

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



**Análisis de propiedades físicas y mecánicas en suelos limo-arcillosos  
adicionando porcentajes de cenizas de Schoenoplectus californicus**

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

**AUTOR**

**Flavio Andre Fernandez Bernal**

**ASESOR**

**Juan Merino Roncero**

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

**Chiclayo, 2024**

**Análisis de propiedades físicas y mecánicas en suelos limo-arcillosos  
adicionando porcentajes de cenizas de *Schoenoplectus californicus***

PRESENTADA POR

**Flavio Andre Fernandez Bernal**

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

**INGENIERO CIVIL**

APROBADA POR

**Ronald Esteban Villanueva Maguiña**

PRESIDENTE

**Angel Lorren Palomino**

SECRETARIO

**Juan Merino Roncero**

VOCAL

## **Dedicatoria**

A mi familia, por nunca dejarme caer y estar al pendiente de mi proyecto de vida.

A mis padres Fátima y Jimmy, por brindarme su apoyo y soporte en los momentos más difíciles de esta travesía, quedó totalmente agradecido

A mis hermanas, Melisa y Abigail, por ser mi motivo de seguir adelante y mejorar día a día

## **Agradecimientos**

A Dios, por brindarme salud, fortaleza y sabiduría, para sacar adelante este proyecto personal

A mis compañeros de clases, por brindarme los mejores recuerdos de vida universitaria

A mis docentes de la carrera, por brindarme sus consejos y conocimientos.

A mi asesor, por su dedicación, consejos, motivación y brindarme sus conocimientos, para lograr realizar esta investigación de la mejor manera posible

## INFORME TESIS 2

### INFORME DE ORIGINALIDAD

<b>23%</b> INDICE DE SIMILITUD	<b>23%</b> FUENTES DE INTERNET	<b>6%</b> PUBLICACIONES	<b>10%</b> TRABAJOS DEL ESTUDIANTE
-----------------------------------	-----------------------------------	----------------------------	---------------------------------------

### FUENTES PRIMARIAS

<b>1</b>	<b>hdl.handle.net</b> Fuente de Internet	<b>7%</b>
<b>2</b>	<b>repositorio.ucv.edu.pe</b> Fuente de Internet	<b>4%</b>
<b>3</b>	<b>repositorioacademico.upc.edu.pe</b> Fuente de Internet	<b>1%</b>
<b>4</b>	<b>tesis.usat.edu.pe</b> Fuente de Internet	<b>1%</b>
<b>5</b>	<b>www.grafiati.com</b> Fuente de Internet	<b>1%</b>
<b>6</b>	<b>Submitted to Universidad Cesar Vallejo</b> Trabajo del estudiante	<b>1%</b>
<b>7</b>	<b>repositorio.usanpedro.edu.pe</b> Fuente de Internet	<b>1%</b>
<b>8</b>	<b>repositorio.uss.edu.pe</b> Fuente de Internet	<b>&lt;1%</b>
<b>9</b>	<b>Submitted to Universidad Continental</b> Trabajo del estudiante	<b>&lt;1%</b>

## Índice

RESUMEN.....	13
ABSTRACT .....	14
INTRODUCCIÓN .....	15
REVISIÓN DE LA LITERATURA .....	20
ANTECEDENTES.....	20
BASES LEGALES.....	26
BASES TEÓRICAS.....	29
SUELOS ARCILLOSOS .....	29
ESTABILIZACIÓN DE SUELOS .....	29
ESTABILIZACIÓN QUÍMICA.....	29
TOTORA.....	29
CAPACIDAD PORTANTE.....	29
ENSAYOS DE LABORATORIO .....	33
CLASIFICACIÓN AASHTO .....	39
CLASIFICACIÓN SUCS.....	41
SUBRASANTE.....	43
TIPOS DE ESTABILIZACIÓN .....	44
CENIZAS DE TOTORA:.....	45
DEFINICIÓN DE TÉRMINOS.....	46
MATERIALES Y METODOS .....	47
TIPO DE ESTUDIO .....	47
POBLACIÓN Y MUESTRA Y MUESTREO .....	48
POBLACIÓN .....	48
MUESTRA .....	48
MUESTREO DE ESTUDIO .....	49
HIPOTESÍS.....	51
VARIABLES Y OPERACIONALIZACIÓN.....	51

VARIABLES.....	51
CUADRO DE OPERACIONALIZACIÓN .....	52
TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS .....	53
PROCEDIMIENTO .....	54
EJECUCIÓN DE CALICATAS .....	54
ENSAYO DE CONTENIDO DE HUMEDAD .....	61
ENSAYO DE ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR TAMIZADO .....	62
ENSAYO DE LÍMITE LÍQUIDO .....	63
ENSAYO DE LÍMITE PLÁSTICO E ÍNDICE DE PLASTICIDAD .....	64
ENSAYO DE PROCTOR MODIFICADO .....	65
ENSAYO DE RELACIÓN DE SOPORTE DE CALIFORNIA (CBR).....	66
ENSAYO DE ANÁLISIS QUÍMICO POR FLUORESCENCIA DE RAYOS X PARA CENIZAS DE TOTORA 67	
PROCESO DE OBTENCIÓN DE CENIZA DE TOTORA .....	68
ELABORACIÓN DE MUESTRAS EXPERIMENTALES .....	71
PROCEDIMIENTO DE ESTABILIZACIÓN IN SITU CON CENIZAS DE TOTORA EN SUELOS ARCILLOSOS .....	74
RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	75
RESULTADOS.....	75
CARACTERIZACIÓN DE MUESTRAS NATURALES EXTRAIDAS DE CALICATAS.....	75
CLASIFICACIÓN DE SUELO DE MUESTRAS NATURALES.....	78
CLASIFICACIÓN DE CENIZAS DE TOTORA .....	82
ENSAYOS EN MUESTRAS EXPERIMENTALES: SUELO NATURAL + CDT (%).....	83
DISCUSIÓN DE RESULTADOS .....	98
Comparativa entre las muestras de suelo patrón y experimentales.....	102
Comparativa con Antecedentes.....	103
ANÁLISIS ECONÓMICO .....	105
COCLUSIONES .....	111
RECOMENDACIONES .....	112
REFERENCIAS .....	113
ANEXOS.....	118

## Lista de tablas

Tabla N° 1: Caracterización de suelo según índice de plasticidad. ....	31
Tabla N° 2 : Tamices para ensayo granulométrico. Fuente: Manual MTC.....	34
Tabla N.º 3 : Factores según el número de golpes para determinar el límite líquido. Fuente: Manual MTC .....	35
Tabla N° 4:Clasificación de suelos según normativa AASHTO M 145 [22].....	40
Tabla N° 5: Categoría de subrasante [22].....	43
Tabla N° 6: Categoría de subrasante [24].....	43
Tabla N° 7: Composición química de la ceniza de totora. Fuente: Propia.....	45
Tabla N° 8: Requisitos químicas para clasificación de puzolanas. Fuente: ASTM-C618-19 [28]. ....	45
Tabla N° 9: Número de puntos de exploración según CE.010 Pavimentos Urbanos [24]. ....	49
Tabla N° 10: Muestreo. Fuente: Propia .....	50
Tabla N° 11 : Variables de operacionalización. Fuente: Propia .....	51
Tabla N° 12: Tabla de operacionalización de variables. Fuente: Propia.....	52
Tabla N° 13: Técnicas e instrumentos de recolección de datos. Fuente: Propia. ....	53
Tabla N° 14:Distribución de calicatas. Fuente : Google Earth.....	55
Tabla N° 15: Mediciones de temperatura en horno. Fuente: Propia .....	70
Tabla N° 16: Contenido de humedad en muestras naturales. Fuente: Propia.....	75
Tabla N° 17: Contenido de humedad en muestras naturales. Fuente: Propia.....	76
Tabla N° 18: Límites de consistencia. Fuente: Propia.....	77
Tabla N° 19: Clasificación de plasticidad según IP. Fuente: MTC.....	77
Tabla N° 20: Clasificación AASHTO Y SUCS. Fuente: Propia.....	78
Tabla N° 21: Proctor modificado muestras Naturales. Fuente: Propia.....	78
Tabla N° 22:CBR de muestras naturales . Fuente: Propia.....	79
Tabla N° 23: Composición Química de CDT. Fuente: Propia .....	82
Tabla N° 24: Requisitos químicas para clasificación de puzolanas. Fuente: ASTM-C618-19 [28]. ....	82

Tabla N° 25: Límites de consistencia de muestras experimentales. Fuente: Propia .....	83
Tabla N° 26: Límites de consistencia de muestras experimentales. Fuente: Propia .....	84
Tabla N° 27: Límites de consistencia de muestras experimentales. Fuente: Propia .....	85
Tabla N° 28: Datos obtenidos del ensayo Proctor de muestras experimentales. Fuente: Propia .....	86
Tabla N° 29: Datos obtenidos del ensayo Proctor de muestras experimentales. Fuente: Propia .....	87
Tabla N° 30: Datos obtenidos del ensayo Proctor de muestras experimentales. Fuente: Propia .....	88
Tabla N° 31: Datos obtenidos del ensayo de CBR de muestras experimentales. Fuente: Propia .....	89
Tabla N° 32: Datos obtenidos del ensayo de CBR de muestras experimentales. Fuente: Propia .....	92
Tabla N° 33: Datos obtenidos del ensayo de CBR de muestras experimentales. Fuente: Propia .....	95
Tabla N° 34 Resultados de ensayos en muestras naturales .....	98
Tabla N° 35 Resultados de muestras experimentales en C-1 .....	98
Tabla N° 36 Resultados de muestras experimentales para C-2 .....	100
Tabla N° 37 Resultados de muestras experimentales en C-3 .....	101
Tabla N° 38 Resultados de muestras patrón y experimentales.....	102
Tabla N° 39 Análisis de precio unitario para estabilización con cemento .....	106
Tabla N° 40 Análisis de precios unitarios para estabilización con Cal .....	107
Tabla N° 41: Análisis de precios unitarios de estabilización con Ceniza de Totora .....	108

## Lista de Figuras

Figura N.º 1: Límites de Atterberg [21]. .....	31
Figura N.º 2: Curva para calcular índice de CBR. Fuente: Manual MTC .....	38
Figura N.º 3: Signos convencionales para perfil de calicatas [22]. .....	39
Figura N.º 4: Signos convencionales para perfil de calicatas [22]. .....	41
Figura N.º 5: Clasificación de suelos según SUCS [21]. .....	42
Figura N.º 6: Tipos de suelos de la ciudad de Ferreñafe. Fuente: INDECI .....	48
Figura N.º 7 Área de zona de estudio. ....	49
Figura N.º 8: Distribución de calicatas. Fuente : Google Earth. ....	55
Figura N.º 9: Calicata C-1. Fuente: Propia. ....	56
Figura N.º 10: Calicata C-2. Fuente: Propia. ....	56
Figura N.º 11: Calicata C-3. Fuente: Propia. ....	57
Figura N.º 12: Perfil estratigráfico Calicata C-1. Fuente: Propia. ....	58
Figura N.º 13: Perfil estratigráfico Calicata C-2. Fuente: Propia. ....	59
Figura N.º 14: Perfil estratigráfico Calicata C-3. Fuente: Propia. ....	60
Figura N.º 15: Ensayo de Contenido de Humedad. Fuente: Propia. ....	61
Figura N.º 16: Ensayo de Granulometría, tamizado. Fuente: Propia. ....	62
Figura N.º 17: Ensayo de Granulometría, peso de muestra retenida. Fuente: Propia. ....	62
Figura N.º 18: Ensayo de Límite líquido. Fuente: Propia. ....	63
Figura N.º 19: Ensayo de Límite plástico. Fuente: Propia. ....	64
Figura N.º 20: Ensayo de Proctor modificado. Fuente: Propia. ....	65
Figura N.º 21: Ensayo de CBR. Fuente: Propia. ....	66
Figura N.º 22: Espectrómetro de rayos X. Fuente: Propia. ....	67
Figura N.º 23: Horno de mampostería. Fuente: Propia. ....	68
Figura N.º 24: Titora calcinada. Fuente: Propia .....	69
Figura N.º 25: Medición de temperatura en horno. Fuente: Propia .....	69

Figura N° 26: Muestra de ceniza de Totora. Fuente: Propia .....	70
Figura N° 27: Cuantificación de adición para calicatas. Fuente: Propia .....	73
Figura N° 28: Adición de ceniza de totora a Suelo natural. Fuente: Propia.....	73
Figura N° 29: Contenido de humedad en muestras naturales. Fuente: Propia .....	75

## Lista de Gráficas

Gráfica N° 1 Proceso de demostración de hipótesis. Fuente: Propia .....	51
Gráfica N° 2: Análisis granulométrico de calicatas. Fuente: Propia .....	76
Gráfica N° 3: Límites de consistencia de calicatas. Fuente: Propia .....	77
Gráfica N° 4: Curva de compactación de muestras naturales. Fuente: Propia .....	79
Gráfica N° 5: Curva de carga – penetración a los 55 golpes. Fuente: Propia .....	80
Gráfica N° 6: Curva de carga – penetración a los 26 golpes. Fuente: Propia .....	81
Gráfica N° 7: Curva de carga – penetración a los 26 golpes. Fuente: Propia .....	81
Gráfica N° 8:límites de consistencia de muestras experimentales. Fuente: Propia.....	84
Gráfica N° 9:límites de consistencia de muestras experimentales. Fuente: Propia.....	85
Gráfica N° 10:límites de consistencia de muestras experimentales. Fuente: Propia.....	86
Gráfica N° 11: Curvas de compactación de muestras experimentales. Fuente: Propia.....	87
Gráfica N° 12: Curvas de compactación de muestras experimentales. Fuente: Propia.....	88
Gráfica N° 13: Curvas de compactación de muestras experimentales. Fuente: Propia.....	89
Gráfica N° 14: Curvas de carga – penetración de muestras experimentales a 55 golpes. Fuente: Propia .....	90
Gráfica N° 15: Curvas de carga – penetración de muestras experimentales a 26 golpes. Fuente: Propia .....	90
Gráfica N° 16: Curvas de carga – penetración de muestras experimentales a 12 golpes. Fuente: Propia .....	91
Gráfica N° 17: Curvas de carga – penetración de muestras experimentales a 55 golpes. Fuente: Propia .....	92
Gráfica N° 18: Curvas de carga – penetración de muestras experimentales a 26 golpes. Fuente: Propia .....	93
Gráfica N° 19: Curvas de carga – penetración de muestras experimentales a 12 golpes. Fuente: Propia .....	94
Gráfica N° 20: Curvas de carga – penetración de muestras experimentales a 55 golpes. Fuente: Propia .....	95
Gráfica N° 21: Curvas de carga – penetración de muestras experimentales a 26 golpes. Fuente: Propia .....	96

Gráfica N° 22: Curvas de carga – penetración de muestras experimentales a 26 golpes. Fuente:  
Propia. .... 97

## RESUMEN

La Presente investigación tiene la finalidad de analizar cómo influye la adición de ceniza de totora en las muestras de subrasante arcillosa. Para el desarrollo de la investigación, se realizó el procedimiento correspondiente que nos indica el manual de ensayos brindado por el MTC, el cual comienza con la realización de calicatas, caracterización de las muestras y ensayos de laboratorio, para obtener datos como el porcentaje de humedad, índice de plasticidad, óptimo contenido de humedad, máxima densidad seca y el índice de CBR, para lo cual se adiciono ceniza de totora en porcentajes de 2,4,6,8 y 10 %. En esta investigación experimental se determinó que el porcentaje óptimo de adición de ceniza de totora es del 8%, en la cual se presenta el mejor aumento del CBR hasta 3 veces su valor inicial de la muestra patrón en los tres puntos de muestreo realizados. Además, se determinó que a mayor aumento de porcentaje de ceniza el Límite líquido, el óptimo contenido de humedad e índice de plasticidad disminuyen, a diferencia de la máxima densidad seca que aumenta a mayor porcentaje de ceniza de Totora, convirtiendo así a una subrasante pobre de categoría S1 a una de categoría S3, siendo esta una subrasante buena.

**Palabras Clave:** Mejoramiento de Subrasante, Suelos Arcillosos, Ceniza de Totora, CBR

## ABSTRACT

The present investigation has the purpose of analyzing how the addition of reed ash influences the samples of clayey subgrade. In order to develop the investigation, the corresponding procedure indicated in the test manual provided by the MTC was carried out, which begins with the realization of test pits, characterization of the samples and laboratory tests, to obtain data such as the percentage of humidity, plasticity index, optimal moisture content, maximum dry density and the CBR index, for which reed ash was added in percentages of 2,4,6,8 and 10%. In this experimental investigation, it was determined that the optimum percentage of reed ash addition is 8%, in which the best increase in CBR is presented up to 3 times its initial value of the standard sample in the three sampling points carried out. In addition, it was determined that the higher the ash percentage increase, the liquid limit, the optimum moisture content and plasticity index decrease, unlike the maximum dry density that increases with a higher percentage of Totorá ash, thus making it a poor subgrade. from category S1 to one of category S3, this being a good subgrade.

**Keywords:** Subgrade improvement, Clay soils, Cattail ash, CBR

## **Análisis de propiedades físicas y mecánicas en suelos limo-arcillosos adicionando porcentajes de cenizas de *Schoenoplectus californicus***

### **INTRODUCCIÓN**

En la actualidad, la alta demanda de uso de agregados en la construcción provenientes del suelo o canteras está siendo explotada drásticamente, generando un agotamiento de recursos y daños de ecosistemas naturales. Esto se debe a que, no se busca la opción a reemplazo para el material granular. Por lo cual, este problema ha despertado la necesidad de buscar un reemplazo de materiales dando pie a que cada vez se realicen más estudios e investigaciones para lograr un desarrollo sostenible, proponiendo emplear residuos de materiales, materiales nuevos y adiciones como opción de reemplazo a los convencionales. Además, debido al crecimiento de la población, la construcción de vías ha ido incrementando, lo cual ha generado que se realicen vías en diversos tipos de suelos con diferente comportamiento mecánico como los suelos arcillosos, los cuales presentan un tipo de comportamiento expansivo y deficiente capacidad de carga, por lo que se empezó a tomar mayor importancia en este tipo de suelos, debido a los efectos estructurales negativos producidos por el comportamiento geotécnico que presentaba este tipo de suelo [1]. Según Landa y Torres, las arcillas está compuesta por un grupo de minerales, básicamente de caolinita, illita y montmorillonita, las cuales su composición es de forma tetraédrica y octaédrica, de las cuales la que presenta mayor inestabilidad es la montmorillonita y esto se debe a la frágil unión de la capa alumínica con la sílice, las cuales son causante de la filtración del agua en la matriz y de la inestabilidad volumétrica del suelo [2]. Además, los suelos pobres o conformado por arcillas, son depósitos minerales los cuales están compuestos por silicatos de aluminio hidratado que por lo general se caracterizan por la presencia de granos muy finos, los cuales no son aptos para apoyar la cimentación de edificaciones y obras en general [3]. Es por ello, que se realiza el mejoramiento del terreno o estabilizaciones de suelos utilizando materiales de préstamo y en otros casos estabilizadores para mejorar sus propiedades mecánicas y físicas.

Según, la Norma CE0.20, algunos de los materiales empleados y normados como agentes estabilizadores son la cal y el cemento, debido a que al mezclarse con el suelo reduce su plasticidad y mejora sus propiedades mecánicas respectivamente resultando ser una alternativa sumamente viable para el uso de estabilizaciones, por lo cual son las técnicas más empleadas en el medio [1]. Sin embargo, el proceso de fabricación tanto de la cal como el cemento son sumamente contaminantes, ya que emiten gases como el  $\text{CO}_2$  al medio ambiente durante el

proceso de combustión de la caliza, lo cual produce el efecto invernadero. Es por ello se buscan opciones para el reemplazo de estos. No obstante, para comprender el comportamiento del suelo con algún agente estabilizador es necesario conocer ciertas características físicas, mecánicas y composición química del suelo y del agente estabilizador lo cual se obtienen mediante técnicas o ensayos in situ de reconocimiento y laboratorio.

Cabe recalcar que, Ferreñafe, antiguamente estaba conformada por numerosos drenes, los cuales movidos de su cauce, para poder realizar la construcción de viviendas y calles. Así mismo, predominaban las zonas agrícolas y ganaderas, lo que originó la conformación de una capa de material limoso y arcilloso en la superficie, material de basura orgánica, raíces de vegetación, material orgánico y presencia de acuíferos. Además, es una ciudad con un clima temperado, las temporadas de lluvia generalmente se presentan durante el periodo de verano que corresponde a los meses de enero a marzo aproximadamente, su actividad económica principal actualmente es la agricultura, comercio y ganadería. Sin embargo, el sector agrícola y ganadero no cuenta con las vías de acceso para realizar el comercio adecuado. Según INDECI, durante el fenómeno del niño de 1997, las viviendas, puentes y trochas carrozables que eran vías de acceso y comunicación con el departamento de Lambayeque y carretera a Olmos colapsaron y fueron obstruidas en su totalidad debido a la precipitación que fue ocho veces mayor a la anual, aumento de la plasticidad, expansión del suelo e inundación de estas, fueron 25 000 metros de trocha correspondiendo 10 000 a la trocha de Ferreñafe – Punto 4, la cual actualmente se encuentra asfaltada y 15 000 metros a la Laquipampa-Incahuasi, que se encuentra en proyecto de asfaltación y conecta el centro de la ciudad a la serranía Ferreñafana [4]. Es por ello, que el mejoramiento de suelos en la zona rural juega un rol importante en el desarrollo cultural, tecnológico, social y sobre todo económico, ya que estos son los que brindarán la mejora de la capacidad portante para edificar sus viviendas y acceso al intercambio de materia prima y productos de primera necesidad.

Así mismo, En el País, contamos con normas técnicas que definen los procesos y requisitos mínimos para los diversos tipos de estabilización ya sea de tipo física, mediante la compactación o mediante agente químicos como la inclusión de asfalto, cal y cemento, este conjunto de requerimientos y procedimientos que se usan con el propósito de optimizar las propiedades mecánicas de los suelos como la resistencia, permeabilidad, compresibilidad, durabilidad y estabilidad volumétrica, para evitar posibles fallas estructurales a futuro. Sin embargo, las técnicas que nos brindan son de alto costo debido a que se realizan con materiales producido en fábrica [5]. No obstante, en algunos países para mitigar las propiedades negativas de la arcilla se han investigado diferentes técnicas y métodos, implementándose la inclusión de

cenizas volantes, cenizas calcinadas, desperdicios de acero, geotextiles, polímeros sintéticos, etc. Una de las opciones que están implementando recientemente para mejorar el comportamiento de subrasantes, muros en base de tierra reforzada, elaboración de ladrillos, adoquines, cenizas de agentes estabilizadores y es uno de los materiales de construcción que no es aprovechado en su totalidad, quizás porque no se conoce de sus bondades, es la Totora, esta planta de raíz acuática crece principalmente en lagos y humedales, se puede apreciar en drenes y lagos, como lo es el Titicaca, en el cual hay una población conocida como los Uros los cuales emplean la totora para realizar sus edificaciones, esta planta tiene una longitud promedio de 4 metros y un diámetro de 2.5 cm, respecto a su crecimiento, se reproduce de manera rápida por lo cual es cortada cada 6 meses, su estructura interna es porosa por lo cual también es utilizada como material aislante acústico y térmico. También, como propiedades mecánicas, presenta una resistencia a la tensión de 38 kg/cm<sup>2</sup>, 15Kg/cm<sup>2</sup> para esfuerzos a la compresión, el cual puede mejorar si se realiza el ensayo con un grupo de tallos sujetos para conseguir un volumen compacto, pudiendo alcanzar una resistencia de hasta 40 Kg/cm<sup>2</sup> [6].

En conclusión, el desarrollo de esta investigación se realizará en la ciudad de Ferreñafe, ya que en los últimos años su expansión y crecimiento poblacional ha aumentado notoriamente, lo cual hace necesario que a población tenga un conocimiento certero sobre las nuevas técnicas de estabilización y pueda desarrollar la construcción de sus vías, viviendas o proyectos, economizando, sin agotar los recursos y de manera eco amigable. Si bien es cierto, las cenizas de totora se obtendrán a través de una combustión controlada, esta ceniza puede variar su composición química y física debido a la variación de temperatura que influye en la cristalización y modificación de componentes, Según Landa, la temperatura de combustión ideal para las cenizas de bagazo de caña es de 700 C° [2]. Por lo cual, para la presente investigación se realizará una técnica de estabilización de suelos mediante la incorporación de cenizas de totora para analizar el comportamiento mecánico que tiene el suelo arcilloso después de adicionar las cenizas de totora, las cuales estuvieron a una temperatura de 400 C° - 500 C°, según las mediciones realizadas con el termómetro infrarrojo y además de buscar el porcentaje óptimo de adición de esta.

Para realizar la investigación, se revisó una extensa bibliografía de investigaciones experimentales en las cuales se estabilizo muestras de suelos adicionando cenizas de diversos agentes estabilizadores en porcentajes, con el fin de definir el porcentaje óptimo de adición de cenizas en la muestra de suelo arcilloso estabilizado. Por consiguiente, la problemática a investigar queda formulada de la siguiente forma ¿De qué manera influye la adición de porcentajes de Cenizas de totora en las propiedades físico-mecánicas de los suelos arcillosos?

Además, se planteó como hipótesis:

La adición de ceniza de totora mejorara las propiedades físico-mecánicas de la subrasante del suelo arcilloso de la ciudad de Ferreñafe.

Para ello, se planteó como objetivos:

Objetivo General:

- ✓ Analizar cómo influye la adición de cenizas de totora en diferentes porcentajes en las propiedades geotécnicas de un suelo limo-arcilloso.

Objetivos específicos:

- ✓ Determinar las propiedades físicas de la muestra de suelo natural y estabilizadas con diferentes porcentajes de cenizas de totora a través de ensayos de contenido de humedad, límite plástico, límite líquido, Clasificación SUCS y AASHTO por ensayo granulométrico, así como las propiedades químicas y mineralógica del agente estabilizador mediante ensayo de fluorescencia y difracción de rayos x respectivamente.
- ✓ Obtener el contenido de sales, humedad óptima y densidad máxima seca de la muestra natural, así como de las muestras estabilizadas con ceniza de totora por medio del ensayo de sales solubles y Proctor modificado
- ✓ Determinar mediante los ensayos de CBR los valores de índice de CBR de la muestra natural y estabilizadas.
- ✓ Evaluar qué porcentaje de adición de ceniza de totora a la muestra de suelo es el óptimo para mejorar sus propiedades físico-mecánicas.
- ✓ Analizar el costo y beneficio entre el uso de la ceniza de totora y los agentes estabilizadores convencionales en la estabilización de suelos.

Por otro lado, respecto a la justificación de la presente investigación se basa en lo siguiente:

- ✓ Según su justificación Técnica, a que la presencia de arcillas en el suelo de la Provincia de Ferreñafe, es un tema de suma importancia, debido a que este tipo de suelos con finos tienen un comportamiento distinto a los de tipo granular, por lo cual es necesario mejorarle sus propiedades mediante adiciones de agentes estabilizadores como la ceniza de totora para que pueda cumplir con los requisitos mínimos para que se puedan realizar las obras necesarias que mejoren el transporte, comercio y construcción de viviendas.

- ✓ Según su justificación social , como bien se sabe, Ferreñafe es una provincia en la cual la expansión demográfica aumento durante los últimos años, generando que los pobladores busquen opciones en donde asentar sus viviendas y vías por las cuales comunicarse , la evolución de la zona urbana y el crecimiento demográfico de los centros poblados en la mayoría de situaciones no están preparados para este tipo de desarrollo generando impactos negativos, más aún cuando sucede de manera espontánea y sin dirección técnica, esto se observa en las ciudades pequeñas en las cuales se ocupan los sectores agrícolas que no son aptos para habilitaciones urbanas , debido a su tipo de suelo con material orgánico. Además, la falta de conocimiento por parte de la población, el deficiente control por parte de las autoridades municipales hace que la población ocupe zonas vulnerables que están expuestas a desastres naturales, generando sectores críticos en los cuales pueden haber perdidas y daños debido a la vulnerabilidad a las que están sometidas las edificaciones. [8]. Es por ello que se busca, la mejora de este tipo de suelos para que los pobladores y conductores se vean favorecidos debido a la mejora de la transitabilidad.
  
- ✓ Según su justificación económica, debido a que se plantea el uso de la ceniza de totora, la cual será aprovechada de la limpieza de canales de la misma zona mediante la limpieza de canales de regadío y acequias, para luego someterlas a una combustión controlada para obtener las cenizas, las cuales tienen la finalidad de reducir los costos de ejecución de estabilización de subrasantes y utilizar de manera eficiente y racional los recursos de la zona.
  
- ✓ Según su justificación científica, debido a que se encontró pocas investigaciones a Nivel nacional e internacional respecto al aprovechamiento de la totora como agente estabilizador en suelos arcillosos específicamente, por lo cual esta investigación contribuirá a la búsqueda de un material innovador y con alcance global como opción al reemplazo de los insumos de estabilización de suelos usuales. Además, brindará información a futuras generaciones de estudiantes y profesionales interesados en esta línea de investigación.

## REVISIÓN DE LA LITERATURA

### ANTECEDENTES

**A. Kumar Yadav, K. Gaurav, R. Kishor y S. K. Suman, "Stabilization of alluvial soil for subgrade using rice husk ash, sugarcane bagasse ash and cow dung ash for rural roads", International Journal of Pavement Research and Technology, vol. 10, n.º 3, pp. 254–261, mayo de 2017.**

En este artículo de investigación, se basa en la estabilización de subrasantes de suelos arcillosos empleando insumos de la zona como la ceniza de cáscara de arroz RHA, ceniza de bagazo de caña (SCBA) y ceniza de estiércol de vaca (CDA), los cuales fueron mezclados por remplazo parcial del suelo en peso en 0%, 2.5%, 5%, 7.5%, 10% y 12.5%, el suelo es arcilloso plástico intermedio, el cual luego de la estabilización reduce densidad seca, aumenta el contenido óptimo de humedad. Además, para los valores de CBR y UCS aumenta y luego disminuye, optando un porcentaje de adición óptimo de cenizas de 7.5% para el cual se presentaron los mejores resultados. En conclusión, el presente artículo nos muestra que las cenizas influyen en la mejora de CBR y UCS de suelos arcillosos, además de controlar el cambio volumétrico de este. [19]

**R. Aparna, "Soil Stabilization using Rice Husk Ash and Cement", International Journal of Civil Engineering, vol. 5, n.º 1, pp. 1–6, 2014**  
**R. Aparna, "Soil Stabilization using Rice Husk Ash and Cement", International Journal of Civil Engineering, vol. 5, n.º 1, pp. 1–6, 2014.**

En este trabajo de investigación se empleó como agente estabilizador las cenizas calcinadas de cáscara de arroz, con la finalidad de mitigar el efecto negativo ambiental generado en la producción de los estabilizadores químicos más conocidos. Por lo cual, el suelo a estabilizar es de tipo CH, de alta plasticidad y se usó porcentajes de cenizas de cáscara de arroz y pequeñas cantidades de cemento, observándose cambios en la MDS, contenido de humedad, CBR y UCS. De los resultados obtenemos que el aumento de ceniza de cáscara de arroz aumenta el O.C.H, pero disminuye M.D.S y además el CBR Y UCS mejoran considerablemente a partir de la inclusión de esta, por lo cual se recomienda la inclusión de un 10% de ceniza de cáscara de arroz y un 6% de cemento, que es en donde se obtuvieron los mejores resultados. [20]

**I. Jaen Cutipa, M. Surco Portillo, C. Aranzabal Pataca, D. Vilca Velarde y A. Gutierrez Quispe, "Resistencia mecánica de mortero con cemento sustituido 5% y 10% por cenizas de totora", Universidad Nacional del Altiplano Puno, Puno, Informe del curso de Tecnología de recursos constructivos, marzo de 2020.**

Para esta investigación dentro del departamento de Puno, propuso a la ceniza de totora como aditivo puzolánico para el mejoramiento de características mecánicas de un mortero de concreto., durante el procedimiento de calcinación de cenizas de totora se realizó la incineración a 600 C° durante 2 horas, la cual se usará en 18 de los 27 bloques de mortero, las dosificaciones para el diseño del mortero patrón fueron de 50 % A.F, 30% Cemento Portland y 20% agua. Las muestras serán 3, un patrón y dos adicionadas al 5 y 10 % con cenizas de totora de las que se midió su resistencia a la compresión y flexión a los 3, 7 y 22 días. Los valores promedios que nos brindan las muestras patrón y adicionadas a 5 y 10 % fueron de 166 Kg/cm<sup>2</sup> ,157 Kg/cm<sup>2</sup> y 146 Kg/cm<sup>2</sup> respectivamente , a la semana se obtuvieron resultados de 183 Kg/cm<sup>2</sup> , 182 Kg/cm<sup>2</sup> y 164 Kg/cm<sup>2</sup> y a los 28 días de 119 Kg/cm<sup>2</sup> , 284 Kg/cm<sup>2</sup> y 235 Kg/cm<sup>2</sup> , observándose que para la adición de 5% los resultados fueron los mejores y que para el 10 % de adición la resistencia a la compresión es mayor a la de la muestra patrón, por lo cual se puede concluir que la adición de totora en el porcentaje óptimo mejoro la resistencia a la compresión del mortero [12].

