

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



Mejoramiento de las propiedades mecánicas para suelos arcillosos en subrasantes adicionando ceniza de pajilla de arroz y madera proveniente de ladrilleras artesanales de la provincia de Chachapoyas, 2022

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

AUTOR

Cinthia Marleny Cruz Tafur

ASESOR

Lucas Ludeña Gutierrez

<https://orcid.org/0000-0001-7903-3646>

Chiclayo, 2024

**Mejoramiento de las propiedades mecánicas para suelos arcillosos
en subrasantes adicionando ceniza de pajilla de arroz y madera
proveniente de ladrilleras artesanales de la provincia de
Chachapoyas, 2022**

PRESENTADA POR
Cinthia Marleny Cruz Tafur

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

INGENIERO CIVIL AMBIENTAL

APROBADA POR

Juan Merino Roncero
PRESIDENTE

Angel Alberto Lorren Palomino
SECRETARIO

Lucas Ludeña Gutierrez
VOCAL

Dedicatoria

Este logro va dedicado a mis padres por su apoyo incondicional en esta etapa de mi vida, por nunca dejarme sola y quiero hacer una mención especial a mi madre querida por ser el pilar de mi vida y que a pesar de los obstáculos siempre se mantiene firme, alentándome ante las adversidades.

Agradecimientos

Quiero agradecer en primer lugar a Dios, por darme la fortaleza de seguir adelante ante las adversidades, por darme perseverancia e inteligencia. Agradezco también a mi tía Margarita y familia en general por ser mi apoyo y soporte en esta larga etapa de mi formación profesional.

TESIS

INFORME DE ORIGINALIDAD

25%

INDICE DE SIMILITUD

24%

FUENTES DE INTERNET

3%

PUBLICACIONES

9%

TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1	hdl.handle.net Fuente de Internet	10%
2	tesis.usat.edu.pe Fuente de Internet	2%
3	repositorio.ucv.edu.pe Fuente de Internet	1%
4	Submitted to Universidad Cesar Vallejo Trabajo del estudiante	1%
5	www.doccity.com Fuente de Internet	1%
6	repositorio.uss.edu.pe Fuente de Internet	1%
7	alicia.concytec.gob.pe Fuente de Internet	<1%
8	upc.aws.openrepository.com Fuente de Internet	<1%
9	cybertesis.uni.edu.pe Fuente de Internet	<1%

Índice

Resumen	12
Abstract	13
Introducción.....	14
Revisión de literatura.....	17
Antecedentes	17
Bases teóricas científicas.....	20
Suelos	20
Propiedades del suelo.....	22
Clasificación de suelos.....	22
Subrasante	24
Suelos arcillosos.....	25
Estabilización de suelos	27
Ceniza de paja de arroz y madera	28
Ladrilleras artesanales.....	29
Ensayos de laboratorio	30
Materiales y métodos	42
Tipo y nivel de investigación	42
Diseño de Investigación.....	43
Hipótesis.....	43
Unidad de estudio.....	43
Población.....	43
Muestra.....	43
Muestreo de estudio	44
Operacionalización de variables	46
Diseño metodológico.....	47
Técnicas e Instrumentos de recolección de datos	47
Procedimiento experimental	49

Materiales	54
Ensayos de laboratorio	55
Resultados y discusión	68
Procesamiento de datos.....	68
Resultados	68
Discusión	96
Conclusiones	100
Recomendaciones	101
Referencias	102

LISTA DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1: Etapas y procesos de la formación del suelo	21
Ilustración 2: Clasificación de suelos AASHTO- SUCS	22
Ilustración 3: Clasificación de suelos AASHTO.....	23
Ilustración 4: Nombres de los materiales según la clasificación SUCS.....	24
Ilustración 5: Estructura de pavimento flexible.....	25
Ilustración 6: Características expansivas de suelo arcilloso.....	27
Ilustración 7: Requisitos Químicos de las cenizas volantes. ASTM C618.....	29
Ilustración 8: Tamaño de partículas del suelo.....	30
Ilustración 9: Aberturas según la normativa del Manual de Ensayos de Materiales	31
Ilustración 10: Ensayo de Hidrometría en Laboratorio	32
Ilustración 11: Peso de la muestra a ensayar según el tamaño de partícula.....	34
Ilustración 12: Límites para los 4 estados de suelos finos	35
Ilustración 13: Clasificación de suelos según Índice de Plasticidad	35
Ilustración 14: Categoría de Subrasante.....	41
Ilustración 15: Ubicación del área de estudio	44
Ilustración 16: Muestras de suelo arcilloso.....	54
Ilustración 17: Ceniza procedente de ladrillera artesanal	54
Ilustración 18: Ensayo de Granulometría en el laboratorio	56
Ilustración 19: Ensayo de Hidrometría	56
Ilustración 20: Ensayo de Humedad Natural	57
Ilustración 21: Ensayo de Limite líquido y Limite Plástico	58
Ilustración 22: Ensayo de la gravedad específica relativa a los sólidos.....	59
Ilustración 23: Ensayo de Peso volumétrico	60
Ilustración 24: Muestra para el ensayo de Proctor Modificado	60
Ilustración 25. Ensayo de Proctor Modificado	61

Ilustración 26 : Preparación de muestras de CBR.....	61
Ilustración 27: Lectura de datos del ensayo de CBR	62
Ilustración 28: Tamizado de la ceniza de ladrillera	62
Ilustración 29: Ensayo de Hidrometría para la muestra experimental	66
Ilustración 30: Mezcla de la ceniza con el suelo natural seco.....	67
Ilustración 31: Peso específico relativo a los sólidos de la muestra experimental.....	67
Ilustración 32: Proctor Modificado y penetración de CBR de las muestras experimentales	68
Ilustración 33: Ceniza tamizada por la malla N°100.	87
Ilustración 34: Segregación de desperdicios de la Ceniza.	87
Ilustración 35: Moldes fuera de la poza.	88
Ilustración 36: Mezcla de suelo mas Ceniza.	88
Ilustración 37: Penetración de CBR.	89
Ilustración 38: Curado de especímenes de CBR.	89

LISTA DE TABLAS

Tabla 1: Designación de suelos granulares.	23
Tabla 2: Designación de los suelos finos.	24
Tabla 3: Ensayos para las 5 calicatas	45
Tabla 3: Numero de ensayos experimentales C-01	46
Tabla 4: Numero de ensayos experimentales C-03	46
Tabla 5: Operacionalización de variable Independiente.	46
Tabla 6: Operacionalización de variable Dependiente.	47
Tabla 7: Operacionalización de variable Interviniente.	47
Tabla 8: Investigacion científica	47
Tabla 9: Investigacion de campo	48
Tabla 10: Perfil Estratigráfico de Calicata 01	52
Tabla 11: Perfil Estratigráfico de Calicata 02	52
Tabla 12: Perfil Estratigráfico de Calicata 03	53
Tabla 13: Perfil Estratigráfico de Calicata 04	53
Tabla14: Perfil Estratigráfico de Calicata 05	53
Tabla 15: Adiciones de la ceniza para el suelo natural	63
Tabla 16: Composición química de la CDL	70
Tabla 17: Resultados de Análisis Granulométrico por Tamizado	71
Tabla 18: Resultados de la Humedad natural del suelo	73
Tabla 19: Resultados de LL y LP de suelo natural	73
Tabla 20: Resultados de La gravedad especifica de suelo natural	74
Tabla 21: Resultados de la clasificación de suelos SUCS/AASHTO	75
Tabla 22: Resultados Proctor Modificado para Suelo natural.	75
Tabla 23: Resultados CBR para Suelo natural	76
Tabla 24: Resultados de Peso Específico de C-01 y C-03	78

Tabla 25: Resultados de la variación de MDS y OCH de la calicata C-1 y C-3.	79
Tabla 26: Resultados de Proctor Modificado de C-01.	81
Tabla 27: Resultados de Proctor Modificado de C-03.	81
Tabla 28: Resultados de CRB de la calicata C-01 y C-03.	83
Tabla 29: Analisis de Indice de Plasticidad de muestra en estado natural.	84
Tabla 30: Analisis de Indice de Plasticidad de muestra experimental con el 20% de CDL.	84
Tabla 32: Resultados de la Densidad de Campo.	92
Tabla 32: Porcentajes de agente estabilizador para el análisis económico.	94
Tabla 33: Análisis de costos de estabilización para 100m de carretera.	94

LISTA DE GRAFICOS

Gráfico 1. Representación del análisis granulométrico por sedimentación.....	72
Gráfico 2: Hidrometría de muestra experimental de C-01	77
Gráfico 3: Hidrometría para muestra experimental de C-03	77
Gráfico 4: Representación de los resultados experimentales de Gs.	78
Gráfico 5: Representación gráfica de CDL VS. MDS.....	80
Gráfico 6: Representación gráfica de CDL VS OCH.	80
Gráfico 7:Gráfico de la densidad seca y la humedad C-01.	81
Gráfico 8:Gráfico de la densidad seca y la humedad C-03.	82
Gráfico 9: Representación gráfica del CBR vs. ADICION DE CDL.	83
Gráfico 10: Variación de IP de Suelo Natural VS. Adición Óptima de CDL.....	85
Gráfico 11: Comparación de Número de veces del agente estabilizador	95

Resumen

La presencia de material arcilloso en la subrasante de carreteras se conoce como un problema muy común el cual ha desencadenado una serie de soluciones a lo largo del tiempo, entre ellas existen técnicas de estabilización que se hacen uso de cenizas las cuales dependen de sus características químicas, las cuales pueden remplazar al cemento debido a sus propiedades puzolánicas que contiene, esta técnica resulta ser económica y sostenible a nivel ambiental.

El presente estudio tiene la finalidad de mejorar las características de resistencia de un material arcilloso que es común en la subrasante de las vías de tránsito con la adición de las cenizas de pajilla de arroz y madera proveniente de las ladrilleras artesanales, las cuales fueron analizadas químicamente y pertenecen al tipo F, la adición se da en diferentes porcentajes adicionados al suelo que vendrán a ser de 5%, 10%, 15% 20% y 30%. Las muestras analizadas fueron en estado natural y las muestras experimentales con adición, mediante los ensayos de Proctor Modificado y CBR. Para la clasificación del suelo en estado natural se realizó mediante AASHTO y SUCS, además se realizó el ensayo de Hidrometría, Peso específico y Límites de Atterberg. Los resultados obtenidos muestran la eficacia de la adición de CDL ya que mejoran en cuanto a su capacidad de soporte del suelo CBR y la Máxima Densidad Seca, ya que los valores de la máxima densidad seca decrecen. De este modo se obtuvo el óptimo contenido de cenizas de ladrillera denominada CDL para la adición en el suelo arcilloso siendo el 20% del peso seco del suelo. Con esto se analizó económicamente el uso de CDL en la estabilización de suelos arcilloso, lo cual resulta más económico en comparación a los métodos convencionales que son la estabilización con cemento y cal.

Palabras clave: CDL, Suelo arcilloso, Estabilización de suelos, Máxima Densidad Seca, CBR.

Abstract

The presence of clayey material in road subgrades is a very common problem that has led to a series of solutions over time. Among these solutions, there are stabilization techniques that make use of ashes, depending on their chemical characteristics. These ashes can replace cement due to their pozzolanic properties, making this technique cost-effective and environmentally sustainable. The purpose of this study is to improve the strength characteristics of clayey material commonly found in road subgrades by adding rice straw and wood ashes from artisanal brick kilns. These ashes were chemically analyzed and belong to Type F. The addition is done in different percentages added to the soil, ranging from 5%, 10%, 15%, 20%, and 30%. The analyzed samples were in their natural state, and the experimental samples, with the addition, were tested using the Modified Proctor and CBR (California Bearing Ratio) tests. The soil classification in its natural state was carried out using AASHTO and SUCS standards. Additionally, tests were conducted for hydrometry, specific gravity, and Atterberg limits. The results obtained demonstrate the effectiveness of adding CDL (brick kiln ashes) as they improve the soil's bearing capacity (CBR) and maximum dry density, with the maximum dry density values decreasing. The optimal content of CDL for addition to clayey soil was found to be 20% of the dry soil weight. Economic analysis of the use of CDL for soil stabilization in clayey soils showed that it is more cost-effective compared to conventional methods, such as stabilization with cement and lime.

Keywords: CDL, Clayey Soil, Soil Stabilization, Maximum Dry Density, CBR (California Bearing Ratio)

Introducción

La construcción de viviendas y la producción de los bloques que se emplean para esta misma se ha incrementado con respecto al transcurso de los años. El sistema estructural para el cual se hace uso de estos bloques o ladrillos es muy empleado en el sector construcción, esto conlleva al crecimiento de la producción industrial a nivel de su elaboración artesanal de estas piezas, provocando así excesos de los residuos que se generan con la incineración de la materia prima en este caso se considera la madera y la pajilla de arroz. Estos residuos generalmente no poseen un buen manejo y por lo tanto no tiene definido una disposición final concreta y en efecto ocasiona que la producción artesanal de ladrillos sea ambientalmente insostenible. Por esta razón la necesidad de dar un buen manejo y darle valor a estos residuos de las ladrilleras artesanales ha generado el interés no solo a nivel nacional si no a nivel internacional, de plantear diferentes alternativas para el uso de estos residuos, especialmente en el área de la construcción y/o rehabilitación de las vías de tránsito que tienen presencia de arcillas a nivel de subrasantes, planteando así el uso de estas cenizas como agente estabilizador, para evaluar el mejoramiento de sus propiedades mecánicas. [1]

En la actualidad, como parte de la reactivación económica se gestionan diversos proyectos entre ellos los proyectos viales, que favorecen al desarrollo tanto turístico como a facilidad de provisionar de bienes a las distintas comunidades poblacionales, las cuales se ubican en diferentes lugares del Perú, dentro de los proyectos importantes se encuentran la construcción de 377 kilómetros de carretera lo cual representa una gran cantidad de inversión. [2]

La construcción de proyectos viales, se llevan a cabo en diferentes zonas del Perú, las cuales que por la ubicación geológica suelen tener presencia de suelo inadecuado para un funcionamiento óptimo de las vías, así mismo el Ministerio de Transportes y Comunicaciones (MTC), nos señala que, para la aplicación del procedimiento de estabilizar o mejorar un suelo no apto en una subrasante es necesario incorporar agentes estabilizadores necesarios que conlleven a la mejora de sus propiedades tanto físicas como mecánicas, generando que la capacidad de soporte del suelo sea apta ($CBR \geq 6\%$). [3]

Cuando hablamos de suelos no aptos para la construcción de una carretera nos referimos a los suelos de baja resistencias, que vendrían a ser los suelos arcillosos, los cuales tiene las características de ser expansivos y generalmente varían su volumen en la presencia de

humedad por consiguiente genera importantes desafíos en el ámbito estructural y del mismo modo en el aspecto geotécnico en todo el mundo, y con esto ocasiona las fallas en las vías de transporte terrestre. Entonces, esta problemática obliga a realizar un proceso de estabilización de estos suelos, y para ello se deben realizar una serie de estudios ya sea económicos, ambientales, accesibilidad de los productos a usar, etc. Como ya es de conocimiento básico de la carrera de ingeniería civil, las cenizas tienen un alto contenido de sílice, y estas son parecidas al cemento, y debido a esto se considera un material apto para usarse como agente estabilizador de los suelos arcillosos a nivel de subrasantes.

En el Perú la presencia de suelos arcillosos en la construcción de carreteras es común y por ello se plantean diferentes métodos para el mejoramiento de estas propiedades y así obtener buenos resultados en las obras que se realizan. Así mismo dando un enfoque, en el departamento de Amazonas, distrito de Chachapoyas, hay presencia de suelos arcillosos en diferentes vías transitables, las cuales se ven afectadas en las temporadas de lluvias en la localidad. Este problema genera grietas, fallas geológicas, inestabilidad en las vías, y que generalmente ocasionan que el presupuesto adicional en la fase de rehabilitación resulte ser muy costoso, por este motivo se realizan las investigaciones para buscar soluciones accesibles, es decir económico, eficaz y amigable con el medio ambiente. Considerando que según las estadísticas de las carreteras en mal estado en el Perú son aproximadamente el 17% las cuales no se encuentran pavimentadas.

El uso de las cenizas está siendo potencialmente investigado en distintos campos de la ingeniería uno de ellos es la estabilización de suelos arcillosos, ya que en su mayoría cumplen con las características que se buscan para un agente estabilizador, en la ciudad de Chachapoyas la fabricación de ladrillos artesanales, generan una gran cantidad de estos residuos, los cuales, mediante investigaciones se conoce que no cuentan con un buen manejo y disposición final adecuada, es por ello que en este proyecto se evaluarán las características de las cenizas producto de la calcinación de madera y pajilla de arroz en la elaboración de los ladrillos artesanales, para verificar si nos pudieran servir como agente estabilizador, y así proponer una alternativa de solución ante la realidad problemática expuesta.

Recapitulando lo anteriormente mencionado de los suelos arcillosos se manifiesta la siguiente pregunta: ¿En qué medida el empleo de cenizas de pajilla de arroz y madera

proveniente de ladrilleras artesanales mejorará las propiedades mecánicas de suelos arcillosos en subrasantes?

De acuerdo con la formulación del problema se planteó la siguiente hipótesis: Mediante el empleo de cenizas de pajilla de arroz y madera provenientes de ladrilleras artesanales, se mejorarán las propiedades mecánicas de los suelos arcillosos en subrasantes, obteniendo valores de CBR adecuados según el MTC para que una subrasante sea apta para una carretera.

Siendo el objetivo general: Evaluar las propiedades mecánicas de suelos arcillosos en subrasantes adicionando las cenizas de pajillas de arroz y madera provenientes de ladrilleras artesanales. De este modo también se plantearon los objetivos específicos:

- Describir las características de las cenizas de pajilla de arroz y madera provenientes de ladrilleras artesanales.
- Identificar las propiedades físicas de la muestra de suelo natural: Clasificación del suelo (SUCS y AASHTO), contenido de humedad, límites de Atterberg y gravedad específica relativa a los sólidos.
- Identificar las propiedades mecánicas de la muestra de suelo natural mediante el ensayo de Proctor modificado y el ensayo de California Bearing Ratio (CBR).
- Analizar las propiedades mecánicas correspondientes a la muestra de suelo natural con la adición de ceniza provenientes de ladrilleras artesanales en los porcentajes del 5%, 10%, 15%, 20% y 30%.
- Determinar la dosificación óptima del contenido de cenizas y la metodología para el uso de la ceniza en la estabilización de suelos arcillosos.
- Realizar el análisis económico que trae el uso de cenizas de ladrilleras artesanales como agente estabilizador.

La justificación de la presente investigación se centra en 4 aspectos importantes: Técnica, social, económica y ambiental.

En el aspecto técnico es referente al avance de las investigaciones que forjaran el desarrollo de la formación profesional de la carrera de ingeniería civil, con esto nos abre nuevos horizontes hacia nuevas investigaciones para buscar las posibles soluciones a los problemas que se debe enfrentar en la construcción de estas carreteras con las características

de suelos de baja resistencia tales como los suelos arcillosos, con el desarrollo de nuevos materiales cementantes ambientalmente sostenibles.

La justificación social de esta investigación está ligada a un aprovechamiento adecuado de los residuos generados por estas ladrilleras, la cual se basa principalmente en reducir la incomodidad de la población cercana y también menora la contaminación de sus suelos de cultivo ya que al ser excesivo este residuo resulta ser tóxico para el suelo haciendo que estos pierdan nutrientes, también mejoraría el entorno visual que no permite la tranquilidad y el bienestar social, además que con la mejora de las vías de tránsito se mejora las relaciones sociales.

Con respecto a la justificación económica del uso de las cenizas de pajilla de arroz y madera, se considera viable ya que al ser un desperdicio este material es relativamente fácil de conseguir y por ende económico para el uso en la estabilización de las subrasantes en la construcción de carreteras.

Y de acuerdo con lo analizado, el impacto ambiental de los desechos no gestionados de manera adecuada con el tiempo va empeorando ya que se produce la acumulación de ello, es por eso por lo que en esta investigación se pretende dar un valor agregado a un material de desperdicio que tiene las características necesarias para poder ser reutilizado en cuanto el sector construcción. Ya que son grandes las cantidades de ceniza que se produce, al ser aprovechado este material se reduciría la acumulación de este mismo como ya se menciona y así lidiar con la contaminación ambiental que genera el exceso que genera la producción artesanal de ladrillos.

Revisión de literatura

Antecedentes

En este punto se considerarán las diversas investigaciones vinculadas al tema de mejoramiento de subrasante con cenizas de pajilla de arroz y madera proveniente de las ladrilleras artesanales en el distrito de Chachapoyas, 2022. Mencionando lo siguiente:

En el año 2018, Honores Adanaqué, en su tesis: **“Comparación de la ceniza de cascarilla de arroz frente al óxido de calcio como estabilizante químico para mejorar La Sub-Rasante En La Av. Gustavo Mohme [Progresiva Km 0+654.19 – Km 1+654.19] Distrito Veintiséis de Octubre-Piura-Piura”**, realiza una comparación del comportamiento de la ceniza de cascarilla de arroz frente al agente estabilizador mencionado, lo cual se realiza la estabilización IN SITU para posteriormente realizar la comparación de los valores

porcentuales obtenidos en laboratorio. En esta investigación concluye que la ceniza de cascarilla de arroz funciona como agente estabilizador en un 72.9% en un suelo de tipo Arcilloso (CL-ML), considerando que la capacidad de soporte inicial del suelo natural fue de 3.3%. [4]

Por su parte López Barbarán, en su tesis: **“Estabilización de suelos arcillosos aplicando ceniza de cáscara de arroz para el mejoramiento de subrasante, en la localidad de Moyobamba – departamento de San Martín”**, busca determinar el impacto en las propiedades mecánicas del suelo arcilloso mediante la incorporación de ceniza de la cascara de arroz como un agente estabilizador para la subrasante que presenta características expansivas y no aptas para la construcción de carreteras, este análisis se realiza mediante los ensayos de laboratorio. De acuerdo a los resultados que se obtuvieron de la incorporación del 15% de la ceniza, la mejora de las características del suelo arcilloso es notable en cuanto a la resistencia, además con la comparación del 10% de adición se obtiene valores positivos. Y mediante el ensayo de resistencia por el ensayo de CBR al 95%, para el suelo natural el resultado fue de 3.96%, con el 5% de la ceniza adicionada a la muestra experimental fue de 6.90%, con el 10% de ceniza de cascarilla el resultado fue de 9.60% y finalmente la incorporación del 15% de ceniza dio como resultado un CBR de 10.5%, por lo que en conclusión la dosificación óptima sería con el 15% de ceniza de cascarilla de arroz. [5]

Así mismo en la tesis de Oliveros: **“Análisis de las propiedades mecánicas del suelo arcilloso con ceniza de fondo de ladrilleras en la carretera Acovichay – Huaraz 2020”**, describe el análisis de las propiedades mecánicas del suelo arcilloso de la carretera Acovichay de la provincia de Huaraz, agregando ceniza de fondo de ladrilleras. Con las adiciones de ceniza como agente estabilizador en las proporciones de 10%, 15% y 20%. Se realizaron los ensayos correspondientes a sus propiedades tanto físicas como mecánicas, para verificar si el suelo mejora significativamente, de tal manera que con los resultados obtenidos se puede concluir así que las cenizas artesanales producidas en la zona de Huaraz, pueden ser utilizadas como aditivos químicos para ayudar a mejorar las propiedades del suelo arcilloso y mejorar las condiciones de la carretera de Acovichay para una mejor circulación de vehículos, para esta conclusión se basa en la reducción de índice de plasticidad de 9.13% a un 5.39% con la adición de 20% de ceniza de fondo y del mismo modo, con el 15% de cenizas de fondo se reduce a 6.93% y con el 10% de cenizas de fondo se reduce a un 8.17%.

