

# UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE LOS ANDES

## FACULTAD DE INGENIERÍA

### ESCUELA PROFESIONAL: DE INGENIERÍA CIVIL



#### Tesis

**Análisis de incorporación de cal viva y aceite reciclado en el CBR de la subrasante AP-104 Km 47+500–48+700 Talavera – Pucaccasa, Andahuaylas, Apurímac, 2024**

#### Asesor:

Mag. Ing. Saavedra Ore, Danilo

#### Autor:

Tambraico Chuhui, Edison

**Para optar el Título Profesional de:** Ingeniero Civil

Abancay – Apurímac – Perú

2025

## Acta de sustentación



**Universidad  
Tecnológica de los Andes**

*Transformando vidas*

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL

### ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TÍTULO PROFESIONAL

Acta N°: 062



En la ciudad de Abancay, a los veinte uno días del mes de agosto del 2025, siendo las 9:00 am horas, se reunieron los integrantes del Jurado designado por Resolución Directoral N° 0674-2025- EPIC-FI-UTEA-SA de fecha 12 de agosto del 2025, de la Escuela Profesional de Ingeniería Civil de la Facultad de Ingeniería:

Presidente :	Ph. D. Vasquez Ramirez, Abbon Alex
Dictaminante :	Mag. Roldan Juárez, Américo
Replicante :	Dr. Soto Palomino, Wilfredo

Para evaluar la sustentación, en la modalidad de:

Tesis       Trabajo de suficiencia profesional

Titulada:

Análisis de incorporación de cal viva y aceite reciclado en el CBR de la subrasante AP-104 km 47+500-48+700 Talavera – Pucaccasa, Andahuaylas, Apurímac, 2024

Desarrollado por las (los) Bachilleres (es):

Br: Tambaico Chuhui, Edison

Para optar el Título Profesional de:

Ingeniero Civil

Concluido el acto, el Jurado dictaminó que el (la) (los) mencionado(a) (s) bachiller (es) fue (ron) APROBADO (S):

Por: Mayoría  
(Unanimidad o Mayoría) (\*)

Emitiéndose el calificativo final de:

Bachiller (Apellidos y Nombres)	Calificación (**)
Tambaico Chuhui, Edison	Aprobado

Siendo las 10:35am horas concluyó la sesión, firmando los integrantes del Jurado.

Presidente: Ph. D. Vasquez Ramirez, Abbon Alex

Dictaminante: Mag. Roldan Juárez, Américo

Replicante: Dr. Soto Palomino, Wilfredo

Abancay 28 de agosto del 2025

Se expide la presente conforme al Libro de Actas de Sustentación de Tesis, consignado en los folios N° 351

**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE LOS ANDES**  
Ciudad Universitaria Av. Perú N° 700, Abancay, Central Telefónica 051 (083) 321559  
Filial Cusco, Av. Grau N° 516, Teléfono (084) 251565  
Filial Andahuaylas, Av. Juan Antonio Trelles N° 513 Teléfono (083) 421752  
[www.utea.edu.pe](http://www.utea.edu.pe)

(\*): Mayoría: Dos integrantes del jurado aprueban o desaprueban; Unanimidad: Todos los integrantes del jurado aprueban o desaprueban; Art. 18 RGAT.  
(\*\*): 0 a 10: Desaprobado, 11 a 15: Aprobado, 16 a 18: Aprobado Notable, 19 y 20: Aprobado con Distinción, Art. 18 RGAT.

# Reporte de similitud






## 20% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...

### Filtrado desde el informe

- Bibliografía
- Coincidencias menores (menos de 8 palabras)

### Fuentes principales

- 16%  Fuentes de Internet
- 3%  Publicaciones
- 18%  Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

### Marcas de integridad

N.º de alertas de integridad para revisión

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitirían distinguirlo de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarlo.

Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y la revise.



## Metadatos

<b>Datos del Autor</b>	
Apellidos y Nombres	: Tambranco Chuhui Edison
Tipo de Documento de Identidad	: DNI
Numero de Documento de Identidad	: 74130551
URL ORCID	: <a href="https://orcid.org/0009-0001-3153-1221">https://orcid.org/0009-0001-3153-1221</a>
<b>Datos del Asesor</b>	
Apellidos y Nombres	: Mag. Ing. Saavedra Ore, Danilo
Tipo de Documento de Identidad	: DNI
Numero de Documento de Identidad	: 72846839
URL ORCID	: <a href="https://orcid.org/0000-0002-1757-9616">https://orcid.org/0000-0002-1757-9616</a> .
<b>Datos de la investigación</b>	
Facultad	: Ingeniería
Escuela profesional	: Ingeniería Civil
Línea de Investigación	: Gestión de la infraestructura para el desarrollo sostenible
Rango de años en que se realizó la investigación	: 2024 al 2025
Fuente de financiamiento	: propia
Porcentaje de similitud	: 20 %
URL de OCDE	: <a href="https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#2.01.01">https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#2.01.01</a> .

## **Dedicatoria**

A mi padre Lucio Casiano, quien me enseñó el valor de la libertad el esfuerzo y el trabajo duro y necesario para cumplir sueños y metas, por impulsar el inicio de este proyecto y apoyando en cada proceso. A mi madre Maximiliana por ser símbolo de valentía y voluntad inquebrantable ante dificultades que siempre nos aqueja en el día a día, quien a pesar de las situaciones de infortunio estuvo y está ahí apoyándonos con el fin de lograr nuestras sueños y metas, porque cada logro y meta alcanzado por los hijos es también para los padres. A mis hermanos, Adalbert por ser paciente y comprensible, a Kenyi por su ayuda incondicional durante la ejecución de este proyecto, a Mayra por inspirar confianza en cada proyecto que inicio.

A mi Abuelita Fortunata Céspedes, quien nos vio crecer en su regazo y fue compañía durante una parte de nuestra vida, gracias por todo y por tus bendiciones que nos brindas desde donde te encuentres.

Al Ingeniero Hermógenes Tupa, quien fue mi primer mentor y me inspiró mucho más para lograr ser Ingeniero Civil, por ser el primero en creer y demostrar que mis habilidades se pueden mejorar para tener un mejor desempeño y mucho éxito.

A Dios, por permitirme establecer valiosos vínculos entre amistades y colegas durante mi formación académica y profesional, relaciones fundamentales de mi desarrollo, cuyas contribuciones fueron precisos en la culminación de esa etapa.

## **Agradecimiento**

Primordialmente, expreso mi profunda gratitud al señor padre nuestro, por su invariable guía, fortaleza y bendición en cada curso de este propósito. A él debo el don de la vida, el crecer y compartir mi vida junto a personas maravillosas, porque con Dios y para Dios todo es posible.

A mis docentes, quienes compartieron sus conocimientos, experiencias y anécdotas que inspiran para continuar con máximo esfuerzo.

A mis asesores, por brindar ese apoyo necesario para iniciar, completar y hacer realidad este proyecto.

## Resumen

Las investigaciones conexas al análisis del CBR en suelos tratados con cal viva y aceite reciclado son limitados, centrándose principalmente en estudios individuales. Para ello, se realizó esta investigación con muestra extraída de la carretera AP 104, km 47+500 – 48+700, que se encuentra en el tramo Talavera Pucaccasa, Provincia de Andahuaylas, precisamente en la frontera entre la Jurisdicción de Huancaray y San Antonio de Cachi. La intención fue analizar la influencia de la incorporación de cal viva y aceite reciclado en el CBR, tanto en el ejemplar patrón como en las muestras con dosificación de 4% de cal viva más 2%, 6% y 8% de aceite reciclado. Para realizar los ensayos pertinentes, se hizo uso como base teórica las normatividades del Manual de Ensayo de Materiales MTC-2014. Asimismo, se utilizó el Manual de Procedimientos de Ensayos de Suelos y Memoria de Cálculos INV-2021 y las normas ASTM establecidos para cada ensayo. Se determinó una reducción significativa en el IP al incrementar el % de aceite reciclado. Por otro lado, la densidad seca óptima presenta un cambio mínimo, y se evidenció una disminución del % humedad óptima al incrementar el % de aceite reciclado. De acuerdo a los resultados, el CBR óptimo al 100% se consiguió al adicionar 4% de cal viva (CV) más 2 y 6% de Aceite reciclado (AR), alcanzando incrementos del 29.30% y 9.31%, respectivamente en semejanza con la muestra patrón a una profundidad de 0.2”.

**Palabras claves:** California Bearing Ratio (CBR), aceite reciclado, cal viva, límites de Atterberg.

## **Abstract**

This research evaluates the influence of adding quicklime and recycled oil on the California Bearing Ratio (CBR) of subgrade soils, addressing the limited availability of comprehensive studies on this topic. Soil samples were collected from road section AP-104, between kilometers 47+500 and 48+700, located in the province of Andahuaylas, Apurímac region. The study analyzed both the natural (control) sample and samples treated with a fixed 4% quicklime and varying percentages of recycled oil (2%, 6%, and 8%). Laboratory tests were conducted following the standards of the MTC Soil Testing Manual (2014), the INV Procedures Manual (2021), and applicable ASTM specifications. Results indicated a significant reduction in the Plasticity Index (PI) with increasing recycled oil content. Additionally, the maximum dry density showed minimal variation, while the optimum moisture content decreased as the recycled oil percentage increased. The most effective CBR improvements at 100% compaction were obtained with 4% quicklime and 2% or 6% recycled oil, achieving increases of 29.30% and 9.31%, respectively, at a depth of 0.2" compared to the control sample.

**Keywords:** California Bearing Ratio (CBR), recycled oil, quicklime, Atterberg limits.

## Índice General

<b>Portada</b> .....	<b>i</b>
<b>Acta de sustentación</b> .....	<b>ii</b>
<b>Reporte de similitud</b> .....	<b>iii</b>
<b>Metadatos</b> .....	<b>iv</b>
<b>Dedicatoria</b> .....	<b>v</b>
<b>Agradecimiento</b> .....	<b>vi</b>
<b>Resumen</b> .....	<b>vii</b>
<b>Abstract</b> .....	<b>viii</b>
<b>Índice General</b> .....	<b>ix</b>
<b>Índice de tablas</b> .....	<b>xiv</b>
<b>Índice de Figuras</b> .....	<b>xv</b>
<b>Índice de Anexos</b> .....	<b>xviii</b>
<b>I. Introducción</b> .....	<b>19</b>
<b>II. Planteamiento del Problema</b> .....	<b>20</b>
2.1. Descripción y formulación del problema .....	20
2.1.1. Problema general .....	21
2.1.2. Problemas específicos.....	21
2.2. Objetivos .....	22
2.2.1. Objetivo General.....	22
2.2.2. Objetivos Específicos .....	22
2.3. Justificación e importancia.....	22
2.3.1. Delimitación de la Investigación.....	23

2.3.2.	Social .....	23
2.3.3.	Conceptual .....	23
2.3.4.	Viabilidad de la Investigación.....	23
2.3.5.	Limitaciones .....	23
2.4.	Hipótesis.....	24
2.4.1.	Hipótesis general.....	24
2.4.2.	Hipótesis específicas .....	24
2.5.	VARIABLES .....	24
2.5.1.	Operacionalización de variables .....	25
<b>III.</b>	<b>Marco teórico .....</b>	<b>27</b>
3.1.	Antecedentes.....	27
3.1.1.	Antecedentes internacionales.....	27
3.1.2.	Antecedentes nacionales.....	30
3.1.3.	Antecedentes regionales y locales.....	33
3.2.	Bases Teóricas.....	34
3.2.1.	Método de ensayo de granulometría .....	34
3.2.2.	Límite líquido .....	37
3.2.3.	Límite plástico.....	39
3.2.4.	Resistencia CBR .....	41
3.2.5.	Peso unitario del suelo .....	44
3.2.6.	Cal viva.....	48
3.2.7.	Aceite reciclado .....	49
3.2.8.	Dosificación de materiales .....	50

3.3.	Definición de términos .....	51
<b>IV.</b>	<b>Metodología.....</b>	<b>56</b>
4.1.	Tipo y nivel de investigación .....	56
4.1.1.	Tipo de investigación .....	56
4.1.2.	Nivel de investigación .....	56
4.1.3.	Alcance de la investigación.....	56
4.1.4.	Diseño de investigación.....	57
4.1.5.	Enfoque de la investigación .....	57
4.1.6.	Método de la investigación .....	58
4.1.7.	Recolección de datos de la investigación .....	58
4.2.	Ámbito temporal y espacial.....	58
4.2.1.	Temporal .....	58
4.2.2.	Espacial.....	58
4.3.	Población y muestra .....	59
4.3.1.	Población.....	59
4.3.2.	Muestra .....	59
4.3.3.	Muestreo .....	60
4.4.	Instrumentos.....	60
4.4.1.	Técnicas .....	61
4.5.	Procedimientos.....	61
4.6.	Análisis de datos .....	62
4.7.	Consideraciones éticas.....	63
<b>V.</b>	<b>Resultados y discusión .....</b>	<b>65</b>

5.1.	Resultados .....	65
5.1.1.	Granulometría.....	65
5.1.2.	Límites de consistencia .....	66
5.1.3.	Clasificación .....	68
5.1.4.	Contenido de humedad .....	69
5.1.5.	Compactación.....	70
5.1.6.	Profundidad de penetración.....	74
5.1.7.	Relación de soporte de california.....	77
5.2.	Discusión de resultados.....	79
5.2.1.	Objetivos General.....	79
5.2.2.	Objetivo específico 1 .....	80
5.2.3.	Objetivo específico 2 .....	81
5.2.4.	Objetivo específico 3 .....	81
5.3.	Prueba de hipótesis.....	82
5.3.1.	Prueba hipótesis general.....	82
5.3.2.	Prueba de hipótesis específica 1 .....	84
5.3.3.	Prueba de hipótesis específica 2 .....	85
5.3.4.	Prueba de hipótesis específica 3 .....	86
<b>VI.</b>	<b>Conclusiones.....</b>	<b>88</b>
<b>VII.</b>	<b>Recomendaciones.....</b>	<b>90</b>
<b>VIII.</b>	<b>Referencias.....</b>	<b>91</b>
<b>IX.</b>	<b>Anexos.....</b>	<b>102</b>
9.1.	Contrato de alquiler de laboratorio de suelos.....	116

9.2.	Resultado de ensayo de muestra patrón .....	118
9.3.	Resultado de muestra patrón más 4% cal viva y 2% aceite reciclado .....	127
9.4.	Resultado de muestra patrón más 4% cal viva y 6% aceite reciclado .....	132
9.5.	Resultado de muestra patrón más 4% cal viva y 8% aceite reciclado .....	137
9.6.	Evidencias fotográficas .....	142

## Índice de tablas

<b>Tabla 1.</b> <i>Matriz de Operacionalización de variables</i>	25
<b>Tabla 2.</b> <i>Valores de orientación de diámetro máximo del material</i>	35
<b>Tabla 3.</b> <i>Métodos de ensayo normal de compactación</i>	45
<b>Tabla 4.</b> Reactividad de la cal viva según tipo.	48
<b>Tabla 5.</b> Distribución granulométrica estándar	48
<b>Tabla 6.</b> <i>Análisis granulométrico mediante cribado</i>	65
<b>Tabla 7.</b> <i>Límites de Atterberg</i>	66
<b>Tabla 8.</b> <i>Análisis de varianza del soporte de california a través del método ANOVA.</i>	83
<b>Tabla 9.</b> <i>Análisis de varianza para la densidad seca máxima a través del método de ANOVA</i>	84
<b>Tabla 10.</b> <i>Análisis de Varianza para el índice de plasticidad por el método de ANOVA</i>	85
<b>Tabla 11.</b> <i>Análisis de Varianza para el ensayo de penetración por el método de ANOVA</i>	86

## Índice de Figuras

<b>Figura 1</b> <i>Curva de Fluidez</i> .....	39
<b>Figura 2</b> <i>Procedimiento de impactos de la compactación en moldes de 4 pulgadas.</i> .....	46
<b>Figura 3.</b> <i>Diagrama de cajas para varianza de ANOVA</i> .....	62
<b>Figura 4.</b> <i>Distribución de granulométrica</i> .....	66
<b>Figura 5.</b> <i>Límites de consistencia.</i> .....	67
<b>Figura 6.</b> <i>Carta de plasticidad.</i> .....	68
<b>Figura 7.</b> <i>Humedad del suelo.</i> .....	69
<b>Figura 8.</b> <i>Curva de compactación de la muestra patrón para determinar la densidad seca máxima y la humedad óptima.</i> .....	70
<b>Figura 9.</b> <i>Curva de compactación de la muestra más 4% de cal viva (CV) más 2% de aceite reciclado (AR) para determinar la densidad seca máxima y la humedad óptima.</i> ..	71
<b>Figura 10.</b> <i>Curva de densificación para espécimen con 4% de cal viva (CV) más 6% de aceite reciclado (AR)</i> .....	72
<b>Figura 11.</b> <i>Curva de compactación para muestra con 4% de cal viva (CV) más 8% de aceite reciclado (AR)</i> .....	73
<b>Figura 12.</b> <i>Relación de densidad seca máxima y humedad óptima</i> .....	74
<b>Figura 13.</b> <i>Resistencia a la penetración a 56 golpes.</i> .....	75
<b>Figura 14.</b> <i>Resistencia a la penetración a 25 golpes.</i> .....	76
<b>Figura 15.</b> <i>Resistencia a la penetración a 12 golpes.</i> .....	77
<b>Figura 16.</b> <i>Relación de soporte a 0.1”.</i> .....	78
<b>Figura 17.</b> <i>Relación de soporte de california a 0.2”</i> .....	79
<b>Figura 18</b> <i>Demarcado de las dimensiones de calicata</i> .....	142

<b>Figura 19</b> <i>Proceso de excavación de calicata</i> .....	142
<b>Figura 20</b> <i>Proceso de Excavación de calicata</i> .....	143
<b>Figura 21</b> <i>Profundidad de calicata con presencia de napa friática</i> .....	143
<b>Figura 22</b> <i>Estratigrafía de calicata a 1.50m de profundidad</i> .....	144
<b>Figura 23.</b> <i>Preparación de muestra para ensayo de granulometría</i> .....	144
<b>Figura 24.</b> <i>Ensayo de cuarteo</i> .....	145
<b>Figura 25.</b> <i>Muestra inicial para ensayo de granulometría</i> .....	145
<b>Figura 26.</b> <i>Lavado de muestra en la criba 200 para eliminación de partículas finas. ....</i>	146
<b>Figura 27.</b> <i>Pesado de muestra posterior al lavado.</i> .....	146
<b>Figura 28.</b> <i>Datos obtenidos posterior al cribado</i> .....	147
<b>Figura 29.</b> <i>Cantidad de muestras en recipiente de acuerdo a la cantidad retenida en cada criba</i> .....	147
<b>Figura 30.</b> <i>Cantidad de muestra posterior al cribado</i> .....	148
<b>Figura 31.</b> <i>Preparación de muestra para ensayo de límite líquido</i> .....	148
<b>Figura 32.</b> <i>Ranurado y muestra extraída para la determinación de la cantidad de agua</i> .....	149
<b>Figura 33.</b> <i>Ensayo de límite plástico para muestra patrón</i> .....	149
<b>Figura 34.</b> <i>Ensayo de límite plástico</i> .....	150
<b>Figura 35.</b> <i>Preparación de muestra con dosificación de cal viva y aceite reciclado para ensayo de CBR</i> .....	150
<b>Figura 36.</b> <i>Ensayo de compactación con muestra dosificada</i> .....	151
<b>Figura 37.</b> <i>Preparación de cámara de inundación</i> .....	151

<b>Figura 38.</b> <i>Moldes ensayados depositados en cámara de inundación, cubierto con agua en su totalidad.</i> .....	152
<b>Figura 39.</b> <i>Lectura del dial que permite medir la expansión diaria de la muestra inundada.</i> .....	152
<b>Figura 40.</b> <i>Ensayo de resistencia a la penetración con pisto de fuerza aplicada en cada molde.</i> .....	153
<b>Figura 41.</b> <i>Características de las muestras posterior al ensayo de penetración.</i> .....	153

## Índice de Anexos

<b>Anexo 1</b> Matriz de Consistencia .....	102
<b>Anexo 2.</b> Operacionalización de variables.....	104
<b>Anexo 3.</b> Certificado de calibración de equipos.....	105
<b>Anexo 4.</b> Resultado de ensayo de muestra patrón.....	118
<b>Anexo 5.</b> Resultado de muestra patrón más 4% cal viva y 2% aceite reciclado .....	127
<b>Anexo 6.</b> Resultado de muestra patrón más 4% cal viva y 6% aceite reciclado .....	132
<b>Anexo 7.</b> Resultado de muestra patrón más 4% cal viva y 8% aceite reciclado .....	137
<b>Anexo 8.</b> Evidencias fotográficas .....	142

## I. Introducción

La magnitud del suelo de subrasante para soportar es un componente crítico en la ejecución de carreteras, debido a que condiciona concisamente en la durabilidad y solidez de la carpeta de rodadura (Das, 2010). En el Perú, especialmente en regiones como Apurímac, las vías terrestres enfrentan desafíos debido a suelos con baja resistencia, lo que incrementa el precio de mantenimiento y reduce su tiempo de vida de las carreteras (MTC, 2018). Ante la problemática, la modificación de suelos mediante aditivos como la cal viva y aceite recaldado se plantea como una opción sostenible y económica para incrementar la resistencia de la suelo que compone la subrasante.

La hipótesis planteada sugiere que la mezcla de cal viva y aceite reciclado incrementa significativamente el CBR de la subrasante, optimizando costos y reduciendo el impacto ambiental al reutilizar residuos industriales. Para ello en esta investigación se ha realizado ensayos en la muestra patrón con dosificaciones de 4% de cal viva más 2%, 6% y 8% de aceite reciclado. Este proyecto de investigación tiene como fin plantear la combinación de estos materiales como agente estabilizante de fácil obtención con aplicaciones en variados proyectos de la ingeniería civil.

Se examinó como la cal viva y aceite reciclado afecta en los resultados de límites de Atterberg, la condición máxima de densificación, la resistencia a la profundidad de entrada y en el ensayo de CBR, concluyendo que influye de manera eficiente.

## II. Planteamiento del Problema

### 2.1. Descripción y formulación del problema

En las plataformas de rodadura afirmadas es frecuente encontrar tramos con deterioro avanzado o fallas estructurales, situación que deriva principalmente de una evaluación insuficiente de las cualidades índice y mecánicas de los materiales constituyentes de la capa de soporte. La conservación adecuada de estas vías resulta fundamental, ya que constituye un factor determinante en la conectividad socioeconómica de las comunidades aledañas. El comportamiento de los suelos en la capa de soporte varía en muchos ámbitos o zonas de acuerdo a las realidades topográficas, atmosféricas, y la intensidad de carga a la que es sometido.

En países como Costa Rica, las rutas secundarias o terciarias abarcan una gran fracción de la red vial nacional, concretamente un 73%. Además, componen un puente entre el sector productor y comercial del país. La distribución de las carreteras, según su tipo de superficie en rutas secundarias y terciarias, se distribuye de la siguiente manera: Carpeta asfáltica con espesores mayores a 4 cm es el 25.92%, vías con sellos y tratamientos superficiales múltiples es el 26.63%, vías con tratamientos superficiales simples un 0.11%, vías con lastre 46.87% y vías pavimentadas con concreto es el 0.47% (Herrera, 2017).

En la concepción y ejecución de obras civiles, estabilizar el suelo que soporta la estructura es una característica que debe ser determinada con buen acierto, evitando así los problemas de vida útil del proyecto. Mediante estudios realizados se ha demostrado que es necesario realizar un adecuado mejoramiento y estabilización de suelos, para modificar potenciales problemas de estabilidad y deformación que el suelo cause en la obra de interés (Cáceres et al., 2022).

De acuerdo al Centro de Comercio Exterior (CCEX) de la cámara de comercio, las vías en el Perú están compuestas por 95,863 km de longitud de los cuales solo 16% esta

pavimentada, lo que equivale a 15496 km de longitud. El restante 84% corresponde a vías afirmadas, que se extienden por 80,367 km de longitud (Latam Construction, 2018).

Como investigador, al visualizar el problema de la subrasante en la ruta que interconecta el Distrito de Huancaray con el Distrito San Antonio de Cachi, la cual tiene una longitud de 26 kilómetros, del total de vía el 11% tiene un tipo de suelo cohesivo. En temporadas de lluvia se expone a una gran cantidad de agua, lo que altera su comportamiento y pierda algunas propiedades mecánicas. Como consecuencia, la circulación vehicular se vuelve difícil. El tramo afectado es un total de 2 kilómetros donde la subrasante tiende a perder su capacidad de soporte y el aguante de rodadura, incrementado la expansión en muchos casos produciendo hundimiento y ocasionando deslizamiento de los vehículos sobre la subrasante.

