

**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE LOS ANDES**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA**  
**ESCUELA PROFESIONAL: DE INGENIERÍA CIVIL**



**Tesis**

**Efecto de la incorporación de plástico reciclado PET y cal en el valor del CBR  
empleando material de cantera para afirmado, Abancay - Apurímac - 2023**

Asesor:

Msc. Maldonado Mendivil Ángel

Autor:

Flores Sanchez Victor Raul

Para optar el Título Profesional de:

Ingeniero Civil

Abancay – Apurímac – Perú

2024



# Universidad Tecnológica de los Andes

Transformando vidas

## ACTA DE EXAMEN DE TITULACIÓN N°038-2024-EPIC-FI- UTEA- SA

Reunidos el Jurado Evaluador constituido por los señores Docentes de la Escuela Profesional de Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería de la Universidad Tecnológica de los Andes:

- |                                    |              |
|------------------------------------|--------------|
| > Dr. Wilfredo SOTO PALOMINO       | PRESIDENTE   |
| > Ing. Holguer CAYO BACA           | DICTAMINANTE |
| > Ph.D. Abbon Alex VÁSQUEZ RAMÍREZ | REPLICANTE   |

y el (la) postulante al TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO (a) CIVIL,  
Bachiller: **FLORES SANCHEZ, Victor Raul** con código de matrícula N°201010698-D.


Ha cumplido con las exigencias del Reglamento General de Grados Académicos y Títulos de la Universidad Tecnológica de los Andes, aprobado mediante resolución del Vicerrectorado Académico N°002-2024-UTEA-VRAC, de fecha 23 de enero del año 2024, respecto a la sustentación de tesis, para optar al título profesional de Ingeniero Civil.

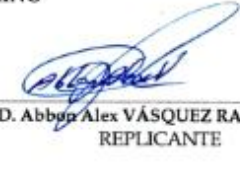
SUSTENTACIÓN DE TESIS titulado: "*Efecto de la incorporación de plástico reciclado PET y cal en el valor del CBR empleando material de cantera para afirmado, Abancay-Apurímac-2023*", habiendo aprobado con la nota de doce (12).

Se expide, la presente conforme al Libro de Actas de Sustentación de Tesis, consignado en los folios N° 290.

Abancay, 20 de noviembre 2024.

  
Dr. Wilfredo SOTO PALOMINO  
PRESIDENTE

  
Ing. Holguer CAYO BACA  
DICTAMINANTE

  
Ph.D. Abbon Alex VÁSQUEZ RAMÍREZ  
REPLICANTE

# Efecto de la incorporación de plástico reciclado PET y cal en el valor del CBR empleando material de cantera para afirmado, Abancay-Apurímac-2023

## INFORME DE ORIGINALIDAD

<b>19%</b>	<b>19%</b>	<b>2%</b>	<b>9%</b>
INDICE DE SIMILITUD	FUENTES DE INTERNET	PUBLICACIONES	TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

## FUENTES PRIMARIAS

<b>1</b>	<b>hdl.handle.net</b> Fuente de Internet	<b>5%</b>
<b>2</b>	<b>repositorio.utea.edu.pe</b> Fuente de Internet	<b>5%</b>
<b>3</b>	<b>Submitted to Universidad Tecnológica de los Andes</b> Trabajo del estudiante	<b>3%</b>
<b>4</b>	<b>Submitted to Universidad Cesar Vallejo</b> Trabajo del estudiante	<b>1%</b>
<b>5</b>	<b>repositorio.upn.edu.pe</b> Fuente de Internet	<b>1%</b>
<b>6</b>	<b>repositorio.ucv.edu.pe</b> Fuente de Internet	<b>1%</b>
<b>7</b>	<b>repositorio.upla.edu.pe</b> Fuente de Internet	<b>&lt;1%</b>
<b>8</b>	<b>www.scribd.com</b> Fuente de Internet	<b>&lt;1%</b>

## Metadatos Complementarios

<b>Datos del Autor</b>		
Apellidos y Nombres	:	Flores Sanchez Victor Raul
Tipo de Documento de Identidad	:	Documento Nacional de Identidad (DNI)
Numero de Documento de Identidad	:	72848564
URL ORCID	:	<a href="https://orcid.org/0009-0003-8057-541X">https://orcid.org/0009-0003-8057-541X</a>
<b>Datos del Asesor</b>		
Apellidos y Nombres	:	Msc. Maldonado Mendivil Ángel
Tipo de Documento de Identidad	:	Documento Nacional de Identidad (DNI)
Numero de Documento de Identidad	:	06788424
URL ORCID	:	<a href="https://orcid.org/0000-0001-9002-1910">https://orcid.org/0000-0001-9002-1910</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	:	Setiembre 2023 – Agosto 2024
Fuente de financiamiento	:	Autofinanciado
Porcentaje de similitud	:	19%
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 Dios por darme vida, salud y a mi familia. A mis padres: **Ulises y Marisela**, por todo el esfuerzo y sacrificio que realizaron para formarme y educarme, los cuales me dieron el ímpetu de humildad, superación y sacrificio. A mi hermana: **Sherly Tatiana**, quien me dio la fortaleza, deseo de lograr los objetivos, las metas y esas ganas de triunfo en la vida.

## **Agradecimiento**

A Dios por guiarme y darme la fortaleza de seguir adelante. Agradezco a mis padres y familiares por su constante apoyo emocional. Agradezco a mi asesor de tesis Msc. Ángel Maldonado Mendivil, así como a mis amigos, por su valiosa orientación, respaldo emocional.

## Resumen

El objetivo principal de esta tesis fue analizar los atributos físicos y mecánicos del material granular destinado al afirmado proveniente de la cantera de Condebamba, al incorporar plástico reciclado PET y cal, con el fin de determinar su idoneidad como capa de rodadura afirmada en una carretera.

El propósito fundamental de esta tesis es evaluar si la incorporación de plástico reciclado PET y cal con el objetivo de mejorar el valor del CBR del material granular empleado en afirmado de la cantera de Condebamba. Mediante una investigación aplicada, con un diseño experimental realizando pruebas estandarizadas. Para llevar a cabo el estudio, se realizó todos los ensayos que conlleva para la caracterización de la cantera de Condebamba, eligiendo el material de distintos puntos de dicha cantera obteniendo así un resultado patrón. Seguidamente se examinó el material en el laboratorio según las normas ASTM Y MTC (EM – 2016); Análisis granulométrico, límites de consistencia, abrasión los ángeles, equivalente de arena, proctor modificado, california Bearing ratio (CBR), se consideraron cinco niveles de incorporación de plástico reciclado PET y cal específicamente: 1%, 2%, 3%, 4%, 5%, al material granular destinado al afirmado de la cantera de Condebamba.

Demostrando que la incorporación de plástico reciclado PET y cal al material granular de cantera para afirmado mejora el valor del CBR, reduce la densidad seca máxima, aumenta de forma positiva el contenido de humedad optima. La proporción optima al material granular destinado al afirmado de la cantera de Condebamba es de 3% PET + 3% cal.

**Palabras claves:** CBR, densidad seca máxima, contenido de humedad optimo.

## **Abstract**

The main objective of this research was to analyze the physical and mechanical attributes of the paving material from the Condebamba quarry, by incorporating recycled plastic, PET and lime, in order to determine its suitability as a firm tread layer on a road.

The main purpose of this thesis is to evaluate whether the incorporation of recycled plastic, PET and lime with the aim of improving the CBR value of the granular material used in the Condebamba quarry. An applied research approach was chosen, with an experimental design which are referenced in standardized tests. To carry out the study, all the tests involved for the characterization of the Condebamba quarry are carried out, choosing the material from different points of the quarry, thus obtaining a standard result. Next, the material was examined in the laboratory according to ASTM and MTC standards (EM – 2016); Granulometric analysis, consistency limits, abrasion Los Angeles, sand equivalent, modified proctor, California Bearing ratio (CBR), five levels of incorporation of recycled plastic PET and lime specifically were considered: 1%, 2%, 3%, 4%, 5%, to the granular material for affirmation of the Condebamba quarry.

Demonstrating that the incorporation of recycled PET plastic and lime to the granulated quarry material for affirmation improves the value of CBR, reduces the maximum dry density, positively increases the optimal moisture content. The optimal proportion to the granular material for affirmation from the Condebamba quarry is 3% PET + 3% lime.

**Keywords:** CBR, maximum dry density, optimal moisture content.



## 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 Complementarios</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>xii</b>
<b>Índice de figuras</b> .....	<b>xiv</b>
<b>Índice de anexos</b> .....	<b>xvii</b>
<b>I. Introducción</b> .....	<b>18</b>
<b>II. Planteamiento del Problema</b> .....	<b>20</b>
2.1 Descripción de la realidad problemática.....	20
2.2 Objetivos.....	22
2.2.1 Objetivo General.....	22
2.2.2 Objetivos Específicos.....	23
2.3 Justificación e importancia .....	23
2.4 Hipótesis .....	24

2.5 Variables .....	25
<b>III. Marco Teórico.....</b>	<b>29</b>
3.1 Antecedentes.....	29
3.2 Bases Teóricas .....	36
3.2.1 Tereftalato de polietileno (PET) .....	36
3.2.2 Cal (Oxido de calcio).....	41
3.2.3 Afirmado.....	44
3.2.4 Ensayos de Laboratorio.....	55
3.3 Definición de términos .....	94
<b>IV. Metodología.....</b>	<b>97</b>
4.1 Tipo y nivel de investigación.....	97
4.2 Ámbito temporal y espacial .....	97
4.3 Población, muestra.....	98
4.4 Instrumentos .....	99
4.5 Procedimientos .....	101
4.6 Análisis de datos.....	102
4.7 Consideraciones éticas.....	106
<b>V. Resultados y discusión.....</b>	<b>107</b>
5.1 Resultados.....	107
5.1.1 Ubicación de la cantera y muestreo de los agregados.....	107
5.1.2 Propiedades físicas.....	110
5.1.3 Propiedades mecánicas .....	116

5.2	Discusión de resultados .....	125
5.2.1	Cálculo de la región crítica .....	127
5.2.2	Hipótesis específica 1 .....	128
5.2.3	Hipótesis específica 2 .....	131
5.2.4	Hipótesis específica 3 .....	134
<b>VI.</b>	<b>Conclusiones.....</b>	<b>139</b>
<b>VII.</b>	<b>Recomendaciones.....</b>	<b>142</b>
<b>VIII.</b>	<b>Referencias .....</b>	<b>143</b>
<b>IX.</b>	<b>Anexos.....</b>	<b>149</b>

## Índice de tablas

<b>Tabla 1</b>	Matriz de operacionalización de variables .....	26
<b>Tabla 2</b>	Serie de tamices de malla cuadrada .....	56
<b>Tabla 3</b>	Factor K para el Límite Líquido .....	65
<b>Tabla 4</b>	Estimados de precisión para Límite Plástico .....	67
<b>Tabla 5</b>	Clasificación de suelos según su Índice de Grupo .....	71
<b>Tabla 6</b>	Condiciones para ensayo de Proctor Modificado .....	85
<b>Tabla 7</b>	Características de la muestra .....	92
<b>Tabla 8</b>	Formato de resultados de ensayos a realizar. ....	100
<b>Tabla 9</b>	Resultados del análisis granulométrico de la cantera Condebamba. ....	111
<b>Tabla 10</b>	Contenido de material en porcentajes de la cantera de Condebamba. ....	112
<b>Tabla 11</b>	Límites de atterberg de la cantera de Condebamba. ....	113
<b>Tabla 12</b>	Clasificación de suelos SUCS Y AASHTO. ....	113
<b>Tabla 13</b>	Contenido de humedad. ....	114
<b>Tabla 14</b>	Equivalente de arena. ....	115
<b>Tabla 15</b>	Abrasión los ángeles. ....	115
<b>Tabla 16</b>	Proctor modificado muestra natural. ....	116
<b>Tabla 17</b>	Resultados de CBR muestra natural. ....	117
<b>Tabla 18</b>	Resumen de resultados de la cantera de Condebamba. ....	118
<b>Tabla 19</b>	Porcentajes empleados de cantera natural + PET + cal. ....	119
<b>Tabla 20</b>	Resultados de proctor modificado material de cantera + PET + cal. ....	120
<b>Tabla 21</b>	Resultados de CBR de la incorporación de PET + cal + afirmado. ....	123

<b>Tabla 22</b>	Resumen de resultados de incorporación de PET + cal + afirmado. ....	125
<b>Tabla 23</b>	Resultados de hipótesis específica 1 Afirmado + PET + cal. ....	130
<b>Tabla 24</b>	Resultado de la hipótesis específica 2 afirmado + PET + cal. ....	133
<b>Tabla 25</b>	Resultados de la hipótesis 3 afirmado + PET + cal. ....	136
<b>Tabla 26</b>	Resumen de decisiones tomadas para las pruebas de hipótesis. ....	138

## Índice de figuras

<b>Figura 1</b>	Representación gráfica del tratamiento y reciclaje del PET .....	39
<b>Figura 2</b>	Porcentaje que pasa por el tipo de afirmado .....	47
<b>Figura 3</b>	Diagrama para la identificación del tipo .....	51
<b>Figura 4</b>	Diagrama de proceso de selección del Tipo de Estabilización.....	52
<b>Figura 5</b>	Ensayo de granulometría.....	57
<b>Figura 6</b>	Formato de granulometría por tamizado .....	59
<b>Figura 7</b>	Ensayo de Límite Líquido .....	63
<b>Figura 8</b>	Gráfico para el ensayo de Límite Líquido .....	65
<b>Figura 9</b>	Equipos y materiales para el ensayo de Limite Plástico.....	68
<b>Figura 10</b>	Tabla del sistema de clasificación AASHTO .....	72
<b>Figura 11</b>	Sistema de clasificación SUCS de suelos de grano grueso .....	74
<b>Figura 12</b>	Carta de plasticidad Casagrande .....	75
<b>Figura 13</b>	Sistema de clasificación SUCS de suelos de grano fino.....	76
<b>Figura 14</b>	Gradación de la muestra de ensayo .....	77
<b>Figura 15</b>	Ensayo de Abrasión los Ángeles.....	78
<b>Figura 16</b>	Ensayo de Equivalente de Arena.....	81
<b>Figura 17</b>	Relación de unidades de penetración. ....	91
<b>Figura 18</b>	Table de datos de la distribución “t” Student.....	104
<b>Figura 19</b>	Diagrama bilateral de la distribución “t” Student. ....	105
<b>Figura 20</b>	Ubicación de la cantera de Condebamba. ....	107
<b>Figura 21</b>	Cantera Condebamba. ....	108

<b>Figura 22</b>	Muestreo de la cantera Condebamba. ....	109
<b>Figura 23</b>	Ensayo de análisis granulométrico de la cantera Condebamba. ....	110
<b>Figura 24</b>	Curva granulométrica de la cantera Condebamba. ....	111
<b>Figura 25</b>	Ensayo de Límites de Atterberg. ....	112
<b>Figura 26</b>	Ensayo de Equivalente de Arena. ....	114
<b>Figura 27</b>	Ensayo de Abrasión los Ángeles. ....	115
<b>Figura 28</b>	Ensayo de Proctor Modificado. ....	116
<b>Figura 29</b>	Ensayo de relación de soporte california (CBR). ....	117
<b>Figura 30</b>	Incorporación al material granular para afirmado + PET + cal. ....	119
<b>Figura 31</b>	Ensayo proctor modificado cantera Condebamba + PET + cal. ....	120
<b>Figura 32</b>	Resultados de la densidad máxima seca de la incorporación de PET y cal al material granular para afirmado. ....	121
<b>Figura 33</b>	Ensayo de CBR cantera Condebamba + PET + cal. ....	122
<b>Figura 34</b>	Ensayo de CBR cantera Condebamba + PET + cal. ....	122
<b>Figura 35</b>	Resultados de CBR, incorporación de PET + cal al material granular para afirmado. ....	123
<b>Figura 36</b>	Evaluación del valor de CBR, incorporación de PET + cal al material granular para afirmado. ....	124
<b>Figura 37</b>	Diagrama de la región crítica y la región de la investigación. ....	128
<b>Figura 38</b>	Diagrama de los estadísticos de la hipótesis específica 1 muestra con incorporación de PET y cal. ....	131

<b>Figura 39</b> Diagrama de los estadísticos de la hipótesis específica 2 muestra con incorporación de PET y cal. ....	134
<b>Figura 40</b> Diagrama de los estadísticos de la hipótesis específica 3 muestra con incorporación de PET y cal. ....	137



## Índice de anexos

<b>Anexo 1</b> Matriz de consistencia .....	150
<b>Anexo 2</b> Matriz de operacionalización de variables .....	151
<b>Anexo 3</b> Instrumentos de recolección .....	152
<b>Anexo 4</b> Resultados de laboratorio, base de datos .....	161
<b>Anexo 5</b> Juicio de expertos .....	187
<b>Anexo 6</b> Avance de la tesis con evidencias fotográficas.....	192
<b>Anexo 7</b> Certificados de calibración .....	196

## **I. Introducción**

En estos tiempos el desarrollo de la población con lleva la urgencia de buscar lugares o zonas donde vivir o habitar lo que conlleva al planteamiento y la construcción de carreteras. Estos tipos de infraestructuras viales son fundamentales para afianzar la accesibilidad y conexión entre los diferentes centros poblados y servicios básicos, facilitando el intercambio económico, la comunicación y otros aspectos esenciales para el desarrollo de las comunidades.

Para la creación del estrato o carpeta de rodadura del material granular destinado al afirmado, es esencial utilizar materiales de canteras que cumplan con condiciones óptimas. La calidad de estos materiales tiene un impacto directo en el rendimiento de la capa o carpeta de rodadura. Sin embargo, en muchas ocasiones, estos materiales no satisfacen los estándares mínimos requeridos para su uso en la estructuración de la capa de rodadura. Por esta razón, se proponen diversas alternativas de solución, las cuales variarán según el proyecto y la disponibilidad de los materiales granulares necesarios para el afirmado.

Es así que, se propone para esta tesis utilizar plástico reciclado PET y cal (óxido de calcio), incorporándolos en diversas cantidades al material granular destinado al afirmado proveniente de la cantera de Condebamba. Es así que se buscó evaluar los efectos que estas adiciones tienen sobre el valor del CBR, la densidad seca máxima y el contenido de humedad óptima. Al emplear plástico reciclado triturado PET, se encuentra una excelente forma de reutilizar este tipo de materiales que, en muchas ocasiones, son desechados o depositados en botaderos y otros lugares de nuestro entorno, fomentando así la contaminación ambiental. Por lo tanto, la reutilización de estos materiales es una de las mejores formas de aprovecharlos de manera sostenible.

Por lo que este estudio se divide en cuatro capítulos. El Capítulo I se dedica a la formulación del problema, se expone la situación problemática, junto con la justificación del estudio, sus objetivos, así como su delimitación y las limitaciones que enfrenta. En el Capítulo II se presenta el marco teórico, que abarca los antecedentes de la investigación a nivel internacional, nacional, regional y local. Este capítulo también establece la base teórica y el marco conceptual de las teorías científicas que respaldan la investigación. El Capítulo III describe la metodología empleada en el estudio, que incluye la formulación de la hipótesis, el método adoptado, el tipo de investigación, el nivel y diseño del estudio, así como la población y muestra seleccionadas. También se detallan los procedimientos de muestreo, las técnicas e instrumentos utilizados, las consideraciones éticas involucradas y los métodos estadísticos aplicados. Además, se presenta un cuadro de operacionalización de variables. Finalmente, EL Capítulo IV se enfoca en los resultados obtenidos y su análisis, donde se valida la hipótesis para llegar a conclusiones y recomendaciones. Al final del documento, se incluyen anexos que contienen la matriz de consistencia, herramientas específicas para la recolección de datos en experimentos científicos realizados, evaluaciones de expertos y evidencias recopiladas a través de paneles fotográficos.

## **II. Planteamiento del Problema**

### **2.1 Descripción de la realidad problemática**

#### **Descripción**

Desde los inicios de las primeras civilizaciones humanas sobre las fas de la tierra, los residuos o basura generados a raíz de las actividades del ser humano han representado un problema que ha ido en aumento a través del tiempo, debido a estas consecuencias se presentan enfermedades, contaminación ambiental y las condiciones de vida cada vez van empeorando. Debido a estos antecedentes en la actualidad en varios países a nivel mundial, Se consideró que el plástico es un insumo que contribuye a la degradación del medio ambiente, es por eso que se opta por el reciclaje dándole uso a estos residuos empleándolos como aditivo en la generación de nuevas alternativas para el mejoramiento en la infraestructura de las vías terrestres a nivel mundial.

En Abancay en sus periferias como son los sectores de Aymas, Marcahuasi, Moyocorral, Quitasol, etc. Cuentan con carretas de bajo volumen de tránsito no pavimentadas, Estas son sometidas a un mantenimiento regular utilizando material granular destinado al afirmado proveniente de la cantera de Condebamba, donde que se ha podido apreciar que el tiempo de vida de dicha carpeta de rodadura afirmada no cumplen ni el año de uso, y ya están presentado fallas o patologías en la carpeta de rodadura como son: encalaminado, baches, agrietamientos, desmoronamiento, piel de cocodrilo, etc.

A pesar de que las obras de ingeniería ofrecen importantes beneficios a la sociedad, la falta de controles o estudios previos sobre el posible impacto ambiental puede resultar en más problemas que ventajas. Por esta razón, en la actualidad se busca incorporar nuevos materiales y técnicas que sean más respetuosos con el medio ambiente, o en su defecto, se intenta reutilizar recursos para reducir los efectos negativos asociados a su uso.

En la actualidad países asiáticos como la India y Filipinas, países de Centro América como Puerto Rico, vienen utilizando el Plástico reciclado PET como aditivo en pavimentos flexibles y carreteras afirmadas.

### **Formulación del problema de investigación**

En América actualmente la reutilización de plástico reciclado PET es escasa, donde que algunos países como México, Estados Unidos, Colombia, Puerto Rico están usando este tipo de material; dándole uso principalmente en carreteras asfaltadas, por lo que se viene aprovechando en bajos volúmenes este tipo de insumo en la construcción de vías pavimentadas.

El plástico es uno de los insumos industriales más contaminantes en el medio ambiente que puede existir, es por eso que mediante el reciclaje. Se puede dar uso a este tipo de residuos incorporándolos como aditivo para generar una mejor capacidad de soporte de los suelos que contengan agregados finos como limos y arcillas, donde también estos ausentes las gravas.

En la edificación de infraestructuras viales, es importante considerar, que para realizar dicha construcción de una vía afirmada se debe realizar los estudios físico mecánicos y así minimizar en todo lo posible las actividades de movimientos de tierras, ya que este tipo de actividad tiene consecuencias ambientales, técnicas y económicas. Siguiendo con dichas recomendaciones se podrá optar por la mejor opción, sea de mejor o realizar el cambio del afirmado de baja capacidad de soporte, y así poder evitar el movimiento de tierras innecesarias. Por lo que se plantea como una alternativa esta tesis, que es potenciar el material granular destinado al afirmado mediante la adición de plástico reciclado triturado (PET) y cal.

Sin antes dejar de mencionar, al usar material de desecho es decir restos contaminantes para el medio ambiente, estaremos contribuyendo a la eliminación de la

contaminación ambiental, De esta manera, en esta tesis se busca aportar una trascendencia adicional a las botellas de plástico reciclado triturado (PET) a través de su uso adecuado como aditivo junto con cal, y mejorar los atributos físicos-mecánicos del suelo utilizado como material de afirmado.

### **Problema General**

- ¿Cuál es el efecto del material granular para afirmado al incorporar plástico reciclado PET y cal en el valor del CBR de la cantera de Condebamba en la ciudad de Abancay?

