

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



**Estabilización de suelos arcillosos mediante uso del polímero lignosulfonato
de calcio**

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

AUTOR

Luis Humberto Silva Guevara

ASESOR

Juan Merino Roncero

<https://orcid.org/0000-0002-5753-7664>

Chiclayo, 2025

**Estabilización de suelos arcillosos mediante uso del polímero lignosulfonato
de calcio**

PRESENTADA POR
Luis Humberto Silva Guevara

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

INGENIERO CIVIL

APROBADA POR

Lucas Ludeña Gutierrez
PRESIDENTE

Angel Alberto Lorren Palomino
SECRETARIO

Juan Merino Roncero
VOCAL

Dedicatoria

A mis padres, cuyo apoyo ha sido mi fuente de motivación. Gracias por enseñarme el valor del esfuerzo y perseverancia.

A mis hermanos Milton y Sarith por siempre estar a mi lado y aconsejarme siempre a ser mejor y salir adelante.

Agradecimientos

A mis amigos, por estar a mi lado en los momentos más difíciles brindándome su aliento y su compañía.

A mi asesor de tesis y docentes de la carrera por su dedicación, enseñanza y orientación han sido fundamental en mi formación académica y profesional.

TESIS LUIS SILVA GUEVARA 19 3 2025.pdf

INFORME DE ORIGINALIDAD

24%	23%	1%	6%
INDICE DE SIMILITUD	FUENTES DE INTERNET	PUBLICACIONES	TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1	tesis.usat.edu.pe Fuente de Internet	10%
2	hdl.handle.net Fuente de Internet	5%
3	repositorio.ucv.edu.pe Fuente de Internet	2%
4	upc.aws.openrepository.com Fuente de Internet	1%
5	Submitted to Universidad Cesar Vallejo Trabajo del estudiante	1%
6	Submitted to Universidad Católica San Pablo Trabajo del estudiante	<1%
7	repositorio.urp.edu.pe Fuente de Internet	<1%
8	www.passeidireto.com Fuente de Internet	<1%
9	repositorio.undac.edu.pe Fuente de Internet	<1%
10	repositorio.uprit.edu.pe Fuente de Internet	<1%
11	repositorio.unprg.edu.pe Fuente de Internet	<1%
12	Submitted to Universidad Andina del Cusco Trabajo del estudiante	<1%

Índice

Resumen	11
Abstract	12
Introducción	13
Revisión de literatura	16
ANTECEDENTES	16
BASES LEGALES	20
BASES TEÓRICAS	22
SUELOS ARCILLOSOS	22
ESTABILIZACIÓN DE SUELOS	22
TIPOS DE ESTABILIZACIÓN:	22
ESTABILIZACIÓN QUÍMICA	23
CAPACIDAD PORTANTE.....	23
ENSAYOS DE LABORATORIO	25
CLASIFICACION ASSHTO	32
CLASIFICACIÓN SUCS.....	32
SUBRASANTE.....	34
MATERIALES Y MÉTODOS	35
TIPO DE INVESTIGACIÓN	35
POLBLACION Y MUESTRA	36
HIPOTESIS	37
TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS	38
PROCEDIMIENTO	40
CALICATAS.....	40
ENSAYO DE CONTENIDO DE HUMEDAD	44
ENSAYO DE ANALISIS GRANULOMÉTRICO POR TAMIZADO	45
ENSAYO DE LÍMITE LÍQUIDO	46

ENSAYO DE LÍMITE LÍQUIDO EXPERIMENTAL.....	47
ENSAYO DE LÍMITE PLÁSTICO E ÍNDICE DE PLASTICIDAD	48
ENSAYO DE PROCTOR MODIFICADO	49
ENSAYO DE PROCTOR MODIFICADO EXPERIMENTAL.....	50
ENSAYO DE CBR	51
ENSAYO DE RELACIÓN DE SOPORTE DE CALIFORNIA (CBR) EXPERIMENTAL.....	51
MÉTODO DE ENSAYO PENETRÓMETRO DINÁMICO DE CONO	52
Resultados y discusión	54
Conclusiones	77
Recomendaciones	78
Referencias.....	79
Anexo 1.....	82
Validación de ensayos de Laboratorio	82
ANEXO 2	83
Ensayo químico del Lignosulfonato de calcio.....	83
ANEXO 3	87
Ensayos de Laboratorio.....	87

Lista de tablas

Tabla 1 Caracterización de suelo según IP.....	24
Tabla 2: Composición química del lignosulfonato de calcio	25
Tabla 3: Tamices para el ensayo granulométrico. Fuente manual MTC	27
Tabla 4 Factores según el número de golpes para determinar el límite líquido. Fuente: Manual MTC	28
Tabla 5: Clasificación de suelos según la norma ASSHTO.....	32
Tabla 6: Categoría de subrasante	34
Tabla 7: Muestreo.....	36
Tabla 8: Cuadro de operacionalización de variables.....	38
Tabla 9: Contenido de humedad. Fuente: Propia	54
Tabla 10: Ensayo sales solubles	55
Tabla 11: Ensayo gravedad específica	55
Tabla 12: Límites de consistencia. Fuente: Propia.....	56
Tabla 13: Clasificación según Ip: Fuente: MTC	56
Tabla 14: Clasificación AASHTO Y SUCS.Funete: Propia	57
Tabla 15: Proctor modificado muestra natural. Fuente: Propia	57
Tabla 16: Proctor promedio muestra natural. Fuente: Propia	58
Tabla 17 CBR promedio calicata 1	59
Tabla 18 CBR promedio calicata 2	59
Tabla 19 CBR promedio calicata 3	59
Tabla 20: Límites de consistencia muestra experimental. Fuente: Propia	60
Tabla 21: Límites de consistencia muestra experimental. Fuente: Propia	61
Tabla 22: Límites de consistencia muestra experimental. Fuente: Propia	62
Tabla 23: Resultados del ensayo Proctor experimental. Fuente: Propia	63
Tabla 24: Resultados de ensayo Proctor de muestras experimentales. Fuente: Propia.....	64
Tabla 25:Resultados de ensayo Proctor muestras experimentales	65
Tabla 26 CBR de muestras experimentales calicata 1	66

Tabla 27 CBR de muestras experimentales calicata 2	67
Tabla 28 CBR de muestras experimentales calicata 2	68
Tabla 29 Resultados de ensayo DPC muestra natural.....	69
Tabla 30 Resultados de ensayo PDC muestra experimental	69
Tabla 31 Resultados de muestras naturales.....	70
Tabla 32 Resultados límites de Atterberg calicata 1	70
Tabla 33 Resultados de Proctor Modificado calicata 1	71
Tabla 34 Resultados límites de Atterberg calicata 2.....	71
Tabla 35 Resultados de Proctor Modificado calicata 2.....	72
Tabla 36 Resultados límites de Atterberg calicata 3	72
Tabla 37 Resultados de Proctor Modificado calicata 2.....	73
Tabla 38 Resumen de resultados.....	73
Tabla 39 Análisis de precio unitario con cemento	75
Tabla 40 Análisis de precio unitario con cal	75
Tabla 41 Análisis de precio con lignosulfonato de calcio.....	76

Lista de figuras

Figura N° 1: Calculo de índice de CBR. Fuente: MTC	31
Figura N° 2: Clasificación de suelos SUCS	33
Figura N° 3: Ubicación de calicatas. Fuente: Google Earth	40
Figura N° 4: Calicata 1. Fuente: Propia	40
Figura N° 5: Calicata 3.Fuente: Propia	40
Figura N° 6: Calicata 2. Fuente: Propia	40
Figura N° 7: Perfil de calicata C-1. Fuente: Propia.....	41
Figura N° 8: Perfil de calicata C-2. Fuente: Propia.....	42
Figura N° 9: Perfil de calicata C-3. Fuente: Propia.....	43
Figura N° 10: Ensayo de contenido de humedad.Fuente:Propia.....	44
Figura N° 11: Ensayo granulométrico por tamizad. Fuente: Propia	45
Figura N° 12: Ensayo de limite líquido. Fuente: Propia	46
Figura N° 13: Ensayo de limite plástico experimental.....	47
Figura N° 14: Suelo natural más lignosulfonato de calcio.....	47
Figura N° 15: Ensayo de límite plástico. Fuente: Propia	48
Figura N° 16: Ensayo Proctor modificado. Fuente: Propia.....	49
Figura N° 17: Lignosulfonato de calcio	50
Figura N° 18: Proctor modificado experimental.....	50
Figura N° 19: Ensayo de CBR experimental	51
Figura N° 20: Mezclado de adición y compactación	52
Figura N° 21: Excavación y nivelación del tramo de prueba.....	52
Figura N° 22: Penetrómetro dinámico de cono.....	53

Lista de gráficos

Gráfica N° 1 : Contenido de humedad muestra natural. Fuente: Propia	54
Gráfica N° 2: Curva granulométrica de calicatas. Fuente: Propia	55
Gráfica N° 3: Límites de consistencia de calicatas. Fuente: Propia.....	56
Gráfica N° 4: Proctor modificado natural. Fuente: Propia.....	58
Gráfica N° 5: Límites de consistencia experimental. Fuente: Propia	60
Gráfica N° 6: Límites de consistencia experimentalL. Fuente: Propia	61
Gráfica N° 7:Límites de consistencia experimental. Fuente: Propia	62
Gráfica N° 8: Curva de compactación experimental. Fuente: Propia	63
Gráfica N° 9: Curva de compactación experimental. Fuente: Propia	64
Gráfica N° 10: Curva de compactación experimental.Fuente:Propia	65

Resumen

Los suelos arcillosos presentan factores que afectan la estabilidad de las propiedades físicas y mecánicas, debido a su baja capacidad de carga. Por esta razón, la presente investigación tiene como objetivo principal mejorar las propiedades físicas y mecánicas en subrasantes arcillosos incorporando lignosulfonato de calcio. Se realizó una serie de ensayos bajo la normativa correspondiente al manual de ensayos que nos facilita el MTC, donde se realizaron el ensayo granulométrico, clasificación SUCS y AASHTO, LL, LP, IP Proctor Modificado y CBR. Se adicionó lignosulfonato de calcio en porcentajes de 1.5%, 2.0% y 2.5%. En esta investigación se determinó que con 1.5% de lignosulfonato de calcio se obtienen mejores resultados, donde se refleja un aumento de CBR alrededor de 3 veces con respecto a la muestra patrón de las 3 calicatas realizadas. Además, se realizó un análisis comparativo del lignosulfonato de calcio con otros estabilizadores como la cal y el cemento. Finalmente se realizará un tramo de prueba para verificar los resultados obtenidos en laboratorio.

Palabras Clave: Lignosulfonato de calcio, suelo arcilloso, subrasante, CBR.

Abstract

Clay soils present factors that affect the stability of physical and mechanical properties, due to their low bearing capacity. For this reason, the main objective of this research is to improve the physical and mechanical properties of clay subgrades by incorporating calcium lignosulfonate. A series of tests were carried out under the regulations corresponding to the testing manual provided by the MTC, where granulometry, SUCS and AASHTO classification, Atterberg limits, Modified Proctor and CBR tests were performed. Calcium lignosulfonate was added in percentages of 1.5%, 2.0% and 2.5%. In this research it was determined that the optimum percentage of addition is 1.5% of calcium lignosulfonate, which reflects an increase in CBR about 3 times with respect to the standard sample of the 3 test pits performed. In addition, a comparative analysis of calcium lignosulfonate with other stabilizers such as lime and cement was carried out. Finally, a test section will be carried out to verify the results obtained in the laboratory.

Keywords: Calcium lignosulfonate, clayey soil, subgrade, CBR.

Introducción

En la actualidad, la construcción y las industrias son algunos de los rubros más importantes en el mundo, los cuales consumen en gran parte los recursos naturales causando problemas ambientales, que al mismo tiempo generan desperdicios o subproductos industriales en grandes cantidades. Dado a las consecuencias ambientales, es de suma importancia reutilizar estos subproductos que generan las industrias como una alternativa de adición para reemplazar a las adiciones convencionales [1]. Ahora bien, el campo de la construcción cada vez más está avanzando pasos gigantados generando que las construcciones se realicen en diferentes tipos de suelos. Cuando los proyectos se ejecutan en suelos con baja capacidad portante como los suelos arcillosos, surgen varios problemas como la expansión y el asentamiento [2]. Los suelos arcillosos presentan una estructura química laminar donde están presentes minerales como: ilita, caolinita, montmorillonita, etc. Estos minerales tienen la capacidad de retener el agua y por ende el suelo suele expandirse, siendo causante de varios problemas en las construcciones de edificios o carreteras con este tipo de suelo [3]. Teniendo en cuenta este problema, la mejor alternativa para reforzar un suelo arcilloso es la estabilización, que es una técnica que en donde se utilizan diferentes tipos de adiciones que sirvan de agente estabilizador y de esta manera lograr que el suelo sea más estable y por ende mejoren sus propiedades físico mecánicas.

En el Perú, los agentes estabilizadores normados más comunes son la cal y el cemento [4], ya que al interactuar con el suelo se presentan reacciones físicas y mecánicas que mejoran el suelo. Sin embargo, la fabricación de estos estabilizadores convencionales genera efectos negativos para el medio ambiente. Como se sabe, para la producción del cemento y la cal, no solo se consume enormes cantidades de caliza, energía térmica y eléctrica, sino que en el proceso se generan gases como el CO₂ y polvo que se descargan en el aire afectando su calidad [5]. En base a este inconveniente se vienen realizando diferentes investigaciones para sustituir el uso de cemento y cal, por una adición que sea económica y que no afecte al medio ambiente. Una alternativa de estabilización con las características antes mencionadas es la estabilización química usando polímeros.

La lignina es un biopolímero muy abundante en las plantas, y se encuentra junto a la celulosa y la hemicelulosa, conformando la pared celular de las plantas a nivel nanoestructurar. Estas redes de lignina y carbohidratos varían según el tipo de planta. En la madera, las proporciones generales de estos componentes son: celulosa 38-50%, hemicelulosa 23-32% y lignina 15-25%. La lignina está presente en todas las plantas vasculares y en muchos otros componentes de la biomasa, formándose a través de las reacciones de la fotosíntesis. Considerada un recurso renovable con potencial uso industrial, se estima que su producción anual es de 500 millones de toneladas. Las características de este polímero son muy favorables ya que, no es un producto tóxico, no contamina el suelo y las aguas subterráneas y sobre todo es que es renovable. [6]

En conclusión, la presente investigación se realizará con muestras extraídas de la región Lambayeque, en este caso en la ciudad de Ferreñafe, ya que según [7] el sector I y II están conformados por arcillas y limos. Es por ello que se optará por la estabilización química con el polímero mencionado en porcentajes, con la finalidad de saber con qué porcentaje obtendremos mejores resultados frente a los ensayos de laboratorio.

Ante la problemática, se optará por utilizar el polímero lignosulfonato de calcio como agente estabilizador de suelos arcillosos en la región de Lambayeque. Según todo lo mencionado líneas arriba, la interrogante de la problemática queda formulada de la siguiente manera ¿De qué manera influye la incorporación del polímero lignosulfonato de calcio en las propiedades físicas y mecánicas de suelos arcillosos? Además, se planteó la siguiente hipótesis: La adición en porcentajes del polímero lignosulfonato de calcio mejorará las propiedades mecánicas y físicas del suelo arcilloso típico de la zona de Lambayeque.

Con los siguientes objetivos: Objetivo general: Mejorar las propiedades físicas y mecánicas de un suelo arcilloso adicionando el polímero lignosulfonato de calcio.

Objetivos específicos: Caracterizar el suelo con el método ASSHTO y SUCS. Determinar las propiedades del suelo patrón y adicionado con lignosulfonato de calcio en porcentajes de 1.5%, 2% y 2.5%, mediante los ensayos de LL, LP y contenido de humedad. Obtener la máxima densidad seca, el OCH y el contenido de sales del suelo en su estado natural y adicionado con lignosulfonato de calcio por medio del ensayo Proctor modificado. Realizar ensayo químico al agente estabilizador lignosulfonato de calcio. Determinar el índice de CBR para la muestra natural y estabilizada con lignosulfonato de calcio. Determinar cuál es el porcentaje de la adición de lignosulfonato de calcio que muestra mejores resultados en las propiedades del suelo. Analizar la

factibilidad económica del agente estabilizador en comparación a los agentes estabilizadores convencionales. Validar resultados de laboratorio con ensayos en un tramo experimental de 2x2m.

Así mismo se basa en las siguientes justificaciones:

Justificación Técnica: El proyecto de investigación se basa en su justificación técnica, dado que logrará mejorar propiedades del suelo arcilloso, es por ello que se plantea como alternativa la adición del polímero lignosulfonato de calcio, y de esta manera dejarlo en las condiciones necesarias para poder realizar futuras construcciones.

Justificación Social: El presente proyecto presenta justificación social, puesto que, con el mejoramiento de la subrasante, el beneficio será para todos los pobladores de la zona de estudio en la región Lambayeque para que puedan tener vías de acceso sin irregularidades.

Justificación Económica: Como es sabido, existen métodos de estabilización normados, los más comunes en el Perú son la cal y el cemento, pero las algunas ocasiones este tipo de estabilización suele ser muy costosa. Debido a esto, el presente proyecto de investigación busca mejorar el suelo utilizando el polímero lignosulfonato de calcio. Si bien es cierto, este es un producto que se tiene que comprar, pero su costo es muy cómodo a diferencia de los estabilizadores mencionados anteriormente.

Justificación Ambiental: Como justificación ambiental del presente proyecto de investigación puesto que, se buscar utilizar el desperdicio de las fábricas de madera como un producto para mejorar la subrasante del suelo arcillosos aliviando el impacto ambiental, puesto que el lignosulfonato de calcio no es toxico y mucho menos genera impactos negativos.

Revisión de literatura

ANTECEDENTES

Schwendler [8] en su investigación busca evaluar el comportamiento del lignosulfonato de calcio en las propiedades del suelo arcilloso tomando dos muestras de Cruzeiro de Sul y Cachoeira de Sul en Brasil. Donde se llevaron a cabo ensayos de límites de Atterberg, análisis granulométrico y de CBR, para el estudio de estas muestras se adicionó polímero de lignosulfonato de calcio en porcentajes de 1.5%, 3% y 6% del suelo seco y con tiempos de curado a los 7, 4 y 28 días. Para los resultados de límites de Atterberg se hicieron 3 ensayos para cada suelo y se tomaron como respuesta el promedio. Los resultados de la muestra de Cruzeiro de Sul se obtuvieron valores LL de 33.7, un LP de 16.7 con un IP de 17. Los resultados de la segunda muestra fueron los siguientes, LL de 35.5 y un 22.8 para el LP, además el IP fue de 12.7. Además, se obtuvo un OCH de 15.75% y una MDS de 1.775 g/cm³ para la primera muestra y para la segunda muestra los resultados son 13.5% OCH y 1.88 g/cm³ MDS. La mejor resistencia del suelo estabilizado con lignosulfonato de calcio fue añadiendo el 1.5% dando una resistencia de 402 Kpa para la primera muestra y 556 kPa para la siguiente, cabe recalcar que a medida que se añadía lignosulfonato el suelo aumentaba su resistencia, pero esta no era significativa. En conclusión, la adición de este polímero es una buena alternativa para estabilizar suelos arcillosos.

