada con residuos de polvo de ladrillo cocido, fortalecida con fibras de yute y sisal en diferentes proporciones. Las pruebas de resistencia mecánica, tales como compresión, tracción y flexión, revelaron que la inclusión de un 2.5% de fibras de sisal aumentó la tenacidad en un 76%, 112% y 270%, respectivamente, mientras que un 1.5% de fibras de corchorus capsularis incrementó la resistencia en un 45%, 222% y 64% para cada tipo de prueba, respectivamente. Este hallazgo es de gran repercusión

dirigido al sector de la construcción, al ofrecer una solución sostenible para la fabricación de materiales más sólidos y flexibles, mejorando así su tenacidad en todas las pruebas mecánicas realizadas.

Luna et. al. (2021) [25], en su investigación titulada “Fibras de agave americana tratada con óxido de calcio en la estabilización de suelos arcillosos en la subrasante de pavimentos rígidos en la ciudad de Cusco” se enfocó principalmente en determinar el nivel de efectividad de hebras de Agave Americana tratadas empleando cal para fortalecer la estabilidad del terreno con contenido arcilloso en subrasantes de pavimentos rígidos, aplicando un enfoque metodológico basado en el método científico. Realizaron pruebas de campo y laboratorio, ajustando concentraciones y longitudes de fibra, así como la cantidad de cal. Los resultados mostraron que estas fibras influían positivamente en la cohesión, máxima densidad en estado seco y CBR del suelo, pero no afectaban su permeabilidad. Sin embargo, determinaron que en suelos altamente plásticos la aplicación de fibras tratadas resulta desaconsejable, ya que incrementos en la proporción de fibra reducían el CBR.

Castro et. al. (2021) [26], en su investigación titulada “Influencia de la cáscara y fibra de coco en mezclas asfálticas en caliente” la investigación se centró en evaluar la influencia de residuos de coco (fibras y cáscaras) en las propiedades de mezcla asfálticas a elevadas temperaturas, evaluando sus características para su aplicación como componentes porcentuales en dichas mezclas, esta investigación está realizada con una metodología cuasi experimental. En particular, este trabajo se centra en el coco, un material abundante en Perú, y examina cómo El empleo de cáscara de coco puede optimizar el comportamiento de la fluencia estática y incrementar la capacidad del asfalto para soportar esfuerzos de tracción indirecta, optimizando así su resistencia ante cargas laterales o deformaciones no axiales. Además, se investiga cómo las hebras de coco pueden incrementar a estabilidad, la capacidad de resistencia al deslizamiento y la rigidez de las mezclas asfálticas. Los resultados demostraron que incorporar cáscaras y hebras de coco incrementa sustancialmente las características técnicas del asfalto en estado caliente. Estos materiales naturales contribuyen a fortalecer la estabilidad y potenciar la resistencia al esfuerzo del deslizamiento y la elasticidad. de las mezclas.

Benel (2019) [27], en su investigación titulada “Influencia de la incorporación de fibra de yute en la resistencia mecánica del material de afirmado de la cantera “Bazán” - Cajamarca, 2017” el estudio se enfocó en la estabilización de suelos subóptimos mediante el uso de fibras

naturales, particularmente Corchorus capsularis, aplicando una metodología experimental para optimizar sus propiedades mecánicas y estructurales. Se demostró que la inclusión de fibras de corchorus capsularis, se puede reforzar la resistencia del suelo a fuerzas físicas en la cantera, cumpliendo con los estándares del MTC. Al añadir entre 0.5% y 1% de hebra de corchorus capsularis, los niveles de CBR aumentaron de 92.3% a hasta 113.0%, se concluyó que aumenta significativamente la estabilidad del terreno y proporciona un método eficiente para el reforzamiento de terrenos en proyectos de infraestructura, combinando sostenibilidad y desempeño estructural.

Rosario (2021) [28], en su investigación titulada “Evaluación de la fibra de plátano en las propiedades mecánicas de la subrasante en suelos arcillosos, La Palma, Tumbes-2021” La investigación se centró en evaluar el efecto de las hebras de plátano en la optimización estructural de suelos de fundación, con énfasis en arcillas, cuyo comportamiento geotécnico suele requerir métodos innovadores de estabilización. Utilizando una metodología de tipo aplicada, se extrajeron muestras de terreno en las proximidades de la vía La Palma-Tumbes para ser analizadas en laboratorio. El análisis se basó en metodologías estandarizadas (AASHTO y SUCS), incluyendo la evaluación de la distribución granulométrica, los límites de plasticidad y la humedad óptima para alcanzar la densidad seca máxima. Complementariamente, se ejecutaron ensayos Proctor modificados y pruebas para determinar el índice de capacidad de soporte (CBR), con el fin de cuantificar la capacidad portante del suelo bajo un enfoque cuasiexperimental, sustentado en métodos cuantitativos y explicativos. Los ensayos revelaron que la inclusión de hebras de plátano en proporciones de 0.5%, 1.0% y 1.5% generó un aumento de la resistencia del terreno. En su condición sin tratamiento previo, el CBR a 0.1" fue de 5.5% y 3.6%. Al integrar 0.5% de fibra, los índices de CBR se elevaron a 9.4% y 6.8%. Con un incremento al 1.0%, los valores obtenidos fueron de 8.2% y 4.5%, y al añadir 1.5% de fibra, de 7.6% y 3.8%. Estos datos concluyeron que la estabilización de suelos con tendencia limo-arcillosa es factible mediante el refuerzo de fibra de plátano, lo cual se corroboró mediante ensayos de laboratorio con muestras procedentes del tramo mencionado, logrando así un avance significativo en la estabilización del suelo.

Peñaloza (2022) [29], en su investigación titulada “Adición de Fibra de Ramio para Mejorar la Capacidad de Soporte de la Subrasante en el Diseño del Pavimento Flexible” el propósito central de este estudio fue evaluar la mejora en capacidad portante de bases para pavimentos flexibles mediante el uso de fibra de ramio, esta investigación utilizo una metodología científica. El estudio se enfocó en analizar la eficacia de la fibra de ramio para optimizar la

estabilidad de subrasantes en proyectos viales, sustentado en su capacidad comprobada para mejorar propiedades críticas como la resistencia y durabilidad de capas de soporte. Mediante un método científico y experimental, se examinó un volumen de 1 m³ de suelo no alterado de Huancayo, enriquecido con fibra de Ramio. Los hallazgos mostraron que la fibra de Ramio altera el punto donde el suelo logra su densidad óptima en estado seco, bajo un porcentaje ideal de humedad, y más importante aún, incrementa el valor de CBR, se observó una mejora en la resistencia estructural de la capa de soporte, pero con fluctuaciones del 1.40%, -4.01% y -4.87% respecto al suelo natural, evidenciando que el reforzamiento tiene efectos variables según la composición original del terreno, con una (MDS) de 1.773 g/cm3, en cuanto al caso el porcentaje ideal de agua para la compactación, indicó variaciones en el rango de -0.28%, -0.34% & -1.07%; y finalmente para el caso del CBR el terreno presentó variaciones del 23.53%, 41.98% & 76.47%. En conclusión, la incorporación de hebra de Ramio es útil para fortalecer la estabilidad de la base en la planificación de pavimentos flexibles.

Falem (2023) [30], en su investigación titulada “Estabilización de suelos aplicando yeso reciclado y fibras de yute en un camino carrozable” el estudio buscó caracterizar el efecto de distintas cantidades de fibra de yute. Tuvieron como metodología de tipo aplicada y diseño experimental donde aplicaron las proporciones del yute entre el 0.5% y el 2.0%, así como de yeso reciclado, en un rango del 2.5% al 10%. Mediante pruebas de CBR (California Bearing Ratio), este trabajo empleó métodos cualitativos en su realización, se evaluó la resistencia mecánica de las distintas mezclas. El análisis demostró que la interacción de 7.5% de yeso y 1.5 de hebra de corchorus capsularis, incrementó el valor de CBR en un 173%, alcanzando un 95% de su capacidad. Se llegó a la conclusión que la inclusión de estos materiales no solo mejora de manera notable las características geotécnicas de suelos arcillosos, también constituye un método efectivo para el tratamiento de residuos sólidos.

Bases Legales

Ensayos de Laboratorio

Ensayos físicos

Análisis granulométrico de suelos por tamizado – MTC-E107 [31]**:**

Este análisis determina la distribución granulométrica del suelo mediante tamizado, clasificando las partículas según el tamaño de malla que atraviesan, para su posterior categorización con los sistemas AASHTO & SUCS.

<u>Equipamiento:</u>

- ✓ Horno termorregulado (110±5) °C según normativa ASTM.
- ✓ Instrumento de medición de masa con una exactitud de ±0.01g.

Materiales:

TABLA I
TAMICES PARA ENSAYO GRANULOMÉTRICO

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

Fuente: Extraída de Manual Ensayo de Materiales [31]**.**

Cálculos:

- $Porcentaje\ de\ material\ que\ pasa\ por\ el\ tamiz\ N°\ 200$

$$\%\ que\ pasa\ la\ malla\ N°\ 200 = \frac{Peso_{Total} - Peso_{retenido\ en\ malla\ N°\ 200}}{Peso_{Total}} \times 100$$

- $Porcentaje\ de\ la\ muestra\ que\ se\ mantiene\ en\ cada\ tamiz.\ (\%)$

$$\%\ retenido = \frac{Peso_{retenido\ en\ malla}}{Peso_{Total}} \times 100$$

- $Porcentaje\ de\ material\ que\ pasa\ a\ través\ de\ cada\ malla\ del\ tamiz.\ (\%)$

$$\%\ pasa = 100 - \%\ retenido\ acumulado$$

Medición de humedad en suelos según norma MTC-E108 [31]**:**

La muestra húmeda se seca completamente en un horno regulado a 110 ±5°C, proceso mediante el cual se determina el contenido total de humedad al medir la pérdida de masa post-secado. La

masa de partículas sólidas se establece pesando el residuo seco, mientras que la masa de agua se calcula restando el peso final del inicial. Para garantizar precisión, se emplean balanzas de 0.01g de sensibilidad, hornos de secado, recipientes herméticos y, en algunos casos, un desecador para evitar la absorción de humedad ambiental.

El procedimiento para calcular el porcentaje de humedad comienza midiendo la masa de un envase limpio y previamente secado, junto con su tapa. Inicialmente, se selecciona una muestra representativa del suelo húmedo, la cual se introduce en el envase para registrar su peso total (envase + muestra húmeda). A continuación, el conjunto se somete a un horno calibrado a 110±5°C hasta estabilizar su masa, asegurando la eliminación completa de agua. Finalmente, tras un periodo de enfriamiento controlado, se vuelve a pesar el envase con la muestra seca para determinar la pérdida de humedad.

Equipamiento:

- ✓ Horno termorregulado (110±5) °C según normativa ASTM.
- ✓ Instrumento de medición de masa con una exactitud de ±0.01g.

Materiales:

- ✓ Depósitos o taras que soportan altas temperaturas.

Cálculos:

$$W = \frac{Peso\ de\ H2O}{Peso\ de\ suelo\ despues\ de\ ser\ secado\ en\ el\ horno} \times 100$$

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

Donde:

- $W = Humedad\ relativa\ en\ porcentajes\ (\%)$
- $M_{cws} = Peso\ del\ recipiente\ más\ el\ suelo\ sin\ secar\ (gr)$
- $M_{cs} =$ $Peso\ del\ recipiente\ más\ el\ suelo\ seco\ después\ de\ haber\ pasado\ por\ el\ horno\ (gr)$
- $M_c = Peso\ en\ gramos\ del\ depósito\ (gr)$
- $M_w = Contenido\ de\ agua\ en\ peso\ (gr)$

- $M_s = \ Peso\ de\ fracción\ seca\ del\ suelo\ (gr)$

Análisis Granulométrico por medio de hidrómetro – MTC-E109 [31]**:**

Este ensayo de laboratorio permite determinar la composición granulométrica de la fracción fina del suelo, específicamente el material que atraviesa la malla #200 (<0.075 mm). El análisis de estos componentes es crítico para entender el comportamiento ambiental y textura edáfica, dado que su concentración influye directamente en atributos clave como la retención hídrica, conductividad hidráulica y propensión a la consolidación diferencial.

El peso de muestra requerido para el análisis con hidrómetro varía según la naturaleza del suelo. Para suelos de textura arenosa, se recomienda emplear una masa comprendida entre 75 y 100 gramos, mientras que, para suelos limosos y arcillosos, se emplean entre 50 y 60 gramos

Como primera etapa del proceso, se procede al pesaje exacto de 50 g de muestra previamente secada. A continuación, se deben añadir 10 gramos de hexametafosfato de sodio a dicha muestra. A continuación, el material se introduce en un recipiente de dispersión con 250 ml de agua destilada y se agita durante un periodo de entre 5 y 10 minutos. Finalizada esta etapa, la solución se transfiere a probetas que contienen 1 litro de agua destilada, comenzando así el registro de mediciones en intervalos que van desde 1 hasta 1440 minutos.

Equipamiento:

- ✓ $Tamices\ de\ N°10$
- ✓ $Hidrómetro$
- ✓ $Cronómetro$
- ✓ $Solución\ de\ hexametafosfato\ de\ sodio$
- ✓ $Balanza$
- ✓ $Probetas\ graduadas\ con\ capacidad\ de\ 1\ litro$
- ✓ $Horno\ de\ temperatura\ constante$

Medición del límite líquido en suelos mediante MTC-E110 [31]**:**

El ensayo define la humedad crítica en la cual el suelo pasa de un estado semisólido a líquido bajo condiciones de laboratorio estandarizadas. Para ello, se elabora una mezcla homogénea de suelo con humedad controlada, se coloca en el equipo Casagrande y se aplican impactos normalizados hasta que la muestra fluya. Los materiales y protocolos, como el recipiente de porcelana (115 mm), el dispositivo Casagrande, balanzas de precisión y un horno termorregulado (110±5°C), se especifican en la norma MTC E 110, que garantiza la repetibilidad del método.

El procedimiento comienza con el cribado de la muestra de suelo mediante el tamiz Nº40 (425 µm), seguido de una homogenización con agua destilada y un reposo de 24±1 horas para asegurar su saturación total. Finalizado este período, la mezcla se vierte en la copa Casagrande, donde, empleando un ranurador de acero inoxidable, se realiza un surco de ≤10 mm de profundidad a lo largo del eje longitudinal del recipiente, garantizando precisión en la separación de la muestra. El ensayo consiste en someter la copa Casagrande a impactos continuos de 2.0±0.1 golpes/segundo, interrumpiendo la prueba cuando las mitades del surco entran en contacto a lo largo de 13±1 mm. Según la cantidad de golpes registrados (25-35, 20-30 o 15-25), se extrae una porción de la muestra, se mide su masa (excluyendo el recipiente) y se seca en un horno. Posteriormente, una vez deshidratada, se determina su peso final sin considerar la tara, para calcular el contenido de humedad.

Equipamiento:

- ✓ Horno termorregulado (110±5) °C según normativa ASTM.
- ✓ Instrumento de medición de masa con una exactitud de ±0.01g.
- ✓ Calibrador
- ✓ Copa de Casa grande
- ✓ Acanalador

Materiales:

- ✓ Espátula

Cálculos:

$$LL = W^n \left(\frac{N}{25}\right)^{0.121} \; O \; LL = kW^n$$

Donde:

- $N =$

  $El\ número\ de\ golpes\ requeridos\ para\ cerrar\ la\ ranura\ varía\ según\ el\ contenido\ de\ humed$

- $W^n = Humedad\ del\ suelo$
- $k = Coeficiente\ especificado\ en\ la\ tabla\ A.1\ para\ determinar\ el\ LL$

TABLA II
FACTOR K EMPLEADO EN LA DETERMINACIÓN DEL LÍMITE LÍQUIDO DE SUELOS

N (CANTIDAD DE IMPACTOS)	K (COEFICIENTE PARA EL LÍMITE DE FLUIDEZ)
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

Fuente: Extraída de Manual Ensayo de Materiales [31]**.**

Evaluación del índice de plasticidad y determinación del límite de plasticidad en suelos mediante el estándar MTC-E111 [31]**:**

El límite plástico (LP) representa la humedad mínima necesaria para que un suelo, al ser sometido a la técnica de amasado y enrollado sobre una superficie lisa, pueda moldearse en cilindros de 3.2 mm de diámetro sin desintegrarse. A diferencia del límite líquido, este parámetro se refiere a la menor cantidad de agua que el material es capaz de conservar manteniendo su integridad física. Por otra parte, el índice de plasticidad, el cual evalúa la ductilidad del suelo, se determina restando el límite líquido al plástico [31].

Para el ensayo, se selecciona una porción de 1.5 a 2 gramos de la muestra previamente usada en el límite líquido. El material se amasa manualmente sobre una superficie de vidrio, aplicando

presión uniforme hasta lograr cilindros de 3 mm de grosor. Posteriormente, estos rollos se pesan en estado húmedo, se secan en horno y, tras el secado, se registra su peso nuevamente [31].

Equipamiento:

- ✓ Contenedores para muestras y medición de humedad.
- ✓ Cristal grueso esmerilado para área de trabajo.
- ✓ Malla N° 40

Materiales:

- ✓ Espátula

Cálculos:

$$LP = \frac{Peso_{agua}}{Peso_{suelo\ seco}} \times 100$$

$$IP = LL - LP$$

Donde:

- $LL = Límite\ líquido.$
- $LP = Límite\ plástico$
- $IP = Índice\ de\ plasticidad$

Procedimiento de laboratorio para la compactación de suelos aplicando energía ajustada (método Proctor Modificado), conforme a la norma MTC-E115

Este método de laboratorio evalúa la relación entre la densidad seca del suelo y su humedad, ejecutando la compactación de muestras en moldes de 101.6 mm (4") o 152.4 mm (6") a través de un martillo de 44.5 N (10 lb-f) que cae desde 457 mm (18") de altura. El procedimiento se divide en cinco capas sucesivas, aplicando 25 impactos uniformes por cada una, con el objetivo de determinar cómo influye el contenido de agua en la compactación alcanzada [31].

Muestra: Tras el tamizado, se recogen 16 kg del material que atraviesa el tamiz N°4. Este se segmenta en cuatro lotes equivalentes, ajustando su humedad según parámetros calculados previamente para el ensayo. [31].

Al seleccionar las muestras para humedecerlas, se procura que la cantidad de agua que contenga varíe alrededor de un 2% en cada punto y que no supere el 4%. Luego de humedecerlas, las muestras se dejan en reposo hasta alcanzar la saturación máxima. A continuación, cada muestra es evaluada en su humedad, pesada e introducida al horno para eliminación del agua contenida. Posteriormente, se compacta cada capa, retirando el collar del molde en la última capa y nivelando la superficie del suelo compactado. Posteriormente, se determina el peso del molde con el suelo compactado. Una vez registrado este dato, se extrae el material y se repite la operación con las muestras restantes [31].

Equipamiento:

- ✓ Pisón manual
- ✓ Ensamblaje del molde: cada unidad debe contar con un collar de montaje y una base, asegurando que el collar alcance una altura mínima de 2.0 pulgadas y cumpla con el Tamiz N° 40.
- ✓ Molde de 6 pulgadas, el cual debe ajustarse a los requisitos establecidos en esta norma.

Materiales:

- ✓ Espátula

Cálculos:

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

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

Donde:

- $\rho_m = Densidad\ en\ húmedo\ del\ espécimen\ compactado$

- $M_t = Masa\ del\ prototipo\ húmedo\ y\ molde\ (kg)$
- $M_{md} = Masa\ del\ molde\ de\ compactación\ (kg)$
- $V = Volumen\ del\ molde\ de\ compactación\ (m3)$
- $\rho_d = Densidad\ seca\ del\ prototipo\ compactado\ (\frac{Mg}{m3})$
- $W = Contenido\ de\ agua\ (\%)$

Evaluación de la Relación de Soporte de California (CBR) en suelos sometidos a compactación controlada en laboratorio, mediante el procedimiento establecido en la norma MTC-E132 [31]

Este procedimiento tiene como finalidad determinar la capacidad de carga del suelo en función de su contenido de humedad y grado de compactación, debido a que ambos parámetros influyen directamente en su desempeño mecánico. Con el fin de analizar el comportamiento de las capas de pavimento como subrasante, base, subbase y afirmado, el ensayo se emplea en estos estratos, ya que dichos valores experimentan fluctuaciones según las condiciones de humedad y la energía de compactación aplicada al material. [31].

El primer paso consiste en medir la humedad del suelo secando la muestra en un horno de laboratorio. En la siguiente fase, se procede al montaje del molde con sus componentes, ajustando el contenido hídrico mediante adición dosificada de agua. Se utiliza una muestra de 5000 g para cada nivel de compactación, tomando porciones antes y después de la inmersión. Tras la compactación, el molde se desensambla para quitar el collar y luego se rearma en configuración invertida, empleando papel de filtro como separador. Luego, se aplica una sobrecarga y se sumerge la muestra en anillos para observar la primera expansión, dejándola en agua durante cuatro días. Después de este periodo, se procede a drenar, pesar y efectuar la prueba de penetración con una sobrecarga mínima; se calibran los indicadores y se aplica carga al pistón a una velocidad determinada [31].

Equipamiento:

- ✓ $Separador\ circular\ de\ metal.$
- ✓ $Molde\ cilíndrico\ de\ metálico$
- ✓ $Una\ o\ dos\ pesas\ anulares\ de\ masa\ 4.54\ \pm\ 0.02\ kg$
- ✓ $Pisón\ de\ penetración$
- ✓ $Prensa\ empleada\ para\ la\ penetración\ de\ la\ muestra$

Materiales:

- ✓ *Tamices para finos* ($N°$ 04)

Metodología para la determinación de valores:

Tras registrar los datos de penetración, se elabora un gráfico que relaciona las presiones aplicadas con las penetraciones obtenidas. En caso de que la curva carezca de un punto de inflexión, los valores asociados a 2.54 mm (0.1") y 5.08 mm (0.2") se toman como referencia de manera directa. Por el contrario, si se identifica dicho punto, se realiza un ajuste siguiendo las pautas especificadas en la norma técnica correspondiente.

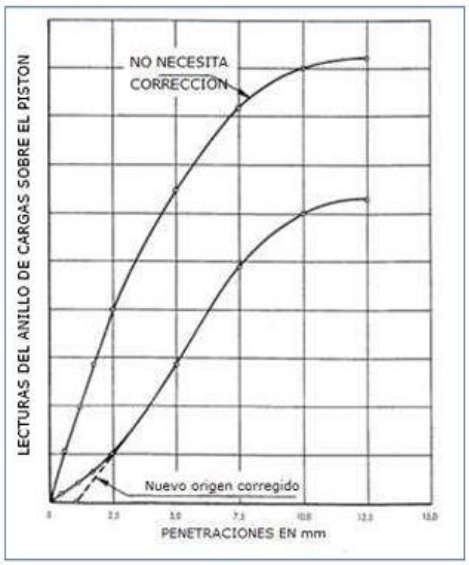


Fig. 1 Gráfico empleado para calcular el índice CBR Fuente: *[31]*.

Ensayo de penómetro dinámico de cono – ASTM D 6951 [32]

El objetivo principal de este procedimiento es evaluar la resistencia en campo de suelos compactados y en estado natural, utilizando un penetrómetro dinámico de cono (DCP) de 8 kg. A través de la velocidad de penetración registrada, se determina el Índice de Soporte California (CBR), además de estimar el espesor de las capas y su resistencia al corte, entre otros parámetros geotécnicos relevantes.

Procedimiento: Se requieren tres operarios: uno sostiene el equipo en posición vertical, otro realiza los golpes con el martillo y el tercero registra las mediciones.

- En primer lugar, se elige el sitio de ensayo y se posiciona el equipo en posición vertical sobre una superficie limpia, libre de piedras u obstáculos que puedan afectar los resultados.
- Luego, se introduce el cono hasta que quede asentado 2" en el suelo, asegurando que esté bien confinado.
- Para cada golpe, se eleva el martillo al extremo del eje y se deja caer por gravedad, sin imprimir impulso externo ni permitir que golpee la estructura superior.
- Para completar el proceso, se documenta en los registros técnicos la profundidad máxima alcanzada antes del rechazo del penetrómetro en cada ubicación evaluada.

Componentes del equipo:

- ✓ *Manija superior para sostener el equipo vertical.*
- ✓ *Masa de* 8 *kg o* 4.6 *kg.*
- ✓ *Varilla superior que permita caída de la masa de* 575 *mm.*
- ✓ *Varilla inferior de penetración de* 900 *a* 1200 *mm de longitud.*
- ✓ *Tope para transmitir el golpe de la masa hacia varilla inferior y punta.*
- ✓ *Punta desechable o fija de* 20 *mm de diámetro y ángulo de* 60°.
- ✓ *Regla graduada en milímetro o pulgadas para medir la penetración.*

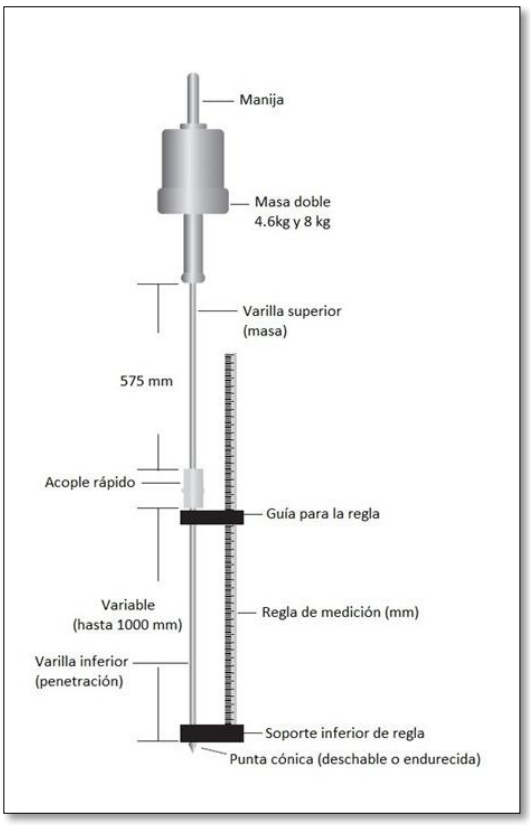


Fig. 2 Componentes del equipo Fuente:*[32]*.

Procedimiento normalizado para la medición de la densidad in situ y el peso unitario del suelo a través del método del cono de arena, conforme a la norma técnica N.T.P. 339.143. La Norma Técnica Peruana NTP 339.143 busca establecer un procedimiento estandarizado que permita medir, mediante el método del cono de arena, tanto la densidad como el peso unitario del suelo en condiciones de campo. Este enfoque facilita la obtención de información precisa sobre las características del material en su estado natural o tras procesos de compactación, factores críticos para garantizar la calidad en obras de ingeniería civil y construcción. Este ensayo prioriza verificar que la compactación del suelo se haya ejecutado de manera adecuada, asegurando que cumpla con los estándares de densidad predefinidos. Para ello, se analiza si el material alcanza los valores requeridos, lo cual es esencial para validar la calidad del proceso de compactación en proyectos geotécnicos. Este proceso es indispensable para cimentaciones, pavimentos y obras de tierra, ya que garantiza su solidez y seguridad estructural a lo largo del tiempo.

Procedimiento

Procedimiento para llevar a cabo la prueba de densidad de campo (sección de ensayo)

El proceso se inicia excavando un hoyo de 0.50 metros, el cual se fracciona en tres estratos: las dos capas superiores de 15 centímetros cada una y una inferior de 20 centímetros.

Posteriormente, cada capa se compacta de manera uniforme, siguiendo los parámetros establecidos para el material en uso. Es fundamental emplear el equipo adecuado para garantizar que la compactación cumpla con las especificaciones requeridas según el método aplicado.

Una vez completada la compactación, se deja reposar la estructura durante 24 horas. Este tiempo de estabilización es necesario para evitar que factores externos, como cambios en la humedad, afecten la densidad alcanzada durante el proceso.

Luego, se procede a medir la densidad de campo para comprobar si se ha logrado alcanzar el nivel adecuado. Se debe perforar un hoyo de 6 pulgadas de ancho por 30 cm de fondo, teniendo especial cuidado durante la excavación para no modificar la compactación de la primera capa del suelo.

Finalmente, se analizan los datos recolectados para determinar si la densidad alcanzada satisface las especificaciones técnicas del proyecto. Este paso es crucial para validar que el material utilizado es apto como estabilizante en el tramo de prueba.

Equipamiento:

- ✓ Compactador manual o mecánico.
- ✓ Pala
- ✓ Barreta
- ✓ Balanza de precisión
- ✓ Recipiente calibrado
- ✓ Cinta métrica
- ✓ Recipientes metálicos
- ✓ Instrumento de cono de arena
- ✓ Arena normalizada

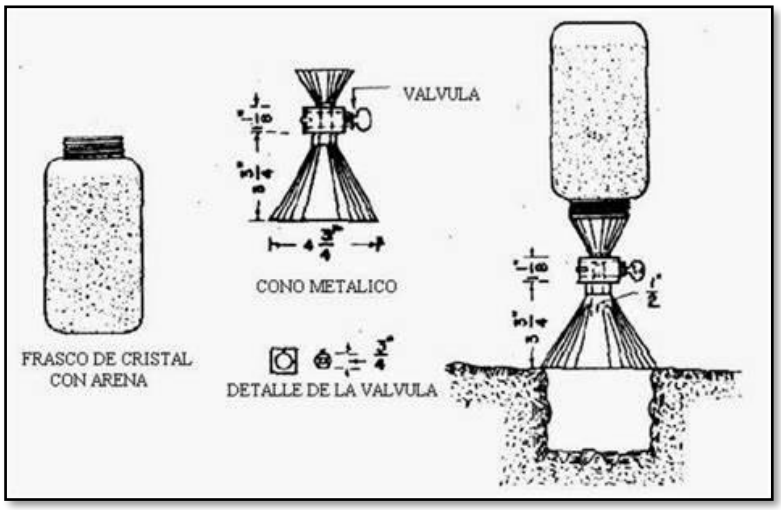


Fig. 3 Componentes del ensayo de cono de arena Fuente: *[31]*.

Pavimentos urbanos N.T.P. CE010

En el marco de la norma CE.010 se definen las exigencias básicas para proteger la integridad de pavimentos en entornos urbanos. La sección 3, en particular, describe los procedimientos técnicos aplicables en evaluaciones de mecánica de suelos para proyectos de pavimentación, así como los ensayos obligatorios, los requisitos de calidad de los materiales y las directrices de supervisión durante la construcción [33].

Manual EG-2013 de Especificaciones Técnicas Básicas para Obras de Construcción

Este documento técnico establece directrices y requisitos para los procesos asociados a la infraestructura vial, con el propósito de asegurar su cumplimiento normativo y calidad constructiva. En particular, el capítulo III detalla los análisis obligatorios para suelos según el método de estabilización utilizado, junto con los criterios técnicos para validar los trabajos ejecutados y garantizar su alineación con los estándares establecidos [34].

Normativa MTC/14 – Sección de geotecnia y pavimentación del Manual de Carreteras

Este manual proporciona directrices fundamentales, tanto técnicas como económicas, para el diseño eficiente de las capas estructurales de pavimentos. En su sección IV, se detallan procedimientos aplicables a la exploración geotécnica del terreno, los cuales incluyen el análisis de la subrasante y las especificaciones mínimas que esta debe satisfacer con el propósito de funcionar como base de apoyo para la estructura. Adicionalmente, el capítulo IX analiza en profundidad los procesos de estabilización de suelos, presentando tanto los criterios de diseño como las diversas alternativas técnicas disponibles para este fin, todo ello orientado a asegurar el adecuado desempeño de la estructura vial [35].