### **Problemas Específicos**

- ¿Cuál es el efecto del material granular para afirmado al incorporar plástico reciclado PET y cal en el valor del CBR de la cantera de Condebamba en la ciudad de Abancay?
- ¿Cuál es el efecto del material granular para afirmado al incorporar plástico reciclado PET y cal en el valor de la densidad seca máxima – proctor modificado de la cantera de Condebamba en la ciudad de Abancay?
- ¿Cuál es el efecto del material granular para afirmado al incorporar plástico reciclado PET y cal en el valor del contenido de humedad de la cantera de Condebamba en la ciudad de Abancay?

## **2.2 Objetivos**

### **2.2.1 Objetivo General**

- Evaluar el efecto del material granular para afirmado al incorporar plástico reciclado PET y cal en el valor del CBR de la cantera de Condebamba en la ciudad de Abancay.

### **2.2.2 Objetivos Específicos**

- Analizar el efecto del material granular para afirmado al incorporar plástico reciclado PET y cal en el valor del CBR de la cantera de Condebamba.
- Analizar el efecto del material granular para afirmado al incorporar plástico reciclado PET y cal en el valor de la densidad seca máxima – proctor modificado de la cantera de Condebamba.
- Analizar el efecto del material granular para afirmado al incorporar plástico reciclado PET y cal en el valor del contenido de humedad de la cantera de Condebamba.

### **2.3 Justificación e importancia**

La vigente tesis busca contribuir a la ingeniería y el mejoramiento del medio ambiente mediante el aprovechamiento de residuos plásticos reciclados, si no se da un uso apropiado a este material, se genera un impacto ambiental, ya que termina siendo depositado en los vertederos informales de la ciudad.

La innovación de la vigente tesis es los residuos plásticos reciclados PET (tereftalato de polietileno) el cual es una alternativa innovadora de realizar el reciclamiento y reaprovechamiento de materiales que tienen todavía un valor, dado que una gran cantidad de estos residuos plásticos se eliminan en los depósitos de eliminación de basura de dicha ciudad, produciendo así el deterioro de superficies verdes. Al adoptar esta posibilidad de uso de residuos plásticos, hacemos que la construcción sea una industria respetuosa con el medio ambiente, generando el menor impacto posible. Esta solución es viable técnica, económica y ambientalmente.

La vigente tesis busca aportar información que sea útil mediante la incorporación de plástico reciclado PET y Cal en material granular destinado al afirmado de cantera, que pueda sustituir a otros materiales que tengan plasticidad alta, mala gradación, baja

capacidad de soporte, alta expansión, etc. Es por eso que se busca mejorar los atributos físicos – mecánicas hasta alcanzar valores óptimos.

## **2.4 Hipótesis**

### **Hipótesis general**

- La incorporación del plástico reciclado PET y Cal, influye en el valor de CBR del material granular para afirmado de la cantera de Condebamba en la ciudad de Abancay - 2023.

### **Hipótesis específica**

- **Hipótesis específica 1:** La incorporación de plástico reciclado PET y cal, produce efectos significativos en el valor del CBR del material granular para afirmado de la cantera de Condebamba.
- **Hipótesis específica 2:** La incorporación de plástico reciclado PET y cal, produce efectos significativos en la densidad seca del material granular para afirmado de la cantera de Condebamba.
- **Hipótesis específica 3:** La incorporación de plástico reciclado PET y cal, produce efectos significativos en el contenido de humedad óptima del material granular para afirmado de la cantera de Condebamba.

### **Método**

#### **Método de investigación**

El método científico responde al paradigma positivista y es un método hipotético-deductivo con un enfoque cuantitativo. Es experimental porque se basa en el análisis de eventos inducidos artificialmente en entornos controlados de investigación científica es por eso que de carácter cuantitativo. También es una situación donde implica la alteración deliberada de factores autónomos que influyen resultados con el fin de evaluar su impacto sobre las variables independientes o variables dependientes, Hernández, (2010).



Por lo tanto, la presente tesis tiene enfoque cuantitativo reúne información para validar suposiciones, basándose en mediciones precisas busca descubrir patrones conductuales y verificar postulados teóricos mediante el análisis de datos cuantificables.

### **Diseño de investigación**

Es de tipo experimental, según (Fernández Collado & Baptista Licio, 2010, p. 25) y (Gómez Bastar, 2012, p. 48), donde que el grupo de control se obtendrán de los ensayos de laboratorio del material granular destinado al afirmado, sin la incorporación del tereftalato de polietileno (PET) más cal, es decir el suelo en estado natural; y por otra parte se obtendrá de los ensayos de laboratorio de mecánica de suelos del material granular destinado al afirmado con la incorporación del tereftalato de polietileno (PET) más cal.

## **2.5 Variables**

### **Variable independiente**

Incorporación de plástico reciclado PET y Cal.

### **Variable dependiente**

Proctor modificado, CBR, Contenido de humedad.

**Tabla 1** Matriz de operacionalización de variables

Variable	Definición Conceptual	Dimensiones	Indicadores	Medición	Técnicas e Instrumentos
<b>Independiente</b> (Plástico reciclado triturado – PET)	<b>PET:</b> Tereftalato de polietileno o Polyethylene Terephthalate. Se elabora a partir de un proceso de polimeración de ácido tereftálico y monoetilenglicol. Ecológicos, M. (2019, junio 28). MaterialesEcologicos.es.	Cantidad de PET	Incorporación de PET en un 1%, 2%, 3%, 4% y 5%	Porcentaje	Manual de Ensayos de materiales. Manual de Especificaciones Técnicas Ganarles para construcción, MTC - 2013
<b>Independiente</b> (Oxido de Calcio - Cal)	La cal que se utiliza se compone fundamentalmente de óxido cálcico (cal viva), obtenido por calcinación de materiales calizos, o hidróxido cálcico (cal apagada). (MTC – 2008).	Cantidad de Cal	Incorporación de PET en un 1%, 2%, 3%, 4% y 5%	Porcentaje	MTC-E107 Ensayo de Contenido de H. MTC-E108 Ensayo de Granulometría MTC-E109 Ensayo de Limite Liquido
<b>Independiente</b> Material granular para afirmado	Es la combinación apropiada de piedra, arena y finos o arcillas tamaño máximo de 25 mm. Afirmados con gravas naturales o zarandeadas, afirmados con gravas homogenizadas mediante chancado. (Manual de carreteras; MTC – 2014).	Cantidad de material granular seleccionado	Peso propio de material granular para afirmado.	Kilogramos	MTC-E110 Ensayo de Limite Plástico MTC-E111 Ensayo de Hidrómetro MTC-E115 Ensayo de Proctor MTC-E132 Ensayo de CBR
<b>Dependiente</b> Capacidad de soporte – CBR	El índice CBR evalúa la resistencia de los suelos, midiendo su capacidad de soporte. Esta herramienta, originada en California, es crucial para analizar la firmeza de diferentes capas en la construcción vial, incluyendo sub rasantes, bases y sub bases. Su aplicación es fundamental en la ingeniería geotécnica, civil y diseño de pavimentos. (NTP 339. 029. 2014).	Resistencia del suelo al esfuerzo cortante	CBR 0.1 pulg	Porcentaje	<b>Dependiente</b> Capacidad de soporte – CBR
<b>Dependiente</b> Densidad seca máxima (Proctor modificado)	El objetivo del Proctor modificado es obtener la densidad máxima seca de un suelo y la humedad optima – NTP 339. 141. 2014.	Densidad máxima y Contenido de humedad optima	(%) $gr/cm^3$ - %	Volumen y porcentaje	<b>Dependiente</b> Densidad – Humedad (Proctor modificado)

Nota: Elaboración propia

## **Viabilidad de la Investigación**

La vigente tesis está contemplada de los recursos necesarios como son: el recurso humano, materiales, financiamiento y ensayos de laboratorio que nos permitirán establecer los resultados que se busca alcanzar con esta tesis para su aplicación.

Se pretende realizar una mejora relevante en el incremento del valor del CBR de material granular destinado al afirmado de la cantera de Condebamba por medio de la combinación de plástico reciclado PET y Cal con distintos porcentajes, donde posteriormente sea utilizado en las diversas obras para la mejora de la estabilidad en vías afirmadas de tercera clase con una densidad baja de tránsito de la periferia de la ciudad de Abancay.

Desde la perspectiva financiera, el proyecto es factible porque los costos serán cubiertos por el investigador. Esto se debe a que el plástico PET (Tereftalato de Polietileno) se obtiene a través del reciclaje, la cal está disponible en los comercios de materiales de construcción, y las muestras de áridos para el afirmado proviene de la cantera de Condebamba. Por lo tanto, los gastos asociados a los diversos ensayos de laboratorio son relativamente bajos. La producción de plástico reciclado PET triturado, combinado con cal y el material granular para el afirmado, resulta rentable, lo que lo convierte en una opción la implementación del material mencionado ofrece ventajas financieras significativas para entidades gubernamentales y empresas privadas por igual.

## **Limitaciones de la Investigación**

### **Limitaciones Económicas**

En cuanto a lo económico se dispuso recursos económicos puesto que los ensayos de laboratorio se realizaron en una empresa privada dedicada a este rubro, en cuanto al transporte y trituración de plástico reciclado (PET) se trajo desde la ciudad de Lima, ya que

no se cuenta actualmente con una fábrica recicladora que tenga los equipos o maquinaria necesaria para realizar la trituración de plásticos en general, en la provincia de Abancay.

### **Limitaciones Tecnológicas**

Para el avance de la tesis no se tuvo limitaciones tecnológicas, ya que donde se ejecutarán los ensayos de laboratorio, dispone de los equipos, recursos, infraestructura e instalaciones apropiadas.

### **Limitaciones Conceptuales**

Se halló poca información y publicaciones similares en el espacio local y regional. Por ello, se recurrió a antecedentes en el contexto nacional e internacional, adoptando y adaptando los métodos utilizados por esos investigadores para aplicarlos en el avance de esta tesis.

### **III. Marco Teórico**

#### **3.1 Antecedentes**

##### **En el contexto internacional**

Guerrero, Obando y Trujillo (2024), abordando la investigación titulada “Evaluación del comportamiento de una mezcla asfáltica drenante, con adiciones de pellets de plástico reciclado para implementarse en una carpeta de rodadura”, (tesis de pregrado), ejecutado en San Juan de Pastos – Colombia, El objetivo que más destaco se centró en analizar las características físicas y mecánicas de una mezcla asfáltica drenante con la combinación de pellets de plástico en una carpeta de rodadura. La metodología adopto un enfoque cuantitativo y experimental, utilizando briquetas de mezcla asfáltica con diferentes porcentajes de reemplazo de agregados por pellets de plástico PET (10%, 20%, 30%, 50% y 70%). Caracterizaron los materiales y pruebas de desempeño como resistencia a la disgregación, estabilidad Marshall, permeabilidad y compresión simple. Los resultados mostraron que la combinación de pellets de plástico PET mejoró la permeabilidad de la mezcla, con tiempos de filtración entre 7.77 y 13.86 segundos para las combinaciones modificadas, en comparación con 15.1 segundos de la combinación convencional. Sin embargo, se observó una disminución en el soporte a la disgregación y estabilidad Marshall a medida que aumentaba el porcentaje de reemplazo. Los autores concluyeron que la combinación de pellets de plástico PET en mezclas asfálticas drenantes es viable técnicamente hasta ciertos porcentajes, mejorando la permeabilidad, pero requiriendo un balance con las propiedades mecánicas.

Gavilanes y Portilla (2023), abordando la tesis titulada “Análisis del efecto de la adición de partículas de tereftalato de polietileno (PET) en mezclas asfálticas en frío”, (tesis de pregrado), realizado en Ambato – Ecuador, El objetivo que más destaco fue evaluar cómo la incorporación de PET reciclado afecta los atributos mecánicos de las mezclas

asfálticas en frío. Utilizó un método cuantitativo con un diseño de tipo experimental, utilizando agregados pétreos de una cantera local y diferentes porcentajes de PET (0%, 3%, 6%, 9%, 12% y 15%). Se elaboraron y ensayaron 100 briquetas mediante el método Marshall. Los resultados indicaron que la combinación de PET modificó los atributos de las mezclas, observándose un incremento en la firmeza y la afluencia con porcentajes de hasta 9% de PET. Sin embargo, porcentajes mayores tendieron a disminuir el desempeño. Los investigadores concluyeron que la incorporación de PET en porcentajes moderados puede mejorar ciertas características de las mezclas asfálticas en frío, aunque su efectividad depende del nivel de tráfico previsto, siendo más adecuado para vías de tráfico medio y liviano.

Yaguarshungo y Campoverde (2022), abordando la tesis titulada “Suelo cemento con adición de fibra de plástico y fibra de cáscara de maní en caminos vecinales”, (tesis de pregrado), realizado en Guayaquil – Ecuador, el objetivo que más destaque fue diseñar un suelo utilizando fibra de cáscara de maní, fibra de sorbete reciclado, cemento como estabilizadores para el camino vecinal de la Cooperativa 23 de noviembre cantón Naranjal, el material que emplearon vieron que cantidades de fibra de cáscara de maní, fibra de sorbete reciclado, cemento en la mezcla de suelo, se realizaron las pruebas para determinar los atributos mecánicos de los materiales innovadores a utilizar, se comprobó que estos materiales como el cemento y fibra de cáscara de maní eran aptos y potenciales estabilizadores para el suelo subrasante, realizando el ensayo de peso unitario obtuvieron que el cemento su peso unitario es de  $2.692 \text{ Kg/m}^3$ , mientras que la fibra de cáscara de maní contaba con de  $1.607 \text{ Kg/m}^3$ . con estos datos sacamos los porcentajes de cada mezcla a utilizar para mejorar la plasticidad del suelo plástico expansivo existente. Donde los resultados por medio de ensayos del suelo modificado, se cumplió este objetivo ya que los valores que nos dio los ensayos al material existente natural es una arcilla limosa negra

(nomenclatura Sucs CH y AASHTO A-7-5) con índice de plasticidad del 53%, pasante del tamiz del 200, 96%, densidad máxima del proctor de 1.442 Kg/m<sup>3</sup>, y expansión del 6.8%, y los resultados de un límite líquido (LL) de 33% y un índice de plasticidad (IP) de 7.6%, 1.969 Kg/m<sup>3</sup> en el ensayo de Proctor con una expansión del 2.3%, dando un buen uso a estos materiales desalojados”, y se confirmó que sí se consiguieron los resultados esperados, estando estos dentro de los parámetros que se indicados en las normas del MTOP; en otras palabras, con estos materiales se ha logrado mejorar este estrato.

Andaluz (2022), abordando la investigación titulada “Estudio del efecto de la ceniza de cáscara de arroz en las propiedades físico-mecánicas en suelos finos de subrasante”, (tesis de pregrado), realizado en Ambato – Ecuador, el objetivo que más destaco es la combinación de ceniza de cáscara de arroz afecta los atributos físicos y mecánicos de los suelos finos utilizados como subrasante. La tesis es cuantitativa y de diseño experimental, estudio echo en tres sectores del cantón Puyo. Se ejecutaron ensayos de laboratorio como granulometría, límites de Atterberg, Proctor modificado y CBR, combinado diferentes cantidades de ceniza de cáscara de arroz (0%, 1%, 3%, 5% y 8%). Demostraron que, al aumentar la cantidad de ceniza el valor de CBR se incrementó, mientras que la densidad seca máxima tuvo un declive. Con 8% de ceniza, el CBR aumentó entre 53% y 61% respecto al suelo natural. En conclusión, la ceniza de cáscara de arroz mejora las cualidades mecánicas de los suelos finos de subrasante, permitiendo reducir los espesores de las capas del pavimento flexible.

Celi (2021), abordando la investigación titulada “Estabilización de suelos granulares de subrasante con finos de Tereftalato de Polietileno (PET), Polipropileno (PP) y Polietileno (PE)”, (tesis de pregrado), realizado en Ambato - Ecuador, el objetivo que más destaco fue analizar la capacidad de soporte (CBR) de estos suelos al combinar diferentes cantidades de finos plásticos. La tesis es cuantitativa con diseño experimental.

Se extrajeron muestras de suelo de tres parroquias rurales de Ambato y se realizaron pruebas de laboratorio como (granulometría, límites de Atterberg, Proctor modificado y CBR) con la adición de 0%, 3%, 6%, 9%, 12% y 15% de finos plásticos. Demostraron que la adición de finos plásticos incrementó el CBR de las muestras, alcanzando valores óptimos con porcentajes entre 3.6% y 7.8%. El mayor aumento se observó en la muestra de Montalvo, donde el CBR pasó de 10.4% a 16.3% con 7.8% de finos. El autor concluyó que la combinación de finos plásticos reciclados permite mejorar la capacidad de soporte de suelos granulares utilizados como subrasante, representando una alternativa viable para la consolidación de suelos y el aprovechamiento de residuos plásticos en la construcción de pavimentos.

#### **En el contexto nacional**

Porta (2023), abordando la tesis titulada “Influencia técnica económica y ambiental de la estabilización de suelos arcillosos-vías de Azapampa, mediante desechos poliméricos y cal”, (tesis de maestría), realizado en Huancayo – Perú, el objetivo fue la repercusión técnica, económica y ambiental de consolidar suelos arcillosos con residuos poliméricos y cal en las vías de Azapampa, Huancayo. La tesis es cuantitativa de diseño experimental. Se ejecutaron los ensayos de laboratorio de 4 calicatas como granulometría, límites de Atterberg, Proctor y CBR. De las 4 calicatas, se encontró que la calicata C1 presentaba el suelo más crítico, con 58.3% de material fino (limo-arcilla) y un CBR de 4.5%, la adición de 1.5% de polímero reciclado incrementó el CBR de la muestra C1 de 4.5% a 18.1%, y de la muestra C2 de 5.84% a 19.39%, la combinación de cal y polímero elevó el CBR de la muestra C1 hasta 24.5%, denostando que el uso de polímeros mejoró levemente los atributos mecánicos del suelo, mientras que la cal tuvo un efecto más significativo. Económicamente, el uso de polímeros resultó más favorable que la cal. Ambientalmente, los polímeros tuvieron un impacto positivo al reciclar desechos plásticos. Se confirmó que



la combinación de polímeros y cal es técnicamente muy favorable, aunque económicamente desfavorable, por lo que se recomienda optimizar las dosificaciones para equilibrar costo y beneficio.

Flores y Mayta (2022), abordando la investigación titulada “Mejoramiento de las propiedades físicas y mecánicas incorporando PET y cal en la subrasante de la carretera Unocolla, Puno-2022”, (tesis de pregrado), realizado en Puno – Perú, el objetivo que más destaque fue mejorar los atributos físicos y mecánicos de la subrasante combinado PET y 5% de cal. La tesis es cuantitativa, de tipo aplicada y diseño experimental, con una muestra de 4 calicatas en un rango de 1 km. Se ejecutaron pruebas de laboratorio de mecánica de suelos donde realizaron pruebas de granulometría, límites de consistencia, Proctor modificado y CBR. Demostrando que la adición de 2% de PET y 5% de cal incrementó ligeramente la densidad máxima seca se obtuvo 1.90gr/cm<sup>3</sup> y el CBR al 95% se obtuvo 16.75% y la adición de 2% de PET y 5% de cal incrementó ligeramente la densidad máxima seca se obtuvo 1.90gr/cm<sup>3</sup> y el CBR al 100% se obtuvo 24.52%. Se concluyó que la dosificación óptima de PET para suelos arcillosos estaría entre 3% y 4%, siendo necesario realizar más estudios para determinar la proporción ideal.

Yauli (2022) abordando la tesis titulada “Estabilización con adición de PET triturado en subrasantes de baja calidad en el jr. mantaro, distrito de pichari – cusco, 2021”. (tesis de pregrado), realizado en Lima – Perú, el objetivo que más destaque fue examinar la influencia de la combinación de PET triturado en los atributos de subrasante de baja calidad. La tesis es cuantitativa, diseño experimental y nivel descriptivo-explicativo. Se analizaron muestras de suelo de 3 calicatas, utilizando pruebas de laboratorio como instrumentos. Los resultados demostraron que la combinación de plástico triturado PET redujo el límite líquido del suelo de 35.6% a 29.6% con 10% de PET, en el índice de plasticidad logro reducir de 10.9% a 9.4% con 10% de PET, en el contenido de humedad también disminuyo

de 29.9% a 21.3% con 10 de adición de PET, en el densidad seca máxima aumento de 1.502 gr/cm<sup>3</sup> 1.705 gr/cm<sup>3</sup> con adición de 10% de PET y en cuanto al CBR al 95% de MDS aumento de 2.8% a 6.3% con adición de 10% de PET llegando a un incremento del 125%. Se concluyó que el PET triturado mejora los atributos físicos y mecánicos de la subrasante de baja calidad, siendo la dosificación óptima del 10%, atravesando de una subrasante pobre a regular según la norma CE.010.

Tejada (2022) abordando la tesis titulada “Diseño de una mezcla asfáltica ecológica usando polietileno de tereftalato (PET) reciclado y caucho molido”, (tesis de pregrado), realizado en Lambayeque – Perú, El objetivo que más destaco fue diseñar una mezcla asfáltica ecológica combinando PET reciclado y caucho molido. Se empleó un enfoque cuantitativo con diseño experimental, utilizando el método Marshall para evaluar diferentes proporciones de PET (1%, 1.5%, 2%, 2.5%) y caucho (1%, 1.5%, 2%, 2.5%) en la mezcla asfáltica. Demostrando que la combinación óptima fue 1% de PET y 1% de caucho, obteniendo un 5% de vacíos, 15% de VMA, 65.7% de vacíos llenos de C.A., 0.75 de relación polvo/asfalto, 16 mm de flujo, 10.96 kN de estabilidad y 1794 kg/cm de relación estabilidad/flujo, cumpliendo con los parámetros normativos. Se concluyó que la incorporación de estos materiales reciclados permite obtener una mezcla asfáltica ecológica con propiedades mecánicas adecuadas, representando una alternativa sostenible para la construcción de pavimentos.

Mamani y Caxi (2021) abordando la investigación titulada “Estudio de la influencia del tereftalato de polietileno (PET) y polipropileno (PP) en concretos convencionales para su aplicación en pavimentos rígidos”. (tesis de pregrado), se realizó en Puno – Perú, el objetivo que más destaco fue analizar cómo influye la combinación de PET y PP reciclados en los atributos mecánicos del concreto. Emplearon un enfoque cuantitativo con diseño experimental, utilizando 171 probetas cilíndricas y 171 vigas prismáticas. Demostrando

que la incorporación de 2% de PET y 0.5% de PP respecto al peso de los agregados disminuyó la trabajabilidad en 44.83% para el agregado fino y 42.53% para el grueso. La resistencia a compresión se redujo con mayores porcentajes de adición, mientras que la resistencia a flexión aumentó ligeramente. Concluyeron que el uso de estos polímeros reciclados tiene un lado negativo en la resistencia a compresión, pero positivo en la resistencia a flexión del concreto, siendo viable su aplicación en pavimentos rígidos en porcentajes moderados.

### **En el contexto regional y local**

Cano y Cardenas (2024) abordando la tesis titulada “Análisis comparativo de la influencia en las propiedades índice y mecánicas de un suelo para subrasante añadiendo ceniza del bagazo de la cañaduz en la ruta Canua a Llinqui–Aymaraes–Apurímac, 2021”, (tesis de pregrado), realizado en Apurímac – Perú, el objetivo que más destaque fue determinar cómo influye la combinación de ceniza del bagazo de la cañaduz en los atributos de índice y mecánica de un suelo de subrasante. Emplearon un enfoque cuantitativo con diseño experimental, analizando partes de suelo con adiciones de 5%, 10% y 15% de ceniza. Utilizaron ensayos de límites de Atterberg, proctor modificado y CBR. Demostrando que el índice de plasticidad disminuyó significativamente al agregar 5% de ceniza, la máxima densidad seca se redujo al aumentar el porcentaje de ceniza, y el CBR se incrementó, llegando a un aumento promedio máximo de 522.96% con 10% de ceniza. Concluyeron que la ceniza del bagazo de la cañaduz incide en los atributos índice y mecánicas de los suelos de subrasante estudiados.