#### **2.1.1. Problema general**

¿Cómo influye la incorporación de cal viva y aceite reciclado en el CBR de la subrasante en la carretera AP-104 Km 47+500 - 48+700 Talavera – Pucaccasa, Andahuaylas, Apurímac 2024?

#### **2.1.2. Problemas específicos**

- ¿Cómo influye la incorporación de cal viva y aceite reciclado en la densidad seca máxima del suelo en la carretera AP-104 Km 47+500 -48+700 Talavera – Pucaccasa, Andahuaylas, Apurímac 2024?
- ¿Cómo influye la incorporación de cal viva y aceite reciclado en el índice de plasticidad del suelo de la carretera AP-104 Km 47+500 - 48+700 Talavera – Pucaccasa, Andahuaylas, Apurímac 2024?
- ¿Cómo influye la incorporación de cal viva y aceite reciclado en la profundidad de penetración del suelo de la carretera AP-104 Km 47+500 - 48+700 Talavera – Pucaccasa, Andahuaylas, Apurímac 2024?

## **2.2. Objetivos**

### **2.2.1. Objetivo General**

Determinar cómo influye la incorporación de cal viva y aceite reciclado en el CBR de la subrasante carretera AP-104 Km 47+500 - 48+700 Talavera – Pucaccasa, Andahuaylas, Apurímac 2024.

### **2.2.2. Objetivos Específicos**

- Evaluar Cómo influye la incorporación de cal viva y aceite reciclado en la densidad seca máxima del suelo de la carretera AP-104 Km 47+500 - 48+700 Talavera – Pucaccasa, Andahuaylas, Apurímac 2024.
- Evaluar Cómo influye la incorporación de cal viva y aceite reciclado en el índice de plasticidad de la carretera AP-104 Km 47+500 - 48+700 Talavera – Pucaccasa, Andahuaylas, Apurímac 2024.
- Evaluar Cómo influye la incorporación de cal viva y aceite reciclado en la profundidad de penetración del suelo de la carretera AP-104 Km 47+500 - 48+700 Talavera – Pucaccasa, Andahuaylas, Apurímac 2024.

## **2.3. Justificación e importancia**

La carretera AP-104 está clasificada como vía de segundo orden la cual está construido a nivel de subrasante, esta carretera une varios Distritos entre ellas el Distrito de Huancaray y San Antonio de Cachi, la carretera AP-104 tiene una longitud de 181 kilómetros, en todo el tramo existen zonas con suelos de alto absorción de agua entre ellas el tramo Km 47+500 – 48+700, en tiempos de lluvia este tramo tiende a volverse lodo haciendo que sea imposible transitar por la vía.

Las estructuras viales son importantes para el movimiento económico, acceso a la salud, educación, agricultura, turismo etc. Por ello una vía en buen estado permite acceder a todos los beneficios que necesita una población, es de vital importancia solucionar este problema para cambiar el nivel de asistencia de sus usuarios.

Se examinará el efecto de cal viva y aceite reciclado estudiando para fines de analizar el comportamiento de suelos en subrasantes con dosificaciones variadas, por ello se considera que la combinación de estos materiales y su aplicación es original.

Esta investigación aportara el uso de la mezcla de cal viva y aceite reciclado como nuevo elemento en la construcción para mejoramiento de suelos en los distintos ámbitos, ya sea para estabilizar suelos de cimentación de estructuras, carreteras etc.

### **2.3.1. Delimitación de la Investigación**

#### **2.3.2. Social**

Este proyecto de indagación no tiene delimitación social porque no se analiza una población humana.

#### **2.3.3. Conceptual**

Se definirá de forma conceptual debido a que se verificará la conducta de las cualidades del suelo al añadir cal viva y aceite reciclado, la cual se basará según la norma de pruebas y estudios de mecánica de suelos.

#### **2.3.4. Viabilidad de la Investigación**

Los datos bibliográficos son consecuente y accesible por lo que se empleara técnicas de acogida y acumulación de reseñas recopilados de las verificaciones, para obtener la información requerida se realizara ensayos añadiendo materiales en diferentes proporciones o dosificaciones, para lograr datos que son necesarios para el funcionamiento según las normas E-050 que brinda parámetros.

#### **2.3.5. Limitaciones**

Una de las restricciones es los escasos de datos de la zona con respecto a estudios referidos al tema de investigación.

El uso de la mixtura de cal viva y aceite reciclado para fines de construcción puede ser desconocido, por la misma razón que no se tiene información con respecto a ensayo de combinación de cal viva y aceite de reciclado.

## **2.4. Hipótesis**

### **2.4.1. Hipótesis general**

La incorporación de cal viva y aceite reciclado influye significativamente en el CBR de la subrasante carretera AP-104 Km 47+500 - 48+700 Talavera – Pucaccasa, Andahuaylas, Apurímac 2024.

### **2.4.2. Hipótesis específicas**

- La incorporación de cal viva y aceite reciclado, influye en la densidad seca máxima del suelo de la carretera AP-104 Km 47+500 - 48+700 Talavera – Pucaccasa, Andahuaylas, Apurímac 2024.
- La incorporación de cal viva y aceite reciclado, influye en el índice de plasticidad del suelo de la carretera AP-104 Km 47+500 - 48+700 Talavera – Pucaccasa, Andahuaylas, Apurímac 2024.
- La incorporación de cal viva y aceite reciclado, influye en la profundidad de penetración del suelo de la carretera AP-104 Km 47+500 - 48+700 Talavera – Pucaccasa, Andahuaylas, Apurímac 2024.

## **2.5. Variables**

Se definieron como variables de estudio siguientes:

VI: Cal viva y aceite reciclado.

VD: CBR de la subrasante.

### 2.5.1. Operacionalización de variables

Tabla 1.

*Matriz de Operacionalización de variables*

<b>TÍTULO DE LA TESIS</b> <b>Análisis de incorporación de cal viva y aceite reciclado en el CBR de la subrasante AP-104 Km 47+500–48+700 Talavera – Pucaccasa, Andahuaylas, Apurímac, 2024</b>					
<b>Matriz de Operacionalización de variables</b>					
VARIABLES DE ESTUDIO	DEFINICIÓN CONCEPTUAL	DEFINICIÓN OPERACIONAL	DIMENSIÓN	INDICADORES	ESCALA DE MEDICIÓN
<b>Cal viva y aceite reciclado</b>	<p>La cal viva es un componente cementante extraído de la roca caliza, compuesto por carbonato de calcio, que, al ser expuesto a energía calorífica eminente se vuelve en un óxido de calcio, la que generalmente se cataloga como cal viva (Foccal, 2022)</p> <p>Según Fong, (2017) se denomina aceite de motor vehicular reciclado a los residuos producidos por el tiempo usado y desechado de los lubricantes de motor vehicular, con partículas contaminantes volátiles, insolubles óxidos de metales que están compuestos además de óxido de plomo y metales desgastados</p>	<p>Preparación de la muestra patrón y cálculo de la cantidad requerida para cada ensayo. Posteriormente, se le incorporará un 4% de cal viva en relación con el peso de la muestra; después, se añadirán 2%, 6% y 8% de aceite reciclado con respecto al volumen de la muestra patrón.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Dosificación</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• CV 4%</li> <li>• AR 2%, 6%, 8%</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• m<sup>3</sup></li> <li>• Kg</li> <li>• L</li> </ul>

	<p>Se refiere como densidad seca máxima al proceso de compactación con el fin de reorganizar las partículas para lograr una mayor densidad y el contenido óptimo la cual es primordial para proyectos en carreteras movimiento de tierras etc. (Alshameri, 2020)</p>		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Densidad seca máxima</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• % de agua</li> <li>• Volumen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• kg/m<sup>3</sup></li> </ul>
CBR de la subrasante	<p>El rango de plasticidad (IP) es el intervalo de humedad donde el suelo se deforma plásticamente, calculado como la discrepancia entre la frontera líquida y la frontera plástica, sirve como medida de plasticidad del suelo, por el cual se determina la cantidad y el tipo de arcilla presente (Tanyildizi y otros, 2023)</p> <p>El CBR (california Bering ratio) en México se le denomina como VRS (Valor Relativo de soporte) se estudia con el fin de valorar la calidad del suelo con relación a su aguante, se evalúan superficies donde se colocan estructuras de carreteras, edificaciones etc. (Sánchez , 2020).</p>	<p>Análisis del CBR con resultados de ensayos en recinto, a partir de muestras en estado natural y con adición de cal viva y aceite reciclado.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• índice de plasticidad</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Límite líquido</li> <li>• Límite plástico</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• %w</li> </ul>
			<ul style="list-style-type: none"> <li>• Profundidad de penetración</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Capacidad de soporte</li> <li>• Expansividad</li> <li>• Permeabilidad</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Kg/cm<sup>3</sup></li> <li>• m<sup>3</sup></li> </ul>

*Nota.* La tabla presenta la operacionalización de variables del estudio, donde se describen sus definiciones conceptuales y operacionales. Se detallan los procedimientos experimentales aplicados a las muestras con adición de cal viva y aceite reciclado. Asimismo, se incluyen las dimensiones, indicadores y escalas de medición correspondientes utilizadas para el análisis del CBR de la subrasante.

### III. Marco teórico

#### 3.1. Antecedentes

##### 3.1.1. *Antecedentes internacionales*

Gu & Chen, (2020) en su artículo tiene como objetivo hacer uso de materiales como cenizas volantes (FA), fosfoyeso (PG) y cal viva como estabilizante de loess un tipo de limo de la Provincia de Shaanxi, con fines de construcción de tierra apisonada autocompactante. Para determinar los datos se empleó el método experimental para ello se utilizó el ensayo ortogonal sobre el comportamiento estructural y durabilidad frente a la humedad, la cantidad de muestras extraídas fueron 219 estabilizados en 104 suelos, los cuales fueron mezclados con cemento, cenizas volantes (FA), fosfoyeso (PG) y cal viva, para ello se hicieron dosificaciones de la siguiente manera: primer grupo una mezcla de 100% de loess y cemento en 5%, 10%, 15% y 20%. para el segundo grupo 100% de loess, 10% de cemento y contenido de PG al 2%, 5%, 10%, 15%. Tercer grupo 100% loes, 10% cemento, 5% de PG, y AG con contenido de 10%, 15%, 20% 25%. Cuarto grupo dosificación con 100% loess, 10% cemento, 5% PG, 10% de FA y diferente adición de cal viva que son 3%, 5%, 8%, 10%. La cantidad total de mezclas desarrolladas fueron 16. De los esbozos realizados el resultado obtenido se estableció que la proporción de 100% de loes, 10% cemento, 3% PG, el 20% de AF y el 8% de cal viva tiene un mayor resultado a la compresión, la cual es 18.64 MPa, con un coeficiente de ablandamiento superior a 0.9.

Así mismo Azitz et al. (2021) en la indagación tiene como fin el estudio de la conducta mecánica del terreno cohesivo con aditamento de cal y cemento sometido a repeticiones de humedad y secado, efectuando la dosificación de cemento en rangos porcentuales de 2%, 6%, 10%, 12%, 16%, 20% y la cal dosificada en 2%, 4%, 6%, 8% y 10%. Método usado es estadístico la muestra extraída para los ensayos fue en Lahore, Pakistán. De acuerdo a los atributos del suelo natural, la eficiencia del componente cementante para disminuir la plasticidad es mayor a las tratada con cal, también se visualiza el aumento en la humedad óptima con reducción en la MDS para ambas

adiciones, la vida útil del suelo sometido a tratamiento es multipares dependiente de procedimientos semejantes de deterioro axiomático (causa de hidratación añadido con adhesivos) y deterioro perjudicial (meteorización inducida). Así mismo se obtuvo resultados la cual se concluye que el uso de cemento para reducir la plasticidad es un poco mayor en comparación con la cal, pero esta reducción en el índice de plasticidad tiene la ventaja de una mejor trabajabilidad.

También Bakaiyang et al. (2021) como fin de la investigación es efectuar una comparativa de estabilización de suelos expansivos haciendo uso de conglomerantes hidráulicos (cemento, cal), los suelos de Karal en Camerún tiene un alto contenido de aluminosilicatos con presencia de arcilla de cuarzo, caolinita, montmorillonita, illita/mica, feldespatos, óxidos de hierro y bayerita, siendo estos suelos material nocivo para la durabilidad de las carreteras, para ello se realizaron experimentos adicionando en porcentajes distintas y analizar los cambios que se daba en los intentos de gradación, límites de consistencia, tanteos de Proctor transformado, CBR, la fuerza de aplastamiento no confinada y la fuerza de tracción. El suelo Karal natural de Pitao tiene una distribución granulométrica de grava 0.1%, fracción alta menor a  $63 \mu\text{m}$  93.9% y partículas mayores a  $2 \mu\text{m}$  un 41.9%, y esta fue clasificado como arcilla con una proporción de paso de  $2 \mu\text{m}$  por encima del 30%, la humedad inherente del suelo natural es de 8.4% y esta aumenta de acuerdo a la frecuencia de lluvia llegando hasta un máximo de 31.1%. la adición de tratamiento mixto demostró una gran reducción en el límite plástico, de la densidad máxima de suelo seco tiene un cambio positivo en el CBR al 95% con el contenido de cemento añadido que contiene cal viva (QL) o cal hidratada (HL), los resultados muestran que las propiedades cohesivas del suelo se reducen fuertemente después de 7 días de curado.

De acuerdo a Shetty et al. (2021) en la investigación empírica sobre el equilibrio de suelos lateríticos con aceite de motor usado y cal, en Turquía las estructuras viales están construidos sobre estratos variables, dentro de los datos recolectados del estudio de incorporación de cal y aceite reciclado con las siguientes dosificaciones 2%,3% la condición máxima de densificación es de  $1.83 \text{ gr/cm}^2$  con humedad porcentual óptima de 22.857% y

el CBR a 2.5 mm de penetración es de 9.056% la dosificación de 3%,4% la DSM es de 1.88 gr/cm<sup>2</sup> con  $\omega$ % óptima de 22.88% y CBR a 2.5 mm de entrada es de 12.54%, también para dosificación de 4%,5% la DSM es de 1.68 gr/cm<sup>2</sup> y  $\omega$ % óptima de 21.62% y CBR a 2.5 de entrada es de 9.827%, los corolarios muestran que la DSM del suelo estabilizado con 3% de cal y 4% de aceite reciclado tiene mayor resistencia y mayor soporte de carga a 2.5 mm de profundidad, para la cual se ha realizado la mezcla del suelo más cal y aceite reciclado conjuntamente.

De la misma forma Abd-Allah et al, (2021) tiene como propósito de la exploración evaluar la estabilización de muestras de suelos blandos añadiendo aditivos químicos y físicos para mayorar los atributos de suelo con baja capacidad portante, las muestras extraídas son tres lugares diferentes de la ciudad de Baquba, Gobernación de Diyala en Irak, estas muestras de condición perturbada y no perturbadas de una profundidad de 0.5 a 1.5 m. La disposición de datos es la experimental dado que se practican experimentos de aguante a la compresión no confinada (USC), se usó cinco aditivos que fueron dosificados de la siguiente manera, cal viva en porcentaje de 3, 5, 7 y 9%, cenizas volantes clase F de 5, 10, 15, y 20%, las cuales fueron activadas con un 5% de cemento portland, polvo de roca dosificados en 10%, 15%, 20% y 25% y como última dosificación el caucho granulado de neumáticos en porcentajes de 2, 4, 6 y 8%, todas las dosificaciones se dieron en función de peso del suelo y el total de muestras ensayadas fueron 60, de los corolarios ensayados los especímenes de suelos en estado natural son arcillosos blandos y de baja resistencia a la compresión. Al adicionar la cal viva al 9% muestra un 517, 377, y 278% aumento para las tres muestras, al agregar cenizas volantes de clase F activadas con 5% de cemento, el aumento de resistencia solo se da con la adición de 5% y 15% con el resto tiende a bajar, de la misma forma la adición de polvo de roca muestra al 25% el incremento es de 904, 658 y 503%, y la adición de hormigón triturado al 15% la resistencia incrementa en un 683, 493 y 364%, con la adición de goma granulado de llanta al 4% es donde alcanza la máxima resistencia en un 500, 352 y 259%. Solo la primera muestra da como resultado buena respuesta al adicionar todos los estabilizadores.

### **3.1.2. Antecedentes nacionales**

Para Gallardo & Sánchez (2022), el objetivo de la investigación *Stabilization Of Clay Soils Applying PET at 2%, 4% and 6% On Unpaved Roads* muestra la influencia de adicionar la PET (tereftalato de polietileno) en diferentes proporciones para estabilizar los suelos arcillosos. Se adopta el esquema experimental, tanteos en laboratorio para prueba de materiales con el fin de determinar el % húmeda de las partículas, la distribución granulométrica, categorización de suelos, fronteras de consistencia, Proctor modificado y el CBR para verificar de qué manera influye en el suelo. La extracción de suelo para esta investigación es del Jr. Guadalupe del centro poblado Tartar Chico en Cajamarca; la muestra obtenida es de una calicata con dimensiones de 0.80x0.80x1.50m, de la cual se realizaron 3 ensayos de CBR patrón y 3 ensayos de patrón más dosificación de PET. Procesados los datos, los resultados obtenidos para la densidad máxima seca en estado natural son 1.95 g/cm<sup>3</sup>; añadiendo la PET al 2%, la condición máxima de densificación disminuye hasta 1.91 g/cm<sup>3</sup>; con la adición de PET al 4%, el resultado tiende a 1.861 g/cm<sup>3</sup>; adicionando 6% de PET, la densidad seca máxima es 1.80 g/cm<sup>3</sup>. Así mismo, los resultados del CBR para la muestra natural son de 5.68% y con la adición de PET al 2% es de 5.88%; con el 4% de PET es de 4.65% y con 6% de PET el CBR es de 3.90%. Por ende, se puede decir que solo la adición del 2% de PET ayuda positivamente al CBR del suelo.

Así mismo, Villanueva (2022) tiene como objetivo de investigación establecer cómo influye añadir el aceite residual de vehículo como estabilizador de suelos en subrasantes del camino afirmado en Chirinos, Cajamarca. Como enfoque es cuantitativo de carácter aplicado, con un método de análisis interpretativo y un esquema cuasi-experimental. Modelo no probabilística a discernimiento de expertos, en el ámbito tablón, la cual cuenta con 2 km de tramo más desfavorable; el número de puntos se determinó con la recomendación de la guía de esbozo de calzadas no entramadas de menor circulación vehicular. Mediante el uso de un método retrospectivo, se hace uso de fichas concretas y aprobadas por laboratorios; para ello se hará uso del manual de ensayo de materiales de MTC, con el MTC E-101 para muestreo de suelos, el MTC E-110 para ensayos de fronteras

líquidas, el MTC E-111 para el frontera plástica e índice plástico, el MTC E-107 para granulometrías, el MTC E-115 para ensayos de Proctor modificado y el MTC E-132 para el CBR. En los resultados más destacados se tiene que, al adicionar aceite residual al 4%, incrementa la compacidad máxima seca en un 4.82%; la humedad porcentual optima presenta un cambio de forma negativa al 12.09% y 15.48% al adicionar 4% y 8% de aceite residual. El cambio positivo de la firmeza a la inserción con adición de 4% se obtuvo el 54% y con un 6% tiene un incremento al 84%. Se concluye que el uso de aceite residual automotriz como agente estabilización del suelo tiene una influencia eficiente en las peculiaridades del suelo; con la adición del 4%, tiende a tener mejores resultados, donde el índice de plástico acorta hasta un 69% y la condición máxima de densificación aumenta en un 4.82%.

También Torres & Vilchez (2022), en la tesis que desarrollaron, mencionan que el objetivo es evaluar las propiedades de estabilización de suelos agregando material cementante tipo IP y cal viva en suelos con existencia de bofedal; para ello se manejó el procedimiento científico con orientación cuantitativa, como exploración aplicada con horizonte descriptivo, aclaratorio y comparativo; el proyecto es experimental, para lo cual se considera estudio hipotético. La población es la vía Santa Inés – Plaza Pata, con un tramo de 6 km con una muestra tipo no probabilístico de carácter conducido o por comodidad. Para recolectar los datos, fueron mediante ensayos desarrollados y fichas técnicas. De los resultados, al insertar cal viva y material cementante, se obtiene una mejora en la compactación, llegando a un 97%, 98%, 99% y 100%. Adicionado la cal viva al 3%, 5% y cemento al 3%, 4%, se adquiere una resistencia de 18.35 kg/cm<sup>2</sup>. En conclusión, adicionar cal viva y material cementante IP en dosificaciones óptimas influirá de manera eficiente estabilizar la base con existencia de napa freática, obteniendo un nivel de compactación por encima del 95% en los ensayos de densidad in-situ.

Así mismo, Janooca (2021) menciona que la intención de su investigación es constituir el efecto del aceite de vehículo reciclado en las características de suelos para subrasante en la vía Platería, Perka y Puno. Método de nivel explicativo de enfoque

cuantitativo; por ello se realizaron adulteraciones de suelo con aceite de vehículo residual con dosificaciones de 0%, 1.5%, 2.5%, 3.5% y 4.5% con peso de suelo seco y para realizar los trabajos en laboratorio, y para ello se hace uso del procedimiento de análisis de datos basada en la ASTM D 2216 (MTC E108) para pruebas de cantidad de agua, también la ASTM D\_422 (MTC E107) en ensayos de cribado por tamizado, la MTC E110 en ensayos de límite líquido, así mismo para LL y IP con la MTC E111, para el ensayo de compactación la ASTN D\_1557 (MTC E-115) y los estudios de CBR con la ASTM D-1883 (MTC E-132). La pericia usada en la exploración es la visualización siendo este el método con mayor confiable con aproximación a la veracidad. Como resultado de los ensayos de la suma de aceite residual al 3.5% en la muestra 1 tiene la máxima compacidad seca de 2.086, de los ensayos en Proctor modificado con conexión a retención de Agua Optimo tiene mejor resultado en condiciones naturales teniendo un 8.64%, el ensayo del CBR al 95%, el componente con la añadidura de 3.5% de lubricante oleoso residual tiende a tener mejor resultado con 63.50% y el estudio de CBR al 100% el espécimen con adición de 3.5% continúa mejorando llegando hasta un 83.50%. Por ello se concluye que las mejoras se dieron con la suma de aceite residual al 3.5% en todos los ensayos con la adición en mayor porcentaje a ella tiende a disminuir las propiedades de trabajabilidad del suelo.

De la misma forma Delgado & Guerra (2020) en su teoría tiene como objetivo es comprobar la atribución al incorporar aceite sulfonado con cal para el afianzamiento de suelos para subrasante en carreteras no pavimentadas, tipo de metodología aplicada es la experimental, con nivel cuantitativo y con planteo experimental aplicativo. Como población se tiene constituida una carretera en San Francisco que cuenta con una longitud de 14 km. la técnica de obtención de muestra es la no probabilístico siendo que las peculiaridades dependerá mucho de los investigadores, la técnica es el recaudo de datos de campo que se inscribirá en formatos para su asiento, de la misma forma los estudios de laboratorio sugerido por el MTC para Análisis granulométrico ASTM D-422 / NTP 400 012, la ASTM D2487 / NTP 339\_134 para categorización de especímenes por el método SUCS, la ASTM D3282 / NTP 339\_135 para el método AASTHO, para el límite de Atterberg la ASTM D4318

/ NTP 339-129, la ASTM D1557 / NTP 339-141 para ensayos del Proctor modificado y para el CBR de muestras la ASTM D1883 / NTO 339-145. Para el componente con adición de cal al 3%, se logró un LL 24%, LP de 14% y el IP 10%, adicionando la cal en un 5% se logró el LL de 21% y el LP es 12% y el IP de 9% y con la adición al 8% el LL, LP y el IP es 0% por ende no presenta plasticidad. La combinación de cal 5% y lubricante oleoso sulfonado a 2% se obtiene el IP de 8%, y la dosificación de 5% de cal más 6% fluido oleoso sulfonado se obtiene un IP de 0%. Los resultados para la condición máxima de densificación (MDS) y el porcentaje de proporción de agua óptimo (OCH), los datos del suelo en circunstancias naturales son 1.75 gr/cm<sup>3</sup> con un 7.67% proporcionalmente, al adicionar cal al 5% se obtiene un 1.836 gr/cm<sup>3</sup> y la OCH se obtuvo con la adición de 8% de cal teniendo como resultado 11.20%.