Huamán [9] en su trabajo de investigación que se realizó en la carretera Paruro – Cusco, en el cual se busca demostrar que el cemento y el lignosulfonato de calcio influyen en las propiedades de la subrasante. Para realizar los ensayos se tomaron muestras de suelo de 3 calicatas cumpliendo con el reglamento de carreteras. Las calicatas están ubicadas en las progresivas 1+00 hasta la progresiva 3+00 haciendo una calicata en cada kilómetro. Como agente estabilizador se utilizaron cemento y lignosulfonato de calcio en porcentajes de 2%, 4%, 6% y 8%. De los resultados obtenidos para la MDS, para ambos casos la mejor opción fue de cemento y lignosulfonato al 6%, el cual incremento de 1.773 kg/cm³ de la muestra patrón a 1.841 kg/cm³ en el caso del cemento, y con respecto al lignosulfonato pasó de 1.747 kg/cm³ a 1.801 kg/cm³. Los resultados de CBR más favorables fueron adicionando el 6% de lignosulfonato y cemento, en donde a la muestra pasa de

14.65% de la muestra patrón al 19.31% y 19.95% respectivamente. En definitiva la incorporación de estos estabilizadores como el cemento es favorable porque aumenta la capacidad portante del suelo, y con respecto al lignosulfonato es una buena opción en términos económicos.

Noorzard [2] muestra los resultados de una investigación con un estabilizador fuera de los comunes como son la cal, cemento, cenizas y yeso, sustituyendo estos por Lignosulfonato de calcio con la finalidad de verificar la influencia del lignosulfonato de calcio en las propiedades del suelo arcilloso. Esta investigación se realizó en Irán, donde se estudiaron muestras de arcillas extraídas de la ciudad de Amol. Los porcentajes de lignosulfonato fueron de 0.5%, 0.75%, 1%, 2%, 3% y 4% del peso seco del suelo. Se realizaron los ensayos de límites de Atterberg, Proctor, la resistencia a la compresión no confinada (UCS) y su comportamiento tensión-deformación. Además, se realizó un ensayo por microscopía electrónica de barrido de la arcilla con lignosulfonato y natural, estas muestras fueron curadas durante 4, 7, 14 y 28 días. Los resultados obtenidos con la adición de lignosulfonato muestran que el OCH aumenta y el peso unitario seco máximo tiende a bajar. Además, se observó que el porcentaje óptimo que dio mejores resultados fue de 0.75% en donde aumentó la tensión axial de 276 Kpa a 397 Kpa.

Moraes [6] En la investigación realizada en la región de Santa Vitoria do Palmar, Brasil. En donde busca evaluar la adición de lignosulfonato de calcio como agente estabilizador para arcillas. Para este estudio se preparó la muestra suelo con lignosulfonato de calcio en porcentajes de 0.5%, 1%, 2% y 4% del peso seco del suelo, y curadas en 7, 14 y 28 días. Además se realizaron ensayos de pruebas de compactación, comprensión simple y límites de Atterberg. La muestra presenta 37% LL, 19% LP y un índice de plasticidad de 18%. Para obtener el OCH y la MDS se realizó el ensayo de compactación al 4% de lignosulfonato, dando unos resultados de 16.36 kN/m³ y 19.18% de óptimo contenido de humedad. Los mejores resultados para la resistencia fueron con la adición de 1% con inmersión a los 28 días, dando un valor de 147.92 kPa. Con esto se puede concluir que el lignosulfonato de calcio es un buen agente estabilizador de arcillas suficiente para mejorar la resistencia del suelo.

Negonbadi [10] en su investigación realizada se basa en el comportamiento de cambio de volumen de suelos arcillosos estabilizados con lignosulfonato, este

suelo estudiado fue extraído de la ciudad de Amol en Irán. Las muestras a estudiar se prepararon con porcentajes de 0.5%, 0.75%, 1%, 2%, 3% y 4% de lignosulfonato de calcio y se pusieron a prueba en los ensayos de Límites de Atterberg, ensayo de compresión no confinada y compactación proctor. Los valores más favorables fueron utilizando 0.75% del agente estabilizador obteniendo un LL de 39%, 25% LP y un IP de 14% con respecto del suelo natural que fue de 55% LL, 25% LP y IP de 29%, con el ensayo proctor se pudo determinar el OCH y la MDS con valores de 21.5% y 16.2 kN/m³ al 0.75% de lignosulfonato. La prueba de compresión no confinada fue ensayada a los 28 días obteniendo un valor de casi 400 kPa, esta resistencia fue disminuyendo a medida que se iba añadiendo lignosulfonato. En conclusión, se puede decir que la adición de este polímero es una alternativa viable para estabilizar suelos arcillosos.

Retuerto y Vergara [11] Esta investigación experimental sustenta la estabilización de suelos inestables añadiendo polímero de lignina como estabilizador, en donde se elaboran mezclas de suelo con lignina variando los porcentajes de adición entre 0.75%, 1.50% y 2.50% del peso seco de la muestra a estudiar con la finalidad de verificar el comportamiento y características y de esta manera seleccionar el porcentaje óptimo de lignina que dará mejores resultados de capacidad de soporte del suelo. Para el ensayo de CBR el porcentaje óptimo fue del 1.50% y 1.00% de polímero mezclado con el suelo natural, los resultados de CBR incrementaron de 13.70% hasta 118.60% y 110% respectivamente. En conclusión, esta investigación nos muestra que el polímero utilizado mejora las propiedades de soporte y estabilidad de suelos arcillosos, transformándolo en un suelo adecuado para poder utilizarlo en la construcción con fines de pavimentación.

Andia [12] En su investigación realizada, plantea el uso de la Fibra de Maguey con Lignosulfonato de Calcio para evaluar la influencia en las características físico mecánicas del suelo limoso. Como muestra para esta investigación se tomaron tres tramos de la vía Alto Qosqo por medio de calicatas para realizar los ensayos y determinar las propiedades del suelo. Las adiciones en porcentajes con respecto del suelo seco fueron de 1.00%, 1.50% y de 2.00% con fibras de maguey y lignosulfonato. El mejor resultado se dio mejorando el contenido óptimo de humedad al 2%. De los resultados obtenidos, el óptimo para la MDS de 1.46 gr/cm³ fue con 1.5% de fibra de maguey con lignosulfonato, el porcentaje óptimo

para el ensayo de CBR también fue del 1.5% de fibras de maguey con lignosulfonato arrojando un porcentaje de 6.54% con una variación de porcentaje de 150.69% con respecto del suelo natural de CBR 4.34%. En pocas palabras la adición de fibras de maguey con lignosulfonato tiene buenos resultados para poder estabilizar los suelos limosos ya que mejora la capacidad portante del suelo con su correcta dosificación.

Reshmarani [1]El presente estudio de caracterización de suelos expansivos tratados con lignosulfonato busca examinar el potencial de este polímero adicionado al suelo arcilloso que se realizaron con dos muestras que fueron recolectadas de Vijayawada y Amaravathi en la India. Estas muestras fueron tratadas con los porcentajes de 0.5%, 1%, 2% y 4% y curadas en 7 y 28 días.

Los resultados más favorables fueron adicionando lignosulfonato al 0.5% y 1% a los 28 días en donde la resistencia aumentó a 350 kPa, pero esta se iba reduciendo al aumentar el porcentaje del agente estabilizador, esto se da ya que a mayor porcentaje internamente el polímero crea fuerzas de repulsión entre las partes cargadas de la mezcla, lo que genera esta pérdida resistencia. De esto se puede concluir que, con la correcta adición de porcentaje, el lignosulfonato de calcio es una buena opción para estabilización de suelos.

Nesterenko Cortes [13]en su investigación polímeros para mejorar el suelo. En total se ensayaron 5 muestras con diferentes propiedades desde gravas limosas hasta arcillas con baja plasticidad, las cuales se le asignaron un nombre para facilitar el procedimiento, Suelo A, B, C, D, E. El agente estabilizador utilizado fue el polímero Poliacrilamida en un porcentaje de 0.0026% del peso seco del suelo y las muestras fueron curadas en 4, 7, 14 y 28 días. De los resultados obtenidos, el valor más alto en relación a la reducción del IP fue para la muestra de arcilla con un 18.18%. También se tuvo un incremento moderado de 0.18% de MDS y un OCH de 13.16% para suelos arcillosos. El incremento del CBR para las muestras curadas a los 28 días en comparación a los 4 días superan el 45%, en donde las arcillas al 95% de su MDS incrementa de 56.99% a 63.12%. En conclusión, con los resultados se puede decir que la estabilización con polímeros es una alternativa viable ya que densifica el suelo y aumenta la capacidad de soporte.

BASES LEGALES

MANUAL DE CARRETERAS, SECCIÓN DE SUELOS Y PAVIMENTOS – MTC-2014 [14].

Este manual nos proporciona la información necesaria para explorar correctamente los suelos, a su vez tiene establecido parámetros mínimos que debe cumplir la subrasante para que pueda ser usada [14].

NTP CE .010 PAVIMENTOS URBANOS

Esta normativa brinda parámetros mínimos y técnicas para poder ejecutar un estudio de suelos con fines de pavimentación [15].

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR TAMIZADO MTC E107 [16].

Normativa que indica el procedimiento para realizar el correcto tamizado de las muestras de suelo mediante un juego de tamices que van de acuerdo al tipo de agregado fino y grueso [16].

DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO DE HUMEDAD DE UN SUELO, MTC E 108 [16].

Normativa que muestra el procedimiento para calcular el contenido de humedad del suelo, en donde se calcula cantidad de agua que contiene el suelo expresado en porcentaje [16].

DETERMINACIÓN DEL LÍMITE LÍQUIDO DE LOS SUELOS, MTC E 110 [16].

Esta normativa nos muestra el procedimiento para realizar el ensayo de límite líquido haciendo uso de la copa de Casagrande para saber en qué punto el suelo pasa de un estado plástico a líquido [16].

DETERMINACIÓN DEL LÍMITE PLÁSTICO (L.P) E ÍNDICE DE PLASTICIDAD (IP), MTC E 111 [16].

Normativa que muestra el procedimiento para calcular el límite plástico con la finalidad de encontrar el índice de plasticidad [16].

MÉTODO DE ENSAYO ESTANDAR PARA LA GRAVEDAD ESPECIFICA DE SÓLIDOS DE SUELO MEDIANTE PICNOMETRO DE AGUA E113 [16].

Normativa que nos muestra el correcto procedimiento para calcular la gravedad específica de las muestras de suelo [16].

CLASIFICACIÓN DE SUELO Y MEZCLAS DE SUELO-AGREGADO PARA FINES DE CONSTRUCCIÓN DE CARRETERAS, AASHTO M 145 [17].

Clasifica el suelo de acuerdo a su granulometría y sus límites de consistencia en donde se clasifica desde el grupo A-1 hasta el grupo A-7[17].

MÉTODO DE CLASIFICACIÓN SUCS NTP 339.134 [18].

Normativa que clasifica el suelo basándose en la granulometría y los límites de consistencia en donde se clasifica el suelo en diferentes tipos como arenas, arcillas y limos y también la combinación de estos [18].

MÉTODO (PROCTOR MODIFICADO), MTC E 115 [16].

Esta normativa nos muestra el correcto procedimiento para encontrar la máxima densidad seca y el óptimo contenido de humedad con la finalidad de mejorar la resistencia y estabilidad del suelo. Además, nos brinda 3 procedimientos A, B y C para realizar el Proctor modificado [16].

MÉTODO DE ENSAYO DE CBR, MTC E 132 [16].

Normativa que muestra el procedimiento para realizar el CBR, el cual utiliza el óptimo contenido de humedad calculada con el Proctor modificado [16].

BASES TEÓRICAS

SUELOS ARCILLOSOS

Son suelos que presentan abundancia de arcillas superando a otras partículas de diferente tamaño, son muy impermeables por lo que dificulta su trabajabilidad, por lo general el tamaño de las partículas de arcilla son inferiores a 0.001 milímetros de diámetro [17].

ESTABILIZACIÓN DE SUELOS

Es el mejoramiento de las propiedades físico-mecánicas del suelo in situ, como la resistencia, capacidad portante, plasticidad; de esta manera un suelo débil se vuelve más firme, con la finalidad de la estabilizar suelos es ser utilizados en diferentes proyectos de construcción como: carreteras, viviendas, etc. [18].

TIPOS DE ESTABILIZACIÓN:

ESTABILIZACIÓN MECÁNICA: Tipo de estabilización que mejora el suelo sin cambiar su estructura, se realiza la compactación para así poder reducir el volumen de vacíos presentes en el suelo.

ESTABILIZACIÓN FÍSICA: Tipo de estabilización que se realiza cambios físicos, donde existe dos métodos:

MEZCLA DE SUELO: Tipo de estabilización usada comúnmente en donde se combina el suelo con un material de préstamo, se tiene que tener en cuenta parámetros requeridos como la densidad y el nivel de subrasante.

SUSTITUCIÓN DE SUELO: Este tipo de estabilización se puede realizar de 2 maneras, una es escarificar y compactar el suelo a la densidad especificada, y la segunda es retirar completamente el suelo existente de acuerdo al espesor de reemplazo.

ESTABILIZACIÓN QUÍMICA

Es un proceso que utiliza estabilizantes químicos, normalmente cementantes. La finalidad de esta tecnología es aplicar una sustancia química para buscar las reacciones entre suelo y estabilizante para mejorar las propiedades del suelo, y de esta manera obtener una mayor capacidad portante que estará sometido [19].

CAPACIDAD PORTANTE

Es el último esfuerzo que resiste el suelo sin sufrir deformaciones [4].

PROPIEDADES FÍSICAS

PESO VOLUMÉTRICO

El peso volumétrico de un suelo representa el peso de una muestra contenida en la unidad de volumen.

DENSIDAD

La densidad absoluta del suelo es la masa del suelo contenida en la unidad de volumen en donde no se incluye sus vacíos.

GRANULOMETRÍA

La granulometría es la determinación de la cantidad de partículas de diferente tamaño que conforman el suelo, para clasificar estos tamaños de partículas se utiliza el método de tamizado el cual nos brindará una curva granulométrica y el porcentaje de material que pasa por el tamiz N°200.

PLASTICIDAD

La plasticidad de un suelo es la propiedad que presenta para poder deformarse hasta un cierto punto sin fallar. Para saber que tan plástico es el suelo se hace uso de los límites de Atterberg.

- Límite Líquido: El límite líquido es el contenido de humedad que es expresado en porcentaje con respecto al suelo seco de la muestra, en donde cambia su estado líquido a plástico.

- Limite plástico: Se define como el contenido de humedad expresado en porcentaje con respecto a la muestra seca en horno, en donde los suelos cohesivos pasan de un estado semisólido a plástico.
- IP: Es la diferencia numérica entre el límite líquido y el límite plástico, la cual indica el rango de humedades en el que un material se encuentra en estado plástico.

Según la normativa peruana en el manual de carreteras, clasificación según su IP

INDICE DE PLASTICIDAD	PLASTICIDAD	CARACTERISTICAS
IP > 20	Alta	Suelos muy arcillosos
IP ≤ 20 IP > 7	Media	Suelos arcillosos
IP < 7	Baja	Suelos poco arcillosos plasticidad
IP = 0	No Plástico (NP)	Suelos extensos de arcilla

Tabla 1 Caracterización de suelo según IP

LIGNOSULFONATO DE CALCIO

El lignosulfonato de calcio es un polímero derivado de la pulpa de madera que se obtiene como un subproducto en la industria papelera, y se utiliza para diversos propósitos, entre ellos la estabilización de suelos [5]. Este compuesto se aplica como una técnica de estabilización química que mejora directamente la base del suelo al consolidar sus partículas y aumentar su resistencia mediante reacciones químicas. Como material ecológico, puede incrementar los límites de Atterberg y la resistencia a la compresión, garantizando su efecto estabilizador y mostrando sus mecanismos de refuerzo [5].

COMPOSICIÓN QUÍMICA DEL LIGNOSULFONATO DE CALCIO

COMPOSICIÓN QUÍMICA	RESULTADOS	METODO UTILIZADO
DIOXIDO DE SILICIO (Si O ₂)	17.11	ESPECTROMETRIA DE FLUORESCENCIA DE RAYOS X
OXIDO DE CALCIO (Ca O)	45.16	
TRIOXIDO DE ALUMINIO (Al ₂ O ₃)	9.12	
TRIOXIDO DE HIERRO (Fe ₂ .O ₃)	3.13	
OXIDO DE POTASIO (K ₂ O)	7.91	
OXIDO DE MAGNESIO (Mg O)	2.86	
PENTOXIDO DE FOSFORO (P ₂ O ₅)	2.07	
OXIDO DE COBRE (CO)	0.27	
TRIOXIDO DE AZUFRE (So ₃)	<0.01	
OXIDO DE AINC (Zn O)	0.068	
OXIDO DE MANGANESO (Mn O)	0.017	
PÉRDIDA POR QUEMADO	12.29	

Tabla 2: Composición química del lignosulfonato de calcio

Los resultados del ensayo de rayos X muestran que existen porcentajes elevados de material cementante lo cual es favorable para realizar el mejoramiento del suelo.

ENSAYOS DE LABORATORIO

DETERMINACIÓN DE PORCENTAJE DE AGUA EN EL SUELO [16].

Es la cantidad de agua contenida en una muestra de suelo expresada en porcentaje, es la relación del peso del agua y de sus partículas sólidas.

Materiales:

- Recipientes resistentes al calor y a la corrosión

Equipos:

- Balanza calibrada para muestras de más de 200 gramos

Cálculos

Para el cálculo del contenido de humedad se realiza de la siguiente manera:

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

$$W = \frac{M_{CWS} - M_{CS}}{M_{CS} - M_C} \times 100 = \frac{M_W}{M_S} \times 100$$

Donde:

W = es el contenido de humedad, (%)

Mcws = es el peso del contenedor más el suelo húmedo, en gramos

M_{cs} = es el peso del contenedor más el suelo secado en horno, en gramos

M_c = es el peso del contenedor, en gramos

M_w = es el peso del agua, en gramos

M_s = es el peso de las partículas sólidas, en gramos

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DE SUELOS TAMIZADO [16].

El análisis por tamizado se realiza para separar las partículas de suelo estudiado en los tamices correspondientes, y de acuerdo a esto poder clasificar el suelo mediante el método AASHTO y SUCS.