**M. S. Arriaga Sandi y L. L. Palomino Salvatierra, "Evaluación del mejoramiento de suelos lateríticos con cenizas de productos orgánicos y cenizas volantes", Tesis de Bachiller, Universidad Peruana Unión, Lima, 2020.**

En este trabajo de investigación, tuvo como objetivo diferenciar las características la capacidad de soporte y la compresión simple no confinada de suelos lateríticos estabilizados químicamente con cenizas como opción al mejoramiento de suelos para vías de interconexión de la población para regenerar el crecimiento económico. En este, se utilizaron cenizas de diversos materiales orgánicos que suelen caracterizarse por presentar propiedades similares a las de las puzolanas, lo que las convierte en un insumo cementante para el mejoramiento de suelos como cáscara de yuca, bagazo de caña, hoja de bambú, cáscara de arroz, estiércol de vaca y cenizas volantes , de los cuales se tienen resultados positivos respecto al uso de cenizas de compuestos orgánicos como agente estabilizador en suelos lateríticos , entre los resultados se resalta el uso de la ceniza de hoja de bambú , la

cual mejora el CBR 32.77% al 6% de adición y para el ensayo de resistencia a la compresión simple no confinada el uso de cenizas al 2% de cáscara de yuca se obtuvo un valor de 590.58 Kn/m<sup>2</sup>. [13]

**A. B. Moale Quispe and E. J. Rivera Justo, “Estabilización química de suelos arcillosos con cal para su uso como subrasante en vías terrestres de la localidad de Villa Rica”, Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas (UPC), Lima, Perú, 2019.**

Esta tesis, se realizó en Villa Rica, carretera Oconal – Cedropampa en el cual se busca la estabilización de un suelo arcilloso incorporándole cal en un porcentaje óptimo para mejorar las propiedades de resistencia y CBR. Según Moale y Rivera, la cal tiene propiedades de absorción, es por ello por lo que mejora la resistencia de los suelos arcillas ya que encapsula las partículas de arcilla y que al interactuar con estas se produce la floculación. Para hacer posible este desarrollo se realizaron los respectivos ensayos en laboratorio de los cuales destacan el de granulometría, Proctor modificado, CBR ensayado tanto a las muestras patrón como a las adicionadas con 9,15 y 21 % de cal, obteniendo como resultado que al 15% de cal, es donde se observan los mejores resultados, debido a que en esta dosificación el CBR aumenta de 3.3% a 5.9% [14].

**M. E. A. Ormeño y V. N. E. Rivas, "Estudio experimental para determinar la influencia de la aplicación de Cenizas de Cáscara de Arroz (RHA) en la estabilización de una subrasante de suelo arcilloso de baja plasticidad en Chota- Cajamarca", bachelorThesis, Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas (UPC), 2020.**

En esta investigación, se utilizó como agente estabilizador las cenizas de cáscara de arroz las cuales son residuos del proceso de pilado de arroz, el estudio se realizó en chota en el caserío de Callampampa el cual tiene como objetivo establecer la influencia de la ceniza de cáscara de arroz en el mejoramiento de una subrasante arcillosa pobre no pavimentada. Además, mediante los ensayos realizados se determinó que es un suelo CL según clasificación SUCS y un valor de CBR de 4.30%. Es por ello , que al tener una subrasante pobre se tiene como alternativa a la ceniza de cascara de arroz , buscando el porcentaje óptimo de adición , llegando a la conclusión de que el porcentaje óptimo de adición de cenizas de cascara de arroz es el 20% debido a que en este porcentaje , según los ensayos de laboratorio realizados es donde incrementa el valor de 4.30% a 20.70% , sobrepasando

los rangos requeridos del manual de diseño de carreteras no pavimentadas de bajo volumen de tránsito. Concluyen que la inclusión de cenizas de cáscara de arroz al ser incineradas contiene un elevado valor de sílice, lo cual hace que sea un material puzolánico y como insumo mejora las características geotécnicas de los suelos arcillosos. [1]

**E. Nnochiri y O. Aderinlewo, "Geotechnical properties of lateritic soil stabilized with the ashes of oil palm fronds", *Stavební obzor - Civil Engineering Journal*, vol. 25, n.º 4, 2016**

La presente investigación se realizó en el país de Nigeria la cual tiene como objetivo buscar la proporción óptima de adición de cenizas de palma aceitera. Para el desarrollo, se realizaron la identificación de suelos dentro de la Universidad Federal de Tecnología. Para el muestreo de suelos lateríticos se realizaron calicatas a más de 1.20m de excavación, para llevarlo a un secado natural durante 2 semanas, para posteriormente realizar los ensayos de identificación correspondiente tanto al suelo de muestra patrón y los adicionado con el agente estabilizador propuesto. Llegando a la conclusión de que la ceniza de hoja de palma puede ser un material puzolánico por sus componentes de SiO<sub>2</sub>. Además, los resultados más favorables para el OFPA son del 4% y para el OPC 6% [16].

**A. J. Y. Landa y M. S. F. Torres, "Mejoramiento de suelos arcillosos en subrasante mediante el uso de cenizas volantes de bagazo de caña de azúcar y cal", *bachelorThesis*, Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas (UPC), 2019.**

En esta investigación propusieron como agente estabilizado la mezcla de cal y ceniza de bagazo de caña en conjunto, en dosificaciones de 75% CBCA + 25% cal, 50% CBCA +25% cal y 100% Cal, en dosificaciones de 5,10 y 15% obteniéndose los mejores resultados en la mezcla del 50-50 a un 25% de adición de suelo natural seco, aumentando el valor del CBR hasta en un 110.81%. Además, Landa nos habla sobre una temperatura ideal de 700 C° para la combustión controlada de las cenizas de bagazo de caña, ya que si bien es cierto esta es obtenida de los residuos del proceso de extracción de la sabia, esta no tiene una incineración uniforme pudiendo variar sus propiedades físicas y químicas debido a que la temperatura influye en el proceso de cristalización, por lo cual afirma que a mayores temperaturas se obtiene un mayor efecto de actividad puzolánica. También, nos indica que las arcillas

blandas mejoran sus propiedades mecánicas cuando se usa cenizas con elevado contenido de calcio o añadiendo caolín [2].

**S. J. J. Escobar, S. G. D. Quispe, S. F. R. Quispe, S. J. B. Arana y Q. R. B. Huarcaya, "Estabilización de una subrasante arcillosa de baja plasticidad con cenizas de cáscara de arroz", bachelor Thesis, Pontificia Universidad Católica del Perú, 2020.**

Escobar, nos brinda una investigación respecto a estabilización de subrasante arcillosa mediante el empleo de CCA específicamente en suelos de tipo CL, para poder identificar la influencia de esta ceniza y como mejora las propiedades físico-mecánicas del suelo arcilloso, para ello en base a su indagación logró determinar que el porcentaje óptimo de adición de CCA. Durante la investigación pudo observar que, al estabilizar el suelo con las cenizas, el LL aumentaba y el LP disminuía entre un 5% a 9%. Además, el CBR aumenta respecto al porcentaje de ceniza que se agrega, sin embargo esto varía cuando se llega al porcentaje óptimo de 15% , empezando a disminuir, del ensayo Proctor se pudo observar que su MDS disminuye y el OCH aumenta, para el ensayo de resistencia a la compresión no confinada el porcentaje óptimo de cenizas de cáscara de arroz fue del 25% , tendiendo a disminuir luego de este porcentaje y para las propiedades hidráulica , se observó que a mayor porcentaje de agente estabilizador , la permeabilidad disminuye. Por ello, se llega a la conclusión de que la ceniza de cáscara de arroz es un agente estabilizador de suelos arcillosos que se debería tomar en cuenta para la mejora de suelos ya que, mejora la capacidad portante, el ángulo de fricción y cohesión [3].

**W. Machaca, "Influencia de las cenizas del sistema radicular de la totora en la estabilización de la subrasante en la carretera Orurillo-Nuñoa" Universidad César Vallejo (UCV), Lima, 2022**

En la presente investigación que se realizó en la carretera que conecta Orurillo y Nuñoa en el departamento de Puno, se empleó la ceniza del sistema radicular de totora como agente estabilizante en su subrasante Arcillosa, obteniendo como resultados que la adición óptima de ceniza de totora es el 6%, lo cual le salía un resultado muy parecido al de otro investigador que realizó la estabilización con ceniza de cáscara de maíz. Además, al 6% de adición de totora se logra reducir el L.L en un 4.73%, aumenta el L.P en un 11.87% y disminuir el I.P en un 40.04 % , para lo que corresponde al ensayo de CBR a una adición de suelo natural + 6% de ceniza se logró alcanzar un CBR De 16.60 al 95% de su MDS, por

lo cual ya es un resultado bastante bueno, por lo cual la subrasante estaría clasificándose como una de tipo buena. Por lo cual, se llega a la conclusión que el uso de las cenizas del sistema radicular de la totora si funciona para las estabilizaciones de subrasantes, mejorando las propiedades físicas y mecánicas de una subrasante arcillosa. [32].

**W. Vilca, “Comportamiento estructural de muro de albañilería confinada con unidades de ladrillo artesanal incorporando cenizas de totora, Puno 2021” Universidad César Vallejo (UCV), Lima, 2021.**

En la presente investigación, se usa la ceniza de totora como aditivo para la mejora de las propiedades físicas y mecánicas de un ladrillo artesanal. Según Vilca, nos dice que la totora es extraída al realizar la limpieza del lago Titicaca y la ceniza se produce mediante una combustión controlada a 400 C°, temperatura en la cual se activan los óxidos, dióxido de silicio. El proceso experimental consta en la adición a la arcilla para preparar el ladrillo en un 0 %,5%,10% y 15 % sometiendo la muestra patrón y variaciones a diversos ensayos como Variación dimensional, alabeo y absorción para propiedades físicas y ensayo de densidad, Resistencia a la compresión y flexión para las propiedades mecánicas. Además, se tiene como resultados que la adición de cenizas de totora a un 10% es la mejor alternativa ya que mejora las propiedades físico-mecánicas del ladrillo y que a mayor inclusión de ceniza de totora los resultados obtenidos van disminuyendo, por lo cual se concluye que la adición del 10% es lo óptimo [10].

**F.G. Chambi, “Evaluación de las propiedades mecánicas del concreto sustituyendo con ceniza de totora en la provincia de Azángaro” Universidad César Vallejo (UCV), Lima, 2022.**

En la investigación realizada por Chambi, propone el uso de cenizas de totora en el diseño de mezcla para evaluar las propiedades mecánicas del concreto. Se realizaron probetas cilíndricas de concreto patrón , concreto + 3% CT y concreto +6 % CT a las cuales se les realizo los ensayos correspondientes como resistencia a la compresión y flexión , obteniendo como resultados la resistencia a la compresión a los 7 días de curado para concreto patrón , concreto + 3% CT y concreto + 6% CT valores 233.31 Kg/cm<sup>2</sup> ,235.53 Kg/cm<sup>2</sup> y 226.80% Kg/cm<sup>2</sup>, también para el curado a los 14 días se obtuvieron valores de 276.34 kg/cm<sup>2</sup> , 278.27 Kg/cm<sup>2</sup> y 271.63 Kg/cm<sup>2</sup> respectivamente , para un curado a los 28 días se obtuvieron valores 307.19 Kg/cm<sup>2</sup> , 310.46 Kg/cm<sup>2</sup> , 303.11 Kg/cm<sup>2</sup>. Además,

se realizó el ensayo de resistencia a la tracción, el cual, para un curado de 7 días, se observan valores de 22.75 k, 23.16 y 22.00 kg/cm<sup>2</sup>, a los 14 días 27.15, 28.34 y 25.70 Kg/cm<sup>2</sup>, finalmente para un curado a los 28 días se obtuvieron valores de 28.85, 29.29 y 28.27 Kg/cm<sup>2</sup>. En conclusión, en la presente investigación se determina que el mejor comportamiento de las muestras ensayadas es el de adición de ceniza de totora al 3%, debido a que presenta mejoras en la resistencia de compresión y tracción. Sin embargo, si agregamos 6%, las propiedades tienden a decaer en resistencia [11].

## **BASES LEGALES**

### **MANUAL DE CARRETERAS, SECCIÓN DE SUELOS Y PAVIMENTOS - MTC/14**

La presente guía, nos indica los criterios técnicos que se deben considerar para obtener un diseño eficiente de las capas que conforman un pavimento. Es por ello, que en el capítulo 4 nos brinda recomendaciones para ejecutar una correcta exploración de suelos, así mismo nos muestra la caracterización de una subrasante en la cual nos indica los parámetros mínimos que debe de cumplir para que se pueda usar como suelo de cimentación. Además, en el capítulo 10 nos da información sobre la estabilización de suelos donde indica los criterios y los tipos de estabilización que se practican comúnmente. [22].

### **MANUAL DE ESPECIFICACIONES TÉCNICAS GENERALES PARA CONSTRUCCIÓN (EG-2013)**

Esta guía, nos brinda indicaciones y requisitos de la realización de la infraestructura vial, con el fin de asegurar la calidad en la ejecución de estas. Además, en el capítulo 3, nos detalla los ensayos de suelos y los parámetros mínimos que se deben realizar según el tipo de estabilización a realizar. [23].

### **NTP CE .010 PAVIMENTOS URBANOS**

En la norma CE.010 nos brinda alcances sobre los parámetros mínimos para asegurar la duración de los pavimentos urbanos, mediante su capítulo 3, nos detalla las técnicas para una correcta realización de estudio de mecánica de suelos con fin de pavimentación. Asimismo, los ensayos, requerimiento de materiales y control de calidad [24].

### **DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO DE HUMEDAD DE UN SUELO, MTC E 108**

La presente normativa, nos indica el proceso para determina el contenido de humedad de la muestra de suelo, comparando los resultados entre una muestra con humedad natural y una muestra secada en horno, obteniendo el peso del agua contenida en la muestra y hallando el porcentaje de humedad [25]

### **ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DE SUELOS POR TAMIZADO, MTC E107**

En esta normativa, nos indica el procedimiento para realizar la granulometría por tamizado o sedimentación en muestras de suelos granulares o no granulares, indicándonos los números de tamices y las fórmulas a emplear. [25].

### **DETERMINACIÓN DEL LÍMITE LÍQUIDO DE LOS SUELOS, MTC E 110**

Esta normativa, nos brinda indicaciones para realizar el ensayo de L.L, mediante la copa de Casagrande, indicándonos los rangos de números de golpes e instrumentos a emplear en el ensayo, con la finalidad de obtener humedades en las cuales el suelo cambiara de consistencia plástica a líquida [25].

### **DETERMINACIÓN DEL LÍMITE PLÁSTICO (L.P) E ÍNDICE DE PLASTICIDAD (IP), MTC E 111**

La presente normativa, nos brinda indicaciones para calcular el L.P de una muestra de suelo, con la finalidad de poder hallar el I.P, mediante la diferencia de los límites de consistencia. [25].

### **CLASSIFICATION OF SOIL AND SOIL-AGGREGATE MIXTURES FOR HIGHWAY CONSTRUCTION PURPOSES (CLASIFICACIÓN DE SUELO Y MEZCLAS DE SUELO-AGREGADO PARA FINES DE CONSTRUCCIÓN DE CARRETERAS), AASHTO M 145**

Esta normativa internacional, nos brinda una clasificación de suelos en base a su granulometría y límites de consistencia, clasificando los tipos de suelos en siete grupos desde el A-1 hasta el A-7, en los que los suelos limosos y arcillosos por lo general están dentro de la clasificación del grupo A-4 hasta el grupo A-7 [26].

### **MÉTODO PARA LA CLASIFICACIÓN DE SUELOS CON PROPÓSITOS DE INGENIERÍA (SISTEMA UNIFICADO DE CLASIFICACIÓN DE SUELOS, SUCS), NTP 339.134**

La presente normativa, nos brinda información para poder clasificar un suelo mineral y orgánico para una finalidad ingenieril, sustentándose principalmente en la carta de plasticidad para lo cual es necesario realizar los ensayos de laboratorio como granulometría y límites de consistencia, clasificándolo en tipo de suelos como gravas, arenas, limos, arcillas y suelos orgánicos, así como la combinación entre los tipos de suelos mencionados [27].

### **COMPACTACION DE SUELOS EN LABORATORIO UTILIZANDO UNA ENERGÍA MODIFICADA (PROCTOR MODIFICADO), MTC E 115**

Esta norma nos indica el procedimiento experimental de la compactación óptima en laboratorio determinando de un suelo, con la finalidad de obtener el óptimo contenido de humedad y la máxima densidad seca, para así saber a qué porcentaje de humedad el suelo tendrá la mayor estabilidad y resistencia [25].

### **MÉTODO DE ENSAYO DE CBR (RELACIÓN DE SOPORTE DE CALIFORNIA) DE SUELOS COMPACTADOS EN LABORATORIO, MTC E 132**

En esta normativa nos indica el proceso para determinar el valor de CBR (California Bearing Ratio) o relación de soporte, teniendo en cuenta que para la realización de este ensayo es necesario que el suelo se encuentre con su contenido de humedad óptimo [25].

### **STANDARD SPECIFICATION FOR COAL FLY ASH AND RAW OR CALCINED NATURAL POZZOLAN FOR USE IN CONCRETE, ASTM C618**

La presente norma internacional, nos da información sobre la clasificación de cenizas volantes y puzolanas mediante su composición química y densidad relativa, para hacer uso de estas como material cementante [28].

## **BASES TEÓRICAS**

### **SUELOS ARCILLOSOS**

Las arcillas son partículas sólidas de diámetro menor a 0.005 milímetros, que al entrar en contacto con agua tiende a volverse de consistencia plástica. Así mismo, su estructura química está constituida en gran parte por alúmina hidratado y silicato de hierro o magnesio en menor proporción. Según Crespo Villalaz, las arcillas presentan tres tipos de clasificaciones como el caolinitico, montmorilonitico y el Ilitico [21]

### **ESTABILIZACIÓN DE SUELOS**

Es el proceso al cual son sometidos los suelos pobres para mejorar sus propiedades físicas y mecánicas como resistencia, plasticidad, densidad y capacidad portante para facilitar la construcción de obras viales, viviendas y proyectos de gran magnitud. [15].

### **ESTABILIZACIÓN QUÍMICA**

Este tipo de estabilización implica el arranque de las reacciones químicas de los estabilizadores que son el material cementante y los materiales del suelo o puzolánicos para lograr mejorar las propiedades importantes de un suelo para el aspecto ingenieril como la estabilidad volumétrica, resistencia, compresibilidad, durabilidad y permeabilidad. [16].

### **TOTORA**

La totora es una planta acuática, que por lo general crece en ambiente húmedos con una altura promedio de 3.5 metros y diámetro de 2.5 cm, su proceso de crecimiento es rápido por lo tanto su capacidad de renovación es de cada 6 meses, tiene una estructura porosa, conformada por cámaras de aire lo cual vuelve a la totora un material sumamente liviano y aislante [17].

### **CAPACIDAD PORTANTE**

La capacidad de carga o portante es la presión última que resiste el suelo, es el límite en donde se produce una falla por corte y se determina utilizando las fórmulas brindadas por la E0.50 Suelos y Cimentaciones. [18]

## **PROPIEDADES FÍSICAS**

### **GRANULOMETRÍA**

La granulometría se realiza mediante un ensayo de laboratorio, el cual tiene como finalidad obtener la curva granulométrica o perfil estratigráfico de un suelo mediante puntos de exploración o perforaciones hasta llegar a un estrato continuo de suelo del cual se extrae una porción de suelo como muestra para trabajarlo en laboratorio, el proceso más simple y fácil para realizar la granulometría es el método de tamizado. Sin embargo, debido a que la arcilla es un material fino el proceso de tamizado se complica, por lo cual se recurre al procedimiento de sedimentación, ya que ambos tienen la misma finalidad. Además, una de las formas más rápidas para identificar si el suelo es un tipo de arcilla es el porcentaje que pasa por el tamiz N°200, ya que si pasa el 50% de la muestra se puede decir que es un grano fino de limo o arcilla [21].

### **PLASTICIDAD**

La plasticidad es una de las principales propiedades de las arcillas, entendiéndose por plasticidad a la capacidad que presenta el suelo para lograr deformarse hasta cierto límite sin presentar falla [21].

Para determinar la plasticidad de un suelo se determina mediante los límites de consistencia o límites de Atterberg, que fue el que clasifico los estados de consistencia en cuatro:

✓ Límite Plástico

Se basa en el porcentaje de humedad respecto al peso seco de muestra, con el cual puede cambiar de estado semisólido a plástico

✓ Límite Líquido

Se basa en el porcentaje de humedad respecto al peso seco de muestra, con el cual puede cambiar de estado plástico a líquido.

✓ Límite de contracción

Es el porcentaje de humedad respecto al peso seco de la muestra, con el cual al reducir la cantidad de agua no habrá una variación en el volumen del suelo.

✓ Índice de plasticidad

Es la diferencia entre los límites de consistencia, con la finalidad de indicar el margen de humedad donde el suelo con cohesión estaría en un estado plástico.

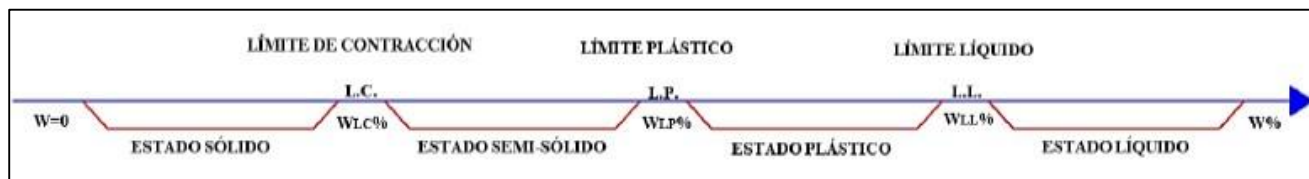


Figura N.º 1: Límites de Atterberg [21].

Además, según lo que nos indica el Manual de Carreteras, Sección de suelos y pavimentos, clasifica al suelo según su índice de plasticidad y la cantidad de arcilla que presenta el suelo [22].

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

Tabla N.º 1: Caracterización de suelo según índice de plasticidad.

## DENSIDAD

Es una propiedad física del suelo, la densidad absoluta es la masa de un material incluyendo sus vacíos en la unidad de volumen, a diferencia de la densidad aparente que es la masa de un cuerpo sin incluir los vacíos [21].

## PESO VOLUMÉTRICO

El peso volumétrico, es una propiedad física del suelo el cual se expresa en peso por unidad de volumen teniendo como unidad Kg/m<sup>3</sup>. Así mismo, se debe tener en cuenta el peso volumétrico aparente, el cual puede ser por volumen suelto y seco, el cual toma en cuenta los vacíos del suelo que además tiene como beneficio la conversión directa de pesos a volumen y viceversa [21].

## **PROPIEDADES MECÁNICAS**

### **RESISTENCIA**

La resistencia es una de las propiedades que poseen los suelos para resistir fuerzas externas, la cual depende del contenido de humedad y energía de compactación, ya que, al estar estos factores en su contenido óptimo, generará la máxima densidad seca, por lo cual el suelo tendrá un comportamiento elástico y por ende altas resistencias. Sin embargo, si el suelo es compactado con una humedad alta, se obtendrá una baja densidad seca obteniendo un comportamiento plástico y viscoso con baja resistencia, esto debido a que la presencia de humedad en las partículas de arcilla genera una repulsión entre sus partículas, generando que la cohesión aumente o disminuya de forma proporcional al contenido de agua [29].

### **PERMEABILIDAD**

Es la propiedad que tiene el suelo para que el agua pueda ingresar a través de sus capas, la permeabilidad en los suelos arcillosos genera problemas como la disipación de presiones de poro y el flujo de agua a través del suelo, por lo cual al presentar altas presiones de poro se generan deslizamientos en las explanaciones y el flujo de agua a través del suelo generara tubificaciones y arrastre de partículas causando daño así a las capas de pavimento superiores , por lo cual es necesario que al realizar la compactación se haga con el porcentaje óptimo de humedad , ya que sobre esta compactación se disminuyera la cantidad de vacíos y la permeabilidad del suelo [29].

### **COMPRESIBILIDAD**

Es la propiedad que presentan los suelos para deformarse cuando están bajo cargas, siendo las arcillas las más comprensibles. Es por ello, que esta propiedad es importante debido a que altera otras propiedades como la permeabilidad, por ende, es necesario que la humedad de compactación sea la óptima, ya que con esto aseguramos que el suelo tenga un comportamiento adecuado para la ejecución de obras viales.

### **ESTABILIDAD VOLUMÉTRICA**

Esta propiedad se da generalmente en las arcillas donde los procesos de expansión y contracción son generados por la variación de humedad, por lo que se incrementan las presiones de las estructuras del pavimento, por lo cual se generan deformaciones y rupturas en este. Es por ello, que se deben realizar estudio para identificar y caracterizar estos tipos

de suelos arcillosos, siendo una de las soluciones que más se usa en el campo de trabajo, la transformación de la arcilla en masa granular o rígida [29].

## ENSAYOS DE LABORATORIO

### DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO DE HUMEDAD DE UN SUELO, MTC E 108 [25]

El contenido de humedad de un suelo es la presencia de agua contenida al momento de extraer la muestra del suelo, es una relación entre el peso de agua contenida y de sus partículas sólidas expresado en porcentaje, es decir que cantidad de suelo que se analizará es agua.

#### Equipos:

- Horno, con capacidad térmica de  $110 \pm 5^\circ\text{C}$
- Balanza con margen de error ( $\pm 0.01\text{gr}$ )

#### Materiales:

- Tara o recipientes resistentes al calor

#### Cálculos:

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

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

Donde:

- $w = \text{contenido de humedad (\%)}$
- $M_{cws} = \text{peso del recipiente + suelo húmedo (gr)}$
- $M_{cs} = \text{peso del recipiente + suelo seco (gr)}$
- $M_c = \text{peso del recipiente (gr)}$
- $M_w = \text{peso del agua (gr)}$
- $M_s = \text{peso de partículas sólidas (gr)}$

## ANÁLISIS GRANULOMETRICO DE SUELOS POR TAMIZADO, MTC E 107 [25]

Este ensayo, nos proporciona información respecto al tamaño de las partículas presentes en el suelo a estudiar, distribuyéndolas según la abertura de tamiz que pasan para posteriormente poder clasificarlas mediante el método AASHTO Y SUCS.

### Equipos:

- Horno, con capacidad térmica de  $110 \pm 5^\circ\text{C}$
- Balanza con margen de error ( $\pm 0.01\text{gr}$ )

### Materiales:

- Juego de tamices

TAMICES	ABERTURA (mm)
3"	75,000
2"	50,800
1 1/2"	38,100
1"	25,400
3/4"	19,000
5/8"	9,500
N° 4	4,760
N° 10	2,000
N° 20	0,840
N° 40	0,425
N° 60	0,260
N° 140	0,106
N° 200	0,075

Tabla N° 2 : Tamices para ensayo granulométrico. Fuente: Manual MTC

### Cálculos:

- Porcentaje de muestra que pasa la malla N°200

$$\% \text{ pasa malla N}^\circ 200 = \frac{\text{Peso Total} - \text{Peso retenido malla N}^\circ 200}{\text{Peso Total}} \times 100$$

- Cantidad de muestra retenida en cada tamiz (%)

$$\% \text{ retenido} = \frac{\text{Peso retenido en tamiz}}{\text{Peso Total}} \times 100$$

- Porcentaje de muestra que pasa

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

## DETERMINACIÓN DEL LÍMITE LÍQUIDO DE LOS SUELOS, MTC E 110 [25]

Este ensayo, nos proporciona información respecto a la máxima capacidad de agua que puede tener una fracción o muestra de suelo sin perder su plasticidad.

### Equipos:

- Horno, con capacidad térmica de  $110 \pm 5^\circ\text{C}$
- Balanza con margen de error ( $\pm 0.01$  gr)
- Copa Casagrande
- Acanalador
- Calibrador

### Materiales:

- Espátula

### Cálculos:

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

$$\text{Límite líquido} = kW^n$$

Donde:

- $N$  = Número de golpes a los que cierra la ranura de la copa Casagrande
- $W^n$  = Contenido de humedad del suelo
- $k$  = factor para determinar el LL

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

Tabla N.º 3 : Factores según el número de golpes para determinar el límite líquido. Fuente: Manual MTC

## **DETERMINACIÓN DEL LÍMITE PLÁSTICO DE LOS SUELOS E ÍNDICE DE PLASTICIDAD, MTC E 111 [25]**

Este ensayo, a diferencia de límite líquido nos proporciona información respecto a la mínima capacidad de agua que puede tener una fracción o muestra de suelo sin cambiar de estado. Además, respecto al índice de plasticidad es la diferencia algebraica de los valores de límite líquido y plástico

### Equipos:

- Tamiz N°40
- Vidrio grueso esmerilado para superficie de trabajo
- Recipientes para muestra y determinación de humedades

### Materiales:

- Espátula

### Cálculos:

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

$$\text{Índice de plasticidad} = L.L - L.P$$

Donde:

- *L.L = límite Líquido*
- *L.P = límite plástico*

## COMPATACIÓN DE SUELOS EN LABORATORIO UTILIZANDO UNA ENERGÍA MODIFICADA (PROCTOR MODIFICADO), MTC E 115 [25]

Este ensayo, se realiza con la finalidad de hallar el contenido óptimo de humedad, ya que esto genera que las partículas se reacomoden, obteniendo una muestra más sólida por lo cual se obtiene una alta densidad seca

### Equipos:

- Molde 6", según lo indicado en el manual de ensayos del MTC
- Pisón manual
- Ensamblaje de molde: el molde tendrá un collar ensamblado en conjunto con un plato base, donde dicho collar deberá tener una altura de 2"

### Materiales:

- Juego de Tamices para suelo fino N°4

### Cálculos:

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

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

Donde:

- $\rho_m$  = Densidad Húmeda de la muestra compactada ( $Mg/m^3$ )
- $M_t$  = Masa de la muestra húmeda y molde ( $kg$ )
- $M_{md}$  = Masa del molde de compactación ( $kg$ )
- $V$  = Volumen del molde de compactación ( $m^3$ )
- $\rho_d$  = Densidad seca de la muestra compactada ( $Mg/m^3$ )
- $W$  = Contenido de agua (%)

## MÉTODO DE ENSAYO DE CBR (RELACIÓN DE SOPORTE DE CALIFORNIA DE SUELOS COMPACTADOS EN LABORATORIO, MTC E 132 [25])

Este ensayo, se realiza con la finalidad de hallar la resistencia a la penetración que tiene un suelo, por lo que el valor que nos brinde este ensayo es el índice de CBR, el cual depende de la granulometría de la muestra, del contenido de finos y de la plasticidad de esta.