### **3.1.3. Antecedentes regionales y locales**

Alarcon, (2021) tiene a manera objetivo estudiar el efecto de la cal y cemento en vías no pavimentadas en Uranmcarca, Chincheros, Apurímac, como material aglutinante para estabilizar suelos inestables con alta presencia de arcillas adicionando mezcla en proporción de 1:2. La población objeto de análisis, es el camino vecinal afirmado que consta de 381.1 Km, de donde se extrae una ejemplar representativo, al ser una población finita la modalidad de obtención en función a la confiabilidad al 95% y error del 5%, realizado los cálculos se obtiene la muestra de 191.56 km a cada 10 km una calicata con profundidad de 1.50m. Para la extracción se hace uso de la norma ASTM D 2488, para el transporte se hace uso de la norma MTC E 104, MTC E 105 para muestras representativas por método de cuarto, la MTC E\_106 para elaboración de muestras para estudios de granulometría, la clasificación se realizará bajo la norma SUCS (ASTM D\_2487\_11) y AASHTO M \_145\_91, usando el resultado más desfavorable se hace el ensayo de CBR. Según efectos de los ensayos ejecutados para muestras en estado natural se clasifica como suelos malos, al adicionar cal y cemento se visualiza que al 5% el límite líquido (LL) es de 62.64 la cual tiende a bajar en un 10.54 el límite plástico (LP) es de 53.14 teniendo un incremento de 23.79 y el índice plástico (IP) es 9.50 teniendo una disminución de 34.33. concluyendo que

la mezcla de cal con cemento IP tiende a influir de forma positiva en la estabilización de suelos arcillosos.

Enciso (2022) en su tesis cuyo objetivo es definir la influencia al adicionar la escoria de eucalipto como afianzamiento de subrasante en la vía Abancay – Huayllabamba con longitud de 4 km. La metodología empleada es cuantitativo aplicado, cuasi-experimental con nivel explicativo, el muestreo es no probabilístico y la cantidad de calicatas realizadas para la extracción de la muestra fueron 3 por cada kilómetro, para la recopilación de datos se hace uso de fichas, validadas con juicio de expertos y certificados de calibración. Los resultados para muestras más desfavorables en una calicata con agregar un 3, 6, 8% de escoria de eucalipto (CE), obteniendo como dato el grado de susceptibilidad del suelo a las cargas (CBR) a 0.2” al 100% del espécimen natural es de 8.58% y haciendo adición de 3% de CE es de 9.98%, con la añadidura de 6% de CE el CBR acrecienta llegando a 12.31% y con la adición de 8% de CE el CBR sigue en incremento llegando a 13.15%. Concluyendo que el uso de escoria de eucalipto tiende incrementar la estabilización de subrasante.

### **3.2. Bases Teóricas**

#### **3.2.1. Método de ensayo de granulometría**

Según norma MTC (2016) E-106 y ASTM D-422 se tiene como objetivo instituir el procedimiento para la preparación de especímenes extraídas de campo la cual se utilizará para el ensayo de análisis de granulometría. Los equipos y herramientas a usar son, báscula con acercamiento a 0.1 g, mortero, maza de liga, y las cribas bajo cumplimiento de la norma NTP 350.001 las cuales según requeridas son Tamiz de 4.750mm (Nº4), tamiz de 2.000 mm (N.º 10) y el tamiz 0.425 mm (N.º 40), también se hará uso de cuarteador mecánico en función a la norma MTC E-105 -2013 la cual es opcional. Para proceder con el ensayo primeramente se secará el espécimen extraído en un ambiente al aire libre, haciendo uso de la masa de goma se desmenuzará los terrones, luego de ello se realizará el cuarteo de la muestra representativa de acuerdo al conjunto necesaria para el estudio. La cantidad necesaria dependerá del equilibrio de finos y gruesos retenida o que pasa por

la criba N° 10 (2.00 mm) y de diámetro máximo del suelo con el fin de tener suficiente muestra para realizar los ensayos, para lo cual se tabla que se muestra indica.

**Tabla 2.**

*Valores de orientación de diámetro máximo del material*

	<b>Diámetro máximo Nominales</b>	<b>Diámetro máximo Redondeo (mm)</b>	<b>Retenida en el tamiz N°10 (kg)</b>
3"	76.2	80	5.00
2 "	50.8	50	4.00
1 ½ "	38.00	40	3.00
1 "	25.4	25	2.00
¾ "	19.00	20	1.00
3/8 "	9.50	10	0.50

*Nota.* La tabla presenta los diámetros correspondientes a las fracciones del material con orientación predominante obtenidos en el análisis granulométrico. Los valores permiten verificar la distribución de partículas conforme a los rangos normativos y determinar la gradación del material para su empleo en la conformación de capas estructurales del pavimento (MTC, 2016).

### ***Forma del ensayo de análisis granulométrico***

Según MTC (2014) E-106 y ASTM D-422 la separación del espécimen acumulada en la criba de 4.760 mm (N.º 4) usando los tamices con las siguientes aberturas 3" (75mm), 2" (50.80mm), 1 ½" (38.10mm), 1" (25.40mm), 3/4" (19.00mm), 3/8" (9.50mm), N°4 (4.760mm). Teniendo las muestras de ensayo en el tamiz se realiza movimientos de forma circular de forma que la muestra este en constante oscilación sobre el tamiz, para comprobar la finalización del tamizado se desmontara y verificara que no pase más del 1% de las partículas retenidas después de haberse tamizado durante 1 minuto, las partículas retenidas se sacaran con cuidado y se pondrá con la muestra retinada por es malla. Se hace uso del tamizador mecánico se pondrá en función durante 10 minutos y la verificación se realizar por el proceso manual. Se comprueba el peso de los materiales retenidos en

cada malla, con una báscula de sensibilidad al 0.1%, la unión de los pesos aglomerados y el peso del espécimen antes del tamizado no deberá ser mayor de 1%.

También MTC (2014) E-106 y ASTM D-422 menciona para el análisis de gradación del espécimen que pasa el tamiz N.º 4 se podrá realizar por el método de tamizado o el método de sedimentación, esta dependerá de la característica de la muestra. Los especímenes con mayor contenido de arena y con mínimo contenido de limo más arcilla cuyas partículas están unidas en forma de terrones se separan fácilmente se tamizarán en forma seca. Los suelos limo-arcillosos cuyas partículas unidas en forma de terrones no se separan con facilidad se analizará sometiéndolo a humedad. Las partículas retenidas por el criba Nº200 (0.074mm) se examinará por cernido seco, previamente colando la muestra en la misma haciendo uso de chorros de agua.

Para el cálculo de % que pasa por la malla Nº4 se usara la siguiente ecuación:

$$\% \text{pasa tamiz } N^{\circ}4 = \frac{W_{N^{\circ}40}}{W_{\text{inicial}}} * 100$$

Donde:  $W_{N^{\circ}40}$ : tara del espécimen que pasa el tamiz N.º 40,  $W_{\text{inicial}}$ : Tara el espécimen inicial.

Para determinar el peso del espécimen retenido en la malla Nº40 se usará la siguiente ecuación:

$$W_{\text{Ret.tamiz } N^{\circ}40} = W_{\text{inicial}} - W_{N^{\circ}40}$$

Para calcular la proporción que pasa el tamiz N.º 200 se hace uso la ecuación de:

$$\% \text{pasa Tamiz } N^{\circ}40 = \frac{W_t - W_{\text{ret.tamiz } N^{\circ}200}}{W_t} * 100$$

Para comprobar el % más fino se hará uso de la ecuación mostrada

$$\% \text{pasa} = 100 - \% \text{Ret. acumulado}$$

Para establecer la saturación porcentual óptima de la muestra extraída y secada al aire y secando posteriormente al horno expresada en porcentajes

$$\% \omega = \frac{W_{\text{seco al aire}} - W_{\text{seco al horno}}}{W_{\text{seco al aire}}} * 100$$

### **3.2.2. Límite líquido**

Denominado así al contenido de H<sub>2</sub>O en porcentajes en circunstancias secas en las que el suelo pasa por diferentes etapas a medida que se añade agua, para obtener datos de la frontera líquida se emplea la copa de Casagrande donde un ejemplar de suelo al que se le hace ranura de 12 mm en la parte central y mediante impacto calibrado de 25 golpes (Geotecno, 2018).

#### **3.2.2.1. Métodos de pruebas para determinar el límite líquido**

Así mismo MTC (2016) E-110 y la ASTM D-4318 tiene como objetivo determinar los límites entre los estados líquidos y plásticos, para la cual se procede a realizar la preparación y proceso de ensayos, para ello se hace uso de diversos sistemas de categorización de las fracciones finas del suelo establecidos por el SUCS y AASHTO.

Las limitaciones líquidas y plásticas del suelo, que se pueden aplicar a partículas finas de suelo con un diámetro de 2 m, utilizan el volumen de humedad natural para representar el parámetro relativo o el índice de liquidez.

#### ***Equipos y materiales***

Recipientes de almacenamiento, vasija o plato de porcelana con diámetro de 11.5 cm, copa de Casagrande, acanalador, calibrador, pesa de filtros o cazuela, báscula con susceptibilidad a 0.01 g, horno o brasero, paleta de hoja elástico de 7.5 a 10 cm de distancia y 2 cm de ancho (MTC, 2014).

#### ***Preparación de la muestra***

Para esta etapa de estudio se contará con material de suelo con partículas que pasaron el tamiz N.º 40 con peso de 150 a 200g. Para suelos con partículas que fluyen libremente se reducirá cuarteando, para suelos cohesivos se hará un mezclado total de los granos haciendo uso de espátula y recipiente para obtener muestra representativa (MTC, 2016).

### ***Procedimiento de ensayo de límite líquido***

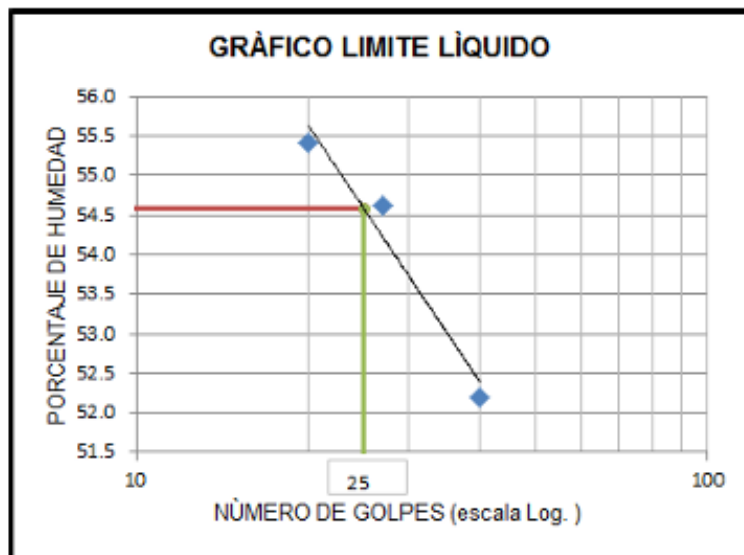
Calibrado la altura, rebote y manivelas de giro de la empuñadura de la copa de Casagrande, se unta el espécimen preparado en la vasija de porcelana, mediante uso de la fuerza se aplanará hasta tener una elevación de 1 cm en el punto más profundo de la copa de Casagrande, la cual deberá formar una superficie horizontal, se tratará de evitar el contenido de burbujas. Mediante uso del acanalador se procederá a realizar una ranura o canal en la parte central del espécimen incluida en la copa de Casagrande, para suelos que no se puede hacer el canal con una sola pasada se procederá a realizar pasadas sin desgarrar el espécimen. Verificado que no haya residuos de partículas de sustrato por debajo de la copa, se procede a rotar la manivela que permite levantar y soltar la copa de Casagrande sobre, la velocidad de giro será de 1.9 a 2.1 impactos por segundo hasta que las 2 partes separadas del ejemplar se junten en la base en una extensión de 13 mm, la cual se medirá con un objeto de medición lineal calibrada o ajustada. Se registrará la cantidad de impactos N, las que se requerirán para la unión de la ranura, hacer un corte de la parte unida con un ancho del mango del acanalador para depositarlo en una vasija con peso conocido (MTC 2014).

La muestra que resta en la copa de Casagrande se devolverá al receptáculo de preparación, para luego limpiar el instrumento y la ranura guía, así como la base donde se apoya la copa. Preparar de nuevo la mezcla incrementada la humedad para reducir la cifra de impactos solicitados para que la zanja se una, reanudar la táctica para un aproximado de 2 ensayos adicionales, con el propósito de restar el número de impactos, una de los ensayos se realiza para una unión de rango de 25 a 35 impactos requeridos, otra para una unión con un rango de 20 y 30 impacto y una que cierre con un rango de 15 a 25 impactos. Se determinará la humedad contenida, En del ejemplar de cada ensayo de acuerdo a la NTP 339.127, los pesos se determinarán finalizada el ensayo, si existe el caso de interrupción mayor a 15 minutos, el ejemplar obtenido se procede a medir el peso en el instante de interrupción (MTC, 2014).

### Determinación de límite líquido

Figura 1

Curva de Fluidez



*Nota.* La figura muestra la curva de fluidez obtenida del ensayo de límite líquido. Se graficaron al menos tres valores de humedad en función del número de golpes registrados con el dispositivo de Casagrande. Al interpolar con el valor estándar de 25 golpes, se determinó el contenido de humedad correspondiente al límite líquido, parámetro empleado para clasificar el tipo de suelo (Botía, 2015).

Para determinar la frontera líquida es necesario determinar la fracción de agua de al menos tres ensayos, las cuales se insertan en un gráfico de curva de fluidez, la cual se da al interpolar el nivel de humedad vs la cifra de golpes de cada muestra ensayada, se hace un corte a la raya de tendencia en los 25 impactos, posterior a ello se realiza un corte en dirección horizontal para determinar el límite líquido (Botía, 2015).

#### 3.2.3. Límite plástico

Es la cantidad del agua mínima en porcentaje, donde al espécimen se le hace hilos con un diámetro de 3.2 mm la cual se desmorona, el punto crítico plástico estima el valor mínimo de humedad, antes de que el suelo exhiba su característica plástica anterior a quebrarse Braja (2013).

### **3.2.3.1. Métodos de ensayos para determinar el límite plástico**

Para MTC (2014) E-111 y ASTM D-1241 el fin es determinar la frontera plástica, la cual se nombra límite plástico a la cantidad de agua mínima con la que se podrá hacer barras de espécimen con diámetros de 3.2mm, mediante el frotado del suelo de forma manual y sobre plano lisa evitando que se rompa o quiebre. Este ensayo estará bajo la NTP 339.129.

#### ***Equipos y materiales***

Espátula de plancha flexible de 7.5cm y 10 cm de largo y 2 cm de ancho, vasija o plato de porcelana con diámetro de 11.5 cm, báscula con susceptibilidad al 0.01 g, horno con energía calorífica contrastable y regulable a  $110\pm 5^{\circ}\text{C}$ , tamiz N°40, Cristal de reloj para determinar el agua recluido y cristal esmerilado.

#### ***Preparación de la muestra***

A fin de comprobar el límite plástico (LP) se usará 20 gramos del material que atraviese la criba N°40, la misma que se hizo uso para el análisis de límite líquido, la cual se mezclara hasta obtener una muestra esférica con la masa del espécimen y se pasa a tomar 1.5 gramos a 2.0 gramos de la esfera para la prueba.

#### ***Procedimiento de ensayo de límite líquido***

Moldeo el espécimen formando un elipsoide, para luego rodar o frotar la muestra haciendo uso de la mano sobre plano liso hasta formar un cilindro.

Si la muestra ensayada no se desmorona cuando el diámetro es menor a 3.2mm se volverá a crear un elipsoide y replicar el ensayo hasta que la muestra se deshaga al aproximarse a la medida circular mencionado.

La manifestación del desmoronamiento se manifiesta de diversos modos, y dependerá del tipo de suelo, sea para un suelo muy plástico el tambor se divide en piezas de 6 mm de extensión y en fragmentos dúctiles, las piezas son más pequeñas.

La fracción seleccionada se coloca sobre vidrio de reloj y se replica el procedimiento con la finalidad de reunir 6g de suelo, para luego determinar la saturación adecuado establecido por la norma MTC-E-108.

### ***Cálculos de datos***

Se calcula el promedio de dos ensayos de contenido de humedad, si hay discrepancia entre dos contenidos de agua y está por encima del rango admisible de dos resultados, se repetirá el ensayo.

La frontera plástica es la media del porcentaje de agua obtenidas de los ensayos y se puede determinar con la siguiente ecuación:

$$LP = \frac{W_w}{W_d} * 100$$

Donde: Ww= peso del agua, Wd= masa de tierra secado en horno.

### ***Cálculos de índice plástico (IP)***

Se define como índice plástico el minuendo de los corolarios de LL y su frontera plástica.

$$IP = LL - LP$$

Cuando la determinación del LL y LP es imposible se dará como resultado del IP como suelo no plástico (NP).

Si el límite plástico está por encima o es igual que el límite liquido el resultado se denominara como suelos no plásticos (NP).

### ***3.2.4. Resistencia CBR***

El CBR (california Bering ratio) en México se le denomina como VRS (Valor Relativo de soporte) se estudia con el fin de evaluar la eficacia del suelo con relación a su resistencia, se evalúan superficies donde se colocan estructuras de carreteras, edificaciones etc. (Sánchez , 2020).

### ***Método de ensayo de CBR de suelos en laboratorio***

Así mismo también MTC (2014) E-132 y la ASTM D-1883: tiene como objeto de estudio los pasos de ensayos, para obtener el parámetro de aguante de las muestras conocido como valor de la relación de soporte denominado también como California Bearing Ratio (CBR), el estudio se realiza con espécimen dispuesto en sala de ensayos, en situaciones determinadas de humedad y densificación, a la vez desarrollarla de forma analógica sobre las muestras inalteradas. El proceso de experimento se aplica para valorar la resistencia permisible de subrasante, subbase y material de base.

### ***Preparación de la muestra***

Para este ensayo se hará uso del suelo con partículas que pasan la criba de 3/4", si se tiene material retenido en la misma se reemplazara por una porción igual pero que pase por el tamiz de 3/4" y las con las que sean retenidos por la criba N°4 la cual se obtiene mediante el tamizado. Estas muestras se prepararán bajo la norma NTP 339.141 ó NTP339.142.

### ***Equipos y materiales***

Según MTC (2014) E-132 y la ASTM D-1883: Para realizar esta prueba se hará uso de: Prensa que se usará para exigir la penetración de un cilindro en la muestra de estudio. Molde tubular de metal de  $152.4 \pm 0.66\text{mm}$  ( $6 \pm 0.026''$ ) de sección de circular interna y elevación de  $177.8 \pm 0.46\text{mm}$  ( $7 \pm 0.018''$ ), provisto de collar metálico con dimensiones de  $50.8\text{ mm}$  ( $2''$ ) de elevación y de base calada de  $9.53\text{ mm}$  de grosor. Rodaja espaciadora metálico con geometría circular con diámetro exterior de  $150.8\text{mm}$  con espesor de  $61.37 \pm 0.127$  la cual se usará a como fondo aparente del cilindro en el periodo de la densificación. Pisón de aglomeración, Registrador de esparcimiento, pesas anulares de metal, cilindro de profundización, diales con camino, estanque de aforo suficiente para la inundación de los moldes con agua, estufa termostática de calor controlable a  $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$ , balanzas que aguante  $20\text{ kg}$  y  $1\text{ kg}$  con precisión de  $1\text{g}$  y a  $0.1\text{g}$ , tamices N.º 4, 3/4" y 2", separador, equipos de

combinación, capsulas, vasijas, espátulas, y discos de pliego de filtro con diámetros del molde.

### ***Procedimientos de ensayo***

El procedimiento experimental se desarrolla de tal manera que los resultados de la relación de soporte se obtienen a partir de muestras de suelo que presentan un contenido de humedad y una densidad unitaria próximos a los valores requeridos tanto en el terreno natural como en el espécimen de laboratorio. La condición más crítica se manifiesta cuando el material es sometido a la acción del agua, conforme a lo establecido en las normas que regulan la determinación de la relación entre peso unitario y humedad, utilizando el método de compactación estándar o modificado. Cuando más del 75% en masa del material atraviesa la criba de 3/4", este se emplea directamente; sin embargo, si el porcentaje retenido en dicha criba supera el 25%, las fracciones gruesa se reemplazan por un material que pase por el tamiz de 3/4" y queda retenido en la criba N°4, con el propósito de obtener una muestra homogénea.

A partir del material preparado, se extrae una cantidad superior a 5000g para cada molde de ensayo CBR. Se registran los datos de masa y dimensiones del molde, incluyendo la base, el collar y el anillo espaciador, colocando en su fondo un papel filtro resisten del mismo diámetro. Posteriormente, el suelo se compacta en el interior del molde mediante energía de impacto controlado (ensayo Proctor estándar o modificado), aplicando el volumen de agua y la energía de compactación adecuada. Por lo general, se preparan entre tres y nueve probetas por tipo de suelo, dependiendo de su naturaleza granular o cohesiva y del grado de densificación requerida. En el caso de suelos granulares, se aplican 55, 26 y 12 golpes por capa, manteniendo el contenido de humedad óptima. Para suelos cohesivos, se busca analizar el comportamiento bajo diferentes rangos de humedad, con el fin de construir un conjunto de curvas que representen la relación entre peso específico seco, el contenido de agua y la respuesta del material ante cargas de penetración. En la etapa de inmersión, se coloca una placa perforada provista de una varilla

sobre la superficie de la muestra saturada, y sobre ella se disponen anillos metálicos que generan una carga equivalente o superior a la ejercidas por las capas superiores del terreno sobre el espécimen ensayado. El ajuste del sistema debe mantenerse dentro de los 2.27 kg correspondientes al peso de la placa, mientras que la sobrecarga total aplicada no debe ser inferior a 4.54 kg (MTC, 2016, p. 250).

### **Cálculo de datos**

El MTC (2016) indica que la cantidad de agua a adicionar al suelo depende de la diferencia entre su humedad natural y la humedad óptima, calculada mediante la ecuación respectiva:

$$\%w = \frac{H_p - h_f}{100 + h} * 100$$

Donde: H=Humedad prefijada, h= Humedad natural

Densidad: Se obtiene mediante el peso de la muestra antes de sumergir y de su humedad, mediante Proctor normal o modificado se obtendrá la densidad máxima y la humedad óptima.

Expansión: Se calcula con la información adquirida del deformímetro antes y posterior a la inmersión, referido a un porcentaje con respecto a la elevación de la muestra en el molde de 127mm.

$$\%expansión = \frac{L_f - L_i}{127} * 100$$

Donde: L<sub>i</sub>= Lectura inicial en mm, L<sub>f</sub>= Lectura final en mm

### **3.2.5. Peso unitario del suelo**

De igual forma INV (2021) E-141-13 y la ASTM D2937-71: “define el peso unitario del suelo como la relación de masa volumen unitaria, la cual está compuesta por partículas sólidas y espacios vacíos ocupado por agua y/o aire, si los espacios vacíos están ocupados por agua se define como peso unitario saturado y los espacios ocupados por aire de define como peso unitario seco, el peso unitario tendrá variaciones por el contenido de agua, nivel de compactación y consolidación a la que se someta”.

### **Preparación de la muestra**

Para realizar este ensayo se debe contar con muestra de suelo representativo de 16 a 30kg, obtenido la muestra se realiza el cribado en la criba #4, registrado los pesos que se retienen y los que atraviesan la criba, posterior a ella se secará y se establecerá la porción de grano gruesa, si el 0.5% de la muestra seca está unida a la porción gruesa se realizará un lavado para luego secar y registrar el peso (INV, 2021).

**Tabla 3.**

*Métodos de ensayo normal de compactación*

<b>Método</b>	<b>Diámetro del molde</b>	<b>Material</b>	<b>Capas</b>	<b>Golpes</b>	<b>Uso</b>	<b>Otro uso</b>
A	101.6mm (4 pulg.)	Pasa criba 4.75 mm (#4)	3	25	Si <25% se retiene en la criba # 4	Si no cumple la granulometría usar el método C
B	101.6mm (4 Pulg)	Pasa criba 9.5 mm (3/8")	3	25	Si < 25% se retiene en la criba 3/8" Si <30% se retiene en la criba de 3/4"	Si no cumple la granulometría usar el método C
C	152.4 mm (6 pulg)	Pasa criba 19.0 mm (3/4")	3	56		

*Nota.* La tabla presenta el método de compactación aplicado en función del diámetro de las partículas del material empleado. Este procedimiento permite seleccionar el tipo de ensayo más adecuado, ya sea el Proctor estándar o modificado, conforme a la granulometría del material. De esta manera, se garantiza que la energía de compactación aplicada sea representativa del comportamiento real del suelo en campo, optimizando su densidad y resistencia estructural para las capas del pavimento (INV 2021).