Materiales:

Existen 2 juegos de tamices para realizar el ensayo de los cuales se utilizará el siguiente:

TAMICES	ABERTURA (mm)
3"	75,000
2"	50,800
1 1/2"	38,100
1"	25,400
3/4"	19,000
3/8"	9,500
Nº 4	4,760
Nº 10	2,000
Nº 20	0,840
Nº 40	0,425
Nº 60	0,260
Nº 140	0,106
Nº 200	0,075

Tabla 3: Tamices para el ensayo granulométrico. Fuente manual MTC

Equipos:

- Horno $110 \pm 5^\circ\text{C}$
- Balanza con aproximación de ± 0.1 gramos

Cálculos

- Cálculo de material pasante por la malla Nº200

$$\% \text{ pasa tamiz } 200 = \frac{\text{Peso total} - \text{Peso Retenido en el Tamiz } 200}{\text{Peso total}} \times 100$$

- Cálculo retenido en cada tamiz:

$$\% \text{ Retenido} = \frac{\text{Peso Retenido en el Tamiz}}{\text{Peso Total}} \times 100$$

- Cálculo pasante de muestra

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

DETERMINACION DEL LÍMITE LÍQUIDO DE LOS SUELOS [16].

Expresa la cantidad de agua que puede contener el suelo sin perder su plasticidad.

Equipos:

- Espatula flexible

Materiales:

- Horno $110 \pm 5^\circ\text{C}$
- Balanza calibrada
- Copa Casagrande
- Acanalador

Cálculos:

$$\text{Límite líquido} = W^n \left(\frac{N}{25} \right)^{0.121}$$

$$\text{Límite líquido} = KW^n$$

Donde:

N =Número de golpes

Wn =Agua presente en el suelo

k =factor para determinar el LL

N (Numero de golpes)	K (Factor para límite líquido)
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

Tabla 4 Factores según el número de golpes para determinar el límite líquido. Fuente: Manual MTC

CALCULO DEL LÍMITE PLÁSTICO DE LOS SUELOS E ÍNDICE DE PLASTICIDAD [16].

El límite plástico es la mínima capacidad de agua en el suelo sin cambiar su estado

Materiales:

- Espátula

Equipos:

- Tamiz N°40
- Vidrio grueso esmerilado
- Taras para muestra
- Balanza calibrada
- Horno de $110 \pm 5^\circ\text{C}$

Cálculos

$$\text{Límite plástico} = \frac{\text{Peso del agua}}{\text{Peso suelo seco}} \times 100$$

$$\text{Índice de plasticidad} = LL - LP$$

Donde:

LL=límite Líquido

LP=límite plástico

COMPACTACIÓN MEDIANTE (PROCTOR MODIFICADO) [16].

Este ensayo permite encontrar OCH y MDS.

Materiales:

- Regla metálica
- Tamices conforme a los requisitos
- Herramientas para mezclado

Equipos:

- Molde de 4 pulgadas
- Pisón o martillo manual
- Ensamble de molde
- Balanza calibrada
- Horno con capacidad de $110 \pm 5^\circ\text{C}$

Cálculos

$$\rho_m = 1000x \frac{(M_t - M_{md})}{v}$$

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

Donde:

ρ_m = Densidad Húmeda de la muestra compactada (Mg/m³)

M_t = Masa de la muestra húmeda y molde (kg)

M_{md} = Masa del molde de compactación (kg)

V = Volumen del molde de compactación (m³)

ρ_d = Densidad seca de la muestra compactada (Mg/m³)

W = Contenido de agua (%)

MÉTODO DE ENSAYO DE CBR MTC E132 [16].

La finalidad de este ensayo es saber la resistencia a la penetración que tiene un suelo, los resultados que arrojen este ensayo representan el índice de CBR que presenta el suelo.

Materiales:

- Tamiz N.º 4

Equipos:

- Molde cilíndrico de metal
- Disco espaciador
- Prensa
- Pistón para penetración
- Pesas de $4.54 \pm 0,02\text{kg}$

Cálculos:

Teniendo los resultados de penetración, se realiza una gráfica de presiones vs penetración, en el caso que exista un punto de inflexión se tendrá que corregir de acuerdo a la normativa, de lo contrario se consideran los valores de 2.54 mm y 5.08mm.

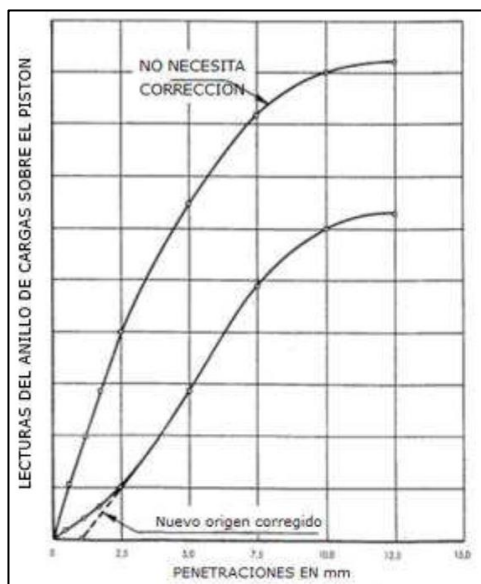


Figura N° 1: Cálculo de índice de CBR. Fuente: MTC

CLASIFICACION ASSHTO

La clasificación ASSTHO se divide en 7 grupos de suelo que va desde el tipo A-1 hasta el tipo A-7, para poder clasificar el suelo se tiene que verificar el porcentaje de material pasante por la malla N° 200. Si el 35% del material no logra pasar por el tamiz el suelo se clasifica como granular, en cambio si logra pasar el 35% estamos en presencia de materiales finos como gravas y arcillas.

SISTEMA DE CLASIFICACIÓN ASSHTO

Clasificación General	Suelos Granulares ($\leq 35\%$ pasa 0,08 mm)						Suelos Finos ($> 35\%$ Bajo 0,08 mm)				
	A-1		A-3	A-2				A-4	A-5	A-6	A-7
Sub-Grupo	A-1a	A-1b		A-2-4	A-2-5	A-2-6*	A-2-7*				A-7-5** A-7-6**
2 mm	≤ 50										
0,5 mm	≤ 30	≤ 50	≥ 51								
0,08 mm	≤ 15	≤ 25	≤ 10	≤ 35				36			
W _L				≤ 40	≥ 41	≤ 40	≥ 41	≤ 40	≥ 41	≤ 40	≥ 41
IP	≤ 6		NP	≤ 10	≤ 10	≥ 11	≥ 11	≤ 10	≤ 10	≥ 11	≥ 11
Descripción	Gravas y Arenas		Arena Fina	Gravas y Arenas Limosas Arcillosas				Suelos Limosos		Suelos Arcillosos	
	** A-7-5: $IP \leq (W_L - 30)$						** A-7-6: $IP > (W_L - 30)$				
	Si el suelo es NP $\rightarrow IG = 0$; Si $IG < 0 \rightarrow IG = 0$										

Tabla 5: Clasificación de suelos según la norma ASSHTO

CLASIFICACIÓN SUCS

La clasificación SUCS divide al suelo en dos grupos, el primer grupo pertenece al material que pasa menos del 50% conformado con gravas(G) y arenas (S), pero si pasa el 50% se clasificaría como limo orgánico (M), arcilla inorgánica (C) o limo (O).

SISTEMA DE CLASIFICACIÓN SUCS

DIVISIÓN MAYOR		SÍMBOLO	NOMBRES TÍPICOS	CRITERIO DE CLASIFICACIÓN EN EL LABORATORIO		
SUELOS DE PARTÍCULAS GRUESAS Más de la mitad del material es retenido en la malla número 200 @	GRAVAS Más de la mitad de la fracción gruesa es retenida por la malla No. 4 PARA CLASIFICACIÓN VISUAL-PUEDEN USARSE 1/2 cm. COMO EQUIVALENTE A LA ABERTURA DE LA MALLA No. 4	GW GP	Gravas bien graduadas, mezclas de grava y arena con poco o nada de finos	COEFICIENTE DE UNIFORMIDAD Cu: mayor de 4. COEFICIENTE DE CURVATURA Cc: entre 1 y 3. $Cu = D_{60} / D_{10}$ $Cc = (D_{30})^2 / (D_{10})(D_{60})$		
			Gravas mal graduadas, mezclas de grava y arena con poco o nada de finos		NO SATISFACEN TODOS LOS REQUISITOS DE GRADUACIÓN PARA GW.	
		GRAVA CON FINOS Cantidad apreciable de partículas finas	* GM d u	Gravas limosas, mezclas de grava, arena y limo	LÍMITES DE ATTERBERG ABAJO DE LA "LÍNEA A" O I.P. MENOR QUE 4. LÍMITES DE ATTERBERG ARRIBA DE LA "LÍNEA A" CON I.P. MAYOR QUE 7.	Arriba de la "línea A" y con I.P. entre 4 y 7 son casos de frontera que requieren el uso de símbolos dobles.
			GC	Gravas arcillosas, mezclas de gravas, arena y arcilla		
		ARENAS Más de la mitad de la fracción gruesa pasa por la malla No. 4 PARA CLASIFICACIÓN VISUAL-PUEDEN USARSE 1/2 cm. COMO EQUIVALENTE A LA ABERTURA DE LA MALLA No. 4	ARENA LIMPIA Poco o nada de partículas finas	SW	Arenas bien graduadas, arena con gravas, con poca o nada de finos.	$Cu = D_{60} / D_{10}$ mayor de 6 ; $Cc = (D_{30})^2 / (D_{10})(D_{60})$ entre 1 y 3.
				SP	Arenas mal graduadas, arena con gravas, con poca o nada de finos.	
	ARENA CON FINOS Cantidad apreciable de partículas finas		* SM d u	Arenas limosas, mezclas de arena y limo.	LÍMITES DE ATTERBERG ABAJO DE LA "LÍNEA A" O I.P. MENOR QUE 4. LÍMITES DE ATTERBERG ARRIBA DE LA "LÍNEA A" CON I.P. MAYOR QUE 7.	Arriba de la "línea A" y con I.P. entre 4 y 7 son casos de frontera que requieren el uso de símbolos dobles.
			SC	Arenas arcillosas, mezclas de arena y arcilla.		
	SUELOS DE PARTÍCULAS FINAS Más de la mitad del material pasa por la malla número 200 @ Las partículas de 0.074 mm de diámetro (la malla No. 200) son, aproximadamente, las más pequeñas visibles a simple vista.	LIMOS Y ARCILLAS Límite Líquido menor de 50	ML	Limos inorgánicos, polvo de roca, limos arenosos o arcillosos ligeramente plásticos.	G – Grava, S – Arena, O – Suelo Orgánico, P – Turba, M – Limo C – Arcilla, W – Bien Graduada, P – Mal Graduada, L – Baja Compresibilidad, H – Alta Compresibilidad	
			CL	Arcillas inorgánicas de baja o media plasticidad, arcillas con grava, arcillas arenosas, arcillas limosas, arcillas pobres.		CARTA DE PLASTICIDAD (S.U.C.S.)
OL			Limos orgánicos y arcillas limosas orgánicas de baja plasticidad.			
LIMOS Y ARCILLAS Límite Líquido Mayor de 50		MH	Limos inorgánicos, limos micáceos o diatomáceos, más elásticos.	LÍMITES DE ATTERBERG ABAJO DE LA "LÍNEA A" O I.P. MENOR QUE 4. LÍMITES DE ATTERBERG ARRIBA DE LA "LÍNEA A" CON I.P. MAYOR QUE 7.	Arriba de la "línea A" y con I.P. entre 4 y 7 son casos de frontera que requieren el uso de símbolos dobles.	
		CH	Arcillas inorgánicas de alta plasticidad, arcillas francas.			
		OH	Arcillas orgánicas de media o alta plasticidad, limos orgánicos de media plasticidad.			
SUELOS ALTAMENTE ORGÁNICOS		P	Turbas y otros suelos altamente orgánicos.			

Figura N° 2: Clasificación de suelos SUCS

SUBRASANTE

Es una capa de superficie final, nivelada durante el proceso de movimiento de tierras, en la cual se establece la estructura del pavimento o del afirmado.

Esta superficie presenta algunos parámetros a considerar, uno de ellos es el índice de CBR que de acuerdo a esto la subrasante se puede clasificar desde pobre a una excelente.

Categorías de Sub rasante	CBR
S ₀ : Sub rasante Inadecuada	CBR < 3%
S ₁ : Sub rasante insuficiente	De CBR ≥ 3% A CBR < 6%
S ₂ : Sub rasante Regular	De CBR ≥ 6% A CBR < 10%
S ₃ : Sub rasante Buena	De CBR ≥ 10% A CBR < 20%
S ₄ : Sub rasante Muy Buena	De CBR ≥ 20% A CBR < 30%
S ₅ : Sub rasante Excelente	CBR ≥ 30%

Tabla 6: Categoría de subrasante

MATERIALES Y MÉTODOS

TIPO DE INVESTIGACIÓN

Según Borja [22] la investigación refleja los siguientes tipos:

- **SEGÚN LOS DATOS ANALIZADOS**

Se trata de una investigación de tipo CUANTITATIVA, ya que se van a obtener resultados numéricos de los ensayos hechos en laboratorio para verificar y analizar las modificaciones que genera el lignosulfonato de calcio de las propiedades del suelo.

- **SEGÚN SU FINALIDAD**

La finalidad de esta investigación es APLICADA, ya que se basa en la aplicación los conocimientos obtenidos a lo largo de la carrera de ingeniería civil ambiental.

- **METODOLOGÍA PARA COMPROBAR LA HIPÓTESIS**

El diseño de la presente investigación es de carácter experimental, dado que mediante los ensayos de laboratorio se podrá estimar la influencia del lignosulfonato de calcio en las propiedades del suelo arcilloso objeto de estudio.

POLBLACION Y MUESTRA

POBLACION

La población a estudiar son los suelos arcillosos a nivel de subrasante ubicados en la región de Lambayeque, que para esta investigación se realizará en Ferreñafe en el sector II ya que este sector presenta suelos arcillosos.

MUESTRA

Las muestras a estudiar son las subrasantes arcillosas ubicadas en el sector II de la ciudad de Ferreñafe. Para la investigación se realizará 3 calicatas de terreno natural zona de estudio, estas muestras serán sometidas a diferentes ensayos de laboratorio para saber sus propiedades.

El tipo de muestra es no probabilística puesto que se obtendrá específicamente en el lugar de estudio.

Las muestras de material se le adicionará el agente estabilizador lignosulfonato de calcio en porcentajes de 1.5%, 2% y 2.5%.

CANTIDAD DE MUESTRAS Y ENSAYOS							
	Granulometria	Sales Solubles	Gravedad específica	Límite líquido	Límite Plástico	Proctor	CBR
Suelo Natural							
C-1	1	1	1	1	1	2	10
C-2	1	1	1	1	1	2	10
C-3	1	1	1	1	1	2	10
Suelo Natural + Adición							
C-1 + 1.5%	-	-	-	1	1	1	10
C-1 + 2.0%	-	-	-	1	1	1	10
C-1 + 2.5%	-	-	-	1	1	1	10
C-2 + 1.5%	-	-	-	1	1	1	10
C-2 + 2.0%	-	-	-	1	1	1	10
C-2 + 2.5%	-	-	-	1	1	1	10
C-3 + 1.5%	-	-	-	1	1	1	10
C-3 + 2.0%	-	-	-	1	1	1	10
C-3 + 2.5%	-	-	-	1	1	1	10
TOTAL	3	3	3	12	12	15	120

Tabla 7: Muestreo

HIPOTESIS

La adición en porcentajes del polímero lignosulfonato de calcio mejorará las propiedades mecánicas y físicas del suelo arcilloso típico de la zona de Lambayeque.

Proceso para demostrar la hipótesis.

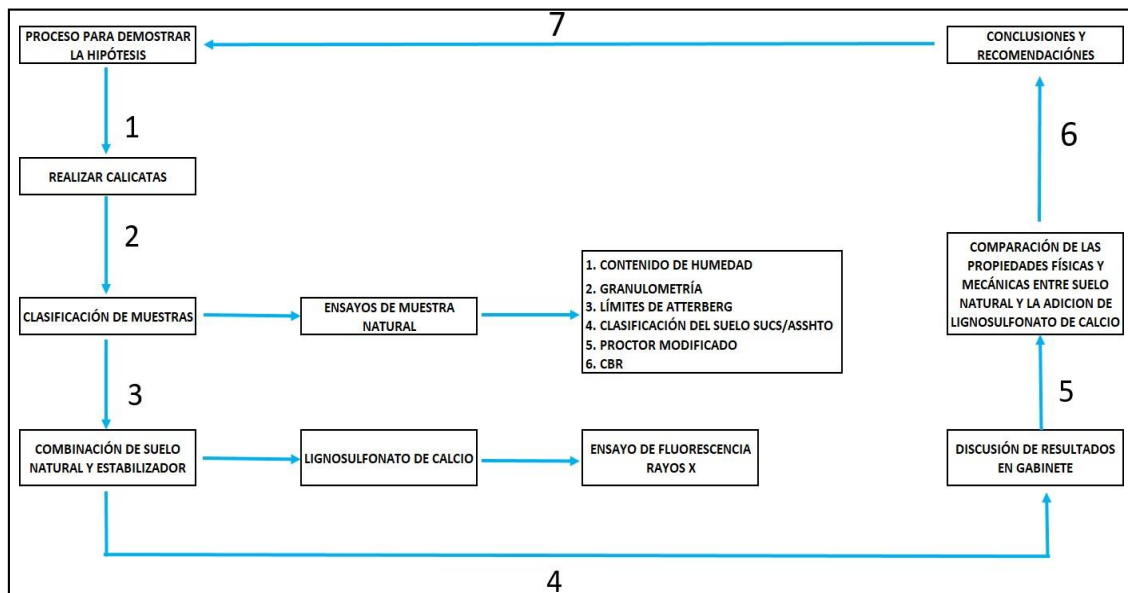


Ilustración 1 Demostración de Hipótesis Fuente: Propia

VARIABLES

Variable independiente

- Adición de polímero lignosulfonato de calcio

Variable dependiente

- Mejorar las propiedades físicas y mecánicas del suelo estabilizado

CUADRO DE OPERACIONALIZACIÓN

TIPO DE VARIABLE	VARIABLE	DIMENSIÓN	INDICADOR	UNIDAD DE MEDIDA	INSTRUMENTOS	RANGOS
Independiente	Adición de polímero lignosulfonato de calcio	Lignosulfonato de calcio	Cantidad de lignosulfonato de calcaio	% de peso	Balanza digital con error de aproximación a 0.1g	1.5%, 2%, 2.5%, 3%
Dependiente	Mejorar las propiedades físicas y mecánicas del suelo estabilizado	Propiedades Físicas	Tamaño de partículas	Milímetros (mm)	Ensayo Granulométrico NTP 339.128	-
			Contenido de Humedad	Porcentaje (%)	Ensayo contenido de humedad NTP 339.127	-
			Plasticidad	Porcentaje (%)	Ensayo LL, LP e Ip NTP 339.129	-
			Contenido de sales	Porcentaje (%)	Ensayo de sales solubles totales en suelos 339.125 / MTC E219	-
		Propiedades Mecánicas	Porcentaje Óptimo contenido de humedad	% de peso	Ensayo de proctor modificado NTP 339.141	-
			Índice de CBR	Porcentaje (%)	Ensayo CBR MTC E132/ASTM D1883	-

Tabla 8: Cuadro de operacionalización de variables

TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS

El procedimiento para mejorar el suelo por medio de la estabilización química con el polímero lignosulfonato de calcio en el suelo arcilloso se ejecutará de acuerdo al cronograma establecido según lo establecido en las Norma Técnica peruana. La finalidad es mejorar las capacidades de carga del suelo arcilloso mediante la incorporación de polímero de lignosulfonato de calcio para mejorar las propiedades como son: la resistencia, densidad, plasticidad y capacidad portante.