Bases Teóricas

Suelo

De acuerdo con la Comisión Europea, se entiende por suelo la capa superficial del planeta, integrada por materiales orgánicos, partículas minerales y contenido hídrico. Esta definición destaca las características dinámicas del suelo, variables esenciales a considerar al construir infraestructuras. Para la ingeniería civil, el estudio de los suelos es esencial, dado que su naturaleza y comportamiento influyen significativamente en la seguridad y resistencia de las construcciones. En consecuencia, se hace indispensable realizar una evaluación geotécnica completa del suelo como etapa previa a la construcción, lo que constituye un requisito fundamental para la seguridad de las estructuras [36].

Características del suelo

Debido a estas particularidades del suelo, su desempeño varía significativamente en aplicaciones clave como la producción agrícola y la ingeniería estructural. Sus propiedades incluyen, pero no se limitan a: la granulometría, la agregación de partículas, la capacidad de almacenamiento hídrico, la velocidad de infiltración y el peso específico El comportamiento de cada propiedad condiciona directamente la estabilidad de cimentaciones y la viabilidad de actividades humanas en el sitio [36].

La textura, definida por el tamaño de las partículas minerales, es determinante para evaluar la calidad y funcionalidad del suelo en aplicaciones técnicas. Su categorización depende de la concentración relativa de arena, limo y arcilla. Por ejemplo, un suelo con una alta proporción de arcilla tiende a retener más agua y nutrientes, aunque también puede ser más propenso a compactarse [37].

La densidad del suelo afecta cómo se distribuye la vegetación y determina la cantidad de plantas que pueden crecer en él. Los suelos más densos, al tener una mayor capacidad para retener agua y nutrientes, generalmente favorecen el desarrollo de una vegetación más abundante. Esta característica es crucial en la construcción, ya que los suelos más densos proporcionan una base más estable para edificaciones y estructuras [37].

La coloración del suelo está determinada por sus componentes minerales y orgánicos, además de variar en función del contenido hídrico que presente. Esta característica puede brindar

indicadores sobre sus propiedades químicas y su aptitud para favorecer el desarrollo vegetal. Por ejemplo, los suelos con tonalidades oscuras suelen presentar una alta concentración de materia orgánica, mientras que, por el contrario, los tonos claros se asocian a un bajo contenido de esta y de elementos nutritivos esenciales. [37].

Clasificación del suelo

Criterios AASHTO para la clasificación de materiales.

Creado en 1929 bajo la denominación inicial "Clasificación de la Oficina de Caminos Públicos", el sistema AASHTO ha sido actualizado progresivamente, adoptando su versión actual (norma M145) en 1945 gracias al trabajo del Comité de Clasificación de Materiales para Subbases y Caminos Granulares del Consejo de Investigación Vial. Este esquema clasifica los suelos en siete categorías (A-1 a A-7), distinguiendo entre materiales granulares y finos a partir del porcentaje de partículas que logran pasar el tamiz N.º 200. Así, si menos del 35% atraviesa este tamiz, el suelo se categoriza como granular (A-1 a A-3); por el contrario, si el porcentaje excede dicho valor, se clasifica como fino (A-4 a A-7) [38].

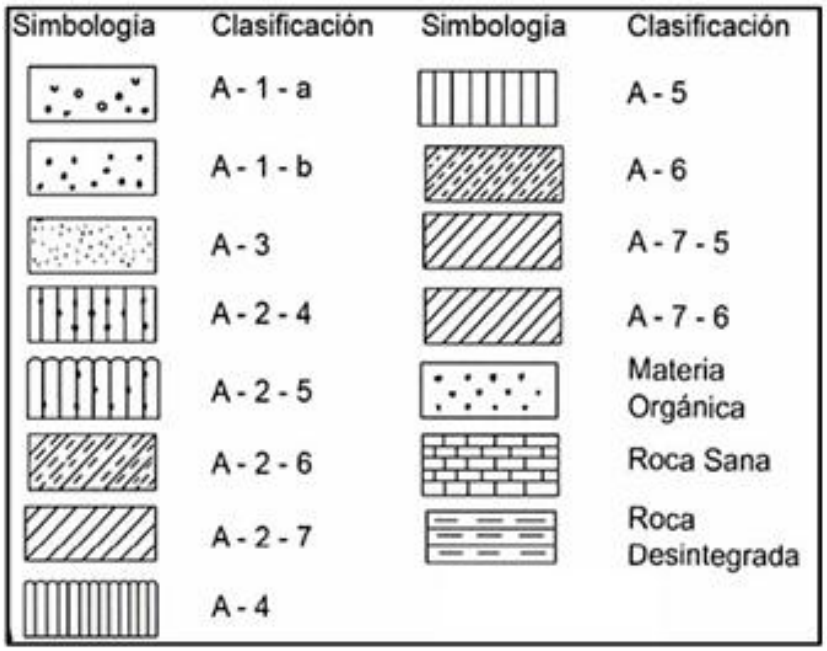


Fig. 4 Símbolos estándar para la representación de perfiles de calicatas. Fuente: *[38]*.

Clasificación de suelos mediante el sistema SUCS, el cual establece parámetros unificados para su categorización técnica.

Este sistema de clasificación de suelos, creado por Casagrande en 1942, surgió con el objetivo de optimizar la edificación de aeródromos durante la Segunda Guerra Mundial. Posteriormente, en 1952, fue sometido a una revisión integral respaldada por la Oficina de Recuperación de Estados Unidos, con el fin de estandarizar su uso, manteniéndose vigente hasta hoy. Bajo este esquema, los suelos se agrupan en dos categorías principales. Al igual que en el sistema AASHTO, si menos del 50% de las partículas atraviesan el tamiz No. 200, el material se designa como grava (G) o arena (S). Por otro lado, si más del 50% supera este tamiz, el suelo se clasifica como limo orgánico (M), arcilla inorgánica (C) o material orgánico limo-arcilloso (O) [35].

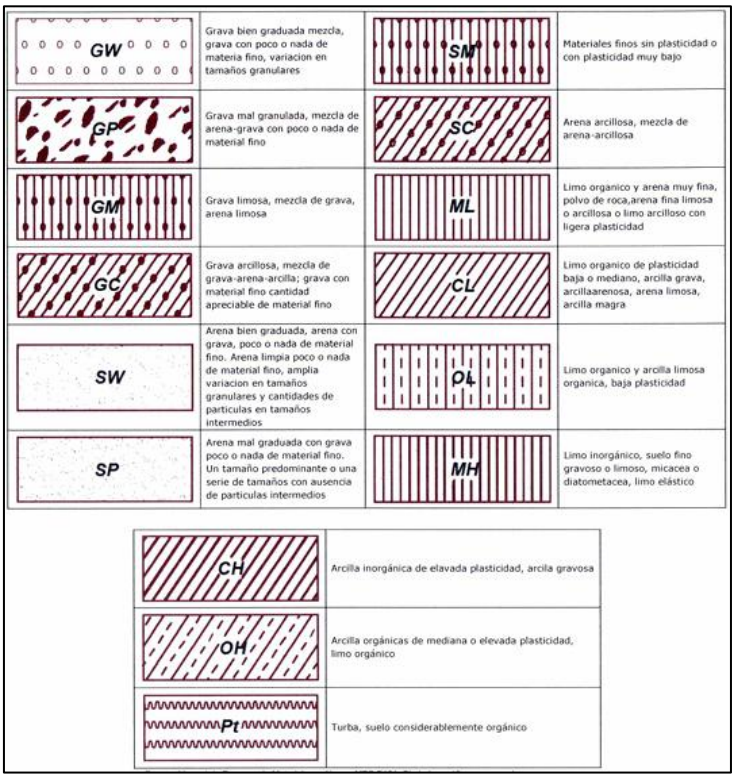


Fig. 5 Simbología convencionales para perfiles de calicatas Fuente: *[35]*.

Suelos Arcillosos

Formados por partículas diminutas de arcilla (menos de 0.02 mm), estos suelos se originan a partir de la degradación de rocas sedimentarias. Estos suelos contienen principalmente minerales como silicatos de aluminio, magnesio y hierro. Entre sus características clave destaca la habilidad de volverse maleables al hidratarse, propiedad que los convierte en materiales óptimos para la fabricación de cerámica y uso en obras civiles [39].

Tipos de Arcillas

La categorización de estos materiales se determina mediante las configuraciones cristalinas que alberga el terreno, ya que estas influyen de manera directa en las características físicas que exhibe la arcilla. Entre estos, los principales elementos minerales constituyentes incluyen:

La illitas, son minerales arcillosos cuya estructura es similar a la de las arcillas montmorillonitas. Sin embargo, tienden a agruparse formando conglomerados, lo cual disminuye su superficie expuesta al agua y reduce su habilidad para expandirse en comparación con las montmorillonitas. Esta propiedad hace que las illitas sean menos expansivas y más estables cuando están en contacto con agua. Son minerales frecuentes en la naturaleza y se encuentran en diversos entornos geológicos [40].

Las caolinitas son minerales arcillosos que presentan una estructura en capas, compuestas por láminas alternas de sílice y alúmina. La unión firme entre estas capas evita que las moléculas de agua puedan penetrarlas, lo cual confiere a esta arcilla una estabilidad considerable en ambientes húmedos. Esta cualidad se deriva de la estructura cristalina propia de la caolinita, que le otorga propiedades distintivas en términos de plasticidad, reducción de volumen y resistencia a fuerzas de compresión [40].

Pertenecientes a la familia de los filosilicatos, las montmorillonitas poseen una disposición en láminas superpuestas, donde una capa central de óxido de aluminio se encuentra flanqueada por dos capas externas de dióxido de silicio. Esta particularidad estructural, caracterizada por enlaces intermoleculares poco resistentes, posibilita la penetración de agua entre sus estratos, provocando la dilatación de la red cristalina, un proceso conocido como hinchamiento [40].

Estabilización De Suelos

Es el procedimiento a través del cual se optimizan las cualidades físicas y también mecánicas de las bases de escasa calidad, como la resistencia, la plasticidad, la densidad y la resistencia del terreno, Con la finalidad de agilizar el proceso constructivo de infraestructuras viales, viviendas y obras de gran escala [41].

Características Físicas

Análisis de la composición granulométrica

Mediante un estudio de laboratorio diseñado para identificar la distribución de los tamaños de las partículas del suelo, se genera la curva granulométrica correspondiente, proceso que constituye la base de la granulometría. Este proceso se inicia con la exploración y perforación hasta alcanzar una capa uniforme de suelo, de la cual se toma una muestra para su análisis. El método más sencillo para esta tarea es el tamizado. No obstante, cuando se trata de arcilla, un material más fino, se prefiere el método de sedimentación debido a las complicaciones que presenta el tamizado. Para identificar rápidamente si un suelo contiene arcilla, se utiliza el tamiz Nº200; si la mayoría de la muestra pasa a través de él, se clasifica como un suelo de partículas finas, como limo o arcilla. [42].

Densidad

La densidad absoluta es una propiedad física que determina el peso total de un material, considerando tanto su masa sólida como los espacios vacíos contenidos en un volumen unitario. Por su parte, la densidad aparente corresponde al peso específico del componente sólido, sin incluir los huecos presentes en dicho volumen [42].

Peso Volumétrico

El peso volumétrico se describe como la carga por unidad de volumen de tierra, expresado en Kg/m^3. La evaluación del suelo debe contemplar el peso volumétrico aparente, definido como la densidad del terreno incluyendo sus huecos y sin humedad, lo cual simplifica la interconexión matemática entre sus propiedades volumétricas y gravimétricas [42].

Plasticidad

La plasticidad es un atributo fundamental de las arcillas, que corresponde a la capacidad del suelo de deformarse hasta un punto específico sin agrietarse [42]. Se evalúa determinando los parámetros críticos de su comportamiento, conocidos como límites de Atterberg, que clasifican su consistencia en cuatro estados distintos:

- Límite Líquido

  El fundamento reside en medir la proporción de agua contenida en el material en relación a su peso seco, lo cual permite identificar el momento exacto de transición entre plasticidad y fluidez.

- Límite Plástico

  Al analizar el vínculo entre la humedad del suelo y su peso seco, este principio establece el límite en el que la muestra evoluciona de un comportamiento semisólido a uno moldeable.

- Límite de Contracción

  Este indicador técnico determina el nivel de humedad presente en una muestra terrosa basándose en el peso de la muestra sin agua. En este contexto, se especifica que aunque disminuya la cantidad de líquido contenido en el material, adicionalmente se establece que su dimensión física permanecerá constante sin experimentar modificaciones volumétricas.

- Índice Plasticidad

  Este indicador técnico establece el rango de contenido acuoso en el cual un material arcilloso logra mantener su plasticidad. Cabe destacar que dicho intervalo se obtiene mediante la resta aritmética entre los valores del límite líquido y el plástico, lo cual se conoce como índice de plasticidad.

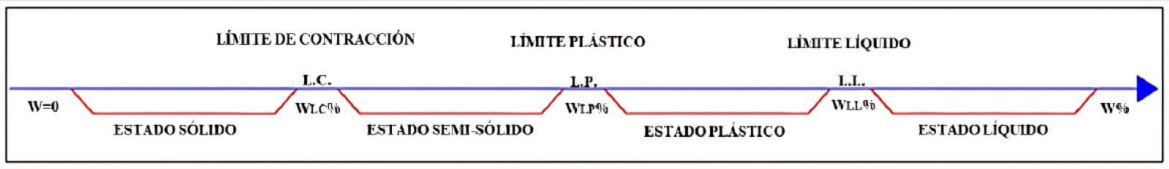


Fig. 6 Límites de Atterberg *Fuente:* [42]

La guía de Carreteras, en su aparato de pavimentos y suelos, establece una categorización de los suelos basada en su (IP). Según esta clasificación, un IP de 20 o superior indica un suelo altamente arcilloso. Un IP que se sitúa entre 7 y 20 señala un suelo moderadamente arcilloso. Si el IP es inferior a 7, se considera que la superficie

tiene poca arcilla. En resumen, un índice de plasticidad (IP) igual a cero indica que el suelo carece de arcilla en su composición. [35].

TABLA III
PARÁMETROS DE ÍNDICE DE PLASTICIDAD

ÍNDICE DE PLASTICIDAD	PLASTICIDAD	CARACTERÍSTICAS
IP > 20	Alta	Suelos muy arcillosos
IP ≤ 20 IP >7	Media	Suelos Arcillosos
IP < 7	Baja	Suelos poco arcillosos
IP = 0	No plástico (NP)	Suelos exentos de arcilla

Fuente: Extraído del Manual de suelos y pavimentos [35].

La tabla III agrupa los materiales terrosos según su índice de plasticidad (IP). En primer lugar, los terrenos con IP superior a 20 se catalogan como altamente plásticos (con predominio de arcilla). Por otra parte, aquellos cuyo IP oscila entre 7 y 20 exhiben una plasticidad media (composición moderadamente arcillosa), mientras que los que registran IP menor a 7 se identifican por su mínima plasticidad (reducida presencia de arcilla). Finalmente, cuando el IP equivale a cero, se definen como no plásticos (totalmente desprovistos de arcilla). Cabe destacar que esta sistematización es fundamental en ingeniería geotécnica para evaluar el comportamiento mecánico de los suelos.

Corchorus Capsularis

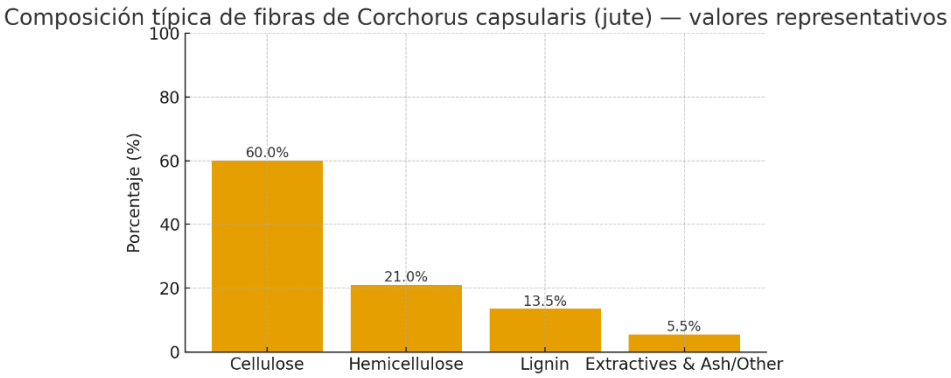
El Corchorus Capsularis es una fibra natural que proviene de la capa interna de ciertas plantas de la familia de las tiliáceas. Este material se comercializa tanto en forma de tejidos como de hilos [43].

Se trata de una fibra natural lignocelulósica que presenta un amplio espectro de aplicaciones en geotextiles, control de erosión y refuerzo ligero de suelos. En los estudios relacionados con la estabilización de subrasantes, se destaca la importancia de ciertos materiales debido a su bajo costo, su disponibilidad en regiones tropicales y su capacidad para mejorar la tenacidad y la resistencia a la tracción de mezclas de suelo. Esta mejora se logra mediante la incorporación de dichos materiales en porcentajes reducidos, generalmente inferiores al 1-2% en peso por peso. Los estudios revisados indican que el jute puede contribuir a la reducción de deformaciones

permanentes, así como a la mejora del índice de compresión California (CBR) y de la resistencia a compresión en mezclas que contienen cal o materiales cementantes[44].

La obtención de la fibra se lleva a cabo mediante un proceso que incluye el retting, el cual implica la descomposición microbiana o química de la pectina que une la fibra al tallo. Este proceso es seguido por las etapas de decorticación, lavado, secado y peinado. El proceso tradicional de water retting tiene una duración que oscila entre 10 y 30 días. Sin embargo, se han desarrollado métodos acelerados, que incluyen enfoques enzimáticos, químicos o mecánicos, los cuales no solo reducen el tiempo de tratamiento, sino que también disminuyen la contaminación y favorecen una mayor uniformidad en la fibra obtenida. La calidad del proceso de retting influye de manera significativa en la resistencia mecánica de la fibra. Un proceso de retting inadecuado resulta en la obtención de fibras cortas y con propiedades mecánicas reducidas[45]

Las fibras de Corchorus capsularis presentan una composición predominantemente lignocelulósica, con un contenido de celulosa que oscila entre el 58% y el 63%, hemicelulosa entre el 20% y el 22%, y lignina que varía del 12% al 15%. El porcentaje restante corresponde a extractivos y cenizas, los cuales se encuentran en proporciones menores. Las proporciones mencionadas presentan variaciones en función de la variedad, las condiciones de cultivo y el tratamiento poscosecha. No obstante, estas proporciones constituyen una guía operativa para comprender el comportamiento mecánico y la reactividad con aditivos[46].



Gráifco 1. Composición química de corchorus capsularis

Propiedades Mecánicas

Estabilidad Volumétrica: Es la propiedad a la que se hace referencia es común en las arcillas y se manifiesta a través de los períodos de aumento y disminución provocados por variaciones en los niveles de humedad. Estos cambios pueden aumentar la presión sobre las estructuras de

pavimento, provocando deformaciones y fisuras. Por esta razón, es esencial realizar investigaciones para reconocer y describir estas tierras arcillosas. Una práctica habitual consiste en modificar la arcilla para lograr una textura granular o compactarla, con el fin de mejorar su estabilidad estructural. [47] .

Peso específico seco máximo alcanzable: Corresponde al valor máximo de densidad seca alcanzable en suelos cuando estos son sometidos a procesos de compactación bajo un porcentaje de humedad ideal [48].

Humedad óptima (contenido de agua óptimo, OMC): Corresponde al porcentaje de agua en el suelo que, al compactarse con una energía específica, permite alcanzar su densidad seca máxima. Este valor también define el contenido de agua ideal para lograr una compactación eficiente del material. [48].

Índice de California Bearing Ratio: Se define como un parámetro porcentual que vincula la presión requerida para penetrar un suelo compactado dentro de un molde cilíndrico de acero, empleando un pistón de 550 mm de diámetro que se desplaza a una velocidad constante de 1,27 mm/min. Este método permite medir deformaciones de hasta 12,7 mm, comparándolas con deformaciones obtenidas en condiciones similares sobre un material triturado, al cual se le asigna un valor de referencia del 100% [20]. El material térreo se categoriza según los criterios establecidos para subrasante, con base en el índice CBR determinado previamente, tal como se detalla en los cuadros adjuntos:

TABLA IV
Clasificación de la base estructural inferior según su capacidad de soporte 1

Grupos de subrasante según sus características	CBR
S0: Suelo de apoyo ineficiente	CBR < 3%
S1: Suelo de apoyo Insuficiente	CBR ≥ 3% A CBR < 6%
S2: Suelo de apoyo Regular	CBR ≥ 6% A CBR < 10%
S3: Suelo de apoyo Buena	CBR ≥ 10% A CBR < 20%
S4: Suelo de apoyo Muy Buena	CBR ≥ 20% A CBR < 30%
S5: Suelo de apoyo Excelente	CBR ≥ 30%

Fuente: Extraído del Manual de suelos y pavimentos [35].

Clasificación de la base estructural inferior según su capacidad de soporte 2

Grupos de subrasante según sus características	CBR
Suelo de apoyo Pobre	CBR ≤ 3%
Suelo de apoyo Regular	3% < CBR < 8%
Suelo de apoyo Buena	8% < CBR < 17%
Suelo de apoyo Excelente	CBR ≥ 17%

Fuente: Extraído del Manual de suelos y pavimentos [35].

La tabla categoriza las capas de subrasante según su índice CBR, parámetro que cuantifica la resistencia estructural de un suelo. La clasificación inicia en S0 (No apta) con CBR < 3% y culmina en S5 (Excelente) con CBR ≥ 30%. Progresivamente, conforme incrementa el CBR, el suelo se clasifica en S1 (Baja resistencia), S2 (Media), S3 (Alta) y S4 (Muy alta), reflejando una mayor capacidad para soportar cargas. Este sistema es esencial en ingeniería civil para seleccionar suelos adecuados en proyectos de carreteras, pavimentos o terraplenes.

Subrasante

De acuerdo con [35], la capa que se dispone en el nivel de movimiento de tierras (actividades de excavación o relleno), denominada técnicamente subrasante, constituye el soporte principal para la configuración de un pavimento. En cuanto a sus características, esta debe satisfacer requisitos técnicos definidos en geotecnia, específicamente se requiere compactar los 30 centímetros superficiales del terreno hasta obtener el 95% de su densidad seca óptima. Dicho parámetro se evalúa mediante el método Proctor modificado, de acuerdo con lo estipulado en la norma ASTM D1557. Además, existen clasificaciones de subrasante definidas por el Manual y NTP CE.010: Pavimentos Urbanos, las cuales establecen criterios para la idoneidad del material en proyectos de infraestructura urbana:

Las subrasantes deben cumplir con ciertas características que aseguren tanto el buen desempeño de las vías como su durabilidad:

- **Estabilidad**: Para garantizar la estabilidad de las vías y prevenir daños estructurales, resulta fundamental realizar una evaluación rigurosa de las características del terreno, así como aplicar técnicas especializadas de tratamiento ajustadas a las normativas de construcción actuales. [49].
- **Composición**: Deben incorporar distintos tipos de agregados granulares, los cuales serán sujetos a ensayos especializados para determinar sus características técnicas y

garantizar que se ajusten a las especificaciones técnicas establecidas en las normativas viales vigentes [49].

- **Capacidad portante:** Establece la capacidad portante requerida que debe garantizar la subrasante, evaluada mediante el ensayo de California Bearing Ratio, para asegurar un desempeño óptimo del pavimento. Adicionalmente, dicha resistencia debe cumplir con los valores mínimos establecidos en las regulaciones técnicas vigentes. [49].

Penetración dinámica:

Esta propiedad se mide mediante impactos aplicados sobre el terreno natural o en suelos de fundación con ligera cementación. El procedimiento utilizado corresponde al ensayo DPC, el cual determina la capacidad estructural del suelo de cimentación en su estado natural, sin modificaciones previas [50].

Optimización de las propiedades técnicas del suelo para garantizar su estabilidad.

De acuerdo con lo establecido en el MTC 2014 (Cap. IX), el proceso de mejoramiento de las propiedades físicas y mecánicas del suelo mediante técnicas especializadas para garantizar su estabilidad en obras civiles consiste en un método técnico que optimiza las características geotécnicas del terreno mediante la aplicación de técnicas mecánicas y la incorporación de agentes químicos de origen natural o sintético. También se pueden emplear otros métodos, como agregar materiales estabilizadores o reemplazar el suelo [16]. La estabilización busca, en esencia, reducir la flexibilidad, fortalecer el suelo, optimizar su manejabilidad y aumentar su estabilidad volumétrica [51].

Tipos de estabilización

Mejoramiento físico del suelo:

Integración de materiales térreos: Como método de consolidación, este procedimiento consiste en incorporar áridos calibrados al terreno presente. Primeramente, se procede a excavar y triturar el suelo natural hasta alcanzar al menos 15 cm de profundidad. Posteriormente, la mezcla se uniformiza mediante procesos de agitación y se somete a compactación, garantizando así dos criterios esenciales: alcanzar la máxima compacidad en estado seco requerida y estabilizar la rasante base conforme a las normativas técnicas vigentes [35].

Refuerzo de terrenos por reemplazo: Este enfoque se ejecuta bajo dos alternativas. Inicialmente, se distribuye una capa de áridos de granulometría controlada sobre el suelo nativo, tras realizar su pulverización y densificación hasta superar los 15 cm de profundidad requeridos. Por otro lado, la segunda opción requiere una sustitución completa del material original por otros con

propiedades superiores, proceso que inicia con la extracción del suelo actual hasta alcanzar la profundidad definida en los planos del proyecto [35].

Mejoramiento mecánico del suelo:

Este método preserva la integridad estructural y química del suelo. Su mecanismo de acción se centra en la densificación del terreno mediante equipos especializados, con el propósito de disminuir la porosidad existente entre partículas. Como resultado, al reducirse los espacios intersticiales, se eleva la masa volumétrica del suelo, potenciando su firmeza y resistencia estructural sin introducir modificaciones en su naturaleza original [35].

Estabilización térmica:

Este método de estabilización térmica consiste en someter las arcillas a un calentamiento controlado entre 200 °C y 400 °C, con el fin de eliminar su capacidad de rehidratación. Al desactivar la propiedad higroscópica de las arcillas (absorción de agua), se incrementa drásticamente su resistencia mecánica. Pese a su uso en países como Rumania y Rusia, la técnica presenta limitaciones tecnológicas que restringen su aplicación a profundidades superficiales, típicamente menores a dos metros [52].

Mejoramiento químico del suelo:

Este procedimiento busca potenciar las propiedades del suelo a través de procesos fisicoquímicos, específicamente mediante interacciones iónicas y la generación de ligantes cohesivos entre los componentes térreos y los agentes estabilizadores. Como efecto directo, se logra incrementar la fortaleza estructural del material, optimizar su manipulación durante la ejecución y asegurar una consistencia volumétrica estable, todo ello sin comprometer la integridad base del terreno. Los suelos limo-arcillosos son especialmente aptos para este tratamiento, ya que muestran una respuesta notable a estas modificaciones fisicoquímicas [53].

Hebra de yute:

La hebra de yute procede de una planta homónima, clasificada como herbácea de crecimiento anual, la cual se cultiva especialmente en zonas de clima tropical. Su versatilidad permite su uso en la fabricación de tejidos de diferentes densidades, desde materiales compactos hasta ligeros. Es un material biodegradable y ecológico, al igual que la fibra de coco, y se posiciona como una opción sostenible para reemplazar fibras artificiales [54]. La hebra de yute es reconocida como una de las hebras naturales más económicas, gracias a sus costos reducidos de producción y disponibilidad extendida, particularmente en regiones como India y Bangladesh. Asimismo, recibe el apodo de "fibra dorada" tanto por su tono dorado natural como por su relevancia socioeconómica en dichas zonas. Este material es empleado de manera

extensiva en la fabricación de sacos industriales, alfombras y textiles diversos, destacándose por su resistencia estructural y adaptabilidad, lo que ofrece una relación óptima entre economía y rendimiento [55].

TABLA V
TABLA DE PROPIEDADES DE FIBRA DE CORCHORUS CAPSULARIS

Propiedad	Hebras de Corchorus Capsularis
Composición química	Celulosa: 60-64%
	Hemicelulosa: 20-24%
	Lignina: 12-15%
Densidad	Aproximadamente 1.5 g/cm^3
Punto de fusión	No aplica (se degrada antes de fundirse)
Resistencia a la flexión	350-500 MPa (varía según la calidad de la fibra)
Alargamiento	Aproximadamente 1.5-1.8%
Conductividad térmica	0.04-0.05 W/m·K
Adsorción de humedad	Alrededor del 12-14% (presenta una elevada capacidad de absorción de humedad).
Estabilidad dimensional	Moderadamente estable (puede experimentar variaciones menores en respuesta a cambios de humedad).
Degradabilidad/biodegradabilidad	Biodegradable en un plazo de 1 a 2 años.
PH	Neutro o ligeramente ácido

Fuente: Extraído del Evaluación de las propiedades físico mecánicas en adobes empleando fibra seca de retama y fibra de yute [55].

La composición química de la fibra de yute (Corchorus capsularis) incluye principalmente celulosa (60-64%), acompañada de hemicelulosa (20-24%) y lignina (12-15%). Además, esta fibra posee una densidad aproximada de 1.5 g/cm³, mientras que su capacidad para resistir fuerzas de flexión oscila entre 350 y 500 MPa, variando en función de las características específicas del material. Además, exhibe un alargamiento bajo carga de 1.5-1.8% y una conductividad térmica en el rango de 0.04-0.05 W/m·K. Su adsorción de humedad es de 12-14%, y es relativamente estable dimensionalmente, aunque sensible a la humedad. Además, es biodegradable en 1-2 años y tiene un pH neutro o ligeramente ácido.

Permeabilidad

La permeabilidad, característica del suelo, facilita la circulación de agua debido a la disposición de sus partículas y poros. En suelos arcillosos, esta característica puede ocasionar problemas como la reducción de la presión entre partículas en un medio y el movimiento del agua en el subsuelo, lo que puede provocar deslizamientos y erosión interna, dañando las capas superiores del pavimento. Por ello, es crucial compactar el suelo con un nivel óptimo de humedad para atenuar los lugares vacíos y, consecuentemente, la permeabilidad del suelo [47].

Resistencia

La resistencia del suelo es una capacidad que le posibilita resistir fuerzas externas y está determinada por el grado de humedad y la energía empleada en su compactación. Cuando estos elementos alcanzan su punto óptimo, resulta en la mayor densidad seca posible, otorgando al suelo propiedades elásticas y una resistencia superior. Por el contrario, si la compactación se realiza con exceso de humedad, se produce una densidad seca menor, lo que lleva a un conducta más plástica y viscosa con resistencias reducidas. Esto se debe a que el agua entre las partículas de arcilla provoca repulsión, afectando la cohesión del suelo de manera proporcional a la porción de agua presente [47].

Definición de térmicos básicos

- ✓ **Suelo expansivo:** Terreno que experimenta expansión o contracción, lo que puede comprometer la estabilidad de las edificaciones construidas sobre él [35].
- ✓ **Plasticidad:** Es la propiedad del suelo que le otorga estabilidad, aunque dicha estabilidad está condicionada por un nivel específico de humedad [35].
- ✓ **Estabilización de suelos**: Esta técnica, dirigida a incrementar la estabilidad del suelo, utiliza métodos físicos o químicos para mejorar sus propiedades físico-mecánicas sin alterar su estado natural. [33].
- ✓ **Pavimento**: Conjunto de capas dispuestas sobre un terreno previamente acondicionado, diseñado para soportar su peso durante un tiempo de servicio determinado [33].
- ✓ **Subrasante:** Corresponde a la capa base preparada del terreno, ya sea en zonas de corte o terraplén, sobre la cual se construye la base del pavimento. [35].