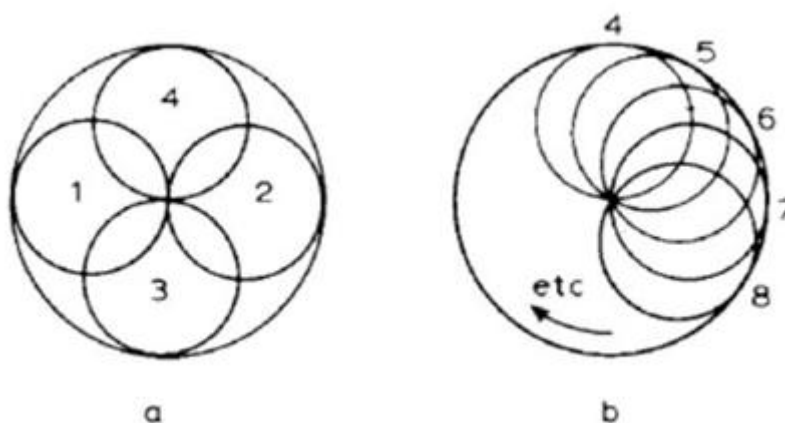
### **Procedimiento**

Preparada la muestra se realizará la compactación para la cual se seguirá los siguientes pasos:

Se registró la masa del molde con sus componentes, acoplando el collar de extensión y asegurando su alineación interna con la base. El suelo se compactó en tres capas de espesor uniforme, empleando un martillo manual o cilindro de dos pulgadas de diámetro. Durante la compactación, se determinó el contenido de humedad de cada submuestra para verificar la humedad de moldeo correspondiente. Las dos primeras capas compactadas se nivelaron, eliminando el exceso con un cuchillo. La tercera capa debía sobresalir ligeramente dentro del collar sin exceder los 6 mm. Cada capa recibió 25 golpes con el molde de 101.6 mm y 56 golpes con el de 152.4 mm, manteniendo la guía del martillo vertical y los impactos constantes, conforme a las especificaciones del INV (2021, pp. 13–14). Cuando se use el molde de 4 pulgadas el martillo de operación manual se deberá seguir un patrón de impactos como se muestra en la siguiente imagen.

### **Figura 2**

*Procedimiento de impactos de la compactación en moldes de 4 pulgadas.*



*Nota.* La figura presenta el proceso de compactación ejecutado conforme al método seleccionado (A o B), según el tamaño máximo de partícula del suelo. Se detalla la preparación de la muestra y la aplicación de la energía de compactación establecida. La

elección del método garantiza resultados representativos del comportamiento del material en condiciones de campo (INV, 2021).

Al compactar las muestras con un contenido de agua superior al óptimo, pueden presentarse irregularidades superficiales que deben corregirse según el criterio del especialista de laboratorio. Una vez concluida la compactación de la última capa, se retira cuidadosamente el collar de extensión y la base del molde, eliminando el material adherido para evitar su fricción o daño durante el desmontaje.

Posteriormente, se nivela la superficie superior del molde con una regla metálica, retirando el exceso de suelo con un cuchillo. En caso de presentarse pequeños huecos o discontinuidades, estos se rellenan con el material residual hasta lograr una superficie uniforme. Para evitar pérdida de humedad o material en suelos muy secos o saturados, la base del molde debe permanecer atornillada durante la calibración del volumen. Finalmente, se registra la masa del molde con la probeta compactada y se extrae una muestra representativa para determinar el contenido de humedad correspondiente (INV, 2021, p. 15).

### **Cálculos**

Masa seca de la fracción de ensayo ( $M_{SFE}$ )

$$M_{SFE} = \frac{M_{HFE}}{1 + \frac{W_{FE}}{100}}$$

Donde:  $M_{HFE}$ ; masa húmeda de la fracción de ensayo, aproximada a 1g,  $W_{FE}$ ; Humedad de la fracción de ensayo, aproximado a 0.1%.

Porcentaje de la fracción gruesa ( $P_{FG}$ )

$$P_{FG} = \frac{M_{SFC}}{M_{SFC} + M_{SFE}} * 100$$

Donde:  $M_{SFC}$ ; masa seca de la fracción gruesa, aproximada a 1g.

Porcentaje de fracción de ensayo ( $P_{FE}$ )

$$P_{FE} = 100 - P_{FG}$$

### 3.2.6. Cal viva

De acuerdo con la norma UNE-EN 459-1 (2016), la cal viva (Q) se compone principalmente de óxidos que, al entrar en contacto con el agua, generan una reacción exotérmica. Este material puede presentarse en distintas formas granulométricas, que abarcan desde partículas gruesas o terrones hasta presentaciones finamente pulverizadas.

**Tabla 4.**

*Reactividad de la cal viva según tipo.*

Tipo de cal viva	R5	R4	R3	R2	R <sub>SV</sub>
Q - 90	$t_{60}>10$	$t_{60}>25$	-	-	Otro valor especificado o no requerido
Q - 80	$t_{60}>10$	$t_{60}>25$	$t_{60}>25$	-	
Q - 70	-	-	-	$t_{60}>25$	

*Nota.* La tabla presenta la clasificación de la cal viva según su grado de reactividad, determinada a partir del tiempo de reacción  $t_{60}$  expresado en minutos. Se distinguen los tipos Q-90, Q-80 y Q-70, de acuerdo con la norma UNE-EN 459-1 (2016, p. 9), donde los valores mayores de  $t_{60}$  indican una menor velocidad de hidratación y, por tanto, una reactividad más baja.

### Distribución granulométrica

**Tabla 5.**

*Distribución granulométrica estándar*

Tamaño de criba	P4	P3	P2	P1	P <sub>SV</sub>
0.0010m	>100<	-	-	-	
0.005m	≥95	100	100		valor distinto
0.002m	-	≥95	≥ 95	100	específico o
0.0002m	-	-	≥ 70	≥ 95	requerido
0.00009m	-	≥30	≥ 50		

El tamaño de partículas  $\geq 0.0002$  m se determinará por tamizado en seco y  $< 2$  mm por tamizado con chorro de aire.

*Nota.* La tabla muestra el perfil granulométrico de la cal viva (Q), expresado en función del porcentaje de masa que atraviesa las cribas de distintos tamaños, los valores corresponden

a los tipos P1, P2, P3, P4 y PSV, definidos según la norma UNE-EN 459-1 (2016, p. 9). El tamaño de partículas igual o superior a 0.0002 m se determina por tamizado en seco, mientras que las inferiores a 2 mm se analizan mediante tamizado con chorro de aire.

Así mismo Sonja & Ritter, (2019) describe el tratamiento de los suelos con cal viva como una técnica reconocida y comúnmente empleada en excavaciones para secar suelos húmedos y optimizar su comportamiento. La cal viva está compuesta primordialmente por óxido de calcio, y mejora y solidifica la mayoría de los ejemplares de suelos, así como la subrasante de las zonas de tránsito. Conforme a estudios realizados en terraplén de la autopista A3 en Alemania, próximo al km 543.7 la cual tiene alturas variables de 10 a 12 metros, se utilizó un 2.5% de cal viva CL 90-Q, logrando una densidad seca de 1.77 kg/m<sup>3</sup>. También se llevó a cabo los ensayos en Bogen, donde en suelos de similar escenario se adicionó un 2.5% de cal viva, lo que incrementó ampliamente los parámetros de prueba.

### **3.2.7. Aceite reciclado**

Para Cabrejos & Murga (2021): Se define el aceite reciclado o aceite quemado como lubricante de diferenciación química por el traspaso de energía calorífica que genera el motor al estar en marcha. El aceite reciclado es un compuesto químico proveniente del petróleo que contiene, sobre todo, hidrocarburos y compuestos orgánicos de carbono. El aceite es un lubricante que se emplea en motores de combustión interna; por lo general, estos son los motores que utilizan vehículos como tractores, autos y motocicletas. Los motores de los vehículos tienen piezas que están separadas por espacios reducidos. Para prevenir la fricción entre los metales, es necesario un filme lubricante entre las partes; a su vez, este también tiene el propósito de regular la temperatura del motor porque entra en contacto con varias superficies metálicas y, así, absorbe una porción del calor producido al desplazarlo.

#### **Composición del aceite lubricante**

El aceite lubricante destinado a motores de combustión interna proviene del refinado del crudo de petróleo, ya que no puede emplearse directamente en aplicaciones

industriales o automotrices. Dicho proceso implica una serie de etapas de purificación y tratamiento que permiten obtener un aceite base adecuado, el cual posteriormente se combina con aditivos específicos para optimizar sus propiedades fisicoquímicas. Este aceite base constituye aproximadamente el 95 % del producto final y es el componente responsable de reducir la fricción entre las piezas móviles del motor, además de disipar el calor generado durante su funcionamiento (Cabrejos & Murga , 2021).

### **Funciones del lubricante de motor**

El aceite lubricante empleado en motores de combustión interna cumple la función esencial de reducir la fricción y el desgaste entre los componentes móviles, tanto durante el arranque como en el funcionamiento continuo del motor. Una lubricación eficiente se alcanza cuando las superficies metálicas no entran en contacto directo, gracias a la formación de una película protectora de aceite que actúa como barrera entre ellas.

### **Obtención del aceite reciclado**

El aceite lubricante de motor se cambia cada determinado tiempo o por la cantidad de recorrido de un vehículo, al estar expuesto a una constante fricción y altas temperaturas tiende a degenerarse sus propiedades y contaminarse con metales, puede determinarse según el tipo de combustible que utilice el motor, si es de diésel o de gasolina, al realizar el cambio se obtiene el aceite reciclado, la cual tiene un color negro y con olor a combustible. (Cabrejos & Murga, 2021, p. 47-51)

### **Normativa para uso del aceite reciclado**

Según el Manual De Carreteras Especificaciones Técnicas Generales Para Construcción EG-2013 (MTC, 2013), capítulo III apartado 301.C suelo equilibrado con soluciones químicas, indica el uso de productos equilibradores de desemejante índole, consecuencias de fabricación industrial de bienes artificiales u orgánicos, las cuales deberán ser aplicados sobre capas de afirmado con el fin de mejorar el comportamiento de los suelos.

### **3.2.8. Dosificación de materiales**

#### **Dosificación de cal viva**

Para determinar el volumen de cal viva necesaria, primero se determinan el peso del material requerido de la muestra; luego, se calcula el 4% de este peso.

$$W_{suelo} = 500.00 \text{ gr}$$

$$2\%_{cal\ viva} = W_{suelo} * 2\%$$

$$2\%_{cal\ viva} = 20 \text{ gr}$$

### **Dosificación de aceite reciclado**

La dosificación del aceite reciclado se llevará a cabo considerando el volumen de la muestra patrón, que en este asunto es 2124.00 cm<sup>3</sup>, por el porcentaje de aceite que se utilizará (2%, 6%, 8%) y multiplicado por la densidad del mismo.

$$\rho_{aceite} = \frac{21.92 \text{ gr}}{25 \text{ ml}} \Rightarrow \frac{21.92}{25 \text{ cm}^3} \Rightarrow \rho_{aceite} = 0.876 \frac{\text{gr}}{\text{cm}^3}$$

$$2\% = \frac{2124 * 2}{100} \Rightarrow 42.48 \text{ cm}^3$$

$$2\%_{aceite} = 42.48 \text{ cm}^3 * 0.88 \frac{\text{gr}}{\text{cm}^3}$$

$$2\%_{aceite} = 37.38 \text{ gr}$$

### **3.3. Definición de términos**

#### **Aceite reciclado**

Según Fong (2017) se denomina aceite de motor vehicular reciclado a los residuos producidos por el tiempo usado y desechado de los lubricantes de motor vehicular, con partículas contaminantes volátiles, insolubles óxidos de metales que están compuestos además de óxido de plomo y metales desgastados, durante el tiempo de trabajo el aceite se adiciona de sustancias metálicas asemejados al plomo de nafta, materiales sulfhídricos, ácidos de origen orgánico, hidrocarburos y partículas metálicas.

#### **Carretera afirmada**

Superficie de rodadura formada por una o más mantos compactados con componentes granulares, natural o combinado con distribución específica que soporta las cargas o esfuerzos del tránsito (Gonzales, 2017).

### **Cal viva (Q)**

La cal viva es un componente cementante extraído de la roca sedimentaria caliza, compuesto por calcita, sometido a temperatura grades, se vuelve en cal quemada, que generalmente se conoce como cal viva, al hidratarse se obtiene el polvo blanco conocido como hidróxido o cal apagada, la cal pura denominado cal viva o caustica tiene composición de  $\text{CaO}$  (óxido de calcio), normalmente se compone incluso de impurezas como óxidos con contenido de aluminio, hierro, silicio y magnesio, al hidratar desprende gran cantidad de energía calorífica y se forma el  $\text{Ca(OH)}_2$  (hidróxido de calcio) que se comercializa como un grano fino blanco conocido como cal apagada (Foccal, 2022).

### **CBR (california bearing Ratio)**

El CBR (california Bering ratio) en México se le denomina como VRS (Valor Relativo de soporte) se estudia con el fin de examinar las características del suelo con respecto a su resistencia, se evalúan superficies donde se colocan estructuras de carreteras, edificaciones etc. (Sánchez , 2020).

### **Consistencia**

Capacidad para experimentar cambios en su forma y estructura ante la influencia de las fuerzas externas, como es la gravedad, presión o al adicionar agua (MTC, 2016).

### **Densidad o peso unitario**

La masa volumétrica es una cantidad intensiva de la materia que expresa la cantidad de masa presente en un espacio volumétrico, la densidad es la relación de masa ( $m$ ) dividida entre el volumen ( $V$ ), estas se expresan de acuerdo al sistema de medición en la que se trabaje para sistema internacional (SI) las unidades de medida son  $\text{kg/m}^3$ , la densidad puede variar de acuerdo a la presión y temperatura sometida, ya que en la mayoría de las sustancias el volumen cambia de manera lineal aproximadamente al someterlo en energías caloríficas (Energia Nuclear, 2021).

**Dial**

Dispositivo de medición graduada que permite registrar la expansión de la muestra al inundarlo durante 96 horas (MTC, 2016).

**Dosificación**

Es el proceso de mezcla específica de materiales para modificar o mejorar las propiedades, lo que implica determinar la cantidad de materiales mediante pruebas y obtener resultados deseados (Polanco & Cascón, 1996).

**Estabilización de suelo**

Término general para los métodos físico químico, mecánico, biológico o combinado que tiene como fin la mejora de las peculiaridades del suelo para alcanzar el objetivo requerido las cuales pueden ser, capacidad portante, resistencia a la tracción, etc. (GeopolymerSolutions, 2015).

**Granulometría**

Los suelos en su mayoría son denominados como grava, arena, limo o arcillas, estas dependen de la mayor concentración de tamaños con respecto a un volumen, para ello se desarrollan límites para los tamaños de la partícula separada, las gravas son rocas constituidas con partículas de minerales, las arenas son partículas formadas a partir de cuarzo y feldespatos también están conformados por partículas de otros minerales (Juares & Rico, 2005).

**Humedad del suelo**

Cantidad de humedad contenida entre los granos del suelo la cual permite cambiar su estructura (MTC, 2016).

**Índice de plasticidad**

Es un punto representativo que se obtiene al calcular el límite líquido y el límite plástico de las muestras ensayadas y representadas en la carta de plasticidad de Casagrande, la cual se obtiene al interpolar el LL y LP, para obtener el índice de plasticidad se hace la operación de sustraer el LP al LL de la cual se obtiene el IP (Tanyildizi y otros, 2023).

### **Límites de Atterberg**

Las fronteras de Atterberg también se definen como las fronteras de cantidad de agua con la cual se caracterizan los estados de consistencia en que se encuentran los suelos finos, las cuales están denominados como sólido, semisólido, plástico y también como estado semilíquido o viscoso (Geotecnia, 2018)

#### **Limite líquido**

Denominado así al contenido de humedad en porcentajes de bases secas en la que el suelo cambia de etapa a medida que se añade agua (Geotecno, 2018).

#### **Limite plástico**

Definido como contenido mínimo de humedad en porcentaje, donde al suelo se le hace hilos con un diámetro de 0.0032 m la cual se desmorona, el límite plástico es el límite inferior del entorno plástico del suelo (Braja, 2013).

#### **Limos**

Grano de suelo que tiene un límite de medida entre 0.00002m y 0.000002m (MTC M. , 2014).

#### **Máxima densidad seca**

Cantidad de suelo con peso máximo que puede alcanzar la unidad de volumen posterior a la compactación, con respecto a la humedad óptima (MTC, 2013).

#### **Proctor estándar y modificado**

Ensayo realizado en moldes con proporción de agua y energía con el fin de determinar la densidad y la humedad optima deseada (MTC M. , 2014).

#### **Suelo**

Se define suelo a un cumulo de distribución precisada y de características que cambian vectorialmente. El suelo posee perfil el cual es la que se hace mayor uso, en ingeniería suelo es todo tipo de material terroso la cual puede ser suelos de relleno hasta areniscas conglomeradas, de esta definición quedan excluidas las rocas que no sufrieron cambios, rocas igneas o metamorficas y el deposito de conglomerados o aquellos materiales que no se hablandan o desintegran con la accion del interperie, el

comportamiento mecánico dependera mucho de la cantidad de agua que contenga, la cual es considerada parte integral del suelo (Juares & Rico, 2005).

### **Suelo cohesivo**

Son las que tienen partículas pequeñas en mayor cantidad con suficiente arcilla por ello tienden a estar adheridos entre ellas, para su clasificación OSHA hizo uso de un sistema de medición denominado *fuerza de compresión* la cual permite clasificar los diferentes tipos de suelos (Departamento de trabajo de los Estados Unidos, 2021).

### **Subrasante**

Es el suelo natural que sirve como soporte o estructura donde se apoya la estructura de las vías, esta tiene que ser uniforme sin cambios bruscos y con la capacidad de soportar cargas, para ello se analizar minuciosamente la expansión (Martinez, 2019).

### **Tamizado**

Es el proceso de separar las diferentes fracciones por las que está compuesto un sólido granular o pulverulento, para su respectiva clasificación del tamaño de sus partículas (Emjuvi, 2020).

### **Tamiz**

Conjunto de cribas que permite la separación de las partículas del suelo con el fin de determinar la distribución granulométrica para su clasificación de % de grava, arena, arcilla y limo (INV, 2021).

### **Viscosidad**

Se refiere a la facilidad con la que fluye de acuerdo a la temperatura específica, también dependerá del espesor de la misma dado que las delgadas tienen la viscosidad más mínima y que tienen mayor fluides con temperaturas bajas, los aceites gruesos tienen una viscosidad alta (TotalEnergies, 2020)

## IV. Metodología

### 4.1. Tipo y nivel de investigación

#### 4.1.1. Tipo de investigación

Según Montuné (2018) el tipo de investigación es **aplicativo experimental** se fundamenta plenamente en la intencionalidad de la propuesta científica orientada a generar el fenómeno objeto a investigar, implicando la participación activa del investigador con el objetivo de lograr conclusiones fundamentales.

Durante le ejecución se manipulará la variable independiente (cal viva y aceite reciclado) para observar los cambios que sufra la variable dependiente (valor del CBR), la cual se obtendrá en un en laboratorio de suelos siguiendo las bases teóricas.

#### 4.1.2. Nivel de investigación

En el desarrollo del presente estudio se adoptará un enfoque de tipo **aplicado**. De acuerdo con Lozada (2014), la investigación aplicada tiene como finalidad producir conocimientos dirigidos a resolver problemáticas específicas de carácter social o productivo, mediante la obtención de resultados tecnológicos que posean una utilidad práctica e inmediata.

Así mismo para Montuné (2018) se define como nivel de investigación **aplicado y explicativo** del estudio práctico o empírico. Por qué se aplica los conocimientos obtenidos a base de un marco teórico para obtener una consecuencia práctica.

Es **aplicada** por que está orientada a zanjar el problema de la limitada capacidad portante de la subrasante en un trayecto de la carretera seleccionada, mediante el uso de cal viva y aceite reciclado. Es **explicativa** porque intenta establecer la relación causa-efecto al dosificar cal viva y aceite reciclado sobre la muestra patrón, y su derivación en el CBR del suelo.

#### 4.1.3. Alcance de la investigación

El alcance o la escala investigativa que se adopta es **descriptivo**. Según (Moreno, 2016) la intención es describir contextos o eventos, buscan puntualizar las propiedades

sustanciales de personas, grupos, materiales etc., y desde la perspectiva científica describe la medición con la mayor exactitud posible, mediante la cual se puede predecir a pesar de lo rudimentario que sea.

#### **4.1.4. Diseño de investigación**

El diseño metodológico adoptado en este estudio corresponde al tipo experimental, dado que implica la manipulación deliberada de una variable independiente para observar su efecto sobre otra. Según Velázquez (2018), la investigación experimental se caracteriza por mantener ciertas variables bajo control, mientras que otras son modificadas intencionalmente con fines de observación científica.

En esta investigación se actuará sobre la variable independiente, definida como la incorporación de óxido de calcio (cal viva) y aceite lubricante reciclado de motor, aplicados en proporciones específicas según volumen y peso. Se evaluará el impacto de dicha intervención sobre la variable dependiente, representada por las propiedades físico-mecánicas del suelo cohesivo utilizado como subrasante.

El esquema experimental se representa de la siguiente manera:

G1: O<sub>1</sub> X O<sub>2</sub>

Donde:

G1 = Grupo experimental;

X = Aplicación de cal viva y aceite reciclado en el CBR de la subrasante;

O<sub>1</sub> = Ensayo previo a la intervención;

O<sub>2</sub> = Ensayo posterior a la intervención.

#### **4.1.5. Enfoque de la investigación**

En el desarrollo de la investigación se aplicará el enfoque cuantitativo; Según (Mata, 2019) es la caracterización por dispensar la lógica empírica deductiva que se obtiene realizando operaciones empíricas mediante uso de métodos de recolección de datos estadísticos.

Por lo tanto, en la investigación se emplearán datos estadísticos para el proceso de datos numéricos, del resultado de los ensayos de la granulometría la cual se expresará

como resultados mixtos, para los límites de Atterberg y el CBR se expresará como resultados cuantitativos.

#### **4.1.6. Método de la investigación**

Existe variedad de metodologías para hacer la exploración científica, de las cuales se menciona dos, Método deductivo e inductivo. Según Ortega C., (2023) la investigación deductiva se entiende como la categoría de investigaciones que consta de comprobaciones de las hipótesis con el fin de probar una teoría, dicha de otra forma el método deductivo se encarga de deducir conclusiones a partir de premisas o proposiciones.

De acuerdo al concepto optaremos el método deductivo para la investigación, puesto que la investigación tendrá como fin evaluar el comportamiento del CBR al añadir cal viva (CV) y aceite reciclado (AR) para subrasante de la carretera AP-104 Km 47+500 – 48+700.

#### **4.1.7. Recolección de datos de la investigación**

Durante la ejecución de la investigación se efectuó la recopilación de datos empíricos necesarios para el análisis. Para (Velásquez, 2018), la obtención de datos comprende el conjunto de procedimientos orientados a la recolección, medición y procesamiento de información específica, utilizando para ello técnicas estandarizadas y validadas. Con base en los datos recopilados, el investigador contrasta y evalúa las hipótesis previamente formuladas.

### **4.2. Ámbito temporal y espacial**

#### **4.2.1. Temporal**

La actual investigación se desarrollará durante el periodo de julio 2023 a agosto del 2025.

#### **4.2.2. Espacial**

El espacio geográfico donde se desarrollará la investigación es La carretera AP-104 tramo km 47+500 – 48+700 que se ubica entre el Distrito de Huancaray y San Antonio de Cachi en la Provincia de Andahuaylas.

### **4.3. Población y muestra**

#### **4.3.1. Población**

Según Vara, (2012) la población es la fuente de información o informante y es el cúmulo de individuos que son sustancias, personas, documentaciones, eventos, data, empresas, situaciones etc., las cuales tiene propiedades en común.

La población para los ensayos es de la progresiva 47+500 a 48+700 de la carretera AP-104, ubicado en el límite entre el Distrito de Huancaray y San Antonio de Cachi, Provincia de Andahuaylas departamento de Apurímac.