Las calicatas se realizaron en diferentes puntos de estudio en la región Lambayeque

Obtención de polímero lignosulfonato de calcio.

Es un producto que se encuentra en investigación como estabilizador, este se obtiene en laboratorios ya que es un producto que se obtiene a partir de diferentes procesos industriales, esto hace que su precio sea bastante económico.

TECNICA

La recolección de datos será de forma experimental ya que se aplicará a los ensayos en laboratorio controlados por la NTP, para registrar los datos se basará de acuerdo a las medidas normalizadas por el Manual de ensayos de materiales del MTC.

INSTRUMENTO

Consiste en la interpretación y discusión de los datos recolectados de los ensayos en laboratorio, algunos de los instrumentos a emplear son:

- Hojas de cálculo
- Gráficos
- Cuadros comparativos

PROCESAMIENTO DE DATOS

El procesamiento de datos con relación de la estabilización con lignosulfonato de calcio en suelos arcillosos, se utilizará como herramienta principal el software Excel para procesar toda la información obtenida de los ensayos y de esta manera reflejar los resultados mediante tablas, gráficos, líneas de dispersión, etc.

PROCEDIMIENTO

CALICATAS

Para realizar las calicatas primero se tuvo que visitar la zona para verificar la presencia de arcillas. Asimismo, se buscó información de la zona de estudio sobre el tipo de suelo, donde se decidió por realizar el muestreo en la zona rural y agrícola de la urbanización villa mercedes y sectores aledaños, que según INDICE la zona presenta suelos arcillosos. Se ejecutaron 3 calicatas de forma manual hasta 1.50 m de profundidad. Además, se tomó 1 muestra alterada por cada estrato, posteriormente las muestras fueron protegidas para no perder las propiedades para luego ser ensayadas.

Las calicatas fueron identificadas como: C-1, C-2 y C-3 como se puede ver en la siguiente imagen.



Figura N° 3: Ubicación de calicatas. Fuente: Google Earth



Figura N° 4: Calicata 1. Fuente: Propia



Figura N° 6: Calicata 2.
Fuente: Propia



Figura N° 5: Calicata 3. Fuente: Propia

Luego de extraer la muestra el siguiente procedimiento es realizar los ensayos de mecánica de suelos para obtener los datos que se necesita para la investigación. Los ensayos se realizaron en el laboratorio de suelos de del campus USAT.

Se realizó los perfiles estratigráficos de cada una de las calicatas.

PERFIL ESTRATIGRÁFICO										
CALICATA 01										
TESIS:		ESTABILIZACIÓN DE SUELOS ARCILLOSOS MEDIANTE USO DEL POLÍMERO LIGNOSULFONATO DE CALCIO								
TESISTA:		LUIS HUMBERTO SILVA GUEVARA								
UBICACIÓN		FERREÑAFE - LAMBAYEQUE								
FECHA EXCAVACION		viernes, 25 de Agosto de 2023								
N.A.F.		No encontrado a la profundidad de excavación								
TIPO DE EXCAVACIÓN:		MANUAL								
COORDENADAS:		E = 634486		N = 9267127						
PROFUNDIDAD	ESTRATO	DESCRIPCION	SUCS	AASHTO	HUMED.	L.L.	L.P.	I.P.	SALES	IDENTIFIC
0.00										
0.10	0.10	-	Relleno con material suelto			-	-	-	-	
0.20										
0.30										
0.40										
0.50										
0.60										
0.70										
0.80										
0.90	1.50	M-1	Suelo de matriz arcillosa limosa de color marrón . Es un material compacto, estructura fina estructura lisa, baja humedad y moldeable.	CL	A-6(5)	12.08	33	20	13	0.28
1.00										
1.10										
1.20										
1.30										
1.40										
1.50										
1.60										

Figura N° 7: Perfil de calicata C-1. Fuente: Propia

PERFIL ESTRATIGRÁFICO											
CALICATA 02											
TESS:		ESTABILIZACIÓN DE SUELOS ARCILLOSOS MEDIANTE USO DEL POLÍMERO LIGNOSULFONATO DE CALCIO									
SOLICITANTE:		LUIS HUMBERTO SILVA GUEVARA									
UBICACIÓN		FERREÑAFE - LAMBAYEQUE									
FECHA EXCAVACION		viernes, 25 de Agosto de 2023									
N.A.F.		No encontrado a la profundidad de excavación									
TIPO DE EXCAVACIÓN:		MANUAL									
COORDENADAS:		E = 935485		N = 9265033							
PROFUNDIDAD	ESTRATO	DESCRIPCION	SUCS	AASHTO	HUMED.	L.L.	L.P.	I.P.	SALES	IDENTIFIC.	
0.00											
0.10	0.10	-			-	-	-	-	-		
0.20											
0.30											
0.40											
0.50											
0.60											
0.70											
0.80											
0.90	1.50	M-1	CL	A-6(4)	12.36	22	9	13	0.28		
1.00											
1.10											
1.20											
1.30											
1.40											
1.50											
1.60											

Figura N° 8: Perfil de calicata C-2. Fuente: Propia



PERFIL ESTRATIGRÁFICO											
CALICATA 03											
TESIS:		ESTABILIZACIÓN DE SUELOS ARCILLOSOS MEDIANTE USO DEL POLÍMERO LIGNOSULFONATO DE CALCIO									
SOLICITANTE:		LUIS HUMBERTO SILVA GUEVARA									
UBICACIÓN		FERREÑAFE - LAMBAYEQUE									
FECHA EXCAVACION		viernes, 25 de Agosto de 2023									
N.A.F.		No encontrado a la profundidad de excavación									
TIPO DE EXCAVACIÓN		MANUAL									
COORDENADAS:		E = 634490		N = 9266072							
PROFUNDIDAD	ESTRATO	DESCRIPCION	SUCS	AASHTO	HUMED.	L.L.	L.P.	I.P.	SALES	IDENTIFIC.	
0.00											
0.10	0.10	-			-	-	-	-	-		
0.20											
0.30											
0.40											
0.50											
0.60											
0.70											
0.80											
0.90	1.50	M-1	CL	A-6(4)	15.51	25	13	12	0.19		
1.00											
1.10											
1.20											
1.30											
1.40											
1.50											
1.60											

Figura N° 9: Perfil de calicata C-3. Fuente: Propia

ENSAYO DE CONTENIDO DE HUMEDAD

El procedimiento que se debe realizar primero es realizar el cuarteo para posteriormente tomar una porción del material, en donde serán puestas en taras previamente pesadas para obtener ambos pesos. Luego se procede a colocar el material en el horno a una temperatura de 110 ± 5 °C en un periodo de 1 día. Luego de 1 día se procede a sacar la muestra del horno dejándola enfriar y pesarla y calcular el porcentaje de agua.



Figura N° 10: Ensayo de contenido de humedad. Fuente: Propia

ENSAYO DE ANALISIS GRANULOMÉTRICO POR TAMIZADO

El ensayo se basa en dividir por tamices la muestra y anotar el peso en cada tamiz retenido, finalmente se verifica la sumatoria en cada tamiz retenido y esta debe ser igual al peso de la muestra inicial.



Figura N° 11: Ensayo granulométrico por tamizad. Fuente: Propia

ENSAYO DE LÍMITE LÍQUIDO

Consiste en tamizar una porción de muestra por el tamiz N°40, para luego tomar como mínimo 100 gramos, estos 100 gramos se dejan saturando con agua destilada por un tiempo de 24 horas, para posteriormente realizar el ensayo con la cosa de Casagrande, cabe recalcar que debe estar calibrada.

Posteriormente se coloca la muestra saturada en la copa, luego pasar el ranurador por el centro de la copa y se procede a girar la manija de la cuchara, contando los golpes hasta que la separación hecha por el ranurador se cierre.

El número de golpes se encuentra en un rango de 4 a 40 en las siguientes etapas

- Etapa 1: 30 a 40 gol
- Etapa 2: 20 a 30 gol
- Etapa 3: 10 a 20 gol
- Etapa 4: 4 a 10 gol

Si la muestra no logra cerrar dentro de los rangos, se procede a añadir agua y se repite el procedimiento. Luego de que cumpla se extrae una muestra, se coloca en una tara previamente pesada y se coloca al horno a una temperatura de 110 ± 5 °C por 1 día, luego sacamos la muestra para poder pesar el material seco y realizar el cálculo de humedad.



Figura N° 12: Ensayo de limite líquido. Fuente: Propia

ENSAYO DE LÍMITE LÍQUIDO EXPERIMENTAL

Para realizar este ensayo se ha tomado se ha trabajado con una cantidad de muestra de 150 gramos y el procedimiento experimental fue el siguiente:

- Para la adición de 1.5% se ha utilizado 2.25 gramos de la adición y 147.75 gramos de la muestra para así completar los 150 gramos en total.
- Para la adición de 2.0 % se ha utilizado 3 gramos de la adición y 147 gramos de la muestra para así completar los 150 gramos en total.
- Para la adición de 2.5% se ha utilizado 3.75 gramos de la adición y 146.25 gramos de la muestra para así completar los 150 gramos en total.

Luego el procedimiento ha sido el mismo de acuerdo a la normativa MTC-E-110



Figura N° 14: Suelo natural más lignosulfonato de calcio



Figura N° 13: Ensayo de limite plástico experimental

ENSAYO DE LÍMITE PLÁSTICO E ÍNDICE DE PLASTICIDAD

Consiste en tomar una porción de la muestra saturada por 1 día y realizar cilindros de aproximadamente 3 mm de diámetro hasta que se agriete o sufra una ruptura, de la misma manera que el límite líquido los cilindros realizados se coloca al horno a una temperatura de 110 ± 5 °C por 1 día, luego sacamos la muestra para poder pesar el material seco y realizar el cálculo de humedad.

Luego se procede a calcular el IP restando el LL menos el LP.

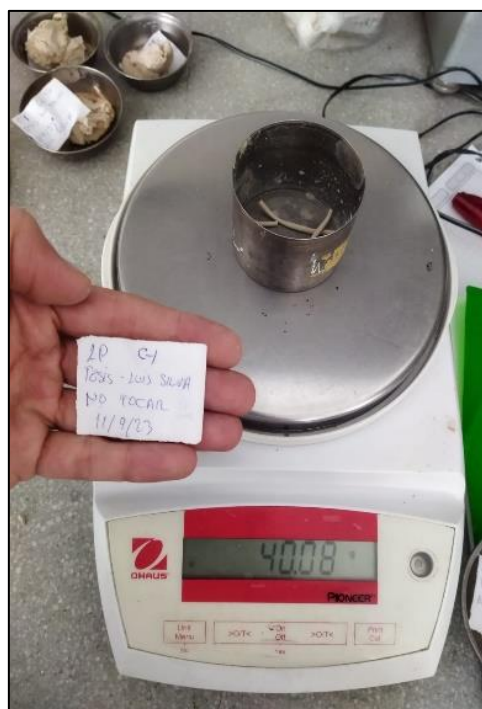


Figura N° 15: Ensayo de límite plástico. Fuente: Propia

ENSAYO DE PROCTOR MODIFICADO

Consiste en determinar OCH y MDS, según la normativa existen 3 tipos de procedimientos para realizar el Proctor, para esta investigación se utilizará el procedimiento “A” el cual consiste en llenar el molde en 5 capas y cada capa se debe compactar con 25 golpes.



Figura N° 16: Ensayo Proctor modificado. Fuente: Propia

ENSAYO DE PROCTOR MODIFICADO EXPERIMENTAL

Para realizar el ensayo de Proctor modificado experimental se ha trabajado con 2500 gramos de acuerdo a la normativa en donde la forma de adicionar el polímero fue la siguiente:

- Para la adición de 1.5% se ha utilizado 37.50 gramos de la adición y 2462.50 gramos de la muestra para así completar los 2500 gramos en total.
- Para la adición de 2.0 % se ha utilizado 50 gramos de la adición y 2450 gramos de la muestra para así completar los 2500 gramos en total.
- Para la adición de 2.5% se ha utilizado 62.50 gramos de la adición y 2437.50 gramos de la muestra para así completar los 2500 gramos en total.

Luego el procedimiento ha sido el mismo de acuerdo a la normativa MTC-E-115.



Figura N° 17: Lignosulfonato de calcio



Figura N° 18: Proctor modificado experimental

ENSAYO DE CBR

Se procederá a realizar el ensayo en todas las calicatas, para conseguir la expansión y la densidad seca del suelo en un proceso de compactación de 12, 26 y 55 golpes, con la finalidad de obtener el CBR a una penetración de 0.1” y 0.2” a una máxima densidad seca de 95% y 100%.

ENSAYO DE RELACIÓN DE SOPORTE DE CALIFORNIA (CBR) EXPERIMENTAL

Para realizar el ensayo de CBR experimental se ha trabajado con 5000 gramos de acuerdo a la normativa en donde la forma de adicionar el polímero fue la siguiente:

- Para la adición de 1.5% se ha utilizado 75 gramos de la adición y 4925 gramos de la muestra para así completar los 5000 gramos en total.
- Para la adición de 2.0 % se ha utilizado 100 gramos de la adición y 4900 gramos de la muestra para así completar los 5000 gramos en total.
- Para la adición de 2.5% se ha utilizado 125 gramos de la adición y 4875 gramos de la muestra para así completar los 5000 gramos en total.

Luego el procedimiento ha sido el mismo de acuerdo a la normativa MTC-E-132.



Figura N° 19: Ensayo de CBR experimental

MÉTODO DE ENSAYO PENETRÓMETRO DINÁMICO DE CONO

Se llevó a cabo el ensayo de DCP con el objetivo de verificar los resultados obtenidos en el laboratorio. Este ensayo servirá para comparar los resultados del CBR obtenidos en laboratorio con aquellas medidas in situ.



Figura N° 21: Excavación y nivelación del tramo de prueba



Figura N° 20: Mezclado de adición y compactación



Figura N° 22: Penetrómetro dinámico de cono

Resultados y discusión

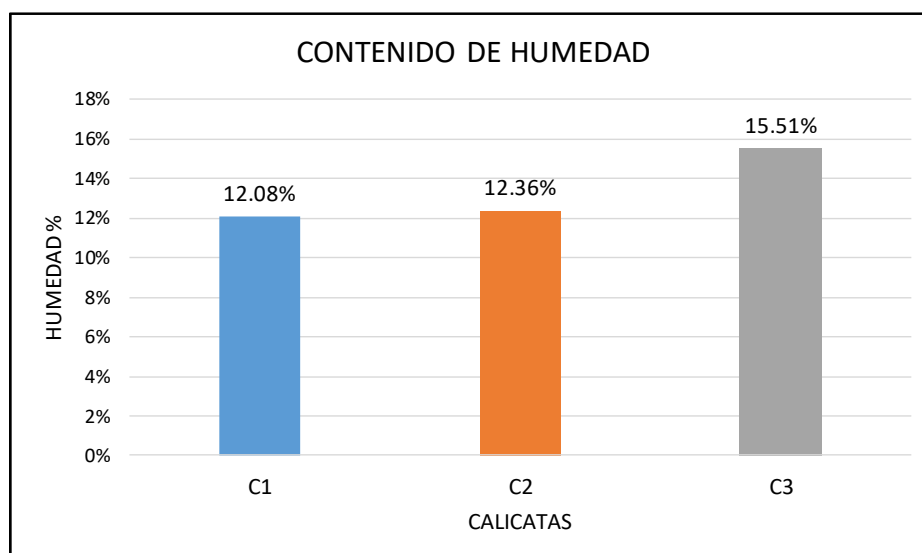
RESULTADOS

CONTENIDO DE HUMEDAD DE MUESTRA NATURAL

En el siguiente cuadro se muestra los resultados del ensayo de humedad de las 3 calicatas siguiendo el procedimiento de la norma MTC E-108.

CONTENIDO DE HUMEDAD			
CALICATA	MUESTRA	PROFUNDIDAD(m)	HUMEDAD %
C1	M1	1.5	12.08%
C2	M2	1.5	12.36%
C3	M3	1.5	15.51%

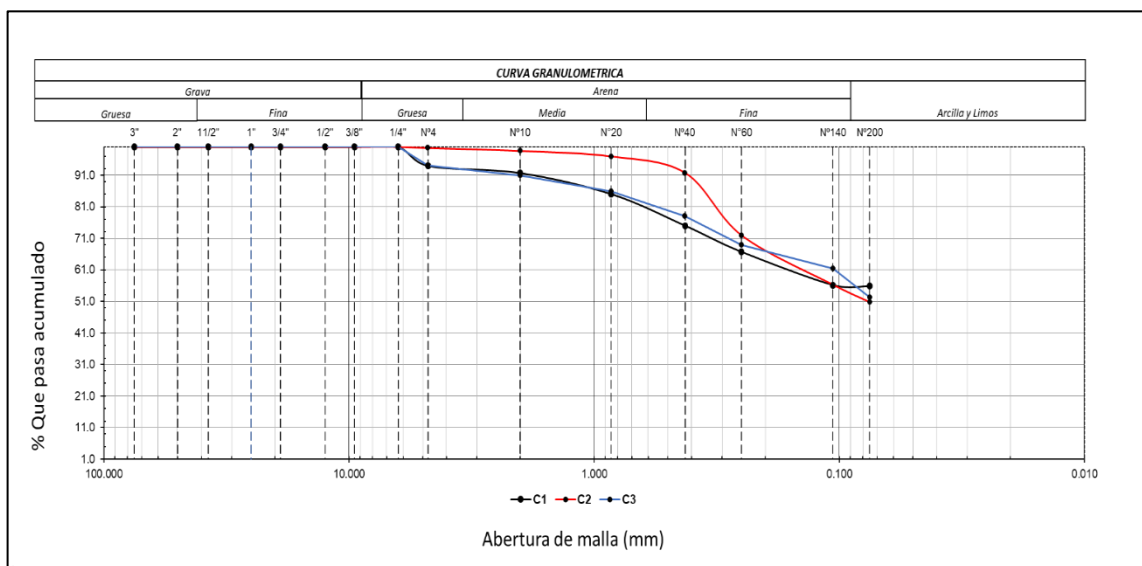
Tabla 9: Contenido de humedad. Fuente: Propia



Gráfica N° 1 : Contenido de humedad muestra natural. Fuente: Propia

Como se muestra en la tabla N°9 y gráfica N°1 se muestra la cantidad de agua presente en el suelo con respecto a las C1, C2 y C3 calicatas con resultados de 12.08%, 12.36% y 15.51% respectivamente.