Con respecto a los ensayos de CBR, se obtuvo el mejor resultado con el 20% de cenizas de fondo obteniendo así una mejora en el CBR al 95% de 15.43% con una densidad seca de 2.29 t/m³ y con OCH de 9.86% y se reduce la expansión de 0.16% a 0.13%. [6]

Adco, en su tesis: **“Estabilización de subrasante en suelos arcillosos empleando cenizas de madera proveniente de las ladrilleras artesanales, Puno 2022”**, abarca el tema de la estabilización de la capa base de un suelo arcilloso utilizando cenizas de madera extraídas en fábricas de ladrillos artesanales. La metodología utilizada para desarrollar esta investigación es aplicada y de una metodología de diseño cuasiexperimental. En los ensayos realizados en laboratorio de suelos arcillosos en condiciones naturales y con adición de 15%, 20% y 25% de ceniza, como resultado del IP en condiciones naturales de suelo CH fue de 43%, y con las adiciones este resultado menoró siendo los resultados obtenidos 28%, 21% y 18% respectivamente según los porcentajes de adición, mientras que para el suelo CL el resultado en condiciones naturales fue de un IP de 27%, y con las adiciones redujeron a 21%, 16% y 13% respectivamente. Para la máxima densidad seca en condiciones naturales mediante el ensayo de Proctor modificado se obtuvo un valor de 1.718 gr/cm³ para el suelo CH, y con las adiciones se obtuvo 1.722 gr/cm³, 1.729 gr/cm³ y 1.719 gr/cm³ respectivamente. Por su parte se realizaron los ensayos para el suelo de clasificación CL, donde los resultados para las condiciones naturales del suelo fueron de 1.911 gr/cm³ y con las adiciones de las cenizas de fondo, fueron de 1.929, 1.937 y 1.912, respectivamente también. Los resultados de la capacidad de soporte de esta investigación el más favorable resultó ser con la adición al 20%, porque mejora, al suelo CH de un 2.30% a un 14.40%, mientras que para el suelo de clasificación CL el valor de 2.80% se eleva a 11.80% de capacidad de soporte. Concluyendo así que la ceniza mejora las propiedades de durabilidad del suelo. El suelo en cuestión. [7]

En el año 2021, los señores, Najmun Nahar, Alex Otieno Owino, Sayful Kabir Khan, Zakaria Hossain, Noma Tamaki. **“Effects of controlled burn rice husk ash on the geotechnical properties of soil”**, en su artículo nos presentan que las reacciones puzolánicas de la ceniza de la pajilla de arroz (RHA) dependen en este caso de una combustión controlada. Se analiza el suelo según la clasificación de la Asociación Estadounidense de funcionarios de Autopistas y Transportes Estatales (AASHTO). La compactibilidad, la capacidad de carga, la resistencia a la compresión, la resistencia al corte y las micrografías electrónicas de barrido se investigaron como propiedades las propiedades mecánicas más importantes a estudiar, este suelo presenta la adición de RHA con 0%, 5%, 10% y 15% y se considera el curado húmedo

de 7 días. Obteniendo así variaciones y mejoras en las propiedades mecánicas del suelo y el suelo con 5% de RHA mostró un mayor porcentaje de relación de carga de California (39,5%), resistencia a la compresión no confinada (6,0%), módulo de deformación (56,3%), Cohesión (11,8 %) y ángulo de fricción interna (6,3 %) en comparación con muestras de suelo sin tratar. [8]

J. Jayashreem V. Jeevanantham. En el año 2022, presentan la siguiente tesis: “**Experimental Study on Strength Characteristics of Fly Ash and Rice Husk Ash added Clay Soil**”. **India**, donde realizaron el análisis de para el mejoramiento de las propiedades de ingeniería de la arcilla expansiva, adicionando al suelo las mezclas de las cenizas volantes y cenizas de cascarilla o pajilla de arroz en diferentes porcentajes como 5, 10, 15 y 20. Se realizaron ensayos de laboratorio necesarios los cuales corresponden a la prueba de límites de Atterberg, compactación Proctor estándar y la prueba de compresión no confinada se realizaron en suelo expansivo recolectado localmente y evaluar sus influencias de las adiciones. Los valores máximos de Resistencia a la Compresión No Confinada se obtuvieron correspondientes a 15% Ceniza de Cáscara de Arroz y 20% Ceniza Volante. [9]

Bases teóricas científicas

Suelos

El suelo está formado por un conjunto de partículas y minerales y/o de materia orgánica, que provienen de la desintegración mecánica y descomposición química de las rocas, mediante los agentes físicos como el aire y el agua principalmente, estos efectos generalmente varían de acuerdo al cambio de temperatura, por lo que es frecuente la formación de suelos arcillosos de importancia en las zonas húmedas y cálida, mientras que en las zonas más frías los materiales predominantes son las formaciones arenosas o limosas. [10]

Para prácticas ingenieriles se deduce que el suelo viene a ser el material de construcción más abundante, el cual constituye el soporte de las estructuras. Por otro lado, la norma CE.0.20 de Suelos y Taludes, da el concepto de suelos a los agregados naturales de partículas minerales granulares y cohesivas separables por medio mecánicos de poca energía o por agitación del agua. [11]

Origen, formación y constitución del suelo

Para realizar trabajos de ingeniería se debe conocer el contexto geológico del suelo, sus condiciones agrológicas de las unidades, el clima de la región donde se trabaja y el relieve, esto nos llevará a un mejor conocimiento de las propiedades inherentes del material.

El origen de los suelos es a partir de la alteración de la roca, que generalmente comienza con la alteración mecánica de manera que surge el fraccionamiento y la deformación de la roca y por ende la descarga por erosión disminuye las presiones. [12]

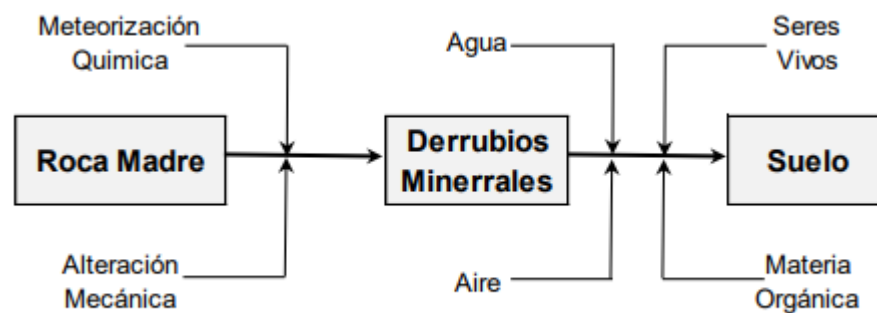


Ilustración 1: Etapas y procesos de la formación del suelo

Para la formación del suelo, intervienen distintos factores en este caso vamos a mencionar 5 factores:

1. **El material parental:** se refiere al suelo o roca permeable, que permiten el acceso y circulación del agua o gases que reaccionan con los minerales que constituyen la roca madre.
2. **El tiempo:** las deformaciones que sufre las rocas y los suelos, la circulación de líquidos y gases y las reacciones químicas en la roca madre requieren tiempo, pero esto depende del tipo de mineral que constituye la roca madre, es por ello que la alteración del suelo es heterogénea y por eso los perfiles cambian.
3. **El relieve:** la topografía, las pendientes y la orientación de la ladera son el resultado de la combinación de la actividad tectónica y volcánica que forman el relieve, dado a esto los suelos presentan mayor espesor en las áreas planas.
4. **Formadores Biológicos:** también conocido como la meteorización edafológica, la cual está vinculada con la actividad fisiológica de la flora y la fauna. Este proceso necesita de la acción del agua para las reacciones químicas y así se originan los ácidos orgánicos y gases que reaccionan con el suelo además de la descomposición de la materia, los cuales contribuyen con la formación del suelo.

5. **El clima:** está vinculado con la temperatura, las precipitaciones, el balance hídrico, la humedad relativa, los cuales están directamente vinculados con los procesos de meteorización para la formación del suelo.

Propiedades del suelo

Las propiedades del suelo se identifican dependiendo de la cantidad y la frecuencia del tamaño de las partículas que conforman el suelo o también por la plasticidad que presentan las partículas más finas del. El suelo se caracteriza a partir de sus propiedades como el color, la textura, el olor, la distribución de partículas y la plasticidad. El muestreo y la obtención de los parámetros mecánicos del suelo son indispensables en el estudio de mecánica de suelos para la construcción de vías de acuerdo con la normativa nacional. [12]

Clasificación de suelos

Para la obtención de la clasificación de suelos se hace uso de la metodología para la construcción de vías y de esto modo se va a proceder a efectuar la clasificación dada por la normativa nacional del Ministerio de transportes y comunicaciones (MTC) que son: AASHTO y SUCS, para lograr la clasificación del suelo se necesita realizar los ensayos de laboratorio de las propiedades físicas del suelo en estudio. Esta clasificación nos va a permitir pronosticar el comportamiento contiguo de los suelos que favorecerá a definir los sectores homogéneos desde un alcance geotécnico. [13]

Clasificación de Suelos AASHTO AASHTO M-145	Clasificación de Suelos SUCS ASTM -D-2487
A-1-a	GW, GP, GM, SW, SP, SM
A-1-b	GM, GP, SM, SP
A-2	GM, GC, SM, SC
A-3	SP
A-4	CL, ML
A-5	ML, MH, CH
A-6	CL, CH
A-7	OH, MH, CH

Ilustración 2: Clasificación de suelos AASHTO- SUCS

CLASIFICACIÓN DEL SUELO (AASHTO)

Esta clasificación está dividida en 7 grupos, los cuales están numerados de la siguiente manera: A1(cascajo y arena), A2 (arena fina), A3 (cascajos y arenas limosas o arcillosas), A-4 y A-5 (suelos limosos), y A-6 y A-7 (suelos arcillosos). De acuerdo con sus propiedades tenemos la siguiente clasificación; A-1 y A-3 corresponden a suelos excelentes y buenos, A-2 a suelos buenos y moderados y A-6 y A-1 son suelos moderados a pobres. [13]

Clasificación General		Materiales granulares 35% o menos pasan la malla 200						Materiales limosos y arcillosos más del 35% pasa la malla No 200					
Grupos		A-1		A-3	A-2			A-4	A-5	A-6	A-7		
		A-1-a	a-1-b		A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7				A-7-5	A-7-6
Análisis por mallas.	10	50 Max											
% que pasa la malla	40	30 Max	50 Max	51 Min									
No	200	15Max	25 Max	10 Max	35 Max	35 Max	35 Max	35 Max	36 Min	36 Min	36 Min	36 Min	36 Min
Característica de la fracción que pasa la malla 40	LL				40 Max	41 Min	40 Max	41 Min	40 Max	41 Min	40 Max	41 Min	41 Min
Índice de grupo	LP	6 Max	6 Max	NP	10 Max	10Max	11 Min	11 Min	10 Max	10 Max	11 Min	11 Min	11 Min
		0	0	0	0	4 Max	8 Max	4 Max	8 Max	12 Max	16 Max	20 Max	20 Max
Tipo usual de materiales constituyentes		Piedra Grava Arena		Arena	Arena limosa o arcillosa, arena			Suelos limosos		Suelos arcillosos			
Comportamiento general como subbase		EXELENTE A BUENO					ACEPTABLE A MALO						

Nota: En la división A-7, cuando IP > 30, el grupo A-7-5. Si el IP < 30 el grupo es A-7-6

Ilustración 3: Clasificación de suelos AASHTO

CLASIFICACIÓN DE SUELOS BASADOS SEGÚN LA NORMA ASTM D-2487 (SUCS)

Esta clasificación se divide desde los suelos granulares o finos, que son aquellos que pasan por el tamiz de 3" (75 mm). Se considera un suelo fino cuando el material que pasa por el tamiz N°200 es mayor al 50%, de lo contrario se considera granular. [14]

a). Los suelos granulares son designados con los siguientes símbolos:

Tabla 1: Designación de suelos granulares.

PREFIJOS	SUFIJOS
G: Grava (El 50% o más es retenido por el tamiz N°4)	W: bien gradado
	M: Limoso
S: Arena (más del 50% pasa por el tamiz N°4).	P: mal gradado
	C: Arcilloso

Fuente: Elaboración propia.

b). Los suelos finos se designan con los siguientes símbolos:

Tabla 2: Designación de los suelos finos.

PREFIJOS	SUFIJOS
M: limo	L: baja plasticidad
C: arcilla	
O: orgánico	H: alta plasticidad

GRUPO	Fuente: Elaboración propia.
GW :	Grava bien gradada, me
GP :	Grava mal gradada, mezclas grava – arena, poco o ningún fino.
GM :	Grava limosa, mezclas grava, arena, limo.
GC :	Grava arcillosa, mezclas grava – arena arcillosas.
SW :	Arena bien gradada.
SP :	Arena mal gradada, arenas gravosas, poco o ningún fino.
SM :	Arenas limosas, mezclas arena – limo.
SC :	Arenas arcillosas, mezclas arena – arcilla.
ML :	Limos inorgánicos y arenas muy finas, polvo de roca, limo arcilloso, poco plástico, arenas finas limosas, arenas finas arcillosas.
CL :	Arcillas inorgánicas de plasticidad baja a media, arcillas gravosas, arcillas arenosas, arcillas limosas, arcillas magras (pulpa)
OL :	Limos orgánicos, arcillas limosas orgánicas de baja plasticidad.
MH :	Limos inorgánicos, suelos limosos o arenosos finos micáceos o diatomáceos (ambiente marino, naturaleza orgánica silíceo), suelos elásticos.
CH :	Arcillas inorgánicas de alta plasticidad, arcillas gruesas.
OH :	Arcillas orgánicas de plasticidad media a alta, limos orgánicos.
Pt :	Turba (carbón en formación) y otros suelos altamente orgánicos.

Ilustración 4: Nombres de los materiales según la clasificación SUCS

Subrasante

La subrasante viene a ser el manto superficial de un terreno natural, donde generalmente se ubica o descansa toda la estructura de un pavimento, es por ello que su estudio es de mucha importancia para todo tipo de obras viales. Este manto superficial es la base de toda estructura a pavimentar que debe brindar la resistencia necesaria para aportar durabilidad y estabilidad en las vías de tránsito, para que así puedes soportar y distribuir de manera uniforme las cargas a las cuales está sometida con el tráfico que transita. En el desarrollo de la construcción de carreteras se requiere hasta 45 cm de espesor y en casa de la rehabilitación de 20 cm. La capacidad de soporte del suelo en condiciones de servicio en conjunto con el tránsito y las propiedades de los materiales de construcción de la superficie de rodadura tienen una constitución en las variables necesarias para el afirmado que se requiere en la parte superior de la vía. [13]

La subrasante debe cumplir con ciertas características para poder ofrecer un buen funcionamiento a las vías, así como su durabilidad:

- Composición: la composición de la subrasante debe ser de diferente tipo de material granular, el cual se someterá a estudios de sus propiedades para verificar su buen funcionamiento, de acuerdo a los criterios de las normas seguidas de diseño de carreteras.
- Drenaje: se debe considerar un buen diseño de la capacidad de drenaje de la subrasante y así poder evitar la acumulación de agua en las vías que producen asentamientos en las vías y afecta a la capacidad de resistencia.
- Estabilidad: la estabilidad es una de las características más importantes que debe brindar la rasante en la vía de tránsito, para evitar las posibles deformaciones y fallas en la misma, por ello es de vital importancia realizar un análisis a la composición del suelo y realizar el tratamiento adecuado según las normativas vigentes de carreteras.
- Capacidad de soporte: la capacidad de soporte viene a ser la capacidad de resistencia que brinda la subrasante para su desempeño óptimo, siendo medida mediante el CBR, y este debe cumplir las especificaciones mínimas de la normativa.

El material perteneciente al tipo de suelo de la subrasante será apto para un funcionamiento si tiene el CBR igual o mayor al 6%, en caso contrario se puede optar a cambiar el material con uno que si cumpla y se procede a realizar la estabilización. [13]

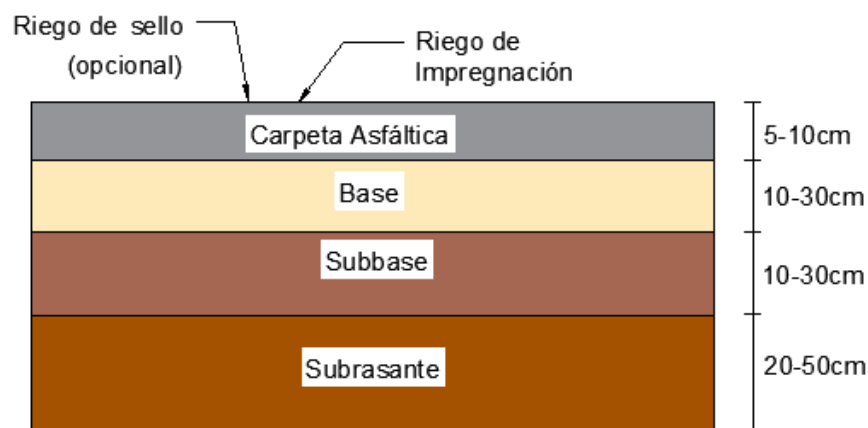


Ilustración 5: Estructura de pavimento flexible

Fuente: Elaboración propia.

Suelos arcillosos

Los suelos arcillosos son aquellos que tienen características expansivas al contacto con el agua, posicionándolo en la sección de suelos no aptos para las estructuras viales, dicho de otra manera, las arcillas desarrollan las propiedades de plasticidad cuando entra en contacto con el

agua, lo cual reduce su capacidad de resistencia. De otro modo son minerales arcillosos, con presencia de algunos metales propios del suelo el silicato de aluminios hidratados. [15]

Su tamaño de partícula en general es pequeño, en el libro de Braja D. “ Fundamentos de ingeniería geotécnica”, mencionan el tamaño de partícula que caracterizan a las arcillas las cuales son menores de 0.002 mm, mientras que existen otros casos donde el tamaño varía entre 0.002 y 0.005mm, estas características son las que atribuyen al suelo en cuanto a su clasificación y comportamiento ante diferente situación en el ámbito de la construcción. [16]

Las arcillas tienen capacidad para la retención de agua es por ello por lo que son de fácil de compactación, lo que ocasiona problemas tanto en la parte de la agricultura como en la construcción y debido a esto es que requiere que se mejoren sus propiedades para poder optimizar su funcionamiento.

Propiedades físicas:

- ❖ Plasticidad: son de alta plasticidad, por ello tienen la capacidad de retener agua y se comportan como masillas que pueden cambiar de forma, lo que ocasiona su cambio en volumen lo que depende de la variación de la humedad.
- ❖ Retención de agua: su capacidad de retención de agua se debe al tamaño de partículas que presenta, esto ocasiona el comportamiento expansivo y de fácil contracción ante la variación de agua a la cual estén expuestos, es por ello que son suelos no recomendables en la construcción de vías.
- ❖ Comprensibilidad: la comprensibilidad es una característica en la que las arcillas no tienden a comportarse adecuadamente ya que presentan una comprensibilidad alta lo que ocasiona los asentamientos ante las cargas a las cuales son expuestas, esto es una más de sus características negativas en la construcción de carreteras.

En resumen, la presencia de suelos arcillosos en los componentes de las carreteras es una problemática la cual afecta a su capacidad de resistencia con la presencia de humedad y también a la estabilidad de la vía, ya que se presentarán asentamientos, agrietamientos y deformaciones en la capa superior del pavimento.



Ilustración 6: Características expansivas de suelo arcilloso.

Estabilización de suelos

La estabilización de suelos en general se da posteriormente al estudio de un suelo para la construcción de una carretera ya que se busca el un buen funcionamiento de este y la durabilidad. Con la estabilización de un suelo se hace ver la mejora y alteraciones en las propiedades físicas y mecánicas del suelo, a través de distintas programaciones mecánicas y con la incorporación de materiales con características estabilizadoras ya sean químicos, naturales o sintéticos. Este procedimiento está presente en los suelos con características deficientes para ser parte de una subrasante de carretera, lo que se conoce comúnmente como subrasante inadecuada o pobre, de manera que mediante las técnicas de estabilización dota al suelo de mejoras en su resistencia mecánica y una permanencia de las propiedades con respecto al tiempo. Existen distintas metodologías para la aplicación de este procedimiento. [16]

Dentro de las metodologías tenemos:

- La estabilización por sustitución de suelos
- La estabilización química de suelos
- La estabilización mecánica de suelos
- Estabilización con cal
- Estabilización con cemento
- Estabilización con cloruro de sodio
- Estabilización con asfalto

Estas metodologías son las que las normas peruanas consideran para el mejoramiento de los suelos en las carreteras es por ello que mediante el Manual de carreteras del Ministerio de Transportes y Carreteras (MTC), tenemos el alcance de cómo realizar dichas prácticas.

Ceniza de pajilla de arroz y madera

Las cenizas de pajilla de arroz es el resultado de la incineración controlada de la cascara de arroz como se menciona, tal es la abundancia de es residuo que las ladrilleras artesanales promueven el uso como principal fuente para la fabricación y elaboración de las unidades para la construcción de viviendas. La principal composición de esta materia es el alto contenido de sílice [17] y debido a esta propiedad que presenta es un material con propiedades absorbentes por ello es considerado con un agente interesante para la estabilización de los suelos arcillosos. [18]

Por su parte, la ceniza de madera también es uno de los principales residuos en las industrias de la elaboración y fabricación de los ladrillos o unidades artesanales, las cenizas se subdividen en cenizas de fondo que vienen a ser las de una fracción gruesa y las cenizas volantes las cuales son de una fracción fina, estas son el resultado de la incineración de la madera en las ladrilleras artesanales. [19]

Para esta investigación se hace un análisis a fondo de las cenizas provenientes de una ladrillera artesanal donde su material de combustión es la madera y la pajilla de arroz en conjunto, con el objetivo de darle un manejo adecuado a estos residuos y por su parte economizar el procedimiento de estabilizar un suelo arcilloso en la construcción de carreteras. Las cenizas de grano fino se clasifican como cenizas volantes y se clasifican en tres grupos según la norma ASTM C618 y depende de los componentes químicos de la ceniza.