La extensión de la población se obtuvo de la siguiente muestra

- Longitud de vía (L) : 1200 m
- Ancho de la vía a nivel subrasante (A): 8.00 m
- Altura de la subrasante (H): 0.40 m
- Volumen de control (VC) : 3840 m<sup>3</sup>

$$VC = L * A * H$$

De acuerdo con las especificaciones técnicas, se establece que la frecuencia de ensayos para la determinación de los límites de Atterberg debe realizarse a razón de una medición por cada 1 000 m<sup>3</sup> de material, mientras que para el ensayo de CBR corresponde una medición por cada 2 000 m<sup>3</sup>. En función de un volumen total de 3 840 m<sup>3</sup> de suelo controlado, se efectuaron cuatro determinaciones de límites de Atterberg y tres evaluaciones de CBR, a fin de garantizar la representatividad estadística y la validez de los resultados obtenidos (Ministerio de Transportes y Comunicaciones (MTC, 2013).

#### **4.3.2. Muestra**

Vara, (2012) indica que la muestra es el conjunto de casos extraído de una población la cuales se selecciona por métodos raciales y estas dependerán del tipo la cantidad de poblaciones.

Así mismo Hernández, (2014) menciona que las investigaciones deben ser verídico y a la vez sujeta a crítica y réplica, la cual será posible solo si el investigador delimita de forma clara la población estudiada y hacer una rotunda selección de la muestra.

Es de opción preferencial o por conveniencia la elección como muestra de la vía que interconecta el Distrito de Huancaray con el Distrito San Antonio de Cachi en la Provincia de Andahuaylas.

#### **4.3.3. Muestreo**

Proceso de extraer muestras a partir de una población, porque no será necesario el estudio de toda la población, trabajar con una parte de la población nos ayudara a obtener muchas ventajas como son: ahorro de tiempo, disminuir costos, incrementa la profundidad y exactitud de los resultados (Vara, 2012). a investigación emplea un muestreo no probabilístico por criterio, donde la selección de las muestras depende del juicio técnico del investigador. Este enfoque no requiere el uso de fórmulas estadísticas, ya que los elementos se eligen por su pertinencia y representatividad respecto a los objetivos del estudio.

Por lo tanto, se tomará en cuenta la selección por criterio de inclusión la vía de 26 kilómetros de longitud que interconecta el Distrito de Huancaray con el Distrito de San Antonio de cachi.

Por exclusión solo se estudiará un tramo de 1.2 kilómetros del tramo total, dado que el tipo de suelo es altamente cohesivo a diferencia del resto del tramo que tiene contenido de suelos granulares o contenido de gravas.

#### **4.4. Instrumentos**

Para Vara (2012) "Los instrumentos de recolección de datos se clasifican en cualitativos y cuantitativos.

Los instrumentos que se hace uso son cuantitativos, pues se obtendrá los datos mediante herramientas mecánicas y electrónicos en laboratorio con equipos calibrados y normalizados y con ayuda de formatos para su recolección, análisis e interpretación las cuales están normadas.

#### **4.4.1. Técnicas**

Según Vara (2012) las técnicas son herramientas aptas para la obtención de información científica, que luego de su organización de datos será necesario corroborar cualitativa o cuantitativamente la que dependerá de su naturaleza, para la obtención de resultados de investigación será necesaria analizar la data. En este proyecto de investigación se hará uso de las técnicas cualitativas, puesto que se hará observación se obtendrá resultados mediante experimentos.

#### **4.5. Procedimientos**

Como primer paso, se realizó la extracción de la muestra mediante método de calicata, la cual consiste en excavar una calicata de una profundidad de 1.50 m en la zona de estudio, para realizar los ensayos fueron necesarios extraer un total de 175.00 kg de muestra alterada.

Para la ejecución de los ensayos de laboratorio, las muestras de suelo fueron previamente secadas al ambiente, permitiendo la evaporación natural de la humedad antes de su análisis. Los ensayos se efectuaron en el laboratorio de mecánica de suelos, conforme a los procedimientos establecidos en el marco teórico y las normas técnicas correspondientes. Previamente a la dosificación de la cal viva y del aceite lubricante reciclado, se determinó el peso específico del material, a partir del cual se calcularon las cantidades requeridas para la realización de los ensayos de límites de Atterberg, peso unitario, densidad seca máxima y CBR

Preparación de datos obtenidos de los ensayos realizados para su posterior calculo y determinación del comportamiento del suelo patrón más la adición de cal viva y aceite reciclado. Mediante cálculos matemáticos con ecuaciones planteadas en las bases teóricas, y haciendo uso de software se determinó e interpreto el comportamiento y cambios que sufre las muestras con distintas dosificaciones.

#### 4.6. Análisis de datos

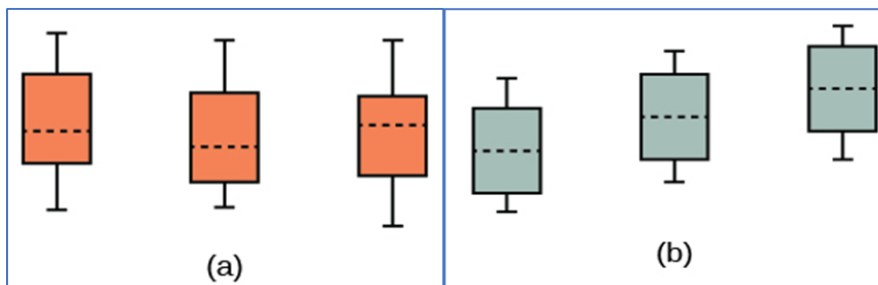
Para Lopez (2019) el proceso estadístico es el conjunto de épocas o períodos que deben procederse para realizar una exploración basada en indagación cuantitativa y alcanzar resultados fieles a la realidad estudiada.

##### Prueba de hipótesis por ANOVA de una vía

De acuerdo con OpenStax (2022), la prueba de análisis de varianza de un solo factor (ANOVA de una vía) tiene como propósito identificar si existen diferencias estadísticamente significativas entre las medias de tres o más grupos independientes. Este procedimiento utiliza la comparación de varianzas para evaluar la homogeneidad entre las medias. La hipótesis nula ( $H_0$ ) plantea que las medias poblacionales son iguales ( $\mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_k$ ), mientras que la hipótesis alternativa ( $H_1$ ) establece que al menos una de las medias difiere de las demás ( $\mu_i \neq \mu_j$ ).

##### Figura 3.

*Diagrama de cajas para varianza de ANOVA*



*Nota.* En la figura la hipótesis nula (a)= $H_0$  plantea que todas las medias son iguales, indicando que no existen diferencias significativas entre los grupos. Por su parte, la hipótesis alternativa (b)= $H_1$  establece que al menos una media difiere, lo que sugiere la existencia de variaciones estadísticas relevantes (OPENSTAX, 2022).

##### Regla de decisión

Se elige el nivel de alfa de significación que se va utilizar, usualmente alfa = 5%.

1. Cuando el P-valor es inferior al nivel alfa de significancia que hemos elegido, se rechaza la hipótesis nula, por tanto, hay al menos dos medias grupales que son diferentes entre sí.
2. Cuando este sea lo contrario, no podemos rechazar la hipótesis nula y se concluirá que no existe diferencias significativas entre los grupos evaluados.

Las variables dependientes o respuestas serán continuas sea dicho unidad de medida continua.

### Prueba de post-hoc método Tukey

Según OPENSTAX (2022) la prueba Tukey se hace uso para cuando no se visualiza diferencia entre medias muestrales con el valor crítico calculado mediante la siguiente ecuación.

$$T_{\alpha} = q_{\alpha}(k, N - k) * \sqrt{\frac{CME}{n_i}}$$

Donde **CME**: es el cuadro medio del error,  $n_i$  es el número de observaciones por tratamiento, **k**: es el número de tratamientos,  $N-k$ : es el grado de libertad para el error,  $\alpha$ : es el nivel de significancia,  **$q_{\alpha}(k, N-K)$** ; son los puntos porcentuales de la distribución del rango estudiado, que se obtiene de la tabla. Se declara significativamente diferentes los pares de medias cuya diferencia muestral en el valor absoluto sea mayor que  $T_{\alpha}$ .

### 4.7. Consideraciones éticas

Para Salazar et al. (2018), la ética es parte de la filosofía estimada un saber racional, por ello es una herramienta de estudio con fundamento y objetivo de la moral, por ello se considera de vital importancia para el investigador mostrar los principios morales más altas durante el desarrollo de la investigación. Una investigación científica se considera ética, cuando la hipótesis es razonable, idóneas para el desarrollo decente y con capacidad de ser completada, obtener respuestas con riesgo mínimo al realizarlo.

Según UTEA (2020), considera que el comité de ética de investigación su fin es proteger los derechos, la vida, salud, intimidad, dignidad y el buen estado de las personas

y/o otros individuos vivos que sean partícipes de una indagación, así mismo es participe en el proceso del desarrollo de la investigación con muestras biológicas o la existencia de uso de sustancias que dañen el medio ambiente.

La búsqueda y uso que se da en este proyecto de investigación corresponde a otros autores las cuales fueron citados, dado que la información adquirida es confiable y válido. El resultado de la investigación que se obtiene será en beneficio y uso de la población, si fuera necesario aplicarlo como elemento de estudios.

## V. Resultados y discusión

### 5.1. Resultados

#### 5.1.1. Granulometría

Se presentan los resultados de ensayos realizados en laboratorio, donde se emplea una muestra alterada. Para ello se inicia con una muestra inicial de 1837.40 gr, la cual se somete al procedimiento de lavado con el fin de excluir las fracciones finas. Como resultado, se cuenta con una masa final de 900.40 gramos.

**Tabla 6**

*Análisis granulométrico mediante cribado*

Tamiz (in)	Tamiz (mm)	Peso Contenido (gr)	Peso corregido (gr)	% Contenido	% Que Pasa
3/4"	19.050	0.00	0.00	0.00	100.00
1/2"	12.700	54.10	54.10	2.94	97.06
3/8"	9.525	52.80	52.80	2.87	94.18
1/4"	6.350	74.70	74.70	4.07	90.12
N°4	4.750	53.90	53.90	2.93	87.18
N°10	2.000	175.50	175.50	9.55	77.63
N°20	0.850	138.40	138.40	7.53	70.10
N°40	0.425	159.50	159.50	8.68	61.42
N°60	0.300	90.50	90.50	4.93	56.49
N°100	0.149	63.00	63.00	3.43	53.06
N°200	0.075	30.30	30.30	1.65	51.42
Cazuela		7.20	944.70	51.42	
<b>TOTAL</b>		<b>899.90</b>	<b>1837.40</b>	<b>100.00</b>	

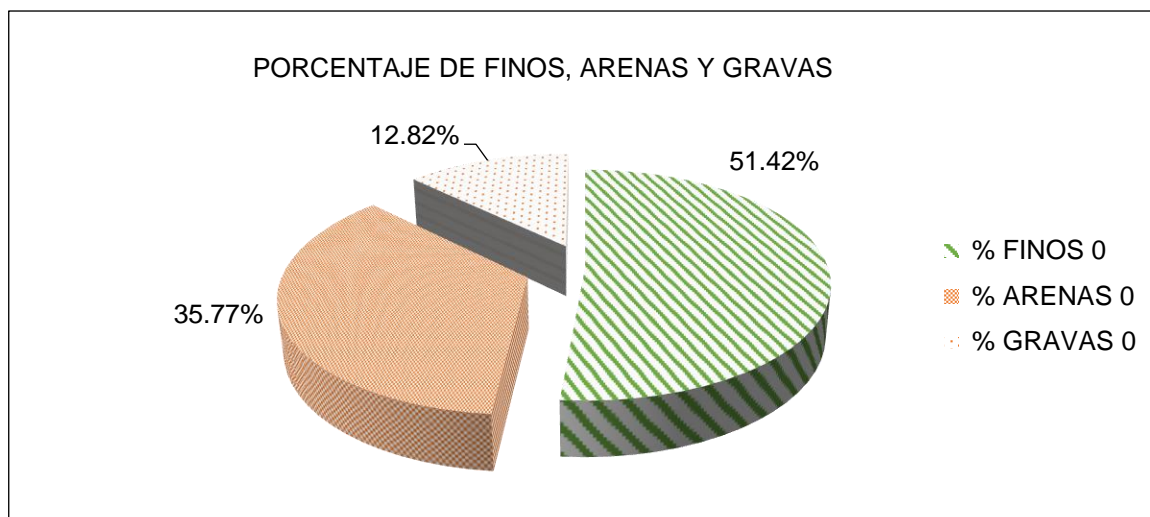
*Nota.* La tabla presenta los resultados del análisis granulométrico de la muestra posterior al proceso de lavado y secado en horno. Se muestran los pesos retenidos y corregidos en cada tamiz, así como los porcentajes de material retenido y que pasa. Estos valores permiten evaluar la distribución de tamaños de partículas y determinar la gradación del suelo.

En la tabla 6 se representa el conjunto del material total usado para el ensayo 1837.40 gr, antes de hacer el proceso de cribado se realiza el proceso de lavado en la criba N° 200, este proceso se realiza por el alto contenido de suelos finos, posterior a ello es secado al horno durante 24 horas a  $110 \pm 5$  °C, se cuenta con 900.40 gr de muestra para

hacer el proceso de cribado, con el cribado se determinará la distribución granulométrica de acuerdo a la cantidad retenida en cada criba.

**Figura 4.**

*Distribución de granulométrica*



*Nota.* De acuerdo a los corolarios que se enfoca en la figura. Se cuenta con 12.82% de grava, 35.77% de arena y 51.42% de partículas finas, según la tabla 6 el suelo no cuenta con un factor de uniformidad (Cu) y tampoco con un factor de curvatura (Cc) por ello se describe como suelo mal graduada con alto contenido de finos.

### 5.1.2. Límites de consistencia

Se tiene el siguiente gráfico sobre los límites de consistencia de donde se puede describir.

**Tabla 7.**

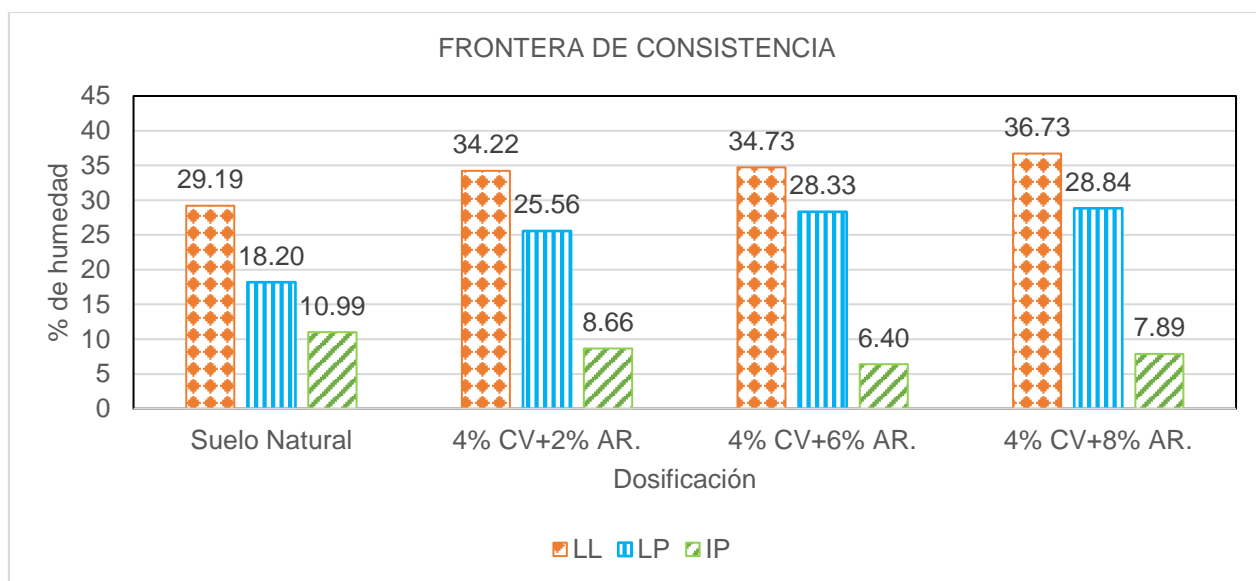
*Límites de Atterberg*

Muestra	Frontera Líquido	Frontera Plástico	Índice de Plasticidad
Suelo Natural	29.19	18.20	10.99
4% CV+2% AR.	34.22	25.56	8.66
4% CV+6% AR.	34.73	28.33	6.40
4% CV+8% AR.	36.73	28.84	7.89

*Nota.* a tabla presenta los resultados de los límites de Atterberg obtenidos para el suelo natural y las mezclas estabilizadas con cal viva (CV) y aceite reciclado (AR). Se observa que la incorporación de estos aditivos modifica los valores de la frontera líquida y plástica, reflejándose en variaciones del índice de plasticidad.

**Figura 5.**

*Límites de consistencia.*



*Nota.* La figura presenta la variación de los límites de Atterberg (límite líquido, límite plástico, e índice de plasticidad) para el suelo natural y las mezclas estabilizadas con diferentes proporciones de cal viva (CV) y aceite reciclado (AR). Se observa que, al incrementar la cantidad de aditivos, los valores de LL y LP aumentan ligeramente, mientras que el IP tiende a disminuir, indicando una reducción en la plasticidad del suelo y una mejora en su comportamiento estructural.

En la tabla 7 y figura 5 se visualiza la diferencia de los resultados con respecto a la muestra patrón. Con la adición de cal viva (cv) al 4% y aceite reciclado (ar) al 2% el LL incrementa en un 5% el LP incrementa en un 7.36% y el IP tiende a disminuir en un 2.33%.

Así mismo, al adicionar cal viva (cv) al 4% y aceite reciclado (ar) al 6% el LL incrementa en un 5.54% el LP incrementa en un 10.13% y el IP tiende a disminuir en un 4.59%.

Finalmente, al adicionar cal viva (cv) al 4% y aceite reciclado (ar) al 8% el LL incrementa en un +7.54% el LP incrementa en un 10.64% y el IP tiende a disminuir en un 3.10%.

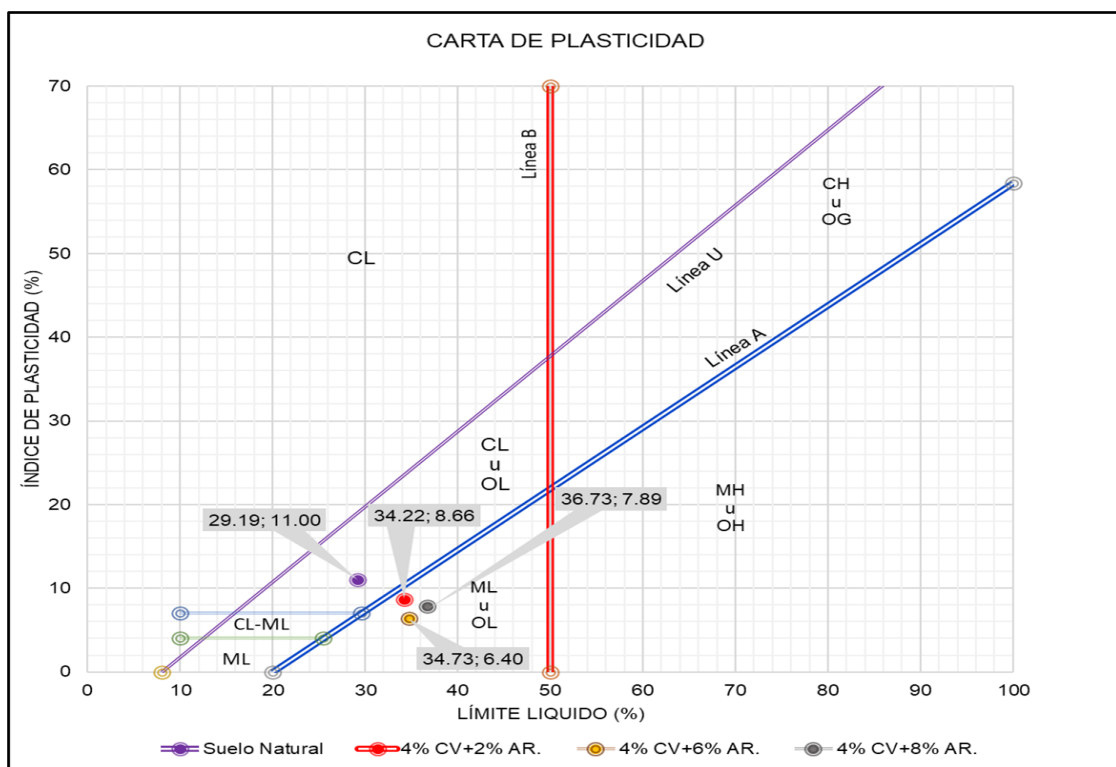
### 5.1.3. Clasificación

Según clasificación ASSTHO, la muestra natural se determina como A-6 y pertenece al índice de grupo 3, según clasificación SUCS se determinó como arcilla de baja plasticidad (CL).

Al adicionar cal viva al 4% y aceite reciclado al 2%, 6% y 8% la clasificación según ASSTHO se determinó como A-4 y índice de grupo 2, según clasificación SUCS se determinó como limos orgánicos y arcillas limosas de baja plasticidad (OL).

**Figura 6.**

*Carta de plasticidad.*



*Nota.* En la figura se presenta la carta de plasticidad, donde las interpolaciones entre los valores del límite líquido y el índice de plasticidad permiten observar el comportamiento de las fracciones finas tanto de la muestra natural como de las muestras tratadas con

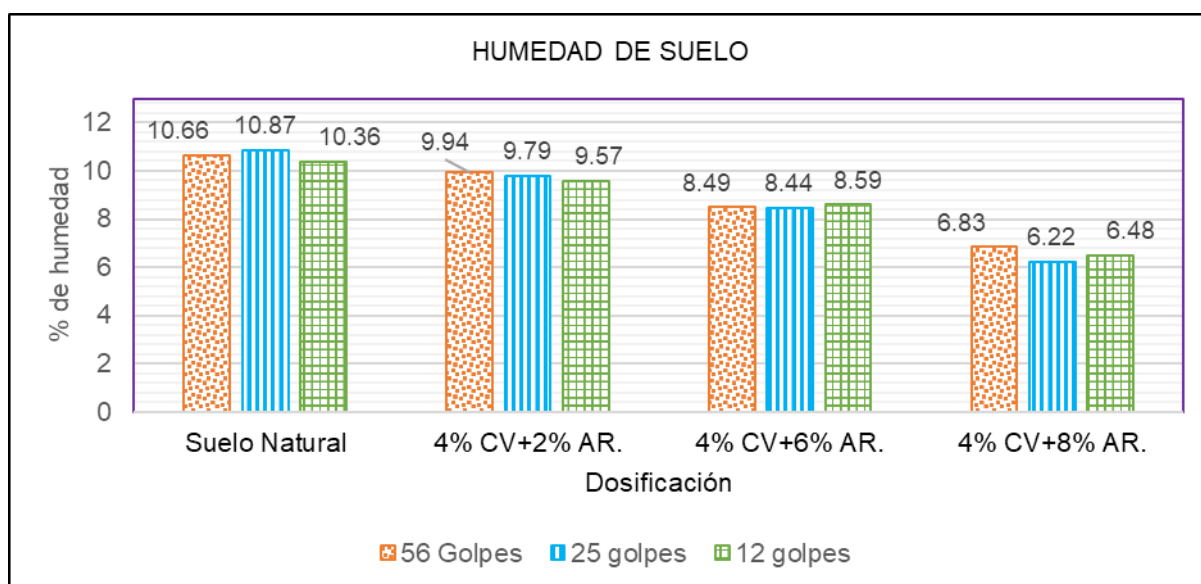
diferentes dosificaciones de cal viva y aceite reciclado. se visualiza que la muestra patrón se clasifica como arcilla de baja plasticidad (CL), y al añadir cal viva más aceite reciclado se clasifica como limo orgánico de baja plasticidad (ML),

#### 5.1.4. Contenido de humedad

Con base en los resultados obtenidos y tras efectuar la comparación entre las diferentes dosificaciones de cal viva y aceite lubricante reciclado respecto a la muestra inicial o de control, se obtuvo la representación gráfica mostrada en la figura siguiente, la cual evidencia las variaciones en el comportamiento del material analizado.