GRANULOMETRIA POR TAMIZADO



Gráfica N° 2: Curva granulométrica de calicatas. Fuente: Propia

Con respecto a los resultados de la gráfica N° 2 se puede ver el material que pasa por el tamiz N°200 supera el 50%, esto quiere decir que la muestra estudiada es arcillas y limos.

ENSAYO DE SALES SOLUBLES

SALES SOLUBLES		
CALICATA	PROFUNDIDAD	%SALES
C-1	1.5	2.80%
C-2	1.5	2.00%
C-3	1.5	1.90%

Tabla 10: Ensayo sales solubles

De acuerdo con la tabla N°10 muestra los resultados de sales solubles en el suelo en donde se encuentra en un rango de no mayor del 3%.

ENSAYO DE GRAVEDAD ESPECÍFICA

GRAVEDAD ESPECIFICA		
CALICATA	PROFUNDIDAD	g/cm ³
C-1	1.5	2.70
C-2	1.5	2.78
C-3	1.5	2.71

Tabla 11: Ensayo gravedad específica

LÍMITES DE CONSISTENCIA DE LA MUESTRA NATURAL

A continuación, se presentan los resultados del ensayo de límites de consistencia tomando el procedimiento de la normativa MTC E110 y MTC E-111.

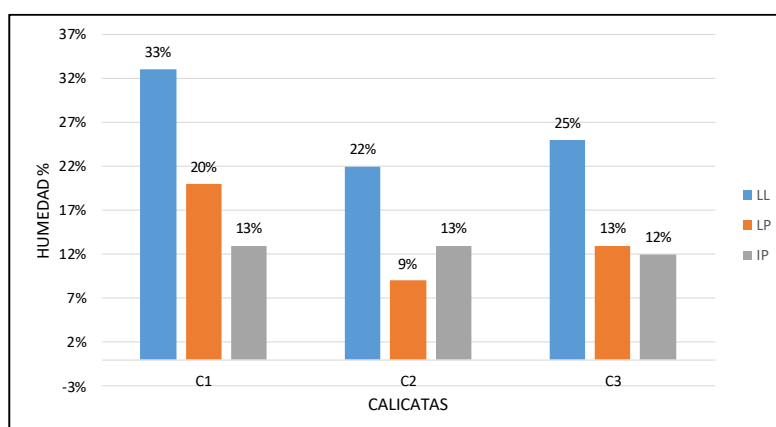
LÍMITES DE CONSISTENCIA			
CALICATA	LL	LP	IP
C1	33%	20%	13%
C2	22%	9%	13%
C3	25%	13%	12%

Tabla 12: Límites de consistencia. Fuente: Propia

Con respecto a los resultados obtenidos y verificando los índices de plasticidad de las muestras ensayadas se puede afirmar que son arcillas de plasticidad media de acuerdo al siguiente cuadro.

INDICE DE PLASTICIDAD	PLASTICIDAD	CARACTERISTICAS
$IP > 20$	Alta	Suelos muy arcillosos
$IP \leq 20$ $IP > 7$	Media	Suelos arcillosos
$IP < 7$	Baja	Suelos poco arcillosos plasticidad
$IP = 0$	No Plástico (NP)	Suelos extensos de arcilla

Tabla 13: Clasificación según Ip. Fuente: MTC



Gráfica N° 3: Límites de Atterberg de calicatas. Fuente: Propia

De acuerdo a la gráfica N° 3 se muestra los resultados de LL, LP e IP con valores de 33%, 20% y 13% correspondientes a las calicatas C1, C2 y C3 tratándose de suelo arcilloso.

CLASIFICACION DE SUELO NATURAL

Teniendo los resultados de la granulometría y los límites de consistencia podemos clasificar las muestras basándose en los métodos ASSHTO y SUCS.

CLASIFICACIÓN				
CALICATA	MUESTRA	PROFUNDIDAD	ASSHTO	SUCS
C-1	M-1	1.5	A-6(5)	CL
C-2	M-2	1.5	A-6(4)	CL
C-3	M-3	1.5	A-6(4)	CL

Tabla 14: Clasificación AASHTO Y SUCS. Fuente: Propia

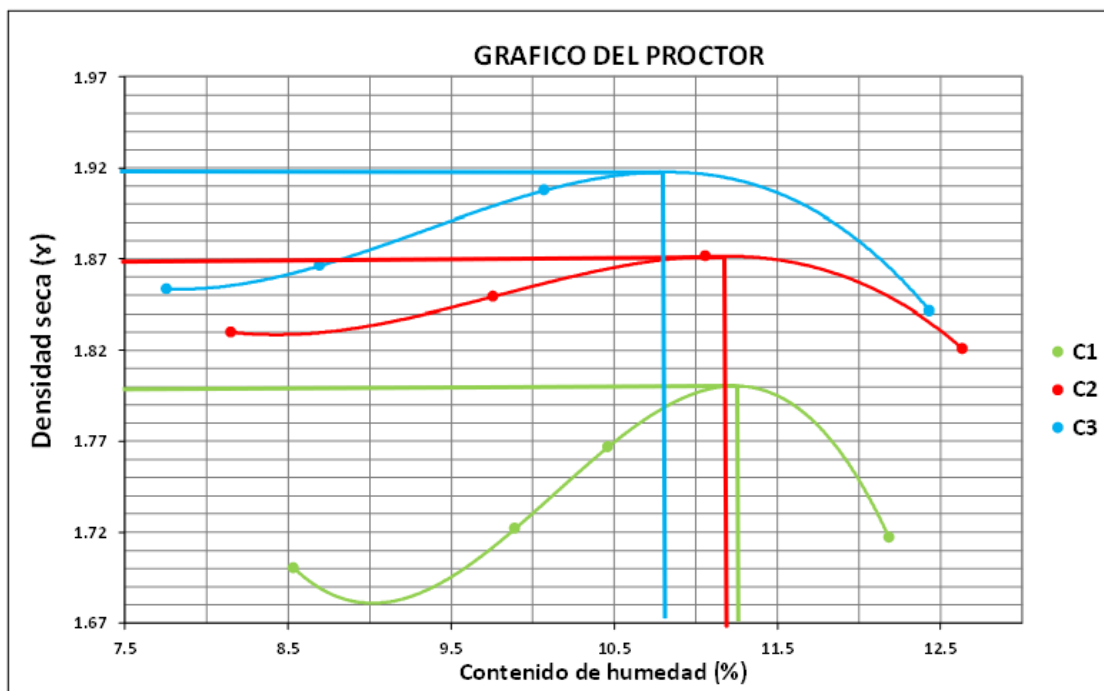
PROCTOR MODIFICADO SUELO NATURAL

Basado en la normativa MTC E-115, busca la MDS y el OCH del suelo para así tener una máxima resistencia y estabilidad. Para obtener estos resultados se ha realizado 2 ensayos Proctor por calicata para sacar un promedio de resultados.

PROCTOR MODIFICADO			
CALICATA	PROFUNDIDAD	OCH %	MDS (gr/cm ³)
C-1	1.5	11.27%	1.799
		11.20%	1.808
C-2	1.5	10.97%	1.871
		11.39%	1.874
C-3	1.5	10.77%	1.975
		10.89%	1.921

Tabla 15: Proctor modificado muestra natural. Fuente: Propia

En la tabla 15 se reflejan los resultados de OCH y MDS de las 3 calicatas. Estos resultados se van a promediar para luego poder trabajar el ensayo de CBR.



Gráfica N° 4: Proctor modificado natural. Fuente: Propia

PROCTOR MODIFICADO PROMEDIO			
CALICATA	PROFUNDIDAD	OCH %	MDS (gr/cm ³)
C-1	1.5	11.24%	1.8035
C-2	1.5	11.18%	1.8725
C-3	1.5	10.83%	1.948

Tabla 16: Proctor promedio muestra natural. Fuente: Propia

De acuerdo a los resultados de la tabla N°4 se trabajará con un OCH y MDS promedio.

CALIFORNIA BEARING RATIO (CBR)

Para el ensayo de CBR se realizaron 10 ensayos para cada una de las calicatas con la finalidad de obtener un valor más exacto tomando el valor promedio de los 10 resultados.

CALICATA	CBR 0.1" (95% MDS)	CBR 0.1" (100% MDS)	CBR 0.2" (95% MDS)	CBR 0.2" (100% MDS)	PROMEDIO CBR 0.1" (95% MDS)	PROMEDIO CBR 0.1" (100% MDS)	PROMEDIO CBR 0.2" (95% MDS)	PROMEDIO CBR 0.2" (100% MDS)
C-1	2.85	3.73	3.69	5.05	2.56	3.89	2.86	4.97
C-1	2.17	3.23	2.73	4.40				
C-1	2.94	4.83	3.35	6.04				
C-1	1.57	4.06	1.57	5.56				
C-1	2.26	3.50	2.46	4.33				
C-1	3.38	4.07	3.22	4.82				
C-1	2.71	4.30	3.09	5.42				
C-1	2.52	3.87	2.79	4.79				
C-1	2.71	3.99	2.97	5.04				
C-1	2.47	3.29	2.72	4.22				

Tabla 17 CBR promedio calicata 1

La tabla 17 muestra resultados de CBR de la muestra natural lo cual se realizó 10 veces para luego sacar un promedio de estos y así tener un valor más cercano.

CALICATA 2	CBR 0.1" (95% MDS)	CBR 0.1" (100% MDS)	CBR 0.2" (95% MDS)	CBR 0.2" (100% MDS)	PROMEDIO CBR 0.1" (95% MDS)	PROMEDIO CBR 0.1" (100% MDS)	PROMEDIO CBR 0.2" (95% MDS)	PROMEDIO CBR 0.2" (100% MDS)
C-2	1.29	3.44	2.00	4.19	2.37	3.64	2.62	4.64
C-2	2.71	4.44	3.00	5.63				
C-2	1.83	2.23	1.88	4.12				
C-2	3.11	3.50	3.04	4.10				
C-2	2.56	3.63	2.84	4.33				
C-2	1.58	4.27	2.11	5.78				
C-2	2.68	3.86	3.01	4.89				
C-2	2.24	3.38	2.44	4.06				
C-2	3.05	3.72	2.85	4.45				
C-2	2.68	3.95	3.03	4.85				

Tabla 18 CBR promedio calicata 2

La tabla 18 muestra resultados de CBR de la muestra natural lo cual se realizó 10 veces para luego sacar un promedio de estos y así tener un valor más cercano.

CALICATA 3	CBR 0.1" (95% MDS)	CBR 0.1" (100% MDS)	CBR 0.2" (95% MDS)	CBR 0.2" (100% MDS)	PROMEDIO CBR 0.1" (95% MDS)	PROMEDIO CBR 0.1" (100% MDS)	PROMEDIO CBR 0.2" (95% MDS)	PROMEDIO CBR 0.2" (100% MDS)
C-3	1.99	3.05	2.24	4.07	2.23	3.46	2.26	4.52
C-3	2.98	4.44	2.88	5.73				
C-3	2.27	3.48	2.36	4.60				
C-3	1.92	3.06	1.90	3.98				
C-3	1.66	2.82	1.60	3.63				
C-3	2.70	3.98	2.79	5.09				
C-3	2.01	3.38	1.99	4.36				
C-3	1.93	3.17	1.95	4.22				
C-3	2.74	3.80	2.83	5.03				
C-3	2.05	3.46	2.07	4.44				

Tabla 19 CBR promedio calicata 3

La tabla 19 se presentan los resultados de CBR de la muestra natural lo cual se realizó 10 veces para luego sacar un promedio de estos y así tener un valor más cercano.

ENSAYOS EN MUESTRAS EXPERIMENTALES: SUELO NATURAL + LIGNOSULFONATO DE CALCIO (%)

Para las muestras experimentales se realizaron los siguientes ensayos: límites de Atterberg e índice de plasticidad, Proctor modificado y CBR con porcentajes de lignosulfonato de calcio de 1.5%, 2.0% y 2.5%.

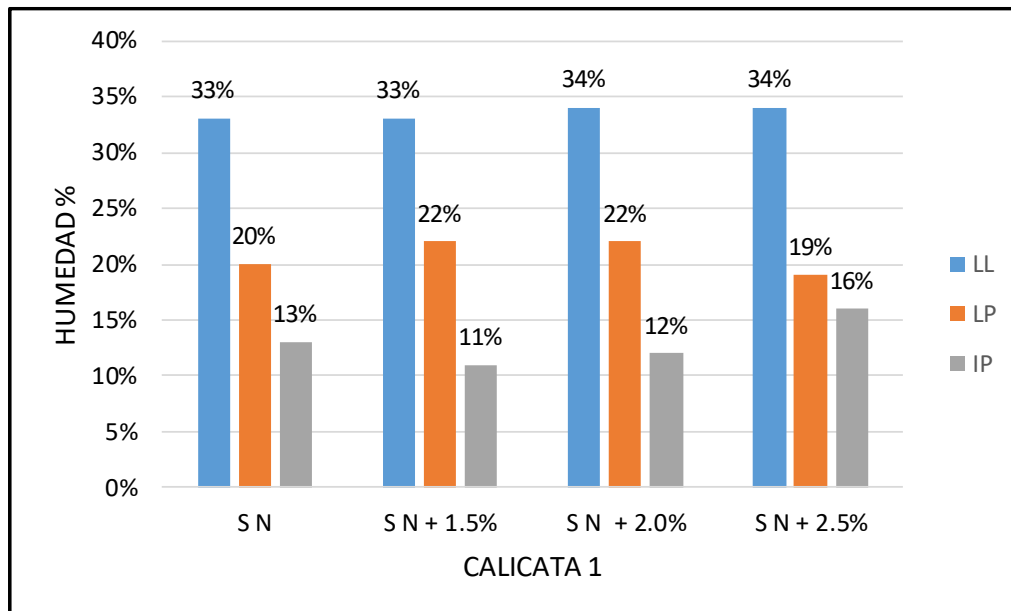
Luego se realizará la comparación de resultados entre ambas muestras de suelo natural y el suelo experimental con las adiciones.

LÍMITES DE ATTERBERG EXPERIMENTALES C-1

LÍMITES DE CONSISTENCIA CALICATA 1			
DISIFICACIÓN	LL	LP	IP
S N	33%	20%	13%
S N + 1.5%	33%	22%	11%
S N + 2.0%	34%	22%	12%
S N + 2.5%	34%	19%	16%

Tabla 20: Límites de consistencia muestra experimental. Fuente: Propia

En la tabla 20 se muestra los resultados de límites de Atterberg del suelo natural y adicionando el polímero en porcentajes de 1.5%, 2.00% y 2.50%



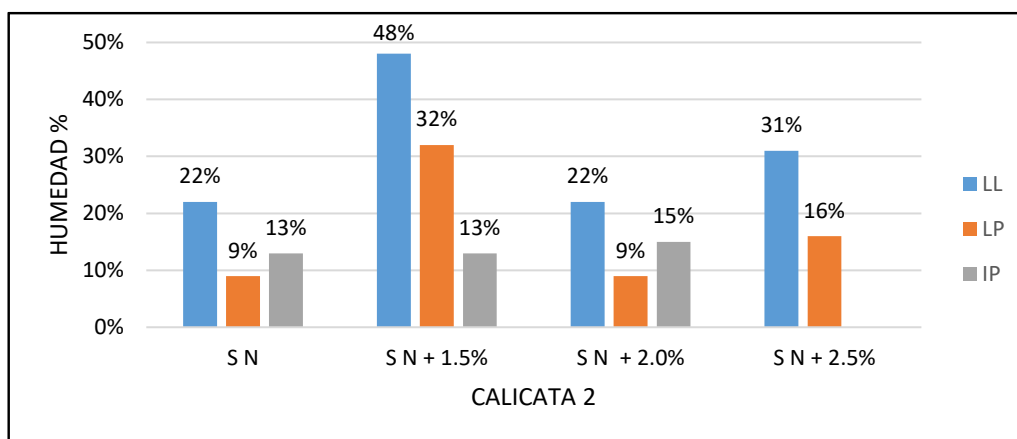
Gráfica N° 5: Límites de consistencia muestra experimentales. Fuente: Propia

Los resultados de la gráfica 5 muestran los valores de IP del suelo natural y suelo adicionado de la calicata 1 en donde el IP con respecto a la muestra natural aumentó en un 3%.

LÍMITES DE ATTERBERG EXPERIMENTALES C-2

LÍMITES DE CONSISTENCIA CALICATA 2			
DISIFICACIÓN	LL	LP	IP
S N	22%	9%	13%
S N + 1.5%	48%	32%	13%
S N + 2.0%	22%	9%	15%
S N + 2.5%	31%	16%	16%

Tabla 21: Límites de consistencia muestra experimental. Fuente: Propia



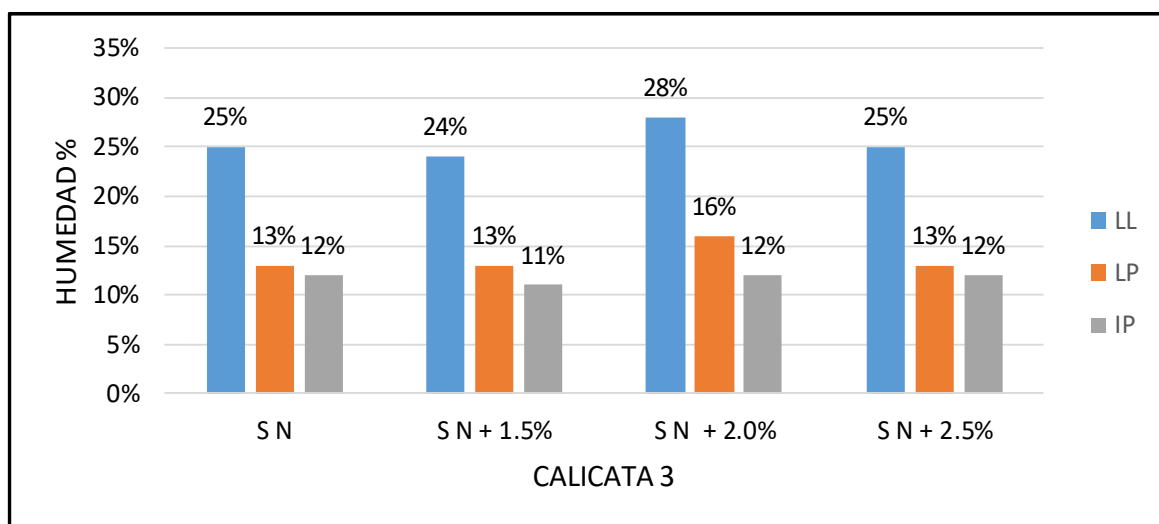
Gráfica N° 6: Límites de consistencia muestra experimentales. Fuente: Propia

Los resultados de la gráfica 6 muestran los valores de IP del suelo natural y suelo adicionado con 2.5% de polímero de la calicata 2 en donde el IP con respecto a la muestra natural aumentó en un 2%.