### Equipos:

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

### Materiales:

- Juego de tamices para finos, en especial Tamiz N° 4

### Cálculos:

Luego de obtener los resultados de penetración, se realiza una gráfica de presiones vs penetraciones, dicha gráfica si no presenta un punto de inflexión se puede decir que no necesita corrección y se consideran los valores de 2.54mm y 5.08mm, pero, si dicha gráfica presenta un punto de inflexión, esta tendrá que ser corregida según lo que indica la norma.

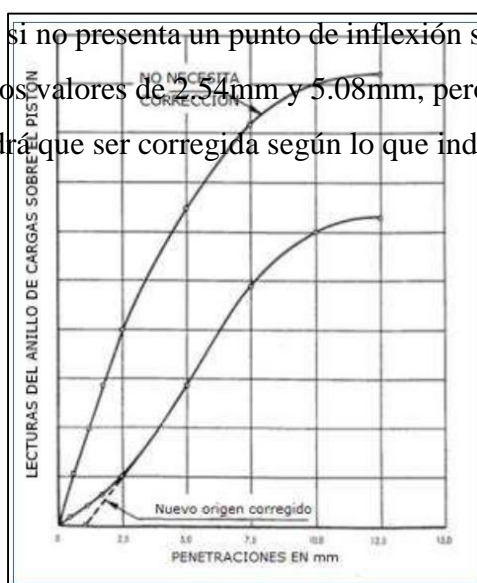


Figura N° 2: Curva para calcular índice de CBR. Fuente: Manual MTC

## CLASIFICACIÓN AASHTO

La clasificación AASHTO, se dio a conocer en el año 1929 con el nombre de Clasificación de la oficina de Caminos Públicos, sin embargo, durante el transcurrir de los años fue siendo modificada obteniendo así la actual norma AASHTO M145, la cual fue propuesta en el año 1945 por el Comité para la clasificación de Materiales para Subrasantes y Caminos tipo granulares del consejo de investigaciones de carreteras.

Esta clasificación divide el grupo de suelos en 7, desde un tipo A-1 hasta A-7, diferenciándose el tipo de material granular del fino por el material pasante por la malla N.º 200, por lo cual si pasa menos del 35 % por esta malla se dice que es un material granular, los cuales están dentro de la clasificación A-1 hasta la A-3 y si pasa más del 35% será un material fino, comprendido en los grupos A-4 hasta A-7.

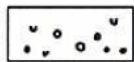

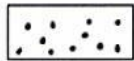
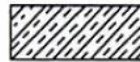


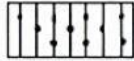


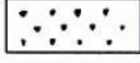



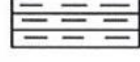

Simbología	Clasificación	Simbología	Clasificación
	A - 1 - a		A - 5
	A - 1 - b		A - 6
	A - 3		A - 7 - 5
	A - 2 - 4		A - 7 - 6
	A - 2 - 5		Materia Orgánica
	A - 2 - 6		Roca Sana
	A - 2 - 7		Roca Desintegrada
	A - 4		

Figura N° 3: Signos convencionales para perfil de calicatas [22].

## METODOLOGÍA DE CLASIFICACIÓN

Clasificación general	Suelos granulares 35% máximo que pasa por tamiz de 0.075 mm (N° 200)							Suelos finos más de 35% pasa por el tamiz de 0.075 mm (N° 200)				
	A-1		A-3	A-2				A-4	A-5	A-6	A-7	
	A-1-a	A-1-b		A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7				A-7-5	A-7-6
<b>Análisis granulométrico</b> % que pasa por el tamiz de:												
2 mm (N° 10)	máx. 50		min. 51									
0.425 mm (N° 40)	máx. 30	máx. 50	máx. 10									
F: 0.075 mm (N° 200)	máx. 15	máx. 25		Máx. 35	máx. 35	máx. 35	máx. 35	min. 36	min. 36	min. 36	min. 36	min. 36
<b>Características de la fracción que pasa el 0.425 (N° 40)</b>												
<b>Características de la fracción que pasa del tamiz (N° 40)</b>												
<b>LL: Límite de Líquido</b>				máx. 40	min. 41	máx. 40	min. 41	máx. 40	Min. 41	máx. 40	min. 41	min. 41
<b>IP: Índice de Plasticidad</b>	máx. 6	máx. 6	NP	máx. 10	máx. 10	min. 11	min. 11	máx. 10	máx. 10	min. 11	min. 11 <sup>(a)</sup>	min. 11 <sup>(b)</sup>
<b>Tipo de material</b>	Piedras, gravas y arenas		Arenas Finas	Gravas y arenas limosas o arcillosas				Suelos limosos		Suelos arcillos		
<b>Estimación general del suelo como sub rasante</b>	Excelente a bueno						Regular a insuficiente					









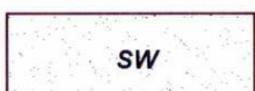

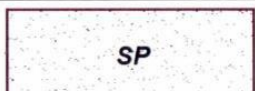

(a) Índice de Plasticidad del subgrupo A-7-5: es igual o menor que LL-30.  
(b) Índice de Plasticidad del subgrupo A-7-6: es mayor que LL-30.  
- Cuando se requiera relacionar los grupos con el Índice de Grupo (IG), estos deben mostrarse entre paréntesis después del símbolo del grupo, ejemplo: A-18:182-6 (3), A-4(5),A-7-5 (17), etc  
 $IG = (F-35) [0.2+0.005 ((LL-40))] +0.01 (F-15)(IP-10)$ .

Tabla N° 4: Clasificación de suelos según normativa AASHTO M 145 [22].

## CLASIFICACIÓN SUCS

Esta metodología de clasificación fue dada por Casagrande en el año 1942, la finalidad era la construcción de los aeropuertos durante la segunda guerra mundial. Sin embargo, en el año 1952, se realizó una revisión integral del sistema con el apoyo de la oficina de restauración de los Estados Unidos para estandarizar su uso hasta la actualidad.

Según esta clasificación, los suelos se dividen en dos grupos, que al igual que el sistema AASHTO el material pasante por la malla N°200, si es menor al 50%, será clasificado como grava (G) o arena (S), pero si pasa más del 50%, el suelo será limo orgánico (M), arcilla inorgánica (C) o limo-arcilla orgánica (O) [22].

	Grava bien graduada mezcla, grava con poco o nada de materia fina, variación en tamaños granulares		Materiales finos sin plasticidad o con plasticidad muy bajo
	Grava mal graduada, mezcla de arena-grava con poco o nada de material fino		Arena arcillosa, mezcla de arena-arcillosa
	Grava limosa, mezcla de grava, arena limosa		Limo orgánico y arena muy fina, polvo de roca, arena fina limosa o arcillosa o limo arcilloso con ligera plasticidad
	Grava arcillosa, mezcla de grava-arena-arcilla; grava con material fino cantidad apreciable de material fino		Limo orgánico de plasticidad baja o mediana, arcilla grava, arcilla arenosa, arena limosa, arcilla magra
	Arena bien graduada, arena con grava, poco o nada de material fino. Arena limpia poco o nada de material fino, amplia variación en tamaños granulares y cantidades de partículas en tamaños intermedios		Limo orgánico y arcilla limosa orgánica, baja plasticidad
	Arena mal graduada con grava poco o nada de material fino. Un tamaño predominante o una serie de tamaños con ausencia de partículas intermedias		Limo inorgánico, suelo fino gravoso o limoso, micacea o diatometacea, limo elástico




	Arcilla inorgánica de elevada plasticidad, arcilla gravosa
	Arcilla orgánicas de mediana o elevada plasticidad, limo orgánico
	Turba, suelo considerablemente orgánico

Figura N° 4: Signos convencionales para perfil de calicatas [22].

## METODOLOGÍA DE CLASIFICACIÓN

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

Figura Nº 5: Clasificación de suelos según SUCS [21].

## SUBRASANTE

Según el manual de carreteras sección suelos y pavimentos, es la capa de superficie finalizada después del movimiento de tierras, sobre la cual se asentará de la infraestructura vial. Además, dicha superficie debe poseer ciertos parámetros aceptables, siendo uno de ellos que los últimos 30 cm de suelo bajo la subrasante compactado al 95% de su máxima densidad seca, dicho dato es obtenido mediante el ensayo de Proctor modificado [22]. Así mismo, existe unas categorías de subrasante que nos brinda el Manual y otro que nos brinda la NTP CE. 010 pavimentos Urbanos.

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

Tabla N° 5: Categoría de subrasante [22].

<b>CATEGORÍAS DE SUBRASANTE</b>	<b>CBR</b>
Subrasante Pobre	$CBR \leq 3\%$
Subrasante Regular	$3\% < CBR < 8\%$
Subrasante Buena	$8\% < CBR < 17\%$
Subrasante Excelente	$CBR \geq 17\%$

Tabla N° 6: Categoría de subrasante [24].

## TIPOS DE ESTABILIZACIÓN

**ESTABILIZACIÓN MECÁNICA:** Este método de estabilización no se modifica la composición del terreno, solo se compacta con la finalidad de disminuir la cantidad de vacíos en este.

**ESTABILIZACIÓN FÍSICA:** Se puede realizar de dos maneras, por combinación de suelos o por sustitución de este.

- ✓ **COMBINACIÓN DE SUELOS:** Esta metodología de estabilización se realiza combinando el suelo natural existente con un material de préstamo, por lo cual previo al proceso de combinación se debe escarificar el terreno natural a una profundidad de 15 cm como mínimo, posterior a esto se realiza la mezcla de suelos y compactación del mismo, considerando los parámetros requeridos como la densidad exigida y el nivel de la subrasante [22].
- ✓ **SUSTITUCIÓN DE SUELOS:** Esta metodología, se puede realizar de dos formas, la primera es realizando la capa de material de préstamo sobre el terreno de suelo existente, para lo cual se escarificará y compactara el terreno natural a una profundidad de 15 cm y la segunda es el remplazo total del terreno natural según lo calculado para el proyecto [22].

**ESTABILIZACIÓN QUÍMICA:** Este proceso de estabilización se fundamenta en las reacciones químicas, el intercambio de iones y la compresión entre las partículas que conforman el suelo y el agente estabilizador, dándose el intercambio de sus iones, con la finalidad de mejorar las propiedades físicas y mecánicas del suelo. Por lo general, este tipo de estabilización es comúnmente usada en los tipos de suelos limo-arcillosos [30].

**ESTABILIZACIÓN TÉRMICA:** Este tipo de estabilización la desarrollaron países como Rusia y Rumania, la cual consiste en incrementar la temperatura en un rango de 200 C° y 400 C°, con la finalidad de que sea para las arcillas imposible rehidratarse para así aumentar su resistencia. [32].

## CENIZAS DE TOTORA:

Según Chambi, la ceniza de totora es obtenida luego de realizar la calcinación de la totora seca, son partículas pequeñas de color gris producto de la quema y están compuestas por sales alcalinas, térreas y óxido metálico [11].

## COMPOSICIÓN QUÍMICA:

Fue obtenida mediante el ensayo de espectrometría de fluorescencia de rayos x, realizado en el laboratorio: “Físico Químico Ambiental Perú S.A.C”, ubicado en la ciudad de Trujillo.

COMPOSICIÓN QUÍMICA	RESULTADOS (%)	MÉTODO UTILIZADO
DIÓXIDO DE SILICIO (SiO <sub>2</sub> )	45.36	Espectrometría de fluorescencia de rayos x
OXIDO DE CALCIO (CaO)	9.84	
TRIOXIDO DE ALUMINIO (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	13.68	
TRIOXIDO DE HIERRO (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	5.95	
OXIDO DE POTASIO (K <sub>2</sub> O)	9.51	
OXIDO DE MAGNESIO (MgO)	1.98	
PENTOXIDO DE FOSFORO (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )	2.17	
OXIDO DE COBRE (CuO)	0.45	
TRIOXIDO DE AZUFRE ( SO <sub>3</sub> )	<0.01	
OXIDO DE ZINC (ZnO)	0.029	
OXIDO DE MANGANESO (MnO)	0.014	
PERDIDA POR QUEMADO	11.02	

Tabla N° 7: Composición química de la ceniza de totora. Fuente: Propia

## CLASIFICACIÓN:

Para la clasificación se tendrá en cuenta la normativa ASTM-C618-19, la cual nos describe los porcentajes que debe de tener en su composición química para ser clasificada como puzolana artificial.

	TABLA 1 Requisitos químicos		
	Clase		
	N	F	C
Dióxido de silicio (SiO <sub>2</sub> ) más óxido de aluminio (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) más óxido de hierro (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ), mín., %	70.0	50.0	50.0
Óxido de calcio (CaO), %	solo informar	18,0 máx.	< 18,0
Trióxido de azufre (SO <sub>3</sub> ), 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 <sup>A</sup>	6,0

<sup>A</sup> El uso de puzolana de Clase F que contenga hasta un 12,0 % de pérdida en ignición puede ser aprobado por el usuario si están disponibles registros de desempeño aceptable o resultados de pruebas de laboratorio.

Tabla N° 8: Requisitos químicas para clasificación de puzolanas. Fuente: ASTM-C618-19 [28].

Por lo observado en la tabla de composición química y en los requisitos que nos brinda la normativa, podemos decir que la ceniza de totora estaría clasificada como una puzolana tipo F, que la suma del SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> y el Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> hacen en conjunto un 64.99%, el CaO es de 9.84, cumpliendo con lo que indica la normativa al igual que el SO<sub>3</sub>.

## DEFINICIÓN DE TÉRMINOS

- ✓ Estabilización de suelos: Es el proceso para mejorar las propiedades físicas y mecánicas como resistencia, plasticidad, densidad y capacidad portante e índice de CBR de un suelo para facilitar la construcción de obras viales, viviendas y proyectos de gran magnitud [15].
- ✓ Estabilización Química: Este tipo de estabilización implica el arranque de las reacciones químicas de los estabilizadores que son el material cementante y los materiales del suelo o puzolánicos para lograr mejorar las propiedades importantes de un suelo para el aspecto ingenieril como la estabilidad volumétrica, resistencia, compresibilidad, durabilidad y permeabilidad [16].
- ✓ Suelos expansivos: son los suelos que al entrar en contacto con el agua sufren problemas de expansión o retracción, peligrando la estructura que se construye sobre este [22].
- ✓ Plasticidad: Propiedad del suelo, que le aporta estabilidad. Sin embargo, esta se ve sujeta hasta cierto límite de humedad [22].
- ✓ Subrasante: capa de terreno a nivel de corte o relleno, donde se asentarán las infraestructuras viales [22].

## MATERIALES Y METODOS

### TIPO DE ESTUDIO

Según [31] la investigación presenta la siguiente tipología:

✓ **SEGÚN SU FINALIDAD.**

El fin que tiene esta investigación es **APLICADA**, puesto que evaluaremos los resultados obtenidos, basándose en los aprendizajes y criterios alcanzados durante el tiempo de la carrera profesional de Ingeniería Civil Ambiental, para solucionar el problema que presentan las subrasantes arcillosas.

✓ **SEGÚN LOS DATOS ANALIZADOS**

Para ello, el desarrollo de la investigación es de tipo **CUANTITATIVA**, debido a que con los valores numéricos que nos brindan los ensayos en laboratorio se podrá analizar la influencia de la ceniza de totora como agente estabilizador en las propiedades físicas y mecánicas suelos arcillosos.

✓ **SEGÚN LA METODOLOGÍA PARA COMPROBAR LA HIPÓTESIS**

El diseño de investigación es de tipo **EXPERIMENTAL**, ya que se busca mediante los ensayos de laboratorio evaluar la influencia de cenizas de totora en el comportamiento geotécnico, específicamente en las propiedades físicas y mecánicas de suelos arcillosos, comprobándose la hipótesis mediante los resultados obtenidos.

## POBLACIÓN Y MUESTRA Y MUESTREO

### POBLACIÓN

Para esta investigación, la población en estudio son las subrasantes arcillosas ubicadas en la ciudad de Ferreñafe clasificadas según la tabla resumen del mapa de peligros de la ciudad de Ferreñafe INDECI, adjuntada líneas abajo, las muestras se tomarán en lugares específicos determinado a juicio del investigador

Cuadro N° 36

CIUDAD DE FERREÑAFE - TIPOS DE SUELO PREDOMINANTE POR SECTORES

SECTOR	ZONA DE INFLUENCIA	TIPO DE SUELO PREDOMINANTE	CONSISTENCIA	EXPANSION DEL SUELO	CAPACIDAD POTANTE	NIVEL FREATICO
I	Se encuentra en: Casi toda el área urbana y áreas de expansión urbana de la ciudad.	Arenas de tipo: SC, SM, SM-SC, SW, SM, Arena Arcillosas, Arena Limosa y Arena con Finos	Blanda a Medio	Suelo de Baja a media expansibilidad	0.70 a 0.90 kg/cm <sup>2</sup>	*
II	Se encuentra al Nor-Este, Centro, Sur-Este y Sur-Oeste Al <b>Nor-Este</b> , a lo largo de la acequia El Pueblo entre las calles Sucre y pasaje Alcántara, incluyendo las intersecciones de las calles Santa Clara con Sucre, la calle Santa Clara con Arequipa y la calle Libertad con Túpac Amaru Al <b>Centro</b> , en las intersecciones de la calle Grau con Tacna y Santa Rosa y la calle San Martín con Unión Al <b>Sur-Este</b> , en las intersecciones de la calle Juana Castro de Bulnes con las calles Tres Marías, San Martín, Nicanor Carmona, Bolívar, Túpac Amaru y Jerusalén, las intersecciones de la calle Ilo con las calles Sucre, Arequipa y Santa Lucía. Al <b>Sur-Oeste</b> , en las intersecciones de la calle Manuel Policarpio con las calles Salcedo Pastor, Juan Gil y Av. Augusto B. Leguía, las intersecciones de la calle Juan M. Sencie con Salcedo Pastor, la Av. Augusto B. Leguía con la calle Casimiro Chumán y la calle Casimiro Chumán con Britaldo Gonzáles y en la Prolongación Norte (límite urbano) de la calle Manuel Policarpio.	Arcillas y Limos de tipo: CL, ML Arcillas y Limos de baja plasticidad. Suelos finos	Blanda a Medio	Suelos de Baja Expansibilidad	0.70 a 0.80 kg/cm <sup>2</sup>	2.00m - 2.50 m
III	Se encuentra al Nor-Este, Centro, Sur-Este y Sur-Oeste Al <b>Nor-Este</b> , incluye a la U.V. Manuel Gonzáles Prada, U.V. Flor de María y parte de la U.V. Héctor Aurich Soto Al <b>Centro</b> , en la intersección de la calle F. Gonzales Burga con la Av. Tacna. Al <b>Sur-Oeste</b> , en las intersecciones de la calle Salvador Peña con las calles Salcedo Pastor, Buenaventura Sialer y Av. Augusto B. Leguía, la intersección de la calle Juan M. Sencie con Buenaventura Sialer, También se encuentra en la periferia de la ciudad a lo largo de los pasajes N° 4 y 5 en el Dist. de Pueblo Nuevo extendiéndose en parte de su entorno inmediato al sur. Al <b>Sur-Este</b> , en la intersección de la calle Ilo con las calles Túpac Amaru, José Olava y Progreso.	Arcillas y Limos de tipo: CH, MH Arcillas y Limos con alta plasticidad. Suelos finos	Blanda a Medio	Suelos de Alta Expansibilidad	0.80 a 0.90 Kg/cm <sup>2</sup>	1.50m - 2.50m
IV	Al <b>Sur-Este</b> , bordeando el área urbana de la ciudad en el área comprendida entre la carretera al Dist. de Mesones Muro y vía de salida al Caserío San Isidro.	Grava Arcillosa: GC	Medio a Dura	Suelos de Baja Expansibilidad	1.20 a 1.50 Kg/cm <sup>2</sup>	*

\* Sin Presencia de Nivel Freatico en el Momento de la Exploración  
FUENTE: "Mapa de Peligros Ciudad de Ferreñafe INDECI Diciembre -2003  
ELABORACIÓN: Equipo Técnico INDECI Mayo 2004

Figura N° 6: Tipos de suelos de la ciudad de Ferreñafe. Fuente: INDECI

### MUESTRA

La muestra por estudiar, son las subrasantes arcillosas presentes en el Sector III al Nor-Oeste, de la ciudad de Ferreñafe, debido a que es un sector representativo de la zona rural y agrícola. Además, como muestra para la presente investigación obtendremos porciones de 250 kg de suelo inalterado de cada calicata a realizar dentro de la zona de estudio, a los cuales serán sometidos a diversos ensayos en laboratorio como el de contenido sales, humedad, granulometría, Proctor y CBR. Además, el tipo de muestra es no probabilística debido a que

## MUESTREO DE ESTUDIO

Para el muestreo se utilizó el no probabilístico y por conveniencia, dado que se seleccionará al conocimiento y juicio del investigador, por lo cual para la presente tesis se realizarán 3 calicatas de terreno natural, por criterio propio con similar estratigrafía, optando el número de puntos de exploración según lo establecido por la norma técnica peruana CE.010 Pavimentos Urbanos, de a los cuales se les adicionara el agente estabilizador en porcentajes de 2%,4%,6%,8% y 10%. Además, el sector seleccionado presenta parte urbana, rural y agrícola.

TIPO DE VÍA	N.º DE PUNTOS DE EXPLORACIÓN	ÁREA (M2)
Expresas	1 cada	2000
Arteriales	1 cada	2400
Colectoras	1 cada </td <td>3000</td>	3000
Locales	1 cada	3600

Tabla N° 9: Número de puntos de exploración según CE.010 Pavimentos Urbanos [24].

Al ser la Ca. A vei Carmen, una calle de poca relevancia respecto a tránsito urbano, será considerada como una calle local, sin embargo, esta es de mucha importancia para el sistema rural especialmente para la U.V Gonzáles Prada que es una de las que conecta el casco urbano con su Urbanización y su sector agrícola

ÁREA: Según el software Google earth pro, el área de la vía a estudiar nos sale un aproximado de 6800 m2, desde el inicio de la Ca. A vei Carmen hasta la intersección con la Ca. 9 de octubre, Ferreñafe.



Figura N° 7 Área de zona de estudio.

Nº de puntos de exploración:

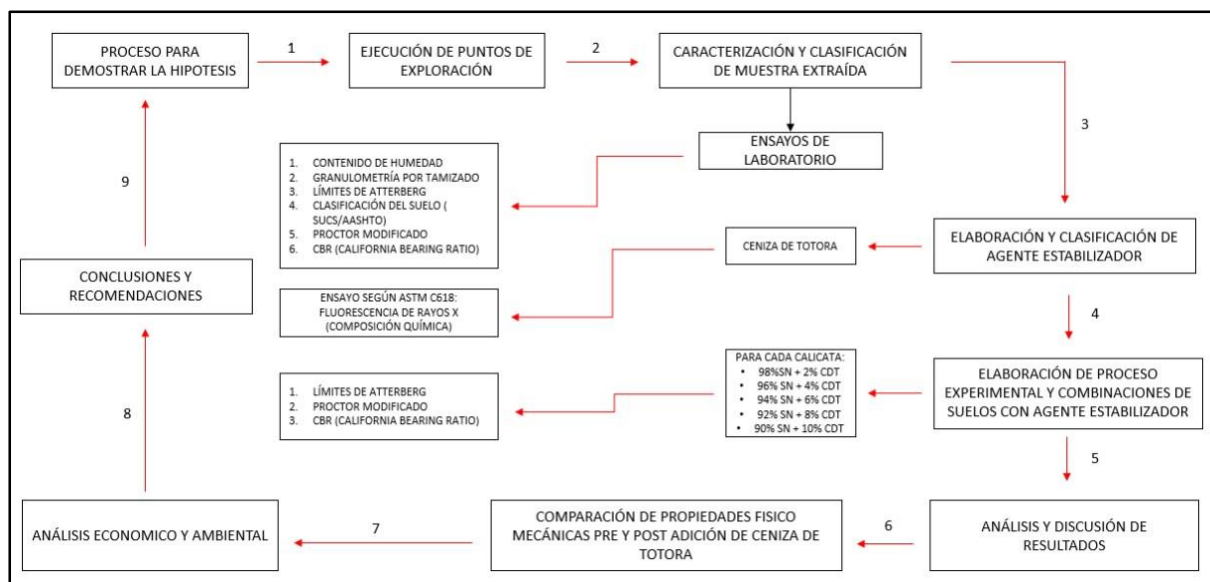
Según el tipo de vía del área de estudio de terminada y su área calculada se obtienen los puntos de exploración mediante la siguiente expresión  $6800\text{m}^2/3600\text{m}^2 = 1.44 \approx 2$  puntos de investigación. No obstante, se optó por realizar 3 calicatas con la finalidad de tener un mejor muestreo y caracterización del suelo a estudiar, realizando las calicatas a una profundidad de 1.50m, con el fin de que sean muestras representativas de una subrasante. Además, se plantea realizar los siguientes ensayos a las adiciones de suelo natural con ceniza de tatora, para verificar nuestra hipótesis.

CANTIDAD DE MUESTRAS Y ENSAYOS						
	GRANULOMETRIA	SALES SOLUBLES	LL	LP	PROCTOR	CBR
C-1	1	1	1	1	1	1
C-1 + 2% CDT	-	-	1	1	1	1
C-1 + 4% CDT	-	-	1	1	1	1
C-1 + 6% CDT	-	-	1	1	1	1
C-1 + 8% CDT	-	-	1	1	1	1
C-1 + 10% CDT	-	-	1	1	1	1
C-2	1	1	1	1	1	1
C-2 + 2% CDT	-	-	1	1	1	1
C-2 + 4% CDT	-	-	1	1	1	1
C-2 + 6% CDT	-	-	1	1	1	1
C-2 + 8% CDT	-	-	1	1	1	1
C-2 + 10% CDT	-	-	1	1	1	1
C-3	1	1	1	1	1	1
C-3 + 2% CDT	-	-	1	1	1	1
C-3 + 4% CDT	-	-	1	1	1	1
C-3 + 6% CDT	-	-	1	1	1	1
C-3 + 8% CDT	-	-	1	1	1	1
C-3 + 10% CDT	-	-	1	1	1	1
<b>TOTAL</b>	<b>3</b>	<b>3</b>	<b>18</b>	<b>18</b>	<b>18</b>	<b>18</b>

Tabla Nº 10: Muestreo. Fuente: Propia.

## HIPOTESÍS

La adición de ceniza de totora en porcentaje óptimo mejorará las propiedades físicas y mecánicas del suelo arcilloso como la densidad, humedad y resistencia en la zona agrícola y rural de la ciudad de Ferreñafe, Provincia de Ferreñafe, Departamento de Lambayeque



Gráfica N° 1 Proceso de demostración de hipótesis. Fuente: Propia

## VARIABLES Y OPERACIONALIZACIÓN

### VARIABLES

Se identificó el objeto de estudio, también la variable dependiente e independiente siendo todas estas de tipo cuantitativo.

Objeto de Estudio	Variable independiente	Variable dependiente
Suelo Arcilloso de la zona agrícola y rural de la provincia de Ferreñafe	Adicción de cenizas de totora	Mejora de propiedades físicas y mecánicas del suelo estabilizado

Tabla N° 11 : Variables de operacionalización. Fuente: Propia.

## CUADRO DE OPERACIONALIZACIÓN

Variable	Dimensión	Indicador	Medición	Instrumento	Rangos
<b>Variable Independiente: Adición de cenizas de totora</b>	<b>Cenizas de totora</b>	Cant. Cenizas de Totora	% de peso	Balanza Elec. Aproximación 0.1 g	2 ,4 ,6, 8 Y 10 %
		Diámetro de Cenizas Totora	mm	Tamiz N°30	< 0.6 mm
<b>Variable dependiente: Mejora de propiedades físicas y mecánicas del suelo estabilizado</b>	<b>Propiedades físico –químicas</b>	Contenido Humedad	%	Ensayo de contenido de humedad NTP 339.127	-
		Plasticidad	%	Ensayo de para determinar LL, LP e IP NTP 339.129	-
		Contenido de sales	%	Ensayo de Sales solubles totales en suelos (NTP 339.152/ MTC E 219)	-
		Tamaño de partículas	mm	Ensayo Granulométrico NTP 339.128	-
	<b>Propiedades mecánicas</b>	% Optimo contenido de Humedad	% de peso	Ensayo de Proctor Modificado NTP 339.141	-
		Máxima Densidad Seca	g/cm <sup>3</sup>	MTC E115	-
		Índice de CBR	%	Ensayo CBR MTC E 132 /ASTM D 1883	-

*Tabla N° 12:* Tabla de operacionalización de variables. Fuente: Propia.

## TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS

El proceso que se empleó para realizar la estabilización química del suelo arcilloso de la ciudad de Ferreñafe se realizará en el tiempo pronosticado de como indica el cronograma a través de los ensayos mostrados líneas abajo según la Norma Técnica peruana, se buscará mejorar la capacidad de carga del suelo pobre mediante la adición de cenizas de totora mejorando sus propiedades físicas y mecánicas como la resistencia, plasticidad, densidad y capacidad portante. Las muestras de suelo se extraerán de calicatas que se realizarán en el área de estudio, la cual abarca diferentes puntos de la ciudad de Ferreñafe pertenecientes a la zona agrícola y rural.

Para la obtención de Totora, esta será extraída de los drenes y acequias propias de la ciudad, la cual no se aprovecha, ya que es desechada durante la limpieza de acequias y drenes para la temporada de sembrado de arroz en los meses de verano, luego para el proceso de obtención de cenizas se realizará un horno casero a base de ladrillos de arcilla realizando una combustión controlada a temperatura óptima para eliminar material orgánico y sales.

### TÉCNICA

Muestreo de suelos según lo que indica el MTC E-101 [25].

Se obtendrá la recolección de datos a través del desarrollo experimental, la cual será aplicada a través de los ensayos controlados en laboratorios por las Norma Técnica Peruana, para el registro de datos se hará en base a los protocolos normalizados por el Manual de Ensayos de Materiales del MTC

TÉCNICA	INSTRUMENTO	APLICACIÓN
Desarrollo Exp.	Hojas de registro	Ensayos de Lab.
Análisis de documentos	Fichas de registro	Fuentes Primarias y secundarias de información

Tabla N° 13: Técnicas e instrumentos de recolección de datos. Fuente: Propia.

## **INSTRUMENTO**

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

- hojas de cálculo
- gráficos
- cuadros comparativos

## **PROCESAMIENTO DE DATOS**

Para el análisis y proceso de datos respecto a la influencia de la adición de cenizas de totora en suelos arcillosos, se usará el software de hoja de cálculo Excel como herramienta para realizar los formatos que contengan los ítems necesarios para registrar los datos obtenidos de los ensayos realizados en laboratorio y presentar los resultados de la investigación a través de gráficos dinámicos de barras, histogramas o líneas de dispersión.