1. Ceniza clase N

Viene a ser las puzolanas naturales calcinadas o sin calcinar, como algunas tierras diatomáceas; horsteno opalinos y pizarras; tobas y cenizas volcánicas o pumitas, calcinadas o sin calcinar, así como también materiales varios que son calcinados para obtener las propiedades satisfactorias y aquí tenemos algunos materiales arcilloso y pizarras. [20]

2. Ceniza clase F

Esta ceniza volante tiene propiedades puzolánicas que reaccionan lentamente con la cal y los álcalis. [20] Su composición básicamente es el óxido de Silicio, Aluminio y

Hierro (SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 respectivamente), además podría presentar Oxido de Calcio en pocas cantidades inferiores al 10%. [21]

3. Ceniza clase C

Este tipo de ceniza volante tiene propiedades puzolánicas y cementicias, las cuales reaccionan formando aluminato cálcico hidratado y ettringita. [20] Con respecto a su composición química tienden a contener cantidades mayores al 30% de Oxido de Calcio (CaO) y altos contenidos de Óxidos de Azufre (SO_3). [21]

	Clase		
	N	F	C
Dióxido de silicio (SiO_2) más óxido de aluminio (Al_2O_3) más óxido de hierro (Fe_2O_3), mín., %	70,0	50,0	50,0
Oxido de calcio (CaO), %	solo informar	18,0 máx.	< 18,0
Trióxido de azufre (SO_3), máx., %	4,0	5,0	5,0
Contenido de humedad, máx., %	3,0	3,0	3,0
Pérdida en ignición, máx., %	10,0	6,0 ^A	6,0

Ilustración 7: Requisitos Químicos de las cenizas volantes. ASTM C618

Si la puzolana a usar pertenece al tipo F contiene hasta un 12% de pérdida con incineración se puede aprobar su uso, de lo contrario se deberá buscar registros de desempeño aceptables o realizar ensayos de laboratorio. [20]

Del mismo modo se tiene que analizar el contenido de impurezas lo que hace saber que la ceniza puede servir como agente estabilizador, en este caso es la presencia de Oxido de Magnesio (MgO), que debe estar presente en un parámetro máximo del 5%. [20]

Ladrilleras artesanales

Las ladrilleras artesanales son industrias que tienen por finalidad la producción de las unidades de arcilla que vienen a ser los ladrillos artesanales para la construcción. Para el funcionamiento de estas industrias que muchas veces son ilegales, es necesario la incineración de materias primas, en este caso es mediante la incineración de la pajilla de arroz y la madera. [19]

A diferencia de las ladrilleras industriales, estas dependen principalmente de la mano de obra de las personas, tanto para el moldeado de ladrillos como para la atención de los hornos y la obtención de los materiales que se van a utilizar para la cocción de los ladrillos.

El funcionamiento de ladrilleras artesanales generalmente se centra en las zonas rurales, que trae consigo un impacto ambiental negativo, que pocas veces es mitigado, los efectos principales son la emisión de gases debido a la quema del material para los hornos. Y del mismo modo podrían afectar al ecosistema existente en la zona.

Ensayos de laboratorio

Para la clasificación del suelo, se realizó el análisis granulométrico por tamizado MTC E 107 y análisis granulométrico por sedimentación MTC E 109.

Análisis granulométrico por tamizado MTC E 107

Este ensayo se realiza con el propósito de analizar el tamaño de las partículas del suelo con mayor o menor cantidad de diferentes partículas del suelo y las propiedades importantes del suelo. De acuerdo con este procedimiento, se clasifica el tamaño de las partículas constituyentes al suelo y se define lo siguiente: [22]

Tipo de material	Tamaño de las partículas
Grava	75 mm – 2 mm
Arena	Arena gruesa: 2 mm – 0.2 mm
	Arena fina: 0.2 mm – 0.05 mm
Limo	0.05 mm – 0.005 mm
Arcilla	Menor a 0.005 mm

Ilustración 8: Tamaño de partículas del suelo

Equipos:

- Balanza con sensibilidad de 0.01 g
- Horno con la capacidad de mantener la temperatura uniforme y constante de 110 ± 5 °C

Materiales:

Los tamices necesarios para la muestra de suelo tienen las siguientes aberturas:

TAMICES	ABERTURA (mm)
3"	75,000
2"	50,800
1 ½"	38,100
1"	25,400
¾"	19,000
⅜"	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

Ilustración 9: Aberturas según la normativa del Manual de Ensayos de Materiales

Envases para el manejo de las muestras que se van tamizando y para el secado de muestras al horno.

Cepillo y brocha para la limpieza de los tamices.

Muestra

Para el caso de esta investigación se hizo uso de muestras de suelo arcilloso la cual fue trabajada mediante el procedimiento de lavado para separar los finos. La fracción que se utilizó fue la fracción que pasa por la malla Nº4 (4,460 mm), con un peso aproximado de 500 g inicialmente.

Procedimiento

La porción de tamaño mayor que el tamiz de 0,074 mm (N.º 200), se analizará por tamizado en seco, lavando la muestra previamente sobre el tamiz de 0,074 mm (N.º 200). [23]

Para este procedimiento previamente se deja saturando el suelo durante 24 horas, pasado este tiempo se realiza el lavado por el tamiz N.º 200. Posteriormente se recoge en un depósito y se deja reposar en el horno durante un periodo de 24 horas, pesando la muestra posteriormente y se realiza el tamizado en seco.

Análisis granulométrico por sedimentación MTC E 109

El análisis granulométrico por sedimentación se realiza por medio del método del hidrómetro, la cual está basada en la ley de Stokes, la cual relaciona la velocidad de sedimentación de la partícula en un fluido y el tamaño de dicha partícula. Esta ley puede ser utilizado para una masa de suelo dispersado, con partículas de diferentes tamaños y formas. Este método tiene como finalidad la determinación del porcentaje de partículas de suelos dispersados que permaneces en suspensión en un intervalo de tiempo, mas especifico las partículas más finas que pasen por el tamiz N.º 200 este material está constituido por limos y arcillas. Para realizar este análisis se hace uso del suelo que pasa por el tamiz N.º 40. [23]

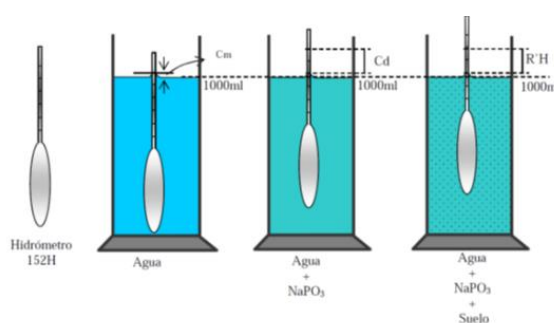


Ilustración 10: Ensayo de Hidrometría en Laboratorio

Equipos:

- Balanza con sensibilidad de 0.01 g
- Tamices N.º 10 y N.º 200.
- Vasos para colocar la muestra de 1 Lt.
- Hidrómetro
- Cronómetro
- Horno de temperatura constante de 110 ± 5 °C

Materiales:

Recipientes para la manipulación de las muestras que se para la manipulación de la muestra y secado de la muestra.

Reactivos

Solución de hexametáfosfato de sodio, la cual se usará en agua destilada, proporción de 50g de esta solución por litro de agua y 50g de material.

Agua destilada o desmineralizada.

Muestra

La muestra para este ensayo varía de acuerdo al tipo de suelo que se va a usar, en este caso se usa un suelo arcilloso y según la normativa el tamaño de muestra va de 50 g a 60g de peso seco y tamizado por la malla N°10. Para esta investigación se utilizó 50 g de muestra seca por calicata a estudiar.

Procedimiento

Para el procedimiento de este ensayo una vez pesado los 50 g de muestra seca se procede a adicionar el reactivo, y colocarlo dentro del vaso, se coloca agua destilada y se deja reposar, a continuación, se realiza la agitación por 1 minuto, se coloca en un lugar plano para realizar la lectura del hidrómetro al sumergirlo en el vaso con el material, se toma la lectura en intervalos de tiempo que comienza de 1' a 1440'. Para calcular los resultados de este tamizado previamente se tiene que haber calculado la gravedad específica de los sólidos del suelo.

Contenido de humedad MTC E 108

El contenido de humedad o la humedad natural en los suelos es el estudio de la humedad natural de estos mismos, la determinación de esta característica nos va a permitir comparar la humedad óptima que se obtendrá de los ensayos que se realizan para la obtención del CBR del suelo (Proctor modificado). En caso de que la humedad natural resultara ser menor o igual a la humedad optima, se procede tendría una propuesta de realizar una compactación normal de suelo, se manera contraria (si es superior) se propondría el incremento de la energía de compactación al suelo en estudio o de lo contrario el reemplazo del material saturado. [13]

Se utiliza la siguiente fórmula para el cálculo de la humedad.

$$W = \frac{W_w}{W_s} \times 100$$

Donde:

- W = Contenido de humedad (%)
- W_w = Peso de agua contenido en la muestra (gr.)
- W_s =Peso seco de la muestra (gr.)

Equipos y materiales

- Horno, con capacidad de alcanzar temperatura constante de 110 ± 5 °C
- Balanza, con margen de error según lo permitido por la norma (± 0.01 gr)
- Recipientes, resistentes al calor y a la corrosión

Muestra

El material para ensayar es una muestra inalterada, la cual se evaluó con sus propiedades

Máximo tamaño de partícula (pasa el 100%)	Tamaño de malla estándar	Masa mínima recomendada de espécimen de ensayo húmedo para contenidos de humedad reportados	
		a \pm 0,1%	a \pm 1%
2 mm o menos	2,00 mm (Nº 10)	20 g	20 g *
4,75 mm	4,760 mm (Nº 4)	100 g	20 g *
9,5 mm	9,525 mm (3/8")	500 g	50 g
19,0 mm	19,050 mm (3/4")	2,5 kg	250 g
37,5 mm	38,1 mm (1 1/2")	10 kg	1 kg
75,0 mm	76,200 mm (3")	50 kg	5 kg

iniciales, aproximadamente 500 g inicialmente.

Ilustración 11: Peso de la muestra a ensayar según el tamaño de partícula

Procedimiento

Para este ensayo lo primero es pesar las muestras seleccionadas, los contenedores o taras deben estar secas y limpias, una vez pesadas las muestras se pone al horno por 24 horas para asegurar el secado total, se pesa la muestra antes de poner al horno y después de poner al horno, posteriormente se realiza los cálculos necesarios.

Los límites de Atterberg MTC E 110 – MTC E 111

Los límites de Atterberg están divididos en Índice líquido e Índice plástico. Estos límites analizan en general los elementos o partículas finas del suelo, ya que mediante el análisis de la granulometría del suelo no nos da permite estimar esta característica, la cual es importante en el análisis de un suelo. Los estados que es de interés son el Limite plástico (LP) y limite Líquido (LL), estos ensayos se realizarán para el suelo que pasa por el tamiz N°40. Estos límites permiten determinar el índice de plasticidad del suelo IP, lo cual se expresa por la siguiente fórmula:

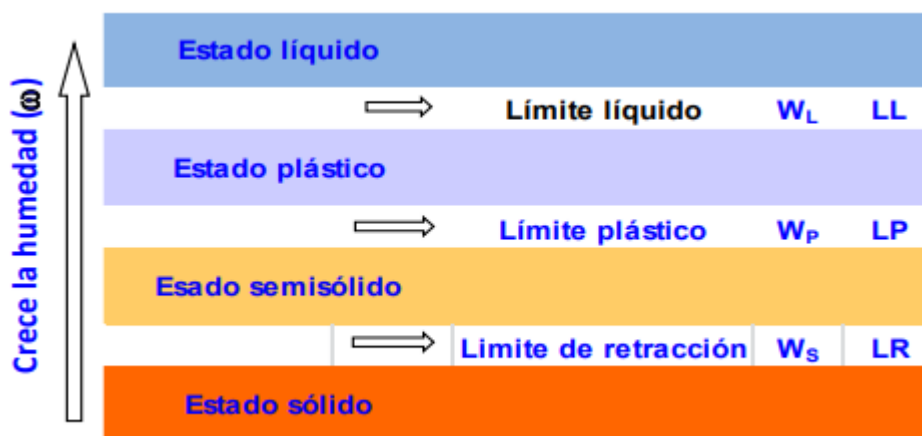


Ilustración 12: Límites para los 4 estados de suelos finos

Índice de plasticidad

El concepto de este término explica que viene a ser la diferencia entre los valores del Límite Líquido y el Límite Plástico, si el índice plástico es bajo significa que el contenido de humedad aumenta, esto quiere decir que al incrementar la humedad el suelo se transforma de semisólido a una condición líquida, es decir que el suelo es muy sensible ante la presencia de humedad, mientras que si el índice de plasticidad es alto nos indica que para que el suelo pase de un estado semisólido a líquido requiere de mucha más agua. [24]

Con el análisis del índice de plasticidad del suelo nos permitirá una clasificación adecuada del suelo. Cuando el IP es alto quiere decir que le corresponde a un suelo de características expansivas es decir un suelo muy arcilloso. Y, por el contrario, un IP pequeño es característico de un suelo poco arcilloso. [13]

Y se presenta la siguiente tabla: [16]

Índice de Plasticidad	Plasticidad	Característica
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 exentos de arcilla

Ilustración 13: Clasificación de suelos según Índice de Plasticidad

Límite líquido (LL) MTC E 110

El suelo tiene un comportamiento parecido a un fluido viscoso cuando está en estado líquido, generalmente estos suelos son arcillas o limo muy húmedos, por ello el límite líquido se refiere al contenido de humedad requerido para que la muestra cierre la ranura que se forma en el aparato de Casagrande a los 25 golpes. Esta humedad se representa en porcentaje, para el cual el suelo se encuentra en el límite entre los estados líquido y plástico. Este método se usa para realizar la clasificación de las fracciones finas de los suelos. [23]

Para el cálculo del límite líquido se hace uso de la siguiente fórmula:

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

Donde:

- LL = Límite líquido.
- W = Porcentaje de humedad del suelo (%)
- N = Número de golpes para cerrar la ranura para el contenido de humedad

Equipos

- Copa de Casagrande
- Acanalador
- Calibrador
- Balanza, sensibilidad ± 0.01 gr
- Horno para temperaturas de 110 ± 5 °C

Materiales

- Espátula
- Agua destilada
- Recipientes resistentes al calor

Procedimiento

Comenzamos con el tamizado de la muestra triturada por el tamiz N.º 40, pesamos 150 gr de esta muestra para posteriormente saturar completamente con el agua destilada y se deja reposar por 24 horas, una vez pasado este tiempo se procede a realizar el ensayo mediante la cuchara de Casagrande, se trata de no dejar burbujas de aire y que la profundidad no sea

mayor a 10 mm, la cuchara de casa grande se mantiene normal hasta acomodar el material para realizar la ranura la cual debe ser lo más uniforme posible. La ranura se realiza con una pasada que parte de la parte inferior hacia la parte superior y tratando de mantener el ranurador normal o perpendicular a la superficie de la cazuela, se realiza la ranura de la manera más uniforme posible.

Una vez realizada la ranura se procede a accionar la cuchara de Casagrande con aproximadamente 2 golpes por segundo y se cuenta el número de golpes hasta que la ranura se cierre por el flujo del suelo. Se divide en 4 la muestra de la cuchara y se procede a extraer una parte de las 4 para colocarlas en un recipiente ya pesado. La muestra sobrante se devuelve a ser mezclado para variar la humedad con el agua destilada, esto va a depender si se necesita aumentar o disminuir el número de golpes. Para seguir realizando el ensayo se limpia la cuchara de casa grande y se realiza los mismos pasos, el número de golpes puede variar entre 25-35, 20-30, 15-25.

Seguidamente del haber culminado el proceso pasamos a pesar la muestra húmeda independientemente del peso del recipiente y se pone a secar en el horno a una temperatura de ± 110 °C, después se pesa la muestra seca independientemente del peso del recipiente.

Límite plástico (LP) MTC E 111

El límite plástico de un suelo se refiere al menor contenido de humedad para el cual el suelo permite moldear o ser trabajable. La humedad de un suelo húmedo pasa a un estado plástico cuando tomamos la muestra húmeda para amasarla hasta obtener un rollo de suelo con un diámetro de 3 mm sobre una superficie plana y no absorbente hasta que este se fracture, sino en los siguiente 2 minutos se repite el ensayo. [23]

Para el cálculo del límite plástico del suelo se hace uso de la siguiente formula:

$$L.P. = \frac{P_W}{P_S} \times 100$$

$$L.P. = \frac{P_h - P_s}{P_s}$$

Donde:

- LP = Límite plástico en %.
- Ph = Peso húmedo (gr.).
- Ps = Peso seco (gr.).
- Pw = Peso de agua contenida.

- **Equipos**
- Tamiz N°40
- Superficie de trabajo (vidrio esmerilado grueso)
- Balanza, sensibilidad ± 0.01 gr
- Horno para temperaturas de 110 ± 5 °C

Materiales

- Espátula, según lo especificado en la presente norma
- Agua destilada
- Recipientes para la determinación de humedades del suelo.

Muestra

La muestra para este proceso, se debe tamizar la muestra del suelo triturado seco por el tamiz N° 40, aproximadamente 20 g para luego saturarla por completo donde no existan los grumos de suelo.

Procedimiento

Se selecciona una porción de suelo humedecido previamente con agua destilada de aproximadamente 1,5 – 2,0 g, se comienza a moldear la muestra con la palma de la mano con una presión constante hasta obtener los 3 mm de diámetro de los rollos que se van formando.

Al llegar a los 3 mm el suelo se debe agrietar mas no romper y se podrá verificar el Límite de contracción (retracción), cuando el suelo pasa de un estado semisólido a un estado sólido y deja de contraerse al perder humedad. [16]

Y posteriormente se pesa los rollos húmedos para colocarlo al horno hasta que seque y del mismo modo se procede a pesar.

Gravedad específica de los sólidos MTC E 113

Este ensayo determina la gravedad específica de los sólidos del suelo que pasa por el tamiz N°4, ya que se trata de un suelo fino. Es usado para el cálculo de la relación de vacíos y grado de saturación. Este ensayo se usa para obtener la densidad de los sólidos del suelo, así como el peso de las partículas de un sólido en suspensión dentro del agua. Además, viene a ser la relación del peso al aire de un volumen dado de partículas de suelo a una temperatura determinada con el volumen igual de agua desairada a esa misma temperatura. [23]

Equipos

- Fiola
- Balanza, sensibilidad ± 0.01 gr
- Tamiz N° 4

Materiales

- Embudo
- Agua destilada

Muestra

La muestra seleccionada en aquella que pasa por el tamiz N° 4, se pesa 50 g para luego colocarlo dentro de la fiola.

Procedimiento

Al tamizar la muestra pesamos 50 gramos para colocarlo en la fiola, junto con el agua destilada, de agita suavemente hasta eliminar el contenido de aire del suelo dentro del agua, posteriormente se deja reposar durante 24 horas.

Transcurrido este tiempo se pone la fiola en agua al punto de ebullición para asegurar que no existan vacos de aire dentro de la muestra saturada, luego se deja enfriar y se pesa para realizar los calculo necesarios.

También se va a necesitar el peso de la fiola con agua y vacía.

Proctor Modificado MTC E 113

El ensayo del Proctor modificado determina la relación entre la densidad seca y la humedad de compactación del suelo a evaluar. Este ensayo es el ensayo más utilizado y fundamental en el estudio de compactación de suelos para la construcción de vías para mejorar las propiedades de la subrasante de una vía. El método consiste en la compactación del suelo dentro del molde del Proctor en 5 capas y por la acción de la energía del martillo del Proctor.

El método usado en esta investigación el METODO “A”, donde se emplea el material que pasa por el tamiz N° 4 y consiste en compactar con 25 golpes las 5 capas. [25]

Es de referencia a la máxima densidad que puede alcanzar el suelo al realizar la compactación con respecto a la humedad optima. Para logra obtener este resultado se debe realizar el ensayo de Proctor Modificado el cual consiste en la compactación de suelo con el molde de diámetro de 15.20 cm y un volumen de 2123,06 cm³. El ensayo se realiza con una dosis de variación de

humedad, y con golpes de 25 veces hasta formar 5 capas. Al realizar la curva de compactación se encuentra el valor de la MDS y el contenido de humedad óptima. [17]

Para el cálculo de la MDS y OCH, se hacen uso de las siguientes formulas:

$$Y_h = \frac{W}{V_m}$$

Donde:

- Y_h = Densidad húmeda (gr/cm³)
- W = Peso del suelo compactado (gr.)
- V_m = Volumen del molde (cm³)

Posteriormente al cálculo del contenido de agua y la densidad húmeda se podrá calcular la densidad seca (Y_s) mediante la fórmula que se muestra a continuación:

$$Y_h = Y_s * \left(1 + \frac{W(\%)}{100}\right)$$

$$Y_s = \frac{Y_h}{1 + \frac{W(\%)}{100}}$$

Donde:

- Y_h = Densidad húmeda (gr/cm³)
- Y_s = Densidad seca (gr/cm³)
- W = Contenido de humedad (%)

Para obtener el valor la máxima densidad seca y el óptimo contenido de humedad de la muestra se debe trazar los valores de la densidad seca en función al contenido de humedad obtenido así la curva de compactación.

Equipos

- Ensamblaje de molde cilíndrico de 6 pulgadas
- Martillo de Proctor
- Balanza, sensibilidad ± 0.01 gr
- Tamiz N° 4

Materiales

- Enrazador metálico
- Cucharón

Muestra

La muestra seleccionada es aquella que pasa por el tamiz N° 4, aproximadamente 16 kg, la cual va a ser saturada de acuerdo con la humedad encontrada.

Procedimiento

Al seleccionar las muestras para ser humedecidas, se tiene en cuenta que para cada punto el contenido de humedad varíe alrededor de 2% y que no excedan el 4%. Una vez saturadas se dejan reposando hasta que la saturación sea máxima, después sacamos la humedad de cada uno de los puntos, pesamos y llevamos al horno. Posteriormente se procede a realizar la compactación, donde en la última capa se retira el collar del molde y se enraza el suelo compactado, seguidamente pesamos el molde mas el suelo compactado. Removemos el material y continuamos de la misma manera para las demás muestras.

California Bearing Ratio (CBR).

El California Bearing Ratio (CBR) es el valor de la capacidad de soporte o resistencia que presenta un suelo, referido al 95% de la Máxima Densidad Seca (MDS) y a una penetración de carga de 2.54mm. [13]

Este método se usa para evaluar la capacidad de soporte de los suelos en el nivel de subrasante y de las capas de base, subbase y de afirmado, brindándonos información sobre la expansión esperada del suelo que conforma la estructura del pavimento cuando el suelo se satura y del mismo modo nos permite analizar la pérdida de resistencia debido a la saturación en el campo, este varía con el grado de compactación y el porcentaje de humedad durante la ejecución del ensayo.

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%

Ilustración 14: Categoría de Subrasante

Equipos

- Ensamblaje de molde cilíndrico
- Pisón de compactación
- Pesas de metal con un agujero central
- Prensa utilizada para la penetración de la muestra compactada
- Disco espaciador de metal
- Aparato medidor de expansión
- Pistón de penetración de sección transversal circular
- Balanza, sensibilidad ± 0.01 gr

Materiales

- Enrazador metálico
- Cucharón
- Tamiz N° 4
- Tanque con agua para inmersión de los moldes

Muestra

La muestra seleccionada es aquella que pasa por el tamiz N° 4, aproximadamente 15 kg, la cual va a ser saturada de acuerdo con la humedad encontrada.