**Figura 7.**

*Humedad del suelo.*



*Nota.* Según la figura la muestra patrón tiene mayor contenido de humedad, la cual cambia de acuerdo a la cantidad de golpes, así mismo se puede visualizar que al adicionar CV al 4% y AR al 2% a 56 golpes decrece la cantidad de humedad en un 0.72%, a 25 golpes el contenido de humedad baja en un 1.09%, a 12 golpes disminuye en un 0.80%. Al adicionar CV al 4% y AR al 6% a 56 golpes baja el volumen de humedad en un 2.17%, a 25 golpes el contenido de humedad decrece en un 2.43%, a 12 golpes disminuye en un 1.77%. Al adicionar CV al 4% y AR al 8% a 56 golpes decrece el contenido de humedad en un 3.82%,

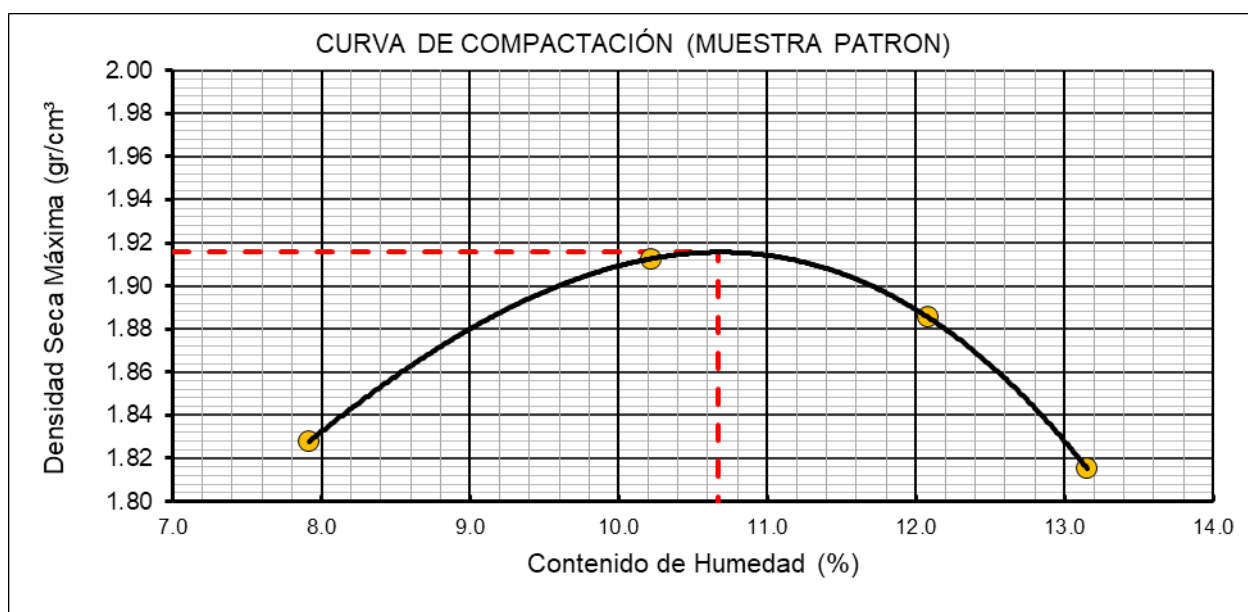
a 25 golpes el contenido de humedad baja en un 4.65%, a 12 golpes disminuye en un 3.88%.

### 5.1.5. Compactación

De acuerdo al tanteo de consolidación se estableció la correlación de densidad máxima seca y humedad óptima para modelo inicial y especímenes con añadidura de cal viva y aceite reciclado.

#### Figura 8.

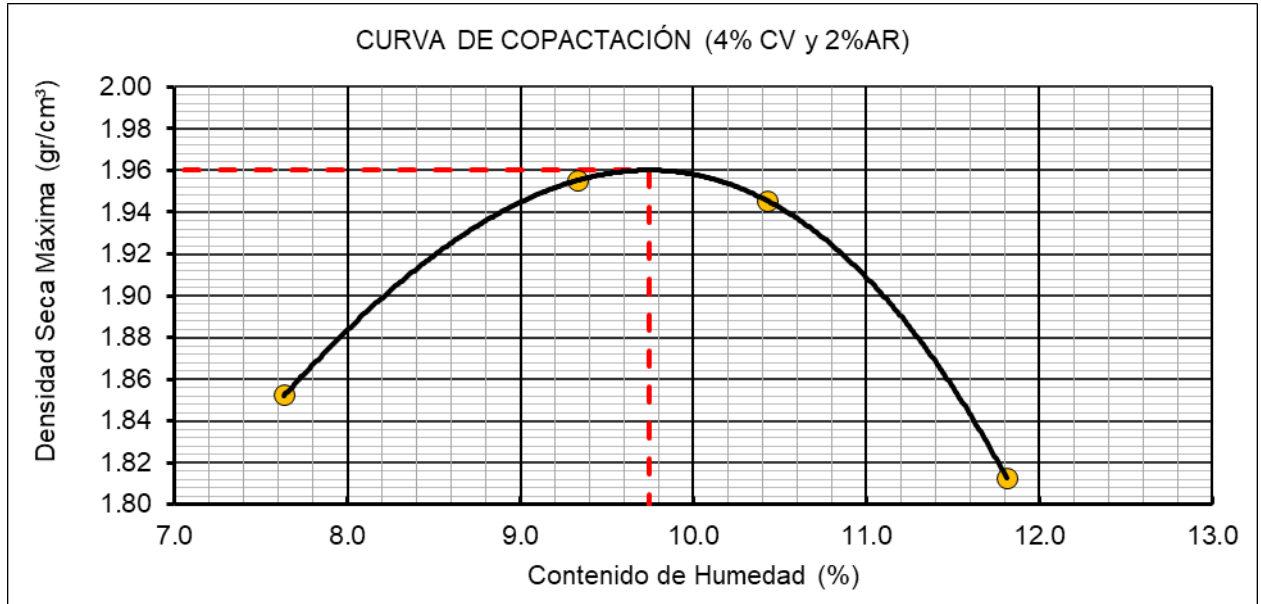
*Curva de compactación de la muestra patrón para determinar la densidad seca máxima y la humedad óptima.*



*Nota.* En la figura se muestra la curva de compactación correspondiente al espécimen modelo, obtenida a partir del ensayo Proctor estándar. En dicho gráfico se observa que la densidad seca máxima alcanzada es de 1.916 g/cm<sup>3</sup>, mientras que el contenido de humedad óptimo es de 10.67%. Estos valores evidencian las condiciones ideales de compactación del suelo, en las cuales se logra la máxima densificación con el menor contenido de agua posible, garantizando una adecuada resistencia y estabilidad estructural del material en campo.

**Figura 9.**

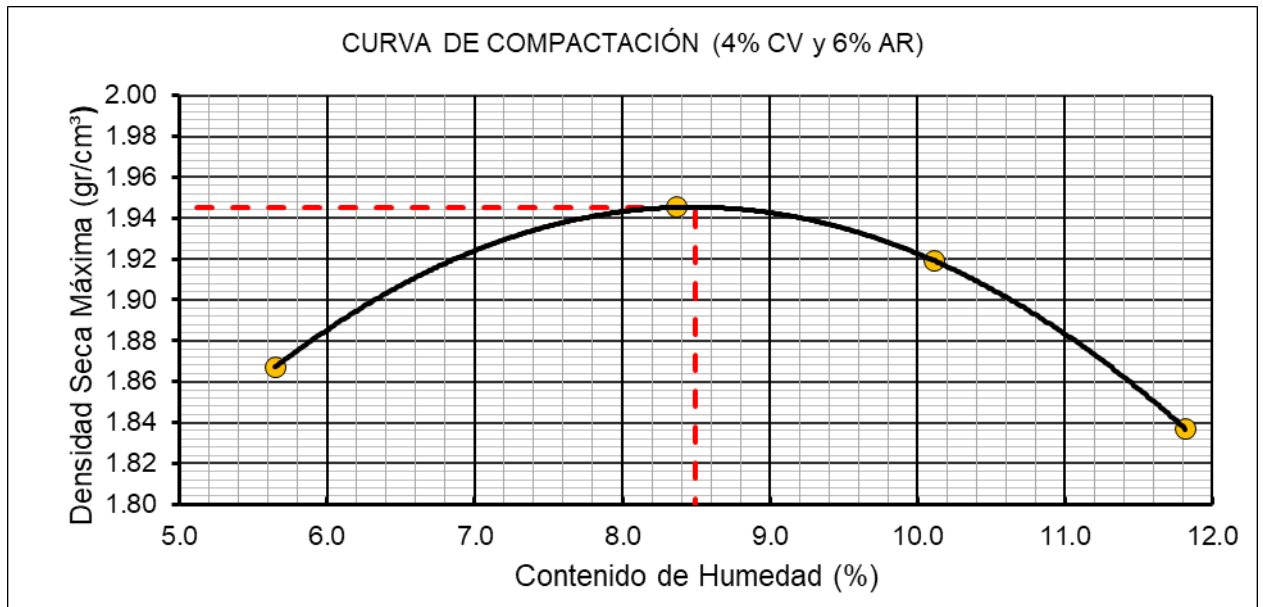
Curva de compactación de la muestra más 4% de cal viva (CV) más 2% de aceite reciclado (AR) para determinar la densidad seca máxima y la humedad óptima.



*Nota.* En la figura se presenta la curva de compactación correspondiente al suelo tratado con una dosificación de 4 % de cal viva (CV) y 2 % de aceite reciclado (AR). A partir de los resultados obtenidos, se identificó una densidad seca máxima de 1.960 g/cm<sup>3</sup> y una humedad óptima de 9.74 %, valores que reflejan la mejora en las propiedades de compactación del material modificado%.

**Figura 10.**

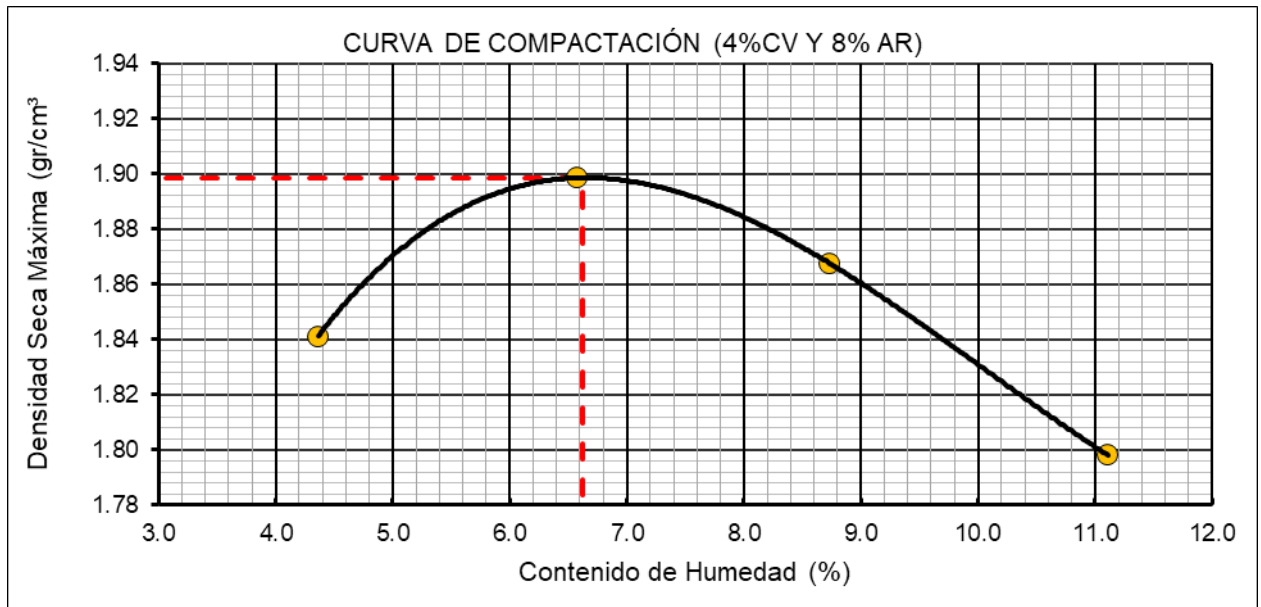
Curva de densificación para espécimen con 4% de cal viva (CV) más 6% de aceite reciclado (AR)



Nota. En la figura se representa el gráfico de gráfica de compactación correspondiente al espécimen de suelo con adición de 4% de CV y 6% de AR. A partir de los resultados obtenidos, se determinó la densidad seca máxima de 1.945 gr/cm<sup>3</sup> y humedad optima de 8.50%.

**Figura 11.**

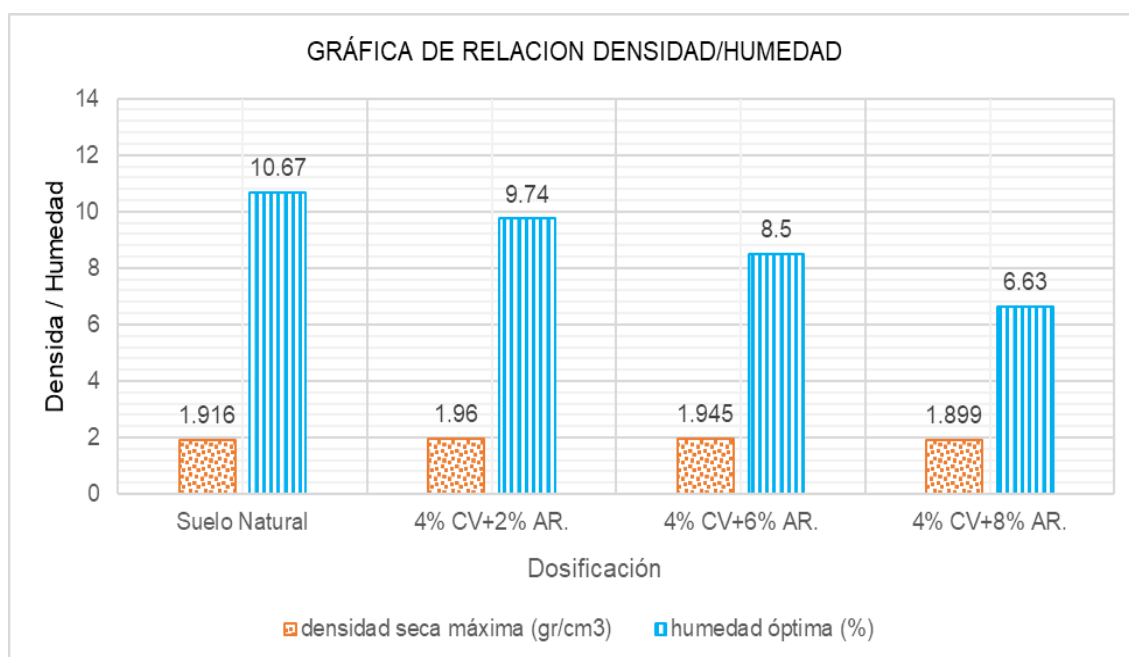
*Curva de compactación para muestra con 4% de cal viva (CV) más 8% de aceite reciclado (AR).*



*Nota.* En la figura se presenta la curva de compactación correspondiente a la muestra de suelo modificada con una dosificación de 4 % de cal viva (CV) y 8 % de aceite reciclado (AR). Con base en los resultados experimentales, se obtuvo una densidad seca máxima de 1.899 g/cm<sup>3</sup> y una humedad óptima de 6.63 %, lo que evidencia una variación significativa en el comportamiento del material frente al proceso de compactación.

**Figura 12.**

*Relación de densidad seca máxima y humedad óptima*



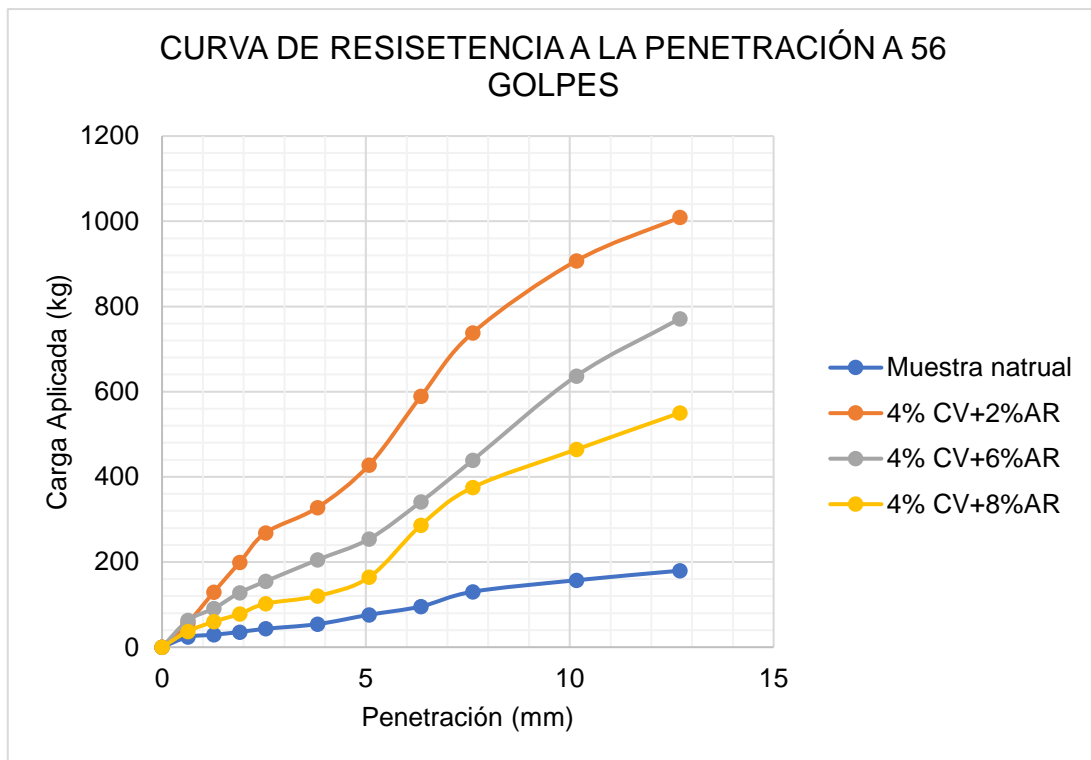
*Nota.* En la figura se observa que el espécimen patrón tiene una condición máxima de densificación de 1.916 gr/cm<sup>3</sup> con humedad porcentual óptima de 10.67%. por otro lado, al incorporar una dosificación de 4% de cal viva y 2% de aceite reciclado, se alcanza una condición máxima de densificación de 1.960 gr/cm<sup>3</sup> y una humedad porcentual de 9.74%. esto representa un incremento de +0.044 gr/cm<sup>3</sup> en la densidad seca máxima y una disminución del 0.93% en la humedad óptima con respecto a la muestra patrón. En consecuencia, se concluye que a mayor proporción de aceite reciclado reduce tanto la densidad como el contenido de humedad óptima necesario para la densificación del suelo

#### **5.1.6. Profundidad de penetración**

Para la obtención de datos de penetración fue necesario tener la muestra compactada inundada en agua durante 96 horas, para luego someter carga con incremento constante haciendo uso del pistón de penetración, se tiene las siguientes figuras.

**Figura 13.**

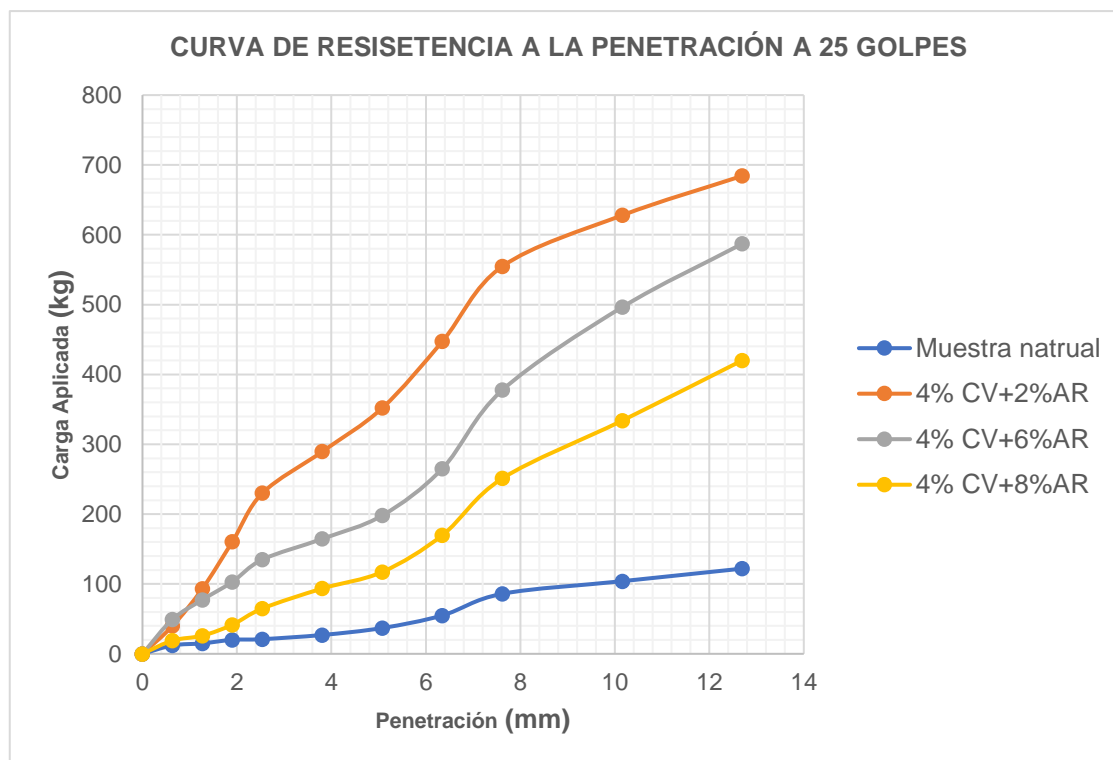
*Resistencia a la penetración a 56 golpes.*



*Nota.* En la figura se visualiza la resistencia a la penetración de muestra patrón y las muestras con adición de cal viva más aceite reciclado a los 56 golpes, se determina que la muestra con adición de 4%CV más 2% AR tiene mayor aguante a la entrada, así mismo la muestra con el resto de dosificaciones se encuentran por encima de la resistencia a la penetración del suelo natural.

**Figura 14.**

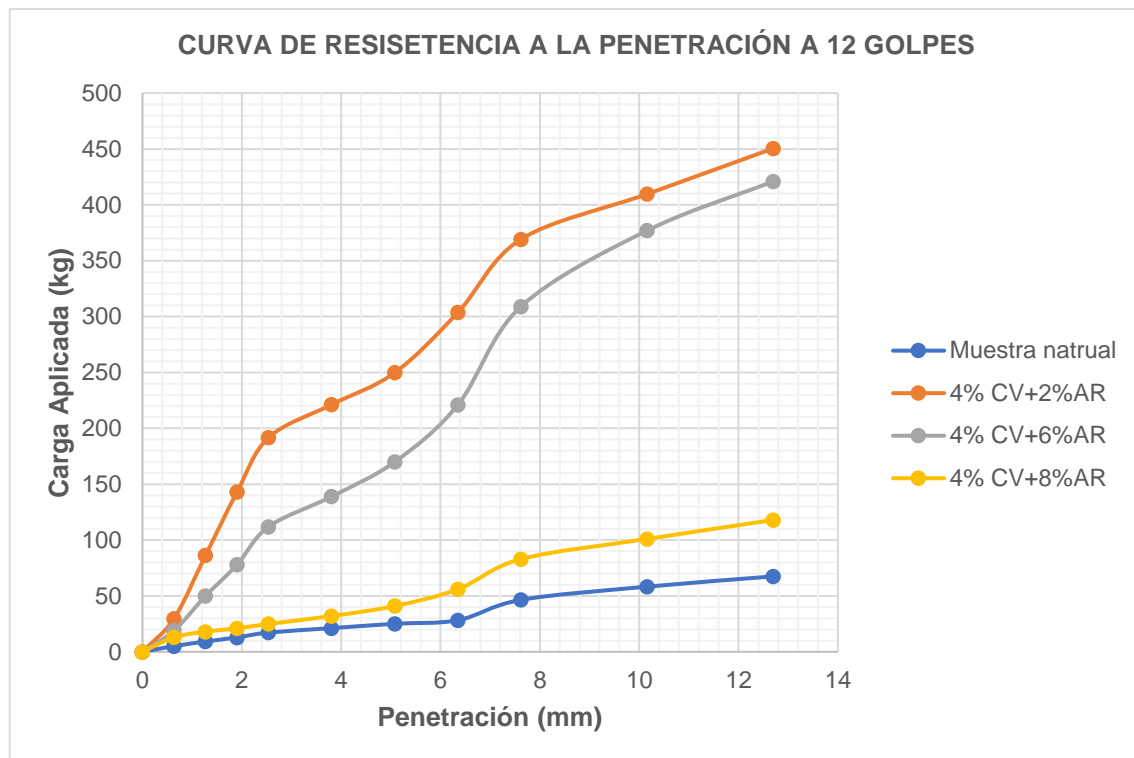
*Resistencia a la penetración a 25 golpes.*



*Nota.* De acuerdo con la figura, correspondiente al ensayo de 25 golpes, se observa que la muestra modificada con una dosificación de 4% de cal viva y 2% de aceite reciclado presenta la mayor resistencia a la penetración, evidenciando un comportamiento estructural más firme respecto a las demás combinaciones. Sin embargo, conforme se incrementa el contenido de aceite reciclado, la resistencia tiende a disminuir progresivamente, debido a la reducción en la cohesión y rigidez del suelo tratado. Este comportamiento sugiere que el exceso de aceite puede actuar como un agente lubricante, afectando negativamente la compactación y el soporte del material.