## **PROCEDIMIENTO**

### **EJECUCIÓN DE CALICATAS**

Para realizar la investigación y ejecución de puntos de exploración, inicialmente se realizó una visita preliminar a la zona, para visualizar el estado de las vías, la transitabilidad y sobre todo los indicios de presencia de arcillas. Posterior a ello, se buscó bibliografía referente a la ciudad y zona seleccionada, sobre el tipo de suelo y los problemas que generan estos en las obras de pavimentación, optando por realizar los puntos de exploración en la zona rural y agrícola de la urb. Manual Gonzales Prada y sectores aledaños, que según el mapa de riesgos que realizó INDECI, son sectores con presencia de arcillas. Además, el trabajo de campo consistió en la realización de tres (03) calicatas realizadas de manualmente a una profundidad de 1.50 m, ubicadas de forma secuencial y ordenada para tener una mejor caracterización de la zona de estudio

Adicionalmente, se tomó una (01) muestra alterada por cada estrato, las muestras tomadas y almacenadas correctamente para llevar al laboratorio para la realización de los ensayos pertinentes, las calicatas realizadas fueron identificadas como C-1, C-2, y C-3. En la imagen N.º se presenta la distribución de las calicatas en el área de estudio.

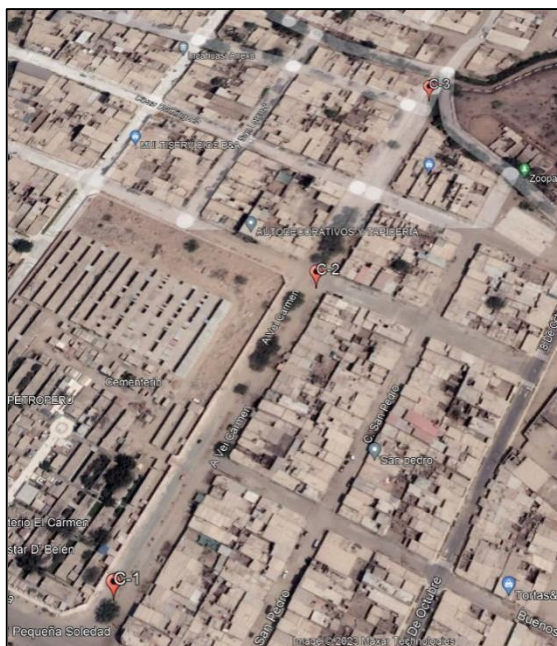


Figura N° 8: Distribución de calicatas. Fuente: Google Earth.

**GEORREFERENCIACIÓN:** UTM WGS84 – 17M

CALICATA	ESTE	NORTE
C-1	634363.90	9266876.40
C-2	634455.30	9267044.10
C-3	634521.60	9267177.60

Tabla N° 14: Distribución de calicatas. Fuente: Google Earth.

De la muestra extraída, se recuperaron muestras representativas alteradas por su condición fina cohesiva, de cada calicata en proporciones suficientes, las cuales se almacenaron en sacos de propilenos, mediante las cuales se realizó el traslado al laboratorio. A la par con la extracción de las muestras, se fue registrando e identificando las características de los estratos como el color, plasticidad, humedad, ubicación, etc. También, estas muestras se clasificaron siguiendo el procedimiento in situ que nos brinda la NTP 339.150 “Descripción e identificación de suelos procedimiento visual-manual”. Además, en ninguna calicata se encontró presencia de agua o nivel freático, así mismo de cada calicata realizada se obtuvo una muestra de 250 kg aprox.





*Figura N° 11: Calicata C-3. Fuente: Propia.*

Posterior a ello, se realizó los perfiles estratigráficos de cada calicata, en el cual se detalla las características del suelo.

<b>PERFIL ESTRATIGRÁFICO</b>										
<b>EXPLORACIÓN: C-1</b>										
<b>PROYECTO:</b>	"ANÁLISIS DE PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICA EN SUELOS LIMO - ARCILLOSOS , ADICIONANDO PORCENTAJES DE SCHOENOPLECTUS CALIFORNICUS"									
<b>SOLICITANTE:</b>	FLAVIO ANDRE FERNANDEZ BERNAL									
<b>UBICACIÓN:</b>	FERREÑAFE - LAMBAYEQUE									
<b>FECHA EXCAVACION:</b>	viernes, 2 de septiembre de 2022	<b>TIPO DE EXCAVACIÓN:</b>	MANUAL							
<b>N.A.F.:</b>	No encontrado a la profundidad de excavación									
<b>COORDENADAS:</b>	<b>E = 633883</b>		<b>N = 9264538</b>							
PROFUNDIDAD	ESTRAT	DESCRIPCION	SUCS	AASHTO	HUMED.	L.L.	L.P.	I.P.	SALES	IDENTIFIC.
0.00	Ø									
0.10	0.10	-	Relleno con material suelto			-	-	-	-	-
0.20										
0.30										
0.40										
0.50										
0.60										
0.70										
0.80										
0.90	1.50	M-1	Suelo de matriz arcillo limosa de coloración marrón claro. Presenta material compacto, textura suave, estructura fina, poco húmedo y moldeable.	CL -ML	A-6	4.93	31	12	19	0.60
1.00										
1.10										
1.20										
1.30										
1.40										
1.50										
1.60										

Figura N.ª 12: Perfil estratigráfico Calicata C-1. Fuente: Propia.

### Calicata 1 (C-1)

- ✓ – 0.10 m. Relleno con material suelto
- ✓ 0.10 – 1.60 m. Suelo de matriz arcillo limosa de coloración marrón claro. Presenta material compacto, textura suave, estructura fina, poco húmedo y moldeable. Suelo clasificado como CL-ML (Arcilla Limosa de baja plasticidad) según SUCS y A-6 (19), según AASHTO.

<b>PERFIL ESTRATIGRÁFICO</b>										
<b>EXPLORACIÓN: C-2</b>										
<b>PROYECTO:</b>	"ANÁLISIS DE PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICA EN SUELOS LIMO - ARCILLOSOS , ADICIONANDO PORCENTAJES DE SCHOENOPLECTUS CALIFORNICUS"									
<b>SOLICITANTE:</b>	FLAVIO ANDRE FERNANDEZ BERNAL									
<b>UBICACIÓN</b>	FERREÑAFE - LAMBAYEQUE									
<b>FECHA EXCAVACION</b>	viernes, 2 de septiembre de 2022				<b>TIPO DE EXCAVACIÓN:</b>	MANUAL				
<b>N.A.F.</b>	No encontrado a la profundidad de excavación									
<b>COORDENADAS: E = 634825 N = 9266474</b>										
PROFUNDIDAD	ESTRAT	DESCRIPCION	SUCS	AASHTO	HUMED.	L.L.	L.P.	I.P.	SALES	IDENTIFIC
0.00										
0.10	-	Relleno con material suelto			-	-	-	-	-	
0.20										
0.30										
0.40										
0.50										
0.60										
0.70										
0.80										
0.90	1.50	M-1	CL-ML	A-6 (1)	27.56	37	17	20	0.95	
1.00		Suelo de matriz arcillo limosa de coloración marrón claro. Presenta material compacto, textura suave, estructura fina, poco húmedo y moldeable.								
1.10										
1.20										
1.30										
1.40										
1.50										
1.60										

Figura N° 13: Perfil estratigráfico Calicata C-2. Fuente: Propia.

### Calicata 2 (C-2)

- ✓ – 0.10 m. Relleno con material suelto
- ✓ 0.10 – 1.60 m. Suelo de matriz arcillo limosa de coloración marrón claro. Presenta material compacto, textura suave, estructura fina, húmedo y moldeable. Suelo clasificado como CL-ML (Arcilla Limosa de baja plasticidad) según SUCS y A-6 (20), según AASHTO.

<b>PERFIL ESTRATIGRÁFICO</b>										
<b>EXPLORACIÓN: C-3</b>										
<b>PROYECTO:</b>	"ANÁLISIS DE PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICA EN SUELOS LIMO - ARCILLOSOS , ADICIONANDO PORCENTAJES DE SCHOENOPLECTUS CALIFORNICUS"									
<b>SOLICITANTE:</b>	FLAVIO ANDRE FERNANDEZ BERNAL									
<b>UBICACIÓN:</b>	FERREÑAFE - LAMBAYEQUE									
<b>FECHA EXCAVACION:</b>	viernes, 2 de septiembre de 2022				<b>TIPO DE EXCAVACIÓN:</b>	MANUAL				
<b>N.A.F.:</b>	No encontrado a la profundidad de excavación									
<b>COORDENADAS: E = 635485 N = 9265026</b>										
PROFUNDIDAD	ESTRAT O	DESCRIPCION	SUCS	AASHTO	HUMED.	L.L.	L.P.	I.P.	SALES	IDENTIFIC
0.00										
0.10	0.10	Relleno con material suelto			-	-	-	-	-	
0.20										
0.30										
0.40										
0.50										
0.60										
0.70										
0.80										
0.90	1.50	M-1	Suelo de matriz arcillo limosa de coloración marrón claro. Presenta material compacto, textura suave, estructura fina, poco húmedo y moldeable.	CL-ML	A-6	13.53	34	15	19	0.85
1.00										
1.10										
1.20										
1.30										
1.40										
1.50										
1.60										

Figura N° 14: Perfil estratigráfico Calicata C-3. Fuente: Propia.

### Calicata 3 (C-3)

- ✓ – 0.10 m. Relleno con material suelto
- ✓ 0.10 – 1.60 m. Suelo de matriz arcillo limosa de coloración marrón claro. Presenta material compacto, textura suave, estructura fina, húmedo y moldeable. Suelo clasificado como CL-ML (Arcilla Limosa de baja plasticidad) según SUCS y A-6 (19), según AASHTO.

Luego de haber obtenido la muestra de suelo arcillosos, se procedió a realizar los ensayos de mecánica de suelos para la caracterización de estos y obtener los datos de investigación correspondiente.

## ENSAYO DE CONTENIDO DE HUMEDAD

Según la normativa que nos brinda el MTC E-108, la humedad es una relación entre el peso de los sólidos de la muestra y el agua contenida en esta, para realizar el ensayo de contenido de humedad, lo primero es realizar un cuarteo, para tener la muestra en cuatro porciones y seleccionar muestras representativas, las cuales serán puestas en taras previamente pesadas, para así poder obtener el peso de la tara y el peso de la muestra. Luego, estas muestras serán expuestas a una temperatura de 110 C° por 24 horas en el Horno. Finalmente, después de haberse cumplido las 24 horas, la muestra será extraída dejándolas enfriar a temperatura ambiente para poder realizar el cálculo de contenido de humedad.



Figura N° 15: Ensayo de Contenido de Humedad. Fuente: Propia.

## ENSAYO DE ANALISIS GRANULOMÉTRICO POR TAMIZADO

Según la normativa del MTC E-107, el ensayo granulométrico consiste distribuir por tamices la muestra extraída de la calicata y anotar el peso retenido en cada tamiz, para finalmente verificar que la sumatoria de la muestra retenida en cada tamiz sea igual a la muestra inicial antes del ensayo.



Figura N° 16: Ensayo de Granulometría, tamizado. Fuente: Propia.

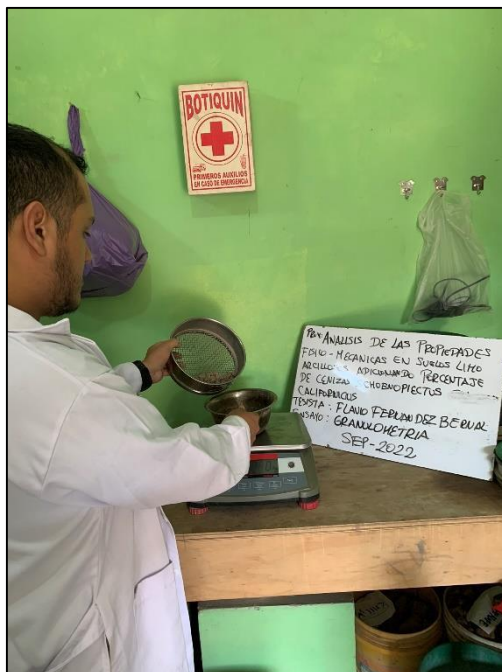


Figura N° 17: Ensayo de Granulometría, peso de muestra retenida. Fuente: Propia.

## ENSAYO DE LÍMITE LÍQUIDO

Este ensayo se realiza bajo la normativa del MTC E-110, consiste en saturar una porción de muestra durante 24 horas, para luego con el apoyo de la Cuchara de Casagrande, la cual debemos verificar que tenga un certificado de calibración actual y con el ranurador se pueda realizar el corte en la parte central de la cuchara, la cual debe tener aproximadamente 13 mm. Luego empezamos a girar la manija de la cuchara, contando los golpes que generaran que el corte de la parte central de la cuchara se junte o cierre.

La cantidad de golpes por lo general varía ente 4 a 40, lo cuales deben registrarse en 4 etapas:

- ✓ Primera etapa: 30 a 40 golpes
- ✓ Segunda etapa: 20 a 30 golpes
- ✓ Tercera etapa: 10 a 20 golpes
- ✓ Cuarta etapa: 4 a 10 golpes

Sin embargo, si la muestra no cierra dentro este rango, se le añade unos ml de agua, para realizar el proceso nuevamente, pero en un rango de 20 a 30 golpes. Finalmente, se pone la muestra de la cuchara en una tara previamente pesada y se pone al horno durante 24 horas a una temperatura de 110 °C, después de ello se extrae la muestra y se realiza el cálculo de humedad.

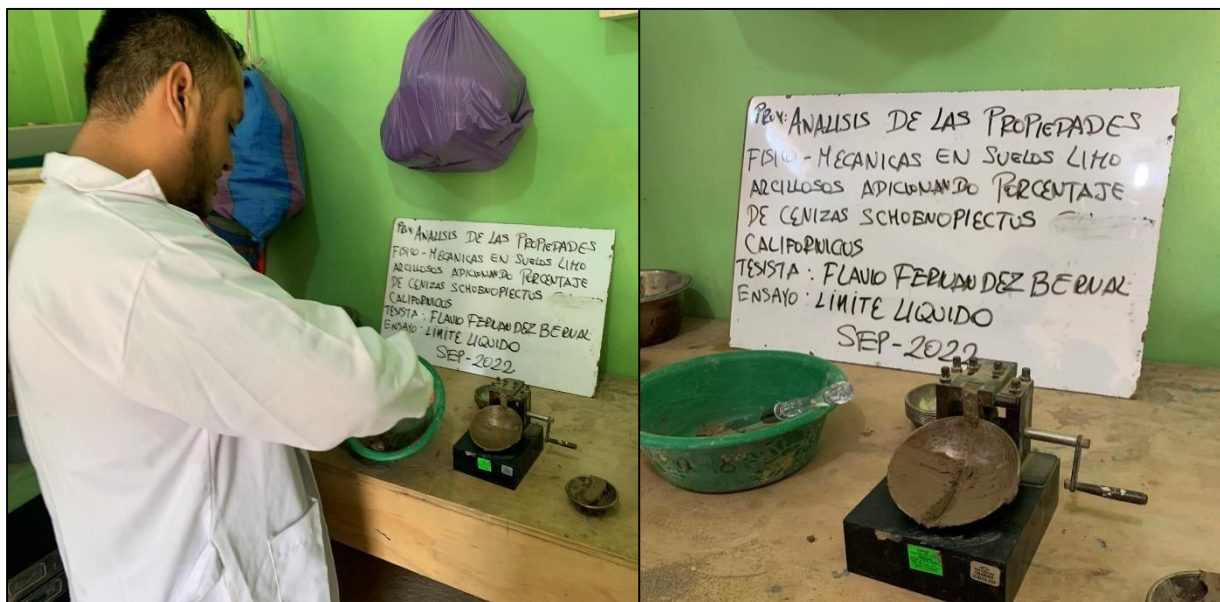


Figura N° 18: Ensayo de Límite líquido. Fuente: Propia.

## ENSAYO DE LÍMITE PLÁSTICO E ÍNDICE DE PLASTICIDAD

Este ensayo sigue la normativa del MTC E-111, el cual indica que de la muestra se realizan cilindros de diámetro de 3mm aproximadamente, los cuales al igual que en el ensayo de límite líquido, serán llevados al horno por 24 horas a una temperatura de 110 °C, para poder calcular su humedad. Luego de ello, calcular el índice de plasticidad restando ambos límites.



Figura N° 19: Ensayo de Límite plástico. Fuente: Propia.

## ENSAYO DE PROCTOR MODIFICADO

Este ensayo se realiza siguiendo la normativa del MTC E-115, para este ensayo se toma 3 muestras de cada punto de exploración, con la finalidad de determinar el óptimo contenido de humedad y la máxima densidad seca, es por ello por lo que cada molde debe contener un contenido de humedad distinto, sin embargo, todos deberá rellenar el molde en 5 capas, la cuales serán compactadas con 25 golpes cada una.



Figura N. ° 20: Ensayo de Proctor modificado. Fuente: Propia.

## ENSAYO DE RELACIÓN DE SOPORTE DE CALIFORNIA (CBR)

Este ensayo se realiza siguiendo la normativa del MTC E – 132, el cual se realizará a cada una de las calicatas realizadas y a sus adiciones correspondientes, para obtener el porcentaje de expansión y la densidad seca del suelo compactado a los 12,26 y 55 golpes, con la finalidad de obtener el CBR a una penetración de 0.1” y 0.2” a una MDS de 95% y 100%



Figura N° 21: Ensayo de CBR. Fuente: Propia.

## ENSAYO DE ANALISIS QUÍMICO POR FLUORESCENCIA DE RAYOS X PARA CENIZAS DE TOTORA

Este ensayo se realizó en las instalaciones del laboratorio de ensayos químicos y servicios generales “Laboratorio Físico Químico Ambiental Perú S.A.C” de la ciudad de Trujillo.

Este ensayo, consiste en someter una muestra de partículas a una fuente de radiación de rayos X, la cual expulsa electrones de las capas internas del átomo, los cuales ocuparan los espacios vacíos y el exceso de energía generado, se disipan en fotones o radiación X fluorescente, los cuales se caracterizan por poseer una longitud de onda que va a depender del gradiente de energía y la intensidad relacionada con la concentración de los elementos de la muestra a ensayar.

Para la investigación, se analizó 35 mg de cenizas de totora en un espectrómetro de fluorescencia de rayos X marca BRUKER, modelo S2-PICOFOX, con la finalidad de conocer la composición química de la ceniza de totora, para así poder clasificarla según la norma ASTM C-618.



*Figura N° 22: Espectrómetro de rayos X. Fuente: Propia.*

## PROCESO DE OBTENCIÓN DE CENIZA DE TOTORA

Para la obtención de la ceniza de totora lo primero que se realizó, fue la compra de esta en la ciudad de Santa Rosa de forma seca, a los comerciantes de la ciudad que la recolectan y la emplean para el uso de caballitos de Totorá, ya que la mayoría de su población son pescadores. Se realizó la compra de dos tercios de totora, la cual tienen un peso aproximado de 60 Kg. Luego fue trasladada hasta la ciudad de San José, al laboratorio donde realice mis ensayos. Luego de realizar la compra y el traslado de la totora, se construyó un horno casero de mampostería de 1m<sup>3</sup>, con el fin de realizar la calcinación de la totora al aire libre.



*Figura N° 23: Horno de mampostería. Fuente: Propia.*

Se procede a realizar el quemado con ayuda de un mechero que fue colocado dentro del horno para que el fuego pueda extenderse y se realice un quemado uniforme. Una vez que el fuego, está estable se procede a tapar el horno con una lámina metálica, es preciso decir que el proceso de calcinación demora un promedio de 6-8 horas.



*Figura N° 24: Totora calcinada. Fuente: Propia*

Además, con la finalidad de poder calcular la temperatura a la cual se estaban quemando la totora, se utilizó una pistola de termómetro infrarrojo de temperatura Laser marca Fluke.



*Figura N° 25: Medición de temperatura en horno. Fuente: Propia*

La medición de temperatura se realizó durante el quemado de la totora, se tomaron distintas mediciones en un intervalo de 4-6 horas obteniendo como resultados que la temperatura promedio suministrada por el horno casero fue superior a los 400° C.

MEDICIÓN	DÍA	HORA	TEMPERATURA
Medición N° 01	02/09/2022	11:00 a.m	500.3
Medición N° 02	02/09/2022	01:00 p.m	472.4
Medición N° 03	02/09/2022	04:00 p.m	435.3

*Tabla N° 15: Mediciones de temperatura en horno. Fuente: Propia*

Luego de dejar enfriar la ceniza en el horno se procedió a tamizarla por la malla N° 30, utilizando el pasante de esta con la finalidad de evitar los grumos y partículas que no fueron quemadas uniformemente



*Figura N° 26: Muestra de ceniza de Totorá. Fuente: Propia*

## ELABORACIÓN DE MUESTRAS EXPERIMENTALES

Las muestras experimentales serán compuestas por suelo natural de cada calicata adicionándole el agente estabilizador, en este caso la ceniza de totora. Para ello es necesario obtener el peso seco de la muestra seca empleando las fórmulas de contenido de humedad, despejando la ecuación y hallando el contenido de agua, para así mediante la diferencia algebraica obtener el peso de la muestra seca.

$$P_w = \frac{\frac{w}{100} (\text{Peso suelo húmedo})}{(1 + \frac{w}{100})}$$

Aplicando la fórmula despejada, se obtiene lo siguiente:

### Calicata 01 (C-1)

#### Datos:

- ✓ Humedad: 4.93
- ✓ Peso suelo húmedo: 30.00 Kg

#### Reemplazando en la ecuación:

$$P_w = \frac{\frac{4.93}{100} (30)}{(1 + \frac{4.93}{100})}$$

$$P_w = 1.41$$

#### Peso seco de la muestra:

$$\text{Peso seco} = \text{Peso húmedo} - \text{Peso el agua}$$

$$\text{Peso seco} = 30 \text{ kg} - 1.41 \text{ kg}$$

$$\text{Peso seco} = 28.59 \text{ kg}$$

El mismo criterio se usará para las calicatas C-2 y C-3.

### Calicata 02 (C-2)

#### Datos:

- ✓ Humedad: 27.56
- ✓ Peso suelo húmedo: 30.00 Kg

**Reemplazando en la ecuación:**

$$P_w = \frac{\frac{27.56}{100} (30)}{(1 + \frac{27.56}{100})}$$

$$P_w = 6.48$$

**Peso seco de la muestra:**

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

$$Peso\ seco = 30\ kg - 6.48\ kg$$

$$Peso\ seco = 23.52\ kg$$

**Calicata 03 (C-3)**

**Datos:**

- ✓ Humedad: 13.53
- ✓ Peso suelo húmedo: 30.00 Kg

**Reemplazando en la ecuación:**

$$P_w = \frac{\frac{13.53}{100} (30)}{(1 + \frac{13.53}{100})}$$

$$P_w = 3.58$$

**Peso seco de la muestra:**

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

$$Peso\ seco = 30\ kg - 3.58\ kg$$

$$Peso\ seco = 26.42\ kg$$

### Cálculo de adicción a la muestra natural

C-1			C-2			C-3		
<b>COMBINACIÓN 1: 98% SN + 2%</b>			<b>COMBINACIÓN 1: 98% SN + 2%</b>			<b>COMBINACIÓN 1: 98% SN + 2%</b>		
<b>CDT</b>			<b>CDT</b>			<b>CDT</b>		
CDT	$0.02 \cdot 28.59$	0.57 kg	CDT	$0.02 \cdot 23.52$	0.47 kg	CDT	$0.02 \cdot 26.42$	0.53 kg
SUELO	$Pw + 0.98 \cdot 28.59$	29.43 kg	SUELO	$Pw + 0.98 \cdot 23.52$	29.53 kg	SUELO	$Pw + 0.98 \cdot 26.42$	29.47 kg
$\Sigma$ DE PESOS		30.00 kg	$\Sigma$ DE PESOS		30.00 kg	$\Sigma$ DE PESOS		30.00 kg
<b>COMBINACIÓN 2: 96% SN + 4%</b>			<b>COMBINACIÓN 2: 96% SN + 4%</b>			<b>COMBINACIÓN 2: 96% SN + 4%</b>		
<b>CDT</b>			<b>CDT</b>			<b>CDT</b>		
CDT	$0.04 \cdot 28.59$	1.14 kg	CDT	$0.04 \cdot 23.52$	0.94 kg	CDT	$0.04 \cdot 26.42$	1.06 kg
SUELO	$Pw + 0.96 \cdot 28.59$	28.86 kg	SUELO	$Pw + 0.96 \cdot 23.52$	29.06 kg	SUELO	$Pw + 0.96 \cdot 26.42$	28.94 kg
$\Sigma$ DE PESOS		30.00 kg	$\Sigma$ DE PESOS		30.00 kg	$\Sigma$ DE PESOS		30.00 kg
<b>COMBINACIÓN 3: 94% SN + 6%</b>			<b>COMBINACIÓN 3: 94% SN + 6%</b>			<b>COMBINACIÓN 3: 94% SN + 6%</b>		
<b>CDT</b>			<b>CDT</b>			<b>CDT</b>		
CDT	$0.06 \cdot 28.59$	1.72 kg	CDT	$0.06 \cdot 23.52$	1.41 kg	CDT	$0.06 \cdot 26.42$	1.59 kg
SUELO	$Pw + 0.94 \cdot 28.59$	28.28 kg	SUELO	$Pw + 0.94 \cdot 23.52$	28.59 kg	SUELO	$Pw + 0.94 \cdot 26.42$	28.41 kg
$\Sigma$ DE PESOS		30.00 kg	$\Sigma$ DE PESOS		30.00 kg	$\Sigma$ DE PESOS		30.00 kg
<b>COMBINACIÓN 4: 92% SN + 8%</b>			<b>COMBINACIÓN 4: 92% SN + 8%</b>			<b>COMBINACIÓN 4: 92% SN + 8%</b>		
<b>CDT</b>			<b>CDT</b>			<b>CDT</b>		
CDT	$0.08 \cdot 28.59$	2.29 kg	CDT	$0.08 \cdot 23.52$	1.88 kg	CDT	$0.08 \cdot 26.42$	2.11 kg
SUELO	$Pw + 0.92 \cdot 28.59$	27.71 kg	SUELO	$Pw + 0.92 \cdot 23.52$	28.12 kg	SUELO	$Pw + 0.92 \cdot 26.42$	27.89 kg
$\Sigma$ DE PESOS		30.00 kg	$\Sigma$ DE PESOS		30.00 kg	$\Sigma$ DE PESOS		30.00 kg
<b>COMBINACIÓN 5: 90% SN + 10%</b>			<b>COMBINACIÓN 5: 90% SN + 10%</b>			<b>COMBINACIÓN 5: 90% SN + 10%</b>		
<b>CDT</b>			<b>CDT</b>			<b>CDT</b>		
CDT	$0.10 \cdot 28.59$	2.86 kg	CDT	$0.10 \cdot 23.52$	2.35 kg	CDT	$0.10 \cdot 26.42$	2.64 kg
SUELO	$Pw + 0.9 \cdot 28.59$	27.14 kg	SUELO	$Pw + 0.90 \cdot 23.52$	27.65 kg	SUELO	$Pw + 0.90 \cdot 26.42$	27.36 kg
$\Sigma$ DE PESOS		30.00 kg	$\Sigma$ DE PESOS		30.00 kg	$\Sigma$ DE PESOS		27.89 kg

Figura N° 27: Cuantificación de adicción para calicatas. Fuente: Propia

Luego de calcular la cuantificación se procede a realizar la mezcla de la ceniza con el suelo natural según los porcentajes

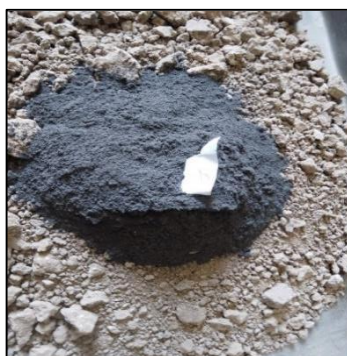


Figura N° 28: Adición de ceniza de totora a Suelo natural. Fuente: Propia.

## **PROCEDIMIENTO DE ESTABILIZACIÓN IN SITU CON CENIZAS DE TOTORA EN SUELOS ARCILLOSOS**

1. Verificar que la subrasante se encuentre libre de elementos orgánicos extraños
2. Escarificar la subrasante con uñas de motoniveladora hasta una profundidad mínima de 15 cm o la indicada en el estudio de mecánica de suelos
3. Agregar 145 kg de CDT por m<sup>3</sup> de suelo a estabilizar, es decir para estabilizar 1km de subrasante de 6m de calzada, con 20 cm de profundidad se necesitaría  $1000*6*0.20*145= 147\text{tn x km}$
4. La aplicación de la ceniza al suelo arcilloso debe ser en forma homogénea verificando que no se conformen grumos y que se mantenga suelta encima de la subrasante escarificada
5. Con ayuda de la motoniveladora, se deberá batir el material para mezclar la ceniza con el suelo natural, el cual se realizará en forma longitudinal de un lado a otro, mínimo 4 veces, 2 de ida y 2 de vuelta, se continuará con el batido, hasta que la mezcla este uniforme.
6. Proceder al riego del material batido, con la cantidad agua necesaria que permita lograr la máxima densidad seca, teniendo en cuenta el óptimo contenido de humedad del estudio de mecánica de suelos realizado
7. Verificar la humedad óptima mediante un ensayo in-situ
8. Batir nuevamente con la motoniveladora para homogeneizar la distribución del agua encima del suelo
9. Conformar la subrasante según los niveles topográficos, indicados en las plantillas del eje de la vía, hombro derecho y hombro izquierda.
10. En el proceso de conformación de la subrasante, se debe tener en cuenta el factor de esponjamiento del suelo
11. Una vez, conformada la subrasante se procederá a compactar con ayuda del rodillo liso vibratorio, empezando desde los bordes hacia el centro de la vía
12. Verificar con un ensayo de densidad de campo, se cumpla con el 95% de la Máxima densidad seca.
13. Una vez realizado el mejoramiento de subrasante y verificando que se cumplen los parámetros mínimos establecidos en el manual de carreteras del MTC, se procede a realizar todo el proceso de pavimentación ya sea del tipo flexible o rígida.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### RESULTADOS

#### CARACTERIZACIÓN DE MUESTRAS NATURALES EXTRAIDAS DE CALICATAS.

Las muestras extraídas, fueron obtenidas en campo, las cuales corresponde a las calicatas realizadas, las cuales al momento de extraerlas se tomó las medidas necesarias para evitar alterar sus propiedades naturales.

Para caracterizar las propiedades físicas y mecánicas de las muestras extraídas se realizaron los ensayos propuestos por el MTC como: contenido de humedad, granulometría por tamizado, límites de consistencia, Proctor modificado, Compresión simple no confinada y relación de soporte de california (CBR), obteniéndose los resultados de a continuación:

#### CONTENIDO DE HUMEDAD DE MUESTRAS DE SUELO NATURAL

Como se mencionó líneas arriba este ensayo se realizó siguiendo la norma del MTC E-108, la cual mide la relación del agua y el peso de los sólidos presente en la muestra.