Zambrano (2022) abordando la investigación titulada “Análisis comparativo de la capacidad de soporte a nivel de subrasante en suelos arcillosos incorporando ceniza de *Saccharum Officinarum* y activador alcalino en la trocha carrozable Sahuanay – Umaccata Tamburco Abancay 2021”, (tesis de pregrado), realizado en Apurímac – Perú, el objetivo

que más desataco fue analizar comparativamente la capacidad de soporte de la subrasante al combinar ceniza de caña de azúcar y activador alcalino. Empleó un enfoque cuantitativo con diseño experimental, utilizando pruebas de laboratorio como granulometría, límites de Atterberg, Proctor modificado y CBR. La muestra consistió en suelo arcilloso de la trocha carrozable estudiada. Demostrando que la adición de 10% de ceniza y 5% de ceniza con activador alcalino incrementaron el valor del CBR a un 10.37% y 15.5%, superando las exigencias mínimas para subrasante. Se concluyó que la combinación de ceniza y activador alcalino mejoró considerablemente los atributos del suelo arcilloso, incrementando su capacidad de soporte y disminuyendo su plasticidad e índice de expansión.

Guillen y Riveros (2021) abordando la tesis titulada “Efectividad del cloruro de magnesio hexahidratado en la estabilización de la capa de rodadura en la carretera Vecinal Santa Rosa – Santiago – Acobamba, distrito de Chapimarca, provincia de Aymaraes - 2019”, (tesis de pregrado) realizado en Apurímac – Perú, el objetivo que más destaco es la efectividad de combinar cloruro de magnesio hexahidratado para estabilizar la capa de rodadura en una carretera vecinal no pavimentada. Se empleó un enfoque cuantitativo con diseño experimental, ejecutando ensayos de laboratorio en partes de espécimen con diferentes cantidades de cloruro de magnesio. Demostraron que al adicionar 4% de cloruro de magnesio se incrementó el valor de CBR de 39.15% a 40.29%, mejorando las propiedades físicas y mecánicas del suelo. Se concluyó que el cloruro de magnesio es efectivo como estabilizador, optimizando la resistencia y estabilidad de la capa de rodadura en carreteras no pavimentadas.

## **3.2 Bases Teóricas**

### **3.2.1 Tereftalato de polietileno (PET)**

Tiene una historia fascinante que se remonta a los turbulentos días de la Segunda Guerra Mundial. Imagínese, en medio del caos global, un par de investigadores británicos,

Whinfield y Dickson, dando creación a este versátil material en 1941. Su motivación no era solo científica, sino también práctica: el conflicto bélico había interrumpido el suministro de algodón egipcio, fomentando una necesidad urgente de alternativas textiles. El PET empezó a demostrar su valía. A partir de 1946, la industria textil lo acogió con entusiasmo, marcando el inicio de una relación duradera que persiste hasta nuestros días. ¿Qué lo hizo tan atractivo? Su increíble resistencia, longevidad y capacidad para repeler la humedad lo, pero el PET no se conformó con conquistar el mundo de la moda. En 1952, dio un salto audaz al universo del empaquetado alimentario, debutando como un filme protector. Sin embargo, fue en 1976 cuando realmente encontró su vocación: los envases rígidos. Este fue el momento en que el PET se convirtió en el rey indiscutible de las botellas, especialmente para aquellas bebidas que no se llevan bien con el oxígeno. Por lo que es fascinante pensar cómo un material nacido de la necesidad en tiempos de guerra ha llegado a ser tan omnipresente en nuestra vida cotidiana. Desde la ropa que vestimos hasta las botellas que sostenemos, el PET ha dejado una huella indeleble en nuestro mundo moderno, demostrando que a veces, las grandes innovaciones surgen de las circunstancias más inesperadas. (Charles A. Harper, 2003, quinta edición, págs. 654,655).

Propiedades más relevantes del polietileno tereftalato PET:

- Tiene una gran capacidad para resistir el desgaste y la corrosión, ya sea por esfuerzos constantes o momentáneos.
- Biodegradación muy lenta.
- Impermeabilidad.
- Posee una alta transparencia y un nivel de cristalinidad elevado, aunque puede incorporar tintes.
- Ofrece una buena resistencia tanto química como térmica.
- Estabilidad a la intemperie.

- Alto coeficiente de deslizamiento.
- Es un material altamente reciclable y puede ser reutilizado.

El manejo responsable del PET ofrece diversas alternativas, incluyendo procesos manuales, transformaciones químicas y otras técnicas implementadas globalmente. Estas estrategias buscan mitigar el impacto ambiental y reducir la acumulación de residuos en vertederos. En la actualidad, las técnicas de reciclaje más comunes emplean sistemas mecánicos convencionales. Estos procesos implican la fragmentación inicial de los materiales, seguida de un lavado intensivo bajo condiciones de alta presión y temperatura. Este enfoque permite eliminar eficazmente los contaminantes provenientes de otros componentes, logrando así un producto final de calidad. Estas metodologías no solo abordan la problemática de la contaminación, sino que también promueven un uso más eficiente de los recursos, contribuyendo a la sostenibilidad ambiental a largo plazo. (Sherwell, 2014, págs. 21,22)

Uno de los factores que surgieron para esta investigación es la preocupación por mitigar el deterioro ecológico que nos afecta cotidianamente. Este problema ambiental se ve exacerbado cuando los residuos no son gestionados adecuadamente como materiales susceptibles de ser reutilizados. La falta de un manejo apropiado de estos desechos contribuye significativamente al incremento de la polución en nuestro entorno. Por lo tanto, abordar esta cuestión se ha vuelto un imperativo en la presente tesis, buscando alternativas que permitan reducir el impacto negativo de estos materiales en el ecosistema cuando no son sometidos a procesos de reciclaje.

## Figura 1

### Representación gráfica del tratamiento y reciclaje del PET



Nota: Elaboración propia.

#### ✓ **Reciclado de botellas de plástico (PET)**

En el ámbito de la reutilización de envases poliméricos, existe un sistema de identificación específico. Los recipientes fabricados con tereftalato de polietileno, comúnmente conocido por su abreviatura como PET, se distinguen por una marca particular. Es importante mencionar que el reciclado de botellas PET promueven la economía al darles una segunda vida a estos materiales y así reducir la necesidad de producir plástico virgen, contribuyendo a la conservación de las reservas naturales, racionalizar el consumo energético y la disminución de gases que contribuyen al calentamiento global son objetivos primordiales.

#### ✓ **Producción del PET, lavado y secado**

La cadena de producción se inicia con la obtención manual de envases poliméricos de tereftalato de polietileno (PET), los cuales suelen presentar impurezas debido a su método de recolección. Posteriormente, estos recipientes son sometidos a un proceso de fragmentación mecánica, generando pequeños trozos denominados hojuelas de PET. La siguiente etapa implica un lavado exhaustivo utilizando diversos agentes químicos, seguido de un secado al aire libre. Una vez que el material ha sido procesado y está listo para su utilización, este estudio se enfoca en el análisis granulométrico del PET triturado. Este protocolo se ejecuta en un laboratorio especializado en mecánica de suelos, empleando una serie de tamices con aperturas específicas: 12.7 mm (1/2"), 9.5 mm (3/8"), 4.75 mm (Nº 4)

y 0.075 mm (N° 200). La relevancia de esta prueba radica en su aporte para facilitar la realización de pruebas subsecuentes, alcanzar los resultados precisos y confiables. Se presta especial atención a la asignación del tamaño de las porciones de PET, ya que esta característica influye directamente en la resistencia máxima del componente ante esfuerzos. Esta propiedad se cuantifica mediante el índice CBR (California Bearing Ratio), el cual dependerá de las dimensiones de las hojuelas de PET utilizadas.

✓ **Adquisición del plástico reciclado (PET)**

El costo del plástico reciclado PET no es elevado. En promedio el precio por kilogramo de plástico reciclado PET lavado es de s/. 10.00 a s/. 12.00 soles y sin lavar está entre los s/. 7.00 a s/. 8.00 soles por kilogramo.

✓ **Nuestro medio ambiente y el PET**

En la actualidad el envenenamiento del medio ambiente y la alteración climática está más presente que nunca, por lo que el reciclaje es una medida vital para alcanzar una sostenibilidad, y esto solo se puede lograr con la alianza de las autoridades, iniciativa privada y la ciudadanía en su totalidad.

Existen indicadores críticos la fundación Ellen MacArthur en colaboración con la consultora McKinsey, en el año 2016 se produjeron aproximadamente 335 millones de toneladas de plástico a nivel mundial. (Fundación Ellen MacArthur & consultora McKinsey).

El año 2018 la producción mundial de polímeros sintéticos alcanzo una cifra astronómica de 359 millones de toneladas, es decir que, en apenas siete décadas, el ser humano a contaminado con más de 140 millones de toneladas los ecosistemas acuáticos a nivel mundial. El plástico representa el 85% de los desperdicios, advierten que para el año 2040 se triplicaría con un importe anual de 23 y 37 millones de toneladas. (Planelles, M. ediciones El País, 2022).



En el Perú, el plástico representa el 10% de todos los desperdicios y solo el 1.9% del total de residuos plásticos son reciclados a nivel nacional se generan aproximadamente 7'005,576 toneladas de residuos. (Ministerio de Ambiente, 2018).

### **3.2.2 Cal (Óxido de calcio)**

El aglutinante cálcico empleado en este proceso se obtiene mediante la calcinación de rocas calcáreas, resultando en óxido de calcio (conocido como cal viva) o hidróxido de calcio (cal apagada). Estos compuestos se distinguen por su facultad de endurecerse expuesto a la atmosfera se produce interacción, una vez que se han mezclado con agua y han reaccionado con el dióxido de carbono atmosférico, de ahí su denominación como cales aéreas. Al combinar el terreno con este aglutinante cálcico y agua, se desencadena una secuencia de reacciones químicas. En este proceso, los componentes silíceos y aluminosos del suelo interactúan con el aglutinante cálcico en presencia de humedad, generando silicatos y aluminatos de calcio insolubles. Esta interacción modifica atributos físicos del suelo, aumentando su friabilidad y granularidad. Además, se observa un incremento en el límite plástico y en el contenido óptimo de humedad para la compactación. Estas alteraciones únicas en la composición terrestre facilitan significativamente su manipulación y aplicación en obras de construcción. La incorporación de cal al suelo provoca notablemente modificaciones en sus propiedades plásticas, este fenómeno se manifiesta de manera diferente según las características iniciales del suelo, Por ejemplo, suelos  $IP < 15$ , aumenta tanto el LL como el LP y es un poco destacable en el IP; en cambio en los suelos de plasticidad con  $IP > 15$  disminuye el IP. (Manual de Carreteras suelos geología, geotecnia y pavimentos; MTC - 2014)

La National lime Association en resumen los beneficios obtenidos tras el aglutinamiento o mejoramiento con cal, en lo siguiente:

- i. Disminución de la maleabilidad del suelo, con un descenso del límite líquido y un aumento del límite plástico.
- ii. Clara disminución del aglutinante originario del suelo generado por la aglomeración de las porciones.
- iii. Mayor manejabilidad y confiabilidad del material resultante, gracias a la disminución del contenido hídrico en los suelos.
- iv. La cal facilita el secado de suelos húmedos, acelerando así el proceso de compactación.
- v. Significativa atenuación tanto de la energía de contracción como de la energía de expansión.
- vi. Aumento a la fuerza de compresión no confinada de la combinación tras el curado, llegando en algunos casos a incrementos del 40%.
- vii. Incrementa de la capacidad de soporte del suelo (CBR).
- viii. Mejora sustancial en la resistencia tensil del suelo natural.
- ix. Diseño de estratos impermeables para bloquear la penetración pluvial y frenar el ascenso de humedad desde el subsuelo.

En cuanto a las experiencias americanas han evidenciado la eficacia de la estabilización con cal en los siguientes escenarios:

Composiciones que combinan grava y arcilla, destinadas a funcionar como estrato granular superior, se benefician notablemente al incorporar entre un 2% y 4% de hidróxido de calcio en relación a su masa total.

Suelos con alto contenido arcilloso pueden optimizarse usándolos como:

Estrato granular superficial, requiriendo una adición de cal que oscila entre el 5% y 10% del peso del suelo.

Estrato inferior, la cual necesita una cantidad pequeña de cal, que va del 1% al 3% en relación a la masa del suelo.

#### Clases de cal

Es fundamental destacar que contienen diversas cantidades de impurezas, las cuales, si no se eliminan, dan lugar a diferentes tipos de cal. En la construcción es denominada cal aérea cálcica, debido a su reacción cementante.

Es decir, la naturaleza de las cales varía según la caliza de explotación, las calizas más puras proceden de las cales con alto contenido de carbonatado de calcio ( $\text{CaCO}_3$ ), mencionando las aéreas y de las calizas las más arcillosas, cales hidráulicas. Se clasifican según:

#### ✓ **Cal viva**

La obtención de cal viva se realiza mediante el proceso de descomposición térmica de rocas calizas o dolomíticas. Durante este procedimiento, el material libera dióxido de carbono, transformándose en óxido de calcio ( $\text{CaO}$ ). Una característica notable es su reacción exotérmica al combinarse con agua.

#### **Ventajas**

Este material presenta múltiples beneficios:

- **Aspecto económico:** Su abundancia en la naturaleza contribuye a reducir los costos de producción.
- **Eficiencia en almacenamiento:** Requiere menos espacio para su almacenaje.
- **Estabilización de suelos:** Tiene la capacidad de disminuir la expansión del terreno.
- **Rendimiento en condiciones húmedas:** Demuestra un comportamiento óptimo durante periodos lluviosos.
- **Consideración importante**

Es crucial tener en cuenta que el proceso de hidratación de este material demanda una atención especial, lo cual podría considerarse como uno de sus pocos inconvenientes.

✓ **Cal hidratada**

Este tipo de cal hidróxido de calcio, comúnmente mencionada como cal hidratada, es una sustancia pulverizada, cristalina e incoloro. Su producción implica el manejo del óxido de calcio (cal viva) con agua, encuentra aplicación en diversos sectores industriales.

**Usos y aplicaciones**

La cal hidratada se aplica en la elaboración de:

- Mezclas de construcción
- Revestimientos
- Aglomerantes
- Recubrimientos
- Artículos de goma resistente
- Productos petroquímicos
- Además, se utiliza para elevar el nivel de pH en terrenos ácidos, un procedimiento conocido como estabilización del suelo.

**Características y consideraciones**

**Ventaja principal:** Demuestra una eficacia superior en suelos con bajo contenido de humedad.

**Desventajas:** El transporte resulta más costoso debido a su mayor peso por unidad de volumen. Su aplicación requiere rapidez y condiciones de viento mínimas para una dosificación adecuada.

**3.2.3 Afirmado**

La capa de afirmado se compone de una mezcla compactada que incorpora tres categorías de materiales: elementos pétreos, partículas arenosas y componentes finos o

arcillosos. La efectividad de esta capa depende de una adecuada proporción de estos tres elementos.

✓ **Composición y variabilidad**

La selección de materiales para el afirmado está condicionada por factores regionales y la disponibilidad de fuentes de agregados, ya sean de origen fluvial o de canteras terrestres. Dependerá según su función:

- a) Superficie de rodadura en infraestructuras viales no pavimentadas.
- b) Estrato granular inferior.
- c) Capa protectora contra la contaminación.

✓ **Características determinantes**

La granulometría máxima de los especímenes de suelo y la proporción de estrato fino o arcilloso son parámetros cruciales que definen la aplicación específica del afirmado. La presencia de componentes arcillosos es un requisito indispensable en la construcción de infraestructuras viales afirmadas.

✓ **Importancia de la mezcla**

Una combinación inadecuada de los tres tipos de materiales mencionados resultará en un afirmado de calidad inferior, comprometiendo su desempeño y durabilidad. (MTC, Manual de carreteras, 2014).

La guía oficial para proyectar caminos rurales sin asfaltar con escaso flujo vehicular establece criterios específicos, nos indican los tipos de afirmados según las alineaciones, pendientes y dimensiones:

**a) Afirmado tipo 1:**

Sedimentos sueltos rocas fragmentadas por erosión seleccionadas mediante un proceso de cribado constituyen la base de este tipo de afirmado. Estos materiales se caracterizan por presentar un índice de plasticidad que no supera el valor de 9, este afirmado

se emplea principalmente en vías con bajo volumen de tránsito, específicamente en las categorías T0 y T1, donde el Índice Medio Diario (IMD) proyectado no excede los 50 vehículos por jornada, el grosor de la capa se determina según las directrices establecidas en el manual de diseño para carreteras no pavimentadas con bajo flujo vehicular. Este documento proporciona los parámetros necesarios para una correcta implementación, en circunstancias excepcionales, se permite elevar el límite de plasticidad hasta 12. Sin embargo, esta modificación requiere una justificación técnica rigurosa previa a su implementación, la correcta selección y aplicación de este tipo de afirmado es crucial para garantizar la durabilidad y funcionalidad de las vías de bajo tránsito, adaptándose a las condiciones específicas de cada proyecto.

**b) Afirmado tipo 2:**

Este tipo de afirmado se compone de elementos granulares de origen natural o gravas cuidadosamente seleccionadas mediante un proceso de tamizado. La característica principal de estos materiales es su índice de plasticidad, que generalmente no supera el valor de 9, este afirmado está diseñado para su uso en vías con un volumen de tráfico moderadamente bajo, específicamente en la categoría T2. Estas carreteras se caracterizan por tener un Índice Medio Diario (IMD) proyectado que oscila entre 51 y 100 vehículos por día, en situaciones particulares, existe la posibilidad de aumentar el límite de plasticidad hasta 12. Sin embargo, se requiere una fundamentación técnica sólida antes de su implementación, la selección adecuada de este tipo de afirmado es clave para garantizar la perdurabilidad y el desempeño óptimo de las infraestructuras en esta categoría de tráfico. Su correcta aplicación contribuye significativamente a la calidad y longevidad de la infraestructura vial en zonas con flujo vehicular moderado.

### c) Afirmado tipo 3:

Este tipo de afirmado se constituye a partir de elementos granulares de origen natural o gravas cuidadosamente seleccionadas mediante un proceso de cribado. Una característica fundamental de estos materiales es su índice de plasticidad, que por norma general no excede el valor de 9, este afirmado está concebido para su implementación en vías con un volumen de tráfico moderado, concretamente en la categoría T3. Estas carreteras se distinguen por presentar un Índice Medio Diario (IMD) que fluctúa entre 101 y 200 vehículos en un período de 24 horas, bajo circunstancias particulares, se puede elevar el umbral de plasticidad hasta 12. No obstante, esta modificación no es discrecional y requiere una justificación técnica rigurosa previa a su adopción, la elección apropiada de este tipo de afirmado resulta crucial para asegurar la longevidad y el desempeño óptimo de las vías en esta categoría de tráfico. Su correcta aplicación contribuye de manera significativa a la calidad y durabilidad de la infraestructura vial en zonas con un flujo vehicular considerable pero no intenso.

### Figura 2

Porcentaje que pasa por el tipo de afirmado

PORCENTAJE QUE PASA DEL TAMIZ	TRÁFICO T0 y T1:	TRÁFICO T2:	TRÁFICO T3:
	TIPO 1 IMD < 50 VEH.	TIPO 2 51 - 100 VEH.	TIPO 3 101 - 200 VEH.
50 mm (2")	100	100	
37.5 mm (1 ½")		95 - 100	100
25 mm (1")	50 - 80	75 - 95	90 - 100
19 mm (¾")			65 - 100
12.5 mm (½")			
9.5 mm (3/8")		40 - 75	45 - 80
4.75 mm (Nº 4)	20 - 50	30 - 60	30 - 65
2.36 mm (Nº 8)			
2.00 mm (Nº 10)		20 - 45	22 - 52
4.25 um (Nº 40)		15 - 30	15 - 35
75 um (Nº 200)	4 - 12	5 - 15	5 - 20
Índice de plasticidad	4 - 9	4 - 9	4 - 9

Nota: Manual para el diseño de carreteras de bajo volumen de tránsito, 2018.

Principales requisitos de calidad a lo que tiene que someterse:

- Desgaste los ángeles: 50% máx. (MTC E 207)
- Limite liquido: 35% máx. (MTC E 110)
- Índice de plasticidad: 4 - 9% (MTC E 111)
- CBR: 40% min. (MTC E 132)

Para el dimensionamiento de espesores, se realiza mediante una ecuación específica originalmente desarrollada por NAASRA y actualmente utilizada por AUSTRROADS esta fórmula establece la resistencia del suelo medida por el (CBR) y se determina de acuerdo a los ejes equivalentes EE, la capacidad de soporte al peso actuante sobre el afirmado:

**Ecuación 1** Cálculo de espesor de afirmado

$$e = [219 - 211 \times (\log_{10} \text{CBR}) + 58 \times (\log_{10} \text{CBR})^2] \times \log_{10} (\text{Nrep}/120)$$

Donde:

e = espesor de la capa de afirmado en mm.

CBR = valor del CBR de la subrasante.

Nrep = número de repeticiones de EE para el carril de diseño.

✓ **Criterios geotécnicos para establecer la estabilización de suelos**

Los estratos inferiores de la estructura vial requieren suelos cuyo índice de resistencia, medido mediante el ensayo CBR, sea igual o superior al 6%. En caso de encontrarse terrenos con valores de CBR por debajo de este umbral, lo cual indicaría una base poco resistente, si se detectan áreas con exceso de humedad o zonas de baja consistencia, se hace necesario realizar un análisis específico para determinar los métodos más apropiados de mejoramiento y mejora de terreno compactado.



- La modificación de las cualidades del suelo mediante procesos físicos, que pueden incluir la sustitución completa del material existente en la base.
- El perfeccionamiento de las particularidades del suelo mediante la incorporación de sustancias o componentes específicos diseñados para este fin.
- La optimización del terreno utilizando materiales sintéticos especializados para ingeniería civil, como fibras textiles o mallas poliméricas, así como la aplicación de capas granulares, estructuras de piedra, aumento del peralte de la superficie de rodadura.

En la capa subrasante si es arcillosa o limosa, existe el riesgo de que, al saturarse, sus partículas migren hacia los estratos superiores granulares de la estructura vial, comprometiendo su integridad. Para prevenir este fenómeno, es recomendable implementar una barrera protectora. Esta puede consistir en una capa de material selecto con un grosor no inferior a 10 centímetros, o alternativamente, en la instalación de una membrana geotextil. La elección entre estas opciones dependerá del análisis y recomendación del profesional en ingeniería a cargo del proyecto, quien deberá fundamentar técnicamente su decisión.