**Figura 15.**

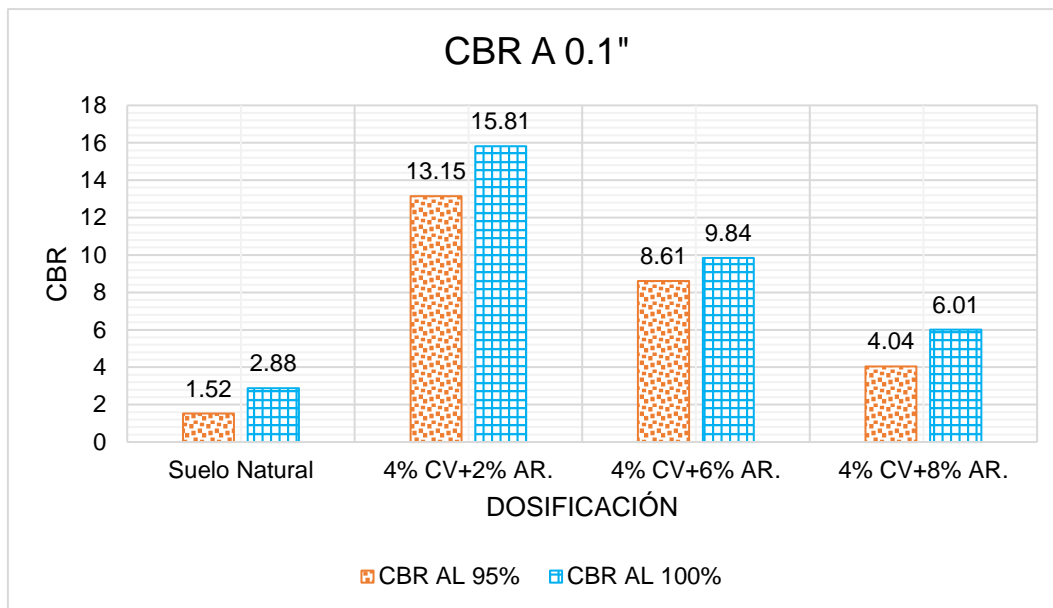
*Resistencia a la penetración a 12 golpes.*



*Nota.* En la figura se aprecia el comportamiento de la resistencia a la penetración correspondiente al ensayo de 12 golpes, donde las mezclas con 4% de cal viva y adición de 2% y 6% de aceite reciclado presentan los valores más elevados de resistencia. Este resultado indica que dichas combinaciones favorecen una mejor reacción entre los componentes cementantes y las partículas del suelo, incrementando la cohesión interna. En contraste, dosis mayores de aceite tienden a reducir la capacidad portante, evidenciando una pérdida gradual de rigidez estructural en la muestra.

#### **5.1.7. Relación de soporte de california**

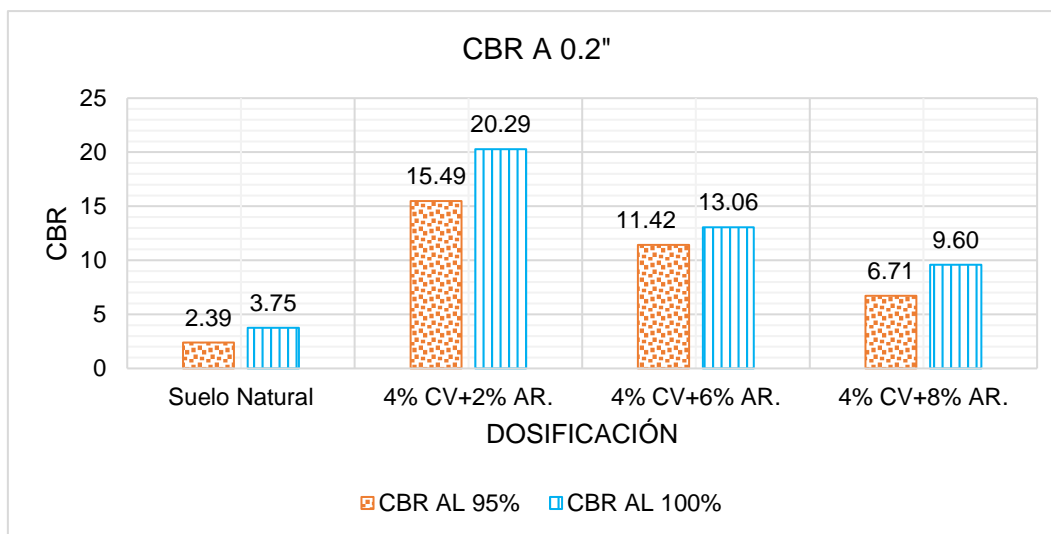
A continuación, se muestra un cotejo del CBR de la muestra natural y las muestras con adición de cal viva y aceite reciclado.

**Figura 16.***Relación de soporte a 0.1".*

*Nota.* En la figura, se visualiza una comparativa del suelo natural la cual tiene valores muy bajos de CBR con 1.52% al 95% y 2.88 al 100% al 0.1" por tanto la capacidad de carga en estado natural es baja. La adición del 4% de CV más 2% de AR incrementa la capacidad de carga, llegando a tener un CBR de 13.15% al 95% y 15.81% al 100% de compactación a 0.1". La adición de 4% de CV más 6% y 8% de AR aún se encuentra por encima del CBR del suelo natural con incremento de hasta 3 veces mayor a la muestra patrón.

**Figura 17.**

*Relación de soporte de california a 0.2"*



*Nota.* En la figura, se visualiza una comparativa del suelo natural la cual tiene valores muy bajos de CBR con 2.39% al 95% y 3.75% al 100% al 0.1" por tanto la capacidad de carga en estado natural es baja. La adición del 4% de CV más 2% de AR incrementa la capacidad de carga, llegando a tener un CBR de 15.49% al 95% y 20.39% al 100% de compactación a 0.2". La adición de 4% de CV más 6% y 8% de AR aún se encuentra por encima del CBR del suelo natural con un incremento de +4.32%.

## 5.2. Discusión de resultados

### 5.2.1. *Objetivos General*

Con el propósito de analizar la influencia de la incorporación de 4 % de cal viva y de 2 %, 6 % y 8 % de aceite reciclado en el Índice CBR de la subrasante correspondiente al tramo AP-104, Km 47+500 – 48+700, Talavera – Pucaccasa, se obtuvieron resultados que reflejan una mejora significativa en la capacidad portante del suelo. En particular, la adición conjunta de 4 % de cal viva y 2 % de aceite reciclado produjo un incremento del 11.63 % en el CBR, evaluado al 95 % del grado de compactación, evidenciando la eficacia del tratamiento estabilizador aplicado. También, la combinación de 4% de cal viva con 6% de aceite reciclado produjo un incremento del 7.09% en las mismas condiciones. Así mismo

al analizar el CBR al 100% de compactación a una profundidad de 0.1", se observó un aumento del 12.93% al emplear 4%CV más 2%AR, y un incremento del 7.56% al usar 4%CV más 6%AR respecto a una penetración de 0.2". En la investigación de Abd-Allah et al. (2021) al añadir cal viva de 9% se obtuvo una mejora en la resistencia del suelo en un 517% con respecto a la muestra patrón. También Shetty et al. (2021) menciona que se ha realizado ensayos con cal y aceite reciclado donde la dosificación de 3%, 4% tiene mayor resultado con CBR de 12.54% a 2.5 mm de profundidad de penetración. Realizando la comparativa de la muestra patrón y las dosificaciones se ha determinado que al adicionar 4%CV más 2%AR se obtuvo CBR de 15.81% a una profundidad de 0.1" y 20.29% a una profundidad de 0.2" con ello se puede mencionar que tiende a influir de manera positiva. De acuerdo a la teoría mencionada por MTC (2013), se siguieron los procedimientos normados, cuyos resultados se reflejan en los datos obtenidos.

### **5.2.2. Objetivo específico 1**

Al analizar el efecto de la incorporación de cal viva y aceite reciclado en la densidad seca máxima del suelo correspondiente al tramo AP-104, Km 47+500 – 48+700, Talavera – Pucaccasa, se evidenciaron variaciones moderadas en los resultados obtenidos. La muestra natural registró una densidad seca máxima de 1.916 g/cm<sup>3</sup> con una humedad óptima de 10.67 %. En contraste, al adicionar 4 % de cal viva y 2 % de aceite reciclado, la densidad seca máxima aumentó a 1.945 g/cm<sup>3</sup>, reduciéndose la humedad óptima a 8.50 %. Por otro lado, al incorporar 4 % de cal viva y 8 % de aceite reciclado, se observó una ligera disminución de la densidad seca máxima, alcanzando 1.899 g/cm<sup>3</sup> con una humedad óptima de 6.63 %.

De acuerdo con los resultados obtenidos por Villanueva (2022), la adición de 4 % de aceite reciclado incrementa la densidad seca máxima en 4.82 %, lo que evidencia su alta eficiencia. Asimismo, Jalanaco (2021) reportó que la incorporación de 3.5 % de aceite reciclado permitió alcanzar una densidad seca máxima de 2.086 g/cm<sup>3</sup>. Al comparar la muestra natural con las tratadas, se determinó que la combinación de 4 % de cal viva y 2 % de aceite reciclado presenta el mejor comportamiento en términos de densificación.

Estos resultados son coherentes con los fundamentos establecidos por la INV (2021) y la norma ASTM D2937-71, las cuales son aplicables para la determinación de la densidad seca máxima en suelos estabilizados con aditivos.

### **5.2.3. Objetivo específico 2**

Con el objetivo de evaluar la influencia de la incorporación de cal viva y aceite reciclado en el índice de plasticidad de la carretera AP-104 Km 47+500 - 48+700 Talavera – Pucaccasa, se identificó una variación significativa del índice de plasticidad. La muestra natural presenta un índice de plasticidad de 10.99%. al incorporar una dosificación de 4% de cal viva y 2% de aceite reciclado, el índice de plasticidad se redujo a 8.66%, lo que representa una disminución de -2.33% con respecto a la muestra en condición natural. La disminución más significativa se obtuvo con la combinación de 4% de cal viva y 6% de aceite reciclado, alcanzando un índice de plasticidad de 6.40%, equivalente a una disminución del -4.59% comparación a la muestra sin tratamiento. Según Delgado & Guerra (2020), el uso de aceite sulfonado y cal disminuye la IP de acuerdo al incremento del porcentaje de cal, llegando a obtenerse un IP 0 con dosificación de 8% de cal. con la combinación de 5% de cal viva y 6% de aceite sulfonado se logró obtener un IP de 0%. Con base en los ensayos realizado, se deduce que, al mantener constante la proporción de cal viva en 4% e incrementar progresivamente el contenido de aceite reciclado, el IP disminuye de forma gradual, siendo más notorio al añadir 6% de aceite reciclado. Finalmente, de acuerdo con los lineamientos establecidos por el Ministerio de Transportes y Comunicaciones MTC (2014), y conforme se estipula en las normas ASTM D-422 y D-1241, utilizadas para los ensayos de límites de Atterberg, menciona que si la IP es mayor al LL se considera como suelo no plastico.

### **5.2.4. Objetivo específico 3**

Con el propósito de evaluar la influencia de la incorporación de cal viva y aceite reciclado en la resistencia a la penetración del suelo, correspondiente al tramo de la carretera AP-104, Km 47+500 – 48+700, Talavera – Pucaccasa, se analizaron los resultados obtenidos en los ensayos de penetración. Los datos evidencian que la mayor

capacidad de soporte se alcanzó con la mezcla que contiene 4 % de cal viva y 2 % de aceite reciclado, alcanzando una resistencia máxima de 1009.00 kg. En comparación, las combinaciones de 4 % de cal viva con 6 % y 8 % de aceite reciclado mostraron resistencias de 771.00 kg y 550.00 kg, respectivamente. Se observó que el incremento en el contenido de aceite reciclado reduce gradualmente la resistencia a la penetración. La muestra patrón, por su parte, registró la menor capacidad de carga, con un valor de 180.00 kg.

Asimismo, los ensayos efectuados bajo distintos niveles de compactación (12, 25 y 56 golpes) confirmaron que la dosificación de 4 % de cal viva y 2 % de aceite reciclado mantiene la mayor resistencia, superando de forma significativa al resto de combinaciones evaluadas. Resultados similares fueron reportados por Shetty et al. (2021), quienes al aplicar 2 % de cal y 3 % de aceite reciclado obtuvieron una resistencia de 250.00 kg, mientras que con 3 % de cal y 4 % de aceite reciclado se alcanzó 355.00 kg, y con 4 % de cal y 5 % de aceite reciclado, 251.00 kg. Dicho estudio concluye que la dosificación más eficiente corresponde a 3 % de cal viva y 2 % de aceite reciclado. Por consiguiente, al contrastar los resultados de la presente investigación con los de la muestra natural y las distintas combinaciones, se determina que la mezcla con 4 % de cal viva y 2 % de aceite reciclado ofrece la mayor resistencia a la penetración, consolidándose como la alternativa más óptima para la mejora del suelo.

### **5.3. Prueba de hipótesis**

#### **5.3.1. Prueba hipótesis general**

##### **Análisis de varianza para Relación de Soporte de California**

Se verificó mediante la prueba de ANOVA para ello se tiene la siguiente regla.

Hipótesis nula (H<sub>0</sub>): se acepta por que no existe Varianza entre los datos.

Hipótesis alternativa (H<sub>1</sub>): al menos una de la varianza es diferente.

**Tabla 8.**

*Análisis de varianza del soporte de california a través del método ANOVA.*

Origen de las $\Delta$	$\sum$ de cuadrados	$^{\circ}$ de libertad	$X^2$	F	Prob.	F crítico
>grupos<	781.0331	3	260.3444	31.1187	0.0031	6.5914
<grupos>	33.4647	4	8.3662			
Total	814.4977	7				

*Nota.* En la tabla se observa el análisis estadístico por método de ANOVA para la varianza del soporte de california (CBR). Se visualiza que el “valor crítico (6.5914)” asignado el 5% es < que el “valor calculado (31.1187)”, se decide que la suposición nula ( $H_0$ ) es rechazado por que existe variación entre medias de grupo de muestras.

### **Prueba de Tukey**

Así mismo según resultados de Tukey ( $T_{\alpha}$ ) se determinó que no hay variación significativa de las medias que se distribuye de la siguiente manera:

- Muestra patrón es **distinto** al tipo con adición de 4%CV y 2% AR.
- Muestra patrón es **igual** al tipo con adición de 4%CV y 6% AR.
- Muestra patrón es **igual** al tipo con adición de 4%CV y 8% AR.
- La muestra con adición de 4%CV y 2%AR es **distinto** a la muestra con adición de 4%CV y 6%AR.
- La muestra con adición de 4%CV y 2%AR es **distinto** a la muestra con adición de 4%CV y 8%AR.
- La muestra con adición de 4%CV y 6%AR es **igual** a la muestra con adición de 4%CV y 8%AR.

### **Decisión de varianza para el CBR**

Se acepta la suposición alternativa ( $H_1$ ), dado que se ha determinado mediante el ANOVA y Tukey que hay diferencia entre las medias de tratamiento entre muestra patrón y muestra con adición de cal viva y aceite reciclado.

### 5.3.2. Prueba de hipótesis específica 1

#### Análisis de varianza para densidad seca máxima

Se verificó mediante la prueba de ANOVA para ello se tiene lo siguiente.

Hipótesis nula (H0): se acepta la hipótesis nula por que no existe Varianza entre los datos.

Hipótesis alternativa (H1): se rechaza la hipótesis nula, existe Varianza entre datos.

**Tabla 9.**

*Análisis de varianza para la densidad seca máxima a través del método de ANOVA*

Origen de las $\Delta$	$\sum$ de cuadrados	$^{\circ}$ de libertad	$X^2$	F	Prob.	F crítico
>grupos<	0.001518	3	0.00050	0.0598	0.9794	4.0661
<grupos>	0.067591	8	0.00844			
Total	0.069109	11				

*Nota.* En la tabla se muestra el análisis estadístico por método de ANOVA para la varianza de la densidad seca máxima. Se visualiza que el “valor crítico (4.0661)” asignado el 5% es > que el “valor calculado (0.0598)”, se decide que la hipótesis nula (H0) es aceptado por que no existe variación entre grupo de muestras.

#### Prueba de Tukey

Así mismo según resultados de Tukey ( $T\alpha$ ) se determinó que no hay variación significativa de las medias que se distribuye de la siguiente manera:

- Muestra patrón es **igual** al tipo con adición de 4%CV y 2% AR
- También es **igual** al tipo con adición de 4%CV y 6% AR
- También es **igual** al tipo con adición de 4%CV y 2% AR
- También es **igual** al tipo con adición de 4%CV y 2% AR.

#### Decisión de varianza para la densidad seca máxima

Se acepta la hipótesis nula (H0), dado que se ha determinado mediante el ANOVA y Tukey que no hay diferencia entre las medias de tratamiento entre muestra patrón y muestra con adición de cal viva y aceite reciclado.

### 5.3.3. Prueba de hipótesis específica 2

#### Análisis de varianza para índice de plasticidad

Se verificó mediante la prueba de ANOVA para ello se tiene la siguiente regla.

Hipótesis nula (H0): se acepta por que no existe Varianza entre los datos.

Hipótesis alternativa (H1): al menos una de la varianza es diferente.

**Tabla 10.**

*Análisis de Varianza para el índice de plasticidad por el método de ANOVA*

Origen de las $\Delta$	$\sum$ de cuadrados	° de libertad	$X^2$	F	Prob.	F crítico
>grupos<	41.1060	3	13.7020	0.0788	0.9697	4.0662
<grupos>	1391.911	8	173.9889			
Total	1433.017	11				

*Nota.* En la tabla se muestra el análisis estadístico por método de ANOVA para la varianza del índice de plasticidad. Se visualiza que el “valor crítico (4.0662)” asignado el 5% es mayor que el “valor calculado (0.0788)”, se decide que la hipótesis nula (H0) es aceptado por que no existe variación entre grupo de muestras.

#### Prueba de Tukey

Así mismo según resultados de Tukey ( $T\alpha$ ) se determinó que no hay variación significativa de las medias que se distribuye de la siguiente manera:

- Muestra patrón es igual al tipo con adición de 4%CV y 2% AR
- También es igual al tipo con adición de 4%CV y 6% AR
- También mismo es igual al tipo con adición de 4%CV y 2% AR
- También igual al tipo con adición de 4%CV y 2% AR, la media

#### Decisión de varianza para la densidad seca máxima

Se acepta la hipótesis nula ( $H_0$ ), dado que se ha determinado mediante el ANOVA y Tukey que no hay diferencia entre las medias de tratamiento entre muestra patrón y muestra con adición de cal viva y aceite reciclado.

#### 5.3.4. Prueba de hipótesis específica 3

##### Análisis de varianza para ensayo de penetración

Se verificó mediante la prueba de ANOVA, para ello se tiene la siguiente regla.

Hipótesis nula ( $H_0$ ): se acepta por que no existe Varianza entre los datos.

Hipótesis alternativa ( $H_1$ ): al menos una de la varianza es diferente.

**Tabla 11.**

*Análisis de Varianza para el ensayo de penetración por el método de ANOVA*

Origen de las $\Delta$	$\sum$ de cuadrados	° de libertad	$X^2$	F	Prob.	F crítico
>grupos<	1988581.246	3	662860.41 55	6.9054	0.0007	2.8387
<grupos>	3839638.849	40	95990.971 2			
Total	5828220.095	43				

*Nota.* En la tabla se muestra el análisis estadístico por método de ANOVA para la varianza de la profundidad de penetración del pistón en la muestra. Se observa que el valor crítico (2.8387) establecido al nivel de significancia del 5% resulta inferior al valor calculado (6.9054); por lo tanto, se rechaza la hipótesis nula ( $H_0$ ), lo que indica la existencia de diferencias estadísticamente significativas entre las medias de los grupos evaluados.

##### Prueba de Tukey

En cuanto a la prueba de Tukey ( $T\alpha$ ), los resultados evidencian que no todas las comparaciones presentan variaciones significativas, distribuyéndose de la siguiente manera:

- El material de referencia difiere del material tratado con 4% de cal viva (CV) y 2% de aceite reciclado (AR).

- El material de referencia presenta similitud con el tratado con 4%CV y 6%AR.
- El material de referencia también es estadísticamente similar al tratado con 4%CV y 8%AR.
- Los tratamientos con 4%CV y 2%AR, 4%CV y 6%AR, así como 4%CV y 8%AR, no muestran diferencias significativas entre sí.

#### **Decisión de varianza para la densidad seca máxima**

Se confirma la aceptación de la hipótesis alternativa ( $H_1$ ), ya que los resultados obtenidos mediante el análisis de varianza (ANOVA) y la prueba de Tukey evidencian diferencias significativas entre las medias de los tratamientos, particularmente entre el material patrón y aquel modificado con la incorporación de cal viva y aceite reciclado.

## VI. Conclusiones

- En la presente investigación se analizó el efecto de la incorporación de cal viva y aceite reciclado sobre el CBR de la subrasante. Los resultados demostraron mejoras notables en la capacidad de soporte del suelo, destacando que la combinación con 4% de cal viva y 2% de aceite reciclado produjo un incremento significativo respecto al material patrón. En concreto, la diferencia de medias del CBR al 100% de compactación y a una profundidad de 2" fue de 20.29%, lo que confirma que la adición de estos aditivos modifica favorablemente el comportamiento mecánico del suelo.
- En relación con la densidad seca máxima, se evidenció una variación leve frente a la muestra original (1.916 g/cm<sup>3</sup> y 10.67% de humedad óptima). La adición de 4% de cal viva y 2% de aceite reciclado incrementó la densidad a 1.960 g/cm<sup>3</sup>, equivalente a un aumento de 0.044 g/cm<sup>3</sup>, mientras que la humedad óptima disminuyó a 9.74%, es decir, 0.93% menos respecto al patrón. Esto indica que la incorporación de estos materiales mejora la densificación del suelo y reduce la cantidad de agua necesaria para alcanzar su punto óptimo de compactación.
- Asimismo, se identificó una variación en las propiedades de plasticidad del suelo. El análisis de los límites de Atterberg mostró que el índice de plasticidad (IP) del material natural (10.99%) se redujo a 8.66% con la adición de 4% de cal viva y 2% de aceite reciclado. Paralelamente, el límite líquido (LL) aumentó en 5.03%, y el límite plástico (LP) en 7.36%. Cabe destacar que, al incrementar la proporción de aceite reciclado, el IP continúa disminuyendo hasta cierto punto, pero al alcanzar el 8% se observa un ligero incremento. En consecuencia, la mezcla de cal viva y aceite reciclado reduce la plasticidad del suelo, mejorando su estabilidad.
- Por último, el análisis de la resistencia a la penetración en distintos niveles de compactación evidenció un comportamiento superior de las mezclas tratadas frente al suelo patrón. Este último, sometido a 56 golpes, registró resistencias de 0

a 180 kg, mientras que la combinación de 4% de cal viva y 2% de aceite reciclado alcanzó 0 a 1009 kg. Las mezclas con 4%CV+6%AR y 4%CV+8%AR presentaron resistencias de 0 a 771 kg y 0 a 550 kg, respectivamente. Se concluye que todas las formulaciones con aditivos mejoran sustancialmente la resistencia del suelo, siendo las más eficientes las dosificaciones 4%CV+2%AR y 4%CV+6%AR. Sin embargo, al aumentar la cantidad de aceite reciclado, la resistencia tiende a disminuir, por lo que dichas proporciones se consideran las más adecuadas para garantizar un desempeño mecánico óptimo en la subrasante evaluada.