LÍMITES DE ATTERBERG DE MUESTRAS EXPERIMENTALES C-3

LÍMITES DE CONSISTENCIA CALICATA 3			
DISIFICACIÓN	LL	LP	IP
S N	25%	13%	12%
S N + 1.5%	24%	13%	11%
S N + 2.0%	28%	16%	12%
S N + 2.5%	25%	13%	12%

Tabla 22: Límites de consistencia muestra experimental. Fuente: Propia



Gráfica N° 7: Límites de consistencia muestra experimental. Fuente: Propia

Los resultados de la gráfica 7 muestran los valores de IP del suelo natural y suelo adicionado con el 2.5% de la calicata 3 en donde el IP con respecto a la muestra natural es de un 12%

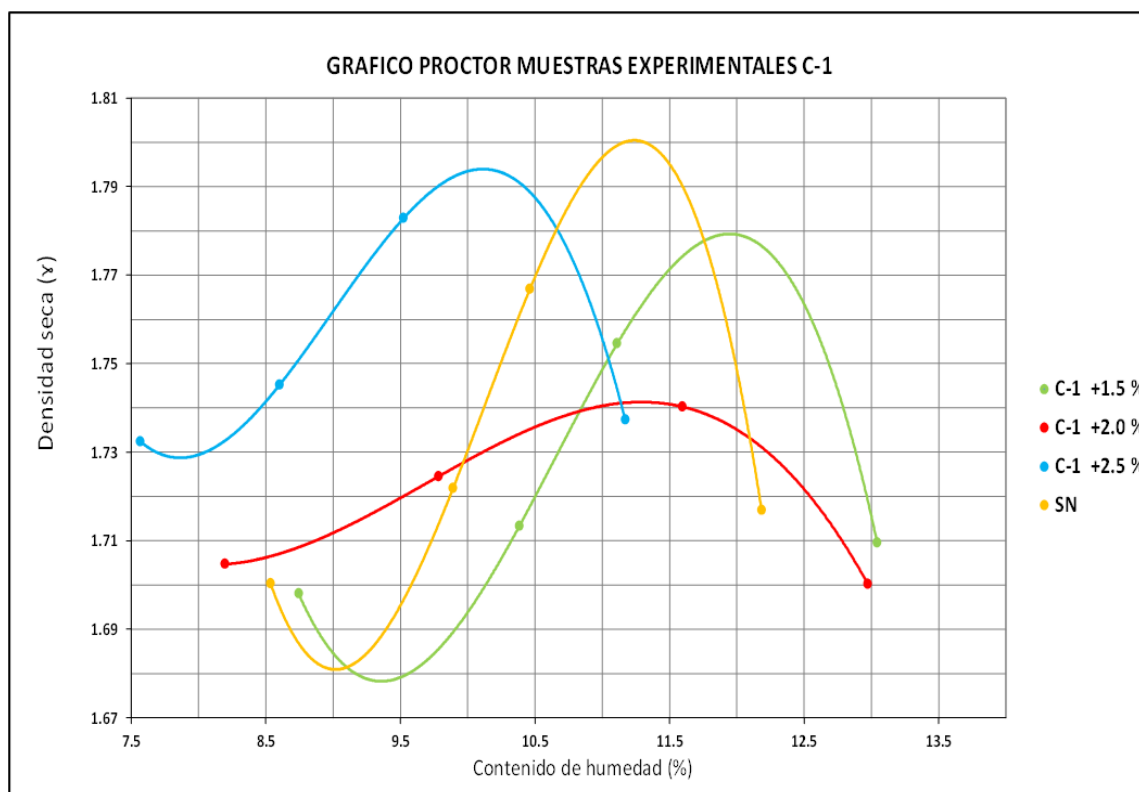
PROCTOR MODIFICADO DE MUESTRAS EXPERIMENTALES C-1

A continuación, se presentan los resultados de Proctor modificado, la curva de compactación tanto de la muestra natural como experimentales.

PROCTOR MODIFICADO			
CALICATA	PROFUNDIDAD	OCH %	MDS (gr/cm ³)
C1	1.5	11.24%	1.804
C-1 +1.5%	1.5	11.97%	1.779
C-1 +2.0%	1.5	11.29%	1.741
C-1 +2.5 %	1.5	10.11%	1.794

Tabla 23: Resultados del ensayo Proctor experimental. Fuente: Propia

Los resultados de la tabla N° 20 los resultados de OCH y MDS en donde se muestra que a medida que se ha ido aumentando la adición la MDS ha ido disminuyendo.



Gráfica N° 8: Curva de compactación de muestras experimentales. Fuente: Propia

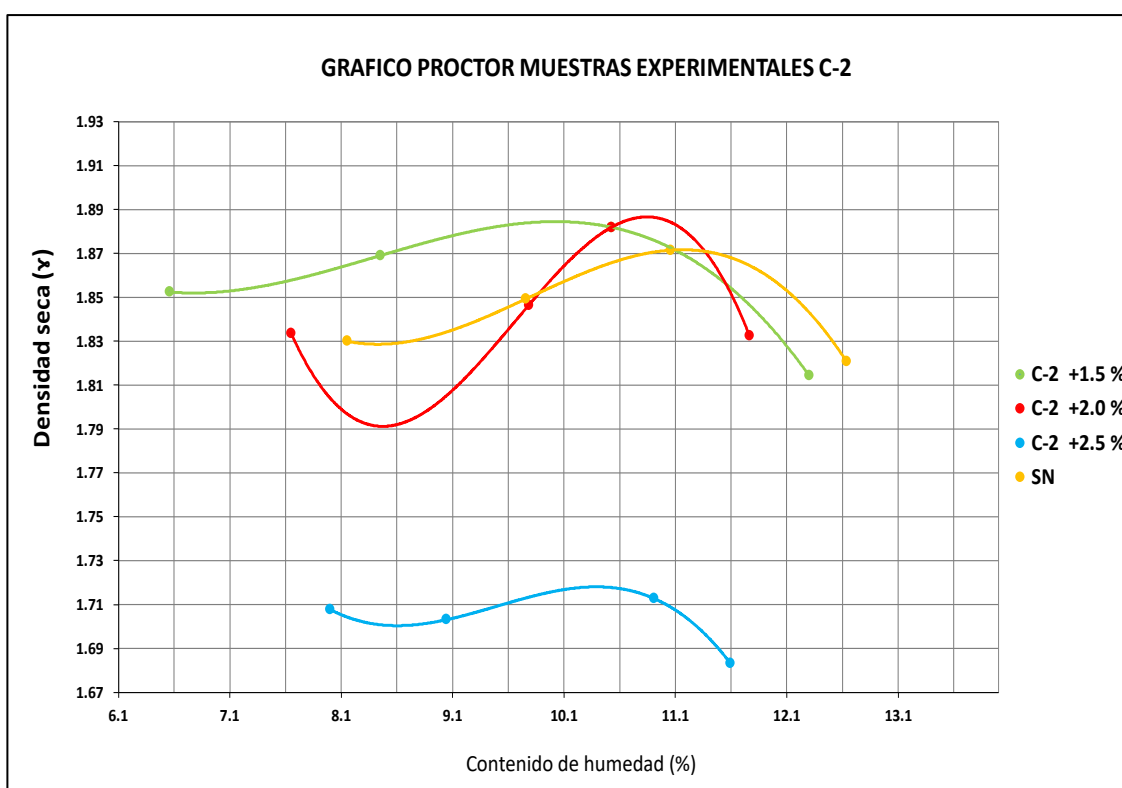
La gráfica N°8 muestra la curva de compactación de la muestra natural y de las muestras experimentales adicionando el polímero lignosulfonato de calcio en adiciones de 1.5%, 2.0% y 2.5%.

PROCTOR MODIFICADO DE MUESTRAS EXPERIMENTALES C-2

PROCTOR MODIFICADO			
CALICATA	PROFUNDIDAD	OCH %	MDS (gr/cm ³)
C-2	1.5	11.18%	1.8725
C-2 +1.5%	1.5	10.01%	1.884
C-2 +2.0%	1.5	10.86%	1.887
C-2 +2.5 %	1.5	10.38%	1.718

Tabla 24: Resultados de ensayo Proctor de muestras experimentales. Fuente: Propia

Los resultados de la tabla N° 21 muestra los resultados de OCH MDS en donde se muestra que a medida que se ha ido aumentando la adición la MDS ha ido disminuyendo



Gráfica N° 9: Curva de compactación experimental. Fuente: Propia

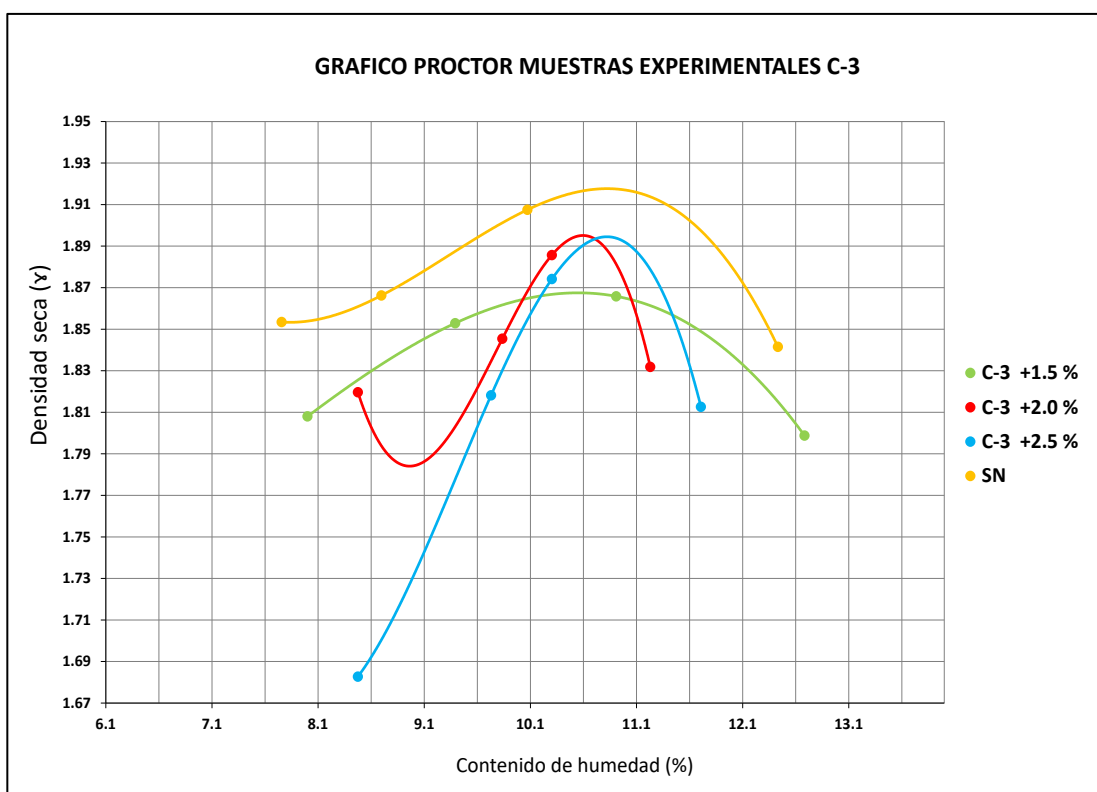
La gráfica N°9 muestra la curva de compactación de la muestra natural y de las muestras ensayadas adicionando el polímero lignosulfonato de calcio en adiciones de 1.5%, 2.0% y 2.5%.

PROCTOR MODIFICADO EXPERIMENTALES C-3

PROCTOR MODIFICADO			
CALICATA	PROFUNDIDAD	OCH %	MDS (gr/cm ³)
C-3	1.5	10.83%	1.918
C-3 +1.5%	1.5	10.57%	1.968
C-3 +2.0%	1.5	10.60%	1.895
C-3 +2.5 %	1.5	10.84%	1.894

Tabla 25: Resultados de ensayo Proctor muestras experimentales

Los resultados de la tabla N° 22 muestra los resultados de OCH y MDS seca en donde se muestra que a medida que se ha ido aumentando la adición la MDS ha ido disminuyendo.



Gráfica N° 10: Curva de compactación de muestras experimentales. Fuente: Propia

La gráfica N°10 muestra la curva de compactación de la muestra natural y de las muestras ensayadas adicionando el polímero lignosulfonato de calcio en adiciones de 1.5%, 2.0% y 2.5%.

CBR DE MUESTRAS EXPERIMENTALES C-1

CALICATA	CBR 0.1" (95% MDS)	CBR 0.1" (100% MDS)	CBR 0.2" (95% MDS)	CBR 0.2" (100% MDS)	PROMEDIO CBR 0.1" (95% MDS)	PROMEDIO CBR 0.1" (100% MDS)	PROMEDIO CBR 0.2" (95% MDS)	PROMEDIO CBR 0.2" (100% MDS)
C-1 + 1.5%	7.11	11.96	8.59	15.13	8.31	12.20	8.72	15.70
C-1 + 1.5%	8.29	12.31	8.18	15.57				
C-1 + 1.5%	7.13	12.13	7.25	15.71				
C-1 + 1.5%	10.27	13.13	11.23	17.21				
C-1 + 1.5%	7.37	12.48	7.37	15.60				
C-1 + 1.5%	7.05	12.36	7.18	15.77				
C-1 + 1.5%	10.25	12.77	10.44	16.45				
C-1 + 1.5%	8.97	11.76	9.67	15.43				
C-1 + 1.5%	6.69	11.35	6.90	14.84				
C-1 + 1.5%	9.98	11.70	10.43	15.24				
C-1 + 2.0%	7.60	9.72	8.01	12.64	6.54	9.86	6.86	11.97
C-1 + 2.0%	5.62	10.08	6.16	12.92				
C-1 + 2.0%	5.91	9.81	6.29	12.50				
C-1 + 2.0%	8.67	10.54	8.24	12.36				
C-1 + 2.0%	5.72	10.03	6.28	10.05				
C-1 + 2.0%	5.71	9.24	6.07	11.77				
C-1 + 2.0%	7.03	9.05	7.62	11.50				
C-1 + 2.0%	5.55	10.18	6.16	12.28				
C-1 + 2.0%	8.23	9.97	7.82	11.65				
C-1 + 2.0%	5.40	10.01	5.93	12.00				
C-1 + 2.5%	4.76	6.68	6.22	9.00	5.02	7.43	5.56	9.39
C-1 + 2.5%	5.09	7.12	6.68	9.61				
C-1 + 2.5%	4.34	6.69	4.68	8.49				
C-1 + 2.5%	5.03	6.75	5.28	8.62				
C-1 + 2.5%	4.15	7.11	4.53	8.78				
C-1 + 2.5%	6.78	8.61	6.43	10.14				
C-1 + 2.5%	5.05	8.06	5.48	10.23				
C-1 + 2.5%	4.43	7.40	4.84	8.92				
C-1 + 2.5%	5.74	8.23	6.22	10.45				
C-1 + 2.5%	4.87	7.63	5.26	9.69				

Tabla 26 CBR de muestras experimentales calicata 1

La tabla 26 presenta los resultados de CBR de muestras experimentales de la calicata 1 con adiciones de 1.5%, 2.0% y 2.5% de lignosulfonato de calcio

CBR DE MUESTRAS EXPERIMENTALES C-2

CALICATA	CBR 0.1" (95% MDS)	CBR 0.1" (100% MDS)	CBR 0.2" (95% MDS)	CBR 0.2" (100% MDS)	PROMEDIO CBR 0.1" (95% MDS)	PROMEDIO CBR 0.1" (100% MDS)	PROMEDIO CBR 0.2" (95% MDS)	PROMEDIO CBR 0.2" (100% MDS)
C-2 + 1.5%	9.03	12.27	9.53	15.72	9.17	12.69	9.79	15.39
C-2 + 1.5%	9.34	13.08	10.08	16.54				
C-2 + 1.5%	8.17	12.21	9.57	15.50				
C-2 + 1.5%	10.31	12.66	9.89	14.92				
C-2 + 1.5%	8.35	13.30	9.60	13.32				
C-2 + 1.5%	9.94	12.09	10.46	15.35				
C-2 + 1.5%	9.34	12.82	10.11	16.29				
C-2 + 1.5%	8.30	13.01	9.46	15.75				
C-2 + 1.5%	10.53	12.74	9.96	15.14				
C-2 + 1.5%	8.37	12.71	9.27	15.39				
C-2 + 2.0%	6.51	8.70	8.68	11.76	6.37	9.77	7.01	11.80
C-2 + 2.0%	6.29	8.76	8.30	11.81				
C-2 + 2.0%	5.78	9.16	6.33	11.63				
C-2 + 2.0%	6.43	9.56	6.71	12.27				
C-2 + 2.0%	6.55	10.38	7.22	12.64				
C-2 + 2.0%	8.23	10.50	7.82	12.30				
C-2 + 2.0%	5.65	9.08	6.04	11.12				
C-2 + 2.0%	6.61	13.35	6.26	11.23				
C-2 + 2.0%	5.69	8.87	6.09	11.30				
C-2 + 2.0%	5.94	9.38	6.63	11.89				
C-2 + 2.5%	4.91	7.80	5.50	9.95	5.38	7.92	5.63	9.80
C-2 + 2.5%	4.73	6.86	5.04	8.73				
C-2 + 2.5%	4.73	7.31	5.04	9.26				
C-2 + 2.5%	7.36	8.82	6.99	10.26				
C-2 + 2.5%	5.95	8.49	6.45	10.32				
C-2 + 2.5%	4.35	7.82	4.75	9.56				
C-2 + 2.5%	5.97	7.85	6.43	10.00				
C-2 + 2.5%	5.09	8.54	5.58	10.93				
C-2 + 2.5%	6.20	7.60	5.87	9.18				
C-2 + 2.5%	4.55	8.08	4.62	9.84				

Tabla 27 CBR de muestras experimentales calicata 2

La tabla 27 presenta los resultados de CBR de muestras experimentales de la calicata 2 con adiciones de 1.5%, 2.0% y 2.5% de lignosulfonato de calcio