CONTENIDO DE HUMEDAD			
CALICATA	MUESTRA	PROFUNDIDAD	HUMEDAD (%)
C-1	M-01	1.5	4.93%
C-2	M-02	1.5	27.56%
C-3	M-03	1.5	13.53%

Tabla N° 16: Contenido de humedad en muestras naturales. Fuente: Propia

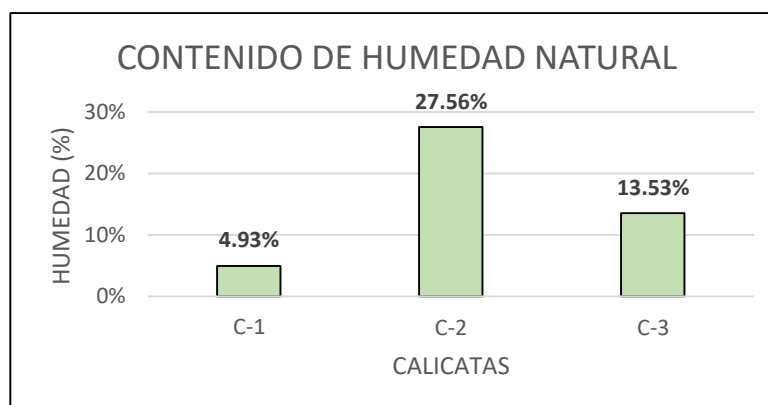


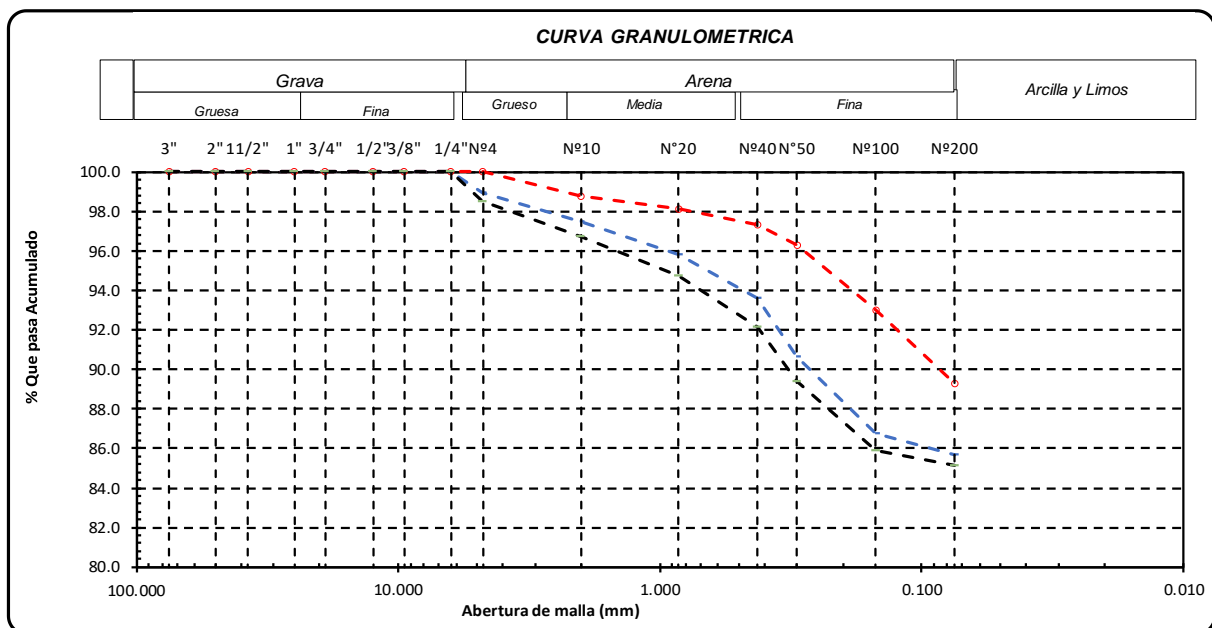
Figura N° 29: Contenido de humedad en muestras naturales. Fuente: Propia

## GRANULOMETRÍA POR TAMIZADO

Para la realización de este ensayo, como ya se mencionó en la parte superior se rige a la normativa del metc E-107, el cual consiste en separar la muestra de suelo, según el tamaño de sus partículas o los tamices que pasa la muestra.

GRANULOMETRÍA POR TAMIZADO				
CALICATA	MUESTRA	Grava (%) 75.00 - 4.75 mm	Arena (%) 4.75 - 0.075 mm	Limo/Arcilla (%) < 0.075 mm
C-1	M-01	0.00%	8.51%	91.49%
C-2	M-02	0.00%	14.33%	85.67%
C-3	M-03	0.00%	14.87%	85.13%

Tabla N° 17: Contenido de humedad en muestras naturales. Fuente: Propia



Gráfica N° 2: Análisis granulométrico de calicatas. Fuente: Propia

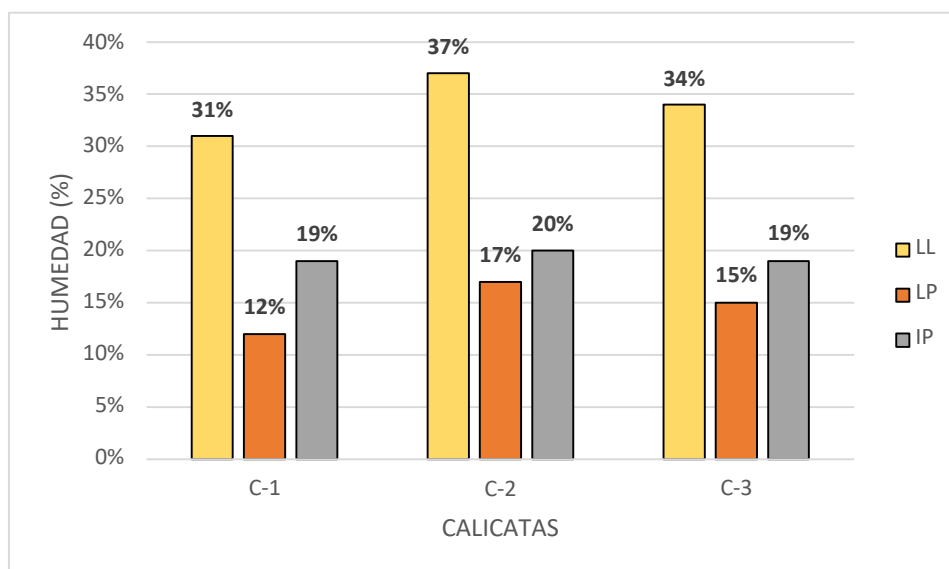
En referencia a la gráfica n° y tabla n° se aprecia que la porción de muestra que pasa la malla N° 200 es superior al 80%, por ende, se puede decir que su composición es de finos, es decir limos y arcillas en su mayoría.

## LÍMITE DE CONSISTENCIA DE MUETRAS NATURALES

Los límites de consistencia o límites de Atterberg son básicamente los porcentajes de humedad en las cuales la muestra de suelo cambia de estados de consistencia y para poder calcularlos se toma en cuenta la normativa del MTC E-110 y MTC E-111.

LÍMITES DE CONSISTENCIA			
CALICATA	LL	LP	IP
C-1	31%	12%	19%
C-2	37%	17%	20%
C-3	34%	15%	19%

Tabla N° 18: Límites de consistencia. Fuente: Propia



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

Como se observa en la gráfica y en base a según su índice de plasticidad el suelo de las calicatas se puede decir que son arcillas de media plasticidad lo cual contienen una moderada cantidad de arcilla

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

Tabla N° 19: Clasificación de plasticidad según IP. Fuente: MTC

## CLASIFICACIÓN DE SUELO DE MUESTRAS NATURALES

En base a los resultados obtenidos de la granulometría y de los límites de consistencia, se puede clasificar las muestras de suelo natural mediante los métodos AASHTO Y SUCS, obteniendo la siguiente clasificación

CONTENIDO DE HUMEDAD				
CALICATA	MUESTRA	PROFUNDIDAD	AASHTO	SUCS
C-1	M-01	1.5	A-6	CL
C-2	M-02	1.5	A-6	CL
C-3	M-03	1.5	A-6	CL

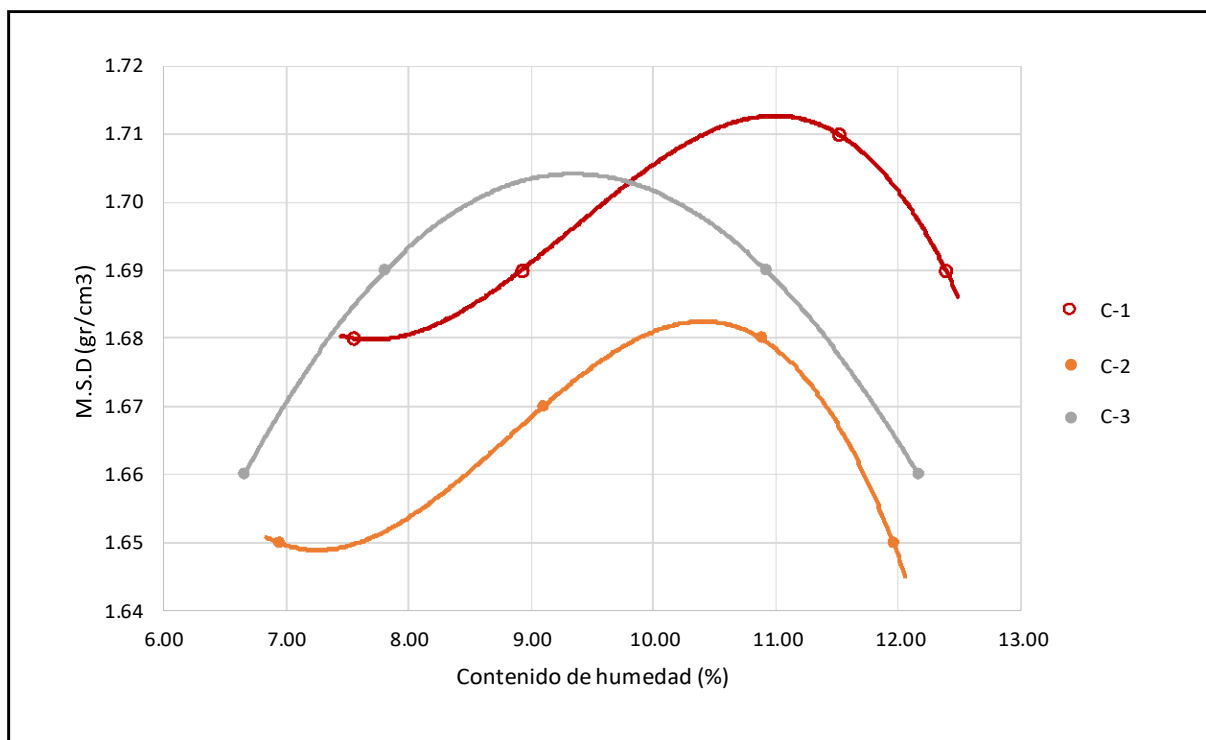
Tabla N° 20: Clasificación AASHTO Y SUCS. Fuente: Propia

## PROCTOR MODIFICADO DE MUESTRAS NATURALES

Este ensayo que se rige a la normativa MTC E-115, tiene como finalidad buscar el óptimo contenido de humedad y la máxima densidad seca de un suelo, ya que es donde tendrá su máxima resistencia y estabilidad. Para ello, se utilizó el método “A” de compactación, viéndose los resultados en la tabla N°, según cada calicata:

PROCTOR MODIFICADO			
CALICATA	Profundidad	O.C.H (%)	M.D.S (gr/cm <sup>3</sup> )
C-1	1.5	11.22	1.71
C-2	1.5	10.29	1.68
C-3	1.5	9.27	1.70

Tabla N° 21: Proctor modificado muestras Naturales. Fuente: Propia



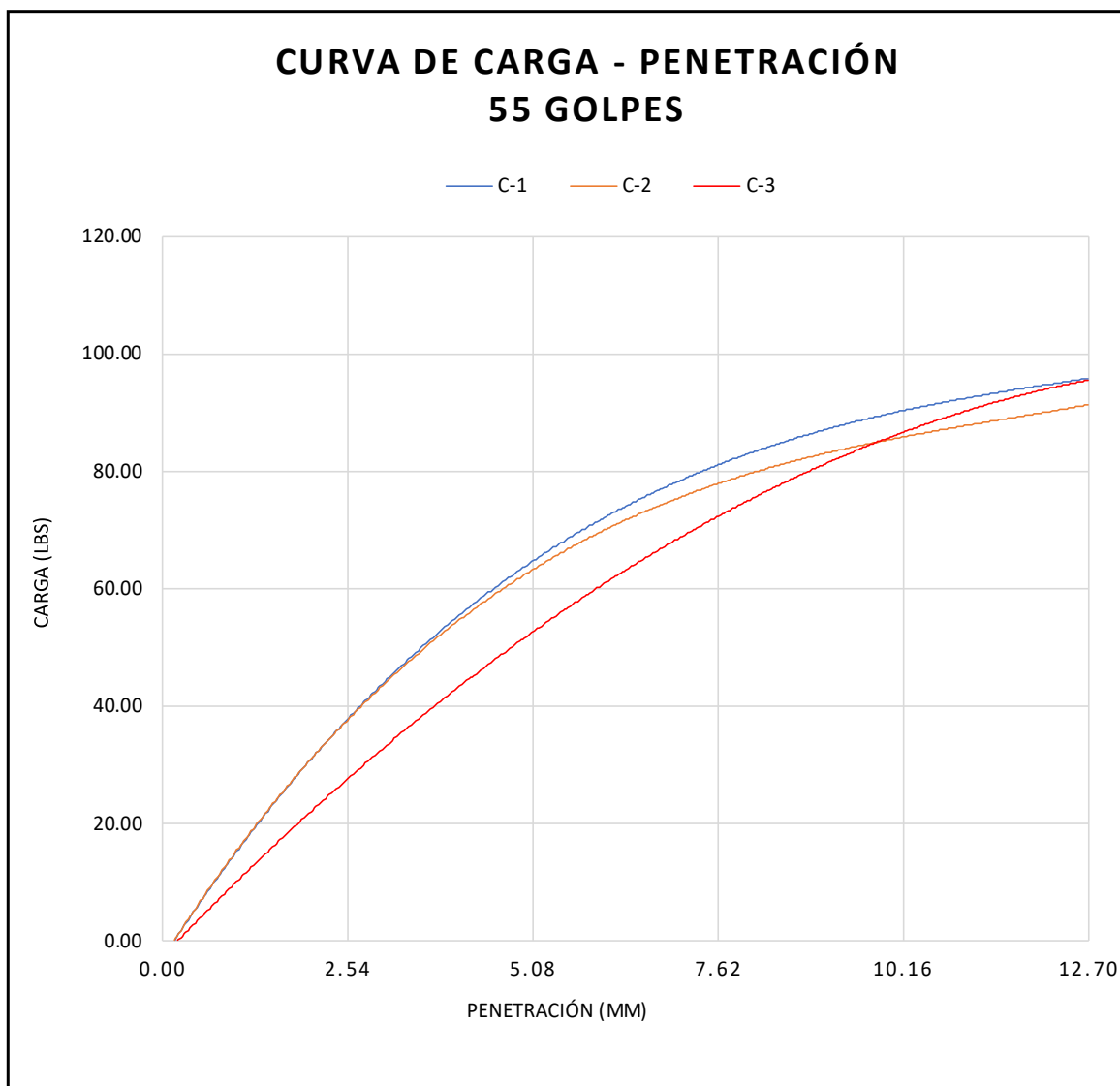
Gráfica N° 4: Curva de compactación de muestras naturales. Fuente: Propia

### CAPACIDAD DE SOPORTE (CBR) DE MUESTRAS NATURALES

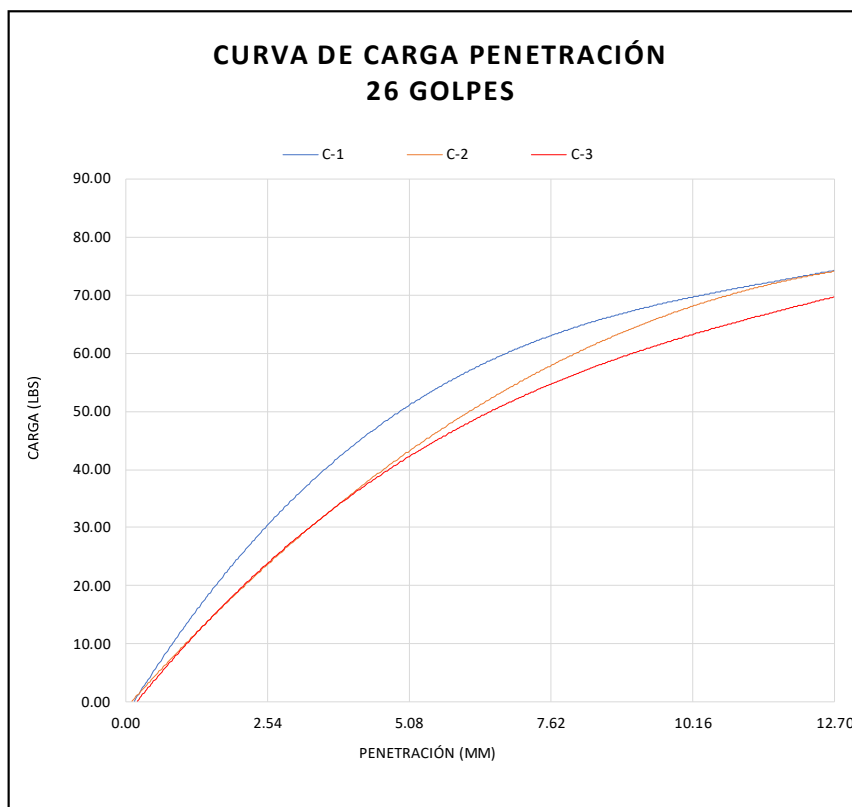
Este ensayo tiene como finalidad calcular la resistencia que tiene el suelo a la penetración, siendo este desarrollado según la normativa del MTC E-132. Además, el CBR está referenciando a una penetración de 0.1", mostrándose los resultados en la tabla N° los resultados obtenidos:

CBR ( CALIFORNIA BEARING RATIO)						
CALICATA	Muestra	Profundidad	CBR AL 95 % MDS (0.1")	CBR AL 95 % MDS (0.2")	CBR AL 100% DE MDS (0.1")	CBR AL 100% DE MDS (0.2")
C-1	M-1	1.5	2.46	2.87	4.97	5.51
C-2	M-1	1.5	2.03	2.2	3.94	4.28
C-3	M-1	1.5	2.19	2.43	2.98	3.63

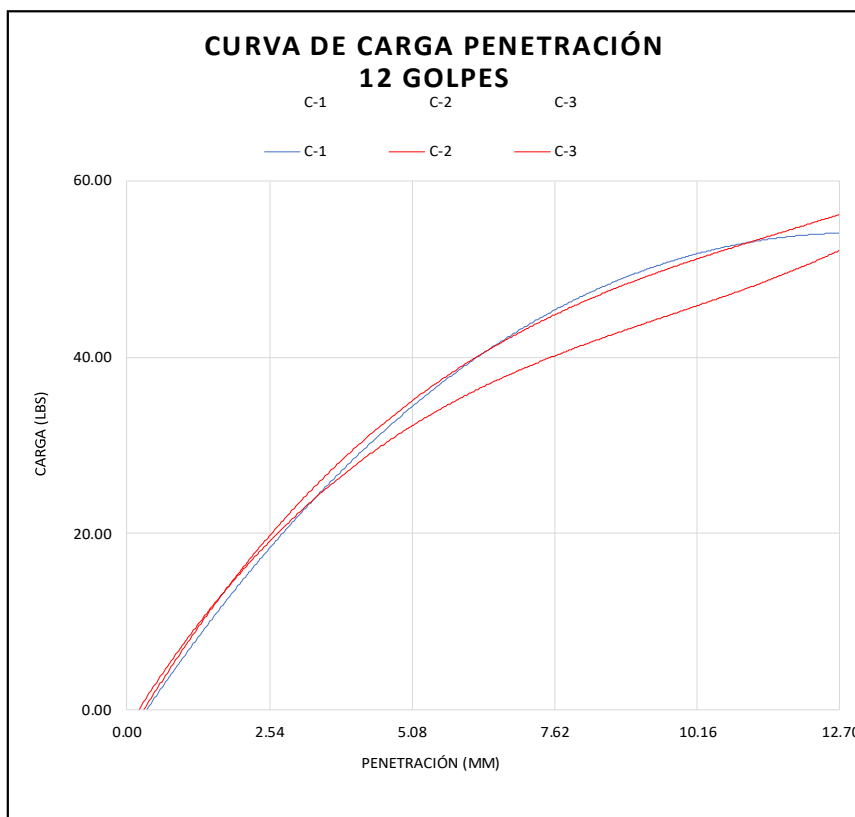
Tabla N° 22: CBR de muestras naturales. Fuente: Propia



Gráfica N° 5: Curva de carga – penetración a los 55 golpes. Fuente: Propia



Gráfica N° 6: Curva de carga – penetración a los 26 golpes. Fuente: Propia



Gráfica N° 7: Curva de carga – penetración a los 26 golpes. Fuente: Propia

Como se puede observar mediante los gráficos y la tabla en la parte superior las subrasantes naturales al 95% de la M.D.S, presentan un CBR en un rango de 2.5%, mientras que a su 100% de M.D.S, están por encima del 4%, considerándose como una subrasante pobre según el manual del MTC, pero que podría mejorar su categoría con algún agente estabilizador.

### CLASIFICACIÓN DE CENIZAS DE TOTORA

Las cenizas de totora fueron obtenidas mediante una combustión controlada y en un horno casero, para poder clasificarlas se necesita su composición química, por lo cual se realizó el ensayo de espectrometría de rayos X, el cual nos brindó los siguientes resultados:

COMPOSICIÓN QUÍMICA	RESULTADOS (%)	MÉTODO UTILIZADO
DIÓXIDO DE SILICIO (SiO <sub>2</sub> )	45.36	Espectrometría de fluorescencia de rayos x
OXIDO DE CALCIO (CaO)	9.84	
TRIOXIDO DE ALUMINIO (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	13.68	
TRIOXIDO DE HIERRO (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	5.95	
OXIDO DE POTASIO (K <sub>2</sub> O)	9.51	
OXIDO DE MAGNESIO (MgO)	1.98	
PENTOXIDO DE FOSFORO (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )	2.17	
OXIDO DE COBRE (CuO)	0.45	
TRIOXIDO DE AZUFRE (SO <sub>3</sub> )	<0.01	
OXIDO DE ZINC (ZnO)	0.029	
OXIDO DE MANGANESO (MnO)	0.014	
PERDIDA POR QUEMADO	11.02	

Tabla N° 23: Composición Química de CDT. Fuente: Propia

### CLASIFICACIÓN:

Para la clasificación se tendrá en cuenta la normativa ASTM-C618-19, la cual nos describe los porcentajes que debe de tener en su composición química para ser clasificada como puzolana artificial.

	TABLA 1 Requisitos químicos		
	Clase		
	N	F	C
Dióxido de silicio (SiO <sub>2</sub> ) más óxido de aluminio (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) más óxido de hierro (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ), mín., %	70,0	50,0	50,0
Óxido de calcio (CaO), %	solo informar	18,0 máx.	< 18,0
Trióxido de azufre (SO <sub>3</sub> ), 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 <sup>A</sup>	6,0

<sup>A</sup> El uso de puzolana de Clase F que contenga hasta un 12,0 % de pérdida en ignición puede ser aprobado por el usuario si están disponibles registros de desempeño aceptable o resultados de pruebas de laboratorio.

Tabla N° 24: Requisitos químicas para clasificación de puzolanas. Fuente: ASTM-C618-19 [28].

Por lo observado en la tabla de composición química y en los requisitos que nos brinda la normativa, podemos decir que la ceniza de totora estaría clasificada como una puzolana tipo F, que la suma del SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> y el Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> hacen en conjunto un 64.99%, el CaO es de 9.84, cumpliendo con lo que indica la normativa al igual que el SO<sub>3</sub>.

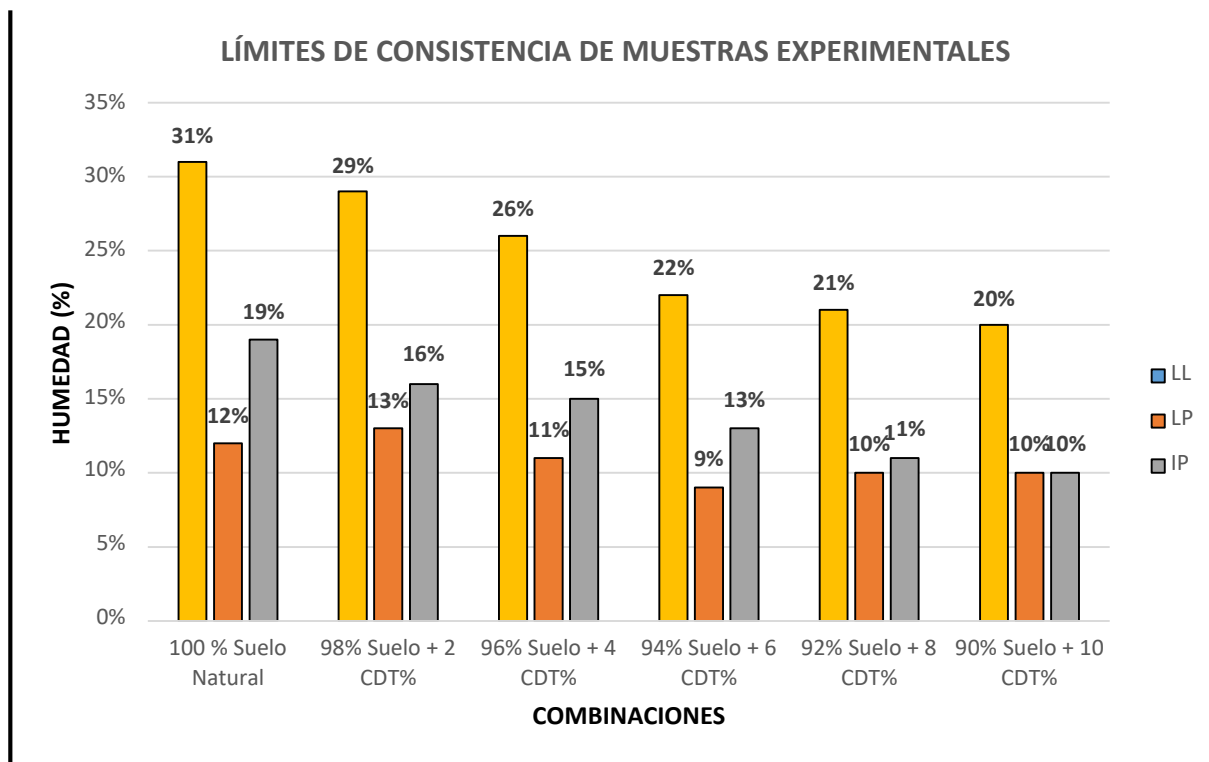
### **ENSAYOS EN MUESTRAS EXPERIMENTALES: SUELO NATURAL + CDT (%)**

Los ensayos realizados a las muestras experimentales fueron los siguientes: límites de consistencia e índice de plasticidad, Proctor modificado, CBR y Compresión simple No confinada, adicionándole los porcentajes de 2%,4%,6%,8% y 10%, para así poder realizar la comparación entre las muestras naturales y las adicionadas.