## VII. Recomendaciones

- Se recomienda utilizar una dosificación de 4% de cal viva con 2% y 6% de aceite reciclado, dado que, los resultados obtenidos de dicha combinación proporcionan un valor de CBR significativamente superior en comparación con la muestra patrón.
- Asimismo, se recomienda aplicar estas dosificaciones en suelos con alta exposición o contacto frecuente con agua, debido a su favorable desempeño en condiciones de humedad.
- Por otro lado, se recomienda realizar un control adecuado del comportamiento del índice de plasticidad (IP), dado que se ha determinado que el incremento de contenido de aceite reciclado, en combinación con 4% de cal viva, produce una disminución progresiva del IP. Por tal motivo, se aconseja hacer uso del aceite reciclado en un rango de 2% a 6%, con el fin de mejorar la trabajabilidad y estabilidad del suelo.
- Finalmente, para futuros estudios que esté relacionado con el presente proyecto de investigación, se recomienda realizar ensayos de permeabilidad y ensayos de desgaste por tráfico en muestras con dosificación de 6% de cal viva y 8% de aceite reciclado.

## VIII. Referencias

- Abd-Allah, O. A., Abid, A. S., & Zehawi, R. (23 de junio de 2021). Improvement of soft clay Soil Using Different Types of Additives. *IOPscience*, 856.  
<https://doi.org/doi:10.1088/1755-1315/856/1/012010>
- Alarcon, S. Y. (2021). *Influencia de la cal y cemento para estabilizar suelos arcillosos en vías no pavimentadas del distrito de Uranmarca – Apurímac 2020 [Tesis de Pregrado, Universidad César Vallejo]*. Repositorio Institucional de la Universidad Cesar Vallejo. <https://hdl.handle.net/20.500.12692/98479>
- Alshameri, B. (2023 de Junio de 2020). *Densidad seca máxima de mezclas de arena y caolín predicha mediante uso del contenido fino y la gravedad específica*. Springer nature link: <https://link.springer.com/article/10.1007/s42452-020-03481-9>
- Apaza, M. (2020). *Proyecto de instalación de una planta de producción de cal viva e hidratada en el distrito de Asillo [Tesis de pregrado, Universidad Nacional del Altiplano de Puno]*. Repositorio institucional de la Universidad Nacional del Altiplano, Puno. <https://repositorio.unap.edu.pe/handle/20.500.14082/14031>
- Arias, G. J. (2020). *Técnicas e instrumentos de investigación científica*. Arequipa: Enfoques Consulting EIRL.  
<https://gc.scalahed.com/recursos/files/r161r/w26118w/Tecnicas%20e%20instrumentos.pdf>
- Autotachki. (26 de mayo de 2022). *Densidad del aceite del motor. ¿De qué parámetros depende?* Densidad del aceite del motor. ¿De qué parámetros depende?:  
<https://es.avtotachki.com/plotnost-motornogo-masla-ot-kakih-parametrov-onazavisit/>
- Aziz, M., Naveed, S. F., Usman, Q. M., Murtaza, R. A., & Irfan, M. (24 de mayo de 2021). Experimental Study on Endurance Performance of Lime and Cement - Treated Cohesive Soil. *Scopus*, 53. <https://doi.org/10.1007/s12205-021-2154-7>

- Bakaiyang, L., Madjadoumbaye, J., Boussafir, Y., Szymkiewicz, F., & Duc, M. (15 de Julio de 2021). Re-use in road construction of a Karal-Type Clay-rich soil from North Cameroon after a lime/cement mixed treatment using two different limes. *Elsevier*, 15. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00626>
- Bótia, D. (2015). *Manual de procedimiento de ensayos de suelos y memoria de cálculo [Trabajo de pregrado, Universidad Militar Nueva granada]*. Repositorio Institucional de la Universidad Militar Nueva granada, Bogotá. <https://repository.umng.edu.co/server/api/core/bitstreams/433c4e77-8e73-440d-911f-ef67f23ec10c/content>
- Bowles, J. (1980). *Manual de laboratorio de suelos en ingeniería civil*. McGraw-Hill de Mexico, S.A DE C.V.
- Braja, M. D. (2013). *Fundamento de ingeniería geotécnica*. Cengage Learning.
- Cabrejos, G. J., & Murga, R. J. (2021). *Estabilización de afirmados con residuos de lubricantes vehicular en el camino rural de centro poblado de cambio - Chombote [Tesis de pregrado, Universidad Nacional del Santa]*. Repositorio universitario de la Universidad Nacional del Santa. <http://repositorio.uns.edu.pe/handle/20.500.14278/3659>
- Chacon, Q. C. (20 de Abril de 2020). Calcular Alfa de Cronbach con excel y confiabilidad del instrumento de investigación fácil! Youtube. [https://www.youtube.com/watch?v=wCFpTCSdnWE&ab\\_channel=CharlesLemanChaconQuinto](https://www.youtube.com/watch?v=wCFpTCSdnWE&ab_channel=CharlesLemanChaconQuinto)
- Dagnino, J. (2014). Análisis de varianza. En J. Dagnino, *Revista Chilena de Anestesia* (págs. 306-310). Chile. <https://revistachilenadeanestesia.cl/P11/revchilanestv43n04.07.pdf>
- Das, B. (2010). *Principles of geotechnical engineering*. Seventh. <https://dl.icdst.org/pdfs/files/f26ec24b602af7971800c8c327a3b3bd.pdf>

Delgado, L. I., & Guerra, P. B. (2020). *Análisis comparativo de aceite sulfonado y cal para la estabilización de la sub-rasante en la carretera no pavimentada San Francisco, Tarapoto-2020 [Tesis de pregrado, Universidad César Vallejo]*. Repositorio institucional de la Universidad César Vallejo.

<https://hdl.handle.net/20.500.12692/67008>

Departamento de trabajo de los Estados Unidos. (2021). *Clasificación del Suelo*. La

Transcripción: <https://www.osha.gov/vtools/construction/soil-testing-fnl-spa-web-transcript#:~:text=El%20suelo%20cohesivo%20contiene%20peque%C3%B1as,que%20se%20produzca%20un%20derrumbe.>

EcuRed. (agosto de 16 de 2012). *Granulometría*. EcuRed:

<https://www.ecured.cu/Granulometr%C3%ADa>

Emjuvi. (15 de Diciembre de 2020). *Tamizado de sólidos*. Tamizado de sólidos:

<https://emjuvi.com/blog/p-tamizado-de-solidos-y-tamices>

Enciso, O. C. (2022). *Adición de ceniza de eucalipto para mejorar la estabilidad de la subrasante en la carretera Abancay - Huayllabamba, Apurímac, 2022 [Tesis de pregrado, Universidad Cesar Vallejo]*. Reposito institucional de la Universidad Cesar Vallejo.

<https://hdl.handle.net/20.500.12692/91902>

Energía Nuclear. (24 de Noviembre de 2021). *¿Qué es la densidad? Fórmula, definición y características*. ¿Qué es la densidad? Fórmula, definición y características:

<https://energia-nuclear.net/fisica/propiedades-de-los-materiales/densidad>

Estefanero, P. L., & Arque, C. M. (2021). *Mejoramiento de la resistencia de la base granular con cal, en el pavimento articulado Arequipa [Tesis de pregrado, Universidad Cesar Vallejo]*. Repositorio institucional de la Universidad Cesar Vallejo.

<https://hdl.handle.net/20.500.12692/72475>

Foccal. (10 de agosto de 2022). *que es la cal*. Foccal:

<https://www.foccal.org/sabermas.php>

Fong, S. W., Quiñonez, B. E., & Tejada, T. C. (Diciembre de 2017). Caracterización físico-química de aceites usados de motores para su reciclaje. *Dialnet*, 15(2).

<https://doi.org/http://dx.doi.org/10.15665/rp.v15i2.782>

Gallardo, M. L., & Sánchez, B. R. (18 de julio de 2022). Estabilización de Suelos Arcillosos Aplicando PET al 2%, 4% y 6% en Caminos no Asfaltados. *Scopus*, 13.

<https://doi.org/10.18687/LACCEI2022.1.1.45>

GeopolymerSolutions. (Marzo de 2015). *Estabilización del suelo*. Estabilización del suelo:

<https://www.geopolymertech.com/es/estabilizacion-del-suelo/#:~:text=%C2%BFQu%C3%A9%20es%20la%20estabilizaci%C3%B3n%20del,cumplir%20un%20objetivo%20de%20ingenier%C3%ADa.>

Geotecnia, F. (11 de Diciembre de 2018). *Límites de Atterberg. Definición e interpretación*.

Límites de Atterberg. Definición e interpretación: <https://geotecniafacil.com/limites-de-atterberg/>

Geotecno. (2018). <https://www.cotecno.cl/limites-de-atterberg-determinacion-de-los-limites-de-plastico-liquido-y-encogimiento/>.

<https://www.cotecno.cl/limites-de-atterberg-determinacion-de-los-limites-de-plastico-liquido-y-encogimiento/>:

<https://www.cotecno.cl/limites-de-atterberg-determinacion-de-los-limites-de-plastico-liquido-y-encogimiento/>

Gonzales, J. (14 de Mayo de 2017). *Afirmado de base de una carretera*. Afirmado de

base de una carretera:

[https://www.google.com/search?q=https%3A%2F%2Fsites.google.com%2Fsite%2Fjhaquelingonzales%2Fafirmado-de-base-de-una-carretera&rlz=1C1YTUH\\_esPE1019PE1019&sxsrf=APwXEdfNTugkigzz8soSETglRPIdfn2fuw%3A1684872643269&ei=wx1tZMCMEMGIwbkPoe-JwAI&ved=0ahUKEwiA-pLbn](https://www.google.com/search?q=https%3A%2F%2Fsites.google.com%2Fsite%2Fjhaquelingonzales%2Fafirmado-de-base-de-una-carretera&rlz=1C1YTUH_esPE1019PE1019&sxsrf=APwXEdfNTugkigzz8soSETglRPIdfn2fuw%3A1684872643269&ei=wx1tZMCMEMGIwbkPoe-JwAI&ved=0ahUKEwiA-pLbn)

[Fjhaquelingonzales%2Fafirmado-de-base-de-una-](https://www.google.com/search?q=https%3A%2F%2Fsites.google.com%2Fsite%2Fjhaquelingonzales%2Fafirmado-de-base-de-una-carretera&rlz=1C1YTUH_esPE1019PE1019&sxsrf=APwXEdfNTugkigzz8soSETglRPIdfn2fuw%3A1684872643269&ei=wx1tZMCMEMGIwbkPoe-JwAI&ved=0ahUKEwiA-pLbn)

[carretera&rlz=1C1YTUH\\_esPE1019PE1019&sxsrf=APwXEdfNTugkigzz8soSETgl](https://www.google.com/search?q=https%3A%2F%2Fsites.google.com%2Fsite%2Fjhaquelingonzales%2Fafirmado-de-base-de-una-carretera&rlz=1C1YTUH_esPE1019PE1019&sxsrf=APwXEdfNTugkigzz8soSETglRPIdfn2fuw%3A1684872643269&ei=wx1tZMCMEMGIwbkPoe-JwAI&ved=0ahUKEwiA-pLbn)

[RPIdfn2fuw%3A1684872643269&ei=wx1tZMCMEMGIwbkPoe-](https://www.google.com/search?q=https%3A%2F%2Fsites.google.com%2Fsite%2Fjhaquelingonzales%2Fafirmado-de-base-de-una-carretera&rlz=1C1YTUH_esPE1019PE1019&sxsrf=APwXEdfNTugkigzz8soSETglRPIdfn2fuw%3A1684872643269&ei=wx1tZMCMEMGIwbkPoe-JwAI&ved=0ahUKEwiA-pLbn)

[JwAI&ved=0ahUKEwiA-pLbn](https://www.google.com/search?q=https%3A%2F%2Fsites.google.com%2Fsite%2Fjhaquelingonzales%2Fafirmado-de-base-de-una-carretera&rlz=1C1YTUH_esPE1019PE1019&sxsrf=APwXEdfNTugkigzz8soSETglRPIdfn2fuw%3A1684872643269&ei=wx1tZMCMEMGIwbkPoe-JwAI&ved=0ahUKEwiA-pLbn)

- Gu, K., & Chen, B. (20 de Enero de 2020). Loes stabilization usin cement, waste phosphogypsum, fly ash and quicklime for self - compacting rammed earth construction. *Elsevier*, 231(117195).  
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117195>
- Hernández, S. R. (2014). *Metodología de la investigacion 6ta edición*. Mc Graw Hill Education.
- INV, I. (2021). *Relaciones Humedad - peso unitario seco en los suelos (ensayo normal de Compactación) INV E-141-13*. Bogota.  
[https://www.labicivil.com/Media/pdfs/INV%20E-141-13%20relaciones%20humedad%20%E2%80%93%20peso%20unitario%20seco%20en%20los%20suelos%20\(ensayo%20normal%20de%20compactaci%C3%93n\).pdf](https://www.labicivil.com/Media/pdfs/INV%20E-141-13%20relaciones%20humedad%20%E2%80%93%20peso%20unitario%20seco%20en%20los%20suelos%20(ensayo%20normal%20de%20compactaci%C3%93n).pdf)
- Jalanoca, C. F. (2021). *Mejoramiento de la subrasante incorporando el aceite residual de vehículos motorizados en la carretera Platería Perka, Puno 2021*[Tesis de pregrado, Universidad César Vallejo]. Repositorio universitario de la Universidad César Vallejo. <https://hdl.handle.net/20.500.12692/63844>
- Juares , B. E., & Rico, R. A. (2005). *Mecánica de suelos tomo 1 fundamentos de la mecánica de suelos*. Mexico: Limusa.
- Latam Construction. (16 de noviembre de 2018). *Perú: ¿qué porcentaje de la red vial no está pavimentada?* Perú: ¿qué porcentaje de la red vial no está pavimentada?:  
<https://peruconstruye.net/2018/11/16/peru-que-porcentaje-de-la-red-vial-no-esta-pavimentada/>
- Lopez, J. (14 de agosto de 2019). *Proceso estadístico*. Economipedia:  
<https://economipedia.com/definiciones/proceso-estadistico.html#:~:text=El%20proceso%20estad%C3%ADstico%20es%20el%20c>

onjunto%20de%20etapas,obtener%20unos%20resultados%20fieles%20a%20la%  
20realidad%20estudiada.

Lozada, J. (2014). Investigación Aplicada definicion, propiedad intelectual e industria.

*Dialnet*, 3(1). Dialnet:

<https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6163749#:~:text=La%20investigaci%C3%B3n%20aplicada%20busca%20la,la%20teor%C3%ADa%20y%20el%20p roducto.>

Luis Alberto, C. C., Karen Inés, E. M., & Edwin Ricardo, Á. V. (2022). Efecto de la aplicacion de cáñamo en las propiedades de resistencia y resistividad de una arcilla. *Logos Ciencia & Tecnología*, 14(3), 8-23.

<https://doi.org/https://doi.org/10.22335/rlct.v14i3.1650>

Martinez, C. E. (2019). *Estabilizacion de suelos Cohesivos con aditivos órganosilanos a Nivel de subrante [Tesis de pregrado, Universidad Peruana los Andes]*.

Repositorio institucional de la Universidad Peruana los Andes.

[https://repositorio.upla.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12848/1366/T037\\_42115949\\_T.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repositorio.upla.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12848/1366/T037_42115949_T.pdf?sequence=1&isAllowed=y)

Mata, S. L. (21 de mayo de 2019). *El enfoque cuantitativo de investigación*.

Investigalia.com: <https://investigaliacr.com/investigacion/el-enfoque-cuantitativo-de-investigacion/>

Montuné, J. (2018). Introduccion a la investigación básica. *Hospital Universitario Virgen del Rocío*, 2.

[https://www.researchgate.net/publication/341343398\\_Introduccion\\_a\\_la\\_Investigacion\\_basica](https://www.researchgate.net/publication/341343398_Introduccion_a_la_Investigacion_basica)

Morales, B. A. (2017). *Cal viva, Cal hidratada y caliza. metodos de ensayo para al enalisis fisico [Norma Técnico Ecuatoriana NTE INEM 2589:2011]*. Quito.

- Moreno, G. E. (5 de Diciembre de 2016). *Niveles de investigación*. Metodología de investigación pautas para hacer tesis: <https://tesis-investigacion-cientifica.blogspot.com/2016/12/niveles-de-investigacion-cientifica.html>
- MTC. (2013). *Manual de carreteras especificaciones técnicas generales para construcción EG-2013*.
- MTC. (2016). *Manual de ensayo de materiales*.  
[https://doi.org/https://portal.mtc.gob.pe/transportes/caminos/normas\\_carreteras/documentos/manuales/Manual%20Ensayo%20de%20Materiales.pdf](https://doi.org/https://portal.mtc.gob.pe/transportes/caminos/normas_carreteras/documentos/manuales/Manual%20Ensayo%20de%20Materiales.pdf)
- MTC. (2018). *Manual de carreteras: Diseño geométrico*. Lima: Diario El Peruano.
- MTC, M. (2014). *Manual de Carreteras suelos y Geología, Geotecnia y Pavimentos seccion suelos y pavimentos*. Diario el Peruano.
- Mugira, A. (24 de Octubre de 2018). *¿Qué es la investigación descriptiva?* QuestionPro: <https://www.questionpro.com/blog/es/investigacion-descriptiva/>
- Norma Venezolana. (2002). *Productos químicos para uso industrial, cal viva, cal hidratada en el tratamiento de potabilización de aguas, requisitos y métodos de ensayo*. Fondonorma. <https://faolex.fao.org/docs/pdf/ven192713.pdf>
- Openstax. (14 de febrero de 2022). *Anova de una vía*. Intruducción a la estadística: <https://openstax.org/books/introducci%C3%B3n-estad%C3%ADstica/pages/13-1-anova-de-una-via>
- Ortega, C. (5 de marzo de 2023). *Investigación deductiva: Qué es, ventajas y cómo realizarla*. Investigación deductiva: Qué es, ventajas y cómo realizarla: <https://www.questionpro.com/blog/es/investigacion-deductiva/>
- Ortega, C. (12 de abril de 2023). *Prueba t: Qué es, ventajas y pasos para realizarla*. Prueba t: Qué es, ventajas y pasos para realizarla: <https://www.questionpro.com/blog/es/prueba-t-de-student/>

Piqueras, Y. V. (31 de marzo de 2023). *dosifacion*. el blog de Victor Yepes:

<https://victoryepes.blogs.upv.es/tag/dosificacion/>

Pitra. (2017). *Tratamiento superficiales como alternativas en rutas de lastre*. Costa Rica:

LanammeUCR.

<https://www.lanamme.ucr.ac.cr/repositorio/handle/50625112500/866>.

Polanco, M. J., & Cascón, S. J. (1996). Conceptos y dosificación de hormigones R.C.C.

*Ciencia y técnica de la ingeniería civil*, 24.

<https://repositorio.unican.es/xmlui/bitstream/handle/10902/2041/Concepto+dosificaci%F3n+hormigones.pdf;jsessionid=4C1D88C45BAD2DB6DE7B6FE6FDF51545?sequence=1>

Rubio , R. J., Nascimento, N. C., & Villegas , f. N. (2022). *Manual de prácticas de laboratorio de mecánica de suelos I*. Edunila.

[https://portal.unila.edu.br/editora/livros/copy3\\_of\\_Manual\\_Suelos.pdf](https://portal.unila.edu.br/editora/livros/copy3_of_Manual_Suelos.pdf)

Ruiz, M. L. (22 de Mayo de 2019). *Alfa de Cronbach ( $\alpha$ ): Qué es y cómo se usa en*

*estadística*. Psicogía y mente: <https://psicologiaymente.com/miscelanea/alfa-de-cronbach>

Salazar, R. M., Icaza, G. M., & Alejo, M. C. (2018). La importancia de la ética de la investigación. *Universidad y sociedad*, 10(305-311).

<file:///C:/Users/edison/Downloads/2218-3620-rus-10-01-305.pdf>

Sánchez , F. (29 de diciembre de 2020). *¿Qué es el CBR?* Geotechtips:

<https://www.geotechtips.com/post/que-es-el-cbr>

Shetty, S., Itjono, B., Reddy, V., & Jayaprakash, M. (03 de junio de 2021). Estudio

experimental sobre la estabilización de los suelos lateríticos con aceite de motor usado y cal viva. *Artículo de Investigación*, 12(102-110), 10.

[https://www.researchgate.net/publication/352088602\\_Experimental\\_Study\\_on\\_Latritic\\_Soil\\_Stabilization\\_with\\_Waste\\_Engine\\_Oil\\_and\\_Lime](https://www.researchgate.net/publication/352088602_Experimental_Study_on_Latritic_Soil_Stabilization_with_Waste_Engine_Oil_and_Lime)

- Sonja, H., & Ritter, J. (23 de mayo de 2019). *Mejora del suelo con cal viva: comportamiento a largo plazo*. Taylor & Francis online:  
<https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/14680629.2018.1474793>
- Tanyildizi, M., Uz, V., & Gökalp, I. (2023). Utilización de materiales de desecho en la estabilización de subrasantes de pavimentos expansivos: Una revisión exhaustiva: Una revisión exhaustiva. *ScienceDirect*.  
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.132435>
- Temga, P. J., Balo, M. A., Basga, D. S., Zo'o , Z. P., Abessolo, A. M., Mache, J. R., . . . Dieudonné, B. L. (15 de setiembre de 2018). Lime - and sand - Stabilization of clayey materials from the logone Valley (lake Chad basin) for their utilisation as building materials. *Elsevier*, 19.  
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jobe.2018.06.003>
- Tique, C. A. (2022). *Estabilizacion de suelos incorporando cal y aceite reciclados de vehiculos motorizados en el tramo Collacachi-Inchupalla, Puno 2022 [Tesis de pregrado, Universidad Cesar vallejo]*. Repositorio institucional de la Universidad Cesar vallejo. <https://hdl.handle.net/20.500.12692/97907>
- Torres, I. K., & Vilchez , Y. M. (2022). *Evaluación de Estabilización con Cal Viva y Cemento para Bases con Presencia de Bofedales, Carretera Santa Inés-Plazapata, Huancavelica 2021[Tesis de pregrado, Universidad Peruana Los Andes]*. Repositorio institucional de la Universidad Peruana Los Andes.  
<https://hdl.handle.net/20.500.12848/4957>
- TotalEnergies. (20 de Mayo de 2020). *¿Qué es la viscosidad y grado de aceite? ¿Qué es la viscosidad y grado de aceite?:* <https://totalenergies.pe/blog/aceites/viscosidad>
- UNE-EN-459-1. (Julio de 2016). *Wuolah*. (Aenor, Ed.) Cales para la construcción:  
<https://wuolah.com/apuntes/materiales-i-quimica-y-geologia-de-los-materiales/une-459-1-pdf->

11943938?utm\_source=wuolah&utm\_medium=referral&utm\_campaign=file-openfile

- UTEA, U. A. (2020). *Reglamento del comite de ética de investigacion V0.4*. Universidad Tecnologica de los Andes Abancay.
- Vara, H. A. (2012). *Desde la idea hasta la sustentación: 7 pasos para una tesis existosa*. Lima.
- Vázquez, Z. J., & Marin , G. C. (2020). *Efecto de la cal como estabilizante de una subrasante de suelo arcilloso en carreteras no pavimentadas en selva baja. aplicación carretera ex petroleros, Loreto*[Tesis de pregrado, Universidad Científica del Perú]. Repositorio Institucional de la Universidad Científica del Perú. <http://repositorio.ucp.edu.pe/handle/UCP/1178>
- Velásquez, a. (14 de septiembre de 2018). *Recolección de datos ¿cuál es el mejor método para hacerlo?* Questionpro: <https://www.questionpro.com/blog/es/recoleccion-de-datos/>
- Velázquez, A. (septiembre de 27 de 2018). *Investigación experimental: Qué es, tipos y cómo realizarla*. Questionpro: <https://www.questionpro.com/blog/es/investigacion-experimental/>
- Villanueva, S. D. (2022). *La adición del aceite residual automotriz mejora la estabilización de subrasante de la carretera afirmada Dv. Chirinos – Chirinos, Cajamarca, 2021*[Tesis de Maestria, Universidad Ricardo Palma]. Repositorio institucional. <https://hdl.handle.net/20.500.14138/5572>
- Seed, H. B., Woodward, R. T., & Lundgren, R. (1963b). Prediction of Swelling Potential for Compacted Clays. Transactions of the American Society of Civil Engineers, 128(1), 1443-1477. <https://doi.org/10.1061/taceat.0008724>.
- Pooni, J., Gravina, R. J., Robert, D., Setunge, S., & O'Donnell, B. (2019). Durability of enzyme stabilized expansive soil in road pavements subjected to moisture

degradation. *Transportation geotechnics*, 21, 100255.

<https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2019.100255>.

Los anexos, panel fotográfico y otros documentos están resguardados en la oficina de repositorio digital institucional en la Biblioteca Central de la Universidad Tecnológica de los Andes