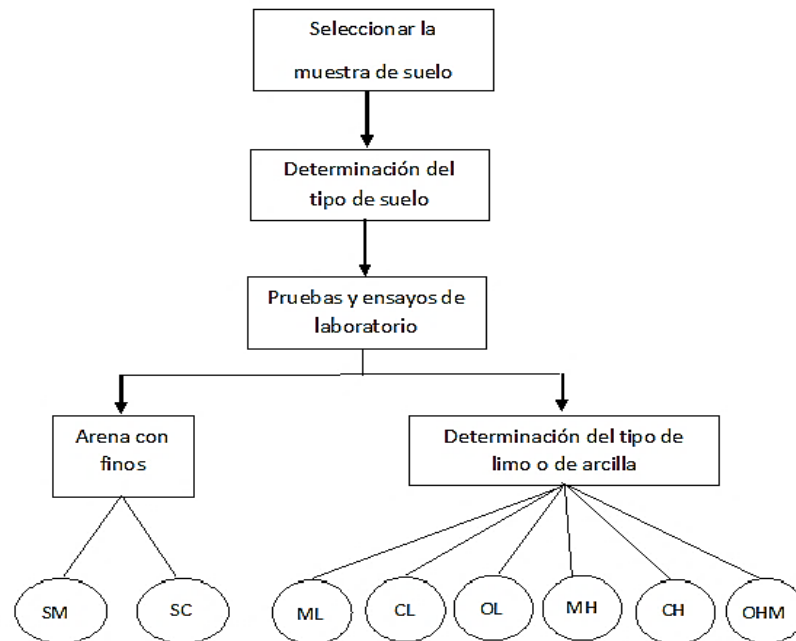
La distancia vertical entre el nivel freático y el plano superior del estrato de cimentación vial debe mantenerse según criterios específicos basados en la calidad del terreno. En suelos de muy alta calidad considerados excepcionales, se requiere una separación mínima de 0.60m. En el caso de terrenos considerados de buena o mediana calidad, esta distancia debe aumentar a 0.80m. En suelos de baja resistencia al corte se requiere un incremento de separación a 1m. Finalmente, para terrenos catalogados como inadecuados para la función de soporte, se exige una distancia aún mayor, estableciéndose en 1.20m como mínimo.

En regiones mayores los 4,000 metros de altitud, es crucial examinar efectos del frío extremo sobre la superficie terrestre. La susceptibilidad a la congelación está íntimamente ligada a la ubicación de aguas subterráneas y capas terrestres, pero en los primeros 60 centímetros del estrato de cimentación se detectan materiales propensos a congelarse, se deben tomar medidas correctivas. Estas pueden incluir la sustitución del material afectado o la elevación del nivel de la vía mediante la adición de un relleno granular apropiado. Los suelos más vulnerables a la congelación son aquellos con alto contenido de limo o que presentan más del 3% de partículas inferiores a 0.02 milímetros. Una excepción notable son los sedimentos finos homogéneas, que pueden contener hasta un 10% de partículas de este tamaño sin presentar problemas significativos de congelación. Por lo general, se consideran resistentes a este fenómeno los suelos cuya composición incluye menos del 3% de partículas menores a 0.02 milímetros. Por regla general, los suelos que presentan una proporción inferior al 3% de su masa total compuesta por partículas menores a 0.02 milímetros se consideran resistentes a los efectos de la congelación.

Para seleccionar el método más adecuado de mejoramiento del suelo, es fundamental realizar una caracterización precisa del material presente. En el contexto geográfico en cuestión, los tipos de suelo que se encuentran con mayor frecuencia son aquellos con alto contenido de partículas finas, incluyendo los sedimentos limosos, los depósitos arcillosos, y las mezclas arenosas con componentes significativos de limo o arcilla.

**Figura 3**

*Diagrama para la identificación del tipo*



*Nota:* Manual de Carreteras, Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentoa,2014.

La técnica más apropiada para optimizar las propiedades del terreno, se deben evaluar diversos aspectos:

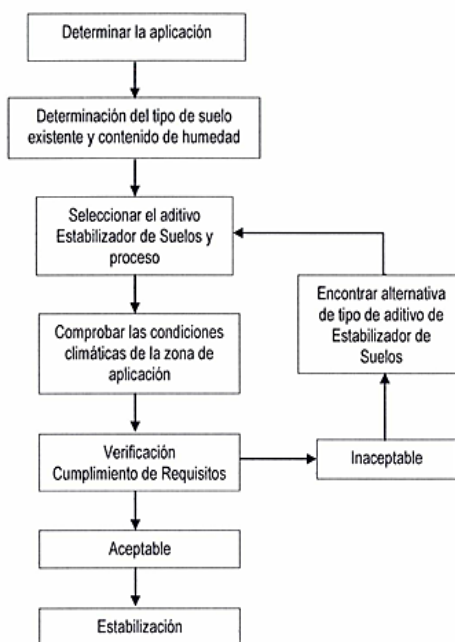
- a. La composición y características del material edáfico que requiere intervención.
- b. El propósito final al que se destinará el suelo una vez modificado.
- c. La naturaleza y propiedades del agente o sustancia que se empleará para alterar el suelo.
- d. El historial y conocimientos previos relacionados con la metodología de mejoramiento a implementar.
- e. La facilidad de obtención del producto o compuesto elegido para la modificación del terreno.

- f. La existencia y accesibilidad de la maquinaria y herramientas necesarias para ejecutar el proceso.
- g. Un análisis comparativo de los aspectos económicos asociados a las diferentes alternativas.

A continuación, mencionaremos el tipo de estabilizador que se pueda seleccionar, el cual pueda satisfacer las características limitantes y aspectos notables de diferentes clasificaciones de suelo.

#### Figura 4

*Diagrama de proceso de selección del Tipo de Estabilización.*



*Nota:* “Manual de Carreteras, Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimento, 2014”.

#### Tipos de estabilización

##### a) Estabilización mecánica

El perfeccionamiento de las características del terreno mediante técnicas mecánicas se fundamenta en la optimización de sus propiedades a través de la reducción de su volumen. Este proceso, conocido como densificación, se logra principalmente mediante procedimientos de compresión controlada. Optimizar las propiedades edáficas mediante

una acción estratégica para mejorar su rendimiento del suelo, transformándolo en un material con mayor resistencia a las fuerzas cortantes y con una proporción de espacios vacíos más favorable, sin alterar fundamentalmente su composición original. Es importante destacar que, al implementar otras estrategias de mejoramiento, es posible complementarlas con el método de compactación, dado que estos procedimientos suelen provocar alteraciones en la estructura interna del suelo. Esta combinación de técnicas puede resultar en una mejora más integral de los atributos del suelo.

La optimización del suelo mediante procesos mecánicos de compresión tiene como principal objetivo la disminución de los espacios no ocupados en la estructura del suelo. Esta técnica resulta en un incremento de la masa por unidad de volumen y una distribución más eficiente de las cargas que actúan sobre el material. Como consecuencia, se obtiene un suelo más compacto, lo que minimiza el riesgo de hundimientos posteriores. Este método de mejoramiento es ampliamente utilizado debido a su aplicabilidad directa en el sitio de la obra. Para su ejecución, se emplean diversos equipos y maquinaria especializada que transmiten fuerzas al suelo a través de diferentes mecanismos, ya sea por aplicación de peso, golpes repetitivos o movimientos oscilatorios.

#### **b) Estabilización física**

Esta modalidad de mejoramiento del suelo busca modificar las propiedades físicas del suelo sin alterar su composición química. Una técnica común dentro de este enfoque es la combinación de diferentes tipos de suelos. Aunque este procedimiento es ampliamente utilizado, generalmente no es suficiente por sí solo para alcanzar los resultados deseados. Para obtener una mejora significativa en las características del terreno, es necesario complementar este método con otras técnicas. En particular, la aplicación de procesos de densificación mecánica se considera un complemento esencial para potenciar la eficacia de la mezcla de suelos y lograr así los objetivos de estabilización propuestos.

Es decir, si tenemos suelos de grano grueso como la grava y arena las cuales tienen un alto grado de fricción y soportan grandes esfuerzos, pero un bajo grado de cohesión por lo que las convierte en inestables al paso de los vehículos.

Las arcillas por otro lado, tienen un alto grado de cohesión y muy poco grado de fricción por lo que son inestables cuando hay mucha humedad.

Entonces al mezclar adecuadamente estos tipos de suelos podemos obtener un material estable donde se puede aprovechar el alto grado de fricción interna de uno y el alto grado de cohesión del otro.

### **c) Estabilización química**

El mejoramiento de terrenos mediante agentes químicos es una técnica que emplea sustancias específicas para alterar las características del suelo, un estabilizador químico se debe mezclar de manera íntima y uniforme con el suelo que se va a tratar y curar, siguiendo las especificaciones técnicas del producto. La finalidad de aplicar un estabilizador químico es dotar al suelo tratado, en un grosor determinado, con propiedades que mejoren su desempeño tanto en la fase de construcción como en la de uso. (Dirección general de caminos y ferrocarriles MTC - 2004).

La estabilización química es una técnica aplicable a diversos tipos de suelos, destinada a mejorar sus características geotécnicas. Este proceso implica modificar las características fisicoquímicas inherentes del suelo se analizan para resolver cuestiones como la variabilidad en su volumen y para mejorar aspectos específicos, tales como la resistencia y la longevidad de los suelos que han sido modificados. (Syed - Zuber et al., 2013).

### 3.2.4 Ensayos de Laboratorio

En esta tesis se empleará un material de afirmado proveniente de la cantera de Condebamba. Este material será sometido a diversas pruebas en laboratorio con el fin de evaluar sus características físicas y mecánicas, así como para determinar su índice CBR. Se llevarán a cabo los ensayos de laboratorio que se detallan a continuación:

- Análisis Granulométrico por tamizado ASTM D - 422, MTC E - 107.
- Contenido de Humedad ASTM D - 2216, MTC E -108.
- Limite Liquido ASTM D – 4318, MTC E – 110.
- Limite Platico ASTM D – 4318, MTC E – 111.
- Clasificación AASHTO.
- Clasificación SUCS ASTM D – 2487.
- Proctor modificado ASTM D – 1557, MTC E – 115.
- California Bearing ratio ASTM D – 1883, MTC E – 132.

#### ✓ **Análisis Granulométricos de suelos por tamizado**

La norma técnica ASTM D – 422, el ensayo busca determinar la distribución granulométrica del suelo. La norma establece un procedimiento para cuantificar el material que atraviesa diferentes tamices, permitiendo así caracterizar la composición de partículas en una muestra de suelo dada. hasta 74 mm (N 200).

**Tabla 2***Serie de tamices de malla cuadrada*

Serie de tamices 01		Serie de tamices 02	
Tamices	Abertura (mm)	Tamices	Abertura (mm)
3"	75.00	3"	75.00
2"	50.80	1 1/2"	38.10
1 1/2"	38.10	3/4"	19.00
1"	25.40	3/8"	9.50
3/4"	19.00	N° 4	4.76
3/8"	9.50	N° 8	2.36
N° 4	4.76	N° 16	1.10
N° 10	2.00	N° 30	0.590
N° 20	0.84	N° 50	0.297
N° 40	0.425	N° 100	0.149
N° 60	0.260	N° 200	0.075
N° 140	0.106		
N° 200	0.075		

*Nota:* Manual de ensayo de materiales, MTC (2016).

**Equipos:**

- Balanza, con aproximación de 0,1g donde que se pesara lo retenido y lo que pasa del material en el tamiz de 4,760 mm (N°4).
- Horno, con capacidad de mantener un temperatura uniforme y constante de  $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$ .
- Tamices, serán seleccionados de acuerdo al formato a utilizar.
- Agitador de tamices, manualmente o mecánica.
- Recipientes adecuados para el proceso de deshidratación y la manipulación apropiada de los especímenes extraídos.



- Instrumentos de cerdas suaves y pinceles, destinados a la remoción de residuos en las superficies perforadas de los dispositivos de cribado.

### Figura 5

#### *Ensayo de granulometría*



*Nota:* Elaboración propia.

#### **Procedimiento del ensayo:**

- El proceso de separación granulométrica puede efectuarse mediante la intervención directa del operador o con el apoyo de dispositivos automatizados. De hacerlo mecánicamente se colocará en una tamizadora mecánica durante un tiempo aproximado de 10 minutos, posteriormente se verificará que no se haya pasado más del 1% del retenido en los tamices. Y de hacerlo manualmente lo realizara con movimientos rotatorios, en forma circular, con la finalidad de que una vez terminado con el proceso no se haya pasado del 1% de la parte retenida en los tamices durante un minuto.
- Para el pasante en el tamiz N°4 (4.75 mm) de abertura debe tener una masa aproximada de 115gr en el caso de materiales predominantemente arenosos, mientras en terrenos arcillosos o limosos requieren manejo especial, se requiere un mínimo de 75gr. Estos valores se consideran los

umbrales inferiores aceptables. Retenida en dicho tamiz N°4 se tendrán que usar los tamices de 3", 2", 1 1/2", 3/4", 3/8" y N°4.

- En cuanto a la porción que no atraviesa el tamiz de N°4 (4.75 mm), se utilizará un instrumento de pesaje electrónico con una precisión de un gramo para determinar su masa. Es importante que la identificación entre este peso y el de la muestra original no exceda el 1% del total inicial, garantizando así la fiabilidad del proceso de separación granulométrica.
- Cuartear el espécimen extraída de las calicatas, de acuerdo al tamaño máximo hasta obtener un peso adecuado.
- Paso siguiente determinar la masa de la muestra y someterla a un proceso de lavado utilizando un tamiz con abertura de N° 200 (75 micrómetros). Posteriormente, se procede a deshidratar el material en un dispositivo de secado térmico, manteniendo una temperatura controlada entre 105 y 115 °C.
- Se elige una serie de dispositivos de cribado con orificios cuadrados, cuyas dimensiones se ajustan a las especificaciones del protocolo de análisis.
- Los tamices se ordenarán según el tamaño de sus aberturas.
- El material a examinar se introduce en el conjunto de tamices previamente ordenados.
- Se procede a sacudir el sistema de cribas de forma manual hasta lograr una distribución óptima de las partículas en las mallas correspondientes.
- Se retira cuidadosamente el contenido de cada tamiz, se determina su masa y se registra el valor obtenido.
- Una vez concluido el proceso de separación, se compara la suma de las masas retenidas en cada tamiz.

**Cálculos:**

- La proporción de material que queda en cada malla, se calculará:

**Ecuación 2** Porcentaje retenido

$$\%retenido = \frac{\text{peso acumulado en el tamiz}}{\text{peso total de la muestra}} \times 100$$

- La proporción de material pasante la malla N° 200, de determinar:

**Ecuación 3** Porcentaje pasante en el tamiz N° 200

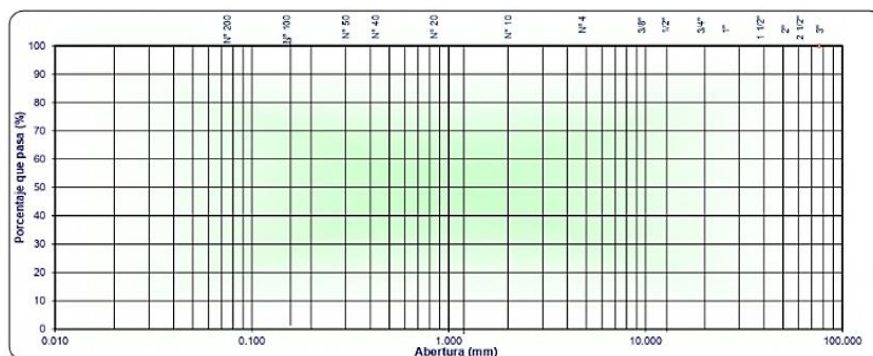
$$\%pasante \text{ la } N^{\circ} 200 = \frac{\text{peso total} - \text{acumulado en el tamiz } N^{\circ} 200}{\text{peso total de la muestra}} \times 100$$

- Porcentaje pasante, se calculará:

**Ecuación 4** Porcentaje pasante

$$\%pasante = 100\% - \text{retenido acumulado} \times 100$$

Posteriormente después de haber obtenido los datos se ingresarán a un formato semilogarítmico, en esta representación gráfica, el eje horizontal muestra las dimensiones de las aberturas, expresadas en milímetros. Por su parte, el eje vertical refleja la proporción acumulada del material que ha atravesado cada uno de estos dispositivos, expresada en términos porcentuales.

**Figura 6***Formato de granulometría por tamizado*

*Nota:* Elaboración propia.

✓ **Contenido de Humedad del suelo**

Según la norma técnica ASTM D-2216, cuyo objetivo es definir el procedimiento analítico para cuantificar la presencia de agua en la muestra de suelo. Se calculará Para el contenido de humedad se usa la siguiente formula:

**Ecuación 5** Contenido de humedad

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

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

$W = \frac{M_w}{M_s} \times 100$	W: se expresa en (%)
----------------------------------	----------------------

Donde:

W = corresponde al contenido de humedad (%).

Mcws = indica el peso del recipiente con suelo húmedo en gr.

Mcs = indica el peso del recipiente con suelo secado en horno, en gr.

Mc = indica el peso del recipiente, en gr.

Mw = indica el peso del agua, en gr.

Ms = indica el peso de las partículas sólidas, en gr.

**Equipos:**

- Balanza, con aproximaciones de 0,01g para muestra menor a 200g y de 0,1 para muestra mayor a 200g.
- Horno de secado dispositivo de deshidratación térmica constante de  $110 \pm 5$  °C.
- Taras o recipientes, resistentes a la corrosión.

**Procedimiento del ensayo:**

- El espécimen de terreno obtenido de las excavaciones de prueba se transfiere inmediatamente a un contenedor de polímero sintético.
- La evaluación del nivel de hidratación del material se inicia sin demora una vez que la muestra llega a las instalaciones de análisis.
- Se anota la masa del recipiente vacío destinado a contener la muestra.
- Se introduce una cantidad apropiada de material en el depósito y se determina su peso total.
- Se anota el peso combinado del contenedor y el terreno sin alteraciones previas.
- La muestra se introduce en el dispositivo de secado térmico.
- Transcurridas aproximadamente 24 horas, se extrae la muestra del equipo de deshidratación y se determina su nueva masa.

**✓ Límites de Atterberg**

Proviene del sueco Albert Mauritz Atterberg es uno de los ensayos más usados, así como el ensayo de granulometría de suelos, en la caracterización de suelos finos.

De acuerdo con los criterios establecidos por Atterberg, se clasifican los suelos según su plasticidad mediante el índice plástico (IP). Se considera al suelo no plástico cuando su IP es igual a cero. Cuando el IP es mayor a cero, pero no pasa el valor de 7, se cataloga como un suelo de plasticidad baja. Los suelos cuyo IP se encuentra entre 7 y 17 se les denomina de mediana plasticidad. Finalmente, aquellos materiales edáficos que presentan un IP superior a 17 se categorizan como suelos de alta plasticidad. Esta escala permite una evaluación cuantitativa de la capacidad del suelo para deformarse sin romperse bajo diferentes condiciones de humedad.

✓ **Límites Líquido ASTMD - 4318, MTC E - 110**

Es el punto de transición de estados ni sólido ni líquido, plástico y semisólido de un suelo se denomina límite líquido, expresado como un porcentaje de humedad, por lo que se halla en el límite líquido se exhibe una resistencia mínima a las fuerzas de cizallamiento, que según los estudios de Atterberg es de aproximadamente 25gr/cm<sup>2</sup>. El contenido de humedad se determinará experimentalmente cuando una incisión estrecha realizada en un espécimen de suelo, colocada en un dispositivo estandarizado, se cierra en una longitud de 13mm (1/2 pulg), dejando caer la copa 25 veces. Estos impactos se producen al dejar caer la cápsula que contiene la prueba se realiza dejando caer el espécimen repetidamente desde una elevación mínima, con frecuencia duplicada por segundo.

**Equipos y materiales:**

- Contenedor de cerámica de 115 mm (4 ½”) de diámetro utilizado para almacenamiento.
- Dispositivo de Casagrande para calcular el límite líquido, compuesto por un cuenco de aleación de cobre y sus componentes auxiliares.
- Envases resistentes a la oxidación y a las variaciones bruscas de temperatura, empleados para contener muestras.
- Horno de secado dispositivo de deshidratación térmica constante de 110 ± 5 °C.
- Instrumento de pesaje con precisión de centésimas de gramo, empleado para medir la masa del material estancado y el que atraviesa cada tamiz.
- Utensilio de mezcla con lamina flexible de longitud entre 75 a 100 mm (3” - 4”) de longitud y 20 mm (3/4”) de ancho, tamiza N° 40, agua destilada.

**Figura 7***Ensayo de limite liquido*

*Nota:* Se utilizo a) Copa de Casagrande, b) Ranurador tipo J, c) Mortero y recipiente de porcelana, d) Pipeta, e) Malla N° 40, f) Espátula, g) Recipientes para secado de muestra, elaboración propia.

**Procedimiento del ensayo:**

- Se procede a tamizar unos 150 gr de suelo que pasa la malla N° 40.
- Se deposita el espécimen de suelo en un receptáculo de porcelana y mezclar con unos 15 a 20 ml de agua purificada, la preparación se combina alternadamente utilizando una espátula. Es posible incorporar entre 1 y 3 ml de líquido extra si fuera necesario.
- Al mezclar lo suficiente el agua purificada con el espécimen se procede a colocar en la cazuela de bronce. Utilizando el utensilio de mezcla, se distribuye uniformemente el material asegurándose de que en su punto más profundo alcance una altura de 1cm de espesor máximo.
- Se emplea el instrumento de ranurado para crear una incisión en la muestra preparada.

- Se acciona el mecanismo del dispositivo, elevando y dejando caer la cápsula mediante el giro de la manivela, este movimiento se realiza a un ritmo de entre 1,9 a 2,1 golpes el proceso continúa hasta que los bordes de la ranura se unen en la base a lo largo de una distancia de 13 mm (1/2 pulg).
- Con una espátula acarrear tierra, colocarla en recipiente, determinar su peso e introducirla al horno.

Repetir los procedimientos anteriores mínimo dos ensayos adicionales, con la muestra de suelo sobrante del receptáculo de porcelana sobrante de la vasija de porcelana y se puede incorporar entre 1 a 3 ml de agua purificada en cada nueva prueba realizada.

### **Cálculos:**

- Cálculo del límite líquido para el contenido de humedad, usando la siguiente fórmula:

**Ecuación 6** Límite líquido

$$LL = W^n \times \left(\frac{N}{25}\right)^{0.121} \quad \text{o} \quad LL = KW^n$$

Donde:

N = representa al N° de golpes necesarios para cerrar la incisión.

$W^n$  = corresponde al contenido de humedad del suelo.

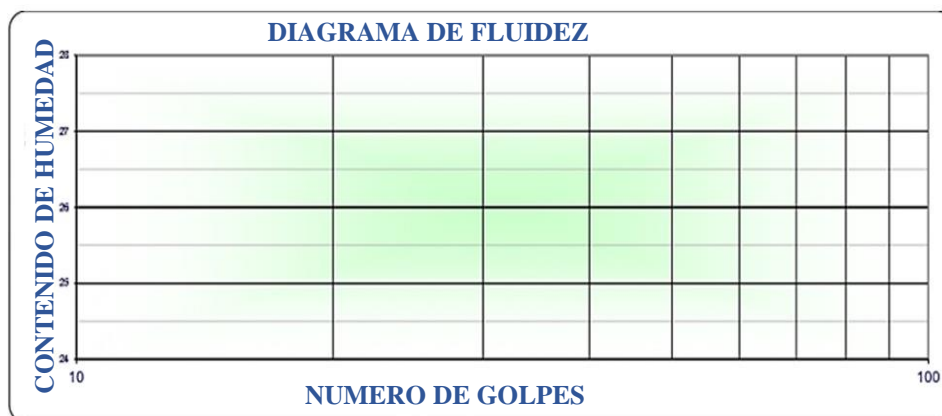
K = factor dado en la tabla 2.



**Tabla 3***Factor K para el límite líquido*

N (número de golpes)	K (factor para límite líquido)
20	0.974
21	0.979
22	0.985
23	0.990
24	0.995
25	1.000
26	1.005
27	1.009
28	1.014
29	1.018
30	1.022

*Nota:* Manual de ensayo de materiales, MTC (2016).

**Figura 8***Gráfico para el ensayo de límite líquido*

*Nota:* Elaboración propia.