Materiales Y Métodos

Enfoque y Metodología de Investigación

Según [56], la indagación actual se ajusta a la tipología que se describe a continuación.

- DE ACUERDO CON SU FINALIDAD

  Investigación Aplicada: Este estudio de tesis se enfoca en la implementación de los fundamentos ya conocidos en la ingeniería de pavimentos se encarga de superar los obstáculos asociados con las capas inferiores de los pavimentos de suelo arcilloso, sin buscar el desarrollo de teorías novedosas.

- DE ACUERDO LOS DATOS ANALIZADOS

  Investigación Cuantitativa: Basado en información cuantificable recolectada a través de pruebas experimentales controladas, este método busca evaluar de manera rigurosa las modificaciones en los atributos mecánicos y físicos presentes en las capas de subrasante analizadas, lo cual permite establecer parámetros precisos.

- SEGÚN EL ENFOQUE METODOLÓFICO PARA VERIFICAR LA HIPÓTESIS

  Investigación Experimental: Este estudio analiza de manera sistemática el impacto resultante de incorporar Corchorus capsularis en las propiedades mecánicas y físicas de suelos arcillosos. Para ello, la validación de la hipótesis se realizará mediante la evaluación de los resultados obtenidos en ensayos de laboratorio controlados.

- DE ACUERDO NIVEL DE INVESTIGACIÓN

  Según lo señalado por [56], esta investigación se categoriza como correlacional debido a que busca examinar la relación entre las variables analizadas, basándose en datos recolectados durante experimentos de laboratorio y considerando el grado de profundidad del objeto de estudio.

Diseño De Investigación

Es una metodología basada en experimentación y, por ende, se pretende examinar en cada prueba de laboratorio cómo la adición del corchorus capsularis afecta las propiedades físico-mecánicas de los terrenos arcillosos.

Población Y Muestra

Población

En esta tesis, se analiza como población de interés a todas las capas subrasantes arcillosas que se encuentran a lo largo de la calle La Despensa, en JLO.

Muestra

El área de estudio comprende subrasantes arcillosas en el tramo de la calle La Despensa (Av. Eufemio Lora y Lora – mercado La Despensa). Para asegurar que las determinaciones de propiedades físico-mecánicas sean representativas y permitan la realización de todos los ensayos previstos (granulometría, límites de Atterberg, Proctor, CBR remojado y sin remojo, compresión simple, permeabilidad, ensayos de durabilidad y réplicas estadísticas), en cada calicata se extraerán 450 kg de material inalterado.

Esta cantidad se justifica porque la normativa y guías técnicas peruanas exigen disponer de muestras suficientes para preparar múltiples especímenes, efectuar cuarteo y conservación (muestras de trabajo y reservas) y posibilitar ensayos repetidos o adicionales en caso de variabilidad o retrabajo, tal como se recomienda en el Manual de Ensayos del MTC (MTC E guías de muestreo y cuarteo) y en la NTP sobre preservación y transporte de muestras de suelos (NTP 339.151).

Además, estudios y prácticas de campo en investigaciones peruanas de estabilización de subrasantes emplean rangos similares (300–500 kg por calicata, por lo que 450 kg constituye un valor conservador que garantiza representatividad, material de reserva y cumplimiento de protocolos de ensayo.

Muestreo de investigación

El estudio empleó un muestreo no probabilístico por conveniencia, basado en la experiencia del investigador. Se ejecutarán tres calicatas en zonas de estratigrafía homogénea, siguiendo la Norma Peruana CE.010. A las muestras se añadirá fibra de Corchorus capsularis (0.5%, 1.5%, 2.5%, 3.5%) para evaluar su efecto en el suelo arcilloso. La metodología, no aleatoria, prioriza la selección intencional de puntos. Se detallarán: i) número de calicatas, ii) porcentajes de fibra y iii) ensayos programados. Factores considerados para determinar las proporciones de incorporación de fibra de Corchorus capsularis y la cantidad de calicatas requeridas:

La cantidad y profundidad de las calicatas se apoyó en la Tabla VII.

TABLA VI
CRITERIO PARA DETERMINAR EL NÚMERO Y LA PROFUNDIDAD DE LAS CALICATAS

Investigaciones previas	Número de calicatas
Enhancing mechanical behavior of micaceous soil with jute fibers and lime additives	Cinco calicatas de 1.5 m de profundidad fueron realizadas.
Influence of Jute Fibre on CBR Value of Expansive Soil	Tres calicatas de 1.5 m de profundidad fueron realizadas.
Enhancement of Bearing Properties of Black Cotton Soil by Optimal Blending Of Jute and Coir Fibres as a Reinforcement	Cuatro calicatas de 1.5 m de profundidad fueron realizadas.
Análisis del desempeño mecánico de una mezcla asfáltica modificada con fibra de bambú	Cuatro calicatas de 1.5 m de profundidad fueron realizadas.
Mejoramiento de las propiedades mecánicas de los suelos finos mediante la adición de residuos sólidos provenientes de fibras vegetales	Tres calicatas de 1.5 m de profundidad fueron realizadas.
Optimization of a reinforced geopolymer composite using natural fibers and construction wastes	Cinco calicatas de 1.5 m de profundidad fueron realizadas.
Fibras de agave americana tratada con óxido de calcio en la estabilización de suelos arcillosos en la subrasante de pavimentos rígidos en la ciudad de Cusco	Tres calicatas de 1.5 m de profundidad fueron realizadas.
Influencia de la cáscara y fibra de coco en mezclas asfálticas en caliente	Cinco calicatas de 1.5 m de profundidad fueron realizadas.
Influencia de la incorporación de fibra de yute en la resistencia mecánica del material de afirmado de la cantera “Bazán” - Cajamarca, 2017	Cuatro calicatas de 1.5 m de profundidad fueron realizadas.
Evaluación de la fibra de plátano en las propiedades mecánicas de la subrasante en suelos arcillosos, La Palma, Tumbes-2021	Dos calicatas de 1.5 m de profundidad fueron realizadas.
Fibra de Ramio para Mejorar la Capacidad de Soporte de la Subrasante en el Diseño del Pavimento Flexible	Cuatro calicatas de 1.5 m de profundidad fueron realizadas.
Estabilización de suelos aplicando yeso reciclado y fibras de yute en un camino carrozable	Cinco calicatas de 1.5 m de profundidad fueron realizadas.

Fuente: Propia.

La ejecución de cinco calicatas, respaldada por los datos de la TABLA VII, permitió caracterizar con precisión las propiedades del suelo en el área de estudio. La profundidad de 1.5 metros fue determinante, ya que en este intervalo se manifiestan atributos críticos de las arcillas expansivas, como su capacidad de hinchamiento y contracción. Asimismo, el criterio para definir los porcentajes de fibra estabilizante se estableció a partir de una revisión bibliográfica preliminar y la consulta con expertos en la materia.

TABLA VII

SELECCIÓN DE PORCENTAJES DE FIBRA.

Investigaciones previas	**Recomendaciones**	**% Óptimo**
Enhancing mechanical behavior of micaceous soil with jute fibers and lime additives	Con porcentajes de 0,5%; 1%; 1,5% se recomendó evaluar qué resultados se pueden obtener si solo se evalúa el suelo con un tipo de fibra, esto podría mejorar o disminuir su resistencia.	0.5%
Influence of Jute Fibre on CBR Value of Expansive Soil	Porcentajes de 0,25%; 0,5%; 0,75%; 1%; 1,25%; 1,50%; recomienda estudiar los porcentajes de adición en áreas de estudios diferentes en porcentajes similares para verificar que comportamiento tienen a otro tipo de suelo.	1.5%
Enhancement of Bearing Properties of Black Cotton Soil by Optimal Blending Of Jute and Coir Fibres as a Reinforcement	Evaluando los porcentajes 0.5%, 1.0%, 1.5% y 2.0%; recomendó implementar el suelo estabilizado con fibras en áreas con suelos débiles o expansivos, donde el costo y la dificultad de reemplazar el suelo serían elevados.	1.5%
Análisis del desempeño mecánico de una mezcla asfáltica modificada con fibra de bambú	La investigación evaluó los porcentajes: 0,5%; 1% y 2%; recomendó evaluar otros tipos de fibra con los mismos porcentajes.	0.5%
Mejoramiento de las propiedades mecánicas de los suelos finos mediante la adición de residuos sólidos provenientes de fibras vegetales	Porcentajes de 0.5%; 1%; 1.5%; 2% profundizar en las investigaciones sobre tipos de fibras y su influencia en el mejoramiento de suelos finos.	1.5% & 2.0%
Optimization of a reinforced geopolymer composite using natural fibers and construction wastes	Se analizaron concentraciones del 0.5%, 1.0%, 1.5% y 2.0%, y se recomienda ampliar estudios sobre la durabilidad y el comportamiento de estos materiales ante	2.0%

	variaciones climáticas y cargas mecánicas, especialmente en proyectos de infraestructura y construcción.	
Fibras de agave americana tratada con óxido de calcio en la estabilización de suelos arcillosos en la subrasante de pavimentos rígidos en la ciudad de Cusco	El estudio analizó proporciones del 0%, 2%, 6% y 15%, y recomendó tratar químicamente con óxido de calcio (cal viva) otras variedades de fibra para su aplicación en procesos de estabilización.	2.0%
Influencia de la cáscara y fibra de coco en mezclas asfálticas en caliente	Los porcentajes: 0.50%, 0.80%, 1.00%, 1.50%, 2.50%, y 3.50%, Se recomienda el proceso en seco para incorporar las fibras, mezclándolas con el agregado antes de añadir el asfalto, ya que es más sencillo y asegura una distribución uniforme de la fibra	3.5%
Influencia de la incorporación de fibra de yute en la resistencia mecánica del material de afirmado de la cantera "Bazán" - Cajamarca, 2017	El estudio utiliza porcentajes de fibra de yute de 0.5%, 0.75% y 1%. Se aconseja realizar estudios de laboratorio y de campo adicionales para explorar mejor el uso de fibras naturales en condiciones variables y asegurar la durabilidad del reforzamiento en distintas aplicaciones	0.5%
Evaluación de la fibra de plátano en las propiedades mecánicas de la subrasante en suelos arcillosos, La Palma, Tumbes-2021	Se analizaron proporciones del 0.5%, 1% y 1.5%. Se recomienda ampliar investigaciones utilizando porcentajes de fibra superiores a los evaluados, con el objetivo de determinar si estos incrementan la densidad seca máxima y disminuyen la humedad óptima del material.	1.0%
Fibra de Ramio para Mejorar la Capacidad de Soporte de la Subrasante en el Diseño del Pavimento Flexible	El estudio empleó diversos porcentajes de fibra de ramio, concretamente 0.3%, 0.5% y 0.9%. Se aconseja continuar investigando el uso de la fibra en otras capas como bases y subbases granulares	0.5%
Estabilización de suelos aplicando yeso reciclado y fibras de yute en un camino carrozable	Se estudió los porcentajes 0.5%, 1.0%, 1.5% y 2.5%. Emplear esta técnica en caminos de bajo tráfico como una opción económica y sostenible para mejorar las condiciones de tránsito, promoviendo además el uso de materiales reciclados.	1.5%

Fuente: Propia.

Según la TABLA VIII, se establecieron cuatro porcentajes de sustitución del estabilizante (fibra de Corchorus capsularis): 0.5%, 1.5%, 2.5% y 3.5%, calculados en relación al peso del material base. Con el propósito de analizar con mayor detalle el impacto inicial de esta fibra, se optó por comenzar con el 0.5%, enfocándose en su interacción con arcillas altamente plásticas presentes en el área de estudio.

Mediante la inclusión de estos valores porcentuales, se podrá evaluar de qué manera la fibra de Corchorus capsularis incide en la estabilización de terrenos arcillosos, lo que favorecerá la optimización de su resistencia estructural, así como la disminución de su plasticidad. A su vez, este enfoque permitirá determinar la proporción más eficiente que brinde las características más idóneas para su aplicación como base en proyectos de infraestructura, con el objetivo de asegurar la perdurabilidad y el equilibrio mecánico de las edificaciones en el área estudiada. De este modo, se establecerán parámetros técnicos que equilibren rendimiento y sostenibilidad en contextos geotécnicos desafiantes.

TABLA VIII
NÚMERO DE PUNTOS DE EXPLORACIÓN SEGÚN CE.010

CLASIFICACIÓN VIAL POR DISEÑO	N° DE PUNTOS DE EXPLORACIÓN	ÁREA (M2)
Expresas	1 cada	2000
Arteriales	1 cada	2400
Colectora	1 cada	3000
Locales	1 cada	3600

Fuente: Extraído de Pavimentoos Urbanos CE.10 [33]

La tabla muestra la relación entre el tipo de vía y la cantidad de puntos de exploración necesarios, así como el área correspondiente a cada tipo de vía. Las expresas requieren 1 punto de exploración cada 2000 m², las arteriales cada 2400 m², las colectoras cada 3000 m², y las locales cada 3600 m².

Según las normativas viales urbanas de Chiclayo, la calle La Despensa se clasifica como parte de la red local, cuya función principal es interconectar zonas residenciales, comerciales y de servicios urbanos, favoreciendo la circulación interna de la ciudad, a pesar de presentar un tránsito moderado, inferior al registrado en vías de mayor jerarquía, como avenidas principales o colectoras. Para cuantificar su extensión, mediante herramientas SIG (Google Earth) y la función «polígono», se estimó un área de 17,261 m² en el tramo comprendido entre la Av.

Eufemio Lora y el mercado La Despensa. Esta demarcación territorial constituye el fundamento técnico para los estudios y diseños asociados al proyecto.

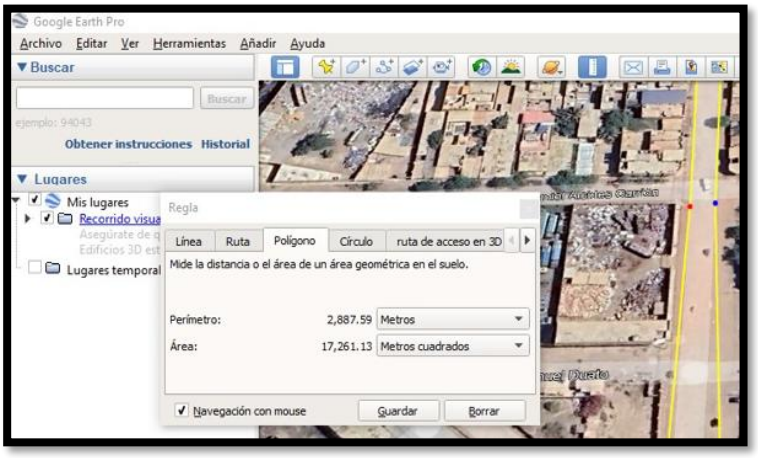


Fig. 7 Espacio geográfico bajo evaluación Fuente: Propia

Imagen que muestra la delimitación geográfica de la zona de estudio, elaborada mediante el uso de la plataforma Google Earth.

Tomando como base la tipología vial del sector analizado y la superficie total estimada (17,300 m²), se estableció el número requerido de puntos mediante la ecuación 17,300 m² ÷ 3,600 m² = 4.80 → 5 unidades. Este resultado fundamenta la ejecución de 5 excavaciones estratigráficas, distribuidas estratégicamente para asegurar una recolección eficiente de muestras y un análisis detallado de las propiedades del terreno. Para ello, las calicatas se realizarán a una profundidad de 1.50 m, con el fin de extraer material representativo de la subrasante y validar las condiciones geotécnicas del suelo. Adicionalmente, se incorporarán fibras de Corchorus capsularis al suelo natural en ensayos controlados, con el objetivo de validar la hipótesis y analizar el efecto estabilizador en las propiedades geotécnicas del material.

TABLA IX
CANTIDAD DE ENSAYOS EN LABORATORIO

NÚMERO DE MUESTAS Y ENSAYOS									
	GRANULOMETRÍA	SALES SOLUBLES	CONTENIDO DE HUMEDAD	LL	LP	CONT. DE SULFATOS	CONT. DE CLORUROS	PROCTOR	CBR
C-1	3	3	3	3	3	3	3	3	3
C-1 + 0,5% FCC	-	-	3	3	3	3	3	3	3
C-1 + 1,5% FCC	-	-	3	3	3	3	3	3	3
C-1 + 2,5% FCC	-	-	3	3	3	3	3	3	3
C-1 + 3,5% FCC	-	-	3	3	3	3	3	3	3
C-2	3	3	3	3	3	3	3	3	3
C-2 + 0,5% FCC	-	-	3	3	3	3	3	3	3
C-2 + 1,5% FCC	-	-	3	3	3	3	3	3	3
C-2 + 2,5% FCC	-	-	3	3	3	3	3	3	3
C-2 + 3,5% FCC	-	-	3	3	3	3	3	3	3
C-3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
C-3 + 0,5% FCC	-	-	3	3	3	3	3	3	3
C-3 + 1,5% FCC	-	-	3	3	3	3	3	3	3
C-3+ 2,5% FCC	-	-	3	3	3	3	3	3	3
C-3 + 3,5% FCC	-	-	3	3	3	3	3	3	3
TOTAL	9	9	45	45	45	45	45	45	45

Fuente: Propia.

La tabla XI especifica la cantidad de ensayos que se realizarán para la sustentación de esta tesis.

TABLA X
CANTIDAD DE ENSAYOS IN-SITU

	CONO DE ARENA	PENOMETRO DINÁMICO
Ensayos para realizar con él % óptimo de aditivo - insitu	1	1

Fuente: Propia.

La tabla XII especifica los ensayos que se realizarán insitu.

Hipótesis

La adición de Corchorus capsularis mejora las características físicas y mecánicas de los suelos arcillosos de alta plasticidad empleados como subrasante en la calle La Despensa, distrito de

José Leonardo Ortiz, al incrementar su capacidad de carga (CBR) y su grado de compactación, y reducir su plasticidad.

Esta hipótesis se comprobó experimentalmente, mediante ensayos de laboratorio normalizados (Proctor modificado – NTP MTC E.115, CBR – NTP MTC E.132, límites de Atterberg – NTP MTC E.108), así como con pruebas in situ (DCP) que permitieron correlacionar los valores de penetración con la capacidad de carga obtenida en laboratorio.

El análisis comparativo de resultados permitió aceptar o rechazar las hipótesis según la mejora observada en los parámetros técnicos del suelo, sin requerir contraste estadístico inferencial.

De igual manera, a continuación, se presenta el proceso para comprobar la hipótesis propuesta.

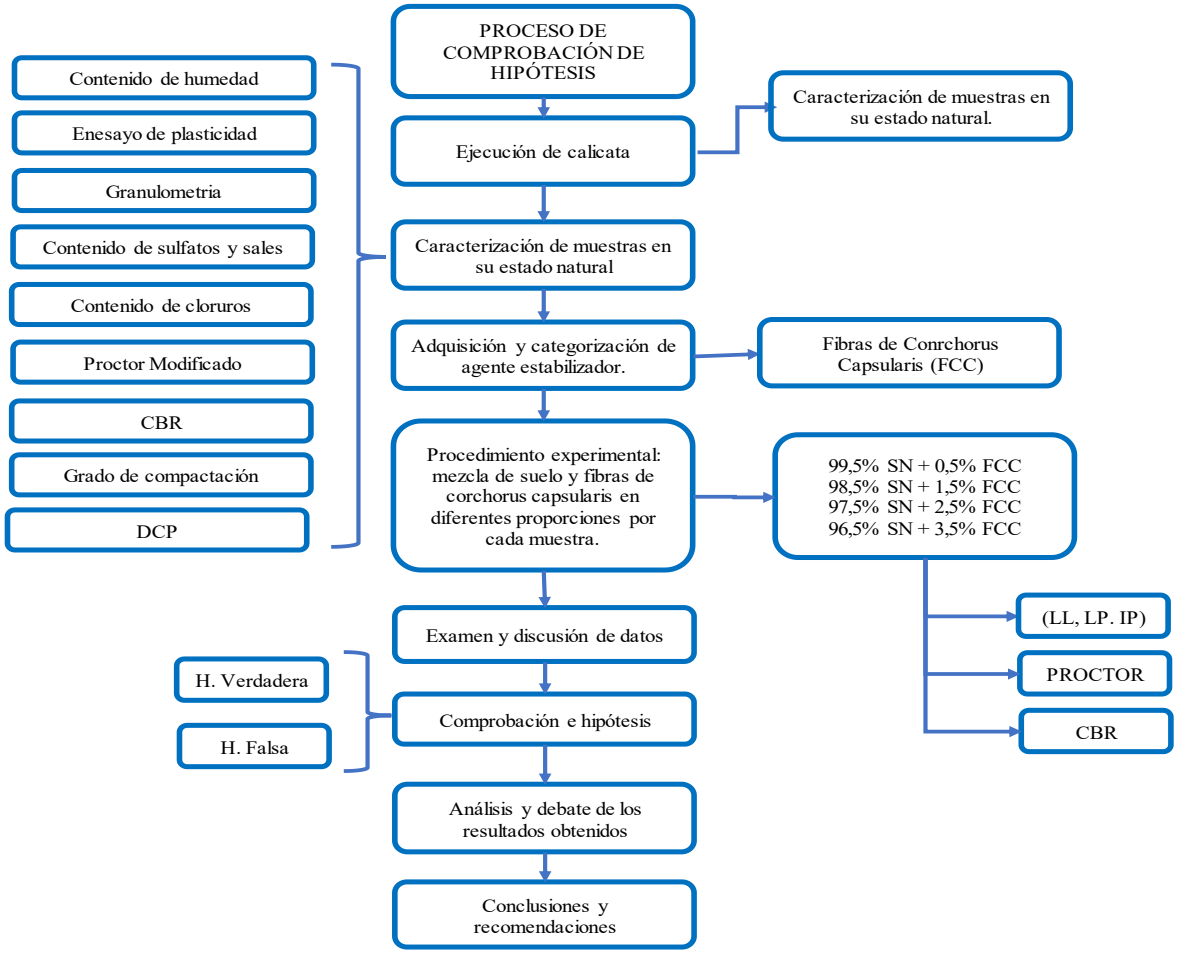


Fig. 8 Procedimiento de comprobación de hipótesis. Fuente: Propia

Variables y Operacionalización

Variables

- Variable independiente:

  Adición de porcentajes de Corchorus Capsularis

- Variable dependiente:

  Propiedades mecánicas y físicas de las subrasantes arcillosas

TABLA XI
MATRIZ DE OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES

VARIABLE	INDICADOR	UNIDAD DE MEDIDA	MÉTODO DE MEDICIÓN (instrumentos, ensayos, NTP)	RANGOS
Variable Independiente: Adición de porcentajes de Corchorus Capsularis	Cant. De Corchorus Capsularis	% en Peso	Balanza Elec.Aproximación a 0.1 g	0.5%,1.5%,2.5%,3.5%
VARIABLE	**DIMENSION**	**INDICADOR**	**UNIDAD DE MEDIDA**	**MÉTODO DE MEDICIÓN (instrumentos, ensayos, NTP)**
Variable Dependiente: Mejoramiento de suelos arcillosos de alta plasticidad a nivel de subrasante	Propiedades fisico-químicas	Contenido de Humedad	%	Ensayo de contenido de humedad NTP 339.127
		Plasticidad	%	Ensayo para determinar LL,LP e Ip NTP 339.129
		Tamaño de particulas	mm	Ensayo Granolumetrico NTP 339.128
		Contenido de sulfatos	%	Ensayo para determinar del contenido de ión cloruro soluble en las muestras de suelos según NTP 339.178
		Contenido de sales solubles totales	%	Ensayo de sales solubles totales en suelos (NTP 339.152/MTC E219)

		Contenido de cloruros	%	Ensayo para determinar del contenido de ión cloruro soluble en als muestras de suelos según NTP 339.177
	Propiedades Mecánicas	% Optimo contenido de Humedad	% de peso	Ensayo de Proctor Modificado NTP 339.141
		índice de CBR	%	Ensayo CBR MTC E132/ASTM D 1883
		Grado de compactación	%	Ensayo para determinar la densidad y peso unitario del suelo insitu mediante el metodo del cono de arena/NORMA N.T.P. 339.143 ASTM D-1556
		Penometro de cono dinamico o DCP	mm	Ensayo de penometro dinamico de cono /normativa ASTM D 6951

Fuente: Propia.

Métodos y herramientas para la recopilación de información

El estudio actual hará uso de las siguientes metodologías y herramientas aplicables:

- **Técnica:** Suelos de los cuales se obtuvo a recolección de muestras siguiendo el protocolo MTC E-101.[31]
- **Herramientas:** La elección de la técnica de muestreo aplicada al suelo en estudio depende de las propiedades del material analizado. En esta investigación, los instrumentos requeridos son los siguientes:

    - Bolas de capacidad 50kg aprox.
    - Pala, para realizar las excavaciones de 1.50m de profundidad a cielo abierto.
    - Otros: Estacas, cámara para las fotografías, pizarra, cinta métrica.

- **Técnica:** Evaluación de resultados
- **Herramientas:** El proceso implica un análisis y una interpretación detallada. Los instrumentos que se utilizarán incluyen hojas de cálculo, gráficos, mapas conceptuales, tablas comparativas y otras herramientas similares.
- **Manejo de la información:** Se mencionan las herramientas digitales que permitirán procesar y analizar los datos obtenidos de los ensayos realizados. Entre los programas esenciales para estas tareas se encuentran: Microsoft Word, Excel, AutoCAD y Google Earth Pro.

Método establecido

Desarrollo de zanjas de inspección (Calicatas)

Como primera etapa de la investigación, se llevó a cabo una exploración preliminar del sector analizado, con el propósito de evaluar visualmente las condiciones de la carretera, identificar sectores con presencia de arcillas y detectar irregularidades en el tramo, entre las que se destacaron depresiones en las aceras y alteraciones en el pavimento asociadas a la acumulación de agua. En una siguiente etapa, se obtuvo datos técnicos relativos al tramo en estudio y los tipos de suelo existentes, determinando la localización de las zonas de muestreo bajo criterios de facilidad de acceso y representación adecuada. En una etapa siguiente, se llevó a cabo la realización de tres calicatas (excavaciones superficiales) donde se procedió a la extracción y conservación de muestras edáficas, siguiendo los protocolos establecidos en la normativa MTC E-101 "Muestreo de Suelos y Rocas" para garantizar la correcta preservación de los especímenes [31]. Para aprovechar el clima cálido y reducir al máximo las interferencias con el tráfico, las calicatas se llevaron a cabo en los costados del eje vial durante las horas de menor afluencia vehicular.

- ✓ C-01: Zona de encuentro entre La Despensa y Manuel Duato
  - E: 626233
  - N: 9252994
- ✓ C-02: Zona de encuentro entre La Despensa y Palmeras
  - E: 626253
  - N: 9253118

- ✓ C-03: Zona de encuentro entre La Despensa y Av. Mexico
  - E: 626270
  - N: 9253355
- ✓ C-04: Zona de encuentro entre La Despensa y Real
  - E: 626314
  - N: 9253844
- ✓ C-05: Zona de encuentro entre La Despensa y el Porvenir
  - E: 626340
  - N: 9253976

Para la generación de las coordenadas visualizadas, se utilizó la plataforma cartográfica Google Earth Pro, reconocida por su precisión en modelado espacial.

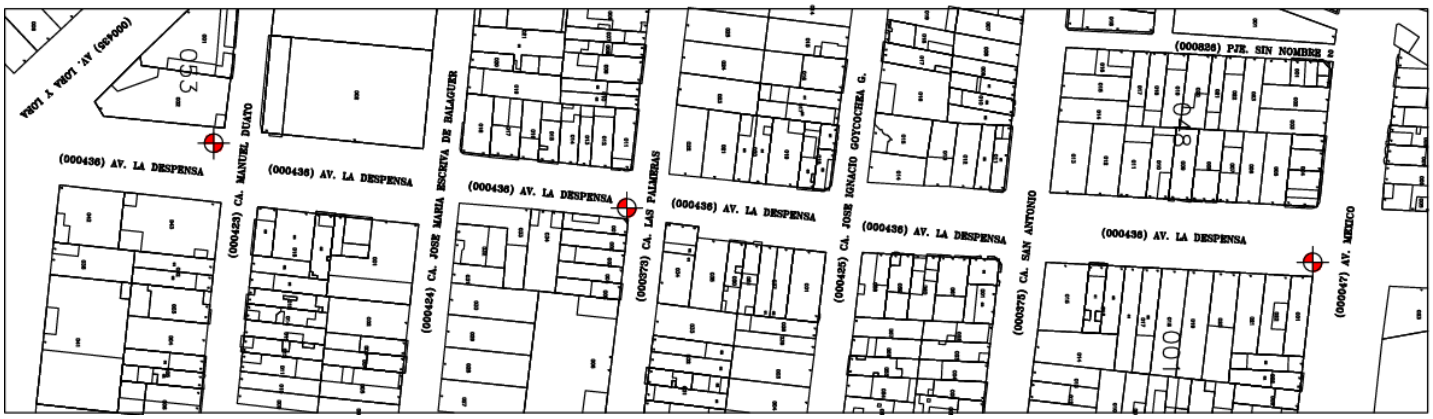


Fig. 9 Sitio en el que se posicionaron las calicatas N°01, N°02 y N°03. Fuente: Propia

Fig. 10 Sitio en el que se posicionaron las calicatas N°04 y N°05. Fuente: Propia

De acuerdo con lo establecido en la normativa CE.010 para Pavimentos Urbanos, se define como requisito una excavación con una profundidad mínima de 1.50 m, medida desde el nivel de la rasante vial. En este estudio, dicho parámetro fue implementado con estricto seguimiento, garantizando su ubicación por debajo de la superficie de la vía. Adicionalmente, el MTC E-101 "Muestreo de Suelos y Rocas" señala que el volumen mínimo de muestra debe permitir la ejecución de los ensayos físicos requeridos. Las calicatas realizadas alcanzaron los 1.50 m de profundidad, identificándose un perfil estratigráfico homogéneo: una capa superficial de material de relleno (0-0.20 m) y una capa subyacente de suelo arcilloso hasta la profundidad máxima.

Fig. 11 Calicata-01: Intersección de La Despensa y Manuel Duato Fuente: Propia

Fig. 12 Calicata-02: Intersección de La Despensa y Palmeras Fuente: Propia

Fig. 13 Calicata-03: Intersección de La Despensa y Av. Mexico Fuente: Propia

Fig. 14 Calicata-04: Intersección de La Despensa y Real. Fuente: Propia

Fig. 15 Calicata-04: Intersección de La Despensa y El Porvenir. Fuente: Propia

En el laboratorio de suelos de la Universidad Católica Santo Toribio de Mogrovejo, se efectuaron los análisis necesarios para evaluar las propiedades físicas y mecánicas de las muestras, las cuales fueron previamente obtenidas de las subrasantes arcillosas. Este proceso se llevó a cabo con el objetivo de cumplir con los protocolos establecidos para su caracterización técnica.

Ensayos de laboratorio

Ensayo para determinar el porcentaje de humedad

De acuerdo con lo estipulado en la norma MTC E-108, la humedad corresponde al porcentaje que representa la masa de agua respecto a la de los sólidos contenidos en el suelo. Para determinarla, en primer lugar se recurre al método de cuarteo, cuya función es dividir la muestra en porciones homogéneas con el fin de obtener una fracción representativa. A continuación, dicha porción se pesa en una balanza electrónica de alta precisión, asegurando así la fiabilidad de los resultados. Tras el cuarteo, las muestras se preservan en recipientes (taras), registrando la masa del envase tanto vacío como con el material. A continuación, las taras ingresan en un horno secador eléctrico, manteniendo durante 24 horas una temperatura estable de 110 °C (± 5 °C) para eliminar el agua residual. Una vez concluido el secado, se retiran las muestras y se dejan enfriar, a temperatura ambiente y bajo condiciones controladas. Por último, se pesa la masa seca de la muestra junto con el recipiente (tara) y, a través de un método gravimétrico, se calcula el porcentaje de humedad natural.