### **LÍMITES DE CONSISTENCIA DE MUESTRAS EXPERIMENTALES C-1**

<b>C-1</b>			
<b>DOSIFICACION</b>	<b>LL</b>	<b>LP</b>	<b>IP</b>
<b>100 % Suelo Natural</b>	31%	12%	19%
<b>98% Suelo + 2 CDT%</b>	29%	13%	16%
<b>96% Suelo + 4 CDT%</b>	26%	11%	15%
<b>94% Suelo + 6 CDT%</b>	22%	9%	13%
<b>92% Suelo + 8 CDT%</b>	21%	10%	11%
<b>90% Suelo + 10 CDT%</b>	20%	10%	10%

*Tabla N° 25: Límites de consistencia de muestras experimentales. Fuente: Propia*

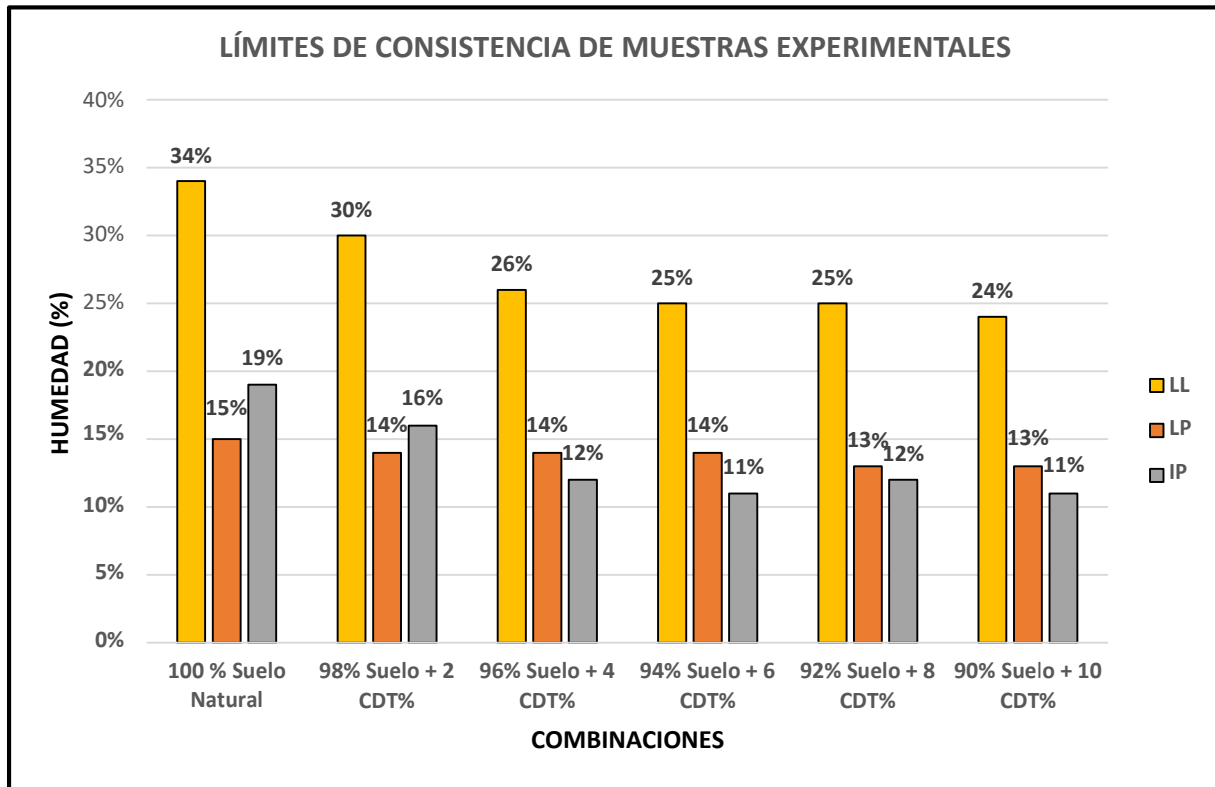


Gráfica N° 8: límites de consistencia de muestras experimentales. Fuente: Propia

### LÍMITES DE CONSISTENCIA DE MUESTRAS EXPERIMENTALES C-2

C-2			
DOSIFICACION	LL	LP	IP
100 % Suelo Natural	37%	17%	20%
98% Suelo + 2 CDT%	33%	14%	19%
96% Suelo + 4 CDT%	25%	13%	12%
94% Suelo + 6 CDT%	22%	11%	11%
92% Suelo + 8 CDT%	20%	11%	9%
90% Suelo + 10 CDT%	19%	13%	6%

Tabla N° 26: Límites de consistencia de muestras experimentales. Fuente: Propia

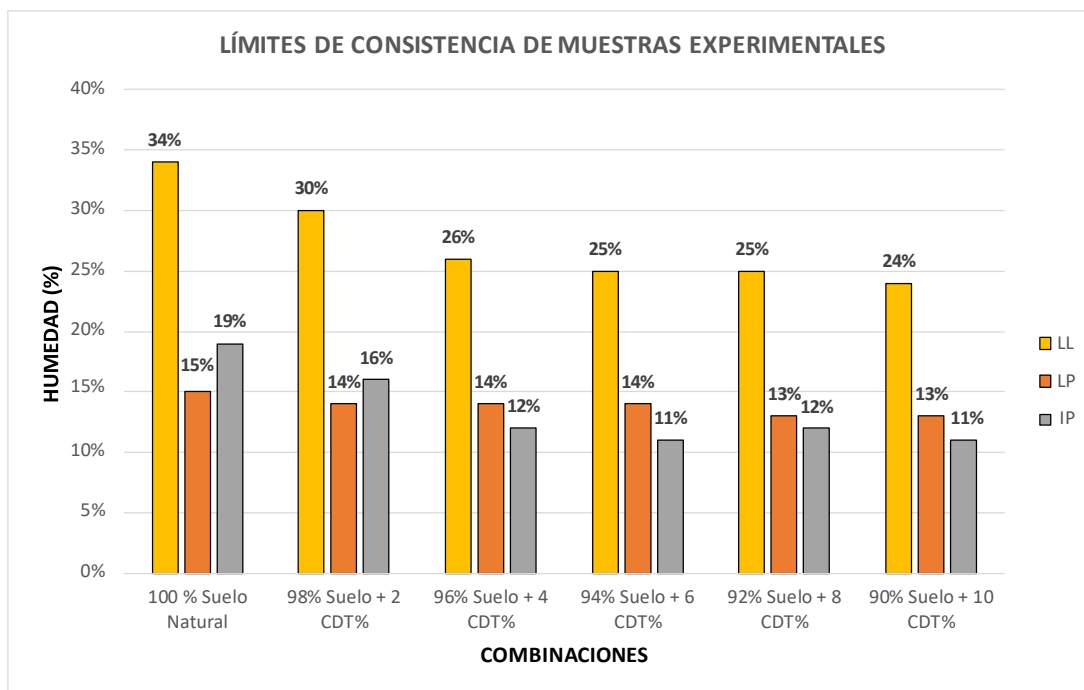


Gráfica N° 9: límites de consistencia de muestras experimentales. Fuente: Propia

### LÍMITES DE CONSISTENCIA DE MUESTRAS EXPERIMENTALES C-3

C-3			
DOSIFICACION	LL	LP	IP
100 % Suelo Natural	34%	15%	19%
98% Suelo + 2 CDT%	30%	14%	16%
96% Suelo + 4 CDT%	26%	14%	12%
94% Suelo + 6 CDT%	25%	14%	11%
92% Suelo + 8 CDT%	25%	13%	12%
90% Suelo + 10 CDT%	24%	13%	11%

Tabla N° 27: Límites de consistencia de muestras experimentales. Fuente: Propia



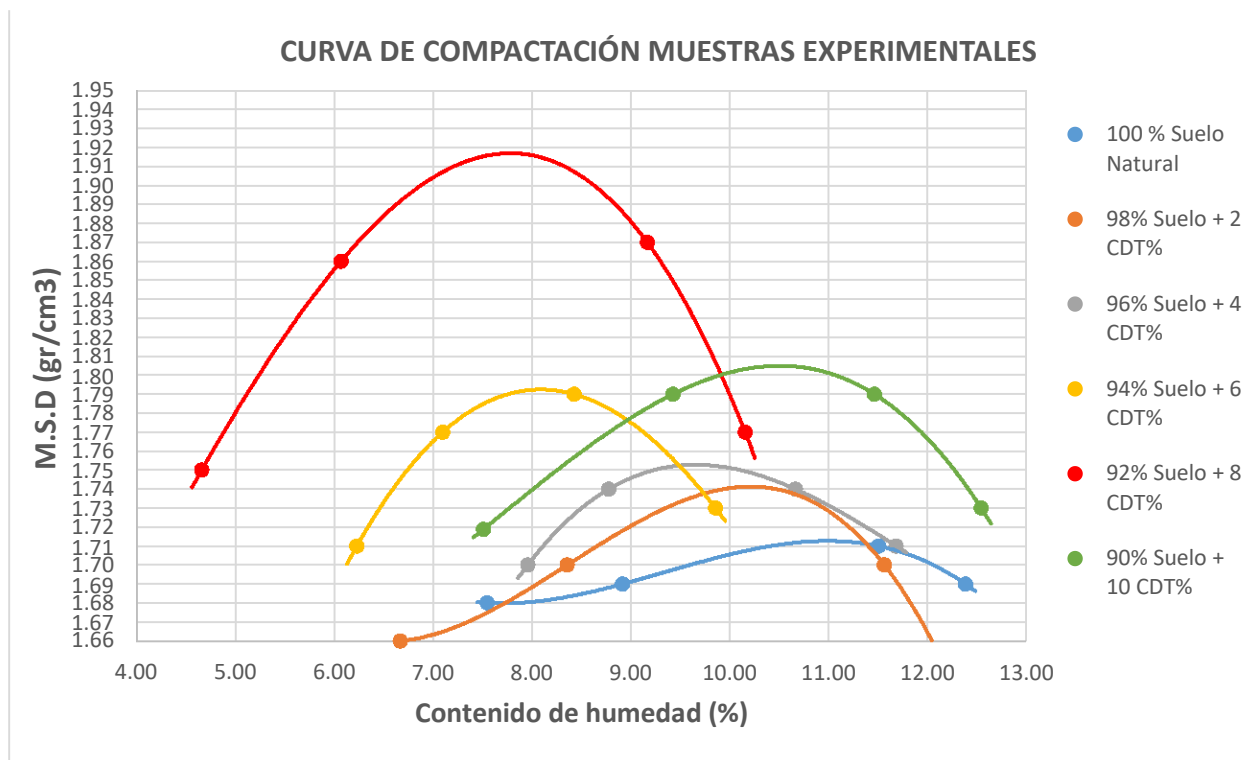
Gráfica N° 10: límites de consistencia de muestras experimentales. Fuente: Propia

### PROCTOR MODIFICADO DE MUESTRAS EXPERIMENTALES C-1

En las tablas N° se presentan los datos obtenidos del ensayo de Proctor modificado. Además, en la gráfica N° se presenta la curva de compactación de la muestra natural y las muestras experimentales evidenciándose los cambios en la muestra.

PROCTOR			
DOSIFICACION	Profundidad	C-1	
		O.C.H (%)	M.D.S (gr/cm <sup>3</sup> )
100 % Suelo Natural	1.5	11.22	1.71
98% Suelo + 2 CDT%	1.5	10.28	1.74
96% Suelo + 4 CDT%	1.5	9.62	1.75
94% Suelo + 6 CDT%	1.5	8.15	1.79
92% Suelo + 8 CDT%	1.5	7.79	1.92
90% Suelo + 10 CDT%	1.5	10.52	1.81

Tabla N° 28: Datos obtenidos del ensayo Proctor de muestras experimentales. Fuente: Propia

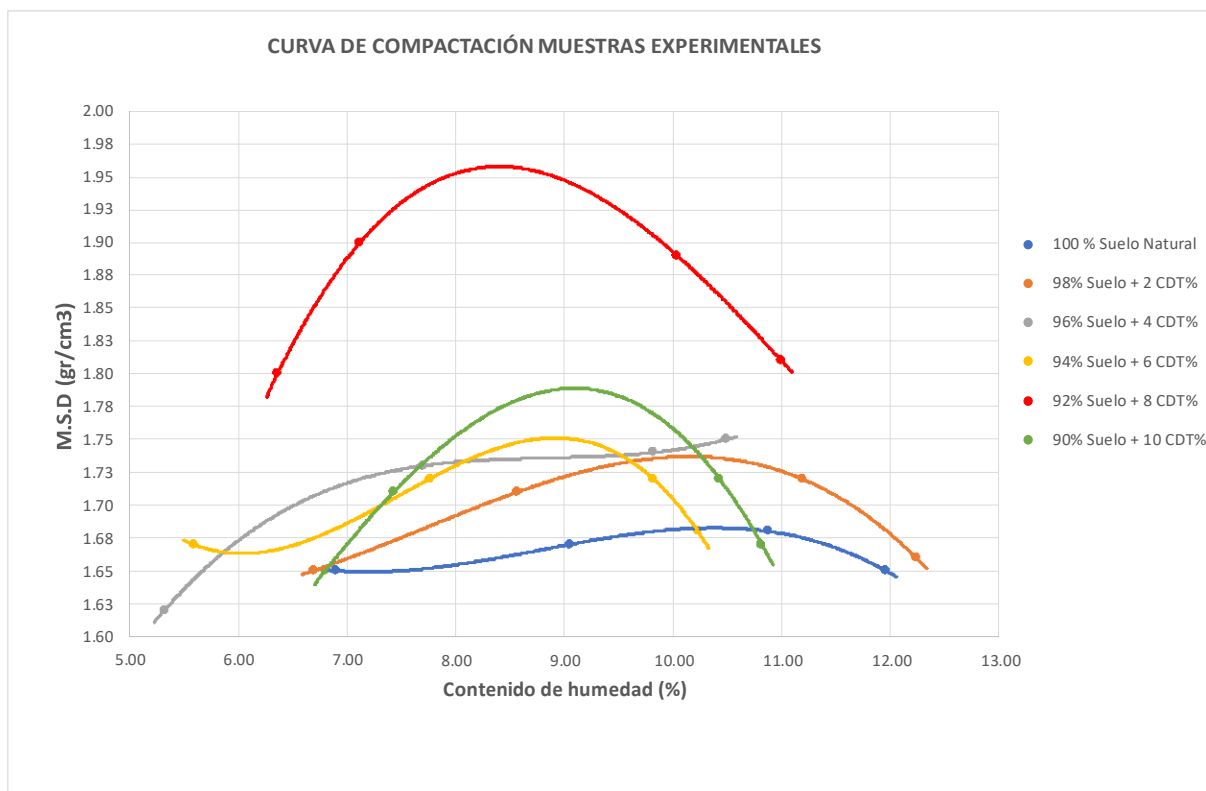


Gráfica N° 11: Curvas de compactación de muestras experimentales. Fuente: Propia

## PROCTOR MODIFICADO DE MUESTRAS EXPERIMENTALES C-2

PROCTOR			
DOSIFICACION	Profundidad	C-2	
		O.C.H (%)	M.D.S (gr/cm³)
100 % Suelo Natural	1.5	10.24	1.68
98% Suelo + 2 CDT%	1.5	10.06	1.74
96% Suelo + 4 CDT%	1.5	8.93	1.78
94% Suelo + 6 CDT%	1.5	8.87	1.75
92% Suelo + 8 CDT%	1.5	8.46	1.96
90% Suelo + 10 CDT%	1.5	9.14	1.79

Tabla N° 29: Datos obtenidos del ensayo Proctor de muestras experimentales. Fuente: Propia

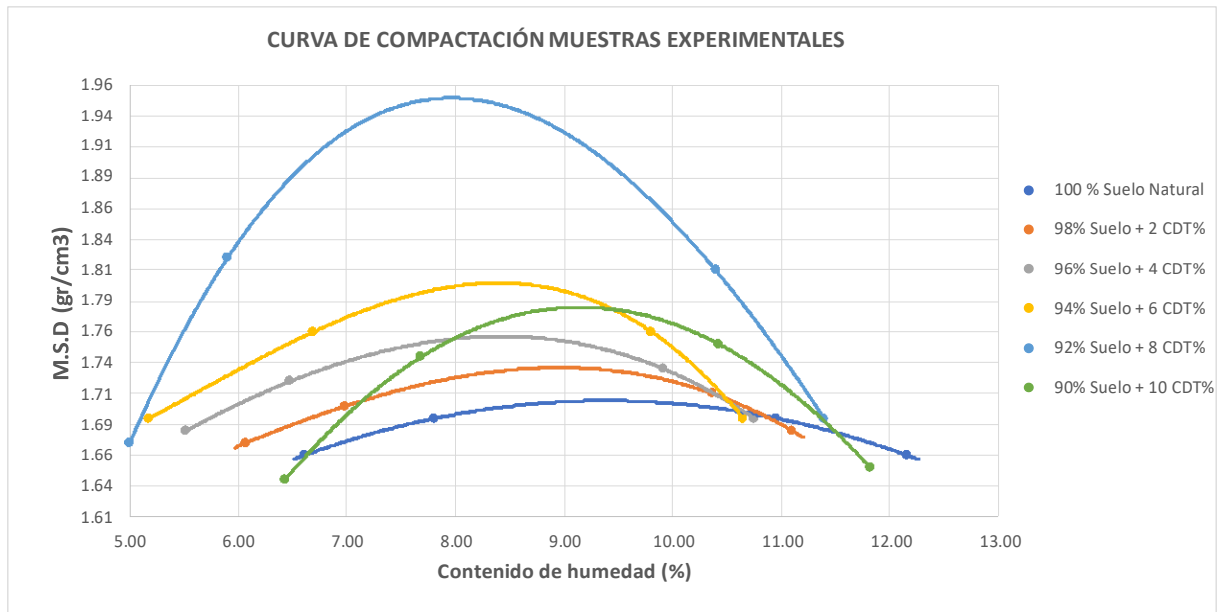


Gráfica N° 12: Curvas de compactación de muestras experimentales. Fuente: Propia

### PROCTOR MODIFICADO DE MUESTRAS EXPERIMENTALES C-3

PROCTOR			
DOSIFICACION	Profundidad	C-3	
		O.C.H (%)	M.D.S (gr/cm <sup>3</sup> )
100 % Suelo Natural	1.5	9.39	1.70
98% Suelo + 2 CDT%	1.5	8.84	1.72
96% Suelo + 4 CDT%	1.5	8.38	1.76
94% Suelo + 6 CDT%	1.5	8.26	1.80
92% Suelo + 8 CDT%	1.5	8.07	1.94
90% Suelo + 10 CDT%	1.5	9.07	1.78

Tabla N° 30: Datos obtenidos del ensayo Proctor de muestras experimentales. Fuente: Propia

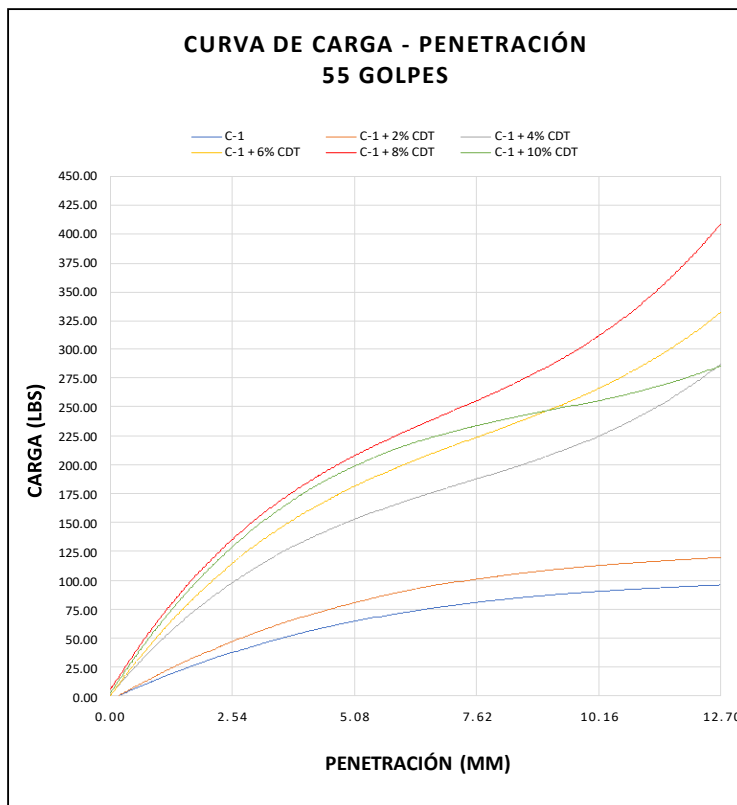


Gráfica N° 13: Curvas de compactación de muestras experimentales. Fuente: Propia

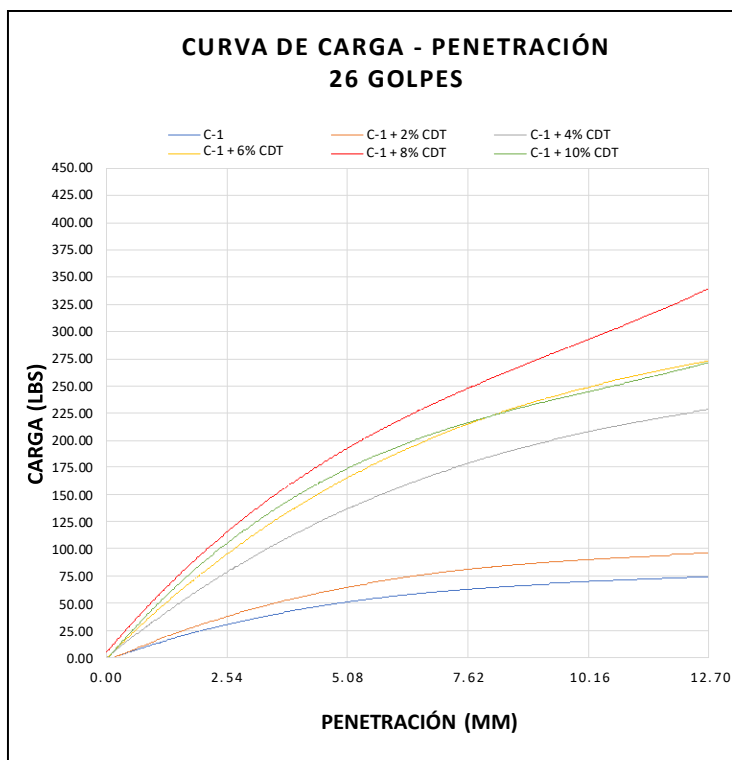
## CAPACIDAD DE SOPORTE DE MUESTRAS EXPERIMENTALES C-1

CBR ( CALIFORNIA BEARING RATIO)						
CALICA	Área del gráfico	Profundidad	CBR AL 95 % MDS (0.1")	CBR AL 95 % MDS (0.2")	CBR AL 100% DE MDS (0.1")	CBR AL 100% DE MDS (0.2")
C-1	M-1	1.5	2.46	2.87	4.97	5.51
C-1 +2% CDT	M-1	1.5	2.91	4.11	5.48	7.73
C-1 +4% CDT	M-2	1.5	6.12	6.96	9.64	10.14
C-1 +6% CDT	M-3	1.5	8.04	9.05	11.33	12.04
C-1 +8% CDT	M-4	1.5	9.54	10.73	13.04	13.68
C-1 +10% CDT	M-5	1.5	9.42	10.6	11.07	11.99

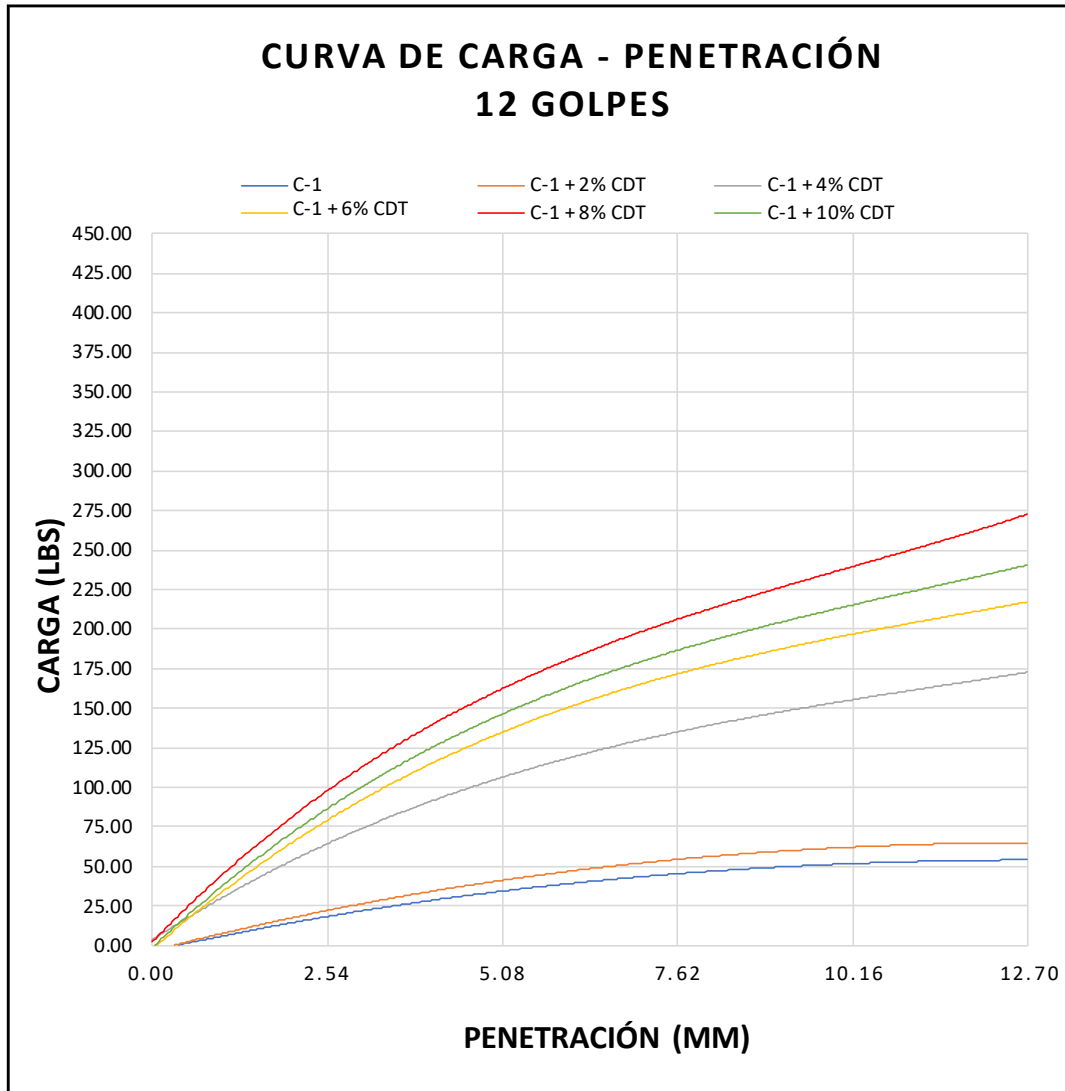
Tabla N° 31: Datos obtenidos del ensayo de CBR de muestras experimentales. Fuente: Propia



Gráfica N° 14: Curvas de carga – penetración de muestras experimentales a 55 golpes. Fuente: Propia



Gráfica N° 15: Curvas de carga – penetración de muestras experimentales a 26 golpes. Fuente: Propia

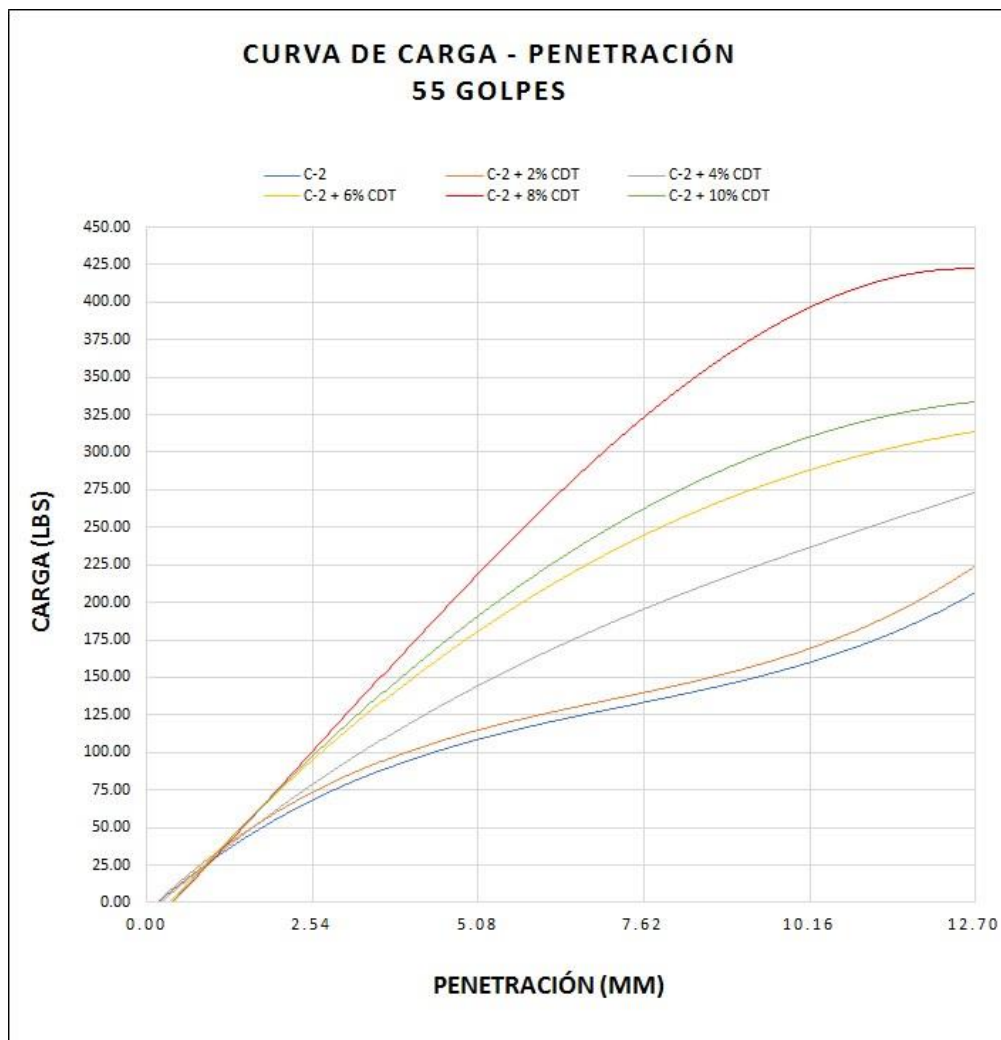


Gráfica N° 16: Curvas de carga – penetración de muestras experimentales a 12 golpes. Fuente: Propia

## CAPACIDAD DE SOPORTE DE MUESTRAS EXPERIMENTALES C-2

CBR						
CALICATA	Muestra	Profundidad	CBR AL 95 % MDS (0.1")	CBR AL 95 % MDS (0.2")	CBR AL 100% DE MDS (0.1")	CBR AL 100% DE MDS (0.2")
C-2	M-1	1.5	2.03	2.2	3.93	4.28
C-2 +2% CDT	M-1	1.5	3.13	3.58	7.59	7.75
C-2+4% CDT	M-2	1.5	2.42	4.45	8.49	9.98
C-2 +6% CDT	M-3	1.5	4.36	6.75	10.81	12.76
C-2 +8% CDT	M-4	1.5	7.01	9.98	11.91	15.79
C-2 +10% CDT	M-5	1.5	6.07	8.28	11.29	13.58

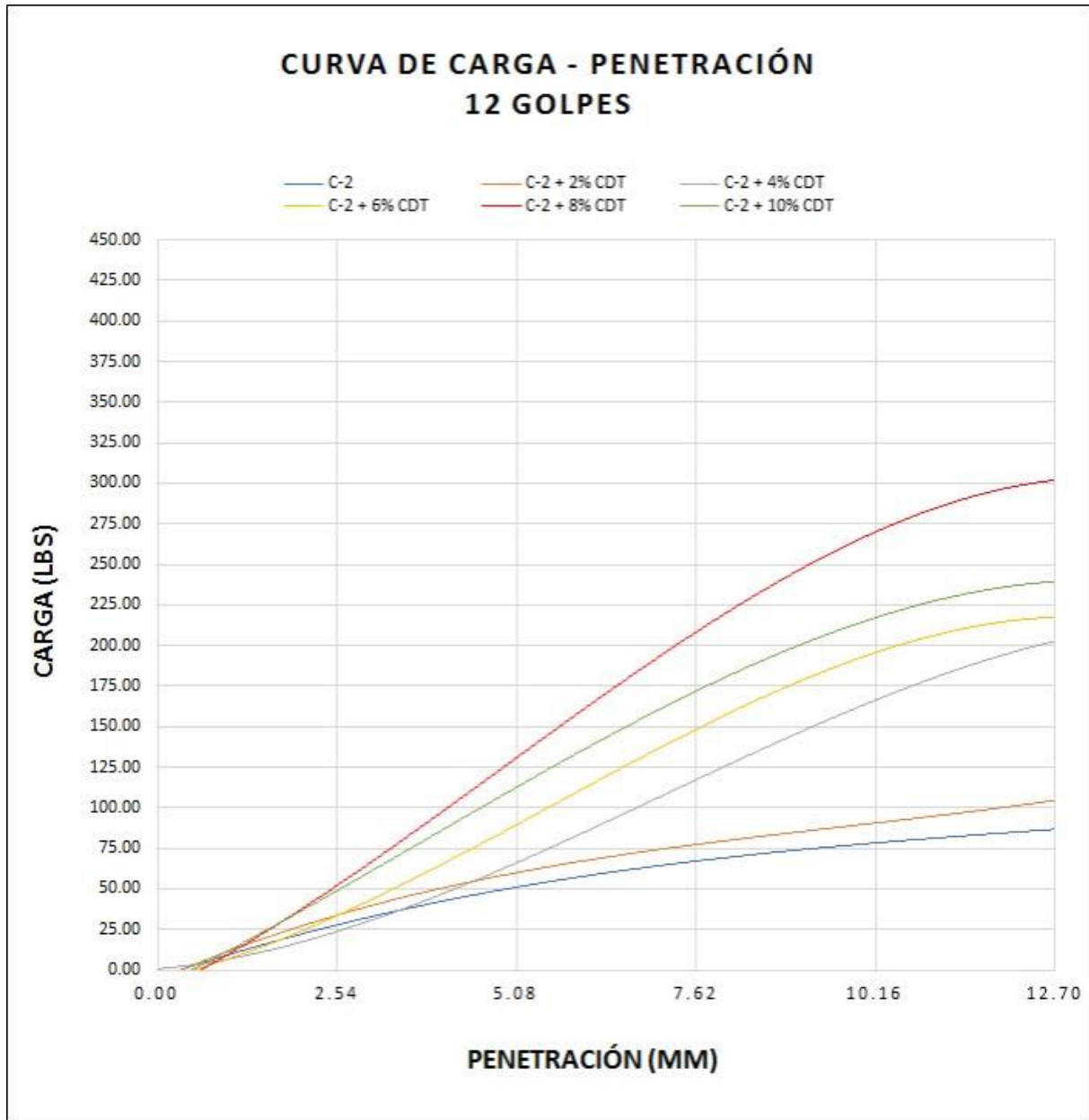
Tabla N° 32: Datos obtenidos del ensayo de CBR de muestras experimentales. Fuente: Propia



Gráfica N° 17: Curvas de carga – penetración de muestras experimentales a 55 golpes. Fuente: Propia



Gráfica N° 18: Curvas de carga – penetración de muestras experimentales a 26 golpes. Fuente: Propia