Procedimiento

Una vez saturada las muestras, se comienza con la compactación en los moldes con diferentes grados de compactación por cada capa, al mismo tiempo sacamos la humedad del suelo y ponemos al horno y pesamos, culminado los especímenes, se procede a poner en la fosa con agua por 4 días. Se medirá la expansión del suelo durante este periodo de tiempo con el nivel de agua constante.

Después de haber pasado los 4 días sumergido en agua, sacamos los especímenes y se realiza el ensayo de penetración de CBR, la cual se evalúa en intervalos de tiempo.

Materiales y métodos

Tipo y nivel de investigación

El proyecto de investigación presentada es de tipo experimental ya que la manipulación de la variable independiente trae consigo efectos en la variable dependiente. Esto quiere decir que el suelo de características arcillosas va a ser sometido a la adición de las cenizas provenientes

de las ladrilleras para obtener el mejoramiento de sus propiedades mecánicas, esto se va a comprobar a través del análisis de los resultados producto de los ensayos que se realizarán en el laboratorio [26].

De acuerdo con lo anterior, es por lo que la investigación adopta un enfoque correlacional en cuanto al nivel de investigación, ya se muestran los resultados de los experimentos realizados en laboratorio que están relacionados con las propiedades del suelo y los efectos causales de la adición de la ceniza de pajilla de arroz y madera [27].

Así mismo esta investigación es de tipo cuantitativa, cuyo propósito radica en medir y extender los resultados a través de algunos métodos estadísticos y haciendo uso de magnitudes numéricas para consolidar con exactitud las teorías o hipótesis planteadas para el comportamiento de una población [26].

Diseño de Investigación

Hipótesis

El empleo de cenizas de pajilla de arroz y madera provenientes de ladrilleras artesanales mejorará las propiedades mecánicas de los suelos arcillosos en subrasantes.

Unidad de estudio

Con respecto a la unidad de estudio de la presente investigación es el mejoramiento de las propiedades mecánicas de los suelos arcillosos en subrasantes.

Población

La población de estudio para esta investigación serán los suelos arcillosos a nivel de subrasantes, que serán adicionadas con cenizas de madera y pajilla de arroz que provienen de las ladrilleras artesanales.

Muestra

Se tomó muestras de suelo arcilloso ubicados en la ciudad de Chachapoyas, a los cuales se realizaron los ensayos correspondientes en laboratorio, debido a que se busca conocer el comportamiento en suelos con diferentes índices de plasticidad adicionando la ceniza de pajilla de arroz y madera de las ladrilleras artesanales. Asimismo, para el número de muestras propuestas a realizar en la presente investigación se va a considerar los requerimientos mínimos del manual de carreteras del MTC.

Muestreo de estudio

Para el muestreo de la investigación, como ya fue mencionado se tomó en cuenta los requerimientos del MTC, con lo cual se eligen la cantidad de muestras a tomar en cuenta, en este caso se realizaron un total de 5 calicatas, de los cuales se realizaron los ensayos correspondientes, para elegir la cantidad de calicatas a evaluar con la adición de las cenizas de cascarilla de arroz y madera que provienen de las ladrilleras artesanales en la ciudad de Chachapoyas, se considerarán también las adiciones en los siguientes porcentajes: 5%, 10%, 15%, 20% y 30%.



Ilustración 15: Ubicación del área de estudio

Para fines prácticos de la investigación se generó abreviaturas tanto para suelo natural (SN) en adelante y para la ceniza de pajilla de arroz y madera de ladrilleras artesanales (CDL) en adelante.

Se plantearon los siguientes ensayos para suelo natural de las 5 calicatas a estudiar, las cuales se detallan con la cantidad muestral en el siguiente cuadro:

Tabla 3: Ensayos para las 5 calicatas

MUESTRA DE SUELO NATURAL	CALICATA 1	CALICATA 2	CALICATA 3	CALICATA 4	CALICATA 5
Análisis granulométrico por tamiz	1	1	1	1	1
Análisis granulométrico por sedimentación	1	1	1	1	1
Contenido de Humedad	1	1	1	1	1
Límite plástico	1	1	1	1	1
Límite líquido	1	1	1	1	1
Gravedad Específica a los sólidos	1	1	1	1	1
Proctor modificado	1	1	1	1	1
CBR	1	1	1	1	1
TOTAL	8	8	8	8	8
TOTAL, DE MUESTRAS	40				

Y para el muestro experimental de igual manera se plantearon los siguientes ensayos, teniendo en cuenta las abreviaturas(SN, SN+5% CDL, SN+10% CDL, SN+15%CDL, SN+20% y SN+30%CDL.

- Granulometría por Hidrometría
- Peso Específico
- Proctor Modificado
- Ensayo de CBR

Con respecto a la evaluación de los ensayos de las adiciones, se realizó el cálculo estadístico para el muestreo probabilístico, con una muestra infinita, con un nivel de confianza al 90% y un error del 20%, obteniendo una muestra de 3 Proctor modificados y 10 CBR por adición, según las calicatas que se seleccionaron, estos requerimientos se realizan con el fin de reducir el error en el análisis de los resultados. Este muestreo probabilístico se realiza para estimar de manera más precisa las características y el comportamiento de la población elegida que está sujeta a la experimentación.

En el caso de esta investigación el tipo de suelo pertenece a una clasificación CL (arcilla de baja plasticidad), para todas las calicatas lo que quiere decir que es el mismo estrato, por ende, de acuerdo con los resultados obtenidos en el cálculo de CBR, seleccionamos 2 calicatas para el estudio, en este caso viene a ser la calicata 01 y la calicata 03, posteriormente se mostrarán los resultados del porqué se hizo esta selección.

Finalmente tenemos la siguiente distribución de la muestra para el suelo experimental.

Tabla 3: Numero de ensayos experimentales C-01

MUESTRA EXPERIMENTAL SUELO DE C 01						
ADICION DE CDL	0%	5%	10%	15%	20%	30%
Análisis granulométrico por sedimentación	1	1	1	1	1	1
Gravedad específica relativa a los solidos	1	1	1	1	1	1
Proctor Modificado	3	3	3	3	3	3
ENSAYO CBR	10	10	10	10	10	10
SUBTOTAL	22	22	22	22	22	22
TOTAL, DE MUESTRAS	90					

Tabla 4: Numero de ensayos experimentales C-03

MUESTRA EXPERIMENTAL SUELO DE C 03						
ADICION DE CDL	0%	5%	10%	15%	20%	30%
Análisis granulométrico por sedimentación	1	1	1	1	1	1
Gravedad específica relativa a los solidos	1	1	1	1	1	1
Proctor Modificado	3	3	3	3	3	3
ENSAYO CBR	10	10	10	10	10	10
SUBTOTAL	22	22	22	22	22	22
TOTAL, DE MUESTRAS	90					

Operacionalización de variables

Variable independiente (Y):

- Cenizas de pajilla de arroz y madera.

Variable dependiente (X):

- Propiedades mecánicas del suelo arcilloso de subrasante.

Tabla 5: Operacionalización de variable Independiente.

VARIABLE	INDICADOR	RANGO DE APLICACIÓN	UNIDAD	METODO DE MEDICIÓN
VARIABLE INDEPENDIENTE Ceniza de pajilla de arroz y madera	PORCENTAJE EN PESO DE LA CENIZA	5%, 10%, 15%, 20%, 30%	Kg	Balanza electrónica con aproximación de 0.1 g

Tabla 6: Operacionalización de variable Dependiente.

VARIABLE	DIMENSIÓN	INDICADOR	METODO DE MEDICIÓN	UNIDAD
VARIABLE DEPENDIENTE Mezcla experimental de suelo arcilloso mas ceniza de pajilla de arroz y madera	Propiedades Físicas	Peso específico relativo a los sólidos	Gravedad Especifica Relativa a los Sólidos (MTC E 113)	gr/cm ³
		Granulometría por sedimentación	Granulometría por Hidrómetro (MTC E109)	mm
	Propiedades mecánicas	Capacidad de resistencia del suelo	Proctor Modificado (MTC E115)	%
			Ensayo de CBR (MTC E132)	%

Tabla 7: Operacionalización de variable Interviniente.

VARIABLE	DIMENSIÓN	INDICADOR	METODO DE MEDICIÓN
VARIABLE INTERVINIENTE Suelo arcilloso Natural	Propiedades físicas y mecánicas	Estudio Geotécnico	Ensayos de laboratorio según MTC

Diseño metodológico

Técnicas e Instrumentos de recolección de datos

Dentro de las técnicas e instrumentos para la obtención de datos en esta investigación se realizó de manera directa, comenzando la etapa 1 es a través de la investigación científica y mediante este proceso se determinó los puntos a considerar para el desarrollo de esta investigación. Con respecto a la siguiente etapa de la investigación que se enfoca en el desarrollo de la investigación se realizará mediante el trabajo de campo y los ensayos en laboratorio para obtener los resultados que se busca en los objetivos ya propuestos.

INVESTIGACION CIENTÍFICA

Tabla 8: Investigación científica

TÉCNICA	INSTRUMENTO	ELEMENTO DE POBLACION
INDAGACION BIBLIOGRÁFICA	ANALISIS DE DOCUMENTOS DE INVESTIGACION	Guías, revistas, libros, normativas, artículos de investigación, tesis.

INVESTIGACION DE CAMPO

Tabla 9: Investigación de campo

TÉCNICA	INSTRUMENTO	ELEMENTO DE POBLACION
Estudio de suelos	Instrumentos y fichas de laboratorio	Muestras del suelo en estudio
Observación	Observación directa	Observación directa de la zona a estudiar, ensayos de laboratorio.
	Guía de fotos	
Extracción del suelo	Colaboración de personas (mano de obra)	Muestras del tipo de suelo en estudio
Captura de fotos	cámara fotográfica	panel fotográfico del desarrollo del proyecto
Formulas	Hojas de cálculo	Datos de campo, resultados de laboratorio, apuntes

Las técnicas de recolección de datos también incluyen la obtención del material que se usó como aditivo en este caso la ceniza de la ladrillera y que posteriormente se analiza sus características, además el desarrollo de los ensayos de laboratorio según las normas actuales.

Para los instrumentos de recopilación de datos, se considera la extracción de las muestras según lo establecido en los objetivos, en este caso se realizaron las 5 calicatas, a mano con el apoyo de 2 peones, además de la cámara fotográfica, las palanas, pico, barreta, sacos y wincha.

Estrategia metodológica para demostración de la hipótesis

Para validar la hipótesis, se realizaron distintos pasos, comenzando desde la recopilación de datos, siguiendo con el análisis de la información encontrada y las normas involucradas en el tema de investigación, también realizar un estudio de los ensayos que se van a realizar a la muestra obtenida. En cuanto a la distribución de calicatas en el área de estudio y la selección del estrato de la muestra se llevó a cabo bajo el criterio del investigador. La elección de este estrato tiene que ser el que sea constante y se encuentre a una profundidad adecuada para una subrasante. Por último, la obtención de los datos que se pondrán en discusión y comparar los resultados, del suelo en estado natural y el suelo de las muestras experimentales con la adición del agente estabilizador.

Una vez realizado el análisis de los antecedentes encontrados, se consideró factible el uso de la ceniza de ladrilleras artesanales (CDL) en los siguientes porcentajes en peso de: 5%, 10%,

15%, 20% y 30%. Estos porcentajes será agregado a las muestras del suelo arcilloso en estado natural y posteriormente realizar las comparaciones de sus características tanto de suelo en estado natural, como del suelo estabilizado. Para este análisis se han considerado para evaluar las propiedades físicas y mecánicas del suelo natural como vendrán a ser:

- Análisis granulométrico por tamiz
- Análisis granulométrico por sedimentación
- Contenido de humedad
- Límites de Atterberg (limite plástico y limite liquido)
- Gravedad específica relativa a los sólidos
- Proctor modificado
- CBR

Procedimiento experimental

El desarrollo de este punto será para evidenciar y detallar los materiales y el procedimiento empleado para el desarrollo de la investigación. Para comenzar con la realización de ensayos, previamente se obtuvieron las muestras de suelo arcilloso y la ceniza de la ladrillera artesanal ubicada en la ciudad de Chachapoyas.

Para la obtención del material arcilloso se realizó trabajo de campo comenzando por el análisis y reconocimiento de la zona, y posteriormente definiendo el número de calicatas a realizar, que fueron 05 calicatas, respetando los parámetros mínimos del manual de carreteras. Con la excavación de las calicatas se realizó a cielo abierto, de 1.50 m de profundidad, no se encontró nivel freático en ninguna de las excavaciones, se extrajo el material para ser trasladado al laboratorio.



CALICATA N°01



CALICATA N°02



CALICATA N°03



Tiempo: 23-04-2023 15:41:52
Nota: Calicata Nro 04

NoteCam @ iOS

CALICATA N°04



Tiempo: 23-04-2023 15:50:53
Nota: Calicata Nro 05

NoteCam @ iOS

CALICATA N°05

Datos del perfil estratigráfico de las calicatas

Profundidad 0.0 (cm)	Tipo de Excavación	Muestra N°	Símbolo	Clasificación SUCS/IAA SHTO	Descripción visual (IN-SITU)
0	A C I E L O A B I E R T O	M - 1		CL A-6 (14)	Material orgánico
0.15					Suelo compuesto de material arcilloso
					Con baja plasticidad
					De color marrón claro que varía a Marrón rojizo
					con manchas grises
					No se encontró nivel freático
					No se encontró deslizamiento
					Arcilla de baja plasticidad con arena
					Limite líquido : 39.9%
					Limite plástico : 14.3%
					Índice de plasticidad : 25.7%
					Humedad natural : 21.2%
1.50					

Tabla 10: Perfil Estratigráfico de Calicata 01

Profundidad 0.0 (cm)	Tipo de Excavación	Muestra N°	Símbolo	Clasificación SUCS/IAA SHTO	Descripción visual (IN-SITU)
0.15	A C I E L O A B I E R T O	M - 1		CL A-6 (12)	Material orgánico
					Suelo compuesto de material arcilloso
					Con baja plasticidad
					De color marrón claro que varía a Marrón rojizo
					con manchas grises
					No se encontró nivel freático
					No se encontró deslizamiento
					Arcilla de baja plasticidad con arena
					Limite líquido : 37.63%
					Limite plástico : 16.67%
					Índice de plasticidad : 20.97%
					Humedad natural : 20.00%
1.50					

Tabla 11: Perfil Estratigráfico de Calicata 02

Tabla 12: Perfil Estratigráfico de Calicata 03

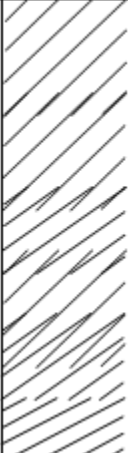
Profundidad 0.0 (cm)	Tipo de Excavación	Muestra N°	Símbolo	Clasificación SUCS/AA SHTO	Descripción visual (IN-SITU)
0.15	A C I E L O A B I E R T O	M - 1		CL A-6 (14)	Material orgánico
					Suelo compuesto de material arcilloso
					Con baja plasticidad
					De color marron claro que varía a Marron rojizo
					con manchas amarillas
					No se encontró nivel freatico
					No se encontró deslizamiento
					Arcilla de baja plasticidad con arena
					Limite liquido : 37.0%
					Limite plástico : 12.3%
					Índice de plasticidad : 24.6%
					Humedad natural : 18.5%
1.50					

Tabla 13: Perfil Estratigráfico de Calicata 04

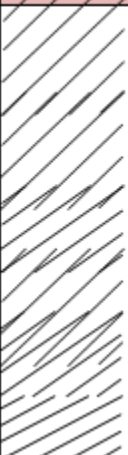

Profundidad 0.0 (cm)	Tipo de Excavación	Muestra N°	Símbolo	Clasificación SUCS/AA SHTO	Descripción visual (IN-SITU)
0.15	A C I E L O A B I E R T O	M - 1		CL A-6 (14)	Material orgánico
					Suelo compuesto de material arcilloso
					Con baja plasticidad
					De color marron claro que varía a Marron rojizo
					con manchas amarillas y blancas
					No se encontró nivel freatico
					No se encontró deslizamiento
					Arcilla de baja plasticidad
					Limite liquido : 34.1%
					Limite plástico : 14.8%
					Índice de plasticidad : 19.3%
					Humedad natural : 14.9%
1.50					

Tabla 14: Perfil Estratigráfico de Calicata 05

Profundidad 0.0 (cm)	Tipo de Excavación	Muestra N°	Símbolo	Clasificación SUCS/AA SHTO	Descripción visual (IN-SITU)
0.15	A C I E L O A B I E R T O	M - 1		CL A-6 (14)	Material orgánico
					Suelo compuesto de material arcilloso
					Con baja plasticidad
					De color marron claro que varía a Marron rojizo
					con manchas amarillas y blancas
					No se encontró nivel freatico
					No se encontró deslizamiento
					Arcilla de baja plasticidad con arena
					Limite liquido : 40.32%
					Limite plástico : 19.12%
					Índice de plasticidad : 21.20%
					Humedad natural : 14.50%
1.50					

Materiales

1. SUELO ARCILLOSO



Ilustración 16: Muestras de suelo arcilloso

El suelo con el cual se va a realizar el análisis experimental es de tipo arcilloso, proveniente de la ciudad de Chachapoyas, con textura suave y el color varía de un marrón claro a un color marrón rojizo.

2. CENIZA DE LADRILLERA ARTESANAL

La ceniza para utilizar se extrajo de la ladrillera CERÁMICA SAC ubicado en la ciudad de chachapoyas, después del quemado de la pajilla de arroz y madera (leña) para la elaboración de ladrillos. Esta ceniza presenta desperdicios de ladrillos por lo que tiene que ser tamizado para obtener el material puro para comenzar con los ensayos de laboratorio.



Ilustración 17: Ceniza procedente de ladrillera artesanal

Para el uso de este material como aditivo estabilizador se requiere realizar un ensayo químico de la ceniza de ladrillera, el cual se realizó en el LABORATORIO FISICO QUIMICO AMBIENTAL PERÚ S.A.C. de la ciudad de Trujillo. El ensayo se realizó mediante el método de Espectrometría de fluorescencia de rayos x, para lo cual se necesitaron 25 mg de la muestra de ceniza, la cual fue tamizada previamente por la malla 200. El método mencionado está basado en la norma ASTM C25 y volumetría USAQ-ME06. Para así conocer sus propiedades químicas y lo que nos va a portar en cuanto al mejoramiento del suelo arcilloso.

Ensayos de laboratorio

METODOS Y PROCEDIMIENTOS

Para el desarrollo de los ensayos correspondientes, se realizó en el laboratorio de la Universidad Católica Santo Toribio de Mogrovejo, para los cuales se respetaron la consideración del manual de ensayos de materiales para carreteras del Ministerio de Transportes y Comunicaciones (MTC). Estos ensayos se realizaron al suelo arcilloso natural, para evaluar con cual se trabajará la adición de la ceniza de ladrillera.

- ❖ Ensayo de Análisis granulométrico: MTC E 107
- ❖ Ensayo Granulométrico por medio del hidrómetro: MTC E 109
- ❖ Ensayo de Contenido de Humedad: MTC E 108
- ❖ Ensayo de Límites de Atterberg: MTC E 110
- ❖ Ensayo de la Gravedad Específica Relativa a los Sólidos: MTC E 113
- ❖ Ensayo de Proctor Modificado: MTC E 115
- ❖ Ensayo de CBR: MTC E 133

Procedimientos de laboratorio:

Ensayo de Análisis granulométrico por tamizado

Este ensayo se realizó con la muestra seca, triturada para pasar por el tamiz N°4, posteriormente pesamos 500g aproximadamente de suelo para ponerlo a saturar durante 24 horas. Una vez transcurrido ese tiempo, se procede a lavar la muestra con la malla 200, el suelo retenido se coloca al horno para su secado durante 24 horas.

Por último, se realiza el tamizado por las mallas N°: 4, 10, 20, 40, 50, 100 y 200, pesando lo retenido en cada tamiz.



Ilustración 18: Ensayo de Granulometría en el laboratorio



Ilustración 19: Ensayo de Granulometría en el laboratorio

Ensayo Granulométrico por medio del hidrómetro

Para realizar este ensayo, la muestra tiene que estar seca, triturada para pasar por la malla N°10, adicionalmente a ello necesitamos contar con el agente dispersante que es



Ilustración 20: Ensayo de Hidrometría

la solución de Hexametáfosfato de sodio. Pesamos 50 gramos de cada calicata, y 10 gramos del agente dispersante (químico), con 1 litro de agua destilada, para posteriormente agitarlo y tomar lecturas del hidrómetro, cada cierto periodo de tiempo durante las 24 horas.

Ensayo de Contenido de Humedad

Para realizar el ensayo de humedad del suelo de cada calicata, se tomó la muestra de suelo natural inalterada, pesándolo inicialmente y pasando las 24 horas en el horno se volvió a pesar la muestra seca.



Ilustración 21: Ensayo de Humedad Natural

Ensayo de Límites de Atterberg

Este ensayo se realizó para las 05 calicatas, con la muestra triturada y tamizada por la malla N°40, pesamos 150 gramos, y se satura con agua destilada por 24 horas. Para el límite líquido se hizo uso de la cuchara de casa grande dando golpes que varían de 30, 23 y 12 golpes, hasta que la línea del centro este unida y dividimos en 4 y usamos uno para el análisis. Para el límite plástico se realizan palitos con la muestra hasta que se agrieten para saber hasta dónde da la plasticidad del suelo, se coloca al horno por 24 horas y pesamos la muestra.



Ilustración 22: Ensayo de Limite líquido y Limite Plástico

Ensayo de la Gravedad Específica Relativa a los Sólidos

Para este ensayo, la muestra seca y triturada, se pasa por el tamiz N° 10, pesamos 50 gramos para colocarlo posteriormente en la fiola para añadirle agua destilada, agitamos para sacarle el aire restante y se coloca en un depósito de agua caliente para eliminar los vacíos por completo, se agita nuevamente y se deja reposar durante 24 horas y finalmente se pesa, tanto la fiola mas el agua y la muestra, como el peso de la fiola y el peso de la fiola solo con el agua destilada.