Fig. 16 Ensayo para determinar el porcentaje de humedad. Fuente: Propia

Análisis de la granulometría a través de métodos de tamizado

El procedimiento se realizó siguiendo las especificaciones establecidas en el estándar MTC E-107. De acuerdo con el protocolo, por cada excavación se procesó un espécimen, clasificando las partículas según su tamaño mediante tamices normalizados y registrando meticulosamente el peso acumulado en cada malla de medidas certificadas. Posteriormente, previo a los análisis, sobre el material extraído de las excavaciones se implementó la técnica de cuarteo diagonal para garantizar la selección de una fracción homogénea y significativa. Esta muestra fue lavada utilizando un tamiz N°200 y posteriormente secada en horno durante 24 horas. Una vez finalizado el secado, se retiró del horno, se registró su peso y se prepararon los tamices según los estándares normativos. El tamizado se inició después del lavado (con el tamiz N°200) y el secado, repitiendo el proceso en las cinco calicatas estudiadas para garantizar consistencia en los resultados.

Fig. 17 Ensayo granulométrico por tamizado. Fuente: Propia

Análisis granulométrico mediante hidrómetro

De acuerdo con la normativa MTC E-109, la aplicación de este procedimiento solo se considera válida si más del 50% de las partículas de la muestra granulométrica logran atravesar el tamiz N°200 (0.075 mm). Cumpliendo este requisito previo, el ensayo requiere el uso de agua destilada y hexametafosfato de sodio como insumos críticos. En este estudio, se dosificaron 40 gramos del compuesto químico mencionado, mientras se controló la temperatura a 20 °C durante la fase de preparación. Cabe destacar que la muestra preservó su contenido higroscópico original, ya que la metodología establece combinar el agente dispersante (hexametafosfato de

sodio) con agua destilada utilizando una pipeta calibrada de 4 cm³, asegurando una distribución uniforme y óptima de las partículas. Una vez que el agente se ha incorporado a la muestra, la mezcla debe agitarse durante aproximadamente 7 minutos. Luego de este tiempo, se transfiere a una probeta, completando el volumen hasta 1000 ml. A continuación, se cubre manualmente el recipiente y se ejecuta una rotación rápida de 60 grados, con el objetivo de sedimentar el material en la base del contenedor.

Finalmente, se introduce el hidrómetro en la probeta y, con el cronómetro listo, se inician las lecturas. Es importante considerar que los tiempos de lectura pueden variar entre registros. Además, debe medirse la temperatura de la mezcla con cuidado, procurando no alterar la posición del hidrómetro.

Fig. 18 Ensayo granulométrico por hidrómetro. Fuente: Propia

Procedimiento para determinar el límite liquido

Siguiendo los requerimientos de la norma MTC E-110, el procedimiento se llevó a cabo bajo condiciones controladas. Previamente a su implementación, fue crítico verificar la calibración del aparato de Casagrande, dispositivo esencial para ubicar una alícuota de la muestra que, siguiendo el protocolo, debió saturarse en agua por 24 horas previas al análisis. Una vez posicionado el material en el recipiente de Casagrande, se realizó un corte longitudinal de 13 mm de longitud mediante una herramienta de ranurado normalizada, asegurando así la estandarización del proceso. Posteriormente, se gira la manivela del dispositivo, generando un impacto que hace caer la copa de la cuchara junto con la muestra. Se registra el número de

impactos necesarios para que la ranura de la muestra se cierre. El número de golpes puede oscilar entre 15 y 35, y se debe registrar en tres fases: la primera entre 25 y 35 golpes, la segunda entre 20 y 30, y la tercera entre 15 y 25.

De acuerdo con el protocolo establecido, inicialmente se registró la masa del recipiente vacío (tara) y posteriormente la del conjunto muestra-envase. A continuación, el material fue sometido a un proceso de secado en un horno a 110 °C durante 24 horas. Finalizado este ciclo térmico, se determinó nuevamente el peso de la muestra deshidratada, lo que permitió cuantificar el porcentaje de humedad mediante cálculo gravimétrico. Esta secuencia metodológica se replicó de manera sistemática en todos los especímenes recolectados de las excavaciones, asegurando la uniformidad en los procesos de validación.

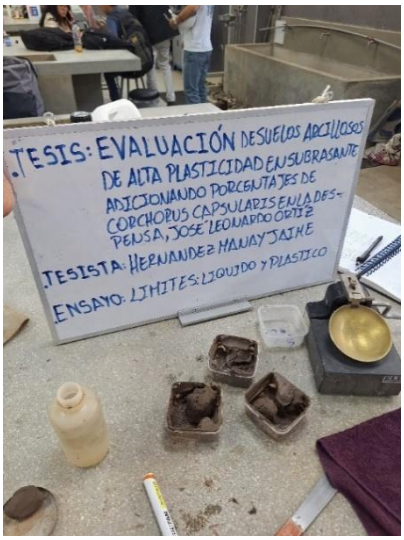


Fig. 19 Ensayo de límite líquido. Fuente: Propia

Procedimiento para establecer el rango de plasticidad.

Conforme a la normativa MTC E-111, se fabrican cilindros de reducidas dimensiones (3 mm de diámetro) como parte del protocolo estandarizado. En la fase siguiente, se determina el peso del envase vacío (tara) y del conjunto que incluye las muestras. Posteriormente, los especímenes son sometidos a un proceso de secado en horno a 110 °C durante 24 horas. Finalizado este intervalo, se retiran para cuantificar el contenido higroscópico mediante el contraste gravimétrico entre los pesos registrados antes y después de la exposición térmica, método clave para validar la humedad residual.

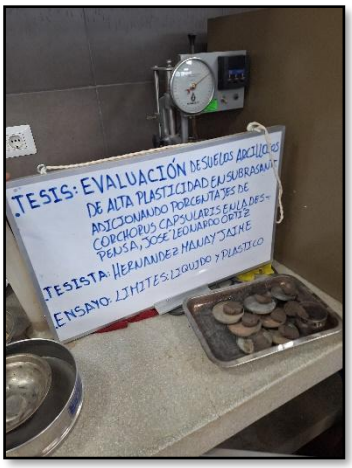


Fig. 20 Procedimiento para establecer el rango de plasticidad. Fuente: Propia

Prueba de compactación que emplea el método P. Modif.

El método se realizó aplicando el método A, que consiste en tamizar el material utilizando el tamiz N°4 (equivalente a 4.75 mm de apertura según estándares ASTM). Se requieren al menos cuatro puntos, cada uno compuesto por 3 kg de material. Una vez obtenidas las muestras con el peso adecuado, se añade agua en diferentes proporciones, tomando como referencia el índice de plasticidad previamente calculado. Como primer paso, cada muestra es sometida a un proceso de saturación y, posteriormente, sellada en bolsas herméticas para asegurar la estabilidad de su humedad durante el almacenamiento. Previamente, se calcula el volumen y el peso del molde Proctor. A continuación, las muestras se compactan, dividiéndolas en cinco capas, a cada una de las cuales se aplican 25 golpes con el martillo Proctor. Al concluir el proceso, se registra el peso del molde junto con la muestra compactada. Este protocolo se repite de manera sistemática en los cuatro puntos de análisis establecidos.

Fig. 21 Ensayo de P. Modif. Fuente: Propia

Procedimiento para determinar la capacidad de soporte mediante el índice CBR.

Como etapa preliminar al ensayo, se determinó la humedad óptima mediante el ensayo P. Modif., metodología que define los parámetros ideales de densificación del suelo. Con este parámetro definido, se acondicionaron 5 kg de material, sometiéndolo a saturación y almacenamiento hermético por 24 horas. De forma simultánea, se calibraron los moldes mediante la medición precisa de su volumen y masa. Para los tres niveles de energía evaluados (56, 25 y 12 impactos por capa), se dosificaron 5000 gramos de muestra por punto, distribuyendo uniformemente el material en 5 estratos dentro del molde. Finalizada la aplicación de energía, se retiró el anillo extensión, se invirtió la unidad de compactación, y se colocó un filtro de papel en su base antes de registrar la masa total del conjunto molde-muestra. Acto seguido, el sistema se sumergió en un tanque de inmersión bajo una carga adicional de 2.25 kg, monitoreando la expansión del espécimen mediante un indicador de carátula. Las lecturas se realizaron a intervalos de 24 horas durante un ciclo total de 96 horas, manteniendo la muestra en condiciones de saturación controlada.

Tras culminar el período de 4 días, el molde fue extraído de la cubeta de inmersión y se permitió el drenaje del exceso de agua durante aproximadamente 15 minutos. En la fase subsiguiente del estudio, se implementó el método CBR (California Bearing Ratio) utilizando un equipo de ensayo especializado. Para materiales de naturaleza arcillosa, se seleccionó un dispositivo de carga acorde, aplicando una fuerza normalizada de 4.5 kN conforme a protocolos internacionales. De manera sistemática, se monitoreó y registró la resistencia al penetración del suelo a intervalos regulares (cada 2 minutos), cubriendo un ciclo total de 10 minutos, bajo los criterios establecidos en normativas de referencia para garantizar la trazabilidad de los resultados.

Fig. 22 Ensayo de CBR Fuente: Propia

Grado de Expansión por método de CBR

La medición del grado de expansión se lleva a cabo utilizando un calibrador o dispositivo de deformación que permite registrar los cambios de altura de la muestra mientras permanece sumergida. Durante el periodo de expansión diario, que dura los 4 días, debido a la captación de agua por parte de la muestra, se registra un aumento progresivo de su altura, parámetro que, mediante la ecuación propuesta, permita calcular el % de expansión derivado de la fluctuación dimensional, por eso se aplica lo siguiente:

$$Grado\ de\ Expansión\ (\%) = \left(\frac{\Delta H}{H_0}\right) * 100$$

Donde ΔH es el cambio en la altura de la muestra y H_0 es la altura inicial de la muestra.

.

Fig. 23 Método de ensayo CBR bajo condiciones de saturación o inmersión. Fuente: Propia

Ensayo para determinar la concentración de sales

El ensayo se llevó a cabo siguiendo la normativa MTC E-219. Para su realización, se deberán pasar 150 gr por la tara N°10, para luego ser almacenadas en recipientes, agregando 250 ml de agua destilada, luego de esto se deberá agitar por un periodo de tiempo de aproximadamente 30 min cada muestra y se dejará reposar durante 24 hrs, una vez que esto ocurra se agregará a este líquido resultante una gota de nitrato de plata para poder separar las sales, despues a través de un embudo y papel filtrante, se deberá pasar este liquido reposado y llenar 100 ml de esta agua ya filtrada, para luego ser llevada al horno a 110 ± 5ºC y luego de ser secada, ser pesada la muestra para poder analizar la concentración de sales presentes en los suelos analizados en las calicatas.

Fig. 24 Ensayo de contenido de sales. Fuente: Propia

Proceso de extracción de fibras naturales de Corchorus capsularis (planta de yute).

- La obtención de fibra de corchorus capsularis, conocida comúnmente como yute, comienza con el corte de los tallos de la planta.
- Este proceso puede realizarse manualmente con herramientas como cuchillos o machetes, o utilizando maquinaria especializada para mayor eficiencia.
- Una vez cortados, los tallos se sumergen en agua durante un periodo de tiempo determinado para facilitar el deshilado, que es el proceso de separación de las fibras del material leñoso.
- Este proceso de separación de fibras puede realizarse de forma manual o mediante maquinaria, según la escala de producción requerida.
- Una vez deshiladas, las fibras se extienden al sol para secarse, un método natural que elimina la humedad y previene la aparición de hongos.
- En caso de condiciones climáticas desfavorables, se pueden utilizar secadores artificiales para un secado más rápido y controlado.
- Tras el secado completo, las fibras de corchorus capsularis están listas para ser comercializadas, siendo adquiridas en mercados locales como "Moshoqueque".
- Este método meticuloso garantiza la excelencia de la fibra, la cual es sumamente apreciada tanto en el ámbito textil como en la elaboración de múltiples artículos.

Ensayo para determinar la densidad del suelo in situ MTC E 117.

Este estudio se realizó con el fin de analizar la efectividad de la incorporación de Corchorus capsularis en suelos arcillosos expansivos, buscando validar los resultados obtenidos previamente en un entorno controlado de laboratorio. El propósito de este procedimiento es contrastar los índices de compactación alcanzados en condiciones de laboratorio con aquellos obtenidos en el lugar de estudio. De esta manera, se facilitará la determinación del nivel auténtico de compactación en el terreno y se validará la optimización del comportamiento geotécnico del suelo tratado con el aditivo mencionado.

Fig. 25 Procedimiento empleado para calcular la densidad natural in situ. Fuente: Propia

ENSAYO DCP ASTM D6951

El ensayo de DCP (ASTM D6951) fue realizado con el propósito de corroborar los resultados de laboratorio en relación con la resistencia del suelo estabilizado con fibra de Corchorus capsularis. Este enfoque metodológico facilita la comparación entre la capacidad portante haya mediante la experimentación en laboratorio y aquella documentada durante las evaluaciones in situ. Esto contribuye a evaluar el comportamiento real del suelo estabilizado en escenarios reales de campo.

Fig. 26 Ensayo de DCP. Fuente: Propia

Preparación de muestras experimentales

El material en su estado original, obtenido mediante 5 excavaciones, será el componente principal de las muestras de investigación, al cual se incorporará el material estabilizante: fibra de Corchorus capsularis. Para ello, se requiere calcular la masa seca de cada muestra aplicando fórmulas técnicas, como la del porcentaje de humedad. Al resolver la ecuación correspondiente, se determina el contenido de agua, lo que permite obtener la masa seca mediante una operación algebraica basada en la diferencia entre pesos húmedo y seco.

$$Pw = \frac{\frac{w}{100}(Peso\ húmedo\ del\ suelo)}{(1+\frac{w}{100})}$$

Mediante la aplicación de la ecuación simplificada, es posible alcanzar los siguiente valores:

- **C-01 (Calicata número uno)**

Datos:

- Humedad: 21.02
- Masa del suelo húmedo: 30 kg

Al reemplazar en la fórmula:

$$Pw = \frac{\frac{21.02}{100}(30)}{(1+\frac{21.02}{100})}$$

$$\boldsymbol{Pw = 5.21}$$

Peso obtenido tras la deshidratación de la muestra:

$$Peso\ seco = Peso\ húmedo - Peso\ de\ agua$$

$$Peso\ seco = 30\ kg - 5.21\ kg$$

$$\boldsymbol{Peso\ seco = 24.79\ kg}$$

- **C-02 (Calicata número dos)**

Datos:

- Humedad: 22.10
- Masa del suelo húmedo: 30 kg

Al reemplazar en la fórmula:

$$Pw = \frac{\frac{21.10}{100}(30)}{(1+\frac{21.10}{100})}$$

$$\boldsymbol{Pw = 5.22}$$

Peso obtenido tras la deshidratación de la muestra:

$$Peso\ seco = Peso\ húmedo - Peso\ de\ agua$$

$$Peso\ seco = 30\ kg - 5.22\ kg$$

$$\boldsymbol{Peso\ seco = 24.78\ kg}$$

- **C-03 (Calicata número tres)**

Datos:

- Humedad: 17.37
- Masa del suelo húmedo: 30 kg

Al reemplazar en la fórmula:

$$Pw = \frac{\frac{17.37}{100}(30)}{(1 + \frac{17.37}{100})}$$

$$\boldsymbol{Pw = 4.44}$$

Peso obtenido tras la deshidratación de la muestra:

$$Peso\ seco = Peso\ húmedo - Peso\ de\ agua$$

$$Peso\ seco = 30\ kg - 4.44\ kg$$

$$\boldsymbol{Peso\ seco = 25.56\ kg}$$

- **C-04 (Calicata número cuatro)**

Datos:

- Humedad: 17.99
- Masa del suelo húmedo: 30 kg

Al reemplazar en la fórmula:

$$Pw = \frac{\frac{17.99}{100}(30)}{(1 + \frac{17.99}{100})}$$

$$\boldsymbol{Pw = 4.57}$$

Peso obtenido tras la deshidratación de la muestra:

$$Peso\ seco = Peso\ húmedo - Peso\ de\ agua$$

$$Peso\ seco = 30\ kg - 4.57\ kg$$

$$\boldsymbol{Peso\ seco = 25.43\ kg}$$

- **C-05 (Calicata número cinco)**

Datos:

- Humedad: 10.09
- Masa del suelo húmedo: 30 kg

Al reemplazar en la fórmula:

$$Pw = \frac{\frac{10.09}{100}(30)}{(1 + \frac{10.09}{100})}$$

$$\boldsymbol{Pw = 2.75}$$

Peso obtenido tras la deshidratación de la muestra:

$$Peso\ seco = Peso\ húmedo - Peso\ de\ agua$$

$$Peso\ seco = 30\ kg - 2.75\ kg$$

$$\boldsymbol{Peso\ seco = 27.25\ kg}$$

TABLA XII

COMBINACIONES DE SUELO NATURAL + CORCHORUS CAPSULARIS CON LOS PORCENTAJES SELECCIONADOS

C-1			
Agrupación 1: 99,5% SN + 0,5% FCC			
FCC	0,005 × 24,79	0,12	kg
TERRENO	Pw + 0,995 × 24,79	29,88	kg
	Σ de pesos	30,00	kg
Agrupación 2: 98,5% SN + 1,5% FCC			
FCC	0,015 × 24,79	0,37	kg
TERRENO	Pw + 0,985 × 24,79	29,63	kg
	Σ de pesos	30,00	kg
Agrupación 3: 97,5% SN + 2,5% FCC			
FCC	0,025×24,79	0,62	kg
TERRENO	Pw + 0,975 × 24,79	29,38	kg
	Σ de pesos	30,00	kg
Agrupación 4: 96,5% SN + 3,5% FCC			
FCC	0,035×24,79	0,87	kg
TERRENO	Pw + 0,965 × 24,79	29,13	kg
	Σ de pesos	30,00	kg

C-2			
Agrupación 1: 99,5% SN + 0,5% FCC			
FCC	0,005 × 24,78	0,12	kg
TERRENO	Pw + 0,995 × 24,78	29,88	kg
	Σ de pesos	30,00	kg
Agrupación 2: 98,5% SN + 1,5% FCC			
FCC	0,015 × 24,78	0,37	kg
TERRENO	Pw + 0,985 × 24,78	29,63	kg
	Σ de pesos	30,00	kg
Agrupación 3: 97,5% SN + 2,5% FCC			
FCC	0,025×24,78	0,62	kg
TERRENO	Pw + 0,975 × 24,78	29,38	kg
	Σ de pesos	30,00	kg
Agrupación 4: 96,5% SN + 3,5% FCC			
FCC	0,035×24,78	0,87	kg
TERRENO	Pw + 0,965 × 24,78	29,13	kg
	Σ de pesos	30,00	kg

C-3			
Agrupación 1: 99,5% SN + 0,5% FCC			
FCC	0,005×24,78	0,13	kg
TERRENO	Pw + 0,995 × 25,56	29,87	kg
	Σ de pesos	30,00	kg
Agrupación 2: 98,5% SN + 1,5% FCC			
FCC	0,015×24,78	0,38	kg
TERRENO	Pw + 0,985 × 25,56	29,62	kg
	Σ de pesos	30,00	kg

C-4			
Agrupación 1: 99,5% SN + 0,5% FCC			
FCC	0,005×25,43	0,13	kg
TERRENO	Pw + 0,995 × 25,43	29,87	kg
	Σ de pesos	30,00	kg
Agrupación 2: 98,5% SN + 1,5% FCC			
FCC	0,015×25,43	0,38	kg
TERRENO	Pw + 0,985 × 25,43	29,62	kg
	Σ de pesos	30,00	kg

Agrupación 3: 97,5% SN + 2,5% FCC			
FCC	0,025×24,78	0,64	kg
TERRENO	Pw + 0,975 × 25,56	29,36	kg
	Σ de pesos	30,00	kg

Agrupación 3: 97,5% SN + 2,5% FCC			
FCC	0,025×25,43	0,64	kg
TERRENO	Pw + 0,975 × 25,43	29,36	kg
	Σ de pesos	30,00	kg

Agrupación 4: 96,5% SN + 3,5% FCC			
FCC	0,035×24,78	0,89	kg
TERRENO	Pw + 0,965 × 25,56	29,11	kg
	Σ de pesos	30,00	kg

Agrupación 4: 96,5% SN + 3,5% FCC			
FCC	0,035×25,43	0,89	kg
TERRENO	Pw + 0,965 × 25,43	29,11	kg
	Σ de pesos	30,00	kg

C-5			
Agrupación 1: 99,5% SN + 0,5% FCC			
FCC	0,005×25,43	0,14	kg
TERRENO	Pw + 0,995 × 27,25	31,68	kg
	Σ de pesos	31,82	kg
Agrupación 2: 98,5% SN + 1,5% FCC			
FCC	0,015×25,43	0,41	kg
TERRENO	Pw + 0,985 × 27,25	29,59	kg
	Σ de pesos	30,00	kg
Agrupación 3: 97,5% SN + 2,5% FCC			
FCC	0,025×25,43	0,68	kg
TERRENO	Pw + 0,975 × 27,25	29,32	kg
	Σ de pesos	30,00	kg
Agrupación 4: 96,5% SN + 3,5% FCC			
FCC	0,035×25,43	0,95	kg
TERRENO	Pw + 0,965 × 27,25	29,05	kg
	Σ de pesos	30,00	kg

Fuente: Propia

Resultados

Obtención de calicatas para el descarte

Evaluación de muestras inalteradas obtenidas de excavaciones de estudio (calicatas).

Las muestras obtenidas in situ corresponden a las cinco calicatas ejecutadas, siguiendo protocolos rigurosos durante la extracción para preservar sus propiedades intactas. Para determinar las características de la muestra estudiada, se realizaron pruebas estandarizadas bajo la normatividad del MTC. Estos procedimientos incluyeron el análisis del contenido de humedad natural, la evaluación granulométrica a través de tamices, la identificación de los límites de consistencia de Atterberg, la prueba de compactación de P. Modif. Y el ensayo CBR. A continuación, se detallan los resultados obtenidos en los análisis:

Suelo Natural

Contenido de Humedad.

Tal como se mencionó previamente, este análisis se llevó a cabo efectuando las directrices del MTC E-108, la cual especifica el método estandarizado para establecer la correlación entre la humedad presente en la muestra y el peso de sus componentes sólidos.

TABLA XIII

CONTENIDO DE HUMEDAD DE SUELO NATURAL

CONTENIDO DE HUMEDAD	
EXCAVACIÓN	**HUMEDAD (%)**
C-01	34,28%
C-02	21,97%
C-03	17,23%
C-04	27,21%
C-05	16,06%

Fuente: Propia

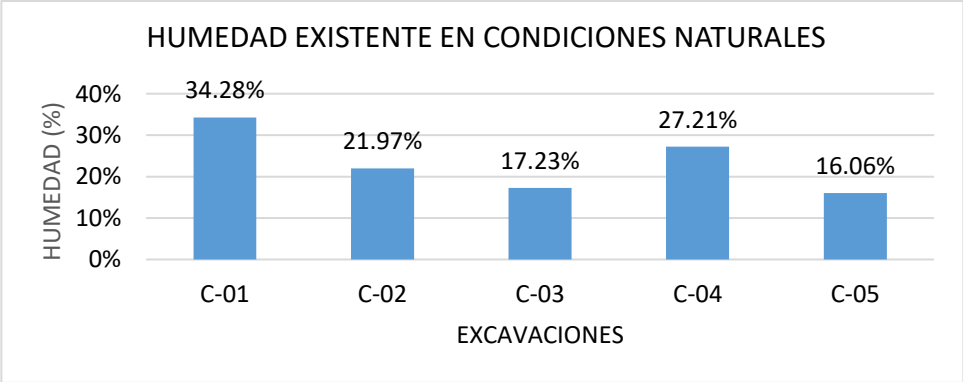


Fig. 27 Cantidad de humedad contenida en el suelo sin intervención. Fuente: Propia

La Tabla XIII y figura 27 se presentan de manera detallada los valores numéricos obtenidos del estudio de la humedad existente en condiciones naturales presente en el terreno, correspondientes a 5 excavaciones realizadas a una profundidad de 1.5m, ubicadas en el sector La Despensa del distrito de José Leonardo Ortiz. Se evidencia una fluctuación notable en los índices de humedad, que varían entre el 16.06% y el 34.28%, con el valor más elevado asociado a la calicata C-01 y el valor más bajo a la calicata C-05. Este fenómeno revela diferencias en las condiciones de humedad del terreno, un rasgo habitual en arcillas de alta plasticidad, destacadas por su gran eficiencia en la conservación de agua. La presencia de factores desfavorables puede provocar una disminución en la resistencia estructural de la capa base del terreno, lo que justifica la necesidad de implementar un proceso de mejora, tal como la incorporación de Corchorus capsularis, este enfoque busca, mediante la mejorar de características físicas del terreno, garantizar un comportamiento uniforme y resistente cuando este se sometió al esfuerzo externo derivado de cargas aplicadas.

Granulometría por Tamizado

Este ensayo, como se indicó previamente, se llevó a cabo bajo la normativa MTC E107. El propósito del método consiste en clasificar los componentes del suelo según su tamaño, usando tamices que categorizan el material en función de su granulometría.

TABLA XIV

GRANULOMETRÍA POR ENSAYO DE TAMIZADO

CALICATA	Grava (%) 75.00 - 4.75 mm	Arena (%) 4.75 - 0.075 mm	Limo/Arcilla (%) < 0.075 mm
C-01	0,00%	7,9%	92,1%
C-02	0,00%	10,2%	89,8%
C-03	0,00%	9,3%	90,7%
C-04	0,00%	6,9%	93,1%
C-05	0,00%	11,7%	88,3%

Fuente: Propia

En la tabla XIV se detallan las cifras obtenidas del estudio de distribución granulométrica realizada mediante el método de tamizado, demuestran que no se registró grava (0.00%) en ninguna calicata y que el contenido de limo/arcilla supera el 88% en todos los casos. Este hallazgo sugiere que la mayoría del suelo se compone de finos, lo que corrobora su naturaleza arcillosa de elevada plasticidad, con una capacidad drenante reducida y un comportamiento inadecuado como subrasante en su estado natural.

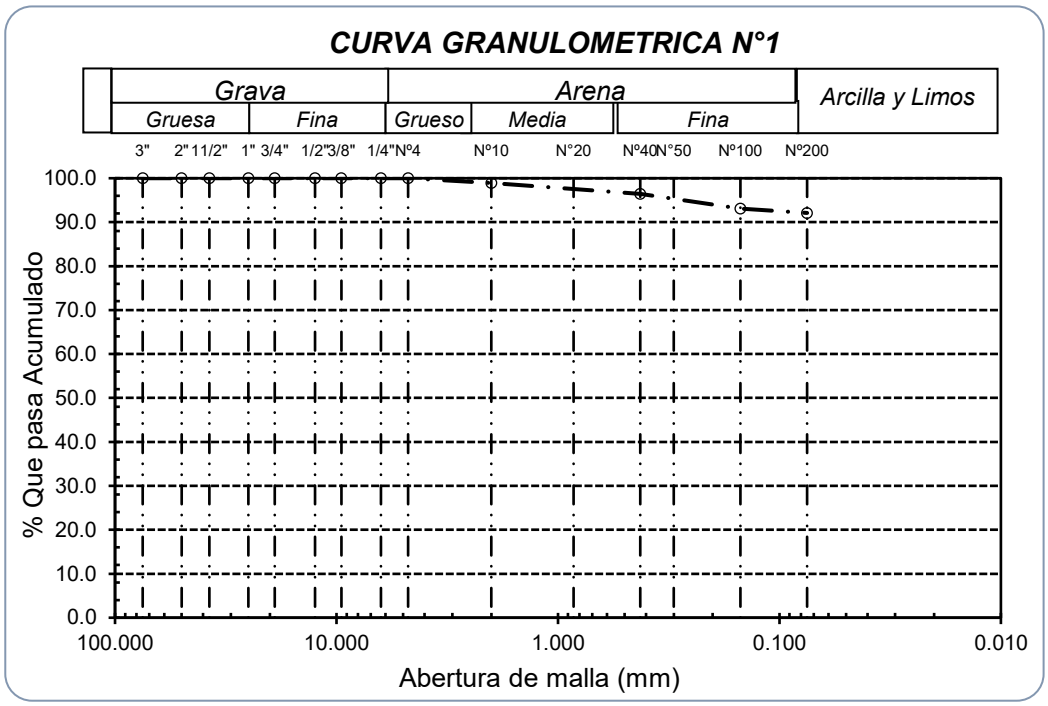


Fig. 28 Gráfica de distribución granulométrica de la excavación Número 1. Fuente: Propia

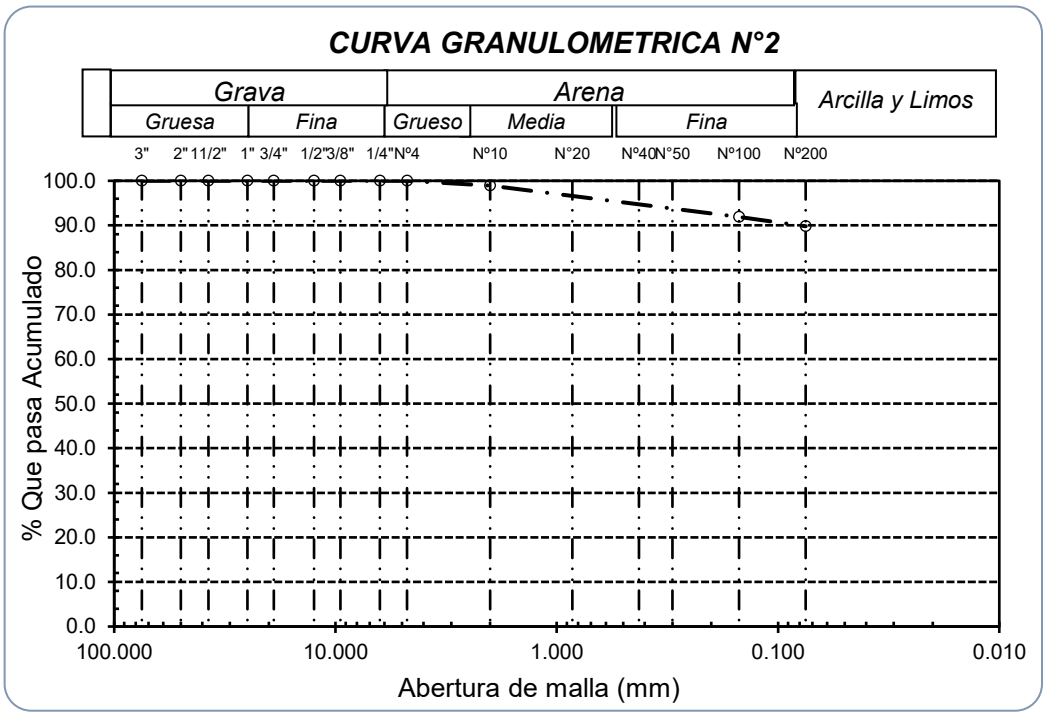


Fig. 29 Gráfica de distribución granulométrica de la excavación Número 2. Fuente: Propia