CBR DE MUESTRAS EXPERIMENTALES C-3

CALICATA	CBR 0.1" (95% MDS)	CBR 0.1" (100% MDS)	CBR 0.2" (95% MDS)	CBR 0.2" (100% MDS)	PROMEDIO CBR 0.1" (95% MDS)	PROMEDIO CBR 0.1" (100% MDS)	PROMEDIO CBR 0.2" (95% MDS)	PROMEDIO CBR 0.2" (100% MDS)
C-3 + 1.5%	8.97	12.23	11.99	16.30	9.33	12.24	10.37	15.22
C-3 + 1.5%	7.28	10.44	9.65	14.14				
C-3 + 1.5%	8.92	12.12	9.40	13.32				
C-3 + 1.5%	9.38	12.06	9.85	15.23				
C-3 + 1.5%	10.99	13.21	11.31	16.06				
C-3 + 1.5%	10.28	12.24	9.79	14.59				
C-3 + 1.5%	9.81	12.23	10.60	15.44				
C-3 + 1.5%	9.16	13.35	10.17	16.14				
C-3 + 1.5%	9.23	12.61	10.82	15.94				
C-3 + 1.5%	9.27	11.90	10.14	15.05				
C-3 + 2.0%	6.49	9.25	12.52	8.57	6.99	10.09	8.27	11.81
C-3 + 2.0%	6.10	8.66	8.05	11.70				
C-3 + 2.0%	6.80	8.50	7.38	10.88				
C-3 + 2.0%	8.79	9.77	9.92	12.66				
C-3 + 2.0%	6.55	9.06	7.22	11.14				
C-3 + 2.0%	8.23	10.66	7.82	12.66				
C-3 + 2.0%	7.38	9.45	8.20	12.12				
C-3 + 2.0%	6.55	14.79	7.22	13.20				
C-3 + 2.0%	6.04	9.68	6.83	12.23				
C-3 + 2.0%	7.00	11.10	7.51	12.93				
C-3 + 2.5%	4.75	6.60	6.21	8.87	4.97	7.45	5.69	9.46
C-3 + 2.5%	4.92	6.92	6.45	9.33				
C-3 + 2.5%	4.23	6.76	4.57	8.55				
C-3 + 2.5%	5.11	7.01	5.30	9.01				
C-3 + 2.5%	4.13	7.48	4.51	9.54				
C-3 + 2.5%	6.79	8.61	6.44	10.13				
C-3 + 2.5%	5.29	8.10	7.04	10.27				
C-3 + 2.5%	4.43	7.18	4.84	8.76				
C-3 + 2.5%	5.25	8.15	6.39	10.33				
C-3 + 2.5%	4.83	7.72	5.16	9.80				

Tabla 28 CBR de muestras experimentales calicata 2

La tabla 28 presenta los resultados de CBR de muestras experimentales de la calicata 2 con adiciones de 1.5%, 2.0% y 2.5% de lignosulfonato de calcio

PENETROMETRO DINAMICO DE CONO

PENETRÓMETRO DINÁMICO DE CONO ASTM D 6951						
PUNTO:		1	CL		Arcilla de baja plasticidad	
LOCALIZACIÓN						
PESO DEL MARTILLO:		8,0 kg	FECHA:		Ago-24	
FACTOR DEL MARTILLO:		1,0				
CLASIFICACIÓN DEL TERRENO:		CL				
Número de golpes acumulados	Número de golpes	% golpes	Penetración acumulada (mm)	Penetración por lectura (mm)	Índice PDC (mm/golpe)	CBR ⁽¹⁾ (%)
0	0	0.0	0			
1	1	16.7	100	100	100.0	1.68
3	2	50.0	200	100	50.0	3.65
6	3	100.0	300	100	33.3	5.75

Tabla 29 Resultados de ensayo DPC muestra natural

En la tabla 29 presenta resultados del ensayo DPC de la muestra natural con un resultado de CBR aproximado de 5.75% que se asemeja a los resultados realizados en laboratorio.

PENETRÓMETRO DINÁMICO DE CONO ASTM D 6951						
PUNTO:		3	CL		Arcilla de baja plasticidad	
LOCALIZACIÓN						
PESO DEL MARTILLO:		8,0 kg	FECHA:		Ago-24	
FACTOR DEL MARTILLO:		1,0				
CLASIFICACIÓN DEL TERRENO:		CL				
ADICION		Lignosulfonato de calcio				
Número de golpes acumulados	Número de golpes	% golpes	Penetración acumulada (mm)	Penetración por lectura (mm)	Índice PDC (mm/golpe)	CBR ⁽¹⁾ (%)
0	0	0.0	0			
5	5	27.8	100	100	20.0	10.19
11	6	61.1	200	100	16.7	12.50
18	7	100.0	300	100	14.3	14.86

Tabla 30 Resultados de ensayo PDC muestra experimental

En la tabla 30 se muestran los resultados del ensayo DPC de la muestra experimental con adición al 1.5% de lignosulfonato de calcio mostrando un resultado de CBR aproximado de 14.56% que se asemeja a los resultados realizados en laboratorio

DISCUSIÓN DE RESULTADOS

El comportamiento del polímero lignosulfonato de calcio en el suelo arcilloso estudiado es relevante ya que al momento de realizar la comparación de las muestras naturales se puede verificar que hay una mejora físicas y mecánicas. Seguidamente se llevará a cabo la discusión de resultados y haciendo una comparativa con investigaciones previas relacionadas.

RESUMEN DE RESULTADOS NATURAL								
CALICATA	HUMEDAD	CLASIFICACIÓN		LIMITE LIQUIDO	LIMITE PLASTICO	INDICE DE PLASTICIDAD	CBR 0.2" (95% M.D.S)	CBR 0.2" (100% M.D.S)
		ASSTHO	SUCS					
C-1	12.08%	A-6(5)	CL	33%	20%	13%	2.85	4.97
C-2	12.36%	A-6(4)	CL	22%	9%	13%	2.62	6.64
C-3	15.51%	A-6(4)	CL	25%	13%	12%	2.26	5.52

Tabla 31 Resultados de muestras naturales

De acuerdo con los resultados, las muestras estudiadas se tratan de un suelo arcilloso el cual quiere decir que es un suelo con baja capacidad portante, lo cual el ensayo de CBR pone en evidencia, debido a esto es necesario el mejoramiento de este tipo de suelos.

CALICATA 1

LIMITES DE ATTERBERG

CALICATA	LIMITE LIQUIDO	LIMITE PLASTICO	INDICE DE PLASTICIDAD
C-1	33%	20%	13%
C-1 + 1.5%LS	33%	22%	11%
C-1 + 2.0%LS	34%	22%	12%
C-1 + 2.5%LS	34%	19%	16%

Tabla 32 Resultados límites de Atterberg calicata 1

Resultados de límites de Atterberg obtenidos con adición de lignosulfonato de calcio

Como se puede observar en el cuadro, el comportamiento de índice de plasticidad se reduce al adicionar el 1.5% de lignosulfonato de calcio, pero mientras se va adicionando el polímero el índice de plasticidad aumenta, esto se debe al comportamiento entre el suelo arcilloso y el polímero.

PROCTOR

PROCTOR MODIFICADO			
CALICATA	PROFUNDIDAD	OCH %	MDS (gr/cm ³)
C1	1.5	11.24%	1.804
C-1 +1.5%	1.5	11.97%	1.779
C-1 +2.0%	1.5	11.29%	1.741
C-1 +2.5 %	1.5	10.11%	1.794

Tabla 33 Resultados de Proctor Modificado calicata 1

Como se puede observar en el cuadro al adicionar el polímero lignosulfonato de calcio varía ligeramente los resultados de OCH y MDS, pero eso no quiere decir que no aumentará su resistencia como se mostrará en los ensayos de CBR.

CBR

Con respecto al CBR, se ha realizado 10 ensayos para la muestra patrón y 10 para una de las adiciones en donde se puede observar que aumenta con el menor porcentaje de lignosulfonato de calcio 1.5% y al seguir aumentando el porcentaje del polímero el CBR disminuye. El mejor resultado de índice de CBR promedio pasó de 4.97% a 15.70%.

CALICATA 2

LIMITES DE ATTERBERG

CALICATA	LIMITE LIQUIDO	LIMITE PLASTICO	INDICE DE PLASTICIDAD
C-2	22%	9%	13%
C-2 + 1.5% LS	22%	9%	13%
C-2 + 2.0% LS	31%	16%	15%
C-2 + 2.5% LS	48%	32%	16%

Tabla 34 Resultados límites de Atterberg calicata 2

Como se refleja en la tabla 32, el comportamiento es similar en al de la calicata 1, pero en este caso al adicionar el 1.5% de lignosulfonato de calcio el índice de plasticidad se ha mantenido, pero al seguir aumentando el porcentaje de adición el índice de plasticidad va aumentando como en el caso anterior.

PROCTOR

PROCTOR MODIFICADO			
CALICATA	PROFUNDIDAD	OCH %	MDS (gr/cm ³)
C-2	1.5	11.18%	1.8725
C-2 +1.5%	1.5	10.01%	1.884
C-2 +2.0%	1.5	10.86%	1.887
C-2 +2.5 %	1.5	10.38%	1.718

Tabla 35 Resultados de Proctor Modificado calicata 2

Como refleja la tabla 33, al agregar lignosulfonato de calcio varía ligeramente los resultados de OCH Y MDS, pero eso no quiere decir que no aumentará su resistencia como se mostrará en los ensayos de CBR.

CBR

Con respecto al CBR, presenta un similar comportamiento que la calicata 1, donde se puede observar que aumenta con el menor porcentaje de lignosulfonato de calcio 1.5% y al seguir aumentando el porcentaje del polímero el CBR disminuye. El mejor resultado de índice de CBR pasó de 6.64% a 15.39%

CALICATA 3

LIMITES DE ATTERBERG

CALICATA	LIMITE LIQUIDO	LIMITE PLASTICO	INDICE DE PLASTICIDA
C-3	25%	13%	12%
C-3 + 1.5% LS	24%	13%	11%
C-3 + 2.0% LS	28%	16%	12%
C-3 + 2.5% LS	25%	13%	12%

Tabla 36 Resultados límites de Atterberg calicata 3

Por último, la calicata 3, los resultados obtenidos muestran que con el 1.5% de lignosulfonato de calcio el índice baja y luego vuelve a aumentar al igual que las otras 2 calicatas, entonces podemos decir que con la el índice de plasticidad mejora con el 1.5% de adición.

PROCTOR

PROCTOR MODIFICADO			
CALICATA	PROFUNDIDAD	OCH %	MDS (gr/cm ³)
C-3	1.5	10.83%	1.918
C-3 +1.5%	1.5	10.57%	1.968
C-3 +2.0%	1.5	10.60%	1.895
C-3 +2.5 %	1.5	10.84%	1.894

Tabla 37 Resultados de Proctor Modificado calicata 2

Como se refleja en la tabla 35, al adicionar el polímero lignosulfonato de calcio varía ligeramente los resultados de OCH y la MDS, pero eso no quiere decir que no aumentará su resistencia como se mostrará en los ensayos de CBR.

CBR

Con respecto al CBR, presenta un similar comportamiento que la calicata 1 y 2, donde se puede observar que aumenta con el menor porcentaje de lignosulfonato de calcio 1.5% y al seguir aumentando el porcentaje del polímero el CBR disminuye. El mejor resultado de índice de CBR pasó de 4.52% a 15.22%.

RESULTADOS								
MUESTRA	PROFUNDIDAD (m)	LL	LP	IP	OCH	MDS	CBR 0.2" (95% MDS)	CBR 0.2" (95% MDS)
C-1	1.5	33%	20%	13%	11.24 %	1.804	2.56	4.97
C-1+1.5%	1.5	33%	22%	11%	11.97 %	1.779	8.72	15.70
C-1+2.0 %	1.5	34%	22%	12%	11.29 %	1.741	6.86	11.97
C-1+2.5%	1.5	34%	19%	16%	10.11 %	1.794	5.56	9.39
C-2	1.5	22%	9%	13%	11.18 %	1.873	2.62	4.64
C-2+1.5%	1.5	22%	9%	13%	10.01 %	1.884	9.79	15.39
C-2+2.0%	1.5	31%	16%	15%	10.86 %	1.887	7.01	11.80
C-2+2.5%	1.5	48%	32%	16%	10.38 %	1.718	5.63	9.80
C-3	1.5	25%	13%	12%	10.83 %	1.918	2.26	4.52
C-3+1.5%	1.5	24%	13%	11%	10.57 %	1.968	10.37	15.22
C-3+2.50%	1.5	28%	16%	12%	10.60 %	1.895	8.27	11.81
C-3+2.5%	1.5	25%	13%	12%	10.84 %	1.894	5.69	9.46

Tabla 38 Resumen de resultados

De acuerdo con los resultados se puede decir que a menor porcentaje el índice de plasticidad logra bajar ligeramente mientras que al seguir aumentando el porcentaje vuelve a subir o mantener su índice de plasticidad. Según los Edwar Huamán, obtuvo valores similares en los límites de Atterberg donde su muestra patrón logra disminuir su índice de plasticidad de 20.35% a 16.90% y al seguir adicionando el polímero tiende a aumentar su Índice de plasticidad.

Según Gaoqiang Wang y Yunpeng Liang en su investigación obtuvieron de MDS de 1.786 g/cm³ con una dosificación del 3% y en esta misma su óptimo contenido de humedad logró disminuir, pero al seguir aumentando la dosificación de 3% al 6% muestra un patrón descontente, pero no significativamente, comparando nuestros resultados, podemos decir que tiene un comportamiento similar ya que la MDS llega a un máximo con el 1.5%, esto quiere decir que los poros del suelo se llenaron con mayor eficacia en este estado. Sin embargo, a medida que se va aumentando el porcentaje de adición la máxima densidad seca disminuye debido a que el exceso de lignosulfonato de calcio debilita la unión entre partículas. El óptimo contenido de humedad logra disminuir con la adición, esto es consecuencia de la capacidad de los materiales cementantes formados por el lignosulfonato de calcio y los minerales que presenta la arcilla para envolver las partículas del suelo.

El índice de CBR aumentó con el menor porcentaje de adición de 1.5%, el menor valor de CBR fue para la Calicata 3 con una muestra patrón de 4.52% y con la adición del polímero llegó a 15.22%, entonces se puede decir que aumentó 3.37 veces su valor inicial dando buenos resultados como estabilizador, datos que al ser comparados con la investigación de Retuerto y Gonzales ensayaron un suelo arcilloso de tipo CL donde el resultado de CBR natural fue de 13.70% y con la adición de polímero al 0.75% logró alcanzar valores de 105% curadas en 8 días. Si bien es cierto nuestro máximo valor de CBR fue de 15.70% curadas en 4 días con una adición de 1.50% podemos decir que con un porcentaje bajo se obtiene un mayor índice de CBR. Comparando con otra investigación realizada por D'alembet Huamán, logró tener un mayor resultado de CBR adicionado un porcentaje de 6% de lignosulfonato de calcio obteniendo un resultado de 19.22% al 100% de MDS.

ANÁLISIS ECONÓMICO

Se realizó el análisis de costo unitario que nos permitirá realizar una comparación entre la estabilización de subrasante con lignosulfonato de calcio y la estabilización con cal y cemento.

Partida : ESTABILIZACION DE SUBRASANTE CON CEMENTO 9% E=0.20 M						
Unidad : m2						
Rendimiento : 120.00						
						Costo unitario directo por m2 S/ 52.24
Descripción	Unidad	Cuadrilla	Cantidad	Precio Unitario	Parcial	Total
Mano de obra						S/ 4.48
OPERARIO	hh	1.00	0.0667	27.71	1.85	
PEON	hh	2.00	0.1333	19.71	2.63	
Materiales						S/ 18.04
CEMENTO TIPO I	bis		0.7200	25.06	18.04	
Equipos y herramientas						S/ 29.73
HERRAMIENTAS MANUALES	%mo		5.0000	4.48	0.22	
VIBRADOR LISO AUTOPROPULSADO 101-135 HP	hm	1.00	0.0667	159.67	10.64	
MOTONIVELADORA DE 125 HP	hm	1.00	0.0667	151.21	10.08	
CAMION CISTERNA 4X2 122 HP 2 000 GAL	hm	1.00	0.0667	131.66	8.78	
Costo Unitario S/						52.24

Tabla 39 Análisis de precio unitario con cemento

Partida : ESTABILIZACION DE SUBRASANTE CON CAL 10% E=0.20 M						
Unidad : m2						
Rendimiento : 120.00						
						Costo unitario directo por m2 S/ 59.99
Descripción	Unidad	Cuadrilla	Cantidad	Precio Unitario	Parcial	Total
Mano de obra						S/ 4.48
OPERARIO	hh	1.00	0.0667	27.71	1.85	
PEON	hh	2.00	0.1333	19.71	2.63	
Materiales						S/ 25.79
CAL 20 KG	bis		1.7000	15.17	25.79	
Equipos y herramientas						S/ 29.73
HERRAMIENTAS MANUALES	%mo		5.0000	4.48	0.22	
VIBRADOR LISO AUTOPROPULSADO 101-135 HP	hm	1.00	0.0667	159.67	10.64	
MOTONIVELADORA DE 125 HP	hm	1.00	0.0667	151.21	10.08	
CAMION CISTERNA 4X2 122 HP 2 000 GAL	hm	1.00	0.0667	131.66	8.78	
Costo Unitario S/						59.99

Tabla 40 Análisis de precio unitario con cal

Partida : ESTABILIZACION DE SUBRASANTE CON LIGNOSULFONATO DE CALCIO 1.5% E=0.20 M						
Unidad : m2						
Rendimiento : 120.00 Costo unitario directo por m2 S/ 69.14						
Descripción	Unidad	Cuadrilla	Cantidad	Precio Unitario	Parcial	Total
Mano de obra						S/ 4.48
OPERARIO	hh	1.00	0.0667	27.71	1.85	
PEON	hh	2.00	0.1333	19.71	2.63	
Materiales						S/ 34.94
LIGNOSULFONATO DE CALCIO 20 KG	Kg		0.2550	137.00	34.94	
Equipos y herramientas						S/ 29.73
HERRAMIENTAS MANUALES	%m o		5.0000	4.48	0.22	
VIBRADOR LISO AUTOPROPULSADO 101-135 HP	hm	1.00	0.0667	159.67	10.64	
MOTONIVELADORA DE 125 HP	hm	1.00	0.0667	151.21	10.08	
CAMION CISTERNA 4X2 122 HP 2 000 GAL	hm	1.00	0.0667	131.66	8.78	
Costo Unitario S/ 69.14						

Tabla 41 Análisis de precio con lignosulfonato de calcio

Conclusiones

Se logró caracterizar el suelo mediante el método ASSHTO para las 3 calicatas, donde más del 35% del material pasó por el tamiz N° 200 lo que evidencia que es un suelo arcilloso, de igual manera se clasificó por el método SUCS dando como resultado un suelo de arcilloso CL de baja plasticidad.

Se logró determinar las propiedades del suelo con los ensayos que nos brinda la normativa del manual de carreteras del Ministerio de transporte, al ser un tipo CL presenta una baja resistencia, en cambio con la menor adición mejora ya que el índice logra bajar de porcentaje y ligeramente OCH, su MDS logra aumentar por ende el índice de CBR aumentó.

Se realizó el ensayo químico al lignosulfonato de calcio mediante rayos X para saber su composición, observando que presenta porcentajes de sílice y óxido de calcio suficientes que funcionan como cementantes.