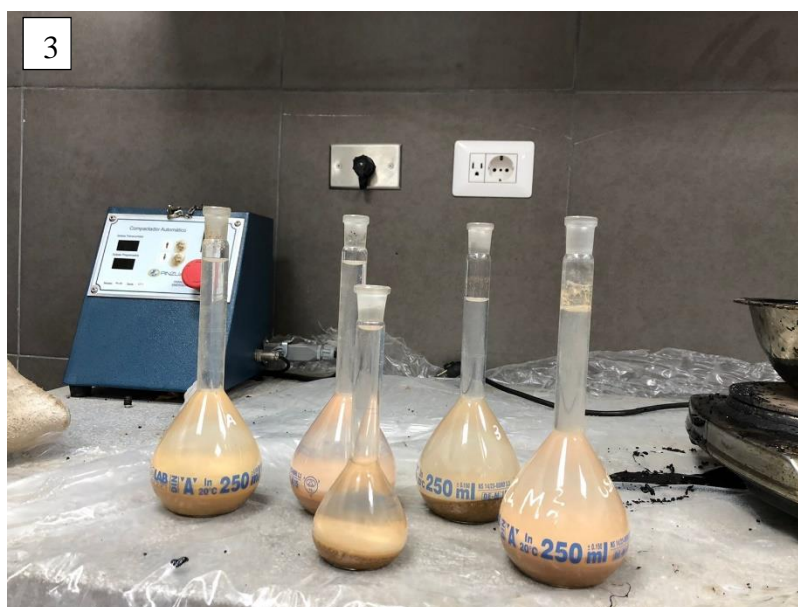
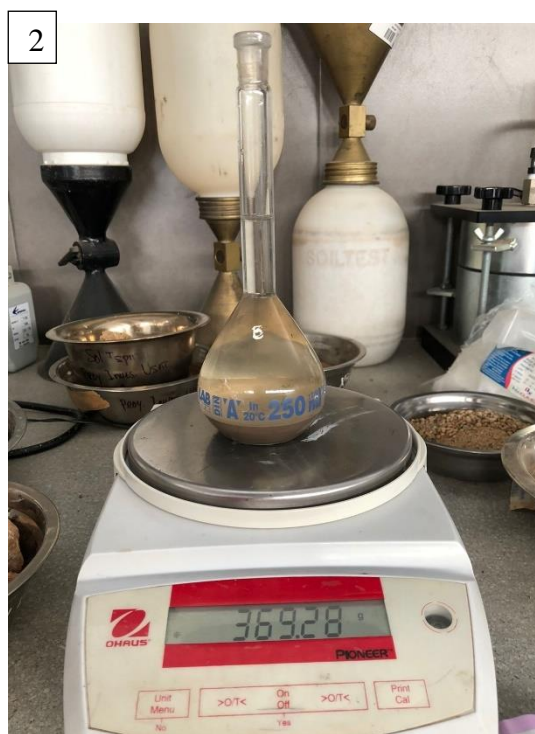


Ilustración 23: Ensayo de la gravedad específica relativa a los sólidos

Ensayo de Peso Volumétrico

Para este ensayo se realiza con la muestra inalterada, cortando la muestra lo mas simétrica posible, después pesamos la muestra y sellamos con parafina, para introducirlo en 500 ml de agua, y anotamos el volumen dispersado, posteriormente pesamos la muestra con la parafina.



Ilustración 24: Ensayo de Peso volumétrico

Ensayo de Proctor Modificado

Para realizar este ensayo, se realizó con el método A que consta pasar la muestra triturada por la malla N° 4, y pesar 3 kilos para 4 puntos, saturamos la muestra y se guarda la muestra en bolsas plásticas para completar la saturación y evitar que la muestra se seque, posteriormente compacta cada punto dividiendo en 5 partes y cada uno requiere 25 golpes del martillo del Proctor, finalmente pesamos el molde mas la muestra compactada.



Ilustración 25: Muestra para el ensayo de Proctor Modificado



Ilustración 26. Ensayo de Proctor Modificado

Ensayo de California Bearing Ratio (CBR)

Este ensayo también es necesario tamizar la muestra triturada por la malla N° 4, se requieren 5 kilos de muestra para 3 puntos, saturamos la muestra y se guarda en bolsas plásticas para completar su saturación y evitar que la muestra se seque y la humedad varíe, para posteriormente compactar. Una vez compactado se procede a colocar los moldes en una poza de agua por 4 días, midiendo la expansión desde el mismo día cada 24 horas. Finalmente realizamos la penetración del CBR.



Ilustración 27 : Preparación de muestras de CBR



Ilustración 28: Lectura de datos del ensayo de CBR

De los resultados obtenidos en los ensayos al suelo natural o muestra patrón, se determinó realizar el muestreo experimental con la combinación del suelo con las cenizas de la pajilla de arroz y madera de la ladrillera artesanal, a las calicatas 01 y 03, ya que se consideran las muestras que tienen peores condiciones de soporte de acuerdo con el ensayo de CBR, y además tienen diferentes características en cuanto al CBR. Considerando las adiciones del 0%, 5%, 10%, 15%, 20% y 30%, para el método de análisis mediante el ensayo de Granulometría por sedimentación, Peso específico relativo a los Sólidos, Proctor modificado y CBR.

Para el aditivo que será usado como el agente estabilizador, se realizará la adición de porcentaje en peso de cada muestra, cuyos cálculos se verán posteriormente. Para el uso de la ceniza, se tuvo que realizar el tamizado para eliminar los residuos, ya que al ser proveniente de una ladrillera tiene desperdicios de ladrillos.



Ilustración 29: Tamizado de la ceniza de ladrillera

CALCULOS PARA LA MEZCLA DE CENIZA CON EL SUELO NATURAL

Para realizar los cálculos para la adición se considera el peso seco de la muestra, eso quiere decir que para cada ensayo el cálculo de la ceniza se realizó en porcentaje en peso de la muestra.

Las combinaciones se especifican en el siguiente cuadro:

CALICATA 1 Y 3				
MEZCLA	SUELO NATURAL	CLASIFICACION	Ceniza de ladrillera (%) en peso del suelo	
			DOSIFICACION	CODIFICACION
0	100%	CL	0%	SN
1	100%	CL	5%	SN+5%CDL
2	100%	CL	10%	SN+10%CDL
3	100%	CL	15%	SN+15%CDL
4	100%	CL	20%	SN+20%CDL
5	100%	CL	30%	SN+30%CDL

Tabla 15: Adiciones de la ceniza para el suelo natural

Peso de ceniza de ladrillera (CDL) para el ensayo de granulometría por sedimentación.

Para la calicata 01 y 03:

Se necesita 50 gramos de la muestra seca de cada adición para realizar este ensayo.

En la adición de: SN+5%CDL

$$CDL = 5 \% * 50g$$

$$CDL = 2.50 g$$

En la adición de: SN+10%CDL

$$CDL = 10 \% * 50g$$

$$CDL = 5.0 g$$

En la adición de: SN+15%CDL

$$CDL = 15 \% * 50g$$

$$CDL = 7.50 g$$

En la adición de: SN+20%CDL

$$CDL = 20 \% * 50g$$

$$CDL = 10.0 \text{ g}$$

En la adición de: SN+30%CDL

$$CDL = 30 \% * 50g$$

$$CDL = 15.0 \text{ g}$$

Peso de ceniza de ladrillera (CDL) para el ensayo de peso específico relativo a los sólidos.

Se necesita 50 gramos de la muestra seca de cada adición para realizar este ensayo.

En la adición de: SN+5%CDL

$$CDL = 5 \% * 50g$$

$$CDL = 2.50 \text{ g}$$

En la adición de: SN+10%CDL

$$CDL = 10 \% * 50g$$

$$CDL = 5.0 \text{ g}$$

En la adición de: SN+15%CDL

$$CDL = 15 \% * 50g$$

$$CDL = 7.50 \text{ g}$$

En la adición de: SN+20%CDL

$$CDL = 20 \% * 50g$$

$$CDL = 10.0 \text{ g}$$

En la adición de: SN+30%CDL

$$CDL = 30 \% * 50g$$

$$CDL = 15.0 \text{ g}$$

Peso de ceniza de ladrillera (CDL) para el ensayo de Proctor Modificado.

Se necesita 3000 gramos de la muestra seca de cada adición para realizar este ensayo.

En la adición de: SN+5%CDL

$$CDL = 5 \% * 3000g$$

$$CDL = 150.0 g$$

En la adición de: SN+10%CDL

$$CDL = 10 \% * 3000g$$

$$CDL = 300.0 g$$

En la adición de: SN+15%CDL

$$CDL = 15 \% * 3000g$$

$$CDL = 450.0 g$$

En la adición de: SN+20%CDL

$$CDL = 20 \% * 3000g$$

$$CDL = 600.0 g$$

En la adición de: SN+30%CDL

$$CDL = 30 \% * 3000g$$

$$CDL = 900.0 g$$

Peso de ceniza de ladrillera (CDL) para el ensayo de CBR.

Se necesita 5000 gramos de la muestra seca de cada adición para realizar este ensayo.

En la adición de: SN+5%CDL

$$CDL = 5 \% * 5000g$$

$$CDL = 250.0 g$$

En la adición de: SN+10%CDL

$$CDL = 10 \% * 5000g$$

$$CDL = 500.0 g$$

En la adición de: SN+15%CDL

$$CDL = 15 \% * 5000g$$

$$CDL = 750.0 g$$

En la adición de: SN+20%CDL

$$CDL = 20 \% * 5000g$$

$$CDL = 1000.0 g$$

En la adición de: SN+30%CDL

$$CDL = 30 \% * 5000g$$

$$CDL = 1500.0 g$$

Luego de realizar los cálculos correspondientes para las adiciones de ceniza a las muestras, pasamos a mezclar el material seco de cada calicata (C-01 y C-03) con los pesos respectivos para proceder a realizar los ensayos correspondientes según lo especificado, en la tabla de las muestras, que vendrían a ser, el peso específico relativo a los sólidos, granulometría por sedimentación, Proctor Modificado y CBR. Las mezclas fueron almacenadas en bolsas plásticas hasta el momento donde se realiza el ensayo.

Se presentan algunos procedimientos de los ensayos a las mezclas de ceniza de pajilla de arroz y madera procedentes de ladrilleras artesanales.

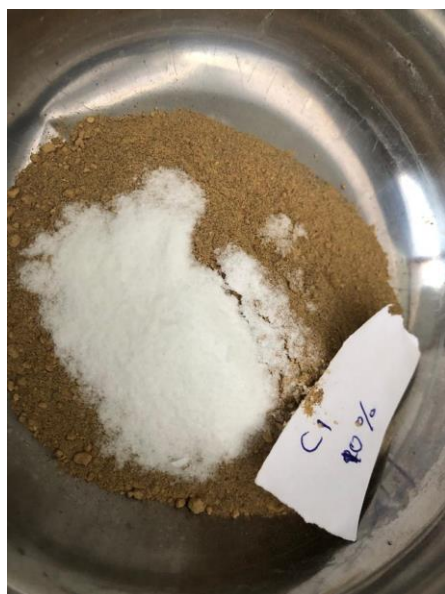


Ilustración 30: Ensayo de Hidrometría para la muestra experimental



Ilustración 32: Mezcla de la ceniza con el suelo natural seco

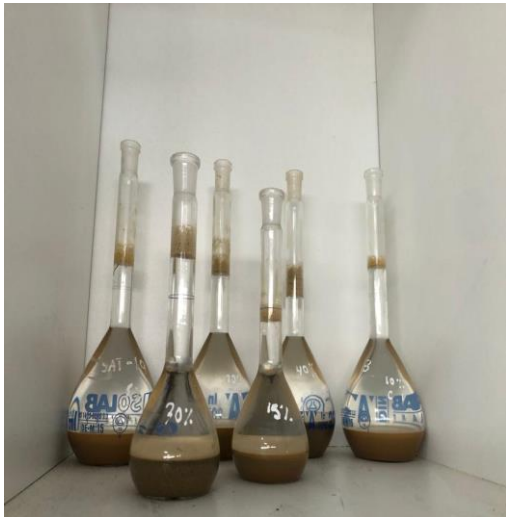


Ilustración 31: Peso específico relativo a los sólidos de la muestra experimental



Ilustración 33: Proctor Modificado y penetración de CBR de las muestras experimentales

Resultados y discusión

Procesamiento de datos

En este apartado se realiza el procesamiento de datos como parte del tratamiento de la información obtenida con respecto a la influencia de la inclusión de la ceniza de ladrillera (pajilla de arroz y madera), CDL, en el suelo arcilloso. Para esto se empleará principalmente el software de hojas de cálculo Excel. En dicho programa se generarán los formatos correspondientes para cada uno de los ensayos planteados y ejecutados en el marco de este estudio. La evaluación de estos datos se realizará a través de la creación y análisis de gráficos.

Resultados

En esta etapa se mostrarán los resultados de los ensayos realizados a las muestras del suelo arcilloso tanto en estado natural (las 05 calicatas) como con sus respectivas adiciones a las calicatas seleccionadas, la adición utilizada como agente estabilizador es la ceniza de pajilla de arroz y madera proveniente de ladrilleras artesanales de la ciudad de chachapoyas, la cual fue adicionada en los porcentajes ya mencionados anteriormente, además de ello previo a su aplicación se realizó el análisis químico para obtener su respectiva clasificación.

Los ensayos de sus características o propiedades físicas del suelo se realizaron para encontrar la clasificación del suelo, según la normativa AASHTO y SUCS, por su parte los ensayos de las propiedades mecánicas del suelo fueron realizados para evaluar las condiciones del suelo y así clasificar el que tenga peores y diferentes condiciones como se menciona en capítulos anteriores. El criterio de selección de las calicatas a estudiar, básicamente es por la similitud de las características entre los suelos de las 05 calicatas, según los ensayos realizados, por ello, que las muestras elegidas para este proyecto son de Calicata 01 (C-01) y Calicata 03 (C-03) para proceder a la experimentación con la ceniza, por ello también se realiza los ensayos de las propiedades mecánicas mediante el ensayo de Proctor Modificado y CBR, al suelo con la adición de ceniza para evaluar el efecto estabilizador que tiene este material sobre los parámetros resistentes del suelo.

Con respecto a los resultados ya procesados se requieren para ir respondiendo a nuestros objetivos planteados en esta investigación, por ende, se comenzará al análisis por objetivos cumplidos.

A. Describir las características de las cenizas de pajilla de arroz y madera provenientes de ladrilleras artesanales.

Características químicas

El análisis se realizó en un espectrómetro de fluorescencia total de rayos x marca BRUKER, MODELO S2-PICOFOX. Cuya fuente de rayos x es el tubo Mo, con un tiempo de medida de 2000 segundos.

COMPOSICION QUIMICA	RESULTADOS (%)	METODO UTILIZADO
DIOXIDO DE SILICIO (Si O ₂)	53.12	Espectrometría de fluorescencia de rayos x
OXIDO DE CALCIO (Ca O)	3.06	
TRIOXIDO DE ALUMINIO (Al ₂ O ₃)	26.98	
TRIOXIDO DE HIERRO (Fe ₂ O ₃)	1.16	
OXIDO DE POTACIO (K ₂ O)	1.87	
OXIDO DE MAGNESIO (Mg O)	2.01	
PENTOXIDO DE FOSFORO (P ₂ O ₅)	0.31	
OXIDO DE COBRE (Cu O)	0.14	
TRIOXIDO DE AZUFRE (SO ₃)	0.72	
OXIDO DE ZINC (ZnO)	0.04	
OXIDO DE MANGANESO (MnO)	0.02	
PERDIDA POR QUEMADO	10.53	

Tabla 16: Composición química de la CDL

Como conclusión del ensayo realizado, se tiene que la comparación del espectro de la muestra (25g) analizada con las energías características de los elementos de la tabla periódica principalmente se encontró sílice con un 53.12%, seguido por el Trióxido de Calcio con un 26.98 %, además de ello se analiza que la pérdida por quemado es del 10.53%. Al ser la sílice uno de los componentes principales de esta ceniza, si se puede usar como agente estabilizador por sus características puzolánicas y cementicias.

Clasificación mediante ASTM C 618-19

Por sus componentes químicos de la ceniza tenemos:

Pertenece al **tipo F** lo que significa que tiene características puzolánicas además de propiedades cementicias, y que es apto para su consideración como agente estabilizador de un suelo arcilloso. Debido a sus componentes químicos que indican cantidades mayores al 50% de Dióxido de Silicio y Trióxido de Aluminio. Con respecto al contenido de Oxide Calcio y Trióxido de Azufre, también se encuentran dentro de los parámetros presentados en capítulos anteriores, considerando la presencia de impurezas en este caso la presencia de óxido de Magnesio está por debajo de lo permitido que es un máximo de 5% y en este caso se presenta con 0.02%.

Las pérdidas por incineración en este caso son de 10.53, lo que indica que puede ser aceptado por el usuario, además de realizar pruebas de laboratorio para su buen funcionamiento, como un agente estabilizador para suelos arcillosos a nivel de subrasante.

B. Identificar las propiedades físicas de la muestra de suelo natural: Coeficiente de Uniformidad, Clasificación del suelo (SUCS y AASHTO), contenido de humedad, límites de Atterberg y gravedad específica relativa a los sólidos.

Para la clasificación del suelo se realizó los siguientes ensayos:

- **ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR TAMIZADO**

En base a los procedimientos del MTC E 107 se realizó el ensayo de granulometría por tamizado a la muestra previamente lavada, de la muestra se suelo en estado natural de las 5 calicatas, para encontrar su clasificación del suelo.

Obteniendo así para las 5 calicatas los porcentajes de arcilla y limo de 83.70%, 72.20%, 75.80%, 90.30% y 83.80% respectivamente en C-01, C-02, C-03, C-04 y C-05, Lo que quiere decir que nuestro suelo para esta investigación este compuesto principalmente por material fino (alto contenido de arcilla y limo). Además de ello se puede observar que también tiene presencia de material arenoso el cual está asociado a las partículas de arena fina, pero en pequeñas cantidades en comparación con el material arcilloso.

Tabla 17: Resultados de Análisis Granulométrico por Tamizado

CALICATA	%GRAVA		%ARENA			%ARCILLA Y LIMO
	G. GRUESA	G. FINA	A. G	A.M	A. F	FINOS
C-01	0.00	0.00	0.90	3.40	10.50	83.70
C-02	0.00	3.20	1.30	5.10	18.20	72.20
C-03	0.00	1.00	1.20	4.90	17.10	75.80
C-04	0.00	0.00	0.50	1.10	8.10	90.30
C-05	0.00	0.20	1.10	1.60	13.30	83.80

Con respecto al Coeficiente de uniformidad del suelo para las 5 calicatas tenemos un valor de $C_u=1.1$, lo que indica que es un suelo con partículas de tamaño uniforme, lo que es común en las arcillas.

- **ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR SEDIMENTACION**

En base a los procedimientos del MTC E 109 se realizó el ensayo de hidrometría a la porción fina de la muestra, la cual es la muestra pasante por la malla 40 en estado natural, se realizó a las 05 calicatas, con la finalidad de determinar la distribución de tamaños de las partículas finas de las muestras que pasen por el tamiz 200, y de este modo calcular el porcentaje que pasa de acuerdo con su diámetro.

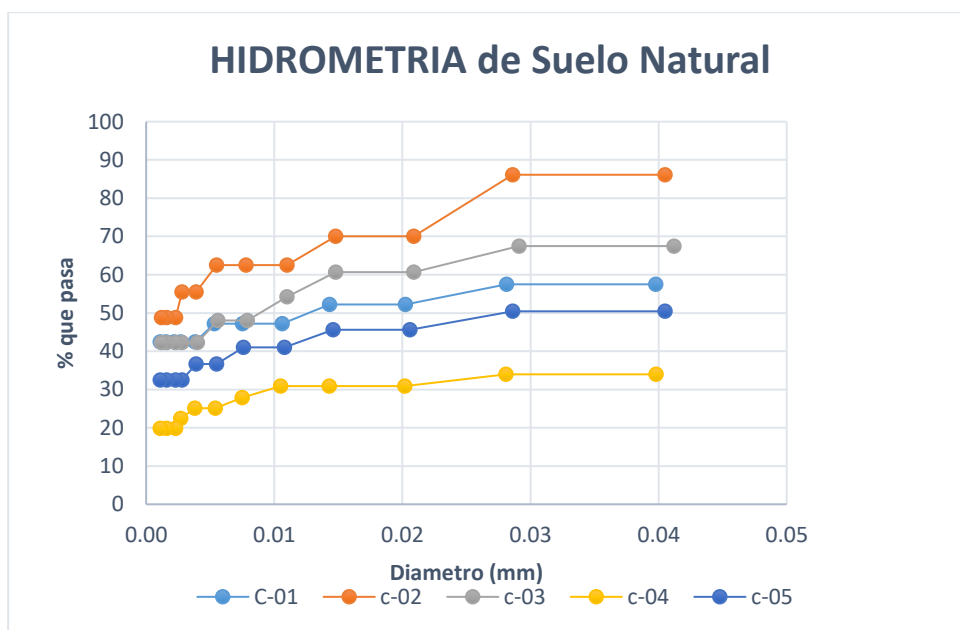


Gráfico 1. Representación del análisis granulométrico por sedimentación

En el siguiente gráfico podemos observar la distribución de las partículas finas de las 5 calicata en estudio, con un tamaño máximo aproximado de 0.04 mm, este ensayo determina las partículas finas en suspensión de la muestra. De este modo también podemos verificar que los tamaños de las partículas son similares y uniformes.

- **CONTENIDO DE HUMEDAD NATURAL**

Este ensayo se realizó en base al MTC E 108, para las 05 calicatas, siendo necesario en este ensayo utilizar la muestra inalterada, la cual fue de aproximadamente 1kg por calicata, esta muestra fue trasladada de manera inmediata al laboratorio para evitar su variación en este resultado.

El presente ensayo no se aplica para la mezcla del suelo mas la ceniza de ladrillera, ya que estas dosificaciones se trabajan con el peso seco.

De esta manera, se obtuvo los resultados de laboratorio para las muestras en estado natural con una humedad inicial de 21.20% para C-01, 20% para C-02, 18.50% para C-03, 14.90% para C-04 y 14.50% para C-05. Por lo tanto, se puede concluir que la humedad promedio para el suelo arcilloso es de 17.82% como se puede observar en la siguiente tabla:

Tabla 18: Resultados de la Humedad natural del suelo

CALICATA	MUESTRA	PROFUND.	HUMEDAD NATURAL
C-01	M-01	1.5	21.20%
C-02	M-02	1.5	20.00%
C-03	M-03	1.5	18.50%
C-04	M-04	1.5	14.90%
C-05	M-05	1.5	14.50%
PROMEDIO DE HUMEDAD			17.82%

- **Límites de Atterberg**

El propósito de realizar este ensayo es para la evaluación de los valores del Limite Liquido (LL) , Limite plástico (LP) e Índice de Plasticidad del suelo en estado natural, cuyos resultados son considerados importantes para la clasificación de dicho suelo. Se hizo uso de la normativa MTC E 110 para Limite Liquido y MTC E 111 para Limite Plástico. Este ensayo solo se realizó para las muestras de suelo natural y de manera adicional para el porcentaje óptimo de ceniza en la muestra experimental.

Tenemos la siguiente tabla resumen de los valores de Índice de Plasticidad de las muestras naturales.