✓ **Límites plásticos ASTMD - 4318, MTC E – 111**

Es el contenido de agua mínimo necesario para moldear cilindros delgados de suelo con un grosor aproximado de 3,2 mm (1/8") de diámetro. Para determinar el límite plástico, por lo general se usa el suelo que sobro en el ensayo de limite liquido donde que se procede a evaporar la muestra de suelo hasta tener una muestra de suelo plástica que sea fácilmente moldeable.

Cuando se logra formar un filamento de suelo con un grosor 3,2 mm (1/8") sin que este se quiebre, se procede a juntar la muestra de suelo de nuevo formando una bola y volver a rodillar. Este procedimiento se debe realizar hasta que los cilindros formados se fragmenten al alcanzar el diámetro mencionado 1/8" de diámetro. Aquellos suelos que no permiten la formación de rollos bajo ninguna condición de humedad se clasifican como no plásticos (N.P). Una vez que los filamentos se rompen al llegar al grosor especificado, se recolectan todos los fragmentos, medición del peso e introducción en estufa para eliminar la humedad sobre una superficie vítrea. Posteriormente, se mide nuevamente la masa del material deshidratado. Se calcula el contenido de humedad correspondiente al límite de plasticidad utilizando una ecuación específica:

**Ecuación 7** Límite plástico

$$L.P = \frac{Ph - Ps}{Ps} \times 100 = \frac{Pw}{Ps} \times 100$$

Donde.

L.P = límite plástico humedad en %.

Ph = peso de partes de filamento húmedos en gr.

Ps = trozos de filamento seco pesado en gr.

Pw = cantidad de agua en los trozos de filamento pesado en gr.

**Tabla 4***Estimados de precisión para límite plástico*

<b>Índice de precisión y tipo de ensayo</b>	<b>Desviación estándar</b>	<b>Rango aceptable de dos resultados</b>
<b>Precisión de un operador simple</b>	0.9	2.6
Límite plástico		
<b>Precisión multilaboratorio</b>	3.7	10.6
Límite plástico		

*Nota:* Manual de ensayo de materiales, MTC (2016)**Equipos y materiales:**

- Espátula flexible.
- Contenedor cerámico o de composición semejante con diámetro 115 mm (4 ½).
- Balanza con aproximación a 0,01 gr. Para obtener el volumen de tierra conservado por cada criba del tamizaje.
- Horno de secado dispositivo de deshidratación térmica constante de  $110 \pm 5$  °C.
- Tamiz o malla N° 40.
- Líquido purificado.
- Placa de cristal de considerable grosor con superficie áspera, utilizada como plano de deslizamiento.
- Se toma muestra de suelo de 20 a 50 gr.

### Figura 9

*Equipos y materiales para el ensayo de límite plástico.*



*Nota:* Se utilizó a) Balanza de 0.01 gr, b) Recipiente de secado de muestra, c) recipiente de mezcla, d) vidrio esmerilizado, e) varilla compactadora, elaboración propia.

#### **Procedimiento del ensayo:**

- Se tiene que tamizar de 20 a 50 gr. De suelo pasante la malla N° 40.
- Se moldea o amasa la muestra de suelo estratégicamente necesaria para formar una esfera,
- Del espécimen de suelo que está de forma esférica se extrae una fracción de 1.5 a 2 gr. Para el ensayo.
- Rodar la muestra de suelo entre las manos y una superficie de vidrio, aplicando fuerza necesaria para moldearla en forma cilíndrica con un grosor de 3,2 mm (1/8") en un lapso de 120seg (2min.).
- En caso de que el filamento comience a quebrarse al alcanzar los 3,2 mm se depositará en un recipiente previamente pesado y se cubrirá para preservar su nivel de hidratación.
- Es preciso reiterar el proceso con 2 o 3 rollitos adicionales cuya masa total debe aproximarse a los 6 gr.
- Se debe replicar el procedimiento hasta obtener una cantidad representativa de al menos 6 gr mínimo.

- La muestra se someterá a calentamiento para determinar su nivel de agua presente.

### ✓ Índice de plasticidad

Es un parámetro crucial para saber el contenido de plásticas de los suelos. Calculo por contraste de valores de los límites líquido y límites plástico, es importante destacar el tipo y la proporción de arcilla en el terreno, en el índice de plasticidad resulta de la resta esta principalmente determinado por la cantidad de partículas arcillosas en la muestra:

**Ecuación 8** Índice de plasticidad.

$$I.P = L.L - L.P$$

Donde:

L.P = representa el parámetro de plasticidad.

L.L = correspondiente al estado de fluidez incipiente.

L.P = indica el estado de fragilidad inminente.

### ✓ Clasificación de suelos

Se utiliza el método SUCS (Sistema Unificado de Clasificación de Suelos), el método AASTHO (Asociación de Americana de Agencias Oficiales de Carreteras y Transportes), el método USDA (Sistema de Departamento de Agricultura de los Estados Unidos), el método ASTM Y FAA (Sistema de la agencia federal de Aviación); el método AASHTO es utilizado para carreteras. Para realizar la estratificación de suelos es necesario tener los datos de los ensayos de granulometría y los límites de Atterberg (límite líquido y límite plástico), donde se deben acompañar la designación simbólica correspondiente al grupo de suelo según el sistema utilizado.

- **Sistema de clasificación de suelos AASHTO**

Innovador sistema de clasificación edáfica creado por expertos, la asociación norteamericana de entidades viales emplea un indicador numérico para establecer

comparaciones entre distintas muestras dentro de una misma categoría. Este sistema establece una división primaria en dos grandes conjuntos, basándose en la proporción finos presentes en la muestra.

**a) Criterios de clasificación**

La distinción entre estos dos conjuntos se realiza mediante un análisis granulométrico, utilizando un tamiz específico:

1. Materiales predominantemente granulares: Menos del 35% de la muestra atraviesa el tamiz N° 200.
2. Materiales con alto contenido de finos: Más del 35% de la muestra atraviesa el tamiz N° 200.

**b) Subclasificación**

Se establecen siete subgrupos, identificados desde A-1 hasta A-7. Cada uno de estos subgrupos presenta características particulares que influyen en su comportamiento geotécnico.

**c) Índice comparativo**

El sistema incorpora un índice numérico que permite realizar comparaciones más precisas entre muestras pertenecientes a un mismo subgrupo. Este índice es inversamente proporcional a la calidad del material para su uso en obras viales.

**d) Aplicación práctica**

Este índice adquiere especial relevancia. Por ejemplo, al comparar dos muestras clasificadas como A-2-6, aquella con un índice menor (por ejemplo, A-2-6(2)) se consideraría más adecuada para su uso en la estructura del pavimento que otra con un índice mayor (como A-2-6(4)). Esta metodología de clasificación proporciona a los ingenieros civiles una herramienta valiosa para la selección y manejo óptimo de materiales en proyectos de infraestructura vial.

Para el caso en particular para determinar el índice de grupo (IG):

**Ecuación 9** Índice de grupo

$$IG = (0.2*a) + (0.005*a*c) + (0.01*b*d)$$

Donde:

a = Pasante en el tamiz N° 200 menos 35, el valor está limitado entre 0 y 40. Es decir:  $a = F - 35$ , donde  $(0 \leq a \leq 40)$ . (F % que pasa la malla N° 200).

b = Pasante en el tamiz N° 200 menos 15, el valor está limitado entre 0 y 40. Es decir:  $b = F - 15$ , donde  $(0 \leq b \leq 40)$ . (F % que pasa la malla N° 200).

c = limite liquido menos 40. El valor está limitado entre 0 y 20. es decir:  $c = LL - 40$ , donde  $(0 \leq c \leq 20)$ . (LL es el límite líquido).

d = índice de plasticidad menos 10. El valor está limitado entre 0 y 20 o más. Es decir:  $d = IP - 10$ , donde  $(0 \leq d \leq 20)$  o más. (IP es el índice de plasticidad).

**Tabla 5**

*Clasificación de suelos según su índice de grupo*

Índice de grupo	Suelo de subrasante
IG > 9	Muy pobre
IG esta entre 4 a 9	Pobre
IG esta entre 2 a 4	Regular
IG esta entre 1 a 2	Bueno
IG esta entre 0 a 1	Muy Bueno

*Nota:* Ministerio de transportes y comunicaciones, 2014.

**Figura 10**

*Tabla del sistema de clasificación AASHTO*

Clasif. General	Materiales Granulares ( 35% o menos pasa la malla nº 200)						Limos y Arcillas ( 35% pasa malla nº 200 )				
Grupos	A - 1		A - 3	A - 2				A - 4	A - 5	A - 6	A - 7
Subgrupos	A - 1 - a	A - 1 - b		A - 2 - 4	A - 2 - 5	A - 2 - 6	A - 2 - 7				A-7.5/A-7-6
% que pasa tamiz :											
Nº 10	50 máx										
Nº 40	30 máx	50 máx	51 mín								
Nº 200	15 máx	25 máx	10 máx	35 máx	35 máx	35 máx	35 máx	36 mín	36 mín	36 mín	
Caract. Bajo Nº 40											
LL				40 máx	41 mín	40 máx	41 mín	40 máx	41 mín	40 máx	41 mín
IP	6 máx	6 máx	NP	10 máx	10 máx	11 mín	11 mín	10 máx	10 máx	11 mín	11 mín
IG	0	0	0	0	0	4 máx	4 máx	8 máx	12 máx	16 máx	20 máx
Tipo de material	Gravas y Arenas		Arena fina	Gravas y arenas limosas y arcillosas				Suelos Limosos		Suelos arcillosos	
Terreno fundación	Excelente		Excelente	Excelente a bueno				Regular a malo			

*Nota:* Manual de ensayo de materiales – MTC.

✓ **Sistema de clasificación SUCS ASTM D – 2487**

Está basado en identificar los suelos según sus cualidades o características estructurales y de plasticidad de acuerdo a su relación con respecto a su agrupación debido al comportamiento como elementos estructurales. Para su debida clasificación de suelos se basa en las siguientes propiedades:

- a) La cantidad de grava, arena y finos (% que pasa por la malla Nº 200).
- b) Representación de la curva de distribución granulométrica.
- c) Particularidades de la plasticidad y compresibilidad.

Estableciendo las fracciones de suelos como: canto rodado, gravas, arena y finos (limo o arcilla). Este sistema abarca a los suelos gruesos y finos, siendo seleccionados a través de la malla Nº 200 donde que las partículas gruesas son mayores que la malla Nº 200 y las partículas gruesas son menores a la malla Nº 200. Un suelo es grueso cuando el 50% del total de sus partículas tienen que ser gruesas, y se considerara como material fino si más del 50% en peso son finos.



✓ **Suelos gruesos**

Se emplea un sistema de codificación alfanumérico para categorizar los materiales terrosos. Este sistema utiliza dos caracteres en mayúscula que representan las iniciales de las denominaciones anglosajonas de los tipos de suelo más frecuentes.

**a) Clasificación primaria**

Los materiales se dividen en:

1. Suelos de granulometría gruesa: Se identifican con la letra "G".
2. Materiales predominantemente arenosos: Se designan con la letra "S".

**b) Criterios de diferenciación**

La distinción entre estas dos categorías se basa en el análisis granulométrico:

- En los suelos tipo "G" se encuentra una mayor cantidad de fragmentos gruesos retenidos en la malla N° 4.
- Los suelos tipo "S" se caracterizan por tener una mayor proporción de su fracción gruesa que atraviesa el tamiz N° 4.

**c) Subclasificación**

Representan cuatro subgrupos secundarios los cuales se subdividen en:

- suelos tipo "G": GW, GP, GM, GC
- suelos tipo "S": SW, SP, SM, SC

Esta subclasificación se fundamenta en:

1. La proporción y naturaleza de las partículas finas presentes.
2. Curva de representación granulométrica en el cual se configura.

Este sistema de clasificación proporciona a los ingenieros civiles una herramienta eficaz para la caracterización adecuada de los suelos en diversos proyectos de construcción e infraestructura.

**Figura 11***Sistema de clasificación SUCS de suelos de grano grueso*

DIVISIONES PRINCIPALES		SÍMBOLOS DEL GRUPO	DENOMINACIÓN TÍPICA	CRITERIOS DE CLASIFICACIÓN			
SUELOS DE GRANO GRUESO Más del 50% es retenido en el tamiz nº 200	GRAVAS 50% o más de la fracción gruesa es retenido por el tamiz nº 4	GRAVAS LIMPIAS	GW	Gravas y mezclas grava-arena bien graduadas, con pocos finos o sin finos	$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} > 4$ $C_c = \frac{D_{75}^2}{D_{60} \cdot D_{10}}$ entre 1 y 3  Cuando no se cumplen simultáneamente las dos condiciones para GW		
			GP	Gravas y mezclas grava-arena mal graduadas, con pocos finos o sin finos			
		GRAVAS CON FINOS	GM	Gravas limosas, mezclas grava-arena-limo		Debajo de la línea A o IP < 4  Por encima de la línea A o IP > 7  Los casos intermedios requieren doble símbolo	
			GC	Gravas arcillosas, mezclas grava-arena-arcilla			
	ARENAS Más del 50 % de la fracción gruesa pasa por el tamiz nº 4	ARENAS LIMPIAS	SW	Arenas y arenas con grava bien graduadas, con pocos finos o sin finos	$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} > 6$ $C_c = \frac{D_{75}^2}{D_{60} \cdot D_{10}}$ entre 1 y 3  Cuando no se cumplen simultáneamente las dos condiciones para SW		
			SP	Arenas y arenas con grava mal graduadas, con pocos finos o sin finos			
		ARENAS CON FINOS	SM	Arenas limosas, mezclas de arena y limo		Debajo de la línea A o IP < 4  Por encima de la línea A o IP > 7  Los casos intermedios requieren doble símbolo	
			SC	Arenas arcillosas, mezclas de arena y arcilla			
		Clasificación basada en el porcentaje de finos que pasan por el tamiz nº 200 (0,080 UNE) Menos del 5%: GW, GP, SW, SP Más del 12%: GM, GC, SM, SC Del 5 al 12%: Casos intermedios que requieren el uso de doble símbolo					

Nota: Comité técnico permanente de geotecnia.

✓ **Suelos finos**

En los suelos finos el sistema considera a los suelos agrupados, así formando el símbolo de cada grupo por dos letras mayúsculas, por lo que son elegidas con criterios similares usados para los suelos gruesos, es decir:

- Limos inorgánicos (origen mineral), se identifica con la letra M.
- Arcillas inorgánicas (origen mineral), se identifica con la letra C.
- Limos y arcillas (alto contenido orgánico), se identifican con la letra O.

Si es menor a 50% de su límite líquido, y corresponden a una baja o mediana compresibilidad se añadirá el símbolo L, esta nomenclatura se incorpora al subgrupo ML, CL, OL para los materiales menos compresibles. Y es mayor a 50% su límite líquido, se le denominara de alta compresibilidad por lo que se le coloca la letra H, esta nomenclatura se incorpora al subgrupo MH, CH y OH para aquellos materiales de alta compresibilidad.

Casagrande tras realizar estudios experimentales realizando análisis de diversos especímenes de suelo de granulometría fina. Como resultado de dichos estudios, es que desarrolla una representación gráfica innovadora que establece una relación entre el límite líquido (LL) con el índice de plasticidad (IP). Para la ingeniería geotécnica se conoce como diagrama de plasticidad para suelos cohesivos también llamada carta de Casagrande de los suelos cohesivos, se caracteriza por la presencia de dos líneas principales que actúan como fronteras entre diferentes categorías de suelo.

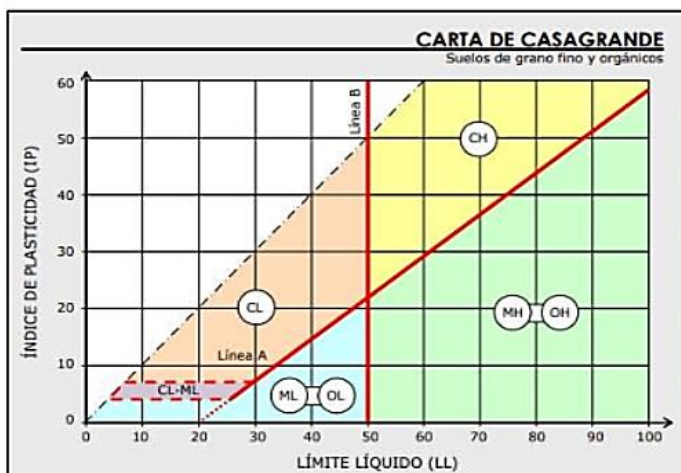
**Ecuación 10** Límites de suelo

$$\text{Línea A: } IP = 0.73 (LL - 20)$$

$$\text{Línea B: } LL = 50$$

**Figura 12**

*Carta de plasticidad Casagrande*

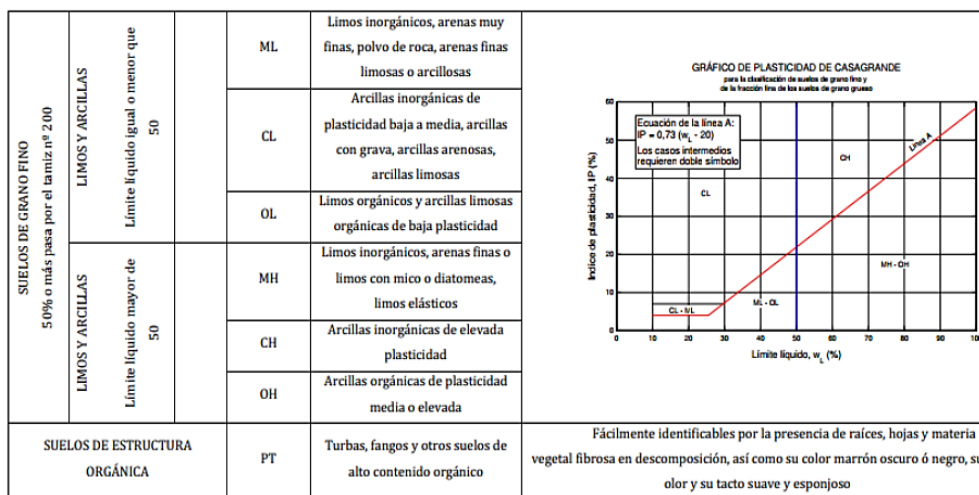


*Nota:* Bañón y Beviá, 2000.

En los diversos grupos de suelos de granulometría fina, que fueron mencionados anteriormente se detalla de forma más explícita mediante la siguiente imagen:

## Figura 13

### Sistema de clasificación SUCS de suelos de grano fino



Nota: Comité técnico permanente de geotecnia.

#### ✓ Abrasión los ángeles ASTM C – 131, MTC E – 207

Es establecido, para realizar ensayos en materiales granulares, es decir agregados gruesos de tal manera que deben de tener dimensiones menores a 37,5 mm (1 ½”), para evaluar su resistencia a la degradación utilizando la máquina de los ángeles.

#### Equipos y materiales:

- Muestra de material seco.
- Tamices dispositivos de separación granulométrica.
- Balanza de precisión con margen de error no superior 0.1% de la masa analizada.
- Horno de secado dispositivo de deshidratación térmica constante de 110 ± 5 °C.
- Máquina de abrasión los ángeles estandarizada para ensayos de desgaste.
- Cargas abrasivas esferas metálicas de dimensiones entre 46.38 mm y 47.63 mm.
- La carga, se tomará dependiendo a la gradación de la muestra a ensayar.

**Figura 14***Gradación de la muestra de ensayo*

Medida del tamiz (abertura cuadrada)		Masa de tamaño indicado, g			
Que pasa	Retenido sobre	Gradación			
		A	B	C	D
37,5 mm (1 ½")	25,0 mm (1")	1 250 ± 25	-.-	-.-	-.-
25,0 mm (1")	19,0 mm (¾")	1 250 ± 25	-.-	-.-	-.-
19,0 mm (¾")	12,5 mm (½")	1 250 ± 10	2 500 ± 10	-.-	-.-
12,5 mm (½")	9,5 mm (⅜")	1 250 ± 10	2 500 ± 10	-.-	-.-
9,5 mm (⅜")	6,3 mm (¼")	-.-	-.-	2 500 ± 10	-.-
6,3 mm (¼")	4,75 mm (Nº 4)	-.-	-.-	2 500 ± 10	-.-
4,75 mm (Nº 4)	2,36 mm (Nº 8)	-.-	-.-		5 000
TOTAL		5 000 ± 10	5 000 ± 10	5 000 ± 10	5 000 ± 10

*Nota:* Manual de ensayo de materiales MTC – 2016.

**Procedimiento:**

- El proceso inicia con la introducción del espécimen y los elementos abrasivos en el tambor rotatorio del dispositivo. Se programa la rotación del cilindro a una frecuencia constante, oscilando entre 30 a 33 rpm, durante un total de 500 vueltas. El equipo gira a una velocidad constante y uniforme.
- Con las vueltas completadas se procede a sacar el espécimen de la máquina en un depósito, la porción menuda atraviesa el tamiz Nº 12, mientras el resto queda retenido arriba.
- El material que no pasa el tamiz Nº 12, se lavará, se introduce al horno a una temperatura de  $110 \pm 5$  °C, luego pasado 24 hrs, se pesará el espécimen.

**Figura 15**

*Ensayo de Abrasión los ángeles.*



*Nota:* a) Máquina de abrasión los ángeles, b) carga abrasiva (esferas de acero), c) bandeja, elaboración propia.

✓ **Equivalente de arena ASTM D – 2419, MTC E – 114**

Es utilizado para determinar la proporción o cantidad de partículas de suelos arcillosos o finos plásticos y polvo en suelos granulares y agregados finos las cuales pasan la malla N° 4 (4,75 mm).

**Equipos y materiales:**

- Cilindro graduado de plástico acrílico transparente.
- Ensamblaje de sifón, tapón de jebe, tubo irrigador.
- Bascula portátil para medir peso.
- Tamiz N° 4 (4,75 mm)
- Recipiente volumétrico calibrado con una capacidad de 85cm<sup>3</sup>, con una tolerancia de  $\pm 5$ cm<sup>3</sup>.
- El almacenamiento de la solución stock requiere un contenedor hermético de capacidad volumétrica de 1 gal.

- Solución stock el cual está compuesta por (glicerina usp, cloruro calcio anhidrido, formaldehido, agua destilada)
- Embudo de boca ancha, para verter de muestra de material a los cilindros.
- Cronometro.
- Se prepara mediante la dilución de  $85\text{cm}^3 \pm 5\text{cm}^3$  de la solución stock por cada galón de agua desmineralizada o agua destilada.
- El espécimen de ensayo se obtiene tras el cribado del material a través del tamiz N° 4, asegurando una masa mínima de 1500 gr. para garantizar la representatividad de la muestra.

**Procedimiento:**

- Humidificación de la muestra para su acondicionamiento previo, consiguiendo así la condición de libre flujo.
- Se tomará cuatro medidas de la muestra, con el uso del recipiente de medida ( $85 \pm 5$  ml), para asegurar una distribución homogénea, se aplican ligeros impactos sobre una superficie rígida y se realizan movimientos suaves del contenedor.
- Por consiguiente, se cuantifica y registra la masa o volumen de suelo contenido en recipientes medidos por peso o volumen.
- Se realiza la colocación del recipiente la cual contiene la solución de trabajo a una altura aproximada de 91 cm y 117 cm tal manera que la solución trabaje.