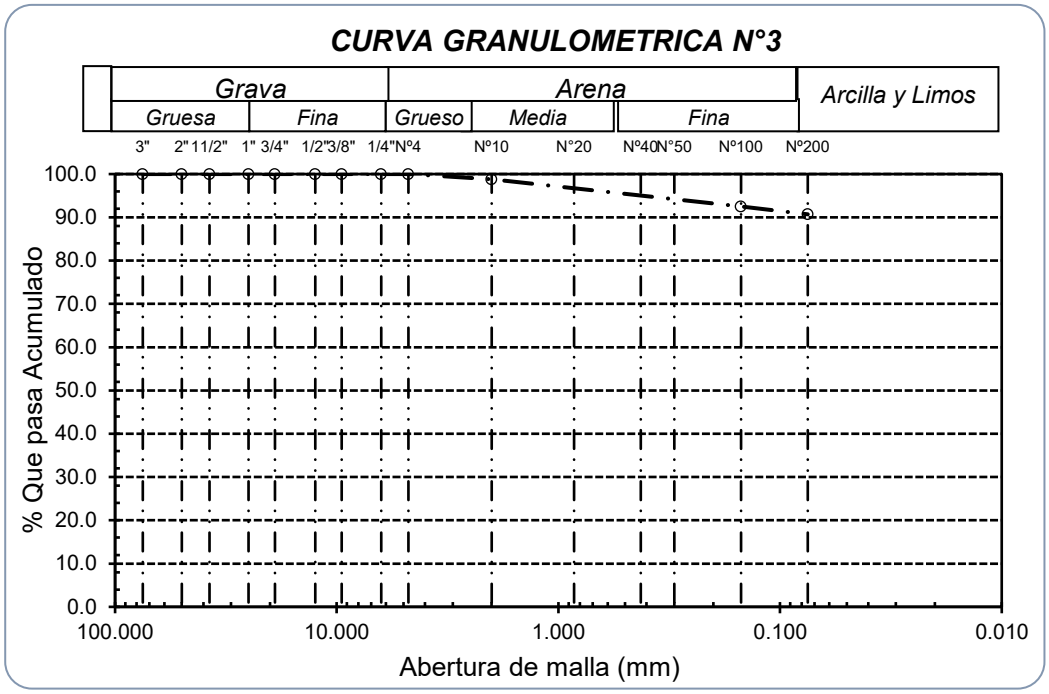


Fig. 30 Gráfica de distribución granulométrica de la excavación Número 3. Fuente: Propia

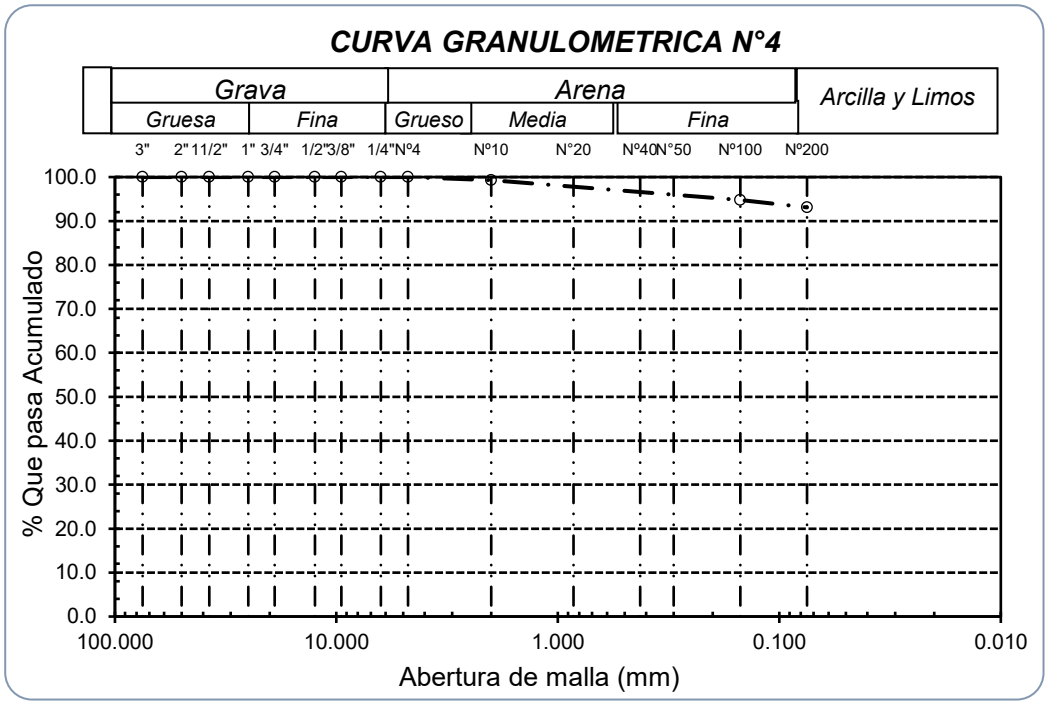


Fig. 31 Gráfica de distribución granulométrica de la excavación Número 4 Fuente: Propia

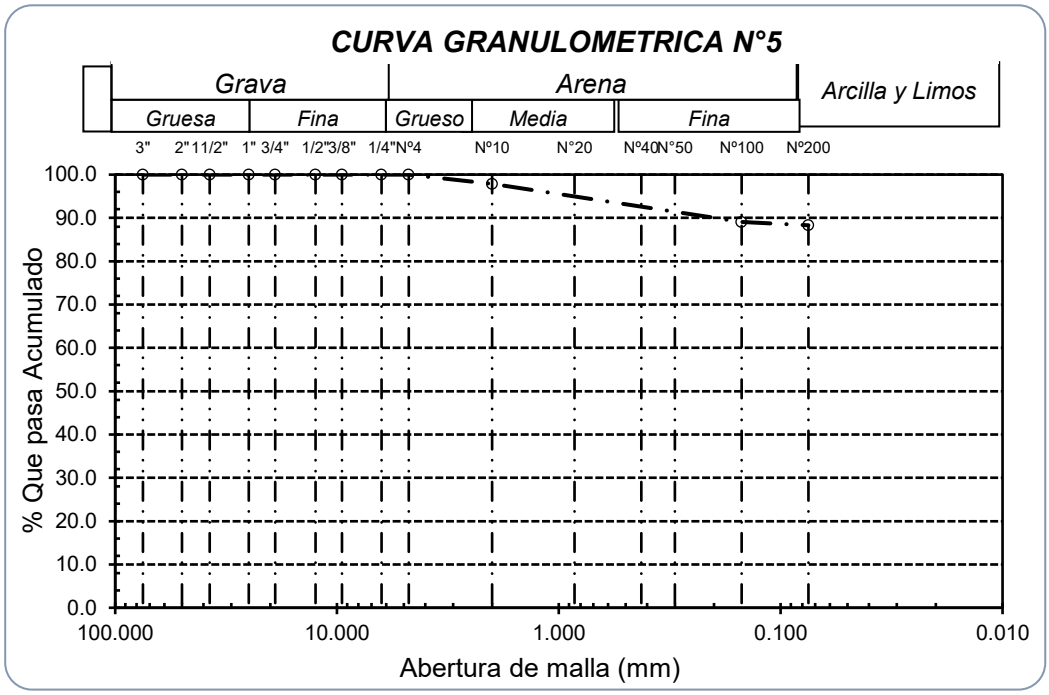


Fig. 32 Gráfica de distribución granulométrica de la excavación Número 5 Fuente: Propia

En las figuras 28, 29, 30, 31 y 32 se aprecia las porciones de muestras que pasan por la malla N° 200, donde se aprecia que se trata de suelos tipos CH (Arcilla de alta plasticidad).

Granulometría por medio del ensayo de Hidrometría

En cumplimiento con la norma MTC E109, el ensayo exige que, durante el proceso de granulometría, más de la mitad de la muestra evaluada supere el tamiz 200 como condición obligatoria para su validación. Solo al cumplir esta condición, el procedimiento podrá realizarse. Posteriormente se incluye un compendio de las cifras obtenidas, destacando los porcentajes de material que atravesaron las mallas en las aberturas normalizadas durante la evaluación.

TABLA XV

GRANULOMETRÍA POR ENSAYO DE HIDROMETRÍA

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR ENSAYO DE HIDROMETRÍA					
C-1		C-2		C-3	
D (mm)	% QUE PASA	D (mm)	% QUE PASA	D (mm)	% QUE PASA
0.0405	8.04	0.0438	3.67	0.0362	9.04
0.0296	6.53	0.0318	2.75	0.0266	7.73
0.0212	5.84	0.0228	2.34	0.0195	6.52

0.0155	4.55	0.0165	1.60	0.0143	5.41
0.0124	1.22	0.0122	1.28	0.0106	4.89
0.0092	0.13	0.0088	0.98	0.0076	4.40
0.0065	0.13	0.0063	0.48	0.0056	3.06
0.0046	0.13	0.0046	0.10	0.0041	2.67
0.0032	0.13	0.0032	0.10	0.0030	1.34
0.0026	0.13	0.0026	0.10	0.0025	0.82
0.0019	0.13	0.0019	0.10	0.0019	0.23
0.0013	0.13	0.0013	0.10	0.0013	0.23

Fuente: Propia

En la Tabla XV se presentan las cifras del estudio granulométrico por hidrometría de tres muestras de suelo (C-1, C-2, C-3), donde los diámetros de partículas oscilan entre 0.0405 mm y 0.0013 mm, con porcentajes acumulados que varían desde 9.04% (C-3) hasta 0.10% (C-2). La muestra C-3 destaca por su mayor contenido de material fino, mientras que C-2 registra los valores más bajos. En diámetros inferiores a 0.0092 mm, los porcentajes se estabilizan cerca de 0.10–0.23%, indicando baja presencia de arcillas coloidales. Se categorizan los terrenos como limos y arcillas con practicad reducida (ML/CL), con un potencial moderado de expansión que sugiere riesgos de estabilidad en obras civiles, recomendándose técnicas de compactación o estabilización química para su uso como subrasante en zonas con variaciones de humedad.

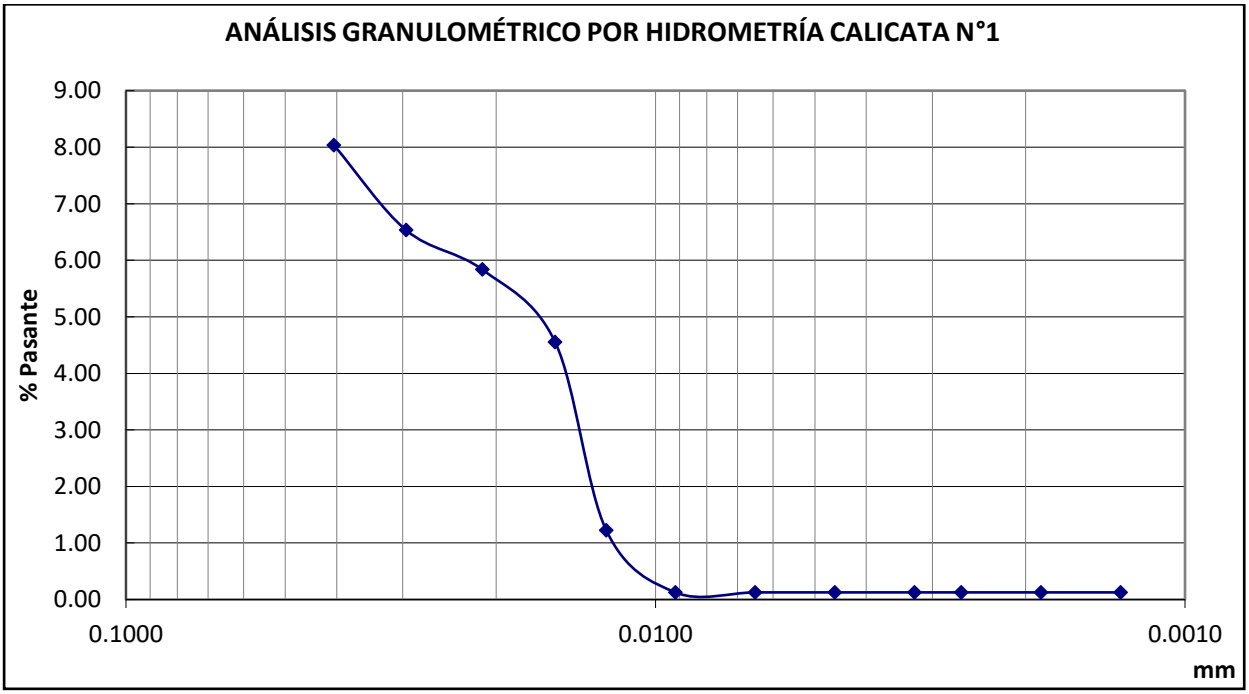


Fig. 33 Curva granulométrica de calicata N°1 por medio del ensayo hidrométrico. Fuente: Propia

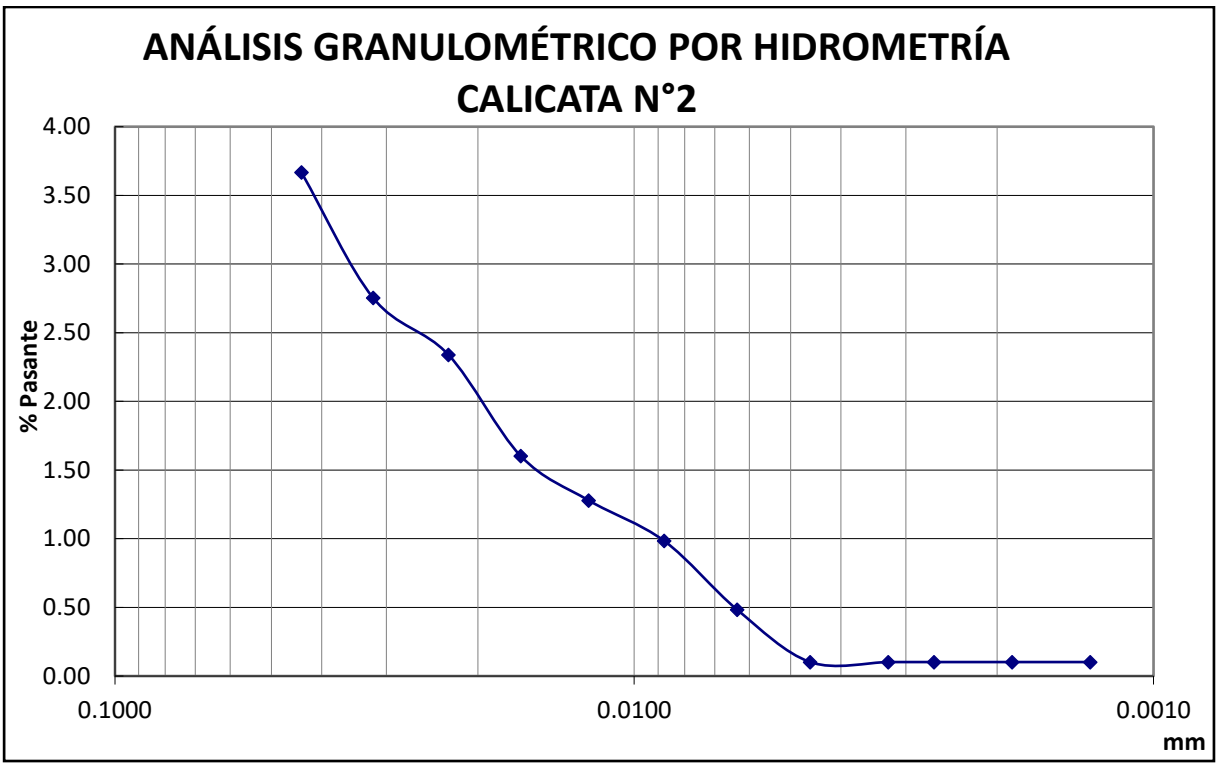


Fig. 34 Curva granulométrica de calicata N°2 por medio del ensayo hidrométrico. Fuente: Propia

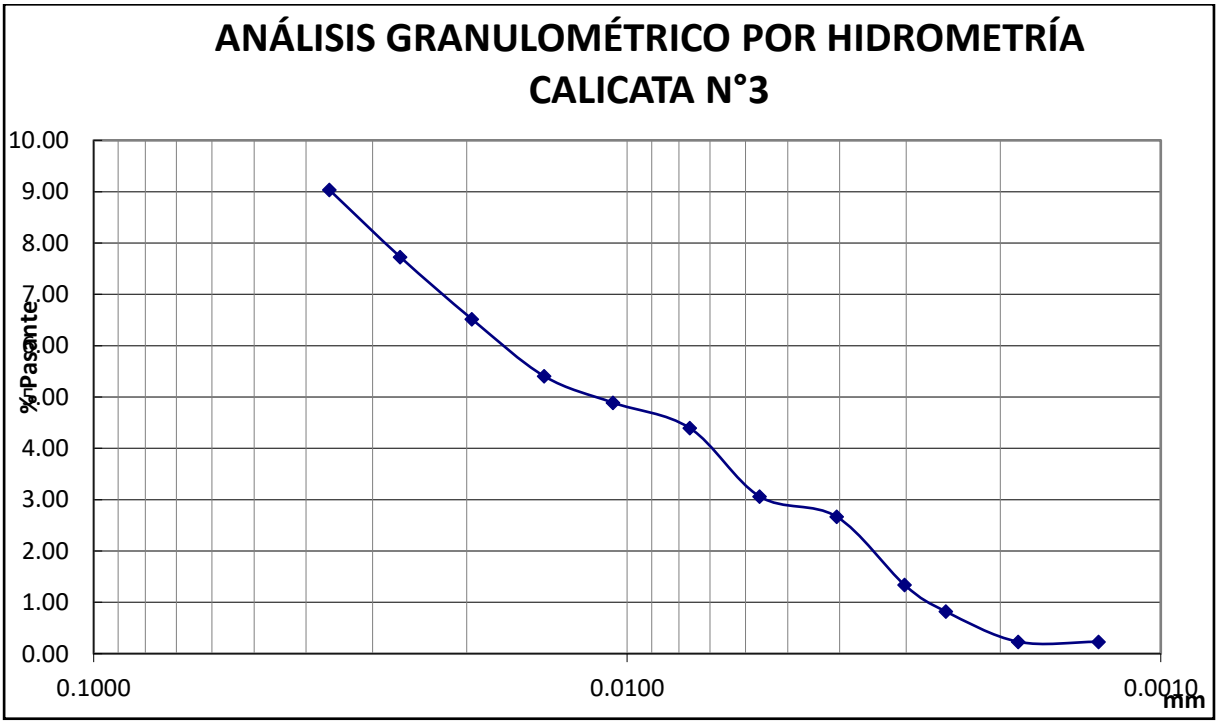


Fig. 35 Curva granulométrica de calicata N°3 por medio del ensayo hidrométrico. Fuente: Propia

En las figuras 33, 34 y 35 se aprecia las curvas del ensayo de granulometría por hidrómetro.

Límites de Atterberg.

Los rangos de Atterberg representan los rangos de humedad donde el suelo altera su consistencia. Su medición se realiza bajo los lineamientos técnicos de las normas MTC E-110 y MTC E-111.

TABLA XVI
LÍMITES DE ATTERBERG DEL SUELO NATURAL PARA DESCARTE DE CALICATAS

RANGOS CRÍTICOS DE CONSISTENCIA			
EXCAVACIÓN	**LL**	**LP**	**IP**
C-01	51,82%	20,43%	31,38%
C-02	54,12%	24,66%	29,45%
C-03	53,38%	19,60%	33,78%
C-04	51,48%	18,65%	32,33%
C-05	55,76%	16,43%	39,34%

Fuente: Propia

En la Tabla XVI se presentan los límites de Atterberg correspondientes al suelo natural, donde los límites líquidos (LL) superan el 50% en todas las calicatas evaluadas, mientras que los índices de plasticidad (IP) oscilan entre 29.45% y 39.34%. Estos resultados confirman que el suelo corresponde a una arcilla altamente plástica (CH), la cual presenta un comportamiento expansivo y una estabilidad volumétrica limitada. Dichas características lo vuelven inapropiado para su uso como subrasante sin una estabilización o tratamiento previo.

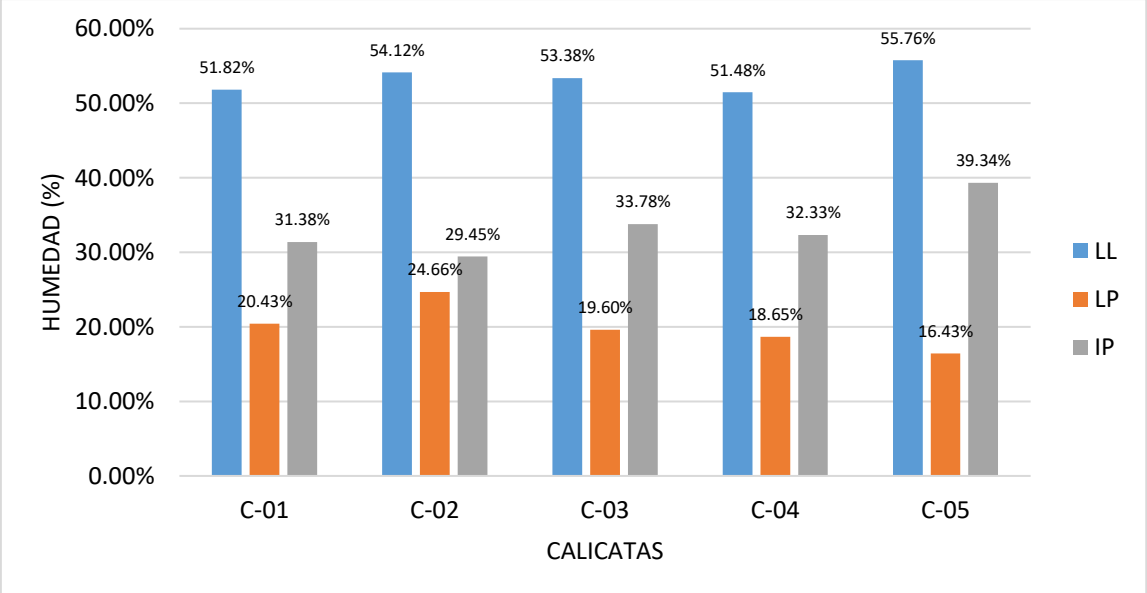


Fig. 36 Límites de Atterberg del suelo natural para descarte de calicatas. Fuente: Propia

En la figura 36 se deduce que los suelos analizados en las calicatas corresponden a arcillas de plasticidad media, lo que sugiere un contenido de arcilla en proporciones moderadas.

TABLA XVII
CLASIFICACIÓN DE PLASTICIDAD DE ACUERDO CON AL PARAMETRO DE PLASTICIDAD

ÍNDICE DE PLASTICIDAD	PLASTICIDAD	CARACTERÍSTICAS
IP > 20	Alta	Suelos muy arcillosos
IP ≤ 20 IP >7	Media	Suelos Arcillosos
IP < 7	Baja	Suelos poco arcillosos
IP = 0	No plástico (NP)	Suelos exentos de arcilla

Fuente: Propia

En la Tabla XVII se muestra la clasificación de acuerdo a los índices de plasticidad de acuerdo a cada característica del suelo.

Clasificación de los suelos a través del estándar SUCS

En la Tabla XVII se presenta una recopilación de la categorización de los suelos conforme al sistema SUCS. En el presente estudio se empleó la granulometría determinada mediante tamizado, tomando en cuenta los porcentajes de partículas que atraviesan los tamices N°. 4 y N°. 200, junto con las propiedades plásticas particulares de las muestras analizadas.

TABLA XVIII
CATEGORIZACIÓN DE SUELOS SEGÚN EL MÉTODO DE SUCS DEL SUELO NATURAL PARA DESCARTE DE CALICATAS

CATEGORIZACIÓN DE SUELOS BASADA EN EL PROTOCOLO SUCS		
CALICATA	**MUESTRA**	**SUCS**
C-1	M-01	CH-Arcilla con plasticidad elevada
C-2	M-02	CH-Arcilla con plasticidad elevada
C-3	M-03	CH-Arcilla con plasticidad elevada
C-4	M-04	CH-Arcilla con plasticidad elevada
C-5	M-05	CH-Arcilla con plasticidad elevada

Fuente: Propia

La Tabla XVIII muestra la categorización de los suelos bajo el sistema SUCS, donde se identificó el tipo CH (arcilla con plasticidad elevada) en todas las calicatas evaluadas. Dicha clasificación confirma que estos suelos poseen una alta retención de humedad, tendencia a la expansión y resistencia limitada, aspectos que los vuelven inapropiados para funcionar como subrasante sin aplicar métodos de estabilización previos.

Clasificación de los suelos a través del estándar AASHTO

La Tabla XX resume la clasificación de los suelos bajo el estándar AASHTO. El estudio se fundamentó en datos granulométricos derivados del tamizado, evaluando el porcentaje de partículas que pasan por los tamices N°. 4 y N°. 200, así como los atributos plásticos específicos de las muestras analizadas.

TABLA XIX

CATEGORIZACIÓN DE SUELOS SEGÚN EL MÉTODO DE AASHTO DEL SUELO NATURAL PARA DESCARTE DE CALICATAS

CATEGORIZACIÓN DE SUELOS BASADA EN EL PROTOCOLO AASHTO		
EXCAVACIÓN	**MUESTRA**	**AASHTO**
C-1	M-01	A-7-6 (14)
C-2	M-02	A-7-6 (19)
C-3	M-03	A-7-6 (15)
C-4	M-04	A-7-6 (14)
C-5	M-05	A-7-6 (15)

Fuente: Propia

La Tabla XIX expone la categorización de los suelos de acuerdo con el sistema AASHTO, identificándose en todas las calicatas como del tipo A-7-6, con valores de grupo que oscilan entre 14 y 19. Esta categorización revela suelos con altas proporciones de arcilla y una capacidad portante limitada, propios de subrasantes deficientes, que demandan estabilización para garantizar un comportamiento estructural adecuado.

Determinación de presencia de sales

Siguiendo lo establecido en la norma MTC E219, este procedimiento tiene como objetivo cuantificar la concentración de cloruros y sulfatos hidrosolubles presentes en materiales pétreos aplicados en bases estabilizadas y en mezclas de asfalto. Para este fin, se emplean agentes como agua destilada y compuestos químicos, con la finalidad de favorecer el aislamiento de estas sales solubles en medio acuoso.

TABLA XX

TABLA DE PORCENTAJES DE SALES SOLUBLES DEL SUELO NATURAL

PRESNECIA DE SALES SOLUBLES		
CALICATA	ppm	PRESENCIA DE SALES
		%
C-01	3556	0,36%
C-02	1222	0,12%
C-03	6778	0,68%
C-04	4000	0,40%
C-05	4556	0,46%

Fuente: Propia

La Tabla XX presenta las proporciones de sales solubles presentes en el suelo natural, cuyos valores oscilan entre el 0.12% y el 0.68%. Estos hallazgos señalan una presencia moderada de sales en ciertas calicatas, con la mayor concentración observada en C-03 (0.68%). Aunque los niveles críticos no son excedidos, las variaciones observadas apuntan a posibles afectaciones en la integridad estructural del suelo y la vida útil de los materiales, aspectos clave a abordar mediante técnicas de estabilización, como la inclusión de Corchorus capsularis.

Ensayo Proctor Modificado aplicado a suelos naturales.

Este estudio, efectuado bajo los lineamientos de la norma MTC E-115, busca definir la proporción adecuada de humedad (%) y la densidad seca óptima (g/cm³), valores críticos donde el terreno alcanza su máxima capacidad resistencia a la carga y estabilidad estática. Con este propósito, se empleó un método de compactación "A", cuyos resultados se exponen en la tabla XXI, elaborada con los datos obtenidos de las cinco calicatas evaluadas.

TABLA XXI

PROCTOR MODIFICADO DE SUELO NATURAL PARA DESCARTE DE CALICATAS

P. MODIF.			
EXVACACIÓN	MUESTRA	DENSIDAD SECA ÓPTIMA	PROPORCIÓN ADECUADA DE HUMEDAD
		(gr/cm3)	(%)
C-01	M-01	2,008	15,40
C-02	M-02	2,025	16,60
C-03	M-03	2,095	14,10
C-04	M-04	2,112	12,20
C-05	M-05	1,995	16,25

Fuente: Propia

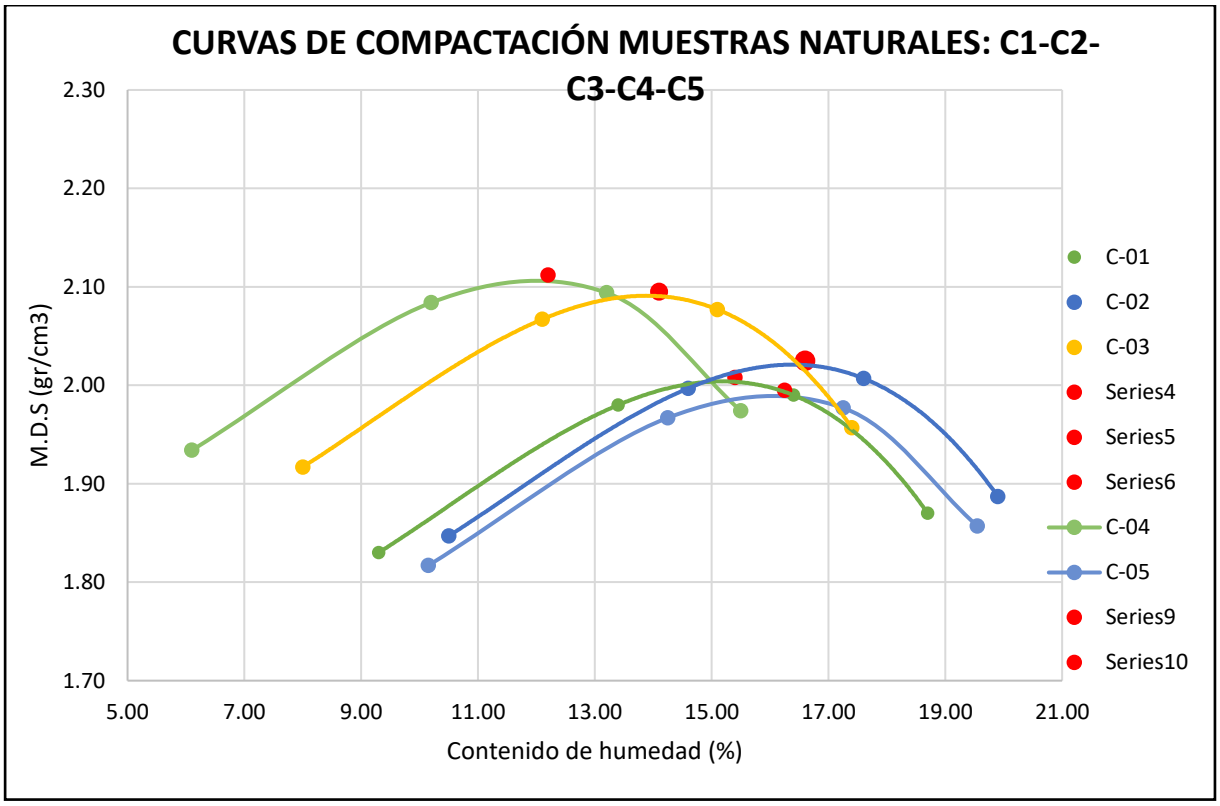


Fig. 37 Curva de compactación correspondiente a suelos en estado natural. Fuente: Propia

La Tabla XXI y figura 37 expone los datos recopilados del P. Modif. en suelos conservados en su condición original, donde la densidad seca óptima se ubica entre 1.995 y 2.112 g/cm³, y la humedad óptima varía de 12.20% a 16.60%. Estos parámetros reflejan que el suelo demanda in manejo equilibrado de la humedad para alcanzar su máxima compactación, un comportamiento típico de arcillas de alta plasticidad (CH según el sistema SUCS), asociado a su capacidad de retención hídrica y deformabilidad bajo carga. Esto intensifica la necesidad de estabilización para optimizar su comportamiento como subrasante.