Tabla 19: Resultados de LL y LP de suelo natural

CALICATA	SUCS	L. LIQUIDO	L. PLASTICO	INDICE DE PLASTICIDAD
C-01	CL	39.94%	14.29%	25.65%
C-02	CL	37.63%	16.67%	20.97%
C-03	CL	36.97%	12.33%	24.63%
C-04	CL	34.06%	14.77%	19.29%
C-05	CL	40.39%	19.12%	21.20%

- **Gravedad específica relativa a los sólidos**

La gravedad específica relativa a los sólidos se hizo para las 5 calicatas de igual manera que el anterior ensayo. Este se usa para el cálculo de las relaciones de fase de suelos, como la relación de vacíos y el grado de saturación del suelo. En este caso se obtuvo un peso específico de 2.425 para C-01, 2.551 en la C-02, 2.569 en la C-03, 2.451 en la C-04 y 2.53, para la C-05, concluyendo que el promedio en peso específico de las muestras naturales es de 2.51 g/m³, el valor

- **Peso volumétrico de suelo cohesivo.**

Este ensayo se hace con la finalidad de calcular el peso del suelo en 1 m³ de tierra. Presentamos el cuadro resumen de la gravedad específica y el peso volumétrico,

Tabla 20: Resultados de La gravedad específica de suelo natural

CALICATA	PESO ESPECIFICO	PESO VOLUMETRICO	
		HUMEDO	SECO
C-01	2.425	1.565	1.324
C-02	2.551	2.374	2.01
C-03	2.569	1.887	1.617
C-04	2.451	1.835	1.621
C-05	2.53	1.951	1.728

Clasificación de suelos

Después de realizar los ensayos en laboratorio, se procede al análisis de estos para obtener la clasificación del suelo en estudio, mediante la implementación de los procedimientos definidos por los sistemas de SUCS y AASHTO. De acuerdo clasificación del sistema SUCS, se concluye que el suelo extraído de las calicatas C-01, C-02, C-03, C-04 y C-05 se clasifica como “CL”, lo que indica su naturaleza como arcilla de baja plasticidad.

Asimismo, se realiza el análisis por medio del sistema de clasificación de suelos de AASHTO, donde como resultados tenemos que el suelo de la calicata C-01 es de tipo A-6 (14), C-02 como A-6 (12), C-03 se clasifica como tipo A-6 (14), C-04 se clasifica como de grupo A-6 (12) y la calicata C-05 su clasificación es de tipo A-6 (13), considerados como un suelo de naturaleza arcillosa y siendo estas deficientes en sus características portantes como para ser usado como subrasante.

Tabla 21: Resultados de la clasificación de suelos SUCS/AASHTO

CALICATA	CLASIFICACION SUCS	CLASIFICACION AASHTO	MATERIAL
C-01	CL (Arcilla de baja plasticidad).	A6(14)	Suelo arcilloso de mala calidad
C-02	CL (Arcilla de baja plasticidad).	A6(12)	Suelo arcilloso de mala calidad
C-03	CL (Arcilla de baja plasticidad).	A6(14)	Suelo arcilloso de mala calidad
C-04	CL (Arcilla de baja plasticidad).	A6(12)	Suelo arcilloso de mala calidad
C-05	CL (Arcilla de baja plasticidad).	A6(13)	Suelo arcilloso de mala calidad

C. Identificar las propiedades mecánicas de la muestra de suelo natural mediante el ensayo de Proctor modificado y el ensayo de California Bearing Ratio (CBR).

- **Ensayo de Proctor Modificado**

Para este ensayo se siguió la normativa del MTC E 115 del Manual de Ensayo de Materiales del MTC. Anteriormente se describe el método aplicado para este ensayo, el cual es el método “A” de compactación, el desarrollo de este método involucra el procedimiento de compactación del suelo en cinco capas con 25 golpes por capa, utilizando un molde de Proctor con un diámetro de 4 pulgadas.

Este proceso nos permite conocer y determinar los valores de la máxima densidad seca (MDS) y el óptimo contenido de humedad (OCH), como se muestra en la tabla 22.

Tabla 22: Resultados Proctor Modificado para Suelo natural.

CALICATA	MDS (gr/cm ³)	OCH (%)
C-01	1.944	13.86%
C-02	1.952	14.10%
C-03	1.94	13.20%
C-04	1.97	15.00%
C-05	1.985	12.50%

- **Ensayo de California Bearing Ratio (CBR)**

El ensayo de CBR, se llevó a cabo siguiendo con los parámetros y requerimientos que se establecen en la normativa del MTC E 132 del Manual de Ensayo de Materiales del MTC. Como resultado de este procedimiento se

logra obtener los valores de la Relación de Soporte de California (CBR) y además se u obtienen los valores de expansión luego de que las 15 muestras de las 5 calicatas hayan estado sumergidas en agua por un periodo de 96 horas (cuatro días), este periodo es la etapa de curado de las muestras compactadas. Los valores de CBR al 95% y al 100% de la MDS se presentan en la siguiente tabla.

Tabla 23: Resultados CBR para Suelo natural

CALICATA	CBR	
	95%	100%
C-01	2.00%	3.00%
C-02	4.00%	5.00%
C-03	4.00%	5.00%
C-04	2.00%	3.00%
C-05	3.00%	3.00%

Como podemos observar en la Tabla 23, el suelo arcilloso presenta baja capacidades de resistencia, teniendo como mínimo un 2% al 95% de la MDS y un máximo de 4% al 95% de la máxima densidad seca, lo que según las especificaciones del MTC, este suelo es inadecuado y requiere mejoramiento para ser usado como subrasante. De este modo, con los valores obtenidos se procedió a seleccionar las calicatas que serán adicionadas la ceniza de ladrilleras, las cuales vendrían a ser la calicata 01 y 03.

D. Analizar las propiedades mecánicas correspondientes a la muestra de suelo natural con la adición de ceniza provenientes de ladrilleras artesanales en los porcentajes del 5%, 10%, 15%, 20% y 30%.

Para el desarrollo de este objetivo se evaluaron 4 ensayos, 2 ensayos que corresponden a las propiedades físicas y 2 de las propiedades mecánicas los cuales se van a detallar a continuación:

- **Análisis granulométrico por sedimentación (hidrometría)**

En los gráficos se observa que la curva granulométrica por sedimentación varía con respecto a la adición de CDL en las diferentes dosificaciones. Podemos notar que a medida que se añaden los porcentajes de CDL la curva tiende a moverse hacia la parte de superior con respecto a la curva que corresponde al suelo sin adición, cada combinación de suelo–ceniza, va aumentando conforme va aumentando el porcentaje de ceniza, esto se debe al agente dispersante en la

muestra combinada y el peso específico de la ceniza es bajo con respecto al suelo, la lectura el hidrómetro es porque existen mayor número de partículas en suspensión por la presencia del agente estabilizador (ceniza de ladrillera) este efecto se observa en las dos calicatas C-01 y C-03. Este comportamiento también se debe a que el peso específico de la ceniza es bajo en comparación del suelo, ya que se requiere de más volumen de ceniza para alcanzar más peso.

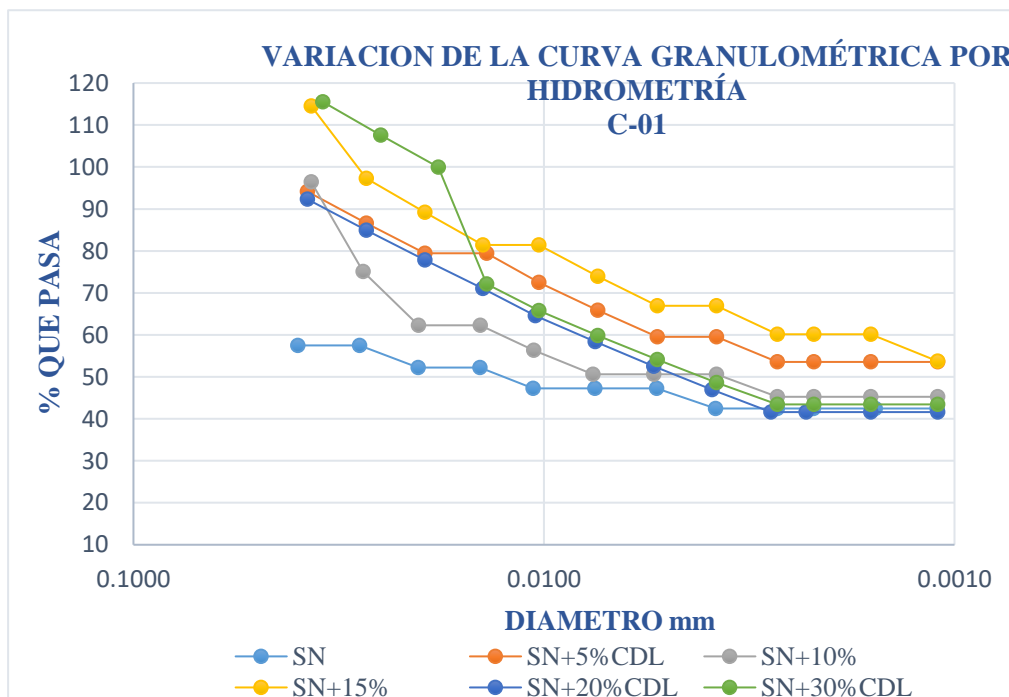


Gráfico 2: Hidrometría de muestra experimental de C-01

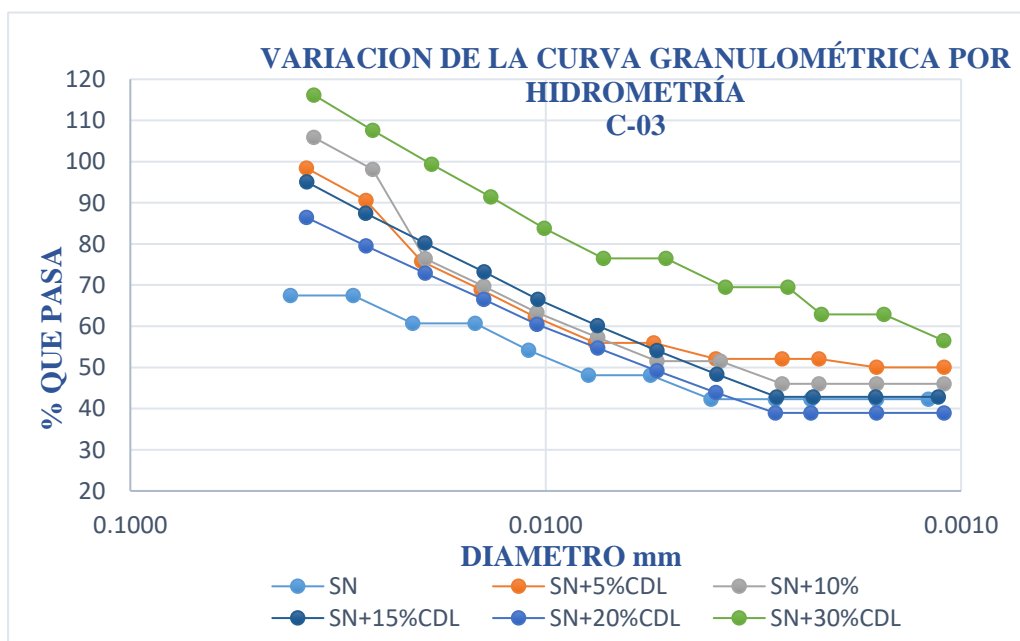


Gráfico 3: Hidrometría para muestra experimental de C-03

- **Peso específico relativo a los sólidos**

En esta parte tenemos el gráfico del peso específico del suelo natural con las adiciones respectivas, de este modo podemos notar que para la calicata C-01 el peso específico aumenta de 2.425 g/cm³ que corresponde al suelo natural, hasta un peso específico de 2.75 g/cm³ que corresponde al 15% de CDL. Y con respecto a la calicata C-03, el valor aumenta de 2.569 g/cm³ que corresponde al suelo natural, hasta un peso específico de 2.889% que corresponde al 10% de CDL luego de aumentar, los valores de peso específico decrecen nuevamente, esto se debe a la cantidad de ceniza que existe en el suelo, y la variación de sus propiedades del suelo arcilloso al someterlo al agente estabilizador. En tabla 24 se muestran los valores de peso específico para la calicata C-01 y para la calicata C-03. Y posteriormente en el gráfico 4, se muestra las curvas de variación de peso específico para las diferentes dosificaciones de ceniza.

Tabla 24: Resultados de Peso Específico de C-01 y C-03

ADICION	PESO ESPECIFICO g/cm ³	
	C-01	C-03
SN	2.425	2.569
SN+5% CDL	2.695	2.695
SN+10% CDL	2.738	2.889
SN+15% CDL	2.75	2.603
SN+20% CDL	2.579	2.473
SN+30% CDL	2.308	2.404

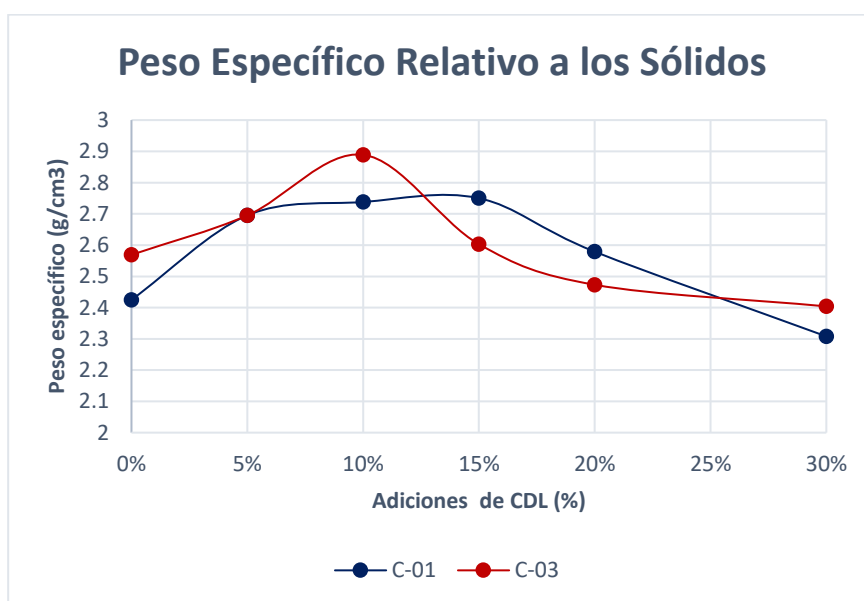


Gráfico 4: Representación de los resultados experimentales de Gs.

- **Proctor Modificado**

Este ensayo fue realizado con base a la norma de MTC E 115 del manual de ensayos del MTC, como ya se mencionó anteriormente este ensayo se realizó con el método A.

En la siguiente tabla se muestran los valores de la Máxima Densidad Seca y el Óptimo Contenido de Humedad para el suelo en estado natural y con la adición de CDL en los porcentajes especificados de las dos calicatas en estudio C-01 y C-03. Para el cálculo del CBR de las calicatas se tomó en cuenta el promedio de los resultados del Proctor Modificado (MDS y OCH), que, según el análisis estadístico se realizaron 3 ensayos de Proctor modificado por adición de CDL de cada calicata.

En la tabla 25 se detallan los valores máximos de la MDS y del OCH, de la calicata C-01 y C-03, en estado natural y de las combinaciones según la adición en porcentaje de la ceniza de pajilla de arroz y madera que provienen de ladrilleras artesanales denominada CDL. En los gráficos 5 y 6, se puede notar que la MDS disminuye hasta el 15% de CDL, lo que conlleva a que el valor ascienda en el 20% de CDL y que en la combinación del 30% decrezca otra vez. Mientras que el OCH asciende hasta el 15% de CDL y posteriormente decrece en la combinación del 20%, y finalmente el valor suba para el valor de 30% de CDL.

Tabla 25: Resultados de la variación de MDS y OCH de la calicata C-1 y C-3.

ENSAYO DE PROCTOR MODIFICADO				
ADICION A SUELO NATURAL	CALICATA 01		CALICATA 03	
	MDS (g/m3)	OCH(%)	MDS (g/m3)	OCH(%)
SN+0% CDL	1.87	13.52%	1.94	13.03%
SN+5% CDL	1.84	15.53%	1.56	15.13%
SN+10% CDL	1.79	15.45%	1.48	15.46%
SN+15% CDL	1.69	15.65%	1.49	13.04%
SN+20% CDL	1.7	14.40%	1.71	12.63%
SN+30% CDL	1.51	21.98%	1.53	17.73%

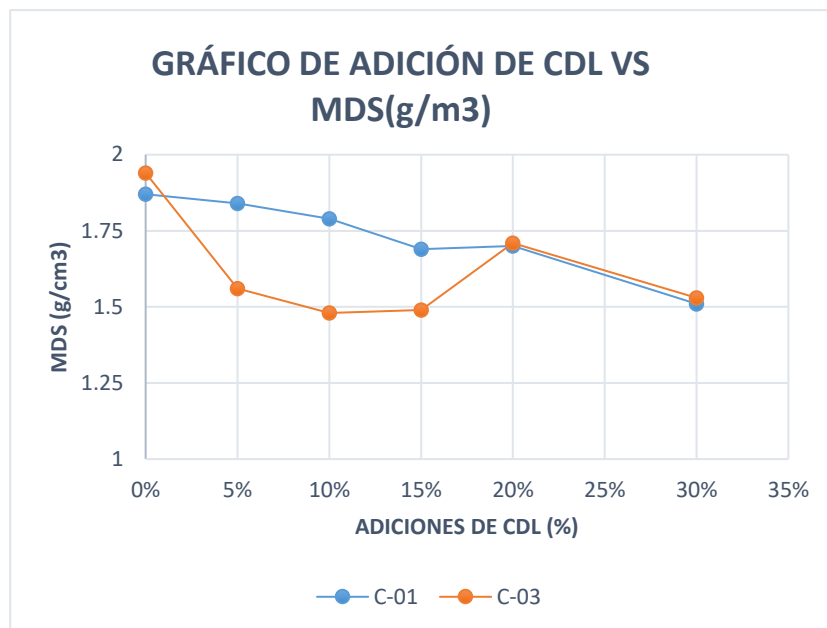


Gráfico 5: Representación gráfica de CDL VS. MDS

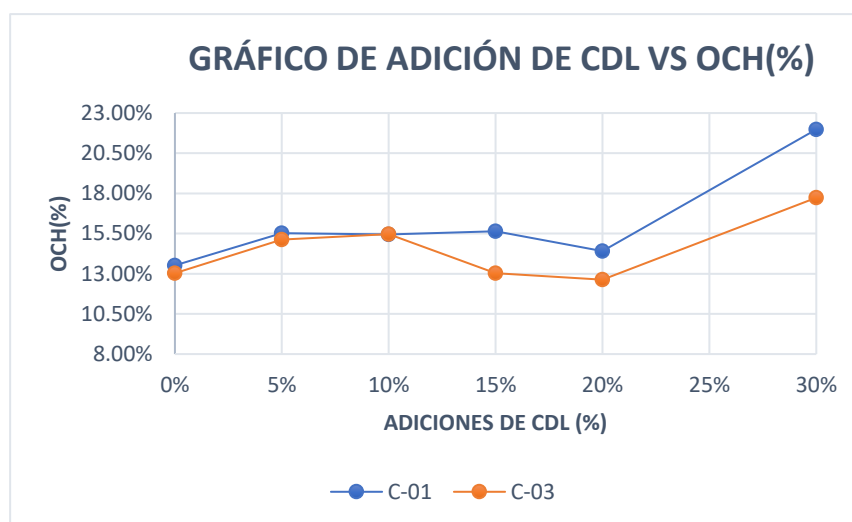


Gráfico 6: Representación gráfica de CDL VS OCH.

En la tabla 26 y 27, se muestran los valores de la máxima densidad seca (MDS) y Optimo contenido de Humedad (OCH) con respecto al suelo natural y las combinaciones de Ceniza, de la calicata C-01 y C-03, en los gráficos 7 y 8, se observan las curvas de compactación, donde se deduce el comportamiento que tienen a moverse a la parte inferior derecha con respecto a la curva de compactación del suelo natural lo que comprueba la variación de la MDS y el OCH.

C-01

ADICIONES	DENSIDAD SECA				HUMEDAD			
SN+0%CDL	1.875	1.928	1.900	1.844	10.108	13.143	16.264	19.288
SN+5%CDL	1.710	1.840	1.760	1.705	12.715	15.118	18.336	21.145
SN+10%CDL	1.763	1.789	1.771	1.720	11.900	15.300	18.500	21.400
SN+15%CDL	1.616	1.691	1.643	1.624	12.778	15.370	18.547	21.211
SN+20%CDL	1.585	1.705	1.653	1.615	11.630	14.363	17.210	20.611
SN+30%CDL	1.300	1.335	1.507	1.374	15.400	18.364	21.250	24.510

Tabla 26: Resultados de Proctor Modificado de C-01.

C-03

ADICIONES	DENSIDAD SECA				HUMEDAD			
SN+0%CDL	1.874	1.942	1.906	1.882	10.508	13.179	16.353	19.567
SN+5%CDL	1.517	1.560	1.542	1.459	11.040	14.030	17.350	19.970
SN+10%CDL	1.422	1.470	1.478	1.396	10.160	13.262	16.023	19.718
SN+15%CDL	1.457	1.488	1.448	1.413	10.600	12.800	16.100	19.000
SN+20%CDL	1.689	1.711	1.701	1.647	8.500	11.600	14.700	17.800
SN+30%CDL	1.479	1.529	1.470	1.458	14.600	18.100	20.500	23.500

Tabla 27: Resultados de Proctor Modificado de C-03.

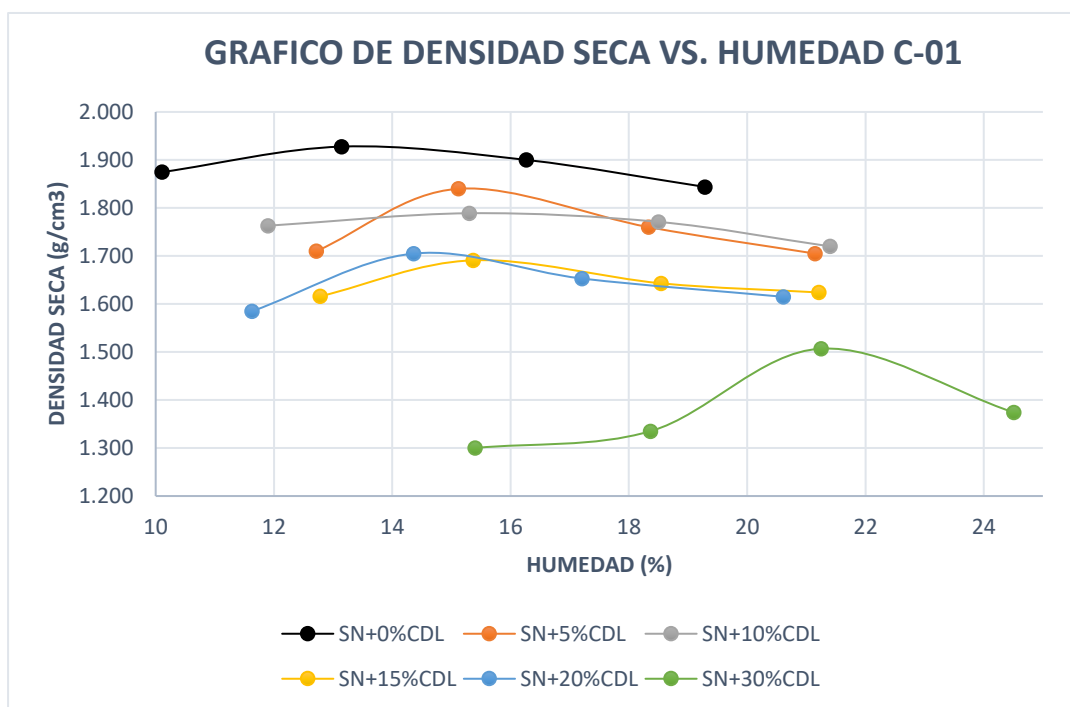


Gráfico 7: Gráfico de la densidad seca y la humedad C-01.