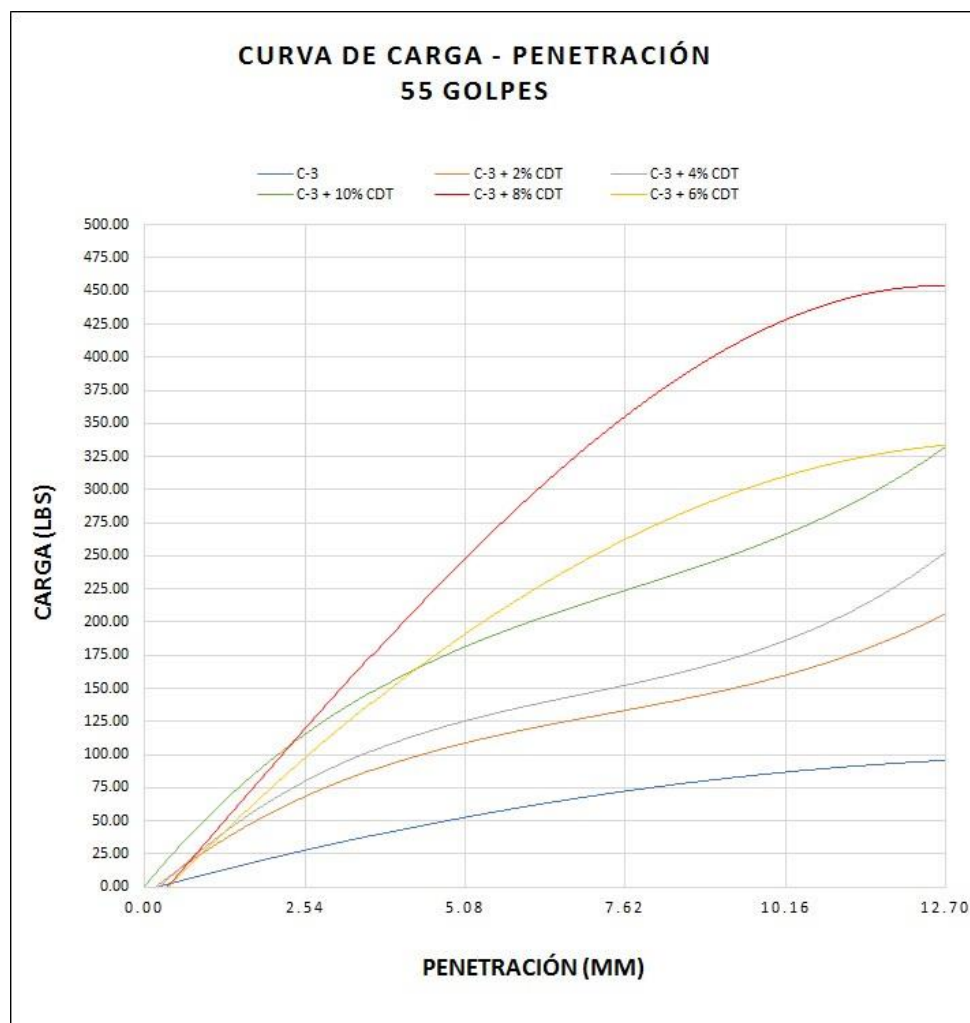


Gráfica N° 19: Curvas de carga – penetración de muestras experimentales a 12 golpes. Fuente: Propia

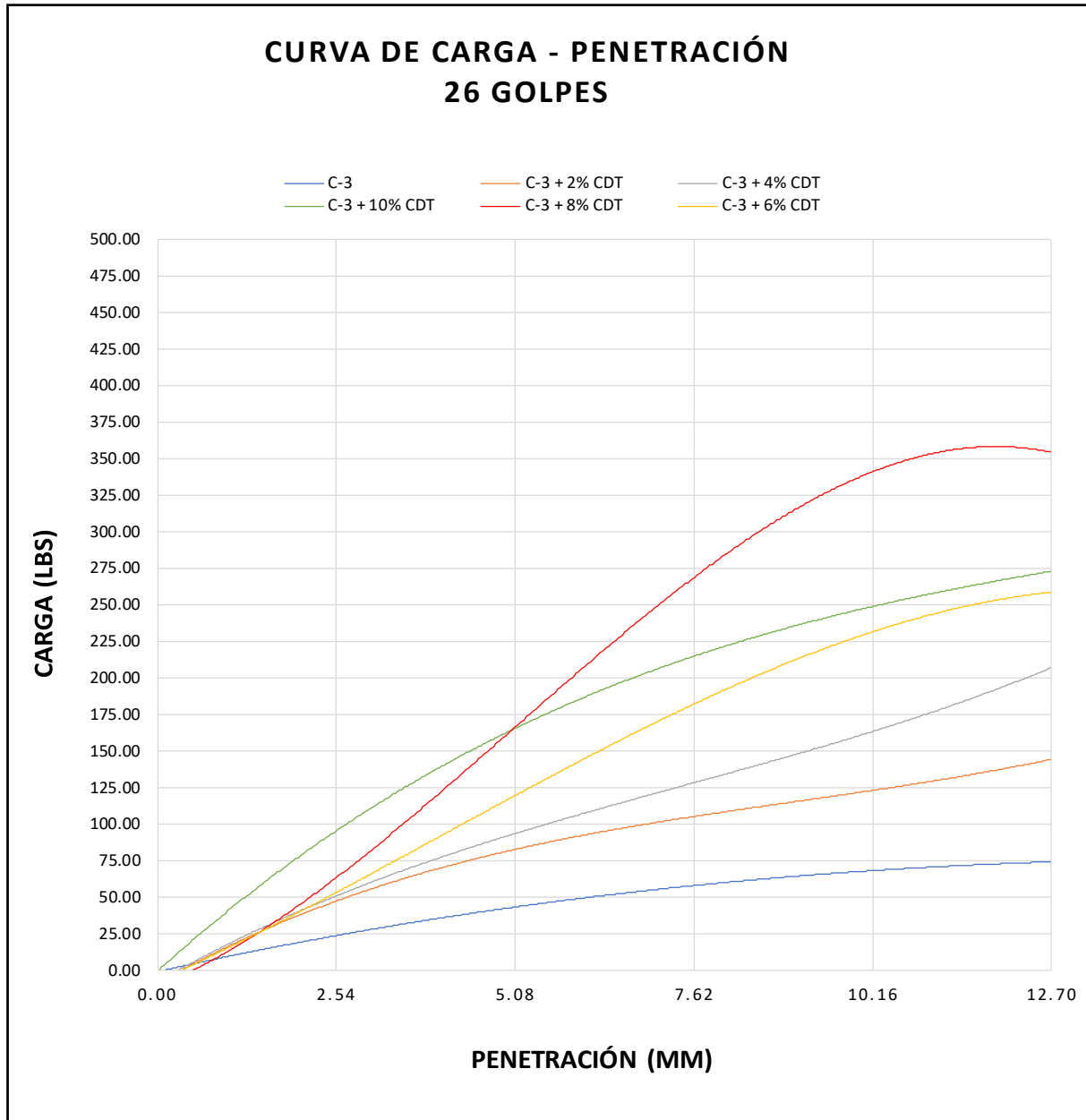
### CAPACIDAD DE SOPORTE DE MUESTRAS EXPERIMENTALES C-3

CBR						
CALICATA	Muestra	Profundidad	CBR AL 95 % MDS (0.1")	CBR AL 95 % MDS (0.2")	CBR AL 100% DE MDS (0.1")	CBR AL 100% DE MDS (0.2")
C-3	M-3	1.5	2.19	2.43	2.98	3.63
C-3 +2% CDT	M-3	1.5	3.07	3.51	7.12	7.36
C-3+4% CDT	M-3	1.5	6.21	7.46	8.59	9.96
C-3 +6% CDT	M-3	1.5	8.04	9.05	11.32	12.04
C-3 +8% CDT	M-3	1.5	6.88	9.87	13.87	17.71
C-3 +10% CDT	M-3	1.5	5.74	7.96	11.31	13.6

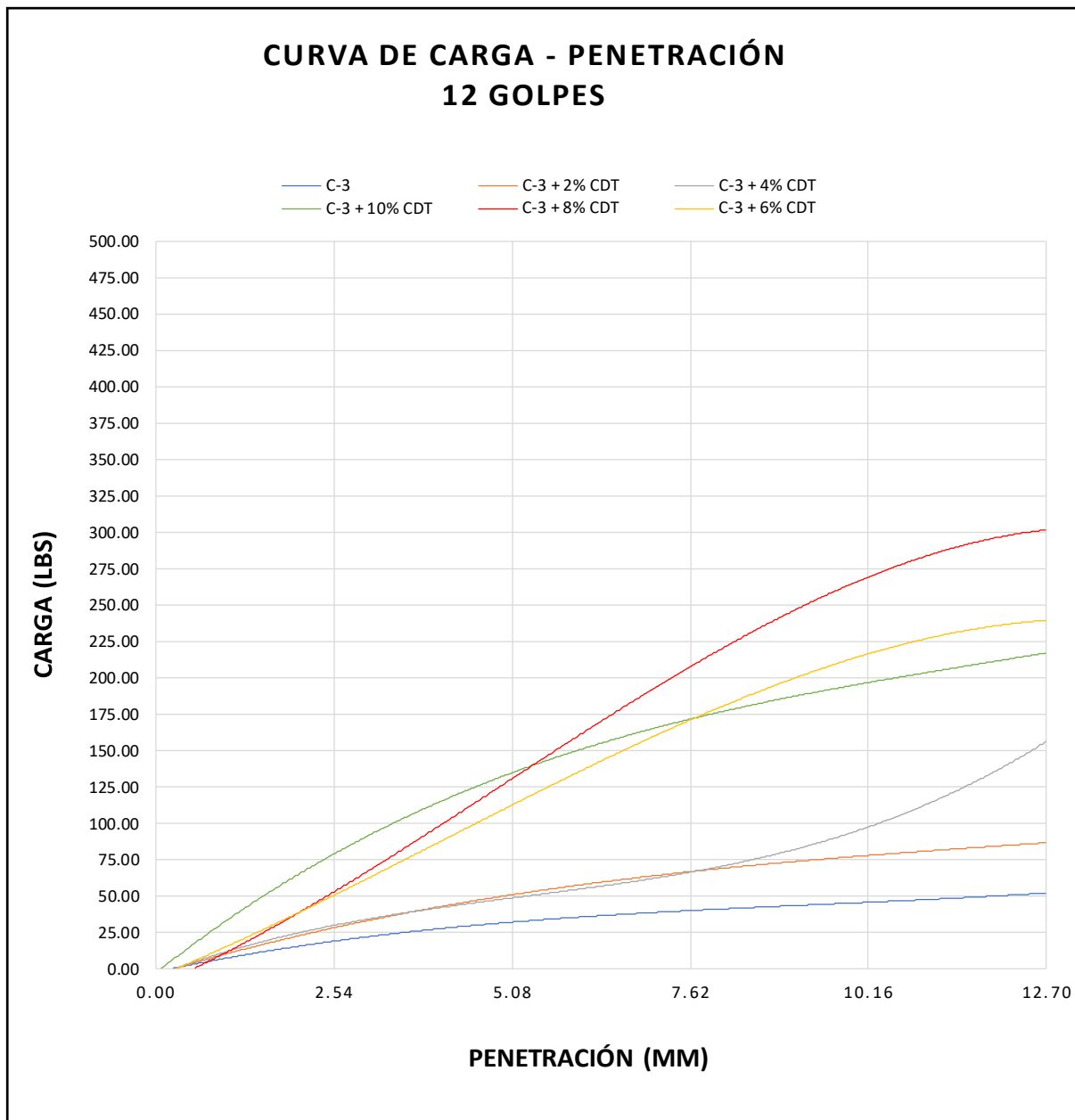
Tabla N° 33: Datos obtenidos del ensayo de CBR de muestras experimentales. Fuente: Propia



Gráfica N° 20: Curvas de carga – penetración de muestras experimentales a 55 golpes. Fuente: Propia



Gráfica N° 21: Curvas de carga – penetración de muestras experimentales a 26 golpes. Fuente: Propia



Gráfica N° 22: Curvas de carga – penetración de muestras experimentales a 26 golpes. Fuente: Propia.

## DISCUSIÓN DE RESULTADOS

La Influencia de cenizas de totora en Subrasantes arcillosas de la ciudad de Ferreñafe es de importancia debido a que si realizamos una comparativa con las muestras patrón se logra identificar la mejora de sus propiedades tanto físicas como mecánicas. Es por ello por lo que a continuación se realizará una breve discusión de resultados obtenidos en base a un estudio experimental y comparando con antecedentes del mismo o similar tema de investigación.

Para las muestras patrón extraídas tenemos los siguientes valores

RESULTADOS									
CALICATA	MUESTRA	PROFUNDIDAD	HUMEDAD(%)	AASHTO	SUCS	LL	LP	IP	CBR 0.2" (100% M.D.S)
C-1	M-01	1.5	4.93%	A-6 (12)	CL	31%	12%	19%	5.51%
C-2	M-02	1.5	27.56%	A-6 (17)	CL	37%	17%	20%	4.28%
C-3	M-03	1.5	13.53%	A-6 (19)	CL	34%	15%	19%	3.63%

*Tabla N° 34 Resultados de ensayos en muestras naturales*

Mediante los resultados mostrados podemos observar que es un suelo bastante arcilloso, por lo cual se puede decir que es un suelo pobre, lo cual se ve reflejado en los índices de CBR, es por ello por lo que es necesario un mejoramiento o reemplazo de este.

Por lo cual, se propone las adiciones de ceniza de totora en porcentajes, obteniendo los siguientes Resultados:

### Para la Calicata 1:

RESULTADOS									
CALICATA	MUESTRA	PROFUNDIDAD	LL	LP	IP	O.C.H	MDS	CBR 0.2" (95% MDS)	CBR 0.2" (100 % M.D.S)
C-1	M-01	1.5	31%	12%	19%	11.22	1.71	2.87	5.51
98% Suelo + 2 CDT%	M-02	1.5	29%	13%	16%	10.28	1.74	4.11	7.73
96% Suelo + 4 CDT%	M-03	1.5	26%	11%	15%	9.62	1.75	6.96	10.14
94% Suelo + 6 CDT%	M-04	1.5	22%	9%	13%	8.15	1.79	9.05	12.04
92% Suelo + 8 CDT%	M-05	1.5	21%	10%	11%	7.79	1.92	10.73	13.68
90% Suelo + 10 CDT%	M-06	1.5	20%	10%	10%	10.52	1.81	10.6	11.99

*Tabla N° 35 Resultados de muestras experimentales en C-1*

Para el I.P, luego de adicionar la ceniza de totora

- Suelo Natural = 19
- Suelo Natural + 2% CDT = 16
- Suelo Natural + 4% CDT = 15
- Suelo Natural + 6% CDT = 13
- Suelo Natural + 8% CDT = 11
- Suelo NatuRal + 10% CDT = 10

Se puede apreciar que a mayor porcentaje de ceniza el índice de plasticidad disminuye, lo cual es favorable para nuestra investigación debido a que, a menor índice de plasticidad, la cohesión de las partículas del suelo mejora.

Para el O.C.H y MDS luego de adicionar la ceniza de totora

- Suelo Natural = 11.22 y 1.71
- Suelo Natural + 2% CDT = 10.28 y 1.74
- Suelo Natural + 4% CDT = 9.62 y 1.75
- Suelo Natural + 6% CDT = 8.15 y 1.79
- Suelo Natural + 8% CDT = 7.79 y 1.92
- Suelo Natural + 10% CDT = 10.52 y 1.81

Para el óptimo contenido de humedad al incrementar el porcentaje de ceniza de totora, reduce el contenido de humedad siendo favorable ya que, al añadir agua al suelo arcilloso en exceso llega a un punto en el cual este se vuelve estado líquido, perdiendo resistencia y cohesión, es por ello por lo que lo ideal es realizar un ensayo Proctor, mediante el cual se obtendrá su óptimo contenido de humedad y máxima densidad seca, que es a la cual el suelo ofrece su mayor resistencia.

Para el CBR a 0.2” de penetración y una MDS al 100%, luego de adicionar la ceniza de totora

- Suelo Natural = 5.51%
- Suelo Natural + 2% CDT = 7.73%
- Suelo Natural + 4% CDT = 10.14%
- Suelo Natural + 6% CDT = 12.04%
- Suelo Natural + 8% CDT = 13.68%
- Suelo Natural + 10% CDT = 11.99%

Para el CBR, vemos que este aumenta a medida que se va adicionando la ceniza de totora. Sin embargo, al porcentaje del 10%, vemos que esta presenta una disminución del CBR, teniendo así un tope límite de adición. Sin embargo, es necesario realizar más ensayos para poder validar esto. Además, al 8% obtenemos el mejor resultado de índice de CBR, mejorando de 5.51% a 13.68%.

## Para la Calicata 2:

RESULTADOS									
CALICATA	MUESTRA	PROFUNDIDAD	LL	LP	IP	O.C.H	MDS	CBR 0.2" (95% MDS)	CBR 0.2" (100 % M.D.S)
C-2	M-01	1.5	37%	17%	20%	10.24	1.68	2.2	4.28
98% Suelo + 2 CDT%	M-02	1.5	33%	14%	19%	10.06	1.74	3.58	7.75
96% Suelo + 4 CDT%	M-03	1.5	25%	13%	12%	8.93	1.78	4.45	9.98
94% Suelo + 6 CDT%	M-04	1.5	22%	11%	11%	8.87	1.75	6.75	12.76
92% Suelo + 8 CDT%	M-05	1.5	20%	11%	9%	8.46	1.96	9.98	15.79
90% Suelo + 10 CDT%	M-06	1.5	19%	13%	6%	9.14	1.79	8.28	13.58

Tabla N° 36 Resultados de muestras experimentales para C-2

Para esta muestra obtenemos los siguientes resultados:

Para el I.P:

- Suelo Natural = 20%
- Suelo Natural +2 % CDT = 19%
- Suelo Natural + 4% CDT = 12%
- Suelo Natural + 6 % CDT = 11%
- Suelo Natural + 8% CDT = 9%
- Suelo Natural + 10% CDT = 6%

Podemos observar, que al igual que en la calicata 1, el índice de plasticidad va en decadencia al incorporar la ceniza de totora.

Para el O.C.H Y MDS:

- Suelo Natural = 10.24 Y 1.68
- Suelo Natural +2 % CDT = 10.06 Y 1.74
- Suelo Natural + 4% CDT = 8.93 Y 1.78
- Suelo Natural + 6 % CDT = 8.87 Y 1.75
- Suelo Natural + 8% CDT = 8.46 Y 1.96
- Suelo Natural + 10% CDT = 9.14 Y 1.79

Para el ensayo de Proctor en la calicata 2, observamos que a mayor porcentaje de ceniza de totora el óptimo contenido de humedad disminuye y la máxima densidad seca aumenta, esto quiere decir que al 8% de adición de ceniza, el contenido de humedad óptimo es donde el suelo tiene su máxima densidad seca, ofreciendo la mejor resistencia y cohesión de sus partículas.

Para el CBR a 0.2" de penetración y una MDS al 100%, luego de adicionar la ceniza de totora

- Suelo Natural = 4.28 %
- Suelo Natural + 2% CDT = 7.75%
- Suelo Natural + 4% CDT = 9.98%
- Suelo Natural + 6% CDT = 12.76%

- Suelo Natural + 8% CDT = 15.79%
- Suelo Natural + 10% CDT = 13.58%

Para el CBR, al igual que en la calicata 1 vemos que este aumenta a medida que se va adicionando la ceniza de totora. El CBR, para la muestra natural obtenemos un valor de 4.28, comparándolo con el 8% de adición de ceniza de totora, que es el porcentaje en el cual obtenemos el mejor resultado de CBR, se puede observar un aumento de 11.51% en el índice de CBR. Sin embargo, al porcentaje del 10%, vemos que esta presenta una disminución del CBR, por lo que podemos decir que se puede observar un patrón de resultados en el CBR.

### Para la Calicata 3:

RESULTADOS									
CALICATA	MUESTRA	PROFUNDIDAD	LL	LP	IP	O.C.H	MDS	CBR 0.2" (95% MDS)	CBR 0.2" (100 % M.D.S)
C-3	M-01	1.5	34%	15%	19%	9.39	1.70	2.43%	3.63%
98% Suelo + 2 CDT%	M-02	1.5	30%	14%	16%	8.84	1.72	3.51%	7.36%
96% Suelo + 4 CDT%	M-03	1.5	26%	14%	12%	8.38	1.76	7.46%	9.96%
94% Suelo + 6 CDT%	M-04	1.5	25%	14%	11%	8.26	1.80	9.05%	12.04%
92% Suelo + 8 CDT%	M-05	1.5	25%	13%	12%	8.07	1.94	9.87%	17.71%
90% Suelo + 10 CDT%	M-06	1.5	24%	13%	11%	9.07	1.78	7.96%	13.60%

*Tabla N° 37 Resultados de muestras experimentales en C-3*

Finalmente, para la calicata 3, obtenemos los siguientes resultados

Para el I.P, luego de adicionar la ceniza de totora

- Suelo Natural = 19
- Suelo Natural + 2% CDT = 16
- Suelo Natural + 4% CDT = 12
- Suelo Natural + 6% CDT = 11
- Suelo Natural + 8% CDT = 12
- Suelo Natural + 10% CDT = 11

Se puede apreciar que a mayor porcentaje de ceniza el índice de plasticidad disminuye, pero para el porcentaje del 8% vemos que vuelve a aumentar, esto puede ser debido a algún factor al momento de realizar el ensayo, pero en general, podemos decir que el índice de plasticidad disminuye a mayor adición de ceniza de totora.

Para el O.C.H Y MDS:

- Suelo Natural = 9.39 Y 1.70
- Suelo Natural +2% CDT = 8.84 Y 1.72

- Suelo Natural + 4% CDT = 8.38 Y 1.76
- Suelo Natural + 6 % CDT = 8.26 Y 1.80
- Suelo Natural + 8% CDT = 8.07 Y 1.94
- Suelo Natural + 10% CDT = 9.07 Y 1.78

Al igual que en las calicatas anteriores vemos que conforme se adiciona el agente estabilizador, en este caso la ceniza de totora el óptimo contenido de humedad disminuye y la máxima densidad seca aumenta.

Para el CBR a 0.2” de penetración y una MDS al 100%, luego de adicionar la ceniza de totora

- Suelo Natural = 3.63%
- Suelo Natural + 2% CDT = 7.36%
- Suelo Natural + 4% CDT = 9.96%
- Suelo Natural + 6% CDT = 12.04%
- Suelo Natural + 8% CDT = 17.71%
- Suelo Natural + 10% CDT = 13.60%

Para el CBR, podemos observar que va aumentando a mayor ceniza de totora, pero al porcentaje del 10% disminuye ligeramente. Para el CBR de la muestra inicial de la calicata 3 obtenemos un valor de 3.63 y para nuestro mejor resultado, la adición del 8% obtenemos un valor de 17.71%, aumentando así el CBR en 14.08% lo que conlleva al mejoramiento de la subrasante arcillosa.

### Comparativa entre las muestras de suelo patrón y experimentales

RESULTADOS									
MUESTRA	MUESTRA	PROFUNDIDAD	LL	LP	IP	O.C.H	MDS	CBR 0.2" (95% MDS)	CBR 0.2" (100 % M.D.S)
C-1	M-01	1.5	31%	12%	19%	11.22	1.71	2.87%	5.51%
98% C-1 + 2 CDT%	M-02	1.5	29%	13%	16%	10.28	1.74	4.11%	7.73%
96% C-1 + 4 CDT%	M-03	1.5	26%	11%	15%	9.62	1.75	6.96%	10.14%
94% C-1 + 6 CDT%	M-04	1.5	22%	9%	13%	8.15	1.79	9.05%	12.04%
92% C-1 + 8 CDT%	M-05	1.5	21%	10%	11%	7.79	1.92	10.73%	13.68%
90% C-1 + 10 CDT%	M-06	1.5	20%	10%	10%	10.52	1.81	10.60%	11.99%
C-2	M-01	1.5	37%	17%	20%	10.24	1.68	2.20%	4.28%
98% C-2 + 2 CDT%	M-02	1.5	33%	14%	19%	10.06	1.74	3.58%	7.75%
96% C-2 + 4 CDT%	M-03	1.5	25%	13%	12%	8.93	1.78	4.45%	9.98%
94% C-2 + 6 CDT%	M-04	1.5	22%	11%	11%	8.87	1.75	6.75%	12.76%
92% C-2 + 8 CDT%	M-05	1.5	20%	11%	9%	8.46	1.96	9.98%	15.79%
90% C-2 + 10 CDT%	M-06	1.5	19%	13%	6%	9.14	1.79	8.28%	13.58%
C-3	M-01	1.5	34%	15%	19%	9.39	1.70	2.43%	3.63%
98% C-3 + 2 CDT%	M-02	1.5	30%	14%	16%	8.84	1.72	3.51%	7.36%
96% C-3 + 4 CDT%	M-03	1.5	26%	14%	12%	8.38	1.76	7.46%	9.96%
94% C-3 + 6 CDT%	M-04	1.5	25%	14%	11%	8.26	1.80	9.05%	12.04%
92% C-3 + 8 CDT%	M-05	1.5	25%	13%	12%	8.07	1.94	9.87%	17.71%
90% C-3 + 10 CDT%	M-06	1.5	24%	13%	11%	9.07	1.78	7.96%	13.60%

Tabla N° 38 Resultados de muestras patrón y experimentales

Entonces , según los resultados, se puede decir que a mayor porcentaje de ceniza de totora el Límite líquido, el índice de plasticidad y el óptimo contenido de humedad tienden a disminuir

esto debido a la interacción del sílice contenido en la ceniza de totora con la arcilla, reduciendo los vacíos, aumentando la densidad y por ello reduciendo el O.C.H, siendo un patrón notable en los resultados de las muestras experimentales, mientras que la máxima densidad seca y el índice de CBR van en aumento, podemos apreciar que el óptimo porcentaje de ceniza de totora es del 8% , que es en el cual obtenemos el mayor valor de CBR , en el caso más desfavorable para la muestra patrón y en el más favorable para la muestra experimental, de la C-3 comparando el valor de 3.63% de la muestra patrón y el de la adición al 8% de 17.71% , podemos decir que el CBR ha aumentado en un 486.78% o ha superado por 4.8 veces el valor de la muestra patrón , brindando buenos resultados la ceniza de totora como agente estabilizador. Esto debido al aporte de la ceniza de totora como material puzolánico en forma natural, el cual, al entrar en contacto con el agua, intensifica el intercambio de cationes, floculación y aglomeración del  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  en conjunto con el  $\text{SiO}_2$  y  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , formando así los hidrosilicatos de calcio, los cuales se caracterizan por tener poros y texturas en sus capas, lo que conlleva al incremento de energía. Además, la reacción que inicia con el ion de calcio, formando una capa de hidrosilicato de calcio hidratado, el cual debido al aumento de presión estalla, lo cual da lugar a formas tubulares radiando el grano de sílice formando así partículas de mayor diámetro, incrementando la fricción entre partículas, disminuyendo así el límite líquido, lo cual conlleva al aumento de resistencia a la penetración, justificando así el aumento de CBR [2].

También podemos decir, que en la calicata 3, es en la cual se obtuvo el mejor resultado de CBR, sin embargo, para las calicatas 2 y 3 obtenemos un valor bastante cercano entre porcentajes de adición similares, observándose el mismo patrón que en la calicata 3 y teniendo como porcentaje óptimo de adición de CDT al 8%.

### **Comparativa con Antecedentes**

Según Machaca , obtuvo resultados cercanos a los de la presente investigación ya que, para el estudio de su investigación, adiciono cenizas del sistema radicular de la totora a suelos arcillosos, obteniendo un porcentaje óptimo de adición del 6% en el cual logra disminuir el límite líquido en un 4.73%, incrementar el límite plástico en un 11.87% y disminuir el índice de plasticidad en un 40.04% , Respecto al CBR , en nuestros ensayos obtuvimos un valor de 13.68% al 8% de CDT para C-1 , para C-2 y C-3 , se obtuvo un CBR respectivamente de 15.79% y 17.67% y para la investigación de Machaca, se alcanzó un valor aproximado de 16.60% de índice e CBR. [32], teniendo resultados cercanos a la investigación realizada para los valores de las calicatas 2 y 3.

Para los autores Ormeño y Rivas, en su investigación ensayan un suelo tipo CL, al igual que el nuestro, en el cual nos indican que el CBR de 4.30% de la muestra patrón aumentaba según el porcentaje de CCA que añadían, obteniendo como porcentaje óptimo del 20% que es donde se alcanza el máximo CBR de 20.70%. Si bien es cierto nuestro máximo valor de CBR en las calicatas ensayadas son de 13.68%, 15.79% y 17.67% y en una adición del 8%, podemos decir que con la ceniza de cáscara de arroz se está añadiendo un mayor porcentaje, además que según el autor la ceniza de cáscara de arroz presenta mayor contenido de sílice, la cual está relacionada directamente con la actividad puzolánica y cementicia conllevando a la mejora del suelo. [1]

Según Landa y Torres, en su investigación utilizaron la combinación de cal y ceniza de bagazo de caña como agente estabilizador, su mejor resultado lo obtuvieron a una adición del 25% el cual está compuesto de 75% cal + 25% CBDC. Respecto al CBR en su muestra patrón obtuvieron un valor máximo de 3.7% y al adicionar el agente estabilizador compuesto el CBR logra aumentar a un 8.7% y cuando emplearon como agente estabilizador el 100% de CBDC a una adición del 25%, obtuvieron como valor de CBR 7.3%, comparándolo con respecto a nuestros resultados se puede decir que a una menor adición de ceniza de totora, en este caso al 8%, tenemos un mejor resultado respecto a la adición del 25% de ceniza de bagazo de caña en su totalidad. [2]

Según los autores Liendo, Acuña, Lavado, Cusiga y Castro, realizaron una revisión sistemática de otros autores respecto al uso de la ceniza de cáscara de arroz, obteniendo diversos resultados dentro de esta revisión sistemática, de los cuales tenemos:

- Gálvez y Santoyo, para el 15% de CCA obtienen un valor de CBR de 13.77%
- Llamoga, para el 7% de CCA obtiene un resultado de 7.88%
- Díaz, para el 20% de CCA obtiene un valor de índice de CBR de 13.80%
- Castro, para el 20% de CCA se obtuvo como resultado CBR 19.40%

Si bien es cierto, estos resultados varían es por el tipo de suelo que están ensayando, en el caso de Gálvez y Castro es un tipo de suelo arcillosos de baja plasticidad, Llamoga es un suelo de baja a media plasticidad y para el caso de Díaz es un suelo de alta plasticidad. Además, influye en el resultado de CBR, los resultados del ensayo Proctor, en este caso la MDS y la OCH.

Realizando una comparativa con nuestra investigación los resultados de CBR se asemejan mucho a los resultados que obtuvieron Santoyo y Gálvez, al igual que es el caso del autor Díaz, de los cuales se tiene CBR's que rondan el 13% al igual que nuestras muestras experimentales al 8% de CDT en la Calicata 1.

## ANÁLISIS ECONÓMICO

Para la presente investigación, se realizó una evaluación económica entre los agentes estabilizadores más comunes que se emplean en el mercado como es el caso del cemento, cal. Para esta evaluación económico se tomó en cuenta ciertos parámetros como el costo comercial de los agentes estabilizadores y se calculó la cantidad de agente estabilizador según nuestro porcentaje óptimo de adición, en este caso 8%.

Para ello empezamos por la realización del cálculo de muestra de suelo y de agente estabilizador que vamos a emplear en un 1 m<sup>2</sup>.