Índice de Capacidad de Soporte (CBR, por sus siglas en inglés).

Los análisis CBR realizados en las excavaciones seleccionadas quedan reflejados en la tabla XXII, evaluando penetraciones de 2.54 cm y 5.08 cm bajo condiciones del 95% y 100% de la densidad seca óptima (MDS).

TABLA XXII

SÍNTESIS DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS DEL CBR DE SUELO NATURAL PARA DESCARTE DE CALICATAS

CALICATA	MUESTRA	CBR
		Penetración 2,54 cm

		Al 95% de M.D.S.	Al 100% de M.D.S.
C-01	M-01	2,00%	2,00%
C-02	M-02	3,00%	4,00%
C-03	M-03	5,00%	6,00%
C-04	M-04	4,00%	4,00%
C-05	M-05	3,00%	3,00%

Fuente: Propia

En la Tabla XXII y figura 38 y 39 se detallan las cifras del experimento de CBR, evidenciando una capacidad de carga reducida en los suelos evaluados, con valores entre 2% y 7%. Estos porcentajes reflejan que los materiales presentan una calidad insuficiente para su uso como subbase en vías, debido a su baja resistencia estructural. Se visualiza que la compactación al 100% de la densidad seca óptima (M.D.S.) incrementa de manera notable la capacidad de soporte en todas las muestras evaluadas, lo cual enfatiza la relevancia de un proceso de compactación óptimo para mejorar la capacidad de carga y estabilidad del suelo. Además, los valores del CBR tienden a ser mayores con una penetración más profunda (5,08 cm), lo que sugiere un ligero aumento de resistencia en capas más profundas. Entre las calicatas, se identifican diferencias notables: C-03 y C-04 presentan los mejores resultados, mientras que C-01 muestra la menor capacidad portante.

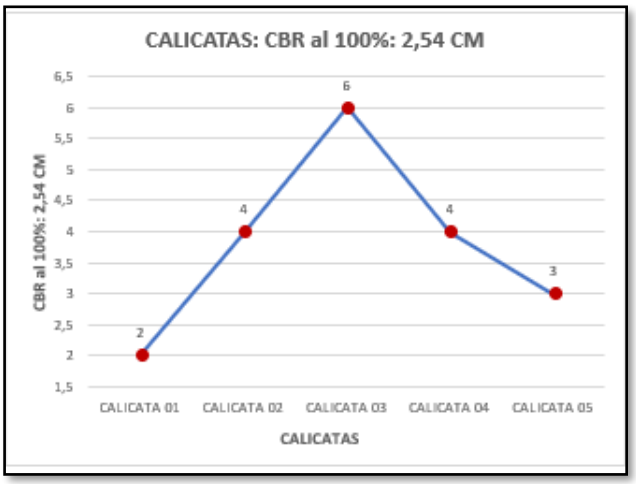


Fig. 38 CBR al 100% de las 5 excavaciones. Fuente: Propia

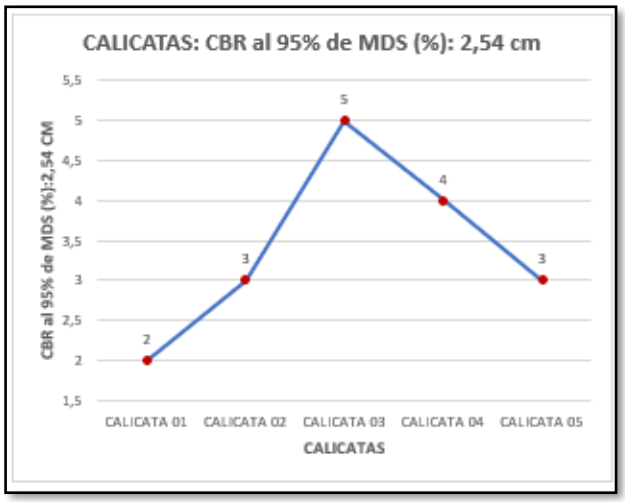


Fig. 39 CBR al 95% de las 5 excavaciones. Fuente: Propia

Por ende, debido a estos resultados las calicatas seleccionadas fueron C-1, C-2 y C-3, para la continuación de la investigación, ya que la C-1 tiene los valores más bajos, la C-2 tiene valores regulares y C-3 presenta mejores valores en el CBR.

Resultados de Calicatas Seleccionadas.

Ensayo Proctor Modificado aplicado a suelos naturales procedentes de calicatas seleccionadas.

La Tabla XXIII muestra los datos de los ensayos de compactación P. modif. realizados mediante el método "A", correspondientes a las tres

TABLA XXIII
P. MODIF. DE LAS CALICATAS SELECCIONADAS

Proctor Modificado			
EXCAVACIÓN	**MUESTRA**	**DENSIDAD SECA ÓPTIMA**	**PROPORCIÓN ADECUADA DE HUMEDAD**
		(gr/cm3)	(%)
C-01	M-01	2,017	14,00
C-02	M-02	2,002	15,33
C-03	M-03	2,053	14,57

Fuente: Propia

La Tabla XXIV y figura 40 comparte los datos derivados del método de compactación Proctor Modificado en las calicatas seleccionadas, donde se registra una densidad seca óptima entre 2.002 y 2.053 g/cm³ y una proporción adecuada de humedad que varía del 14.00% al 15.33%.

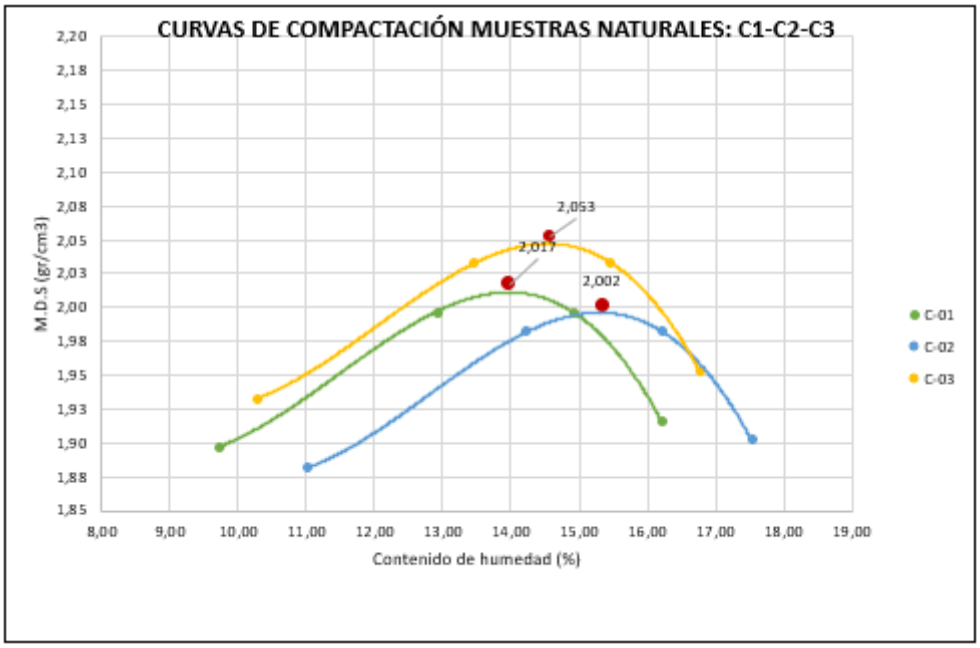


Fig. 40 Curvas de compactación de excavaciones seleccionadas. Fuente: Propia

Estos valores señalan un óptimo potencial de compactación, pese a que el tipo de suelo continúa siendo arcilloso, lo que exige una estabilización para optimizar su rendimiento como subrasante.

CBR de las pruebas naturales de calicatas seleccionadas

La tabla XXIV muestra los valores generados por los análisis CBR realizados en cada zanja de exploración (calicata), considerando penetraciones de 2.54 cm y 5.08 cm, tanto al 95% como al 100% de la densidad seca óptima (MDS).

TABLA XXIV
RESULTADOS DE CBR DE C-1 DE SUELO NATURAL

CALICATA	MUESTRA	CBR	
		Penetración 2,54 cm	
		Al 95% de M.D.S.	Al 100% de M.D.S.
C-01	VUELTA 1	3,00%	4,00%
	VUELTA 2	3,00%	4,00%
	VUELTA 3	3,00%	4,00%
	VUELTA 4	3,00%	4,00%

	VUELTA 5	3,00%	4,00%
PROMEDIO		3,00%	4,00%

Fuente: Propia

La Tabla XXV expone los hallazgos del ensayo CBR aplicado al terreno en estado no alterado de C-01, resultando en valores promedio de 3.00% y 4.00% a una penetración de 2.54 cm, y de 4.00%. Estos hallazgos evidencian una capacidad de soporte reducida, una característica inherente a Los suelos arcillosos con plasticidad elevada (clasificación CH según el sistema SUCS), lo que subraya la necesidad de implementar un tratamiento estabilizador como la incorporación de Corchorus capsularis.

TABLA XXV

RESULTADOS DE CBR DE C-2 DE SUELO NATURAL

CALICATA	MUESTRA	CBR	
		Penetración 2,54 cm	
		Al 95% de M.D.S.	Al 100% de M.D.S.
C-02	VUELTA 1	3,00%	4,00%
	VUELTA 2	2,00%	4,00%
	VUELTA 3	3,00%	4,00%
	VUELTA 4	3,00%	4,00%
	VUELTA 5	2,00%	4,00%
PROMEDIO		2,60%	4,00%

Fuente: Propia

La Tabla XXV presenta los hallazgos del ensayo CBR aplicado al terreno en estado no alterado de C-02, resultando en valores promedio de 2.60% y 4.00% para la penetración de 2.54 cm, y de 3.40%. Estos valores corroboran una capacidad portante reducida del suelo, lo cual intensifica la necesidad de optimizar sus propiedades mecánicas a través de la estabilización con Corchorus capsularis.

TABLA XXVI

RESULTADOS DE CBR DE C-3 DE SUELO NATURAL

CALICATA	MUESTRA	CBR	
		Penetración 2,54 cm	
		Al 95% de M.D.S.	Al 100% de M.D.S.
C-03	VUELTA 1	3,00%	4,00%
	VUELTA 2	4,00%	5,00%
	VUELTA 3	4,00%	5,00%

	VUELTA 4	4,00%	6,00%
	VUELTA 5	5,00%	5,00%
PROMEDIO		4,00%	5,00%

Fuente: Propia

La Tabla XXVI expone los hallazgos del ensayo CBR aplicado al terreno en estado no alterado de C-03, resultando en promedio de 4.00% y 5.00% para la penetración de 2.54 cm, y de 7.20% y 9.00%. A pesar de que estos valores son marginalmente superiores a los de otras calicatas, aún evidencian una resistencia reducida, una característica propia de suelos de elevada plasticidad, lo que hace relevante su estabilización con Corchorus capsularis.

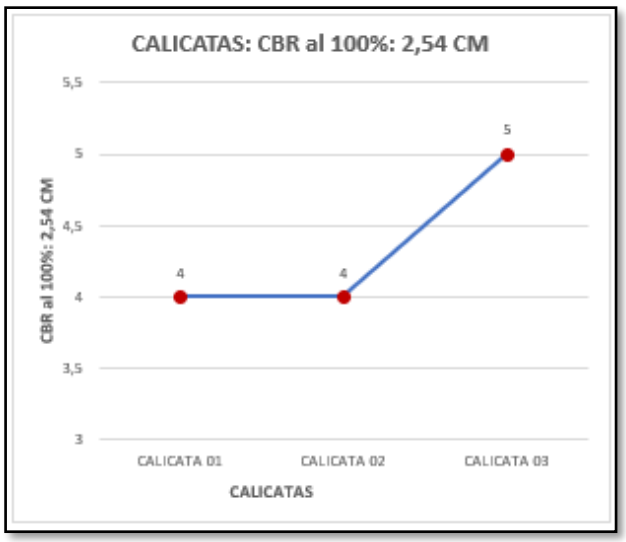


Fig. 41 Resultados del CBR al 100% de las 3 calicatas seleccionadas con un promedio de 5 vueltas. Fuente: Propia

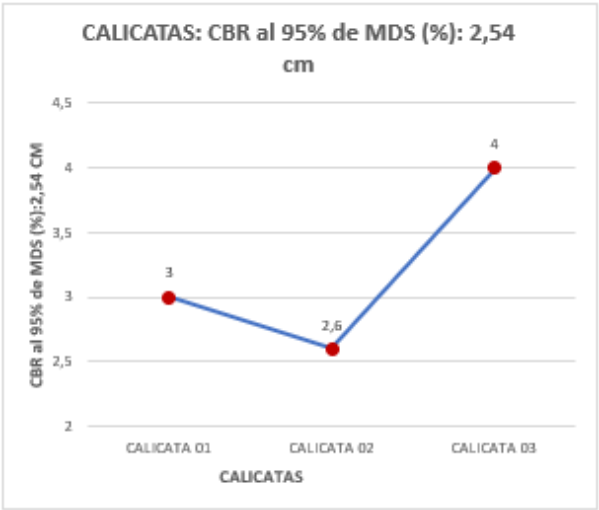


Fig. 42 Resultados del CBR al 95% de las 3 calicatas seleccionadas con un promedio de 5 vueltas. Fuente: Propia

Espectrometría por Fluorescencia de Rayos X (XRF)

A continuación se muestra la constitución química de Corchorus capsularis:

COMPOSICION QUIMICA	RESULTADOS (%)	METODO UTILIZADO
CELULOSA	73	Espectrometría de fluorescencia de rayos x
HEMICELULOSA	18	
LIGNINA	11	

Fig. 43 Espectrometría por Fluorescencia (XRF) de CC. *Fuente: Propia*

La constitución química del Corchorus capsularis exhibe un elevado contenido de celulosa (73%), dándole así una notable resistencia y rigidez, lo que lo posiciona como un material óptimo para el refuerzo de materiales El 18% de hemicelulosa contribuye a la flexibilidad, mientras que el 11% de lignina favorece la cohesión y la longevidad. Esta combinación promueve la optimización del rendimiento mecánico cuando se emplea como aditivo en mezclas de construcción.

Ensayos experimentales con la adición de Corchorus capsularis.

Límites de Atterberg C-01: SN + CC (%)

En esta sección se exponen las cifras calculadas de los límites de Atterberg del material en condiciones del terreno no alterada de C-01, añadiendo porcentajes correspondientes de Corchorus capsularis.

TABLA XXVII
RESULTADOS DE LÍMITES DE ATTERBERG C-01: SN+CC%

C-01			
COMBINACIÓN DE PROPORCIONES	**LL**	**LP**	**IP**
100 % Suelo Natural	51.82 %	20.43 %	31.38 %
99.5% SN + 0.5% CC	48.68 %	26.64 %	22.05 %
98.5% SN + 1.5% CC	47.48 %	34.44 %	13.04 %
97.5% SN + 2.5% CC	51.44 %	23.65 %	27.79 %
96.5% SN + 3.5% CC	56.66 %	35.36 %	21.30 %

Fuente: Propia

La Tabla XXVII demuestra que el terreno en condiciones no alteradas, presenta un parámetro de IP del 31.38%, lo que le otorga la clasificación de suelo de alta plasticidad, es decir, de alto

grado de arcillosidad. Con la aplicación de un 0.5 % y 3.5 % de fibra de Corchorus Casularis (CC), el IP se reduce a 22.05 % y 21.30 % respectivamente. No obstante, se mantiene por encima del límite de 20%, manteniendo su clasificación como suelo de alta arcilla. La única dosificación que disminuye el IP por debajo del 20% es la del 1.5 % de CC (13.04 %), lo cual indica una mejora en la plasticidad, lo que lo ubica dentro de la categoría de suelos con plasticidad media. Sin embargo, con un incremento del 2.5 % de CC, el IP retorna a 27.79 %, lo que confirma que, en la mayoría de las situaciones, el suelo C-01 continúa exhibiendo un comportamiento altamente plástico.

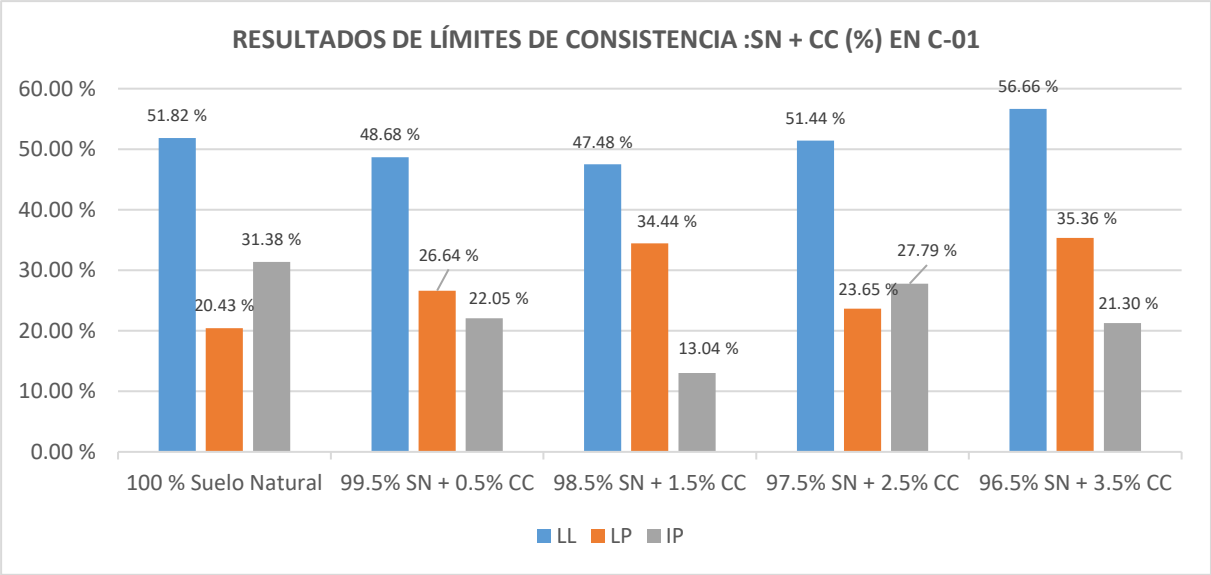


Fig. 44 Parámetros obtenidos de los Límites de Atterberg: SN+CC% en C-01. Fuente: Propia

Límites de Atterberg C-02: SN + CC (%)

En la siguiente sección se detallan las cifras obtenidas de los límites de Atterberg correspondientes al suelo en estado natural de la calicata C-2, añadiendo porcentajes correspondientes de Corchorus capsularis.

TABLA XXVIII

RESULTADOS DE LÍMITES DE CONSISTENCIA: C-02: SN+CC%

C-02			
COMBINACIÓN DE PROPORCIONES	**LL**	**LP**	**IP**
100 % Suelo Natural	54.12 %	24.66 %	29.45 %
99.5% SN + 0.5% CC	41.50 %	19.18 %	22.32 %

98.5% SN + 1.5% CC	50.88 %	22.69 %	28.19 %
97.5% SN + 2.5% CC	35.79 %	16.69 %	19.10 %
96.5% SN + 3.5% CC	44.66 %	22.03 %	22.63 %

Fuente: Propia

La Tabla XXVIII muestra el comportamiento de los límites de Atterberg del suelo C-02 tras la incorporación de distintas proporciones de fibra como material estabilizador. El límite líquido (LL) muestra una tendencia decreciente generalizada, reduciéndose desde un valor inicial de 54.12% en el suelo natural hasta alcanzar un mínimo de 35.79% al incorporar 2.5% de fibra. El límite plástico (LP) presenta una reducción no uniforme. Si bien el índice de plasticidad (IP) muestra un descenso, este supera el 20% en la mayoría de las proporciones de mezcla, esto evidencia que el terreno mantiene una elevada plasticidad en su comportamiento, según los parámetros que se analizaron, es decir, un carácter predominantemente arcilloso. Únicamente mediante la dosificación del 2.5 % de CC, el IP se eleva a 19.10 %, lo que lo clasifica en la categoría de plasticidad intermedia.

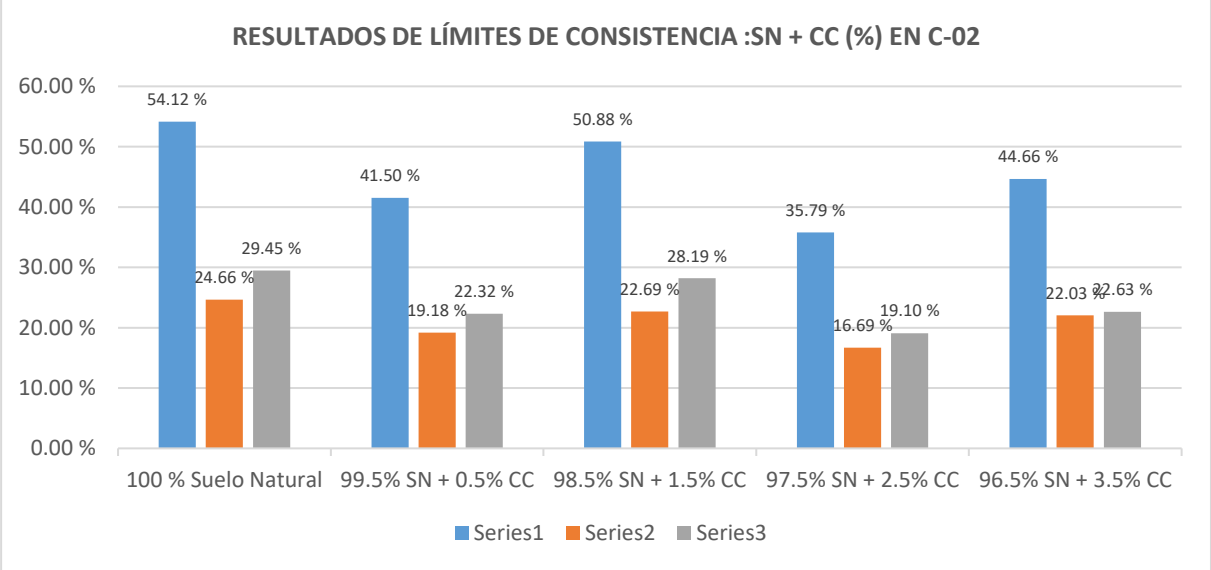


Fig. 45 Parámetros obtenidos de los Límites de Atterberg: SN+CC% en C-02. *Fuente: Propia*

Esto indica que, a pesar de que la incorporación de CC disminuye parcialmente la plasticidad, el suelo mantiene características predominantemente arcillosas en casi todas las dosificaciones evaluadas.

Límites de Atterberg C-03: SN + CC (%)

En la siguiente sección se detallan las cifras obtenidas de los límites de Atterberg correspondientes al suelo en estado natural de la calicata C-3, añadiendo porcentajes correspondientes de Corchorus capsularis.

TABLA XXIX
RESULTADOS DE LÍMITES DE CONSISTENCIA: C-03: SN+CC%

C-03			
COMBINACIÓN DE PROPORCIONES	**LL**	**LP**	**IP**
100 % Suelo Natural	53.38 %	19.60 %	33.78 %
99.5% SN + 0.5% CC	55.12 %	19.66 %	35.45 %
98.5% SN + 1.5% CC	48.73 %	24.59 %	24.14 %
97.5% SN + 2.5% CC	40.52 %	18.00 %	22.51 %
96.5% SN + 3.5% CC	46.43 %	26.46 %	19.97 %

Fuente: Propia

Como se aprecia en la tabla XXIX, el material analizado en su condición inalterada alcanza un IP de 33.78%, valor que, bajo el estándar SUCS, lo ubica en el grupo de arcillas con plasticidad elevada. Sin embargo, al agregar 0.5% de fibra de Corchorus Capsularis (CC), el IP aumenta a 35.45%, lo que mantiene al material en la clasificación de suelos de alta plasticidad, típicos de composiciones arcillosas dominantes. Desde el 1.5 % de CC, el IP disminuye de manera gradual: 24.14 % (1.5 %), 22.51 % (2.5 %) y finalmente 19.97 % con 3.5 % de CC. Esta última dosificación consigue reducir la plasticidad a un nivel medio, de acuerdo con la clasificación de plasticidad (IP ≤ 20 %).

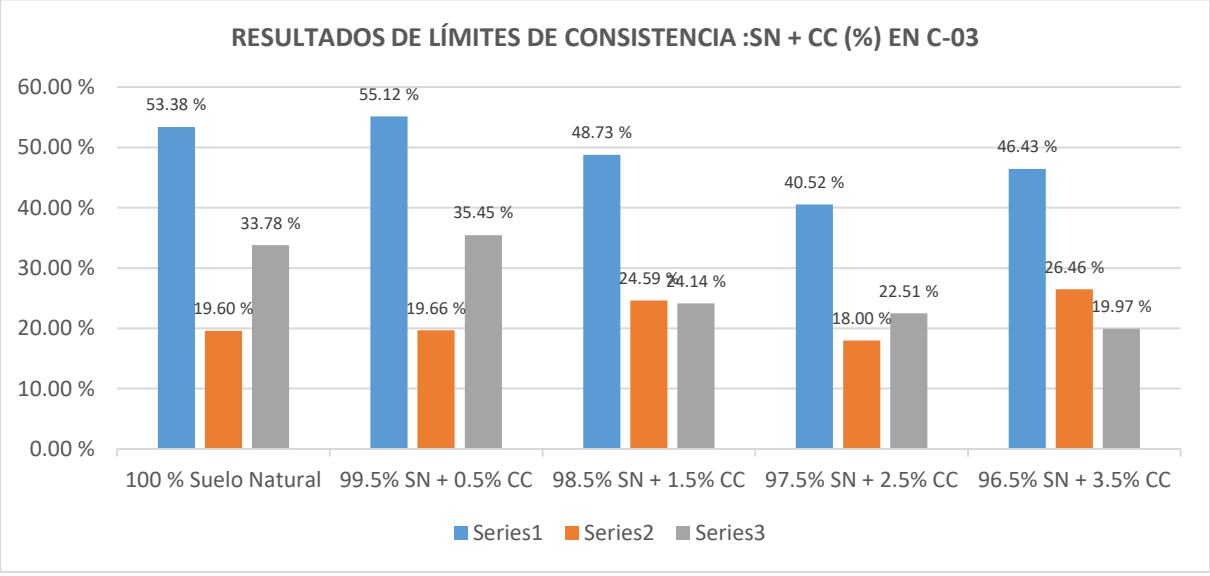


Fig. 46 Parámetros obtenidos de los Límites de Consistencia (Atterberg): SN+CC% en C-03.
Fuente: Propia

En consecuencia, se constata que únicamente la dosificación más elevada ensayada disminuye de manera efectiva la plasticidad del suelo C-03.

P. MODIFICADO C-01: SN +CC (%)

Los datos derivados de este ensayo, correspondientes a las diferentes mezclas analizadas en la calicata 01, que están constituidas por suelo natural y porcentajes ascendentes de fibra de Corchorus Capsularis (CC).

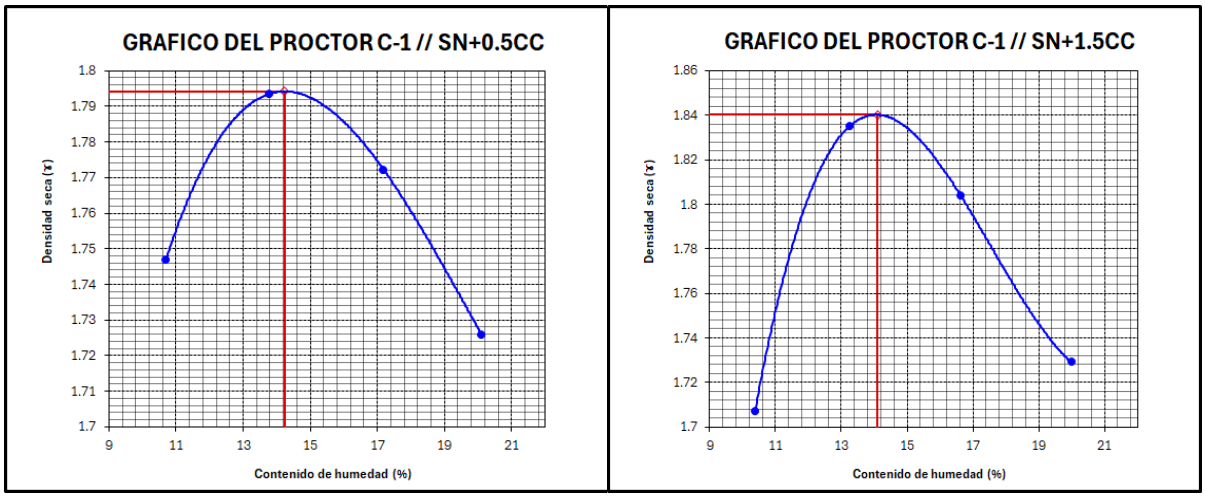
TABLA XXX

RESULTADOS DE P. MODIF: C-01: SN+CC%

PROCTOR C-01: SN +CC		
COMBINACIÓN DE PROPORCIONES	C-01	
	M.D.S (gr/cm3)	O.C.H (%)
100 % Suelo Natural	2.008	15.4
99.5% SN + 0.5% CC	1.794	14.23
98.5% SN + 1.5% CC	1.84	14.1
97.5% SN + 2.5% CC	1.795	13.77
96.5% SN + 3.5% CC	1.781	15.05

Fuente: Propia

En la Tabla XXXI y Fig. 47 se observa el desempeño del suelo en su condición original C-01 empleando la aplicación de progresiva de fibra de Corchorus Capsularis (CC) aplicando el procedimiento la densidad seca óptima (M.D.S.) experimenta una leve disminución conforme aumenta la proporción de fibra, pasando de 2.008 g/cm3 en el suelo en su condición original a 1.781 g/cm3 con un 3.5% de CC, lo que sugiere una disminución en la compactibilidad del material a medida que se incorpora un mayor volumen de aditivo. Además, el contenido óptimo de humedad (O.C.H) exhibe un comportamiento fluctuante, oscilando entre el 13.77% y el 15.40%, sin una tendencia definida.



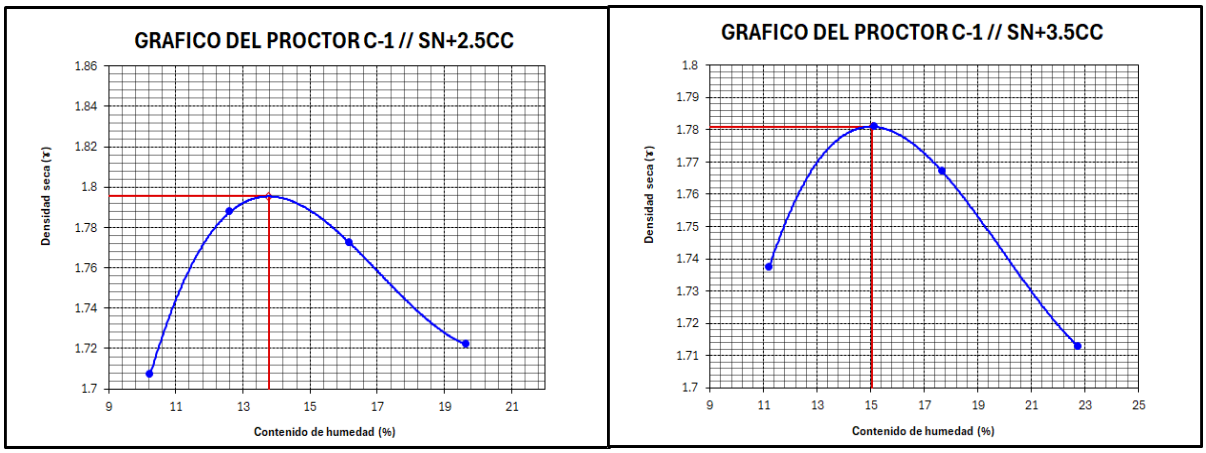


Fig. 47 Resultados de Proctor Modificado : SN+CC% en C-01. Fuente: Propia

Esto evidencia que la inclusión de fibra puede influir de manera leve en la proporción de agua presente requerida A fin de conseguir la compactación ideal en el terreno tratado.