- Se incorporará a cada probeta la solución de trabajo elevación de 4 in. ( $102 \pm 3$  mm), posteriormente verter el espécimen de material pasante de la malla N° 4, que se separado en una capsula de 90 ml, utilizando un embudo se aplican golpes suaves en la base para liberar el aire atrapado y promover la saturación completa del espécimen.
- Se permite un periodo de hidratación de  $10 \pm 1$  min.
- Posteriormente se procede a asegurar la probeta con el tapón de jebes, se sostiene la probeta en posición horizontal y se procede a agitar manualmente completando 90 ciclos en 30 segundos aproximadamente.
- Se inicia con el lavado insertando profundamente el dispositivo de riego a la probeta, aplicando movimientos de rotación y penetración mientras fluye la solución, hasta alcanzar una altura de 15 pulgadas.
- Mantener la probeta y la muestra de material durante  $20 \text{ min} \pm 15$  segundos, para que se asiente la muestra y se pueda visualizar el material fino y grueso.
- Se deja sedimentar la muestra durante 20 min. Transcurrido dicho tiempo se registra el material en suspensión.
- Finalmente, se introduce el dispositivo de medición hasta hacer contacto con la arena sedimentada y se registrara la lectura de arena.



**Figura 16**

*Ensayo de equivalente de arena.*



*Nota:* Se utilizó a) Cantidad de muestra preparada requerida, b) Solución requerida, c) Cilindros o probetas graduadas, d) Aparato para pesar, e) Tapón de jebe, g) maguera y tubo de irrigador, h) Cronometro, i) Capsula de 90 ml para muestreo, elaboración propia.

**Ecuación 11** Equivalente de arena se define como:

$$\text{Equivalente de arena} = \frac{\text{lectura de arena}}{\text{lectura de arcilla}} \times 100$$

✓ **Proctor modificado ASTM D – 1557, MTC E – 115**

Es un estudio de mucha importancia donde se lleva a cabo un análisis de calidad en la compactación del suelo. Este procedimiento tiene como objetivo identificar la cantidad ideal de humedad en el suelo que facilite una compactación más efectiva para una energía específica. Es proporcional a la densidad del suelo seco.

El ensayo de Proctor modificado se realiza de la siguiente manera se procede a compactar la muestra de suelo en un cilindro o molde de 4” o 6” de diámetro de y de 4.6” o 6” de altura, un pisón 10 lbf (4.540 kg) que caerá de una altura de 18 pulg se realizan 25 golpes o impactos por estrato de material, el ensayo se debe de hacer sobre partículas de suelo cuyo diámetro máximo no exceda los 20 mm por lo contrario la composición del

suelo contiene elementos granulares de mayor tamaño se procede a su sustitución por un volumen de material con granulometría comprendida entre 5 y 20 mm.

Este ensayo propone metodología como núcleo fundamental de su propósito, para la compactación de la muestra de suelo en laboratorio utilizando una energía modificada de (2700 KN – m/m<sup>3</sup> (56000 pie – lb/pie<sup>3</sup>)).

El método que se va usar debe ser indicado en las especificaciones de la muestra de suelo que será ensayado, si no está especificada la elección del método se basará en la gradación de la muestra de suelo.

a) **Método “A”**

- El diámetro del molde es de 101.6 mm o (4 pulg).
- El material a usar debe pasar por el tamiz N° 4.
- Serán 5 capas.
- Serán 25 golpes por estrato o capa.
- Cuando el 20% o menos del peso del material se retiene en la malla N° 4.

b) **Método “B”**

- El diámetro del molde es de 101.6 mm o (4 pulg).
- El material a usar debe pasa por el tamiz (3/8 pulg).
- Serán 5 capas.
- Serán 56 golpes por estrato o capa.
- Uso: Cuando más del 20% del peso del material esta retenido en el tamiz N° 4 y se retiene el 20% o menos del peso del material en el tamiz (3/8 pulg).

**c) Método “C”**

- Molde con un diámetro 152.4 mm o (6 pulg).
- El material que pasa por el tamiz (3/4 pulg) es el que se usara.
- Serán 5 capas.
- Serán 56 golpes por cada estrato o capa.
- Uso: cuando el tamiz retiene más del 20% del peso del material (3/8 pulg) o menos del 30% del peso del material (3/4 pulg).
- El procedimiento de prueba requiere una fracción de 24 kg del terreno a analizar. El ensayo de granulometría se llevará a cabo utilizando las mallas (3/4 pulg), (3/8 pulg) y N° 4.

**Equipos y materiales:**

- Ensamblaje del molde cilíndrico de 4 o 6 pulgadas con una altura de 4,584 pulgadas.
- Se emplea un pisón o martillo de compactación su función es descender libremente desde una altura controlada de  $457,2 \pm 1,6$  mm ( $18 \pm 0,05$  pulg) de la superficie del espécimen.
- Balanza.
- Horno de secado dispositivo de deshidratación térmica constante de  $110 \pm 5$  °C.
- regla metálica de 10 pulg. para enrasar y medir.
- Recipiente o taras resistente a la corrosión.
- Tamices de diferentes aberturas como son 3/4" (19,0 mm), 3/8" (9,5 mm) y N° 4 (4,75mm).
- Aparatos complementarios como son: Espátula, cuchara, espátula, probeta graduada de 1 litro, martillo de goma, cucharon, bolsas plásticas.

**Ecuación 12** Densidad Húmeda

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

Donde:

$\rho_m$  = Densidad húmeda del suelo compactado (Mg/m<sup>3</sup>).

$M_t$  = Masa del suelo húmedo y molde (kg).

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

$V$  = Volumen del recipiente de compactación (m<sup>3</sup>).

**Ecuación 13** Densidad Seca

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

Donde:

$\rho_d$  = Densidad seca del suelo compactado (Mg/m<sup>3</sup>).

$\rho_m$  = Densidad húmeda del suelo compactado (Mg/m<sup>3</sup>).

$W$  = Contenido de agua (%).

**Ecuación 14** Peso Unitario Seco

$$\gamma_d = 62,43\rho_d \text{ en } \gamma_d = 9,807\rho_d \text{ en } \frac{KN}{m^3}$$

Donde:

$\gamma_d$  = Peso unitario seco del suelo compactado.

$\rho_d$  = Densidad seca del suelo compactado (Mg/m<sup>3</sup>).

**Tabla 6***Condiciones para ensayo de Proctor Modificado*

Tipo de ensayos	Proctor modificado (MTC E-115/ASTM D-1557)		
Método	A	B	C
Condiciones para la elección del método	% Ret. Acum. N° 4 ≤ 20%	% Ret. Acum. 3/8" ≤ 20%	% Ret. Acum. 3/4" ≤ 30%
Tipo de material utilizado	Pasante la malla N° 4	Pasante la malla N° 3/8"	Pasante la malla N° 3/8"
N° de capas	5	5	5

*Nota:* Norma Técnica Peruana 339.141, 1999.

**Procedimiento:**

- Evitar reutilización de tierra previamente densificada en ensayos de laboratorio.
- Suelo inicialmente húmedo requiere preparación antes del análisis edáfico, se tendrá que realizar el secado a la intemperie o un dispositivo de secado a una temperatura de 60°C como máximo. Es crucial disgregar completamente los conglomerados evitando disgregar las particulares individuales.
- Tamizar en las mallas: N°4, 3/8 pulg, 3/4 pulg.
- Se deben prepara por lo menos cuatros especímenes.
- Disponer el material granular que se puede pasar por el tamiz 3/4 pulg. para su apisonado en un molde de 6 pulgadas, posteriormente separar o triturar los agregados lo suficiente que pasen el tamiz 3/8 pulg.

- La cantidad aproximada será 2,3 kg de la muestra zarandeada. Cada muestra densificada requiere aplicación específica de técnica A o B, según protocolo, mientras que la técnica C demanda una cantidad aproximada de 5,9 kg de muestra de suelo tamizado.
- Agregar volúmenes precisos del líquido vital necesarios para que los especímenes tengan los valores requeridos. Para terrenos áridos, hidratar la tierra y cuidar individualmente cada muestra experimental durante su proceso de endurecimiento.

**Compactación:**

- Se combinará bien las muestras retenidas en la 3/8 pulg. N° 4 y pasantes la malla N° 4.
- Codificar el peso del molde que se va a usar para el ensayo.
- Acoplar, fije firmemente el conjunto de molde y collar al soporte.
- Combinar la muestra hasta que quede homogéneamente húmedo.
- Particionar en 5 porciones iguales.
- Coloque el molde previamente preparado recogiendo intercaladamente.
- La muestra se compacta con 56 golpes las 5 capas.
- Después del apisonamiento, retirar el collar y se enrasa.
- Pesar el molde más la muestra húmeda.
- Extraer una porción de espécimen y medir masa en recipiente para determinar contenido hídrico.
- Medir masa del contenedor con tierra mojada antes de secar al horno.
- Transcurrido un día, extraer del horno y determinar el peso conjunto del recipiente y espécimen deshidratado.

✓ **CBR (California Bearing Ratio) ASTM D – 1883, MTC E – 132**

Es el ensayo de penetración estándar (SPT) destaca por su amplia adopción global, gracias a su economía frente a alternativas como las pruebas triaxiales. Su popularidad se debe a la existencia de numerosas correlaciones y metodologías semi-empíricas para el diseño de pavimentos basadas en sus resultados. El ensayo CBR, detallado en la norma ASTM D 1883, examen de capacidad del terreno para soportar fuerzas aplicadas. En este procedimiento, se introduce piezómetro en el suelo a una aceleración continua. Resultando un índice CBR, nos dice qué tan fuerte es el suelo comparado con un tipo de grava estándar. Se obtienen dos valores de CBR para cada espécimen de suelo, uno a 0.1" (2.5 cm) de penetración y el otro a 0.2" (5 cm) de penetración. ASTM recomienda reportar 0.1" si es menor que 0.2". Si el valor de CBR para 0.1" es mayor que el de 0.2", el ensayo debería repetirse para ese espécimen. El CBR busca determinar la capacidad de soporte de los suelos y agregados compactados en laboratorio con niveles de compactación variables y una humedad ideal. El ensayo se lleva a cabo generalmente sobre suelos preparados en el laboratorio bajo condiciones específicas de humedad y densidad; sin embargo, también se puede llevar a cabo de manera similar sobre muestras del terreno que no han sido alteradas, y se indica:

- a) Este índice se utiliza para evaluar la capacidad de soporte de los suelos de subrasante, así como de las capas de base, subbase y afirmado.
- b) Hace referencia a los ensayos que se llevaron a cabo para determinar las relaciones entre peso unitario y humedad utilizando un equipo modificado.

**Aparatos y equipos para la compactación y penetración:**

- Un gatillo de tornillo mecánico que se opera manualmente está equipado con un dispositivo giratorio especial de manivela para aplicar carga al pistón de penetración.

- Dos anillos de carga, uno de ellos debidamente calibrado, con una amplitud de carga de 0 a 8,8 kN y el otro de 0 a 22,6 kN.
- Pistón de penetración de  $50,8 \pm 0,1$  mm de diámetro ( $19,35 \text{ cm}^3$  de área) y alrededor de 102 mm (4").
- Uno de los dos diales se utilizará para ver las deformaciones del anillo de carga con una lectura de 0,0025 mm y un recorrido de 6,4 mm, mientras que el otro anillo se utilizará para medir la inserción del pistón con una lectura de 0,025 mm y un recorrido de 25 mm.
- Estructura de apoyo para instrumento medidor, fabricada con materiales resistentes y ligeros de 76 mm (3") de altura y aproximadamente 1,5 m de longitud.
- Una platina circular de acero para sobrecarga tiene un diámetro de  $254 + 0,5$  mm y un agujero central circular de  $51 \pm 0,5$  mm. La pesa de la platina debe ser de  $4,54 \pm 0,01$  kg.
- Sobrecarga pesa anular de  $4,54 \pm 0,01$  kg, de  $216 \pm 1$  mm de diámetro total, y pesa similar a la misma dimensión, pero de  $9,08 \pm 0,01$  kg.
- Gata de camión con una capacidad de 14 mg (15 toneladas).
- Un equipo variado, reglas de enrase, cucharones para excavar, etc.

**Procedimiento del CBR:**

- La muestra necesaria se prepara, de la ejecución anteriormente en el ensayo de proctor modificado.
- Se debe calcular la muestra de suelo pasante la malla N°4, 3/8 pulg, 3/4 pulg.



- Cantidad de muestras a preparar para el ensayo de laboratorio serán 3.
- Utilizar 5 kg de muestra de suelo por molde de CBR.
- Para cada molde se compactará la muestra de suelo con el ideal contenido de humedad.
- Para iniciar el ensayo CBR, disponga tres recipientes específicos. Coloque primero la base y luego añada el espaciador circular encima de esta plataforma inicial.
- Tras posicionar el separador circular, se instala la membrana filtrante sobre la superficie preparada.
- Se aplica diferentes frecuencias de energía de compactación por cada molde de CBR.
- Finalizada la compactación, se enraza la superficie y se separa el molde de su base metálica.
- Se procede a rotar el molde quedando con la parte superior hacia abajo se retira el disco espaciador se el papel filtro en la base.
- La plataforma agujereada, equipada con un eje regulable, se instala a continuación. Sobre esta superficie se disponen los pesos adicionales.
- El proceso implica ajustar con precisión el trípode y su dial. Se posiciona en el molde, se calibra a cero y se anota la lectura inicial. Luego, se retira y se repite el procedimiento para cada una de las tres muestras.
- A continuación, el molde se sumerge completamente en un recipiente lleno de agua, manteniéndolo en estas condiciones durante un período de 96 horas para su saturación total.

- El proceso culmina tras cuatro días. Se extrae la forma y se permite un breve drenaje. Posteriormente, se retiran los elementos de presión y la lámina agujereada.
- El dispositivo de medición se reinicia, ajustando a cero tanto el medidor de tensión como el indicador de compresión.
- La compresión del terreno se mide a 0,005 pulgadas/minuto. Un temporizador regula el ritmo de avance del émbolo sobre la superficie.
- Se deben de registrar las lecturas de presión de acuerdo a una tabla de lectura.
- Finalizado el ensayo, se elimina el peso adicional y se extrae el espécimen. Se obtiene una fracción para establecer el contenido de agua definitivo.
- Se traza la curva presión – penetración en escala aritmética.
- El CBR se calcula de 0.1 y 0.2 pulg. De penetración con las presiones correspondientes.

**Ecuación 15** Porcentaje de expansión

$$E = \frac{L_f - L_0}{H}$$

Donde:

E = % de expansión

$L_f$  = Lectura final en mm.

$L_0$  = Lectura inicial en mm.

H = Altura de molde en mm (127 mm o 5 pulg.).

**Ecuación 16** Capacidad de soporte del suelo

$$\text{CBR} = \frac{\sigma_t}{\sigma_p} * 100$$

Donde:

$\sigma_t$  = Esfuerzo de la muestra ensayada.

$\sigma_p$  = Esfuerzo patrón.

**Penetración:****Figura 17**

*Relación de unidades de penetración.*

Milímetros	Pulgadas
0,63	0,025
1,27	0,050
1,90	0,075
2,54	0,100
3,17	0,125
3,81	0,150
5,08	0,200
7,62	0,300
10,16	0,400
12,70	0,500

*Nota:* Bowles, 1981.

**Expansión:**

La diferencia de lecturas del deformímetro se utiliza para calcular la expansión.

Donde que este valor es la proporción en relación al peralte de la muestra dentro del molde que corresponde a 127 mm o 5 pulg.

✓ **Valor de la relación de soporte (índice resistencia CBR):**

Se denomina al porcentaje de presión que el pisón aplica sobre el suelo, para una penetración específica, en comparación con la fuerza de penetración en un espécimen patrón. Las características serán:

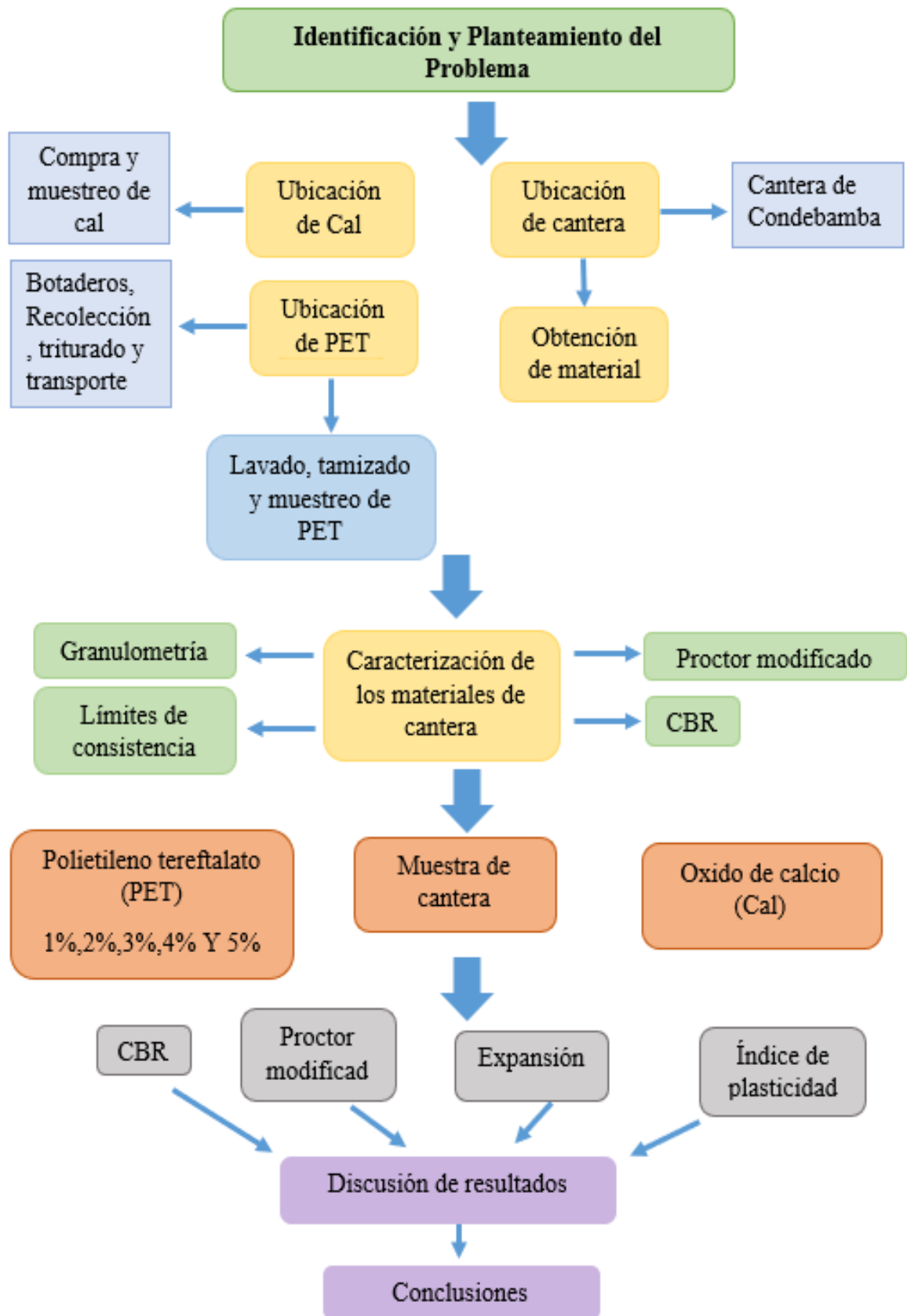
**Tabla 7**

*Características de la muestra*

Penetración		Presión		
Mm	Pulgadas	MN/m <sup>2</sup>	kgf/cm <sup>2</sup>	lb/plg <sup>2</sup>
2,54	0,1	6,90	70,31	1,000
5,08	0,2	10,35	105,46	1,500

*Nota:* Bowles, 1981.

✓ **Procedimiento de la Investigación**



*Nota:* Elaboración propia.

### 3.3 Definición de términos

**CBR (California Bearing Ratio):** “Cuantifica la resistencia al soporte de un suelo o material, determinada mediante la penetración de una fuerza en una masa de suelo, la cual proporciona una medida comparativa de la capacidad de soporte”. (MTC, 2016, p. 249).

**Compactación:** “La compactación es proceso geotécnico crucial que consiste en aplicar energía al suelo para reducir el volumen de vacíos, por lo que este procedimiento incrementa la densidad del suelo, así mejorando significativamente la capacidad de soporte y estabilidad. Optimizar las propiedades ingenieriles del suelo será el objetivo principal, el aumento de su resistencia y reducir la deformación mediante técnicas específicas, se logrará el aumento del peso específico seco y una disminución de los vacíos, así obteniéndose un suelo apto para soportar cargas y resistir asentamientos”. (Braja M Das, 2012).

**Estabilizador de suelos:** “La optimización del suelo implica técnicas mecánicas e incorporación de aditivos químicos, naturales o sintéticos, mediante esta incorporación se potenciará las características físicas del suelo. Estas estabilizaciones se aplican generalmente en la capa de rodadura y en estratos internos de vías terrestres, mejorando el desempeño estructural de dicha carretera”. (MTC, 2013, p. 104).

**Contenido de humedad óptimo:** “El contenido de humedad óptima al cual un suelo o material granular al ser compactado utilizando un esfuerzo especificado produce la máxima densidad seca. Esta fuerza aplicada puede clasificarse como estándar o modificada”. (MTC, 2016, pág. 94).

**Granulometría:** “Evalúa la distribución o tamaños de partículas del agregado mediante el uso de tamices o mallas según normas especificaciones técnicas para clasificar su composición”. (MTC, 2016, p. 98).

**Curva granulométrica:** “Se observa mediante un gráfico una visión objetiva de la distribución de tamaños del agregado. Graficando en el eje X los logaritmos de las aberturas de los tamices y en el eje Y los porcentajes que pasan o retenidos acumulados. Mediante esta representación se puede tener una clara perspectiva de la distribución de tamaños de los materiales analizados”. (MTC, 2013, p. 115).

**Afirmado:** “El afirmado combina: piedra, arena y finos o arcilla, en proporciones adecuadas, una deficiente mezcla de materiales granulares y finos resultara en un afirmado de baja calidad o pobre. El afirmado tiene dos principales usos como carpeta de rodadura en vías sin pavimentadas (carreteras de tercera clase) o como estrato granular inferior o colchón anticontaminante”. (MTC, 2013, p. 114).

**Material de cantera:** “Se define como el material geológico que cumple con especificaciones técnicas para su uso en construcción en una obra, donde su ubicación debe ser estratégica, económicamente cerca de las obras y con volúmenes de material suficientes para satisfacer las demandas de dicha obra”. (MTC,2013, p. 59)

**Cal:** “Se compone fundamentalmente de óxido cálcico (cal viva), obtenido por calcinación de materiales calizos, o hidróxido cálcico (cal apagada). Conocida como cal aérea por la propiedad que tienen de endurecerse en el aire, una vez mezcladas con agua, por acción del dióxido de carbono”. (MTC, 2013, p. 332).

**PET (Tereftalato de Polietileno):** “Los plásticos presentan una resistencia excepcional a la degradación natural, tardan aproximadamente 700 años (siete siglos), ya que su estructura molecular del PET hace que los macroorganismos no puedan desintegrarlos con facilidad, hasta el momento que los enlaces químicos entre los átomos del plástico comiencen a desintegrarse”. (Crawford et.al 2013).

**Impacto ambiental:** “El efecto de la intervención humana a causado a generado una alteración sobre el medio ambiente, trayendo como consecuencia sobre la salud de la población, la calidad del aire y la belleza paisajística” (Gómez y Gómez, 2013, p. 29).

**Material de cantera:** “Es aquel material de características apropiadas para su utilización en las diferentes partidas de construcción de obra, que deben estar económicamente cercanas a las obras y en los volúmenes significativos de necesidad de la misma” (MTC, 2013).

**Medio ambiente:** “Es el conjunto de factores o físico-naturales, sociales, culturales, económicos y estéticos que interactúan entre sí, con el individuo y con la sociedad en que vive, determinando su forma, carácter, relación, y supervivencia” (MTC, 2014, p. 301).