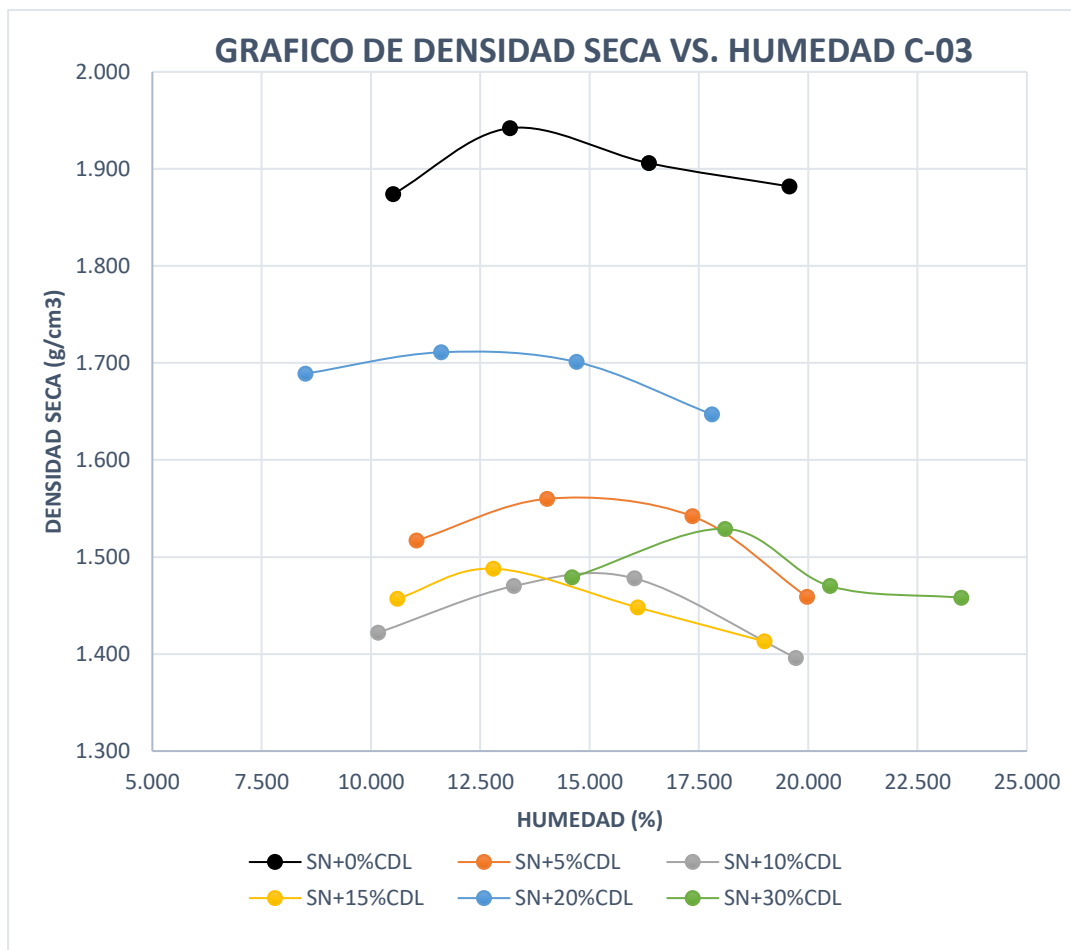


Gráfico 8: Gráfico de la densidad seca y la humedad C-03.

- **Ensayo de CBR**

Para el desarrollo de este ensayo del mismo modo que las muestras naturales se sigue el procedimiento de acuerdo con el MTC 132. Los valores obtenidos corresponden a la Relación de Soporte de California (CBR) al 95% y al 100% de la máxima Densidad Seca de las muestras experimentales. Este ensayo se realizó para la muestra en estado natural de las calicatas seleccionadas (C-1 y C-3) y para las adiciones correspondientes a las muestras de estas calicatas en mención, con el fin de ver el comportamiento del suelo ante la adición del agente estabilizador que en este caso es la ceniza de ladrillera artesanal CDL.

En la tabla se puede apreciar que el valor más alto de capacidad de soporte del suelo es al 20% de la adición de ceniza de ladrillera, obteniendo un valor máximo de CBR de 39% al 95% de la MDS, para la calicata C-01 y un valor de CBR de 28% al 95% de la MDS para la calicata C-03. En la tabla 28 se muestra la variación de los valores de CBR de acuerdo a la adición que se proporciona al suelo en estado natural (SN).

ADICIONES	CALICATA 01		CALICATA 03	
	CBR		CBR	
	95%	100%	95%	100%
SN+0%CDL	2%	3%	5%	6%
SN+5%CDL	5%	5%	10%	12%
SN+10%CDL	7%	8%	13%	16%
SN+15%CDL	33%	39%	18%	20%
SN+20%CDL	39%	47%	28%	31%
SN+30%CDL	28%	34%	28%	33%

Tabla 28: Resultados de CRB de la calicata C-01 y C-03.

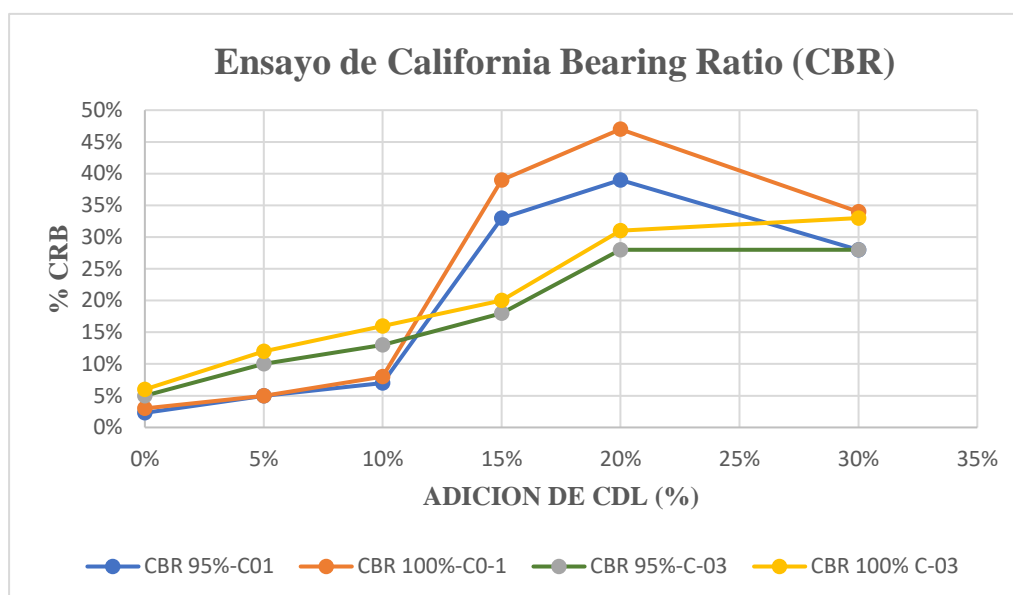


Gráfico 9: Representación gráfica del CBR vs. ADICION DE CDL.

E. DETERMINAR LA DOSIFICACIÓN ÓPTIMA DEL CONTENIDO DE CENIZAS Y LA METODOLOGÍA PARA EL USO DE LA CENIZA EN LA ESTABILIZACIÓN DE SUELOS ARCILLOSOS.

Dosificación óptima

Según los datos observados en el gráfico 9, el valor máximo de CBR se da en la adición de 20% de cenizas de ladrillera, lo que se concluye que este porcentaje vendría a ser el contenido óptimo de cenizas en la estabilización del suelo arcilloso de tipo CL, ya que a este punto cumple con el principal objetivo de esta investigación, que es el mejoramiento de las propiedades mecánicas del suelo arcilloso, en otras palabras la ceniza cumple con mejorar las propiedades resistentes de ambas calicatas, lo que finalmente hace que sea adecuada para ser usado como subrasante.

Con esto se podría realizar la comparación de valores de CBR según los requerimientos del MTC para que un suelo sea apto para usarse como subrasante.

Para la calicata C-01 que inicialmente contaba con un CBR de 2% al 95% de la MDS, se mejora esta capacidad a un valor de 39% al 95% de la MDS, cuyo mejoramiento es producto de la combinación al 20% de CDL, y lo que conlleva a que las características a nivel de subrasante que inicialmente fue una subrasante inadecuada pase a ser una excelente según las disposiciones del MTC. Del mismo modo se realiza el análisis de la C-03, la cual inicialmente contaba con una capacidad de soporte del suelo de 5% al 95% de la MDS, lo cual, según el manual de carreteras, es un suelo que requiere mejoramiento de sus propiedades mecánicas para ser utilizado con subrasante, por lo tanto, se verifica que; con la adición del 20% de CDL, esta mejora sus propiedades a un 28% al 95% de la MDS (Máxima Densidad Seca), de esta manera sus propiedades pasan a la categoría de subrasante muy buena.

Además de ello se analiza sus características mediante el Índice de Plasticidad y la clasificación de suelos a la cual variaría la arcilla de tipo CL, en las siguientes tablas se muestra la variación del IP y la clasificación del suelo de la muestra experimental.

CALICATA	SUCS	L. L.	L. P.	I.P.
C-01	CL	39.94%	14.29%	25.65%
C-03	CL	36.97%	12.33%	24.63%

Tabla 29: Analisis de Indice de Plasticidad de muestra en estado natural

CALICATA	SUCS	L. L.	L. P.	I.P.
C-01	SC	38.56%	22.22%	16.34%
C-03	SM	42.48%	38.69%	3.79%

Tabla 30: Analisis de Indice de Plasticidad de muestra experimental con el 20% de CDL.

Con los resultados expuestos podemos observar que el Índice de Plasticidad disminuye considerablemente en ambas calicatas que teniendo así para la calicata C-01, un IP inicial de 25.65% reduciéndose el valor a 16.34%, con esta variación también analizamos la nueva clasificación de la muestra experimental inicialmente fue de CL, y con la adición del 20% de ceniza pasa a ser de tipo SC según la clasificación SUCS, lo

que significa que pertenece a un suelo arenoso con presencia de arcilla, lo que de acuerdo a sus propiedades mecánicas es considerado como un suelo bueno. De la misma manera se analiza la calicata C-03, de la cual la variación del IP va de 24.63 a un valor de IP de 3.79%, clasificándose según SUCS como un suelo de tipo SM, que significa que es un suelo arenoso con presencia de limos y que es considerado como un suelo regular, con esto podemos deducir que el suelo pierde plasticidad lo cual lo hace ser más resistente ante la presencia de agua, ya que adquiere una característica más granular debido a la adición de la ceniza. A continuación, podemos observar la siguiente grafica.

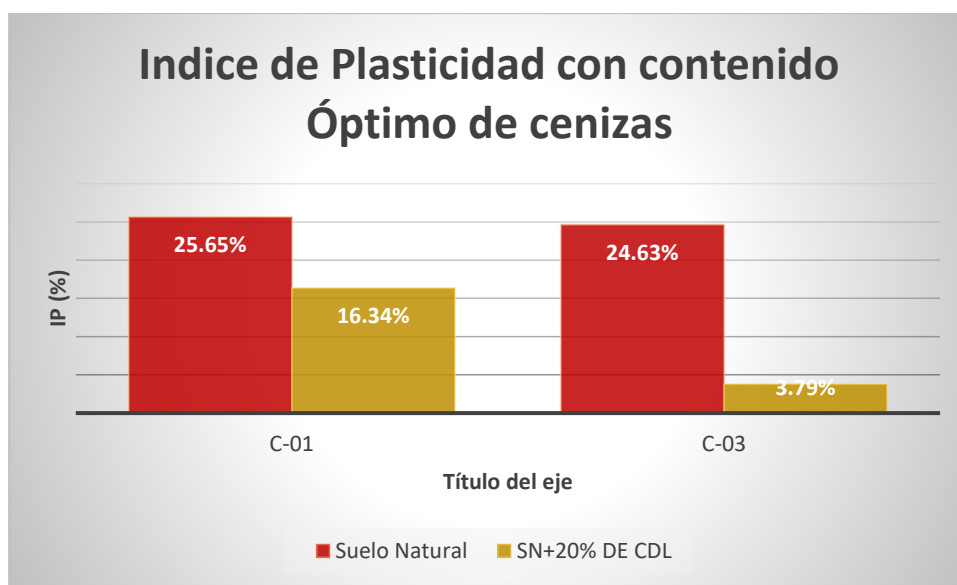


Gráfico 10: Variación de IP de Suelo Natural VS. Adición Óptima de CDL.

Metodología para el uso de CDL como agente estabilizador de suelos arcillosos

De acuerdo con las características del material que se usa para la estabilizar en suelo arcilloso en la presente investigación, el procedimiento para su uso se basa en la metodología de suelo-cemento, el cual consta de la reacción puzolánica o cementante de la ceniza con el suelo frente a los diferentes contenidos de humedad que se presenta [21]. Para obtener mejores resultados en sus propiedades de resistencia depende de la cantidad de material cementante, la edad de la mezcla compactada y el tipo de curado que se da al suelo combinado (suelo mejorado) [16], por ello en esta investigación se deja reposando en ambiente libre a los especímenes un periodo de tiempo para la

reacción de la ceniza y el suelo, y posteriormente se realiza el curado de los especímenes para evaluar la capacidad de resistencia.

Esta metodología inicia con el tratamiento del agente estabilizador para que sea usado en la mejora de las propiedades mecánicas del suelo arcilloso.

1. Tratamiento de la ceniza como aditivo

El tratamiento de las cenizas de ladrillera para ser usado como aditivo estabilizador de suelos arcillosos parte de la recolección de la ceniza después de la incineración de la materia prima en este caso la pajilla de arroz y madera de los hornos donde se realiza la cocción de ladrillos.

Posteriormente se realiza un análisis químico de estas cenizas para verificar sus propiedades, de esta manera podremos saber si el material es apto para ser tratado como material de componentes puzolánicas, en este caso el ensayo realizado a la ceniza fue de Fluorescencia de Rayos X, obteniendo así resultados positivos para el uso de estas cenizas en la investigación.

Además de ello se realiza la separación de desperdicios, con el tamizado, en este caso la ceniza presenta residuos de la quemadura de la madera, desperdicios de ladrillos rotos, piedras. Con esto, se realiza la reducción de tamaño de partícula de la ceniza, ya que la finura es la característica fundamental para la calidad de las puzolanas y así pueda cumplir con el objetivo de mejorar las propiedades del suelo, de lo contrario se comporta como un material inerte sin efectos. [28]

2. Tratamiento de la mezcla ceniza experimental con ceniza para laboratorio

El tratamiento realizado para la ceniza para los ensayos de laboratorios básicamente fueron, el ensayo químico y el análisis de sus componentes químicas para saber a qué grupo de puzolanas pertenece y verificar si funciona de manera positiva con la adición al suelo de baja capacidad de soporte. Se va a describir paso a paso el procedimiento del tratamiento de las cenizas a nivel de laboratorio:

PASO 1.

Separación de los desperdicios de la ceniza para el posterior tamizado, en este caso se utilizó la muestra tamizada por la malla N°100. Una vez obtenido el material tamizado se procede a pesar de acuerdo a los porcentajes propuestos en la



Ilustración 35: Segregación de desperdicios de la Ceniza.



Ilustración 34: Ceniza tamizada por la malla N°100.

investigación para cada ensayo a realizar. Se analizará el ensayo de CBR mediante la adición de cenizas y el proceso de curado.

PASO 2.

Combinación de suelo arcilloso con la ceniza, esto se realiza con la dosificación en peso seco con las muestras a ensayar, posteriormente se pasa a saturar la mezcla combinada para realizar la compactación, una vez comoactada la muestra se deja reposar un periodo de 24h a 48h, este proceso es un metodo de evaluacion para obtener mejores resultados en las características de la puzolana ya que se obtiene mejores resultados a edades mayores.



*Ilustración 37: Mezcla de suelo mas
Ceniza.*



Ilustración 36: Moldes fuera de la poza.

PASO 3.

Una vez transcurrido este tiempo se procede a curar la muestra durante un periodo de 48 horas para realizar el ensayo de la resistencia a la penetracion de CBR, con la finalidad de conocer el porcentaje de resistencia del suelo mejorado (muestra experimental) y compactado. Este procedimiento se realiza para completar la reacción cementante de las muestras ya que con ello se obtiene ejores resultados.



Ilustración 39: Curado de especímenes de CBR.



Ilustración 38: Penetración de CBR.

3. Uso de la ceniza para el proceso de estabilizar suelos arcillosos.

Para el uso de la ceniza de pajilla de arroz y madera en esta investigación se plantea una metodología, que parte con algunos ensayos previos a las propiedades físicas del suelo con el fin de obtener su clasificación y adicionalmente analizar su comportamiento de sus propiedades mecánicas en este caso la evaluación de la Maxima densidad seca y CBR, estos ensayos se realizan a las muestras representativas, esto sería en caso se requiera hacer el estudio mediante laboratorio, pero si se requiere analizar en campo sería mediante la prueba de densidad de campo.

1. Preparacion del suelo a estabilizar

Para la preparacion del suelo a estabilizar se tiene en cuenta sus propiedades físicas como vendrían a ser la relacion de su granulometría, la humedad que presenta o si el suelo esta seco y tambien se considera la nivelación del mismo. Este proceso comienza despues de haber roto el material de la subrasante arcillosa existente y posteriormente se retiran los materiales de mayor tamaño como las piedras grandes y el material orgánico si existiera en la vía.

Posteriormente se va a saturar el suelo para lograr la humedad óptima de compactación, teniendo en cuenta que se necesita mas agua por la accion de la ceniza en la combinacion de suelo mas ceniza para la compactacion.

2. Distribución de la ceniza de pajilla de arroz y madera

Para la distribucion de la ceniza se tiene en cuenta el porcentaje óptimo para el mejoramiento de las propiedades del suelo para que sea apto para una buena subrasante, este procedimiento se realiza despues de la saturación inicial y con el requemiento de la mano de obra necesario para llevar a cabo esta actividad.

3. Mezclado

Para la mezcla del material del suelo con la ceniza se va a requerir la maquinaria necesaria para realizar este proceso deespues de la distribución de la ceniza en el suelo, con esto se busca que la mezcla presente homogenidad para así garantizar un buen procedimiento de compactación en todo el espesor que se va a requerir, se tiene en cuenta que el material combinado en cuanto a volumen es aproximadamente 30% con respecto al suelo compactado.

4. Compactacion inicial

Este proceso comienza despues del mezclado del suelo con la ceniza y es necesario la maquinaria para compactacion; un rodillovibratorio para lograr una buena compactación con respecto al fondo de la capa de subrasante. Se tiene en cuenta que para este proceso la mezcla puede llegar a perder humedad, por ello se realiza la validación de la humedad evaluando si es necesario hacer un ajuste a la saturacion de la mezcla.

Para la compactación del suelo combiando con la ceniza, se podría hacer en capas de 5 cm hasta llegar al espesor requerido para la subrsante, y asi obtener mejor distribucion de la ceniza con el suelo.

5. Nivelacion

La nivelacion del terreno se realiza con una motoniveladora para realizar la distribución del material estabilizado osea el material mezvlado con la ceniza, en todo el largo y el ancho de la vía, en capas homogeneas y asi cumplir con los niveles requeridos mediante el estudio topográfico.

6. Compactacion final

La compactacion final se va a realizar con una compactadora lisa, se debe tener en cuenta que este procedimiento se debe realizar las veces que sean necesarias para obtener la densidad especificada del suelo compactado.

7. Curado y protección de la superficie de rodadura

El curado del suelo compactado es una parte esencial para que la mezcla complete el desarrollo de sus propiedades, con respecto a este paso, se puede aplicar una emulsion asfaltica o agua, en el caso de utilizar agua que es lo mas comun debe asegurar que la superficie del suelo compactado se mantenga con humedad. Una vez realizado todo el procedimiento se tendrá la opción de agregar la capa de rodadura definitiva de acuerdo a las necesidades transitables.

Este procedimiento ayudará que el suelo estabilizado tenga la capacidad de soportar las cargas que se va a general con el transito de vehículos, lo cual se estima con el método de la densidad de campo.

DENSIDAD DE CAMPO

La densidad de campo se ha considerado para comprobar el funcionamiento de CDL en la adición a suelos arcilloso, con ello se busca comprobar los resultados de laboratorio.

Mediante este ensayo se podrá realizar la comparación de los resultados de compactación de laboratorio versus la compactación in situ, por lo tanto, se va a proceder a comparar el grado de compactación obtenido en campo.

Conocer el grado de compactación del suelo influye en el conocimiento de su comportamiento cuando son sometidas a cargas, como por ejemplo es importante conocer y mejorar las propiedades del suelo en caso lo requiera para obtener mejores resultados en la construcción de carreteras y así optimizar su funcionamiento y alargar el tiempo de vida de las vías.

Los resultados del grado de compactación se muestran en la tabla N°32.

		I. Ubicación y/o Descripción de Prueba		
N° de prueba/N° Base		D-01	D-02	
Cono		3	3	
Placa		B	B	
II. Datos de campo y de Laboratorio				
1. Peso de frasco + arena calibrada	g	7362	7328	
1. Peso de frasco + arena que queda	g	3185	3125	
3. Peso de la arena en el cono	g	1613	1613	
4. Densidad de la arena	g/cm ³	1335	1335	
5. Volumen del material extraído	cm ³	1921	1940	
6. Peso del material+ recipiente	g	3706	3764	
7. Peso del recipiente	g	9.0	9.0	
8. Peso del material retenido 3/4"	g	667	617	
9. Peso específico de la grava	g/cm ³	2.41	2.41	
10. Volumen de la grava	cm ³	277	256	
11. Peso de Finos	g	3030	3138	
12. Volumen de finos	g	1644	1684	
13. Densidad natural Húmeda	g/cm ³	1.843	1.863	
III. Contenido de Humedad				
14. Humedad (Speedy)	(%)	13.6	13.5	
15. Densidad natural seca	g/cm ³	1.623	1.642	
IV. Resultados de Laboratorio				
16. MÁXIMA DENSIDAD SEC	g/cm ³	1.71	1.71	
17. OPTIMO CONTENIDO DE HUMEDAD (%)		12.73	12.73	
V. Resultado Final				
18. GRADO DE COMPACTACION	(%)	95	96	

Tabla 32: Resultados de la Densidad de Campo

El grado de compactación del suelo con adición obtenido en los dos puntos analizados son del 95% y 96% de la densidad del Proctor realizado en laboratorio, esto quiere decir que la funcionalidad del material estabilizante en el suelo está siendo positiva. Considerando también que el grado de compactación mínima es del 95%.

Además, se obtiene la MDS para cada punto estudiado en este caso se ha obtenido el valor de 1.71 g/cm³ para ambos puntos, con un OCH de 12.73.