P. MODIFICADO C-02: SN +CC (%)

Los datos derivados de este ensayo, correspondientes a las diferentes mezclas analizadas en la calicata 02, que están constituidas por suelo natural y porcentajes ascendentes de fibra de Corchorus Capsularis (CC).

TABLA XXXI

RESULTADOS DE P. MODIF: C-02: SN+CC%

PROCTOR C-02: SN +CC		
COMBINACIÓN DE PROPORCIONES	**C-02**	
	M.D.S (gr/cm3)	**O.C.H (%)**
100 % Suelo Natural	2.025	16.6
99.5% SN + 0.5% CC	1.794	17.55
98.5% SN + 1.5% CC	1.857	13.4
97.5% SN + 2.5% CC	1.792	14.73
96.5% SN + 3.5% CC	1.845	13.92

Fuente: Propia

La Tabla XXXII y Fig 48 exponen los hallazgos del ensayo Proctor Modificado aplicado al suelo C-02, utilizando diversas dosificaciones de fibra de Corchorus Capsularis (CC). Se constata que la densidad seca óptima (M.D.S.) experimenta una reducción en contraste con el suelo en su condición original (2.025 g/cm3), particularmente en las dosificaciones de 0.5% y 2.5% de CC, que presentan cifras de 1.794 $g/cm3$ y 1.792 $g/cm3$ respectivamente. Sin embargo, se registra una recuperación marginal en otras dosis. Respecto al porcentaje óptimo

de agua en el suelo (O.C.H), se observa una fluctuación significativa, pasando de 17.55% a 13.40% al cambiar de 0.5% a 1.5% de CC, y manteniéndose entre 13.92% y 14.73% en las dosificaciones subsiguientes.

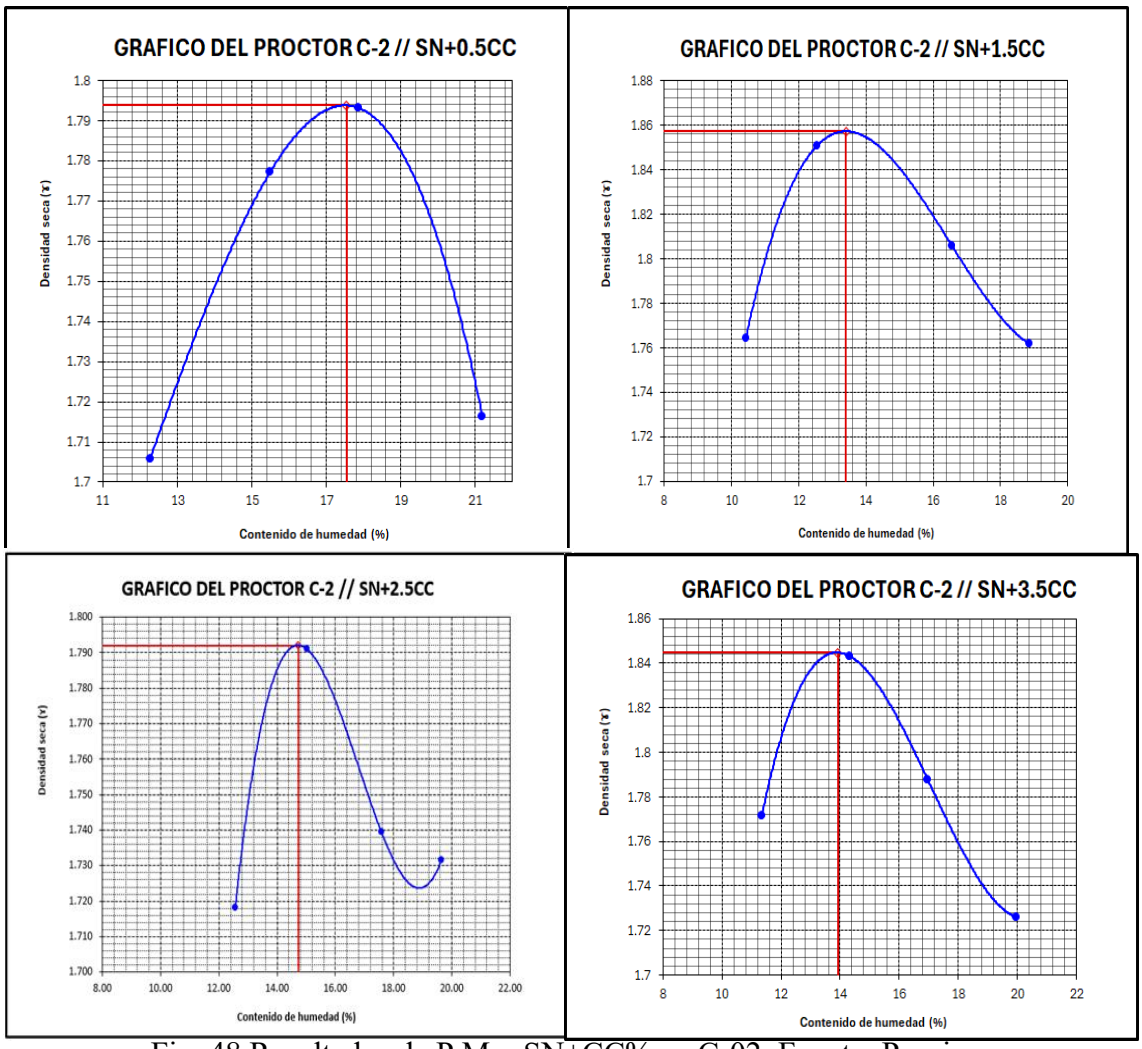


Fig. 48 Resultados de P.M. : SN+CC% en C-02. Fuente: Propia

Esta observación indica que la incorporación de fibra incide en facultad de retención de agua en el material y la compactación del suelo, sin una tendencia lineal claramente definida.

P. MODIFICADO C-03: SN +CC (%)

Los datos derivados de este ensayo, correspondientes a las diferentes mezclas analizadas en la calicata 03, que están constituidas por suelo natural y porcentajes ascendentes de fibra de Corchorus Capsularis (CC).

TABLA XXXII

RESULTADOS DE P. MODIF.: C-03: SN+CC%

PROCTOR C-03: SN +CC	
DOSIFICACION	**C-03**

	M.D.S (gr/cm3)	O.C.H (%)
100 % Suelo Natural	2.095	14.1
99.5% SN + 0.5% CC	1.844	15.23
98.5% SN + 1.5% CC	1.899	13.69
97.5% SN + 2.5% CC	1.869	13.05
96.5% SN + 3.5% CC	1.816	12.23

Fuente: Propia

La Tabla XXXIII y Fig 49 presentan los hallazgos del ensayo Proctor Modificado aplicado al suelo C-03, lo que demuestra una disminución progresiva en la densidad seca óptima (M.D.S.), en conjunto de un incremento en el porcentaje de fibra de Corchorus Capsularis (CC), pasando de 2.095 g/cm3 en el suelo en estado original a 1.816 g/cm3 con un 3.5% de CC. Esta disminución señala una reducción en la compactibilidad del terreno tratado. En relación con el nivel óptimo de agua en el suelo (O.C.H), también se observa una tendencia decreciente desde 15.23% a 12.23%.

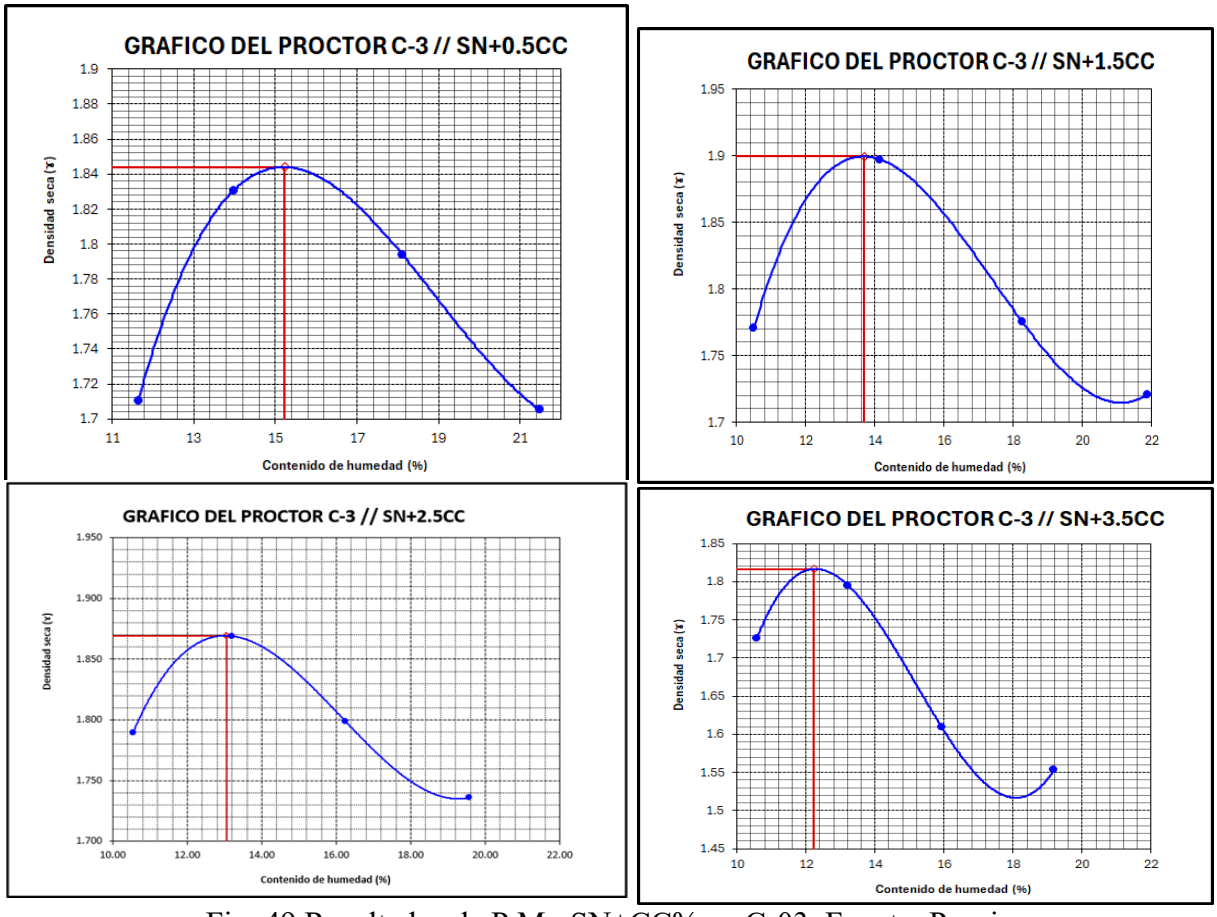


Fig. 49 Resultados de P.M : SN+CC% en C-03. Fuente: Propia

En las gráficas se refleja que el suelo requiere una proporción reducida de agua para lograr su compactación máxima conforme se incrementa el contenido de fibra.

CBR C-01: SN+ % CC (%)

En la siguiente sección se exponen los valores generados por el ensayo de capacidad portante (CBR). para las diversas dosificaciones de calicata C-01, que están constituidas por suelo en estado natural y porcentajes ascendentes de fibra de Corchorus Capsularis (CC).

TABLA XXXIII

RESULTADOS DE CBR A 2.54 CM: C-01: SN+CC%

VALORES DEL ENSAYO DE CAPACIDAD PORTANTE (CBR) CON LA INCLUSIÓN DE CC		
CALICATA 01	**CBR al 95% (%): 2.54 cm**	**CBR al 100%: 2.54 cm**
100 % Suelo Natural	3.00 %	4.00 %
99.5% SN + 0.5% CC	18.00 %	22.20 %
98.5% SN + 1.5% CC	21.78 %	26.67 %
97.5% SN + 2.5% CC	34.80 %	50.70 %
96.5% SN + 3.5% CC	39.10 %	47.20 %

Fuente: Propia

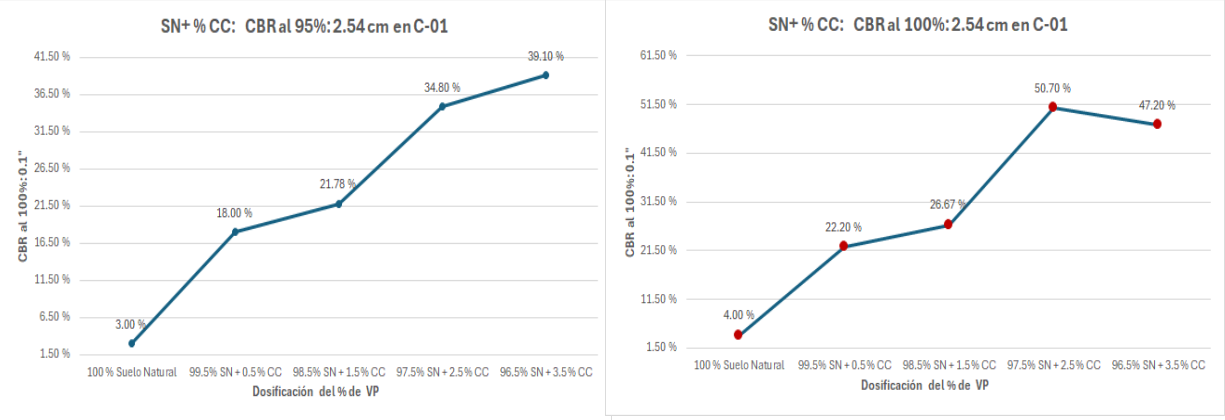


Fig. 50 Resultados de CBR a 2.54 cm : SN+CC% en C-01. Fuente: Propia

La Tabla XXXIV y Fig 50 evidencian un aumento significativo en los parámetros del CBR (California Bearing Ratio) a 2.54 cm a medida que se eleva el porcentaje de fibra de Corchorus Capsularis (CC) en el experimento de la calicata 01 el terreno en su condición natural muestra valores disminuidos de resistencia, oscilando entre el 3.00% y el 95% de los MDS y el 4.00% hasta el 100%. No obstante, al integrar el Control de Calidad (CC), los valores experimentan un incremento progresivo, alcanzando un CBR de 39.10% (95%) y 47.20% (100%) con una adición del 3.5%. Este hallazgo señala que la aplicación de Cemento Compuesto (CC) aumenta significativamente la capacidad de sustentación del terreno, lo que lo hace un material más adecuado para su uso como subrasante en estructuras pavimentadas.

CBR C-02: SN+ % CC (%)

En la siguiente sección se exponen los valores generados por el ensayo de capacidad portante (CBR). para las diversas dosificaciones de calicata C-02, que están constituidas por suelo en estado natural y porcentajes ascendentes de fibra de Corchorus Capsularis (CC).

TABLA XXXIV
RESULTADOS DE CBR A 2.54 CM: C-02: SN+CC%

VALORES DEL ENSAYO DE CAPACIDAD PORTANTE (CBR) CON LA INCLUSIÓN DE CC		
CALICATA 02	**CBR al 95% (%): 2.54 cm**	**CBR al 100%: 2.54 cm**
100 % Suelo Natural	2.60 %	4.00 %
99.5% SN + 0.5% CC	18.10 %	27.80 %
98.5% SN + 1.5% CC	14.11 %	19.11 %
97.5% SN + 2.5% CC	13.10 %	16.50 %
96.5% SN + 3.5% CC	18.70 %	26.30 %

Fuente: Propia

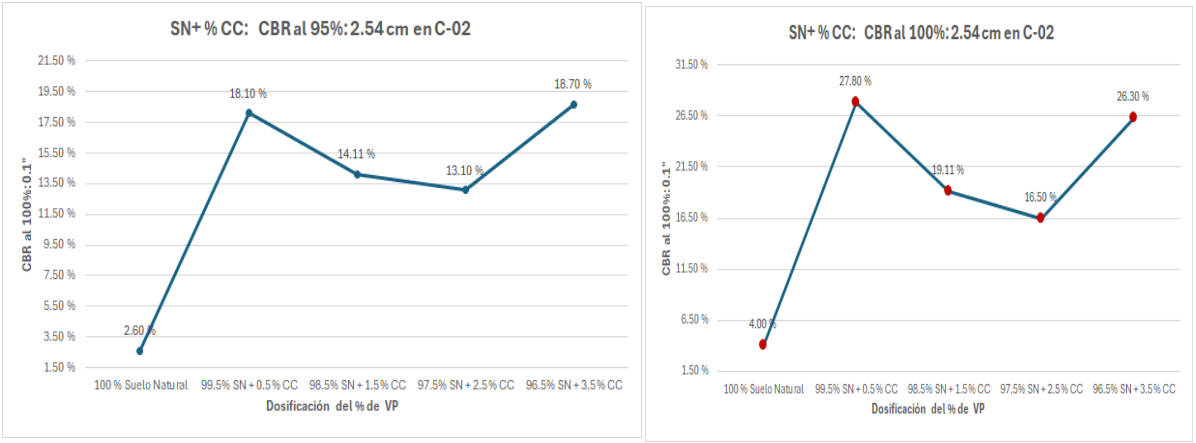


Fig. 51 Resultados de CBR a 2.54 cm : SN+CC% en C-02. Fuente: Propia

La Tabla XXXV y Fig 51 muestran que la incorporación de fibra de Corchorus Capsularis (CC) en el suelo en estado natural de la calicata C-02 optimiza significativamente los valores del CBR a 2.54 cm, particularmente en comparación con el suelo sin tratamiento (2.60% al 95% y 4.00% al 100%), que exhibe una capacidad portante extremadamente reducida. Las dosis con 0.5% y 3.5% de Corchorus Capsularis logran los valores más elevados, con 18.10% y 18.70% del (95%), y 27.80% y 26.30% del (100%) respectivamente, lo que evidencia un impacto positivo de la estabilización. No obstante, se evidencia una reducción en los índices de CBR con las dosificaciones intermedias (1.5% y 2.5%), lo que indica que el porcentaje óptimo de CBR para esta muestra se ubica en los extremos evaluados. De manera colectiva, estos hallazgos sugieren que, mediante una dosificación apropiada, la adición de fibra puede

incrementar de forma relevante la capacidad de soporte del suelo, facilitando su empleo como subrasante.

CBR C-03: SN+ % CC (%)

En la siguiente sección se exponen los valores generados por el ensayo de capacidad portante (CBR). para las diversas dosificaciones de calicata C-03, que están constituidas por suelo en estado natural y porcentajes ascendentes de fibra de Corchorus Capsularis (CC).

TABLA XXXV
RESULTADOS DE CBR A 2.54 CM: C-03: SN+CC%

VALORES DEL ENSAYO DE CAPACIDAD PORTANTE (CBR) CON LA INCLUSIÓN DE CC		
CALICATA 03	**CBR al 95% (%): 2.54 cm**	**CBR al 100%: 2.54 cm**
100 % Suelo Natural	4.00 %	5.00 %
99.5% SN + 0.5% CC	40.20 %	60.10 %
98.5% SN + 1.5% CC	21.30 %	23.70 %
97.5% SN + 2.5% CC	20.90 %	23.50 %
96.5% SN + 3.5% CC	15.80 %	25.30 %

Fuente: Propia

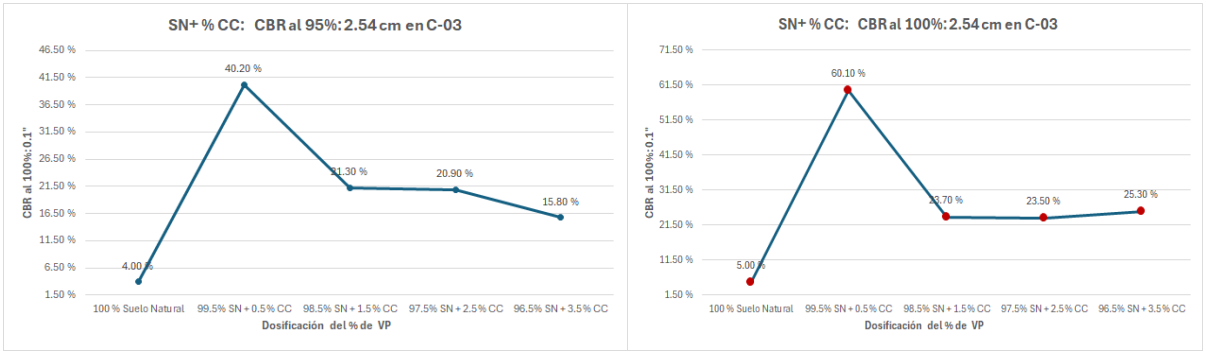


Fig. 52 Resultados de CBR a 2.54 cm : SN+CC% en C-03. Fuente: Propia

La Tabla XXXVI y Fig 52 ponen de manifiesto que la inclusión de fibra de Corchorus Capsularis (CC, se observó una mejora notable en los datos del CBR a 2.54cm en el suelo inalterado de la calicata 3, especialmente cuando se aplicó un 0.5% de CC, lo que resalta su efectividad en la estabilización del terreno estudiado, donde se alcanzan los valores más elevados (40.20% al 95% y 60.10% al 100%) Esta mejora constituye una mejora significativa al contrastar con el suelo en estado natural, que exhibió un valor mínimo de 4.00% y 5.00%, respectivamente. No obstante, al incrementar la dosis de CBR, los valores de CBR tienden a decrecer de manera progresiva, alcanzando sus niveles más bajos con la adición del 3.5%. Estos hallazgos sugieren que una administración reducida de CC, tal como el 0.5%, resulta más eficaz

para potenciar la capacidad portante del material en esta excavación de estudio. Sin embargo, una administración más elevada puede disminuir dicha mejora, probablemente debido a efectos adversos en la compactación o cohesión del terreno.

Incremento del CBR cuantitativamente

Los resultados del ensayo CBR evidencian un incremento significativo en la capacidad portante del suelo al adicionar 0.5% de *Corchorus capsularis*, porcentaje determinado como óptimo. En la Calicata 01, el CBR al 95% pasó de 3.00% (suelo natural) a 18.00%, lo que representa un incremento de 15.00 puntos porcentuales, equivalente a un aumento de 500%; mientras que al 100% se incrementó de 4.00% a 22.20%, es decir, 18.20 puntos porcentuales adicionales (455% de incremento). En la Calicata 02, el CBR al 95% aumentó de 2.60% a 18.10% (incremento de 15.50 puntos, equivalente a 596%), y al 100% de 4.00% a 27.80% (23.80 puntos, equivalente a 595%). Asimismo, en la Calicata 03, el CBR al 95% pasó de 4.00% a 40.20% (incremento de 36.20 puntos, equivalente a 905%), y al 100% de 5.00% a 60.10% (incremento de 55.10 puntos, equivalente a 1102%). Estos resultados demuestran cuantitativamente que la adición del 0.5% de *Corchorus capsularis* mejora de manera sustancial la capacidad portante del suelo arcilloso de alta plasticidad.

Porcentaje de compactación - Evaluación de densidad in situ

TABLA XXXVI

RESULTADOS DE DENSIDAD DE CAMPO-GRADO DE COMPACTACIÓN

DENSIDAD DE CAMPO	MÁXIMA DESNSIDAD SECA (g/cm3)	ÓPTIMO CONTENIDO DE HUMEDAD (%)	GRADO DE COMPACTACIÓN
Muestra patrón	2.057	14.5	96.6
Muestra Patrón	2.057	14.5	96.9
MP+0.5% CC	1.902	13.89	99.2
MP+0.5% CC	1.902	13.89	99.0

Fuente: Propia

Los datos expuestos en Tabla XXXVII demuestran que la adición del 0.5% de Corchorus capsularis (CC) a la muestra de referencia mejoró significativamente el nivel de compactación del suelo, alcanzando valores de 99.0% y 99.2%, en contraste con los valores de 96.6% y 96.9% de la muestra sin aditivos. Este hallazgo señala una optimización en la compactación del suelo a través de la integración del aditivo.

Estudio de DCP

A continuación se muestran los hallazgos del experimento de penetración dinámica realizado en el suelo natural y el suelo tratado con la dosis ideal de CC.

TABLA XXXVII
RESULTADOS DE ENSAYO DPC MUESTRA NATURAL

PENETRÓMETRO DINÁMICO DE CONO
ASTM D 6951

PUNTO:	**1**	**CH**	**Arcilla con plasticidad elevada**
LOCALIZACIÓN			
PESO DEL MARTILLO:	8,0 kg	FECHA:	21/04/2025
FACTOR DEL MARTILLO:	1,0		
CLASIFICACIÓN DEL TERRENO:	CH		
ADICIÓN	Terreno Natural		

Número de golpes acumulado	Número de golpes	% golpes	Penetración acumulada (mm)	Penetración por lectura (mm)	Índice DCP (mm/golpe)	CBR [1] (%)
0	0	0.0	0			
9	9	52.9	100	100	11.1	19.68
13	4	76.5	200	100	25.0	7.94
15	2	88.2	300	100	50.0	3.65
17	2	100.0	400	100	50.0	3.65

Fuente: Propia

La Tabla XXXVIII expone los resultados obtenidos del ensayo con Penetrómetro Dinámico de Cono (DCP) aplicado al suelo en estado natural, clasificado como arcilla de elevada plasticidad (CH) según el estándar ASTM D6951. En el experimento se empleó un martillo de 8 kg, y se

documentó la penetración progresiva del cono conforme se incrementaban los impactos aplicados. Se constata un incremento significativo en el índice DCP a medida que progresa la penetración, alcanzando valores de hasta 50 mm/golpe. Esta conducta manifiesta una elevada capacidad de penetración del cono en el suelo, lo que evidencia una resistencia reducida a la carga. Los valores estimados de CBR, basados en las correlaciones empíricas del ensayo, presentan una disminución desde un 19.68 % hasta un 3.65 Los resultados evidencian que el suelo sin tratamiento exhibe una resistencia estructural insuficiente, requiriendo métodos de mejoramiento para su uso en cimentaciones. El hallazgo reafirma la urgencia de aplicar técnicas de estabilización al suelo utilizando agentes como el insumo seleccionado, tal como se evaluará en los ensayos siguientes.

TABLA XXXVIII
RESULTADOS DE ENSAYO DPC MUESTRA EXPERIMENTAL

PENETRÓMETRO DINÁMICO DE CONO
ASTM D 6951

PUNTO:	**1**	**CH**	**Arcilla con plasticidad elevada**
LOCALIZACIÓN			
PESO DEL MARTILLO:	8,0 kg	FECHA:	21/04/2025
FACTOR DEL MARTILLO:	1,0		
CLASIFICACIÓN DEL TERRENO:	CH		
ADICIÓN	Terreno Natural +CC		

Número de golpes acumulado	Número de golpes	% golpes	Penetración acumulada (mm)	Penetración por lectura (mm)	Índice DCP (mm/golpe)	CBR [1] (%)
0	0	0.0	0			
13	13	72.2	100	100	7.7	29.72
15	2	83.3	200	100	50.0	3.65
16	1	88.9	300	100	100.0	1.68
18	2	100.0	400	100	50.0	3.65

Fuente: Propia

Correlación de CBR de laboratorio con DCP

La Tabla XXXIX muestra los resultados logrados mediante la con el penetrómetro dinámico de cono (DCP) de acuerdo con la norma ASTM D6951, aplicado a un terreno clasificado como CH (arcilla de plasticidad elevada), con una adición de mejora al terreno original. La columna denominada "CBR (%)" se refiere a los valores proyectados de capacidad de sorporte (California Bearing Ratio), extraídos del índice DCP (mm/golpe) a través de la utilización de correclaciones científicas.

Así mismo se realizó el ensayo de DCP en ubicación cercana a la ubicación de la calicata número 3 y con las siguientes coordenadas E: 626353.48 & N: 9253270.35 específicamente.

Fig. 53 Zona en la que se hicieron los ensayos de DPC y ensayo de Densidad (Cono de arena). Fuente: Propia

La correlación de métodos muestra cómo la adición del 0.5% de *Corchorus Capsularis* potencia significativamente la capacidad portante del suelo. En la Calicata número 3, bajo condiciones de 95% de MDS y una penetración de 2.54 cm, el suelo estabilizado alcanzó un CBR del 40.20%, mientras que el suelo natural mostró solo 5%. Por otro lado, mediante la fórmula empírica (CBR = 292/(PDC^1.12)) empleada en el ensayo DPC, se obtuvieron 29.70% para el suelo tratado y 19.69% para el suelo no estabilizado. Aunque ambos métodos ofrecen valores absolutos distintos, la tendencia es clara: la estabilización mejora notablemente el comportamiento mecánico. Las discrepancias se atribuyen a las condiciones de medición y supuestos inherentes a cada técnica. Utilizar ambos enfoques permite complementar la evaluación, proporcionando un análisis integral de las propiedades del suelo y favoreciendo decisiones optimizadas en aplicaciones constructivas para mayor precisión. Este análisis complementario es esencial para garantizar un rendimiento óptimo.

Este comportamiento indica que la mejora o adición al suelo resultó ser más eficaz en la superficie, un fenómeno habitual en intervenciones que no consiguen una mezcla homogénea en su totalidad. Adicionalmente, estos CBR indirectos derivados de DCP son comparables con los resultados de laboratorio, siempre y cuando se disponga de un valor de referencia. Sin embargo, en este caso, solo se presentan los valores estimados por DCP. Es crucial enfatizar que el ensayo DCP facilita una caracterización rápida y continua de la resistencia del suelo, aunque siempre debe ser complementado con ensayos de laboratorio para su confirmación.