## **IV. Metodología**

### **4.1 Tipo y nivel de investigación**

El tipo de investigación será aplicada. De acuerdo con José Lozada (2014), “Esta referida a la aplicación, orientación de generar conocimientos con impacto directo a los desafíos de la sociedad o el ámbito producción, este tipo de investigación es denominado como tecnológica, practico o empírico, donde busca resolver problemas específicos y poder encontrar las soluciones concretas y prácticas” (p. 47).

En esta tesis utilizaremos el nivel de investigación es explicativo, aplicando este estudio se podrá conocer y analizar una realidad o peculiaridad del porqué de las cosas de una realidad tanto como sus cualidades, características, propiedades, etc. Es decir, el por qué o la ocurrencia de los hechos, por medio de la determinación de relaciones causa-efecto. (Fernández Collado & Baptista Licio, 2010, p. 25).

- **Diseño de investigación**

Es de tipo experimental, según (Fernandez Collado & Baptista Licio, 2010) y (Gomez Bastar, 2012, p.48), cuyo grupo de control se obtiene mediante los ensayos de laboratorio del material granular destinado al afirmado sin la incorporación de PET y cal. Y por otro lado el grupo de control se obtiene mediante los ensayos de laboratorio del material granular destinado al afirmado con la incorporación de PET y cal.

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

#### **Espacial**

La tesis se realizó en la cantera de Condebamba, ubicada en la ciudad de Abancay, departamento de Apurímac.

### **Temporal**

La tesis se realizó en el periodo del año 2023, principios del año 2024, donde se realizaron la delimitación temporal, la compilación de muestras, la aplicación de estudios de laboratorio y el procesamiento de datos.

### **Social**

Este tipo de limitación no es relevante para el presente estudio.

### **Conceptual**

La tesis se ejecutará analizando los atributos físicos y mecánicos del material granular utilizado para el afirmado en la cantera de Condebamba, situada en la provincia Abancay. El objetivo es acrecentar estas propiedades mediante la incorporación de plástico reciclado PET y cal. Entre las propiedades más relevantes a evaluar se encuentran el CBR, la densidad seca máxima y el contenido de humedad óptima.

## **4.3 Población, muestra**

### **Población**

De acuerdo con (Arias, 2006) la población es un conglomerado acotado o ilimitado de componentes similares que validan los resultados del estudio, independientemente de su magnitud numérica (p. 83). Se considera como población con el fin de llevar a cabo la investigación al material granular extraído de la cantera de Condebamba, dicho material granular está destinado para la producción de afirmado.

### **Muestra**

Es un subgrupo de la población cuidadosamente seleccionando una muestra representativa esencial para extrapolar hallazgos al conjunto total de individuos estudiados, esta sección debe reflejar las características del conjunto definido para que se pueda contener las características de la población. (Toledo D. L. 2016, p. 5).

La cantera de Condebamba por el material granular que contiene es usada como material para afirmado opción económica para vías rurales con escasa circulación vehicular aledañas a la ciudad de Abancay y por lo tanto el plástico reciclado PET y la Cal. El volumen de número de pruebas determinará el tamaño de la muestra seleccionada que se realizaran según el “Manual de Especificaciones Técnicas Generales para Construcción, EG – 2013”, conjuntamente usando el Manual de Ensayo de Materiales del MTC – 2016.

### **Muestreo**

En la tesis se utilizó un muestreo no probabilístico – intencional, la elección de componentes se realizó de manera discrecional, aprovechando el conocimiento previo sobre los atributos distintivos del grupo poblacional bajo análisis en la investigación actual, esto nos permite una evaluación focalizada en los aspectos más relevantes del material granular analizado.

## **4.4 Instrumentos**

### **Técnicas e instrumentos empleados en la investigación**

La obtención de información dependerá de los instrumentos normalizados. Datos adquiridos mediante observación, calculo y registro de fuentes diversas. Se emplean instrumentos de observación, estimación y registro documental, se seleccionan temas provocados en evaluaciones previas o se crean nuevos basados en cuestionarios escritos. Estos se someten a pruebas y se modifican según sea necesario. Las preguntas, los objetos o los indicadores de medición son explícitos con perspectivas de opciones de respuesta o clasificaciones predeterminadas. (Hernández et al., 2014, p.12).

### **Instrumentos**

Los dispositivos mecánicos y eléctricos que se emplearon en el proceso de recopilación de información son conocidos como tales. En relación con la recopilación de

información, se ofrece un listado de los formatos empleados, según el tipo de ensayo que se realizará a lo largo del proceso de elaboración de la tesis.

**Tabla 8**

*Formato de resultados de ensayos a realizar.*

Norma	Formato de ensayo	Suelo	Suelo +
		Natural	PET + Cal
MTC E 107	Análisis granulométrico por tamizado	X	
MTC E 110	Límites de consistencia	X	
MTC E 108	Determinación de contenido de humedad	X	
MTC E 207	Abrasión los ángeles	X	
MTC E 114	Equivalente de arena	X	
MTC E 115	Compactación - Proctor modificado	X	X
MTC E 132	Relación de soporte california (CBR)	X	X

*Nota:* La tabla representa los ensayos que se realizaran durante la tesis para obtener los datos necesarios, elaboración propia.

### Técnicas

- a) **Observación:** La información se recopiló mediante la observación directa. Muñoz (2012). “La observación es de vital importancia para toda investigación, por lo que el investigador necesita de estas obtener la mayor cantidad de información posible, en esta tesis se utiliza la observación directa, que se define como la revisión directa a un fenómeno, para evaluar cada una de las perspectivas innatas a su forma de comportamiento y características. Para evaluar el comportamiento e informar de los resultados de las pruebas que se realizaran al material granular de cantera para afirmado como para la adición de tereftalato de polietileno (PET) más cal al material granular de cantera.

- b) **Pruebas estandarizadas:** Para esta tesis se tomará como referencia los ensayos normados por el manual de ensayos de materiales RD N° 18 – 2016 – MTC y la norma técnica peruana E – 050 suelos y cimentaciones, las cuales se aplicarán para cada uno de los ensayos de laboratorio de mecánica de suelos realizados en la investigación.

#### 4.5 Procedimientos

También conocida como prueba de significancia, la finalidad primordial de la prueba de hipótesis es evaluar una hipótesis o afirmación sobre un valor estadístico de una población (llamado parámetro). Las hipótesis deben formularse correcta o lógicamente y pueden ser refutadas mediante el análisis estadístico. (Bencardino, 2012, p. 324).

En la presente tesis se empleará la distribución t de Student donde se tomará en cuenta la hipótesis nulas y alternas, con dicha distribución se podrá diferenciar entre dos medias muestrales.

**Hipótesis nula**  $H_0: [\mu_x = \mu_y]$ : “Esta es una forma de especificar los parámetros que serán validos por los resultados de la prueba” (Bencardino, 2012, p. 328).

**Hipótesis alterna**  $H_a: [\mu_x > \mu_y], [\mu_x < \mu_y], [\mu_x \neq \mu_y]$ : “Se diferencia de la hipótesis nula, es decir, proporciona una hipótesis alternativa que demuestra que la hipótesis nula es falsa. La hipótesis alternativa establece que el parámetro puede ser mayor (prueba unilateral a la derecha), más pequeño (prueba bilateral) o también denominada (prueba de dos colas) como lo propone la hipótesis nula” (Bencardino, 2012, p. 328).

La hipótesis nula que se propone se prueba mediante el análisis de estadísticas paramétricas utilizando la distribución de t “Student” para verificar la diferencia entre dos medias muestrales.

### **Procedimiento utilizado en las pruebas de hipótesis**

Bencardino (2012), utilizo su libro de estadística y muestreo para describir como desarrollar las pruebas de hipótesis, siguiendo este proceso:

- Formular las hipótesis  $H_0$ ,  $H_a$ .
- Determinar el grado o nivel de significancia.
- Estimar la varianza o discrepancia.
- Establecer la metodología o técnica y la prueba estadística.
- Identificar los valores críticos y las áreas o regiones de rechazo.
- Calcular los datos muestrales.
- Tomar una decisión estadística sobre aceptar o rechazar.

El procedimiento utilizado para desarrollar las pruebas de hipótesis propuestas se detalla a continuación, pero cabe mencionar que se realizaron las pruebas para cada una de las hipótesis específicamente al material granular destinado al afirmado con y sin incorporación de PET y Cal en la cantera de Condebamba.

#### **4.6 Análisis de datos**

##### **a) Planteamiento de la hipótesis**

Para la prueba de hipótesis se consideró una prueba bilateral, debido al estudio que contempla medir el efecto de la incorporación de plástico reciclado PET y Cal al material granular destinado al afirmado de la cantera de Condebamba, es decir, que se desconoce los resultados a obtener, ya que hay la posibilidad de que los resultados sean positivos o negativos.

$$H_0 : [\mu_x = \mu_y]$$

$$H_a : [\mu_x \neq \mu_y]$$

Donde:

$H_0$ = hipótesis nula

$H_a$  = hipótesis alterna

**b) Nivel de significación o significancia**

Se considera un nivel de significancia o error del 5% en las investigaciones, por eso es que  $\alpha = 0.05$ , es así que nos indica la probabilidad de equivocarse.

**c) Estadístico**

Para distinguir dos medidas muestrales se utilizará la distribución t de student. El estadístico se calculará mediante las siguientes formulas:

**Ecuación 17** “t” calculado.

$$t = \frac{\bar{x} - \bar{y}}{\sqrt{\frac{s^2}{n_1} + \frac{s^2}{n_2}}}$$

**Ecuación 18** Desviación estándar.

$$s^2 = \frac{\sum(x_i - \bar{x})^2 + \sum(y_i - \bar{y})^2}{n_1 + n_2 - 2}$$

Donde:

$t = t_c$  (“t” calculado)

$\bar{x}$  = Promedio de la muestra 1 (con adición ACR)

$\bar{y}$  = Promedio de la muestra 2 (sin adición ACR)

$n_1$  = Muestra 1 (con adición ACR)

$n_2$  = Muestra 2 (sin adición ACR)

$s^2$  = Desviación estándar

**d) Determinación de la región crítica**

Se dispuso como una prueba bilateral, debido a que se desconoce si la incorporación de plástico reciclado PET y Cal al material granular destinado al afirmado de la cantera de Condebamba, influye de manera positiva o negativa. Por lo que el nivel de significancia

(asumido del 5%) se dividió equitativamente, asignado 2.5% a cada cola en ambos extremos, es decir, ambas tendrán el valor de  $\alpha = 0.025$ . la región crítica se determina con el “t” tabulado, determinándose mediante la siguiente figura:

**Figura 18**

*Table de datos de la distribución “t” Student.*

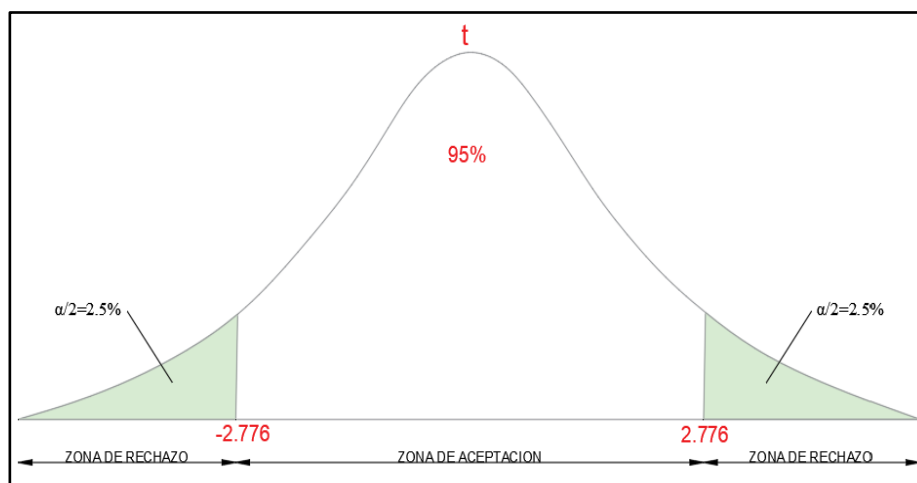
		$\alpha/2$												
		0,0005	0,001	0,005	0,01	0,025	0,05	0,1	0,2	0,25	0,3	0,4	0,45	0,475
v grados de libertad	1	636,619	318,309	63,657	31,821	12,706	6,314	3,078	1,376	1,000	0,727	0,325	0,158	0,079
	2	31,599	22,327	9,925	6,965	4,303	2,920	1,886	1,061	0,816	0,617	0,289	0,142	0,071
	3	12,924	10,215	5,841	4,541	3,182	2,353	1,638	0,978	0,765	0,584	0,277	0,137	0,068
	4	8,610	7,173	4,604	3,747	2,776	2,132	1,533	0,941	0,741	0,569	0,271	0,134	0,067
	5	6,869	5,893	4,032	3,365	2,571	2,015	1,476	0,920	0,727	0,559	0,267	0,132	0,066
	6	5,959	5,208	3,707	3,143	2,447	1,943	1,440	0,906	0,718	0,553	0,265	0,131	0,065
	7	5,408	4,785	3,499	2,998	2,365	1,895	1,415	0,896	0,711	0,549	0,263	0,130	0,065
	8	5,041	4,501	3,355	2,896	2,306	1,860	1,397	0,889	0,706	0,546	0,262	0,130	0,065
	9	4,781	4,297	3,250	2,821	2,262	1,833	1,383	0,883	0,703	0,543	0,261	0,129	0,064
	10	4,587	4,144	3,169	2,764	2,228	1,812	1,372	0,879	0,700	0,542	0,260	0,129	0,064
	11	4,437	4,025	3,106	2,718	2,201	1,796	1,363	0,876	0,697	0,540	0,260	0,129	0,064
	12	4,318	3,930	3,055	2,681	2,179	1,782	1,356	0,873	0,695	0,539	0,259	0,128	0,064
	13	4,221	3,852	3,012	2,650	2,160	1,771	1,350	0,870	0,694	0,538	0,259	0,128	0,064
	14	4,140	3,787	2,977	2,624	2,145	1,761	1,345	0,868	0,692	0,537	0,258	0,128	0,064
	15	4,073	3,733	2,947	2,602	2,131	1,753	1,341	0,866	0,691	0,536	0,258	0,128	0,064
	16	4,015	3,686	2,921	2,583	2,120	1,746	1,337	0,865	0,690	0,535	0,258	0,128	0,064
	17	3,965	3,646	2,898	2,567	2,110	1,740	1,333	0,863	0,689	0,534	0,257	0,128	0,064
	18	3,922	3,610	2,878	2,552	2,101	1,734	1,330	0,862	0,689	0,534	0,257	0,127	0,064
	19	3,883	3,579	2,861	2,539	2,093	1,729	1,328	0,861	0,688	0,533	0,257	0,127	0,064
	20	3,850	3,552	2,845	2,528	2,086	1,725	1,325	0,860	0,687	0,533	0,257	0,127	0,063
	21	3,819	3,527	2,831	2,518	2,080	1,721	1,323	0,859	0,686	0,532	0,257	0,127	0,063
	22	3,792	3,505	2,819	2,508	2,074	1,717	1,321	0,858	0,686	0,532	0,256	0,127	0,063
	23	3,768	3,485	2,807	2,500	2,069	1,714	1,319	0,858	0,685	0,532	0,256	0,127	0,063
	24	3,745	3,467	2,797	2,492	2,064	1,711	1,318	0,857	0,685	0,531	0,256	0,127	0,063
	25	3,725	3,450	2,787	2,485	2,060	1,708	1,316	0,856	0,684	0,531	0,256	0,127	0,063
	26	3,707	3,435	2,779	2,479	2,056	1,706	1,315	0,856	0,684	0,531	0,256	0,127	0,063
	27	3,690	3,421	2,771	2,473	2,052	1,703	1,314	0,855	0,684	0,531	0,256	0,127	0,063
	28	3,674	3,408	2,763	2,467	2,048	1,701	1,313	0,855	0,683	0,530	0,256	0,127	0,063
	29	3,659	3,396	2,756	2,462	2,045	1,699	1,311	0,854	0,683	0,530	0,256	0,127	0,063
	30	3,646	3,385	2,750	2,457	2,042	1,697	1,310	0,854	0,683	0,530	0,256	0,127	0,063
	31	3,633	3,375	2,744	2,453	2,040	1,696	1,309	0,853	0,682	0,530	0,256	0,127	0,063
	32	3,622	3,365	2,738	2,449	2,037	1,694	1,309	0,853	0,682	0,530	0,255	0,127	0,063
	33	3,611	3,356	2,733	2,445	2,035	1,692	1,308	0,853	0,682	0,530	0,255	0,127	0,063
	34	3,601	3,348	2,728	2,441	2,032	1,691	1,307	0,852	0,682	0,529	0,255	0,127	0,063
	35	3,591	3,340	2,724	2,438	2,030	1,690	1,306	0,852	0,682	0,529	0,255	0,127	0,063
$\alpha$		0,001	0,002	0,01	0,02	0,05	0,1	0,2	0,4	0,5	0,6	0,8	0,9	0,95

*Nota:* Coeficientes para el cálculo de la región crítica en una distribución “t”. Bencardino (2012).



**Figura 19**

*Diagrama bilateral de la distribución “t” Student.*



*Nota:* Se observan las zonas (regiones) de aceptación y rechazo de la distribución “t” para pruebas bilaterales de un nivel de significancia de 5%, (Quispe, 2021, p. 61).

Para la región crítica  $t_t$  se deberá calcular mediante la figura 18, necesitamos:

**Ecuación 19** Grados de libertad.

$$gl = (n_1 + n_2 - 2)$$

Donde:

$n_1$  = corresponde a la muestra con incorporación de PET y cal.

$n_2$  = corresponde a la muestra sin incorporación de PET y cal.

$\alpha$  = nivel de significancia.

**e) Adoptar una decisión**

Una vez obtenido los resultados del cálculo del estadístico y el nivel de significancia dado para la región o área crítica, se culmina aceptando o rechazando la hipótesis nula.

#### **4.7 Consideraciones éticas**

Las muestras tomadas en campo insitu, para el desarrollo de la tesis son representativas, es así que los datos fueron procesados con la máxima precisión, honestidad y seriedad. la presente investigación elaborada es genuina y no constituye plagio ni reproducción de investigaciones, publicaciones o trabajos similares elaborados por cualquier persona o entidad.

Es importante tener en cuenta que el artículo de tesis se han hecho referencias a otros autores debidamente citadas y, por lo tanto, no reclamo como propia ninguna información obtenida de medios digitales, escritos o en línea.

## V. Resultados y discusión

### 5.1 Resultados

#### 5.1.1 Ubicación de la cantera y muestreo de los agregados

Para todo estudio de canteras o fuentes de materiales para la conformación de la superficie de rodadura de una carretera en este caso afirmado, inicialmente se requiere la ubicación de las canteras las cuales tengas buenas aptitudes para ser usadas como material para afirmado, posteriormente se requiere los estudios detallados de las propiedades de dicho material.

Los trabajos de campo consistirán en la identificación de la cantera de material granular que se utilizara para la conformación del afirmado en la ciudad de Abancay. Se tomaron muestras representativas de la cantera de Condebamba, que se encuentra ubicada en la zona noreste de la ciudad de Abancay (ver figura 20). Las canteras según su tipo de explotación son a cielo abierto tal como se muestra en la figura 21.

#### Figura 20

*Ubicación de la cantera de Condebamba.*



*Nota:* Ubicación de la cantera tomada para la investigación. Adaptada de Google Earth.

### **Cantera Condebamba**

**Ubicación:** Noreste de la ciudad de Abancay, lado Norte del estadio de Condebamba

**Coordenadas:** Este: 730152, Norte: 8491882, Cota: 2248 msnm

**Tipo de agregado:** Agregado natural

**Origen:** Aluvial – Coluvial

**Roca:** Granodiorita y andesitas

**Tipo de explotación:** A cielo abierto

#### **Figura 21**

*Cantera Condebamba.*



*Nota:* Se observa la estratificación del material de cantera de Condebamba.

#### **5.1.1.1 Muestreo de cantera**

Para la obtención de las muestras de material granular de la cantera en estudio, se utilizaron los ensayos que se ejecutaran a criterio. Es así que las muestras que se llevaron al laboratorio de mecánica de suelos sean las suficientes para llevar a cabo los ensayos y sea representativa.

**Figura 22**

*Muestreo de la cantera Condebamba.*



*Nota:* Material granular destinado al afirmado, zarandeo por una malla de 2 ½ pulg. de diámetro, elaboración propia.

**5.1.1.2 Estudio de los agregados**

Realizar el estudio de las propiedades de los agregados que se caracterizan por ser (agregado grueso y fino) es primordial. Ya que nos permite tener una mejor comprensión de las aptitudes que estas presentan para ser usadas con la finalidad que se pretenda dar.

Para obtener la mejor caracterización de los materiales de la cantera a utilizar en el desarrollo del estudio de esta tesis, se procedieron a ejecutar todos los ensayos que se requieren para el material granular destinado al afirmado dados por la norma, las cuales son:

- Análisis granulométrico por tamizado
- Contenido de humedad
- Límites de consistencia
- Equivalente de arena
- Abrasión los ángeles
- Proctor modificado
- CBR (relación de soporte California)

Los ensayos anteriormente mencionados se llevaron a cabo en muestras representativas de la cantera de Condebamba, así mismo también con la incorporación de PET y cal en ciertos ensayos. Por lo tanto, se utilizaron los procedimientos estandarizados establecidos en las normas del MTC correspondientes para el ámbito del transporte vial, realizando la comparación de los resultados obtenidos con la incorporación de plástico reciclado PET y cal al material granular destinado al afirmado de la cantera de Condebamba versus el material granular destinado al afirmado de la cantera de Condebamba en estado natural.

### 5.1.2 Propiedades físicas.

#### 5.1.2.1 Análisis granulométrico por tamizado MTC E 107

Estos son los resultados que se obtuvieron del ensayo de análisis granulométrico por tamizado a la cantera de Condebamba, se muestra en la siguiente tabla:

#### Figura 23

*Ensayo de análisis granulométrico de la cantera Condebamba.*



*Nota:* Se realizó el cuarteo, zarandeo y separación por tamices el material retenido en cada malla, elaboración propia.

**Tabla 9**

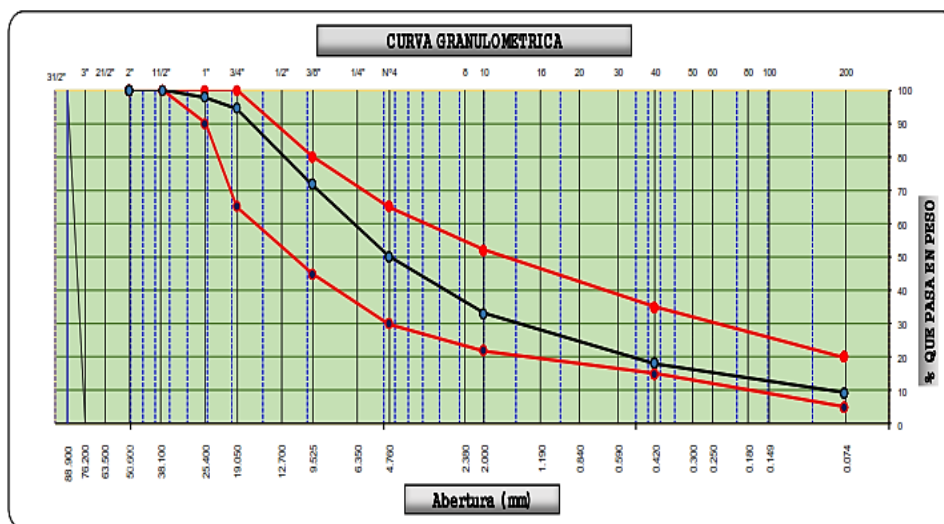
*Resultados del análisis granulométrico de la cantera Condebamba.*

Cantera - Condebamba		
Tamiz	Abertura (mm)	% Que Pasa
1 1/2'	37.500	100.0
1"	25.400	97.9
3/4"	19.050	94.6
1/2"	12.700	82.2
3/8"	9.525	71.8
N°4	4.760	50.1
N°10	2.000	33.1
N°20	0.840	23.5
N°40	0.420	18.0
N°60	0.250	14.5
N°100	0.149	11.5
N°200	0.075	9.4

*Nota:* Resultados del ensayo de Granulometría (% Que pasa) de la cantera Condebamba, elaboración propia.