F. REALIZAR EL ANÁLISIS ECONÓMICO QUE TRAE EL USO DE CENIZAS DE LADRILLERAS ARTESANALES COMO AGENTE ESTABILIZADOR.

En esta investigación se ha realizado el análisis económico que trae consigo el uso de estas cenizas, lo que forma parte de la culminación de este proyecto de investigación, este análisis tiene la finalidad de determinar el valor de esta materia como agente estabilizador.

El costo de la ceniza depende del valor que se da en las ladrilleras a este desperdicio, además de la ubicación de estos mismos para la respectiva recolección, teniendo en cuenta el periodo de fabricación de ladrillos y la cantidad de desperdicios que se genera al realizar dicha práctica, en este breve análisis se va a considerar básicamente el costo de la obtención de la ceniza dado en la ladrillera de donde se extrajo dicho material.

En la ciudad de Chachapoyas, no existe un plan de manejo de residuos que sea adecuado para los residuos generados en la producción de ladrillos, por esto mismo, algunos pobladores usan este material como abono para sus tierras de cultivo, pero en pocas cantidades, lo restante los dueños de estas ladrilleras optan por destinarlos hacia los botaderos ya que no le dan ningún otro uso en particular. Debido a esto, para esta investigación se optó por recolectar las cenizas producto de la incineración de pajilla de arroz y madera de la ladrillera CERAMICA SAC, ya que es la ladrillera más antigua y más grande en la ciudad, para analizar este material de manera química y poder utilizarlo como alternativa de aditivo estabilizador en los suelos que requieren mejoramiento de sus propiedades.

De manera práctica se decidió realizar el análisis mediante una comparación económica al valor de la estabilización de subrasante para 100 m de largo de una carretera, la cual presentará 2 carriles y que cada carril mide 3.5 m, con cal y cemento ya que son las más comunes en la estabilización química de suelos versus la estabilización de la misma subrasante con la ceniza estudiada, que está relacionada con el contenido óptimo encontrado.

Para el espesor de la subrasante de la vía se tiene en cuenta el requerimiento mínimo que es de 0.60m, de esta manera se señala que para este análisis solo vamos a considerar el costo de los insumos, sin el costo de la mano de obra, ni el costo de transporte.

Para los porcentajes analizados se ha considerado el 10% de cemento ya que este es el límite máximo donde el cemento ayuda a mejorar sus propiedades mecánicas a lo suelo arcillosos, y con respecto a la cal se ha considerado un valor de 3% ya que en este porcentaje la cal ayuda a mejorar las propiedades mecánicas del suelo. [21] se consideró el uso de estos insumos para la estabilización debido a que son recomendadas para estabilizar el tipo de suelo que se presenta en esta investigación (ver anexo).

Y los porcentajes analizados para la ceniza serán los que más mejoría nos da en este caso el de 15% y el de contenido óptimos de 20% de CDL. En la siguiente tabla se muestran los porcentajes para el análisis económico

Tabla 32: Porcentajes de agente estabilizador para el análisis económico.

PORCENTAJES DE AGENTE ESTABILIZADOR	
CENIZA DE LADRILLERA	15%
	20%
CEMENTO	10%
CAL	3%

Con los datos detallados del tramo, calculamos el volumen total de suelo a estabilizar:

Longitud de carretera: 100 metros.

Ancho de carril= 3.50 metros

Espesor de subrasante estabilizada: 0.60 metros

Volumen total de estabilización del suelo arcilloso: 420 m³.

Con respecto al análisis de costo unitario de los diferentes materiales a estabilizar, se considera su peso por m³ y el costo por m³. Este precio esta cotizado con la compra del material envasado al por menor en el mercado. Para el costo de la ceniza se realiza la cotización con el personal de la ladrillera, quienes nos brindan el material a un costo de S/. 0.20 a S/. 0.30 aproximadamente por kilo de cenizas. Con esto se va a requerir la densidad promedio de las cenizas que es de 800 kg/m³, con este dato ya podemos encontrar el costo por m³.

Material	Adición	Volumen	Cantidad en m³	PU	P. Parcial
cal	3%	420	12.6	S/ 1,969.00	S/ 24,809.40
cimento	10%		42	S/ 1,130.07	S/ 47,462.91
ceniza	15%		63	S/ 240.00	S/ 15,120.00
	20%		84	S/ 240.00	S/ 20,160.00

Tabla 33: Análisis de costos de estabilización para 100m de carretera.

Realizando el análisis de costos de los materiales podemos observar que nos saldría más económico usar las cenizas como agente estabilizador, en cuanto al tema económico se podría usar la adición de cenizas al 15% ya que también se observa mejoras de subrasante como podemos observar en la tabla 38. Pero si se requiere estrictamente un tema de mejoría para obtener una subrasante en óptimas condiciones de optará por el contenido de cenizas del 20%.

En la siguiente gráfica se muestra una comparación de los costos entre la estabilización con cal, con cemento y con ceniza. Estos datos se muestran en cuantas veces más nos cuesta estabilizar con cemento y con cal en comparación con la ceniza.

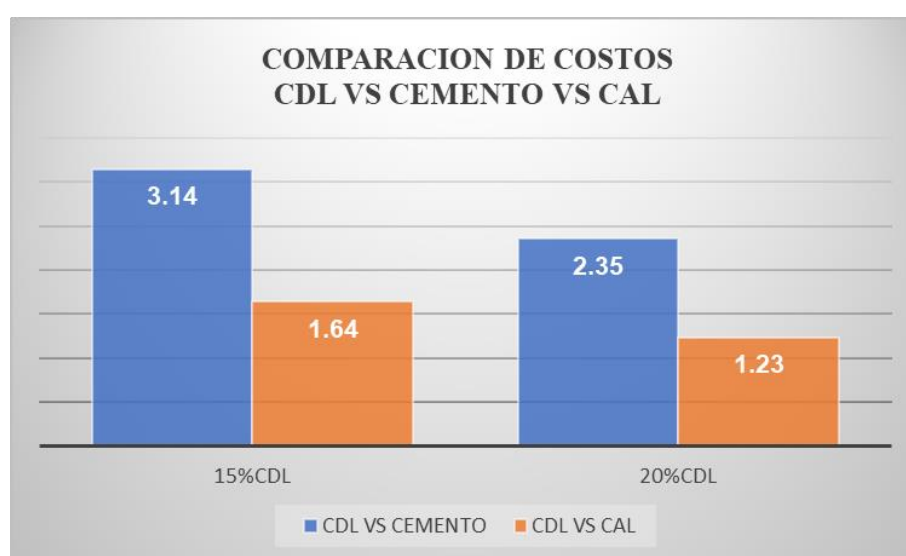


Gráfico 11: Comparación de Número de veces del agente estabilizador

Según el gráfico 11, podemos observar la diferencia económica de acuerdo al uso de la ceniza con respecto a la cal y al cemento, para la comparación de costos del contenido el 15% de CDL con respecto al cemento se puede observar que el cemento es 3.14 veces más el costo de usar al costo de la ceniza en este porcentaje, del mismo modo se analiza el costo de la cal con respecto al 15% de cenizas y se observa que la cal es 1.64 veces más costoso que usar como aditivo a las cenizas.

Del mismo modo se analiza los costos con respecto a la adición del 20% de cenizas, en comparación con el cemento se tiene que el cemento es 2.35 veces más costoso, y con respecto a la cal se tiene que esta es 1.23 veces más costoso. De este modo se concluye que el uso de las cenizas de pajilla de arroz y madera resulta más económico para el uso en la estabilización de una subrasante arcillosa, recomendable usarlo con el porcentaje óptimo según lo evaluado en esta investigación.

Discusión

Esta investigación tiene como propósito fundamental determinar el contenido ideal u óptimo de cenizas de pajilla de arroz y manera provenientes de ladrilleras artesanales (CDL), para mejorar un suelo arcilloso en la subrasante para mejorar sus propiedades mecánicas y pueda cumplir con las especificaciones del MTC para una buena subrasante. Para el cumplimiento de este objetivo se realizaron ensayos de laboratorio a las propiedades físicas y mecánicas del suelo arcilloso en estado natural y con las adiciones que corresponden al 5%, 10%, 15%, 20% y 30% de cenizas. La finalidad de estos procedimientos es obtener los parámetros de resistencia del suelo, la Máxima Densidad seca y CBR, para analizar con qué porcentaje de adición de cenizas se producen mejores resultados y con ello obtener una dosificación óptima del contenido de cenizas para estabilizar el suelo arcilloso.

Ensayo de granulometría por hidrómetro

Del ensayo hidrométrico se puede analizar en las gráficas, ya que las curvas tienden a moverse hacia la parte superior lo que indica las variaciones en la fracción fina del suelo, ya que aumenta la presencia de finos por la adición de CDL, este comportamiento se evidencia en las dos calicatas C-1 y C-3, esto quiere decir que el tamaño de partícula del suelo se mantiene ante la adición del agente estabilizador.

Ensayo de peso específico relativo a los sólidos

Del ensayo del peso específico podemos concluir que los valores suben con respecto a los valores del suelo en estado natural, es decir que a medida que se va adicionando CDL el suelo se sigue comportando como una arcilla ya que aumenta las partículas finas en sus componentes del suelo, este efecto sucede solo hasta el 15% de CDL y posteriormente los valores empiezan a decrecer ya que las partículas de CDL están tomando más volumen en la muestra haciendo que el suelo tenga una consistencia más granular parecida a las arenas, por ello podemos notar que el 20% de adición de CDL el valor se reduce a un 2.579 en la muestra de la calicata C-1 y 2.473 en la muestra de

la calicata C-3, lo que indica que va a tener un comportamiento positivo en cuanto al ensayo de resistencia, y ultimo en la adición del 30% podemos notar que el valor baja considerablemente y habiendo que los resultados de las muestras con eso se puede evidenciar que el suelo va perdiendo plasticidad a partir del 20% de la adición de CDL.

Proctor Modificado

Para este trabajo de investigación es de mucha importancia el desarrollo de este ensayo ya que con ello podemos observar y analizar la variación de las densidades de las muestras expuestas a las adiciones de CDL con respecto a las humedades optimas, ya que en ese estado un suelo logra adoptar su rigidez y nos permite evaluar y controlar la calidad de compactación que puede lograr el suelo con una humedad especificada. Según los valores obtenidos en el estudio de las calicatas C-1 y C-3, podemos observar que el las densidades bajan a medida que se adicionan los porcentajes de CDL, esto valores parte de un valor de 1.87 que pertenece al suelo en estado natural hasta el valor de 1.69 que pertenece al suelo con la adición de CDL del 15%, obteniendo un aumento para el porcentaje del 20% de CDL, y para el 30% vuelve a disminuir esto en la calicata 1, mientras que para la calicata C-3, podemos observar el mismo comportamiento pero con diferentes valores que parten de 1.94 hasta un valor de 1.49 que pertenece al contenido del 15%, y para el valor del 20% del contenido de CDL el valor vuelve a crecer con 1.71, por lo tanto en el porcentaje del 30% el valor vuelve a disminuir. Este comportamiento de las densidades tiene por efecto el aumento en cuanto al contenido de humedad en cada adición, ya que las cenizas tienen características absorbentes y es por esta razón que el suelo combinada va a requerir mas agua para llegar a su máxima densidad seca, lo que indica que las adiciones intervienen en la densidad de las muestras ya que a mayor contenido de CDL las densidades van a ser menores, ya que las cenizas en general tienen una densidad baja ya que a mayor cantidad de cenizas el volumen también aumenta significativamente.

En la investigación de López Barbaran [18], se puede observar y comparar la coincidencia del comportamiento de las densidades, ya que en este proyecto se realizó la estabilización con cenizas de cascara de arroz , obteniendo menores densidades

cuando existen mayor presencia de cenizas, y en sus resultados de resistencia obtiene mejores resultados al 15% de cenizas CCA. Mientras que Oliveros Murga [6] en su investigación el comportamiento de las densidades tiene a aumentar a medida que se agrega las cenizas.

Del mismo modo se analiza el OCH, como se menciona anteriormente que esto va a depender del porcentaje de cenizas CDL se agrega a las muestras ya que las cenizas son materiales de características cementicias las cuales tienen a ser más absorbentes es por ello por lo que las muestras con más porcentaje de cenizas son las que tienen un porcentaje de humedad óptimas más alto variando de 13.52% a 21.98% para la calicata C-1 y de 13.03 a 17.73% para la calicata C-3.

Ensayo de CBR

El ensayo de CBR se realiza para evaluar la capacidad de resistencia de un suelo frente a una carga expuesta, después de 96 horas de curado a las muestras experimentales, con el fin de identificar la validez del suelo que requiere ser usado como subrasante. Los parámetros más importantes evaluados en este caso fueron la MDS y su valor de resistencia a la penetración del CBR.

El análisis comienza desde la evaluación de resistencia al suelo natural los cuales tiene valores bajos, que oscilan entre el 2% y 4%, lo cual según los requerimientos del MTC son suelo no aptos para ser usados como subrasante y que necesitan ser mejorados mediante diferentes métodos, en esta investigación se realizó mediante la adición de CDL, en esta experimentación se parte con el conocimiento de las características de las ceniza lo cual nos permite conocer los beneficios que traerá al ser adicionada.

El suelo presenta mejorías a partir de la adición del 5% de CDL en ambas calicatas presentado un aumento similar en ambas calicatas, este resultado favorable se presenta hasta el 20% de contenido de CDL, obteniendo valores entre 28% al 95% de la MDS para la calicata C-1 y un valor de 28% al 95% de la MDS para la calicata C-3. De este modo podemos concluir que la subrasante mejora a medida que se adiciona la ceniza CDL, obteniendo según los requerimientos del MTC, una subrasante entre buena y excelente.

Asimismo, la tendencia es la incrementación del valor de la capacidad de resistencia del suelo hasta un 20% lo que se concluye que este porcentaje es el contenido óptimo en ambas calicatas, de este modo se buscó comprobar con el IP de ambas muestras

teniendo así una reducción de este valor, lo que quiere decir que la plasticidad del suelo reduce significativamente lo que permite un mejor comportamiento del suelo.

Estos resultados resultan coincidir con la investigación de Adco Calsin, el cual obtuvo mejorías al 20% de cenizas de madera que provienen de las ladrilleras artesanales y de la misma manera una reducción al 25% del contenido de cenizas, lo que concluye también que el contenido óptimo es el 20%.

Por lo tanto, de esta investigación se ha comprobado el comportamiento de suelo arcilloso en los diferentes porcentajes de CDL, obteniendo resultados que pueden ser aceptables para una buena y excelente subrasante, es por ello que se puede comprobar y aceptar la hipótesis: **“Mediante el empleo de cenizas de pajilla de arroz y madera provenientes de ladrilleras artesanales, se mejorarán las propiedades mecánicas de los suelos arcillosos en subrasantes, obteniendo valores de CBR adecuados según el MTC para que una subrasante sea apta para una carretera”**.

Conclusiones

- En el presente estudio se concluye que las características físicas del suelo estudiado al ser arcillas de alta plasticidad, CL por SUCS y por AASHTO A(14), son suelos de baja resistencia a la humedad, y con el análisis de sus propiedades mecánicas se obtuvieron los resultados que requieren mejoramiento, para que este cumpla con los parámetros de resistencia para ser usado como una subrasante de buena calidad.
- Con la estabilización de este tipo de suelo se concluye que mientras más contenido de ceniza se tenga el volumen de este suelo aumenta debido a que la densidad de la ceniza es relativamente baja por lo que ocupa más espacio, con esto la presencia de cenizas varía las propiedades físicas del suelo convirtiéndolo con un suelo más granular con plasticidad baja, por ende cambia la clasificación de suelos, de un suelo malo pasa a un suelo considerablemente bueno con respecto a sus propiedades físicas y mecánicas.
- Con los resultados del análisis químico de las cenizas se concluye que su actividad puzolánica depende principalmente su alto contenido de Silice, Aluminio y Hierro, en este caso el valor es de 81.26%, lo que lo hace apto para ser utilizado como aditivo para la estabilización de suelos.
- Los valores de CBR, aumentan de manera progresiva hasta el contenido de 20% de CDL, lo que hace que este sea el valor óptimo de porcentaje de adición para un mejoramiento de subrasante arcillosa, adicionalmente cabe señalar que la MDS para este porcentaje de ceniza es de 1.70 al 95% con un OCH de 14.40%, para la calicata 1 y para la calicata 3 tenemos una MDS al 95% de 1.71 con un OCH de 12.63%, el cumplimiento demuestra que el análisis realizado en esta investigación resulta ser positiva para el uso de estas cenizas como agente estabilizador para el tipo de suelo que se presenta, por lo que se recomienda considerar la aplicación de este material en la estabilización de suelos.
- Se concluye que la adición de CDL a material arcilloso funciona como agente estabilizador y así mismo se considera que resulta ser más económico con respecto a los estabilizadores convencionales que vendría ser la cal y el cemento, considerando que estabilizar con cal cuenta aproximadamente entre 1.23 y 1.64 veces más que la

estabilización con CDL, mientras que usar el cemento en este proceso cuesta entre 2.35 y 3.14 veces más que la estabilización con CDL.

- Con los datos obtenidos con el desarrollo de la densidad in-situ se comprueba los resultados de laboratorio, obteniendo el grado de compactación de 95% y 96% para la MDS de 1.71 y un OCH de 12.73% para la combinación óptima de 20% de CDL.

Recomendaciones

- Como recomendación de esta investigación se podría sugerir la continuación de esta investigación realizando los ensayos de corte directo, el índice de expansión del suelo y consolidación unidimensional, esto con el propósito de obtener los parámetros de cohesión del suelo y el ángulo de fricción interna.
- Se recomienda considerar el uso de las cenizas CDL en el mejoramiento de subrasante arcillosa ya que mediante esta investigación se comprueba su buena funcionalidad y se facilita un análisis económico del uso de esta ceniza.
- Se recomienda realizar los ensayos correspondientes al estudio con los equipos calibrados para obtener resultados confiables y reales.

Referencias

- [1] A. C. O. Elmer, «"Estabilización de subrasante en suelos arcillosos empleando cenizas de madera proveniente de las ladrilleras artesanales",» Puno, 2022.
- [2] MTC, «Desarrollo de infraestructurá reactivará la economía en las regiones,» *EL PERUANO*, 2023.
- [3] MTC, Manual de Diseño de carreteras no pavimentadas de bajo volumen de transito, Lima-Perú, 2008.
- [4] A. S. H. Adanaqué, «"Comparación de la ceniza de cascarilla de arroz frente al oxido de calcio como estabilizante químico para mejorar La Sub-Rasante En La Av. Gustavo Mohme [Progresiva Km 0+654.19 –Km 1+654.19] Distrito Veintiséis de Octubre-Piura-Piura, 2018",» Piura, 2019.
- [5] L. B. Junior, «Estabilización de suelos arcillosos aplicando ceniza de cáscara de arroz para el mejoramiento de subrasante, en la localidad de Moyobamba – departamento de San Martín,» Universidad de Ciencias Aplicadas (UPC), Lima, 2021.
- [6] O. M. C. Rubén, «Análisis de las propiedades mecánicas del suelo arcilloso con ceniza de fondo de ladrilleras en la carretera Acovichay - Huaraz 2020,» HUARAZ, 2020.
- [7] A. C. O. Elmer, «"Estabilización de subrasante en suelos arcillosos empleando cenizas de madera proveniente de las ladrilleras artesanales, Puno 2022,» Puno, 2022.
- [8] N. Nahar, Alex Otieno Owino, Sayful Kabir Khan, 3Zakaria Hossain y Noma Tamaki, «Effects of controlled burn rice husk ash on the geotechnical properties of soil,» *Journal of Agricultural Engineering 2021*, vol. LII, nº 1216, 2021.
- [9] J. Jayashree y V. Jeevanantham, «Experimental Study on Strength Characteristics of Fly Ash,» *Materials Research Proceeding*, vol. 23, pp. 122-127, 2022.
- [10] J. Badillo y R. Rodriguez, «Mecánica de suelos,» *Fundamentos de la mecánica de suelos*, vol. TOMO I, 2005.
- [11] NORMA CE.020, «Suelos y taludes,» 2016.
- [12] G. D. Escobar, «Geomecánica para Ingenieros,» Colombia, 2016.
- [13] MTC, Dirección General de Caminos y Ferrocarriles, «Manual de diseño de carreteras no pavimentadas de bajo volumen de tránsito,» Lima-Perú, 2008.

- [14] D. Escobar y Escobar Potes, «Mecánica de Suelos,» Universidad Nacional de Colombia, 2002.
- [15] A. Apolinario, «“Estabilización de suelos arcillosos con bajos valores de soporte (CBR), con fines de mejoramiento de la subrasante”,» Huanuco, 2019.
- [16] MTC, Manual de carreteras, suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos, Lima, 2014.
- [17] L. B. Junior, «Estabilización de suelos arcillosos aplicando ceniza de cáscara de arroz para el mejoramiento de subrasante, en la localidad de Moyobamba – departamento de San Martín,» Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas (UPC), LIMA, 2022.
- [18] T. Gómez, J. D. S. Angarita, D. S. Chicaiza y J. C. Velásquez, «Cuantificación de la eficiencia de la cascarilla de arroz como adsorbente de hidrocarburos con simulación de Caudal,» *Gestión, Calidad y Desarrollo en las facultades de ingeniería*, pp. 18-21, 2018.
- [19] O. Elmer, «“Estabilización de subrasante en suelos arcillosos empleando cenizas de madera proveniente de las ladrilleras artesanales”,» UCV, PUNO, 2022.
- [20] ASTM C618-19, «Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete,» USA, 2020.
- [21] J. F. Rivera, A. Aguirre Guerrero y A. O. Mejía de Gutierrez, «Estabilización química de suelos-Materiales convencionales y activados alcalinamente,» *Informe Técnico*, 2020.
- [22] MTC, «Manual de ensayos de materiales,» mayo 2016.
- [23] Ministerio de Transportes y Comunicaciones, «Manual de Ensayos de Materiales,» Lima, 2016.
- [24] W. A. B. Diaz, «Manual de procedimiento de ensayos de suelos y memoria de cálculo,» Universidad Militar Nueva Granada, Bogotá, 2015.
- [25] G. D. Escobar y C. E. Escobar, «Geomecánica,» UNC, Colombia, 2016.
- [26] M. Borja, Metodología de la investigación científica para Ingenieros, Chiclayo, 2016.
- [27] A. Caballero Romero, «Metodología integral innovadora para planes y tesis,» Mexico, CENGAGE Learning, 2014, pp. 39-42.
- [28] Juan S., ESTUDIO DE LAS CENIZAS DE FONDO DE CALDERA DE BAGAZO Y/O CARBÓN COMO SUSTITUTO DEL CLINKER Y/O ADICIÓN PARA MORTERO POR MEDIO DE TRATAMIENTO QUÍMICO ALCALINO., Santiago de Cali: Ingeniería de Materiales, 2014.
- [29] Universidad Tecnológica de Chile, «Propiedades Índices de los Suelos,» Santiago de

Chile.

[30] Ministerio de Construcción y Saneamiento, *Norma, CE.020: Suelos y Taludes*, sencico, Lima, 2010.