Análisis económico

Datos básicos necesarios:

- **Espesor de capa estabilizada**: 20 cm = **0.20 m**
- **Densidad del suelo compactado**:**1,700 kg/m³**
- **Dosificación del estabilizante**:
  - Cal: **15%** del peso del suelo
  - Corchorus: **0.5%** del peso del suelo

Paso 1: Calcular el volumen por 1 m²

$$\text{Volumen por m}^2 = 1\ \text{m}^2 \times 0.20\ \text{m} = 0.20\ \text{m}^3$$

Paso 2: Calcular el peso del suelo por m²

$$\text{Peso del suelo} = 0.20\ \text{m}^3 \times 1700\ \text{kg/m}^3 = 340\ \text{kg}$$

Paso 3: Calcular el peso del estabilizante por m²

Para cal al 15%:

$$\text{Cantidad de cal} = 340\ \text{kg} \times 0.15 = 51\ \text{kg/m}^2$$

Para Corchorus capsularis al 0.5%:

$$\text{Cantidad de Corchorus} = 340\ \text{kg} \times 0.005 = 1.7\ \text{kg/m}^2$$

Resumen final por m² (espesor 20 cm):

Estabilizante	Dosificación (%)	Cantidad por m² (kg)
Cal	15%	51.00 kg/m²
Corchorus capsularis	0.5%	1.70 kg/m²

Fuente: Propia

TABLA XXXIX
ANÁLISIS DE COSTOS UNITARIOS CON CAL

MEJORAMIENTO DE SUELO CON CAL						
Und/DIA	**500.0000**	**EQ.**	**500.0000**	**Costo unitario directo por: m2**		**62.20**
Descripción Recurso		**Unidad**	**Cuadrilla**	**Cantidad**	**Precio $**	**Parcial $**
Mano de Obra						**1.67**
PEON		hh	3.0000	0.0480	27.49	1.32
OFICIAL		hh	1.0000	0.0160	18.12	0.29
OPERARIO		hh	0.2000	0.0032	18.12	0.06
Materiales						**45.65**
CAL DE OBRA (20kg)		bls	2.55	2.5500	17.90	45.65
Equipos						**14.88**
EQUIPOS OPERADOS MANUALMENTE		%MO		5.0000	1.67	0.08
RODILLO LISO VIBRATORIO AUTOPROPULSADO 101 - 135 HP 10 -12 TN		hm	1.0000	0.0160	225.00	3.60
MOTON IVELADORA 125 HP C/ RIPPER		hm	1.0000	0.0160	450.00	7.20
CISTERNA AGUA 4X2 145-165 HP 2000 GAL		hm	1.0000	0.0160	250.00	4.00

Fuente: Propia

TABLA XL
ANÁLISIS DE COSTOS UNITARIOS CON CC

MEJORAMIENTO DE SUELO CON ADICION DE CORCHORUS CAPSULARIS 0.5 (%)						
Und/DIA	**500.0000**	**EQ.**	**500.0000**	**Costo unitario directo por : m2**		**84.55**
Descripción Recurso		**Unidad**	**Cuadrilla**	**Cantidad**	**Precio $**	**Parcial $**
Mano de Obra						**1.67**
PEON		hh	3.0000	0.0480	27.49	1.32
OFICIAL		hh	1.0000	0.0160	18.12	0.29
OPERARIO		hh	0.2000	0.0032	18.12	0.06
Materiales						**68.00**
CORCHORUS CAPSULARIS		kg		1.7000	40.00	68.00
Equipos						**14.88**
EQUIPOS OPERADOS MANUALMENTE		%MO		5.0000	1.67	0.08
RODILLO VIBRATORIO LISO AUTOPROPULSADO 101 - 135 HP 10 - 12 TN		hm	1.0000	0.0160	225.00	3.60
MOTON IVELADORA 125 HP C/ RIPPER		hm	1.0000	0.0160	450.00	7.20
CISTERNA DE AGUA 4X2 145-165 HP 2000 GAL		hm	1.0000	0.0160	250.00	4.00

Fuente: Propia

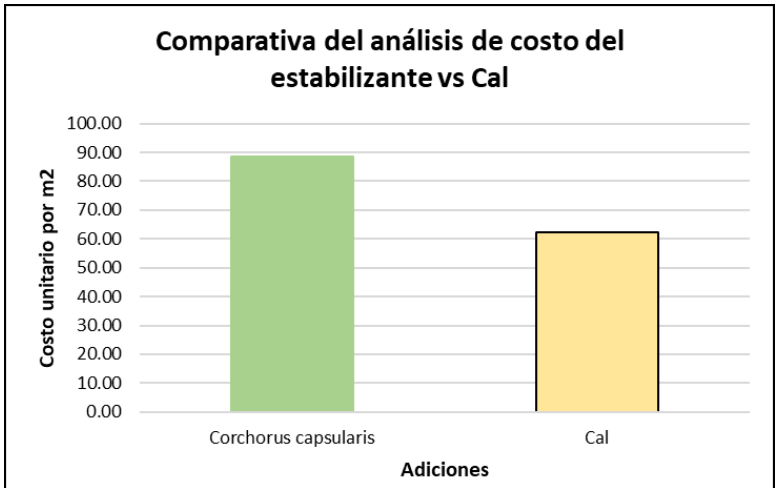


Fig. 54 Comparativa del análisis de costo del estabilizante propuesto vs Cal

Interpretación de los resultados

Para determinar la rentabilidad de emplear fibra de yute (Corchorus capsularis) en la estabilización de arcillas CH, se compararon sus costos con los de la cal, material tradicionalmente utilizado. Para ello, se consideró una misma unidad de intervención 4 m² bajo condiciones equivalentes de ejecución in situ, maquinaria, mano de obra y rendimiento operativo. El análisis económico reveló que la estabilización con cal al 15% tuvo un costo de S/. 62.20, mientras que la incorporación de C. Capsularis al 0.5% ascendió a S/. 84.55, lo que implica una diferencia de S/. 22.35 a favor de la cal. Sin embargo, a pesar de que el estabilizante orgánico tiene un mayor precio por kilogramo (S/. 114.29/kg frente a S/. 0.895/kg de la cal), su baja dosificación permite mantener los costos dentro de un rango razonable y competitivo. Además, este tipo de estabilizante ofrece ventajas ambientales importantes, tales como su origen renovable, su bajo impacto en la huella de carbono y su potencial para mejorar propiedades geotécnicas específicas sin alterar significativamente el equilibrio ecológico.

Por lo tanto, la estabilización con Corchorus capsularis resulta técnica y económicamente viable, especialmente en contextos rurales o ecológicamente sensibles donde el uso de insumos orgánicos locales puede ser priorizado frente a productos industriales.

Asimismo, si se logra una producción local a mayor escala del material vegetal, es posible que sus costos se reduzcan, mejorando aún más su competitividad.

Discusión

Los hallazgos derivados de este estudio corroboran el objetivo general propuesto, el estudio demuestra que la adición de CC incrementa la estabilidad y resistencia de suelos CH (arcillas altamente plásticas), frecuentes en subrasantes viales por su propensión a deformaciones bajo carga. Específicamente, se registró una reducción notable en cálculo del IP, desde un 33.78% en el suelo natural hasta un 19.97% con un 3.5 % de cloruro de calcio, lo que permitió la reclasificación del suelo a una plasticidad intermedia. De igual forma, se evidenció una mejora sustancial en la capacidad portante, con valores de CBR que ascendieron a 73.50 % a 0.5 % de CC, superando considerablemente al suelo natural (9.00 %), aunque dosis de mayor tamaño no

replicaron dicho rendimiento. Estos descubrimientos se corresponden con la investigación de Kumar et al. [17], quienes lograron optimizar el CBR en suelos expansivos mediante la incorporación de fibras de yute, logrando incrementos de hasta 226.92%. Esta evidencia corrobora que subproductos agrícolas, tales como la fibra de Corchorus Capsularis, pueden emplearse como métodos sostenibles, accesibles y eficaces en la estabilización de materiales arcillosos en desarrollos viales. El objetivo específico 1 se corrobora mediante la identificación de que los suelos arcillosos evaluados exhiben elevados índices de plasticidad (IP entre el 29.45% y el 39.34%), un bajo contenido de grava (0.00%), una predominancia de finos que superan el 88%, y una capacidad portante reducida según el ensayo CBR (valores que oscilan entre el 2% y el 7%). Estas condiciones corroboran que los suelos CH son inadecuados para ser utilizados como subrasante sin tratamiento. Aguirre et al. [20] evidenciaron que la integración de fibras vegetales, en este caso de fique, en proporciones que oscilan entre el 1.5% y el 2.0%, posibilitó una mejora significativa en las propiedades mecánicas de los suelos finos, logrando resistencias de hasta 8.41 kg/cm2. Este precedente corrobora la estrategia de emplear Corchorus capsularis como opción de estabilización, dado que se trata también de una fibra vegetal. Su incorporación podría favorecer de manera similar el aumento de la resistencia y la reducción de la plasticidad del suelo. Se confirma el objetivo específico 2 al evidenciar que el Corchorus capsularis posee una composición química sumamente idónea para optimizar suelos arcillosos de alta plasticidad. El elevado contenido de celulosa (73%) ofrece una estructura sólida y robusta, idónea para potenciar la estabilidad del suelo. La hemicelulosa (18%) proporciona flexibilidad, facilitando una adaptación más efectiva del material a esfuerzos fluctuantes, mientras que la lignina (11%) promueve la cohesión interna y la longevidad del compuesto. Esta combinación química fomenta una interacción eficaz con las partículas del suelo, promoviendo su estabilización, optimizando la respuesta mecánica y mitigando las repercusiones adversas vinculadas a su elevada plasticidad, tales como la expansión y contracción desmedidas. Se verifica el cumplimiento del objetivo específico 3 al demostrar que la incorporación de fibras de Corchorus capsularis influye directamente en las propiedades mecánicas del suelo estudiado. Los resultados del ensayo CBR muestran un aumento notable en la capacidad portante del suelo al incorporar un 0,5 % de fibra, alcanzando valores de 52,80 % y 73,50 % para compactaciones del 95 % y 100 %, respectivamente, en comparación con el suelo natural. Este comportamiento se alinea con los descubrimientos de Kumar et al. [17], quienes evidenciaron que la aplicación de fibras vegetales como el yute también mejora de manera significativa los resultados del índice CBR. No obstante, en el estudio actual se constató que las dosificaciones que exceden el 0.5% disminuyen la eficacia del mejoramiento, lo que

sugiere la necesidad de una dosificación óptima. Además, ll ensayo de Proctor Modificado mostró que, al incrementar la cantidad de fibra, tanto la densidad seca máxima como el contenido óptimo de humedad disminuyeron de manera progresiva, indicando una menor compactabilidad del suelo tratado. En suma, estos hallazgos corroboran que una administración controlada de Corchorus capsularis mejora la resistencia mecánica sin poner en riesgo significativo las condiciones de compactación, estableciéndose como una opción sostenible y eficaz para la optimización de suelos arcillosos.

Se confirma el objetivo específico 4 relacionado con el grado de compactación, debido a que los resultados obtenidos muestran que la incorporación del 0.5% de Corchorus capsularis mejora de manera significativa esta propiedad del suelo, alcanzando grados de compactación del 99.0% y 99.2%, superando a la muestra sin aditivos. Esta mejora indica una optimización en la disposición de las partículas del suelo, generando una estructura más densa y estable. Al contrastar estos hallazgos con lo reportado por Silva (2025), quien enfocó su estudio en la estabilización de suelos arcillosos mediante lignosulfonato de calcio, se observa que, aunque realizó el ensayo Proctor Modificado, no profundizó en la mejora del grado de compactación como variable de análisis. Por tanto, esta investigación no solo logra verificar experimentalmente el impacto del aditivo vegetal en la densidad seca del suelo, sino que además aporta evidencia sobre su eficiencia con una dosis reducida y desde un enfoque ambientalmente sostenible.

Se confirma el objetivo específico 4 relacionado con el grado de compactación, debido a que los resultados obtenidos muestran que la incorporación del 0.5% de Corchorus capsularis mejora de manera significativa esta propiedad del suelo, alcanzando grados de compactación del 99.0% y 99.2%, superando a la muestra sin aditivos. Esta mejora indica una optimización en la disposición de las partículas del suelo, generando una estructura más densa y estable. Al contrastar estos hallazgos con lo reportado por Silva (2025), quien enfocó su estudio en la estabilización de suelos arcillosos mediante lignosulfonato de calcio, se observa que, aunque realizó el ensayo Proctor Modificado, no profundizó en la mejora del grado de compactación como variable de análisis. Por tanto, esta investigación no solo logra verificar experimentalmente el impacto del aditivo vegetal en la densidad seca del suelo, sino que además aporta evidencia sobre su eficiencia con una dosis reducida y desde un enfoque ambientalmente sostenible.

Se ha verificado el logro del objetivo específico 6, puesto que se llevó a cabo una comparación económica entre la estabilización del suelo arcilloso con cal al 15% y con Corchorus capsularis al 0.5%. Los datos recabados indican que el costo total de la estabilización con cal ascendió a

S/. 62.20. En el caso de Corchorus capsularis, el valor fue de S/. 84.55. Este desajuste de S/. 22.35. Ilustra que la cal constituye una alternativa más económica para la estabilización del suelo. Sin embargo, aunque la cal resulta más rentable desde una perspectiva financiera, la utilización de Corchorus capsularis proporciona beneficios adicionales como la sostenibilidad ambiental y la utilización de recursos vegetales renovables. En consecuencia, aunque el costo es superior, la utilización de este aditivo puede ser justificada en proyectos que prioricen el enfoque ecológico o la utilización de materiales alternativos.

Conclusiones

Se analizaron de las características físicas y mecánicas de los suelos con plasticidad elevada, se realizó de manera satisfactoria mediante la incorporación de porcentajes de 0.5%, 1.5%, 2.5% y 3.5% de Corchorus capsularis, verificando su efecto positivo como aditivo estabilizante en los subrasantes.

El análisis físico-mecánico del suelo natural reveló una elevada plasticidad (CH), una capacidad portante reducida (S1) y un grado de compactación insuficiente para su utilización estructural, lo cual evidencia la necesidad de estabilización.

La evaluación química de Corchorus capsularis reveló un elevado contenido de celulosa (73%), hemicelulosa (18%) y lignina (11%). Estos componentes contribuyen a la resistencia, flexibilidad y cohesión, atributos fundamentales para la optimización del comportamiento terrestre.

La incorporación de un 0.5% de Corchorus capsularis incrementó significativamente los valores de CBR, llegando a un 73.50%, y permitió reducir la humedad ideal y la densidad seca máxima, lo que sugiera que el suelo tratado es más eficaz en la compactación.

Se ha verificado que con un 0.5% de Corchorus capsularis se logra el grado de compactación más elevado (99.2%), superando al suelo natural, esto señala un avance significativo en su comportamiento físico estructural.

El ensayo DCP in situ corroboró la validez de los resultados de laboratorio, evidenciando un incremento en el valor estimado de CBR (de 19.68% a 29.72%) y una disminución del índice

DCP (de 11.1 a 7.7 mm/golpe), lo cual corrobora la eficacia del aditivo en condiciones reales de laboratorio.

El empleo de Corchorus capsularis al 0.5% demostró ser eficaz en la optimización de la capacidad de soporte del suelo; no obstante, implica un costo superior en comparación con la estabilización tradicional con cal. En consecuencia, a pesar de no ser la opción más rentable, su utilización puede ser justificada en proyectos que otorgan prioridad a la sostenibilidad ambiental y al uso de materiales renovables.

Recomendaciones

Investigar la combinación de Corchorus capsularis con otros aditivos naturales o industriales, tales como cal, ceniza volcánica u otros residuos agroindustriales, con el fin de evaluar posibles efectos sinérgicos en la optimización de suelos arcillosos.

Llevar a cabo pruebas de rendimiento a largo plazo del suelo estabilizado con CC, que incluyan su rendimiento bajo condiciones reales de carga, humedad y tráfico, con el fin de validar su eficacia en terreno.

Expandir la investigación a otros tipos de suelos con variada granulometría y plasticidad, para establecer si los resultados logrados son reproducibles en diferentes contextos geotécnicos.

Examinar la factibilidad económica a gran escala, que incluya los costos de producción, transporte y disponibilidad del Corchorus capsularis en diversas regiones, con el fin de evaluar su aplicación como una alternativa sostenible en comparación con otros estabilizantes convencionales.

Referencias

[1] D. Tsige, M. Korita, y A. Beyene, «Deformation analysis of cement modified soft clay soil using finite element method (FEM)», *Heliyon*, vol. 8, n.º 6, p. e09613, jun. 2022, doi: 10.1016/j.heliyon.2022.e09613.

[2] «Financing Shortfalls Hinder Road Safety Progress in Low- and Middle-Income Countries», World Bank. Accedido: 11 de noviembre de 2025. [En línea]. Disponible en: https://www.worldbank.org/en/news/press-release/2025/02/18/financing-shortfalls-hinder-road-safety-progress-in-low-and-middle-income-countries

[3] L.-L. Zeng, X. Bian, L. Zhao, Y.-J. Wang, y Z.-S. Hong, «Effect of phosphogypsum on physiochemical and mechanical behaviour of cement stabilized dredged soil from Fuzhou, China», *Geomech. Energy Environ.*, vol. 25, p. 100195, mar. 2021, doi: 10.1016/j.gete.2020.100195.

[4] D. S. Vijayan y D. Parthiban, «Effect of Solid waste based stabilizing material for strengthening of Expansive soil-A review», *Environ. Technol. Innov.*, vol. 20, p. 101108, 2020.

[5] A. Montejo Fonseca, *Ingeniería de Pavimentos para Carreteras*, 2th Ed. Colombia, 2002. [En línea]. Disponible en: https://www.academia.edu/22782711/Ingenieria_de_pavimentos_Alfonso_Montejo_Fonseca

[6] S. Islam, J. Islam, y N. M. Robiul Hoque, «Improvement of consolidation properties of clay soil using fine-grained construction and demolition waste», *Heliyon*, vol. 8, n.º 10, p. e11029, oct. 2022, doi: 10.1016/j.heliyon.2022.e11029.

[7] G. Silva, S. Kim, B. Bertolotti, J. Nakamatsu, y R. Aguilar, «Optimization of a reinforced geopolymer composite using natural fibers and construction wastes», *Constr. Build. Mater.*, vol. 258, p. 119697, oct. 2020, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.119697.

[8] «Power BI Report». Accedido: 11 de noviembre de 2025. [En línea]. Disponible en: https://app.powerbi.com/view?r=eyJrIjoiNTFkOWRhYWQtYmMwMS00OWNmLTg4ZTctNjZjYTc1OTIyN2M0IiwidCI6IjNlZWNkMjZlLTlhNTUtNDg4MC04ODEyLWEzMGZjZGU3OGEyZCJ9&pageName=ReportSectioncd99edcca07a5ff10551

[9] J. W. Cueva Vilchez y L. A. Alvarez Vizarreta, «Propuesta para la estabilización de la subrasante en suelos arcillosos con el uso de plástico molido reciclado para carreteras en la zona de Lurín - Lima», *Univ. Peru. Cienc. Apl. UPC*, nov. 2023, Accedido: 11 de noviembre de 2025. [En línea]. Disponible en: https://repositorioacademico.upc.edu.pe/handle/10757/670990

[10] W. Leon Pari, «Estabilización de la subrasante añadiendo fibras de aserrín en el Asentamiento Humano Los Ángeles Comas – 2020», *Repos. Inst. - UCV*, 2020, Accedido: 6 de

junio de 2024. [En línea]. Disponible en: https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/76551

[11] D. K. Ponce Crispín, «Uso del cloruro de calcio para estabilización de la subrasante en suelos arcillosos de la avenida Ccoripaccha - Puyhuan Grande – Huancavelica», 2017, Accedido: 6 de junio de 2024. [En línea]. Disponible en: http://repositorio.unh.edu.pe/handle/UNH/1414

[12] D. Luna Durán, «Zonificación Geotécnica de la Ciudad de Chiclayo», Universidad Nacional De Ingeniería Facultad de Ingeniería Civíl, Perú, 1992. [En línea]. Disponible en: https://www.jorgealvahurtado.com/files/ZonificaciongeotecnicaChiclayo.pdf

[13] Instituto Nacional de Defensa Civil, «Plan de Prevención Ante Desastres: Usos del Suelo y Medidas de Mitigación», Sistema Nacional de Defensa Civil, Perú, 2003. [En línea]. Disponible en: https://sigrid.cenepred.gob.pe/docs/PARA%20PUBLICAR/INDECI/Plan%20de%20prevencion%20ante%20desastres%20Chiclayo.pdf

[14] «Anexos_Informe_cierre_de_brechas.pdf». Accedido: 11 de noviembre de 2025. [En línea]. Disponible en: https://www.mef.gob.pe/contenidos/inv_publica/docs/pmi/Anexos_Informe_cierre_de_brechas.pdf?utm_source=chatgpt.com

[15] L. I. de Chiclayo, «La Industria de Chiclayo: Pistas en JLO generan caos y enfermedades en el distrito», La Industria de Chiclayo. Accedido: 10 de mayo de 2024. [En línea]. Disponible en: https://laindustriadechiclayo.pe/noticia/1569904023-pistas-en-jlo-generan-caos-y-enfermedades-en-el-distrito

[16] «Detalles de: Prospectiva territorial de Lambayeque al 2030: › Biblioteca del Instituto de Estudios Peruanos Koha». Accedido: 10 de mayo de 2024. [En línea]. Disponible en: https://catalogo.iep.org.pe/cgi-bin/koha/opac-detail.pl?biblionumber=5717

[17] «Effect of the type of soil on the cyclic behaviour of chemically stabilised soils unreinforced and reinforced with polypropylene fibres - ScienceDirect». Accedido: 10 de mayo de 2024. [En línea]. Disponible en: https://www-sciencedirect-com.usat.lookproxy.com/science/article/pii/S0267726118307711

[18] S. Naval, «Influence of Jute Fibre on CBR Value of Expansive Soil», *Civ. Eng. J.*, Accedido: 10 de mayo de 2024. [En línea]. Disponible en: https://www.academia.edu/61244782/Influence_of_Jute_Fibre_on_CBR_Value_of_Expansive_Soil

[19] L. Wei, S. X. Chai, H. Y. Zhang, y Q. Shi, «Mechanical properties of soil reinforced with both lime and four kinds of fiber», *Constr. Build. Mater.*, vol. 172, pp. 300-308, may 2018, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.03.248.

[20] J. Zhang, A. Deng, y M. Jaksa, «Enhancing mechanical behavior of micaceous soil with jute fibers and lime additives», *J. Rock Mech. Geotech. Eng.*, vol. 13, n.º 5, pp. 1093-1100, oct. 2021, doi: 10.1016/j.jrmge.2021.04.008.

[21] S. Kumar, A. K. Sahu, y S. Naval, «Influence of Jute Fibre on CBR Value of Expansive Soil», *Civ. Eng. J.*, vol. 6, n.º 6, Art. n.º 6, jun. 2020, doi: 10.28991/cej-2020-03091539.

[22] «TL_SilvaGuevaraLuis.pdf». Accedido: 19 de mayo de 2025. [En línea]. Disponible en: https://tesis.usat.edu.pe/bitstream/20.500.12423/8381/1/TL_SilvaGuevaraLuis.pdf

[23] S. Ashfak, M. P D, y S. Kori, «"Enhancement of Bearing Properties of Black Cotton Soil by Optimal Blending Of Jute and Coir Fibres as a Reinforcement''», *Int. J. Innov. Technol. Explor. Eng.*, vol. 8, pp. 4172-4177, oct. 2019, doi: 10.35940/ijitee.L3662.1081219.

[24] G. A. Aguirre Fuelantala y J. F. Fuel Valencia, «Mejoramiento de las propiedades mecánicas de los suelos finos mediante la adicion de residuos solidos provenientes de fibras vegetales», mar. 2021, Accedido: 6 de junio de 2024. [En línea]. Disponible en: http://repository.unimilitar.edu.co/handle/10654/38614

[25] E. Luna Baca y G. Quispe Herhuay, «Fibras de agave americana tratada con óxido de calcio en la estabilización de suelos arcillosos en la subrasante de pavimentos rígidos en la ciudad de Cusco», *Repos. Inst. – Cont.*, 2021, Accedido: 10 de mayo de 2024. [En línea]. Disponible en: https://repositorio.continental.edu.pe/handle/20.500.12394/10447

[26] H. R. Castro Jerónimo, B. R. Romero Rodríguez, C. A. Vásquez Mendoza, y G. G. Arriola Carrasco, «Influencia de la cáscara y fibra de coco en mezclas asfálticas en caliente», *Rev. Científica Ing. Cienc. Tecnol. E Innov.*, vol. 7, n.º 2, pp. 176-190, 2020.

[27] S. Benel Cerna, «Influencia de la incorporación de fibra de yute en la resistencia mecánica del material de afirmado de la cantera "Bazán" - Cajamarca, 2017», *Repos. Inst. - UPN*, ene. 2019, Accedido: 10 de mayo de 2024. [En línea]. Disponible en: https://renati.sunedu.gob.pe/handle/sunedu/3015064

[28] S. D. Rosario y K. Zarely, «Evaluación de la fibra de plátano en las propiedades mecánicas de la subrasante en suelos arcillosos, La Palma, Tumbes-2021», *Repos. Inst. - UCV*, 2021, Accedido: 10 de mayo de 2024. [En línea]. Disponible en: https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/86460

[29] D. R. Peñaloza Yauri, «Adición de Fibra de Ramio para Mejorar la Capacidad de Soporte de la Subrasante en el Diseño del Pavimento Flexible», *Univ. Peru. Los Andes*, oct.

2022, Accedido: 14 de mayo de 2024. [En línea]. Disponible en: http://repositorio.upla.edu.pe/handle/20.500.12848/4818

[30] C. A. Falen Puicon, «Estabilización de suelos aplicando yeso reciclado y fibras de yute en un camino carrozable», *Repos. Inst. - USS*, 2023, Accedido: 10 de mayo de 2024. [En línea]. Disponible en: http://repositorio.uss.edu.pe//handle/20.500.12802/11848

[31] «Manual Ensayo de Materiales.pdf». Accedido: 15 de mayo de 2024. [En línea]. Disponible en: https://portal.mtc.gob.pe/transportes/caminos/normas_carreteras/documentos/manuales/Manual%20Ensayo%20de%20Materiales.pdf

[32] «Ensayo DCP (ASTM D6951)», TecnoSolum Estudios de Suelos Costa Rica. Accedido: 7 de noviembre de 2024. [En línea]. Disponible en: https://tecnosolumcostarica.com/2018/07/24/ensayo-dcp-astm-d6951/

[33] «Pavimentos_Urbanos.pdf». Accedido: 17 de mayo de 2024. [En línea]. Disponible en: https://cdn-web.construccion.org/normas/files/tecnicas/Pavimentos_Urbanos.pdf

[34] «EG-2013.pdf». Accedido: 17 de mayo de 2024. [En línea]. Disponible en: https://cdn-web.construccion.org/normas/files/tecnicas/EG-2013.pdf

[35] «MC-05-14 Seccion Suelos y Pavimentos_Manual_de_Carreteras_OK.pdf». Accedido: 17 de mayo de 2024. [En línea]. Disponible en: 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

[36] «Concepto suelo | icgc». Accedido: 7 de noviembre de 2024. [En línea]. Disponible en: http://www.icgc.cat/es/Ambitos-tematicos/Suelos/Concepto-suelo

[37] «El suelo: un universo invisible». Accedido: 7 de noviembre de 2024. [En línea]. Disponible en: https://unlp.edu.ar/wp-content/uploads/98/27598/3f23fc987dbbeda82587753c9796000a.pdf

[38] «Método de Clasificación de Suelos - AASHTO PDF | PDF». Accedido: 4 de septiembre de 2024. [En línea]. Disponible en: https://es.scribd.com/document/95814973/Metodo-de-Clasificacion-de-Suelos-AASHTO-pdf

[39] B. K. Chavez Cruz y M. Ocola Zegarra, «Envejecimiento de arcillas y evaluación de las propiedades físicas y quimicas para su aplicación a Procesos Industriales», 2018, Accedido: 7 de noviembre de 2024. [En línea]. Disponible en: http://repositorio.unsa.edu.pe/handle/UNSA/7221

[40] «Mecanica de suelos Juarez Badillo-Tomo 1.pdf», Google Docs. Accedido: 7 de noviembre de 2024. [En línea]. Disponible en: https://drive.google.com/file/d/0B9nKI1tYMgmeYzJEckJVMVc3SlE/view?usp=embed_facebook

[41] L. C. Abanto Espinoza y E. Salinas Sanchez, «ANÁLISIS DE LA ESTABILIZACIÓN DE SUBRASANTES CON USO DE CENIZA DE BAGAZO DE CAÑA DE AZÚCAR Y CAL EN EL PERÚ», Universidad Privada del Norte, Trujillo, 2021. [En línea]. Disponible en: https://repositorio.upn.edu.pe/handle/11537/29043

[42] «mecanica-desuelos-y-cimentaciones-crespo-villalaz.pdf». Accedido: 15 de mayo de 2024. [En línea]. Disponible en: https://stehven.wordpress.com/wp-content/uploads/2015/06/mecanica-desuelos-y-cimentaciones-crespo-villalaz.pdf

[43] R.- ASALE y RAE, «yute | Diccionario de la lengua española», «Diccionario de la lengua española» - Edición del Tricentenario. Accedido: 17 de mayo de 2024. [En línea]. Disponible en: https://dle.rae.es/yute

[44] «Application of Jute Geotextiles», *ResearchGate*, ago. 2025, doi: 10.1300/J395v04n03_05.

[45] D. P. Ray *et al.*, «Accelerated retting technology for the extraction of golden fibre from the Indian Tossa jute (Corchorus sp.)», *J. Clean. Prod.*, vol. 380, p. 135063, dic. 2022, doi: 10.1016/j.jclepro.2022.135063.

[46] «Structural Characterization of the Lignin from Jute (Corchorus capsularis) Fibers | Request PDF», *ResearchGate*, ago. 2025, doi: 10.1021/jf900815x.

[47] T. I. Miranda, «Ingenieria de pavimentos - Alfonso Montejo Fonseca», Accedido: 17 de mayo de 2024. [En línea]. Disponible en: https://www.academia.edu/22782711/Ingenieria_de_pavimentos_Alfonso_Montejo_Fonseca

[48] «UNIVERSIDAD DE MAGALLANES».

[49] «RM-303-2008-MTC-02_09-04-08.pdf». Accedido: 7 de noviembre de 2024. [En línea]. Disponible en: https://spij.minjus.gob.pe/Graficos/Peru/2008/Abril/09/RM-303-2008-MTC-02_09-04-08.pdf

[50] I. M. S. Quijano, «UNIVERSIDAD MILITAR NUEVA GRANADA FACULTAD DE INGENIERÍA ESPECIALIZACIÓN EN INGENIERÍA DE PAVIMENTOS BOGOTÁ D.C.», 2011.

[51] C. H. Higuera Sandoval, J. C. Gómez Cristancho, y Ó. E. Pardo Naranjo, «Caracterización de un suelo arcilloso tratado con hidróxido de calcio», *Rev. Fac. Ing.*, vol. 21, n.º 32, pp. 21-40, 2012.

[52] A. F. Castro Cuadra, «Estabilización de suelos arcillosos con ceniza de cascara de arroz para el mejoramiento de subrasante», *Univ. Nac. Ing.*, abr. 2019, Accedido: 12 de septiembre de 2024. [En línea]. Disponible en: http://repositorioslatinoamericanos.uchile.cl/handle/2250/2351785

[53] C. H. Higuera Sandoval, J. C. Gómez Cristancho, y Ó. E. Pardo Naranjo, «Caracterización de un suelo arcilloso tratado con hidróxido de calcio», *Rev. Fac. Ing.*, vol. 21, n.º 32, pp. 21-40, 2012.

[54] R. A. Cevallos Bedón, «Trazabilidad de materiales biodegradables con fibra de yute mediante infusión en aplicaciones de construcción y mantenimiento», feb. 2022, Accedido: 12 de septiembre de 2024. [En línea]. Disponible en: http://dspace.espoch.edu.ec/handle/123456789/16180

[55] A. D. Bejar Preguntegui, «Evaluación de las propiedades físico mecánicas en adobes empleando fibra seca de retama y fibra de yute, Ayacucho - 2022», *Repos. Inst. - UCV*, 2023, Accedido: 12 de septiembre de 2024. [En línea]. Disponible en: https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/115779

[56] M. B. Suárez, «Metodología de Investigación Científica para ingeniería Civil», Accedido: 17 de mayo de 2024. [En línea]. Disponible en: https://www.academia.edu/33692697/Metodolog%C3%ADa_de_Investigaci%C3%B3n_Cient%C3%ADfica_para_ingenier%C3%ADa_Civil

Anexos

ANEXO. ENSAYOS DE LABORATORIO

https://drive.google.com/drive/folders/1NHpmHL_0tbjrl3NIN0DZxdvEmN6rx7-h?usp=sharing