Se obtuvo la MDS y OCH mediante el ensayo Proctor modificado, donde se reflejan los mejores resultados con una adición del 1.5% de lignosulfonato de calcio en la calicata 3 obteniendo valores de 1.868 MDS y 10.57% OCH.

Del cálculo obtenido en la investigación, con respecto al CBR, la muestra patrón tiene un valor de 2 a 5 % y nuestro mejor resultado con la adición de 1.5% de lignosulfonato de calcio llega a un 15.70%, por ende, la subrasante ha tenido una mejora y de acuerdo a la clasificación de subrasantes según el manual de carreteras esta pasa de Sub rasante insuficiente S1 a una Sub rasante Buena S3.

Se determinó a través de los ensayos que se obtienen mejores resultados de IP, OCH, MDA y CBR con una adición de 1.5% de lignosulfonato de calcio.

Se realizó el análisis económico en donde se obtuvo que el lignosulfonato de calcio es más alrededor de 8 soles más caro que la cal y 16 soles más que el cemento.

Se realizó el tramo de prueba con el ensayo PDC para verificar la resistencia del suelo donde se obtuvo resultados de CBR de 14.86% semejantes a los resultados obtenidos en laboratorio.

Recomendaciones

Se recomienda realizar el mismo procedimiento con un mayor tiempo de curación ya que en esta investigación fue de 4 día, a mayor tiempo de curado se espera obtener mejores resultados.

Se recomienda el uso de lignosulfonato de calcio para el mejoramiento de subrasante ya que los resultados obtenidos mejoran el CBR, siendo este un ensayo importante para proyectos de carreteras.

Se recomienda combinar el polímero lignosulfonato de calcio con otros estabilizadores como la cal o cemento para ver su comportamiento y como varían las propiedades físicas y mecánicas.

Para próximas investigaciones se recomienda ensayar el lignosulfonato de calcio con otro tipo de suelos como gravas, arenas o con otra clasificación de suelos finos.

Se recomienda hacer la mezcla de suelo natural con lignosulfonato de calcio ambos en estado seco, antes de mezclarlo con agua para que tenga una buena mezcla homogénea.

Dado que los resultados han sido aproximadamente satisfactorios se recomienda que para futuras investigaciones se realicen ensayos de compresión simple, corte directo y triaxial, para poder valorizar en factores para posteriormente para el cálculo de cimentaciones, contenciones mediante el ángulo de rozamiento y la cohesión.

Referencias

- [1] C. R. V. Prasad, this link will open in a new window Link to external site, y B. Reshmarani, «Characterization of expansive soils treated with lignosulfonate», *Int. J. Geo-Eng.*, vol. 11, n.º 1, dic. 2020, doi: 10.1186/s40703-020-00124-1.
- [2] B. Ta'negonbadi y R. Noorzad, «Stabilization of clayey soil using lignosulfonate», *Transp. Geotech.*, vol. 12, pp. 45-55, sep. 2017, doi: 10.1016/j.trgeo.2017.08.004.
- [3] C. H. H. Sandoval, J. C. G. Cristancho, y Ó. E. P. Naranjo, «Caracterización de un suelo arcilloso tratado con hidróxido de calcio», *Fac. Ing.*, vol. 21, n.º 32, pp. 21-40, 2012, Accedido: 3 de junio de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=413940771003>
- [4] «NORMACE020.pdf». Accedido: 3 de junio de 2023. [En línea]. Disponible en: http://www3.vivienda.gob.pe/dnc/archivos/Estudios_Normalizacion/Normalizacion/normas/NORMACE020.pdf
- [5] X. Kong, G. Wang, Y. Liang, Z. Zhang, y S. Cui, «The Engineering Properties and Microscopic Characteristics of High-Liquid-Limit Soil Improved with Lignin», *Coatings*, vol. 12, n.º 2, p. 268, feb. 2022, doi: 10.3390/coatings12020268.
- [6] L. Moraes, F. Parfitt, y C. Bastos, *ESTABILIZAÇÃO DE UMA AREIA ARGILOSA SEDIMENTAR PROVENIENTE DE UMA JAZIDA LOCALIZADA NO RS COM O USO DO ADITIVO QUÍMICO LIGNOSULFONATO DE CÁLCIO (LS)*. 2019.
- [7] «[INDECI PNUD] Mapa de Peligros de la ciudad de Ferreñafe (Biblioteca SIGRID)». <https://sigrid.cenepred.gob.pe/sigridv3/documento/3097> (accedido 3 de junio de 2023).
- [8] D. H. Schwendler, «Estabilização de dois solos do Rio Grande do Sul com Lignosulfonatode cálcio para fins rodoviários.», 2013, Accedido: 3 de junio de 2023. [En línea].
Disponible en: <http://repositorio.unisc.br:8080/jspui/handle/11624/1137>
- [9] E. D. Huamán Pezo, «Incorporación de lignosulfonato de calcio y cemento para mejorar las propiedades de la subrasante en la carretera Paruro – Cusco – 2022», *Repos. Inst. - UCV*, 2022, Accedido: 3 de junio de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/100050>
- [10] R. Noorzad y B. Taamp;negonbadi, «Volume Change Behavior of Stabilized Expansive Clay with Lignosulfonate», *Sci. Iran.*, ago. 2018, doi: 10.24200/sci.2018.50210.1575.
- [11] G. A. Retuerto Vergara y A. Y. Gonzales Jurado, «Incremento de la capacidad de soporte de los suelos inestables de la Av. Naranjal en San Martín de Porres-Lima,

- mediante estabilización con biopolímero Lignina», *Univ. Peru. Cienc. Apl. UPC*, abr. 2022, Accedido: 3 de junio de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://repositorioacademico.upc.edu.pe/handle/10757/660232>
- [12] N. L. Andia Baca, «Fibra de maguey con lignosulfonato de calcio para la estabilización de suelo limoso de la vía Alto Qosqo, Cusco, 2022», *Repos. Inst. - UCV*, 2022, Accedido: 3 de junio de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/90907>
- [13] D. Nesterenko Cortes, «Desempeño de suelos estabilizados con polímeros en Perú», *Univ. Piura*, jun. 2018, Accedido: 3 de junio de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://pirhua.udep.edu.pe/handle/11042/3474>
- [14] Ministerio de transportes y Comunicaciones, *Manual de carreteras: suelos, Geología, Geotecnia y pavimentos: sección suelos y pavimentos* (2014) [En línea]. Disponible: <https://bit.ly/3CemRyN>
- [15] *Pavimentos Urbanos*, Instituto de la Construcción y Gerencias. CE 010-AÑO 2010. Disponible en: <https://www.construccion.org/normas/rne2012/rne2006.htm>
- [16] Ministerio de transportes y Comunicaciones, *Manual de ensayos de materiales*, 2016. Disponible en: <https://bit.ly/3r3RBjc>
- [17] Instituto de normas técnicas de costa rica, “Geotecnia. Especificación estándar para clasificación de suelos y mezclas de suelo-agregado para propósitos de construcción de carreteras”. [En línea]. Disponible en: <https://www.inteco.org/shop/inte-c365-2020-geotecnia-especificacion-estandar-para-clasificacion-de-suelos-y-mezclas-de-suelo-agregado-para-propositos-de-construccion-de-carreteras-8847#attr=>
- [18] Instituto Nacional de Calidad, “Catalogo Normas técnicas peruanas”. [En línea]. Disponible en: <https://www.inacal.gob.pe/cid/categoria/catalogo-bibliografico>
- [19] L. Sandoval, «SUELOS ARCILLOSOS: definición, características, propiedades y más», *El Blog de NATURALEZA mas grande del mundo*, 3 de octubre de 2019. <https://magicanaturaleza.com/c-suelos/suelos-arcillosos/> (accedido 21 de mayo de 2023).
- [20] F. A. Ramirez Ojeda, «Análisis de las propiedades mecánicas del suelo arcilloso utilizando fibra de caucho y polímeros de nailon, Villa Hermosa - Chiclayo, 2021», *Repos. Inst. -UCV*, 2021, Accedido: 3 de junio de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/107235>
- [21] M. Angulo Roldan y C. N. Zavaleta Papa, «ESTABILIZACIÓN DE SUELOS

ARCILLOSOS CON CAL PARA EL MEJORAMIENTO DE LAS PROPIEDADES FÍSICO – MECÁNICAS COMO CAPA DE RODADURA EN LA PROLONGACIÓN NAVARRO CAUPER, DISTRITO SAN JUAN – MAYNAS – IQUITOS, 2019», *Univ. Científica Perú*, ene. 2021, Accedido: 3 de junio de 2023. [En línea]. Disponible en: <http://repositorio.ucp.edu.pe/handle/UCP/1220>

- [22] M. B. Suárez, «Metodología de Investigación Científica para ingeniería Civil», Accedido: 3 de junio de 2023. [En línea]. Disponible en: https://www.academia.edu/33692697/Metodolog%C3%ADa_de_Investigaci%C3%B3n_Cient%C3%ADfica_para_ingenier%C3%ADa_Civil

Anexo 1

Validación de ensayos de Laboratorio


USAT
Universidad Católica
Santo Toribio de Mogrovejo

UNIVERSIDAD CATOLICA SANTO TORIBIO DE MOGROVEJO
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA CIVIL AMBIENTAL
LABORATORIO DE ENSAYO DE MATERIALES, SUELOS Y PAVIENTOS

INFORME N° LEM USAT 033-2024-I

FECHA: 23 de Mayo 2024

VALIDACIÓN DE ENSAYOS DE LABORATORIO

ESTUDIANTE: Luis Humberto Silva Guevara

TITULO DE LA TESIS: Estabilización de suelos arcillosos mediante uso del polímero lignosulfonato de calcio

El que suscribe, responsable del laboratorio de Ingeniería Civil Ambiental, verifica y da conformidad que los siguientes ensayos de laboratorio realizados por el indicado estudiante se han efectuado en las instalaciones de la USAT, asimismo valida los ensayos realizados fuera de nuestras instalaciones siempre que no se puedan realizar en esta universidad:

- Contenido de humedad
- Granulometría
- Peso volumétrico
- Peso específico
- Compresión

Se alcanza al interesado para los fines pertinentes.

Observación: Adjunto

Henry Rivadeneyra Oblitas
Responsable de Lab. Ing. Civil Ambiental


Henry Rivadeneyra Oblitas
Tec. Laboratorio
USAT


USAT
Universidad Católica
Santo Toribio de Mogrovejo


LABORATORIO DE SUELOS, CONCRETOS Y ENLACE DE PAVIMENTOS
USAT
TÉCNICO DE LABORATORIO

ANEXO 2

Ensayo químico del Lignosulfonato de calcio

LABORATORIO FÍSICO QUÍMICO AMBIENTAL PERÚ S.A.C.

ENSAYOS QUÍMICOS Y SERVICIOS GENERALES RUC: 20605355189

REPORTE DE MEDICION Y ANALISIS DE MUESTRA POR EL ANALISIS TERMICO DIFERENCIAL

SOLICITANTE	LUIS HUMBERTO SILVA GUEVARA
TESIS	ESTABILIZACIÓN DE LA SUBRASANTE DE SUELO ARCILLOSO MEDIANTE USO DEL POLÍMERO LIGNOSULFONATO DE CALCIO
MUESTRA	LIGNOSULFONATO DE CALCIO
FECHA	28 DE AGOSTO DEL 2023

MUESTRA RECIBIDA EN LABORATORIO

1. MUESTRA: Lignosulfonato de Calcio (15. GR)

Nº DE MUESTRAS	CANTIDAD DE MUESTRA ENSAYADA	PROCEDENCIA
001	750 mg	-

2. ENSAYOS A APLICAR

- ANALISIS TERMICO DIFERENCIAL ATD
- ANALISIS TERMOGRAVIMETRICO TGA

3. EQUIPO EMPLEADO Y CONDICIONES

- ANALIZADOR TERMICO SIMULTANEO TG_DTA_DSC CAP. MAX 1600°C
SETSYS_EVOLUTION, CUMPLE CON NORMAS ASTM ISO 11357, ASTM E967, ASTM E968, ASTM E793, ASTM D3895, ASTM D3417; ASTM D3418, DIN 51004, DIN 51007, DIN 53765.
- TASA DE CALENTAMIENTO: 20 °C/MIN
- GAS DE TRABAJO – FLUJO: NITROGENO, 10 ML/MIN
- RANGO DE TRABAJO 25 – 920°C
- MASA DE MUESTRA ANALIZADA: 35 MG

JEFE DE LABORATORIO ING. CARLOS VALQUI MENDOZA
ANALISTA RESPONSABLE ING. CARLOS VALQUI MENDOZA

AGUAS - SUELOS - ALIMENTOS - MINERALES - ACEITES - CARBON - CAL

CELULAR: 944 077 288 - 949 959 632 CORREO ELECTRÓNICO: fqaperusac@gmail.com

Henry Rivadeneira Obilias
Tec. Laboratorio USAT

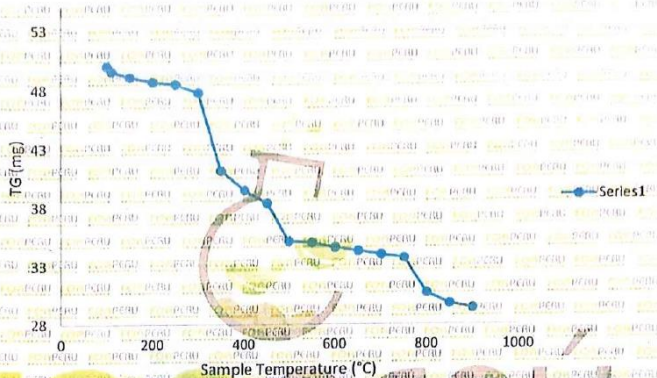
USAT
Universidad Católica del Perú
www.usat.edu.pe



4. RESULTADOS

4.1. CURVA TGA Y ATD

CURVA DE PÉRDIDA DE MASA - ANÁLISIS TERMOGRAVIMÉTRICO



4. CONCLUSIONES

- Según el análisis Termo gravimétrico se muestra la descomposición térmica a través de la pérdida de masa en función a la temperatura indicando sólo una región donde se hace más intensa la pérdida, y es en un rango entre 300 y 500°C ; por otra parte hay una mínima pérdida entre 750.y 850°C. El material llega a perder un aproximado de 13% de masa, respecto a su masa inicial a la temperatura máxima de ensayo.



AGOSTO, 04 DE SETIEMBRE DEL 2017



Henry Rivasdeneyra Oblitas
Tec. Laboratorio USAT



AGUAS - SUELOS - ALIMENTOS - MINERALES - ACEITES - CARBON - CAL

CELULAR: 944 077 288 - 949 959 632 CORREO ELECTRÓNICO: fqaperusac@gmail.com

LABORATORIO FÍSICO QUÍMICO AMBIENTAL PERÚ S.A.C.

ENSAYOS QUÍMICOS Y SERVICIOS GENERALES

RUC: 20605355189



REPORTE DE MEDICION Y ANALISIS DE MUESTRA POR FLUORESCENCIA DE RAYOS X

SOLICITANTE	LUIS HUMBERTO SILVA GUEVARA
TESIS	ESTABILIZACIÓN DE LA SUBRASANTE DE SUELO ARCILLOSO MEDIANTE USO DEL POLÍMERO LIGNOSULFONATO DE CALCIO
MUESTRA	LIGNOSULFONATO DE CALCIO
FECHA	28 DE AGOSTO DEL 2023
MUESTRA RECIBIDA EN LABORATORIO	

MUESTRA RECIBIDA EN LABORATORIO

I. CONSIDERACIONES EXPERIMENTALES

CONDICIONES DE LA MEDICION:

El análisis se realizó en un espectrómetro de fluorescencia total de rayos x marca

BRUKER, MODELO S2-PICOFOX.

Fuente de rayos x: tubo de Mo.

Tiempo de medida: 2000 segundos.

ESTANDAR INTERNACIONAL PARA

CUANTIFICACION: Elemento: Galio (Ga)

Concentración: g/l.

2. CARACTERISTICAS DE LA MUESTRA ANALIZADA

Se analizó 75 mg de la muestra de LIGNOSULFONATO DE CALCIO, la cual fue tamizada previamente a malla 200.

3. METODO

- BASADO EN LA NORMA : ASTM C25
- VOLUMETRIA : USAQ-ME06

JEFE DE LABORATORIO ING. CARLOS VALQUI MENDOZA

ANALISTA RESPONSABLE ING. CARLOS VALQUI MENDOZA



AGUAS - SUELOS - ALIMENTOS - MINERALES - ACEITES - CARBÓN - CAL

CELULAR: 944 077 288 - 949 959 632 CORREO ELECTRÓNICO: fqaperusac@gmail.com

LABORATORIO FÍSICO QUÍMICO AMBIENTAL PERÚ S.A.C.

ENSAYOS QUÍMICOS Y SERVICIOS GENERALES

RUC: 20605355189



4. RESULTADOS

COMPOSICION QUIMICA	RESULTADOS (%)	METODO UTILIZADO
DIOXIDO DE SILICIO (Si O ₂)	17.11	Espectrometría de fluorescencia de rayos x
OXIDO DE CALCIO (Ca O)	45.16	
TRIOXIDO DE ALUMINIO (Al ₂ O ₃)	9.12	
TRIOXIDO DE HIERRO (Fe ₂ O ₃)	3.13	
OXIDO DE POTASIO (K ₂ O)	7.91	
OXIDO DE MAGNESIO (Mg O)	2.86	
PENTOXIDO DE FOSFORO (P ₂ O ₅)	2.07	
OXIDO DE COBRE (Cu O)	0.27	
TRIOXIDO DE AZUFRE (SO ₃)	<0.01	
OXIDO DE ZINC (Zn O)	0.068	
OXIDO DE MANGANESO (Mn O)	0.017	
PÉRDIDA POR QUEMADO	12.29	

5. CONCLUSION

- Al realizar la comparación del espectro de la muestra analizada con las energías características de los elementos de la tabla periódica a partir del sodio, se encontraron principalmente Calcio (Ca), sílice (Si) y Aluminio (Al) con un alto porcentaje. Y en menores porcentajes se encontró; Potasio (K), hierro (Fe), fósforo (P), magnesio (Mg), manganeso (Mn), cobre (Cu), zinc (Zn) y azufre (S).

TRUJILLO, 04 DE SEPTIEMBRE DEL 2023



TÉCNICO DE LABORATORIO



Henry Rivadeneira Obilias
Téc. Laboratorio
USAT Universidad Católica del Perú



AGUAS - SUELOS - ALIMENTOS - MINERALES - ACEITES - CARBON - CAL

CELULAR: 944 077 288 - 949 959 632 CORREO ELECTRÓNICO: fqaperusac@gmail.com

ANEXO 3

Ensayos de Laboratorio

https://drive.google.com/drive/folders/1lfoYDtJ-7oz828Vv3Gr_Pz5SFF-6s7dl?usp=sharing