Para ello:

- Para un 1 m<sup>2</sup> y un espesor de 0.2 m, el peso específico del suelo 1900 kg/m<sup>3</sup>  
Peso Húmedo.

$$1m * 1m * 0.20m * 1900 \text{ kg}/m^3 = 380 \text{ kg}$$

Calculando el peso seco con el O.C.H obtenido en nuestros ensayos: 8.08

$$P_w = \frac{\frac{8.08}{100} (380)}{(1 + \frac{8.08}{100})}$$

$$P_w = 17.85$$

- Calculando la cantidad de cemento al 8%

$$(\text{Peso Húmedo} - \text{Peso agua}) * 0.08 = 112.51 \text{ kg}$$

- Porcentaje respecto al peso seco

$$(380 - 17.85) * 0.08 = 28.97 \text{ kg}$$

Posterior a ello realizaremos el cálculo de un APU, considerando los valores del mercado y una cuadrilla de 1 capataz y 5 peones con un rendimiento de 60 m<sup>2</sup> aproximado, ya que se considerará una motoniveladora dentro del análisis y con un jornal respectivo de 8 horas de trabajo. Pudiendo observar, dentro del análisis de precios unitarios que el número de bolsas de cemento que se incluyen es calculado mediante la división de 28.97 kg / 42.5 kg, que es el contenido usual que contiene una bolsa de cemento.

## ESTABILIZACIÓN DE SUELOS ARCILLOSOS CON CEMENTO

1 ESTABILIZACIÓN DE SUELOS  
ARCILLOSOS

## 1.1 PREPARACIÓN DE TERRENO Y ADICIÓN DE CEMENTO

PREPARACIÓN DE TERRENO Y ADICIÓN DE CEMENTO						
Und/DIA	60.0000	EQ.	60.0000	Costo unitario directo por: m2	<b>S/. 96.78</b>	
<b>Descripción Recurso</b>		<b>Unidad</b>	<b>Cuadrilla</b>	<b>Cantidad</b>	<b>P. U</b>	<b>Total</b>
<b>Mano de Obra</b>						
Capataz		hh	0.1000	0.0133	27.49	0.37
PEON		hh	5.0000	0.6667	18.12	12.08
						<b>12.45</b>
<b>Materiales</b>						
Cemento		bls		0.6817	34.50	23.52
Agua puesta en obra		m3		0.0293	15.00	0.44
						<b>23.96</b>
<b>Equipos</b>						
MOTONIVELADORA C/ RIPPER		hm	1.0000	0.1333	450.00	60.00
HERRAMIENTAS MANUALES		%MO		0.0300	12.45	0.37
						<b>60.37</b>

Tabla N° 39 Análisis de precio unitario para estabilización con cemento

Para la estabilización con cal y con CDT, se realizará el mismo procedimiento. Sin embargo, para el proceso de estabilización con CDT, se incluyera un horno artesanal en el cual se procesará la ceniza de Totorá y para el Apu de estabilización con cal se tendrá en cuenta que el contenido de la bolsa de cal viene en presentación de 20 kg.

### ESTABILIZACIÓN DE SUELOS ARCILLOSOS CON CAL

#### 1 ESTABILIZACIÓN DE SUELOS ARCILLOSOS

#### 1.1 PREPARACIÓN DE TERRENO Y ADICIÓN DE CAL

1.1.1.1		PREPARACIÓN DE TERRENO Y ADICIÓN DE CAL				
Und/DIA	60.0000	EQ.	60.0000	Costo unitario directo por: m2	S/. 102.23	
<b>Descripción Recurso</b>		<b>Unidad</b>	<b>Cuadrilla</b>	<b>Cantidad</b>	<b>P. U</b>	<b>Total</b>
<b>Mano de Obra</b>						
CAPATAZ		hh	0.1000	0.0133	27.49	0.37
PEON		hh	5.0000	0.6667	18.12	12.08
						<b>12.45</b>
<b>Materiales</b>						
CAL		bls		1.4486	20.00	28.97
Agua puesta en obra		m3		0.0293	15.00	0.44
						<b>29.41</b>
<b>Equipos</b>						
MOTONIVELADORA C/ RIPPER		hm	1.0000	0.1333	450.00	60.00
HERRAMIENTAS MANUALES		%MO		0.0300	12.45	0.37
						<b>60.37</b>

Tabla N° 40 Análisis de precios unitarios para estabilización con Ca

## ESTABILIZACIÓN DE SUELOS ARCILLOSOS CON CDT

## 1 ESTABILIZACIÓN DE SUELOS ARCILLOSOS

## 1.1 PREPARACIÓN DE TERRENO Y ADICIÓN DE CDT

1.1.1.1		PREPARACIÓN DE TERRENO Y ADICIÓN DE CDT				
Und/DIA	60.0000	EQ.	60.0000	Costo unitario directo por: m2		<b>95.90</b>
<b>Descripción Recurso</b>		<b>Unidad</b>	<b>Cuadrilla</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Precio \$</b>	<b>Parcial \$</b>
<b>Mano de Obra</b>						
CAPATAZ		hh	0.1000	0.0133	27.49	0.37
PEON		hh	5.0000	0.6667	18.12	12.08
						<b>12.45</b>
<b>Materiales</b>						
CENIZA DE TOTORA		Kg		28.9717	0.21	5.98
Agua puesta en obra		m3		0.0293	15.00	0.44
<b>Equipos</b>						
HORNO		hm	1.0000	0.1333	125.00	16.67
MOTONIVELADORA C/ RIPPER		hm	1.0000	0.1333	450.00	60.00
HERRAMIENTAS MANUALES		%MO		0.0300	12.45	0.37
						<b>77.04</b>

Tabla N° 41: Análisis de precios unitarios de estabilización con Ceniza de Totora

Para la obtención del precio de la totora, lo calculamos mediante lo planteado a continuación

COSTO DE TOTORA	250
PREPARACIÓN DE CENIZA DE TOTORA (MATERIALES + JORNAL ELABORACIÓN DE HORNO)	1000

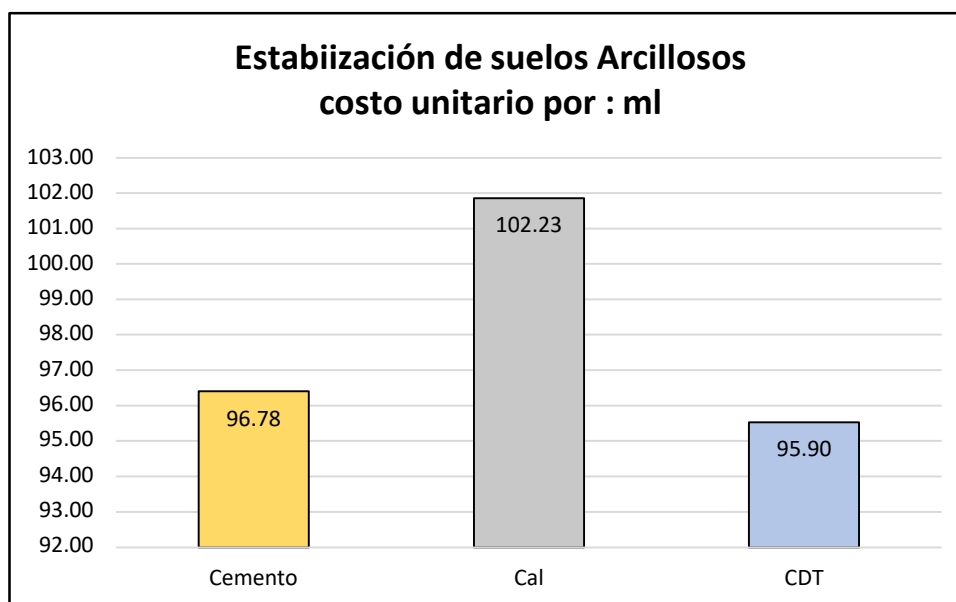
El costo de la ceniza de totora lo considero costo mínimo, en gastos de movilización y preparación del insumo S/. 250.00 ya que, es un material que se puede aprovechar de la limpieza de canales en la ciudad de Ferreñafe y no es aprovechado, para la preparación del horno asumimos un costo de S/. 1000.00 al cual le asumimos una producción de 8000 kg de ceniza de totora, siendo esta una suposición ya que estos hornos pueden producir más cantidades, con estos valores procedemos a calcular el costo de la ceniza de totora

- Costo mínimo de Totora = S/. 250.00
- Considerando el costo de fabricación del horno = S/. 1000.00
- Jornal de personas encargada de calcinar la totora = S/. 400.00
- Producción aproximada = 8000 kg

$$\text{Costo de Producción Ceniza de totora} = (250+1000+400) / 8000 = \text{S/. } 0.20625$$

Entonces por lo presentado en los análisis de precios unitarios, llegamos a los siguientes resultados:

<b>Estabilización de suelos Arcillosos</b>	
	costo unitario por: m2
Cemento	96.78
Cal	102.23
CDT	95.90



Podemos observar que los resultados de la estabilización con Cal es la más costosa y que la más económica es la de la Ceniza de totora, esto debido a que se planteó dentro del análisis de precio unitario un costo mínimo de S/. 250.00 de la totora ya que, esta sería aprovechada de la localidad de Ferreñafe, debió a que la zona rural y agrícola, cuenta con sus respectivos drenes para la circulación del agua y semestralmente limpian estos ya que la totora crece de una manera rápida y no es aprovechada como recurso. Además, la estabilización con totora sería la más favorable económicamente debido a que sí, se decidiera estabilizar con cemento o cal, muy aparte del costo de los insumos, se tendría que considerar flete, situación que no sucede con la totora ya que se recogerá in-situ y será trasladada a un horno cercano realizado artesanalmente.

## CONCLUSIONES

Se determinó que la ceniza de totora influye en el mejoramiento de las propiedades físicas y mecánicas como agente estabilizador de los suelos arcillosos de media plasticidad y que a mayor porcentaje de adición de totora va mejorando las propiedades del suelo, tal como la máxima densidad seca y el CBR.

Se logró determinar las propiedades del suelo, mediante los ensayos brindado en el manual de carreteras del MTC, viendo así que es un suelo de tipo CL según su clasificación SUCS , pobre en resistencia y en comparación a las muestras adicionadas con ceniza de totora, se pueden observar que a mayor contenido de ceniza de totora el LL, O.C.H e I.P disminuyen , caso contrario sucede con la máxima densidad seca y CBR, ya que estos van en aumento. Además, se realizó la composición química, mediante el ensayo de difracción de rayos x , observando que la ceniza de totora contiene elementos como la sílice , calcio que funcionan como materiales cementantes en los suelos.

Se obtuvo el contenido de sales de la muestra patrón, mediante el ensayo de sales solubles encontrando en el suelo un porcentaje bajo en este, 1% de la muestra total, también se logró obtener el O.C.H y la máxima densidad seca mediante el ensayo de Proctor, para el cual los mejores resultados se obtuvieron en la adición del 8% de CDT en la calicata 3 obteniendo valores de 8.08 y 1.94 respectivamente.

Se determinó el índice de CBR de las muestras patrón y adicionadas con CDT, de la cual se obtuvo mejoras notables ya que nuestra muestra patrón ronda un CBR inicial de 4 a 5 % y en nuestro mejor resultado de CBR al 8% de CDT el CBR ronda un valor de 17.67%, por lo cual se puede decir que la subrasante se mejoró de un tipo S1 a una S3, pasando de una subrasante insuficiente a una subrasante buena según el manual de carreteras del MTC

Se demostró mediante los ensayos realizados, que para una adición del 8% de CDT, se obtuvieron los mejores resultados tanto para IP, O.C.H, MDS y CBR.

Se demostró mediante un análisis de precios unitarios, que la estabilización con cenizas de totora in-situ, en la ciudad de Ferreñafe, es menos costosa y favorece a la población local, ya que se aprovecharán los recursos de la zona y se exceptuará el pago de Flete.

## RECOMENDACIONES

- Se recomienda que para la estabilización ya sea en Ferreñafe, o dentro el departamento de Lambayeque se tenga como opción la totora, ya que es una planta que crece rápidamente y en el departamento la podemos encontrar en la mayoría de las ciudades, lo cual disminuiría el costo de estabilizaciones, obteniendo una subrasante de calidad.
- Se recomienda adicionar un porcentaje mayor al 10% para tener la certeza de que a esta cantidad de adición la subrasante empieza a perder resistencia y cohesión de sus partículas, ya que si bien es cierto en nuestras muestras experimentales al 10% decae el CBR, pero en un valor insignificante.
- Se recomienda a las empresas ejecutoras de estabilizaciones de subrasantes arcillosas optar por un ensayo Proctor para determinar el óptimo contenido de humedad al cual el suelo presentará su máxima densidad seca. Además, la energía con la cual se compacta este y el proceso constructivo es fundamental para obtener mejores resultados y una subrasante de mejor calidad.
- Se recomienda analizar la estabilización de los suelos arcillosos teniendo en cuenta mayores temperaturas de calcinación a la de esta investigación, debido a que es en donde la sílice se vuelve cristalina, por lo cual puede influenciar la calcinación y el proceso de enfriamiento de la ceniza.
- En la presente investigación se utilizó la ceniza de totora, como material puzolánico artificial, por lo cual es recomendable utilizarla en conjunto con otro estabilizador como la cal o cemento y observar de qué manera varían sus propiedades físicas y mecánicas

**REFERENCIAS**

- [1] M. E. A. Ormeño y V. N. E. Rivas, "Estudio experimental para determinar la influencia de la aplicación de Cenizas de Cáscara de Arroz (RHA) en la estabilización de una subrasante de suelo arcilloso de baja plasticidad en Chota- Cajamarca", bachelorThesis, Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas (UPC), 2020. Accedido el 1 de junio de 2022. [En línea]. Disponible: <http://hdl.handle.net/10757/653974>
- [2] A. J. Y. Landa y M. S. F. Torres, "Mejoramiento de suelos arcillosos en subrasante mediante el uso de cenizas volantes de bagazo de caña de azúcar y cal", bachelorThesis, Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas (UPC), 2019. Accedido el 3 de junio de 2022. [En línea]. Disponible: <http://hdl.handle.net/10757/626177>
- [3] S. J. J. Escobar, S. G. D. Quispe, S. F. R. Quispe, S. J. B. Arana y Q. R. B. Huarcaya, "Estabilización de una subrasante arcillosa de baja plasticidad con cenizas de cáscara de arroz", bachelorThesis, Pontificia Universidad Católica del Perú, 2020. Accedido el 4 de junio de 2022. [En línea]. Disponible: <http://hdl.handle.net/20.500.12404/18221>
- [4] Instituto Nacional de Defensa Civil, "Plan de uso del suelo y propuestas de medidas de mitigación ante desastres de la ciudad de Ferreñafe", Ferreñafe, Pnud per/02/051 ciudades sostenibles, mayo de 2004.
- [5] A. S. Vizcarra y C. I. L. Lujan, "Análisis experimental de las características mecánicas de la subrasante arcillosa del camino vecinal N° SM-707 Tarapoto – San Francisco de Río Mayo estabilizada con 3% de cal tras la adición de Cenizas de Cáscara de Arroz (CCA)", bachelorThesis, Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas (UPC), 2021. Accedido el 9 de junio de 2022. [En línea]. Disponible: <http://hdl.handle.net/10757/656757>
- [6] J. F. Hidalgo, "Aprovechamiento de la Totorá como material de construcción", bachelorThesis, UCUENCA, Cuenca, 2007. Accedido el 10 de junio de 2022. [En línea]. Disponible: <http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/6180>

- [7] Ministerio de Transportes y. Comunicaciones, "Informe multianual de inversiones en asociaciones público-privadas 2020 -2023", Lima, IMIAPP 2020-2023 MTC, noviembre de 2020.
- [8] Instituto Nacional de Defensa Civil, "Mapa de peligros de la ciudad de Ferreñafe", Ferreñafe, Pnud per/02/051 ciudades sostenibles, diciembre de 2003.
- [9] Instituto Nacional de Estadística e. Informática, "Lambayeque - Resultados definitivos", Lambayeque, Tomo 1, octubre de 2018. Accedido el 10 de junio de 2022. [En línea]. Disponible: [https://www.inei.gob.pe/media/MenuRecursivo/publicaciones\\_digitales/Est/Lib1560/14TOMO\\_01.pdf](https://www.inei.gob.pe/media/MenuRecursivo/publicaciones_digitales/Est/Lib1560/14TOMO_01.pdf)
- [10] W. Vilca, "Comportamiento estructural de muro de albañilería confinada con unidades de ladrillo artesanal incorporando cenizas de totora, Puno 2021" Universidad Cesar Vallejo (UCV), Lima, 2021. Accedido el 29 de mayo de 2022. [En línea]. Disponible: <https://hdl.handle.net/20.500.12692/78920>
- [11] F.G. Chambi, "Evaluación de las propiedades mecánicas del concreto sustituyendo con ceniza de totora en la provincia de Azángaro" Universidad César Vallejo (UCV), Lima, 2022. Accedido el 30 de mayo de 2022. [En línea]. Disponible: <https://hdl.handle.net/20.500.12692/90077>
- [12] A. I. Jaen Cutipa, M. Surco Portillo, C. Aranzábal pataca, D. Vilca Velarde y A. Gutiérrez Quispe, "Resistencia mecánica de mortero con cemento sustituido 5% y 10% por cenizas de Totora", Universidad Nacional del Altiplano Puno, Informe del curso de Tecnología de recursos constructivos, marzo de 2020.
- [13] M. S. Arriaga Sandi y L. L. Palomino Salvatierra, "Evaluación del mejoramiento de suelos lateríticos con cenizas de productos orgánicos y cenizas volantes", Tesis de Bachiller, Universidad Peruana Unión, Lima, 2020. Accedido el 10 de junio de 2022. [En línea]. Disponible: <http://hdl.handle.net/20.500.12840/3409>

- [14] A. B. Moale Quispe and E. J. Rivera Justo, "Estabilización química de suelos arcillosos con cal para su uso como subrasante en vías terrestres de la localidad de Villa Rica," Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas (UPC), Lima, Perú, 2019. <http://hdl.handle.net/10757/648846>
- [15] L. C. Abanto Espinoza y E. Salinas Sánchez, "Análisis de la estabilización de subrasantes con uso de ceniza de bagazo de caña de azúcar y cal en el Perú," Universidad Privada Del Norte (UPN), Trujillo, Perú, 2021. <https://hdl.handle.net/11537/29043>
- [16] E. Nnochiri y O. Aderinlewo, "Geotechnical properties of lateritic soil stabilized with the ashes of oil palm fronds", *Stavební obzor - Civil Engineering Journal*, vol. 25, n. ° 4, 2016. Accedido el 23 de junio de 2022. [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.14311/cej.2016.04.0022>
- [17] J. F. Hidalgo, "Aprovechamiento de la totora como material de construcción" Universidad de Cuenca, Ecuador, 2007. <http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/6180>
- [18] Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento, "Norma CE0.20 Suelos y taludes", Lima ,2012
- [19] A. Kumar Yadav, K. Gaurav, R. Kishor y S. K. Suman, "Stabilization of alluvial soil for subgrade using rice husk ash, sugarcane bagasse ash and cow dung ash for rural roads", *International Journal of Pavement Research and Technology*, vol. 10, n. ° 3, pp. 254–261, mayo de 2017. Accedido el 7 de julio de 2022. [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.1016/j.ijprt.2017.02.001>
- [20] R. Aparna, "Soil Stabilization using Rice Husk Ash and Cement", *International Journal of Civil Engineering*, vol. 5, n. ° 1, pp. 1–6, 2014. Accedido el 2 de julio de 2022. [En línea]. Disponible: <https://scholar.google.com.pe/scholar?q=Soil+Stabilization+using+Rice+>

- Husk+Ash+and+Cement&hl=es&as\_sdt=0&as\_vis=1&oi=scholar  
t
- [21] C. Crespo Villalaz, *Mecánica De Suelos Y Cimentaciones*, 5th ed. México: Limusa,2004. [En línea]. Disponible en: <https://stehven.files.wordpress.com/2015/06/mecanica-desuelos-y-cimentaciones-crespo-villalaz.pdf>
- [22] Ministerio de transportes y Comunicaciones, *Manual de carreteras: suelos, Geología, Geotecnia y pavimentos: sección suelos y pavimentos* (2014) [En línea]. Disponible: <https://bit.ly/3CemRyN>
- [23] Ministerio de transportes y Comunicaciones, *Manual De Carreteras: Especificaciones Técnicas Generales Para Construcción*, EG-2013. Disponible en: <https://bit.ly/3mk85Rm>
- [24] *Pavimentos Urbanos*, Instituto de la Construcción y Gerencias. CE 010-AÑO 2010. Disponible en: <https://www.construccion.org/normas/rne2012/rne2006.htm>
- [25] Ministerio de transportes y Comunicaciones, *Manual de ensayos de materiales*, 2016. Disponible en: <https://bit.ly/3r3RBjc>
- [26] Instituto de normas técnicas de costa rica, “Geotecnia. Especificación estándar para clasificación de suelos y mezclas de suelo-agregado para propósitos de construcción de carreteras”. [En línea]. Disponible en: <https://www.inteco.org/shop/inte-c365-2020-geotecnia-especificacion-estandar-para-clasificacion-de-suelos-y-mezclas-de-suelo-agregado-para-propositos-de-construccion-de-carreteras-8847#attr=>
- [27] Instituto Nacional de Calidad, “Catalogo Normas técnicas peruanas”. [En línea]. Disponible en: <https://www.inacal.gob.pe/cid/categoria/catalogo-bibliografico>
- [28] Ceniza volante de carbón y puzolana natural cruda o calcinada para su uso en hormigón, ASTM C618 – 19. [Online]. Disponible en: <https://pdfcoffee.com/astm-c618-19-spanish-3-pdf-free.html>

- [29] A. Montejo Fonseca, Ingeniería de Pavimentos para Carreteras, 2th ed. Colombia: 2002. Disponible en: [https://www.academia.edu/22782711/Ingenieria\\_de\\_pavimentos\\_Alfonso\\_Montejo\\_Fonseca](https://www.academia.edu/22782711/Ingenieria_de_pavimentos_Alfonso_Montejo_Fonseca)
- [30] C. H. Higuera Sandoval, J. C. Gómez Cristancho y O. E. Pardo Naranjo, “Caracterización De Un Suelo Arcilloso Tratado Con Hidróxido De Calcio”, Revista Facultad De Ingeniería (UPTC), Vol. 21, N°.32, pp.21-40, enero-junio de 2012. Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=4222676>
- [31] M. Borja S. Metodología de la investigación científica para ingenieros. Chiclayo, 2016. [En línea]. Disponible en: [https://www.academia.edu/33692697/Metodolog%C3%ADa\\_de\\_Investigaci%C3%B3n\\_Cient%C3%ADfica\\_para\\_ingenier%C3%ADa\\_Civil](https://www.academia.edu/33692697/Metodolog%C3%ADa_de_Investigaci%C3%B3n_Cient%C3%ADfica_para_ingenier%C3%ADa_Civil)
- [32] W. Machaca L. Influencia de cenizas del sistema radicular de la totora en la estabilización de la subrasante en la carretera Orurillo-Nuñoa, Lima, 2022. [En línea]. Disponible en: <https://hdl.handle.net/20.500.12692/92563>
- [33] A. F. Castro Cuadra, “Estabilización De Sueos Arcilloso Con Ceniza De Cascara De Arroz Para El Mejoramiento De Subrasante”, Tesis de Pregrado, Lima, Universidad Nacional de Ingeniería, Perú, 2017. [En línea]. Disponible en: [https://alicia.concytec.gob.pe/vufind/Record/UUNI\\_8c0b64fb2da9d5b50002dd91c058774e](https://alicia.concytec.gob.pe/vufind/Record/UUNI_8c0b64fb2da9d5b50002dd91c058774e)

**ANEXOS**

*Anexo 01: Estado de vías de suelo arcilloso en zona agrícola y rural*

*Fuente : Elaboración propia*



*Anexo 02: Crecimiento de Totora en Drenes y Acequias*

*Fuente: Elaboración propia*

## ANEXO 03: Solicitud de constancia de la No existencia de la investigación en el Banco de proyectos de la municipalidad



"Año del fortalecimiento de la Soberanía Nacional"

SEÑORA: Violeta Patricia Muro Mesones  
SOLICITA: Permiso para realizar trabajo de Investigación  
REFERENCIA: Proyecto de Tesis denominado:

**"ANÁLISIS DE PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS EN SUELOS ARCILLOSOS ADICIONANDO PORCENTAJES DE CENIZA DE SCHOENOPECTUS CALIFORNICUS EN FERREÑAFE, LAMBAYEQUE"**

De mi consideración:

Yo, **FERNÁNDEZ BERNAL FLAVIO ANDRÉ** identificado con DNI N° 72051046, en calidad de estudiante de la Universidad Católica Santo Toribio de Mogrovejo de la Ciudad de Chiclayo, he optado por desarrollar el siguiente proyecto investigativo : "ANÁLISIS DE PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS EN SUELOS ARCILLOSOS ADICIONANDO PORCENTAJES DE CENIZA DE SCHOENOPECTUS CALIFORNICUS EN FERREÑAFE, LAMBAYEQUE", motivo por el cual solicito a su digno despacho una **CONSTANCIA** que indique que el mencionado proyecto no se encuentra en el Banco de Proyectos de la Municipalidad Distrital de Ferreñafe.

POR LO EXPUESTO:

Agradeceré mucho a Ud. Señora Violeta Patricia Muro Mesones alcaldesa de Ferreñafe, acceder a mi solicitud por el motivo antes mencionado.

FERREÑAFE, 13 DE MAYO DEL 2021

MUNICIPALIDAD PROVINCIAL DE FERREÑAFE	
ÁREA FUNCIONAL TRÁMITE DOCUMENTARIO	
13 JUN. 2022	
EXP. N°:	249731
REG. N°:	743151 FOLIOS: 01
HORA:	10:52 FIRMA: <i>[Firma]</i>

*[Firma]*  
 FLAVIO ANDRÉ FERNÁNDEZ BERNAL  
 DNI:72051046

## ANEXO 04: Solicitud de autorización y permisos para realización de ensayos



"Año del fortalecimiento de la Soberanía Nacional"

SEÑORA: Violeta Patricia Muro Mesones

SOLICITA: Permiso para realizar trabajo de Investigación

REFERENCIA: Proyecto de Tesis denominado:

**"ANÁLISIS DE PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS EN SUELOS ARCILLOSOS ADICIONANDO PORCENTAJES DE CENIZA DE SCHOENOPLECTUS CALIFORNICUS EN FERREÑAFE, LAMBAYEQUE"**

De mi consideración:

Yo, **FERNÁNDEZ BERNAL FLAVIO ANDRÉ** identificado con DNI N° 72051046, con domicilio Nicanor Carmona 181, del distrito de Ferreñafe. Ante Ud. respetuosamente me presento y expongo:

Que, en calidad de estudiante de la carrera de Ingeniería Civil Ambiental de la "Universidad Católica Santo Toribio de Mogrovejo" de la ciudad de Chiclayo, Departamento de Lambayeque, he optado por desarrollar el proyecto de tesis de la referencia, motivo por el cual solicito a su digno despacho la **AUTORIZACIÓN** para realizar trabajo de investigación en su municipio y se me brinde acceso a la información, así como se me permita poder realizar mis ensayos insitu, con fines de obtener datos que me permitan desarrollar mi proyecto de tesis el cual contribuirá e impactará en el distrito de Ferreñafe.

POR LO EXPUESTO:

Agradeceré mucho a Ud. Señora Violeta Patricia Muro Mesones alcaldesa de Ferreñafe, acceder a mi petición que espero alcanzar por ser de justicia.

FERREÑAFE, 13 DE MAYO DEL 2021



  
 FLAVIO ANDRÉ FERNÁNDEZ BERNAL  
 DNI:72051046

## ANEXO 05: Autorización y permisos para realización de ensayos.



Municipalidad Provincial de  
Ferreñafe

"AÑO DEL FORTALECIMIENTO DE LA SOBERANÍA NACIONAL"

Ferreñafe, 15 de Junio del 2022

**OFICIO N° 018-2022-MPF/UGRH**

Señor:  
**FLAVIO ANDRE FERNANDEZ BERNAL**  
**Chiclavo.-**


**ASUNTO : AUTORIZACIÓN PARA EL DESARROLLO DE INVESTIGACION**  
**REF. : EXPEDIENTE 249731- FECHA 13 DE JUNIO DEL 2022**

De mi consideración:

Tengo a bien dirigirme a Ustedes, para saludarlo en nombre de la Municipalidad Provincial de Ferreñafe y por este intermedio hacerles conocer que con documento de la referencia solicita la autorización para desarrollo de investigación "ANÁLISIS DE PROPIEDAD FÍSICA Y MECÁNICA EN SUELOS ARCILLOSOS ADICIONANDO PORCENTAJES DE CENIZA DE *SCHOENOPLECTUS CALIFORNICUS* EN FERREÑAFE LAMBAYEQUE", documento que ha sido **ACEPTADO** por nuestra Institución; por tanto le hago de conocimiento que el estudiante estará realizando su Proyecto de Investigación en esta Entidad.

Hago propicia la ocasión para reiterarle los sentimientos de mi sincera consideración y estima personal.

Atentamente,

  
SANTIAGO ALEXANDER VASQUEZ  
JEFE (E) DE LA UNIDAD DE GESTIÓN DE RECURSOS HUMANOS

MUNICIPALIDAD PROVINCIAL DE FERREÑAFE  
UNIDAD DE GESTIÓN DE RECURSOS HUMANOS

N° DE EXPEDIENTE: 249731

N° DE REGISTRO : 446339

FOLIOS 01


FECHA: 15.06.2022


HORA : 1:10 PM.

FIRMA:

c.c.: Archivo

 Nicanor Carmona N° 436  
Ferreñafe

 074 287876

 [www.muniferreñafe.gob.pe](http://www.muniferreñafe.gob.pe)



## ANEXO 06: Autorización y permisos para realización de ensayos



"AÑO DEL FORTALECIMIENTO DE LA SOBERANÍA NACIONAL"

EXPEDIENTE N° 249732

### AUTORIZACION

**LA GERENCIA DE INFRAESTRUCTURA Y DESARROLLO URBANO, de la Municipalidad Provincial de Ferreñafe a través de la DIVISION DE DESARROLLO URBANO Y RURAL.**

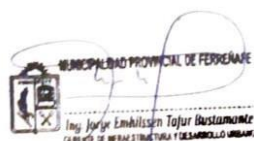
#### **AUTORIZA:**

Al sr. **FLAVIO ANDRE FERNANDEZ BERNAL** con DNI N° 72051046, para que realice los trabajos de investigación para la tesis denominada "ANALISIS DE PROPIEDADES FISICAS Y MECANICAS EN SUELOS ARCILLOSOS ADICIONANDO PORCENTAJES DE CENIZA DE SCHOENOPECTUS CALIFORNICUS en el Distrito y Provincia de Ferreñafe, Departamento de Lambayeque.

La Municipalidad Provincial de Ferreñafe, a través de esta Jefatura supervisará el cumplimiento de dicha Autorización, así mismo el solicitante se comprometa a dejar libre y limpia la vía pública para el tránsito peatonal y vehicular en el lapso de su autorización, así mismo está prohibido preparar mezcla de concreto armado en pista y/o vereda, para el caso de calicatas deberán ser cerradas al terminar los ensayos.

*Se expide la presente, para los fines que el propietario lo estime conveniente.*

*Ferreñafe, 15 de junio del 2022.*

MUNICIPALIDAD PROVINCIAL DE FERREÑAFE  
  
 Ing. Jorge Embilissen Tajur Bastamante  
 JEFE DE DIVISION DE INFRAESTRUCTURA Y DESARROLLO URBANO

☎ Teléfono Municipal: 051 436 436 436  
 Ext: 101

☎ 074 207 874

🌐 [www.muniprovferreñafe.gob.pe](http://www.muniprovferreñafe.gob.pe)



**ANEXO 08: ENSAYOS DE LABORATORIO**

**<https://drive.google.com/drive/folders/1Mxv46iHtW9dFwzBpATMcHl97i32BFNQk?usp=sharing>**