**Figura 24**

*Curva granulométrica de la cantera Condebamba.*



*Nota:* Curva granulométrica de la cantera de Condebamba, elaboración propia.

Se realizaron todos los ensayos requeridos mediante el manual de ensayo de materiales EM - 2016 del Ministerio de Transporte y Comunicaciones y el reglamento nacional edificaciones E.050 suelos y cimentaciones.

**Tabla 10**

*Contenido de material en porcentajes de la cantera de Condebamba.*

Material	(% de material)
Grava	49.9
Arena	40.7
Limo y arcillas	9.4

*Nota:* Elaboración propia.

De la tabla 10, se puede observar que los porcentajes de grava, arena y arcillas, es el contenido de material de cantera que es requerido para su uso como afirmado, por eso que se toma como muestra de estudio.

### 5.1.2.2 Límites de consistencia MTC E 110 – MTC E 111.

Este ensayo nos permitirá conocer las propiedades de plasticidad y liquidez o fluidez del material granular destinado al afirmado de la cantera Condebamba.

**Figura 25**

*Ensayo de límites de atterberg.*



*Nota:* elaboración propia.



**Tabla 11***Límites de atterberg de la cantera de Condebamba.*

Cantera	L.L	L.P	I.P
Cantera Condebamba	29.63%	21.63%	8.00%

*Nota:* Elaboración propia.

De los valores obtenidos de la tabla 11, según el Manual de carreteras suelos, geología, geotecnia y pavimentos, se puede deducir que los valores de IP (índice de plasticidad) del material granular destinado al afirmado de la cantera de Condebamba se encuentra entre  $7 < IP \leq 20$ ; lo que indica que se trata de suelos de plasticidad media.

### 5.1.2.3 Clasificación SUCS y AASHTO

Para obtener la clasificación SUCS, se deberá considerar la granulometría, también los valores del porcentaje que pasan la malla N° 200 y N° 4, así como las propiedades plásticas. Para obtener la clasificación AASHTO, se deberá tener en cuenta la granulometría, también los valores del porcentaje que pasan la malla N° 10, N° 40 y N° 200, así mismo las propiedades plásticas.

**Tabla 12***Clasificación de suelos SUCS Y AASHTO.*

Cantera	Clasificación SUCS	AASHTO
	GP – CG Grava mal	
Cantera Condebamba	graduada con arcilla con arena	A-2-4 (0)

*Nota:* Referencia de la carta de plasticidad, la tabla de clasificación se suelos según AASHTO, elaboración propia.

### 5.1.2.4 Contenido de humedad MTC E 108

Con el contenido de humedad uno se puede dar una idea aproximada del contenido óptimo de humedad que debe tener el suelo para que tenga buena compactación.

**Tabla 13**

*Contenido de humedad.*

Contenido de humedad	
Cantera	(W%)
Cantera Condebamba	12.70%

*Nota:* Elaboración propia.

### 5.1.2.5 Equivalente de arena MTC E 114

Se determina la proporción relativa de los suelos arcillosos o finos y polvo en suelos granulares y agregados que pasan la malla N° 4. Es así que se indica la cantidad de suelo grueso deseable (arena) vs suelos indeseables (arcillas o finos) presentes en una muestra.

**Figura 26**

*Ensayo de equivalente de arena.*



*Nota:* Se realizó el ensayo de equivalente de arena como especifica el MTC E 114, elaboración propia.

**Tabla 14***Equivalente de arena.*

Equivalente de arena	
Cantera	(%)
Cantera Condebamba	32.29%

*Nota:* Elaboración propia.**5.1.2.6 Abrasión los ángeles MTC E 207**

Es utilizado para evaluar la resistencia al desgaste y la abrasión de los agregados, lo que os proporciona información importante sobre la durabilidad y calidad de los materiales granulares. Se utilizarán agregado grueso menor de 37.5 mm (1 1/2”).

**Figura 27***Ensayo de abrasión los ángeles.*

*Nota:* Se realizó el ensayo de abrasión los ángeles de acuerdo al MTC E 207, Elaboración propia.

**Tabla 15***Abrasión los ángeles.*

Abrasión los ángeles	
Cantera	(%)
Cantera Condebamba	30.38%

*Nota:* Elaboración propia.

### 5.1.3 Propiedades mecánicas

#### 5.1.3.1 Proctor modificado muestra natural MTC E 115

El proctor modificado se determinará con la afinidad entre el contenido de humedad y peso específico seco, posteriormente se obtendrá la curva compactación de la muestra natural de suelo con el objetivo de calcular la densidad seca máxima y contenido óptimo de agua.

**Figura 28**

Ensayo de proctor modificado.



*Nota:* Se realizó el ensayo de proctor modificado de acuerdo al MTC E 115, elaboración propia.

**Tabla 16**

Proctor modificado muestra natural.

Cantera	MDS	OCH
Cantera	2.27	7.24
Condebamba		

*Nota:* Elaboración propia.

### 5.1.3.2 Ensayo CBR (muestra natural) MTC E 132

Una vez realizado el ensayo de CBR de la muestra natural granular de cantera para afirmado, luego se comparará con los valores de CBR que obtuvieron de la incorporación de plástico reciclado PET y cal en sus diferentes porcentajes de dosificación.

**Figura 29**

*Ensayo de relación de soporte californiana (CBR).*



*Nota:* Ensayo de relación de soporte californiana (CBR), según el manual de ensayos del MTC E 132, elaboración propia.

**Tabla 17**

*Resultados de CBR muestra natural.*

Cantera Condebamba	CBR 0.1" (%)
56 golpes	52.93
25 golpes	43.83
12 golpes	35.75
CBR - 95 %	39.89
CBR - 100%	52.93

*Nota:* Elaboración propia.

**Tabla 18***Resumen de resultados de la cantera de Condebamba.*

Ensayo	Resultados
	Cantera Condebamba
Análisis Granulométrico por tamizado	% Grava :49.9
	% Arena:40.7
	% Finos: 9.4
Contenido de humedad (%)	12.70 %
Límite líquido (%)	29.63 %
Límite plástico (%)	21.63 %
Índice de plasticidad (%)	8 %
Clasificación SUCS	GP-GC
Clasificación AASHTO	A-2-4 (0)
Densidad máxima seca ( $gr/cm^3$ )	2.27 $gr/cm^3$
Humedad óptima (%)	7.24 %
CBR 0.1" 56 golpes	16.67 %
CBR 0.1" 25 golpes	12.00 %
CBR 0.1" 12 golpes	8.33 %
Equivalente de arena (%)	32.29 %
Abrasión los Ángeles (%)	30.38 %

*Nota:* Resumen de resultados de los ensayos realizados a la cantera de Condebamba, elaboración propia.

### 5.1.3.3 Incorporación de PET y cal a la cantera de Condebamba

Se le incorporo el plástico reciclado triturado PET y cal a la muestra de material granular, diversas proporciones de material extraído de Condebamba, empleando su distribución granulométrica original para análisis comparativo.

Se realizaron diferentes combinaciones de material granular de la cantera de Condebamba en estado natural para afirmado e ir incorporándole el plástico reciclado triturado PET y cal tal como se muestra en la tabla 11, obteniéndose así las características físicas y mecánicas.

#### Figura 30

*Incorporación al material granular para afirmado + PET + cal.*



*Nota:* Se realiza la incorporación de PET + cal en distintos porcentajes, al material granular destinado al afirmado de la cantera de Condebamba, elaboración propia.

#### Tabla 19

*Porcentajes empleados de cantera natural + PET + cal.*

Plástico reciclado PET (triturado)	Cal (CaO)
1% - PET	1% - CaO
2% - PET	2% - CaO
3% - PET	3% - CaO
4% - PET	4% - CaO
5% - PET	5% - CaO

*Nota:* Se muestran las diferentes proporciones aplicadas a la cantera de Condebamba, elaboración propia.

Las proporciones de plástico reciclado triturado PET y cal como incorporación al material granular de cantera para afirmado, de acuerdo al volumen inicial de muestra representativa que se usara para dichos ensayos.

#### 5.1.3.4 Resultados del ensayo de Proctor modificado (Condebamba + PET + cal)

Para los ensayos de proctor modificado se realizaron según el manual de ensayos de materiales MTC E 115.

**Figura 31**

*Ensayo proctor modificado cantera Condebamba + PET + cal.*



*Nota:* Ensayo de proctor modificado de material de cantera para afirmado más la incorporación de PET y cal en diferentes porcentajes, elaboración propia.

Se muestra a continuación los siguientes resultados:

**Tabla 20**

*Resultados de proctor modificado material de cantera + PET + cal.*

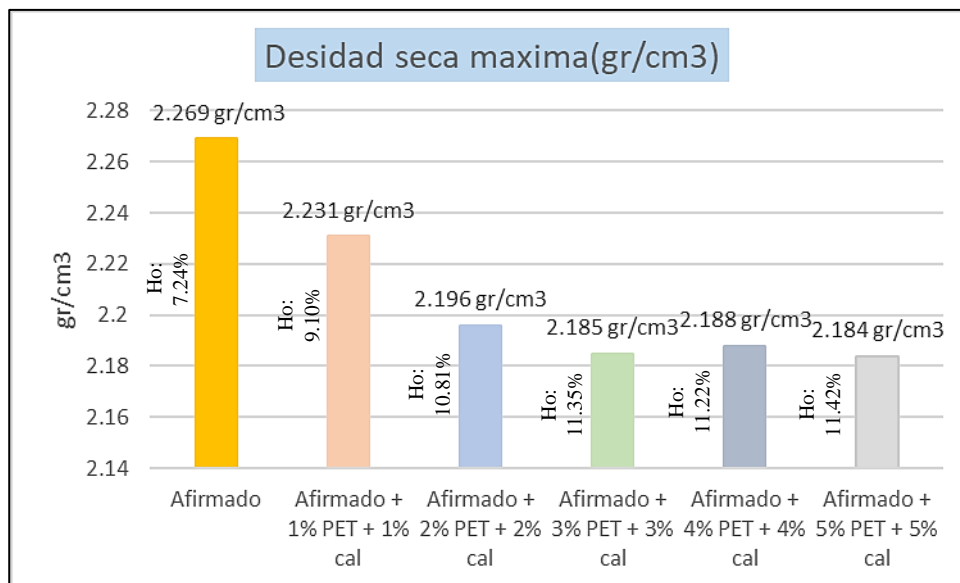
Cantera	Densidad Máxima	Humedad Optima
Condebamba	2.269 gr/cm <sup>3</sup>	7.24%
Condebamba + 1% PET + 1% cal	2.231 gr/cm <sup>3</sup>	9.10%
Condebamba + 2% PET + 2% cal	2.196 gr/cm <sup>3</sup>	10.81%
Condebamba + 3% PET + 3% cal	2.185 gr/cm <sup>3</sup>	11.35%
Condebamba + 4% PET + 4% cal	2.188 gr/cm <sup>3</sup>	11.22%
Condebamba + 5% PET + 5% cal	2.184 gr/cm <sup>3</sup>	11.42%

*Nota:* Resultados de ensayos de Proctor modificado de material para afirmado más la incorporación de PET y cal, elaboración propia.



**Figura 32**

*Resultados de la densidad máxima seca de la incorporación de PET y cal al material granular para afirmado.*



*Nota:* Elaboración propia.

Resultados de proctor modificado del material granular destinado al afirmado de la cantera de Condebamba, se contempla una disminución de la densidad aparente edáfica evoluciona con la incorporación de las adiciones de PET y cal. Lo que ocurre lo contrario con el óptimo contenido de humedad el cual tiende a incrementar con cada incorporación de PET y cal con respecto al material granular destinado al afirmado de la cantera de Condebamba.

#### **5.1.3.5 Resultados del valor de CBR (Condebamba + PET + cal)**

Para obtener el valor de CBR, se realizó según el manual de ensayos de materiales MTC E 132, mediante el siguiente procedimiento:

En primer lugar, se inició con la compactación de 03 muestras la cuales presentan un nivel óptimo de humedad determinado mediante el ensayo de proctor modificado, estas muestras se compactaron utilizando diferentes energías, aplicando 56, 25 y 12 golpes respectivamente. Posteriormente, se procedió a la fase de saturación que se extendió por 96

horas o hasta que cesara la expansión del material. Una vez culminado este periodo, se procederá a discurrir el agua de saturación durante un aproximado de 15min. luego cada muestra será sometida a la prensa de compresión de CBR puede ser automatizada o manual con el cual se estará determinando características físicas del terreno en diferentes estados de compactación y saturación.

**Figura 33**

*Ensayo de CBR cantera Condebamba + PET + cal.*



*Nota:* Preparación y comparación de las muestras de material granular destinado al afirmado de cantera más la incorporación de PET y cal en diferentes porcentajes, elaboración propia.

**Figura 34**

*Ensayo de CBR cantera Condebamba + PET + cal.*



*Nota:* Ejecución de Ensayo de relación de soporte californiana (CBR) de material de cantera para afirmado más la incorporación de PET y cal en diferentes porcentajes, elaboración propia.

**Tabla 21**

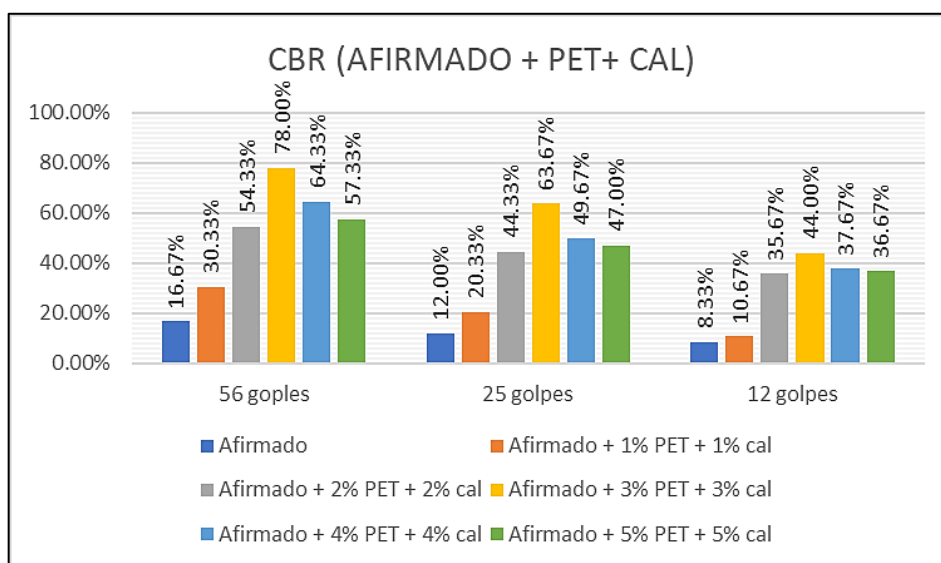
*Resultados de CBR de la incorporación de PET + cal + afirmado.*

Cantera	CBR 0.1 pulg. de penetración			
	56	25	12	Expansión
	golpes	golpes	golpes	(%)
Condebamba	16.67%	12.00%	8.33%	0.00 %
Condebamba + 1% PET + 1% cal	30.33%	20.33%	10.67%	0.00 %
Condebamba + 2% PET + 2% cal	54.33%	44.33%	35.67%	0.00 %
Condebamba + 3% PET + 3% cal	78.00%	63.67%	44.00%	0.00 %
Condebamba + 4% PET + 4% cal	64.33%	49.67%	37.67%	0.00%
Condebamba + 5% PET + 5% cal	57.33%	47.00%	36.67%	0.00%

*Nota:* Resultados del ensayo de relación de soporte californiana (CBR) de material de cantera para afirmado más la incorporación de PET y cal en diferentes porcentajes, elaboración propia.

**Figura 35**

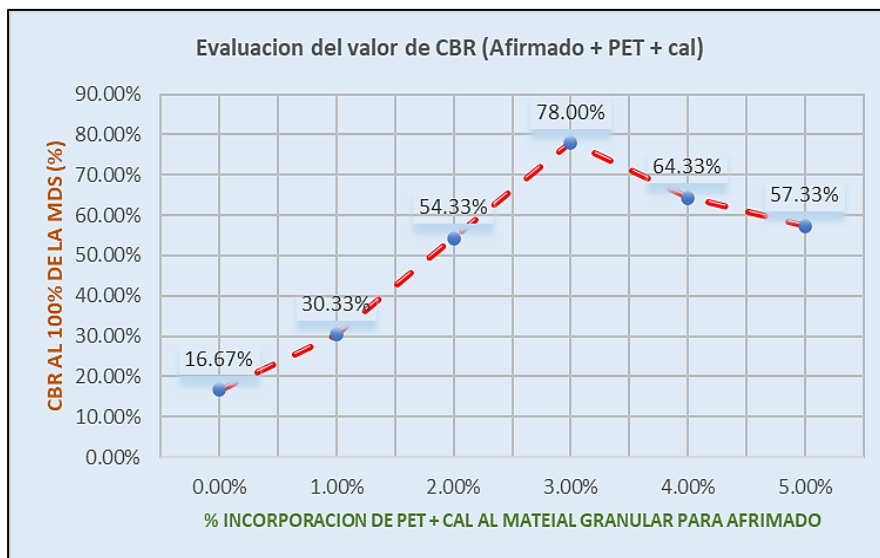
*Resultados de CBR, incorporación de PET + cal al material granular para afirmado.*



*Nota:* Se pueden observar las diferentes variaciones del CBR respecto a la incorporación de PET + cal al material granular destinado al afirmado de la cantera de Condebamba, elaboración propia.

### Figura 36

*Evaluación del valor de CBR, incorporación de PET + cal al material granular para afirmado.*



*Nota:* Se observa cómo evoluciona el valor del CBR de las incorporaciones realizadas, elaboración propia.

Por lo tanto, podemos decir que de los resultados obtenidos del valor de CBR, se estaría observando que inicia al incorporar el afirmado + 1% PET + 1% cal (30.33%), sigue con un aumento al incorporar el afirmado + 2% PET + 2% cal (54.33%), sigue aumentando al incorporar el afirmado + 3% PET + 3% cal (78.00%), luego presenta un decrecimiento a partir de la incorporación de afirmado + 4% PET + 4% cal (64.33%), de ahí continua el decrecimiento del valor con la incorporación de Afirmado + 5% PET + 5% cal (57.33%) de CBR. durante la fase de inmersión, se nota que el material se expande de manera específica para cada caso de las incorporaciones de PET + cal al material granular destinado al afirmado de la cantera de Condebamba, las muestras compactadas no presentan expansión.

**Tabla 22**

*Resumen de resultados de incorporación de PET + cal + afirmado.*

Ensayo	Resultados	
	Humedad	CBR 0.1"
	Optima	al 100%
	(%)	MDS
Afirmado	7.24 %	16.67 %
Afirmado + 1% PET + 1% cal	9.10 %	30.33 %
Afirmado + 2% PET + 2% cal	10.81 %	54.33 %
Afirmado + 3% PET + 3% cal	11.35 %	78.00%
Afirmado + 4% PET + 4% cal	11.22 %	64.33 %
Afirmado + 5% PET + 5% cal	11.42 %	57.33 %

*Nota:* Resultados de la incorporación de PET + cal en diferentes porcentajes al material granular destinado al afirmado de la cantera Condebamba, elaboración propia.

## 5.2 Discusión de resultados

De los resultados obtenidos del material granular destinado al afirmado de la cantera Condebamba, se realizó la incorporación de plástico reciclado PET + cal en diferentes porcentajes. Donde que los porcentajes incorporados en la presente investigación fueron: afirmado + 1% PET + 1% cal, afirmado + 2% PET + 2% cal, afirmado + 3% PET + 3% cal, afirmado + 4% PET + 4% cal, afirmado + 5% PET + 5% cal.

a) En lo que respecta a la relación de soporte california (CBR):

Para el material granular destinado al afirmado de la cantera de Condebamba, se obtuvieron los siguientes resultados de 16.67% de CBR, la cual corresponde al 100% de su máxima densidad seca. Por otro lado, de las incorporaciones realizadas, se obtuvieron los siguientes valores: 30.33% de CBR al incorporar afirmado + 1% PET + 1% cal, 54.33% de

CBR al incorporar afirmado + 2% PET + 2% cal, 78.00% de CBR al incorporar afirmado + 3% PET + 3% cal, 64.33% de CBR al incorporar afirmado + 4% PET + 4% cal, 57.33% de CBR al incorporar afirmado + 5% PET + 5% cal.

En su tesis Flores y Mayta (2022), abordando la investigación titulada *“Mejoramiento de las propiedades físicas y mecánicas incorporando PET y cal en la subrasante de la carretera Unocolla, Puno-2022”*, realizaron 4 calicatas en un tramo de 1 km. Obteniendo los siguientes resultados al adicionar 2% de PET y 5% de cal incrementó ligeramente el CBR al 95% se obtuvo 16.75% y la adición de 2% de PET y 5% de cal incrementó ligeramente el CBR al 100% se obtuvo 24.52%. Determinando que la dosificación óptima de PET para suelos arcillosos estaría entre 3% y 4%.

b) En lo que respecta a la Expansión:

Datos de expansión revelan hallazgos porcentuales significativos, se toman los valores de las muestras de 56 golpes se tomarán datos durante 4 días a las muestras saturadas y tras 96 horas el ensayo de CBR alcanza máxima absorción se podrá observar si hubo o no hubo reducción gradual de la expansión, el material granular de cantera para afirmado y con la incorporación de plástico reciclado PET y cal. Se puede concluir que no hubo alguna expansión que sea representativa por lo que se concluyó que debido a que es un material granular de cantera que pasa por un proceso de zarandeado o tamizado la cual lo hace óptimo para afirmado y por dichas características se concluyó que no hay expansión alguna.

c) En lo que respecta a la Densidad Seca máxima:

Los resultados de Densidad seca se obtuvieron mediante el ensayo de Proctor modificado, para el material granular de cantera para afirmado con una Densidad seca de  $2.269 \text{ gr/cm}^3$ , y posteriormente la densidad conforma se incorpora los porcentajes de plástico reciclado PET y cal, para Afirmado + 1% PET + 1% cal con una Densidad seca de

2.231 gr/cm<sup>3</sup>, Afirmado + 2% PET + 2% cal con una Densidad seca de 2.196 gr/cm<sup>3</sup>, Afirmado + 3% PET + 3% cal con una Densidad seca de 2.185 gr/cm<sup>3</sup>, Afirmado + 4% PET + 4% cal con una Densidad seca de 2.188 gr/cm<sup>3</sup>, Afirmado + 5% PET + 5% cal con una Densidad seca de 2.184 gr/cm<sup>3</sup>, determinando que con la adición de plástico reciclado PET y cal se observa que hay un decrecimiento de la densidad máxima del material granular de cantera para afirmado.

En su tesis Flores y Mayta (2022), abordando la investigación titulada *“Mejoramiento de las propiedades físicas y mecánicas incorporando PET y cal en la subrasante de la carretera Unocolla, Puno-2022”*, realizaron 4 calicatas en un tramo de 1 km. Obteniendo los siguientes resultados al adicionar 2% de PET y 5% de cal incrementó ligeramente la densidad máxima seca se obtuvo 1.90gr/cm<sup>3</sup>. Sin embargo, el análisis revela similitud estadística entre intervenciones experimentales evaluadas. Determinó que la cantidad ideal de PET para suelos con características arcillosas se encuentra en un rango del 3% al 4%.

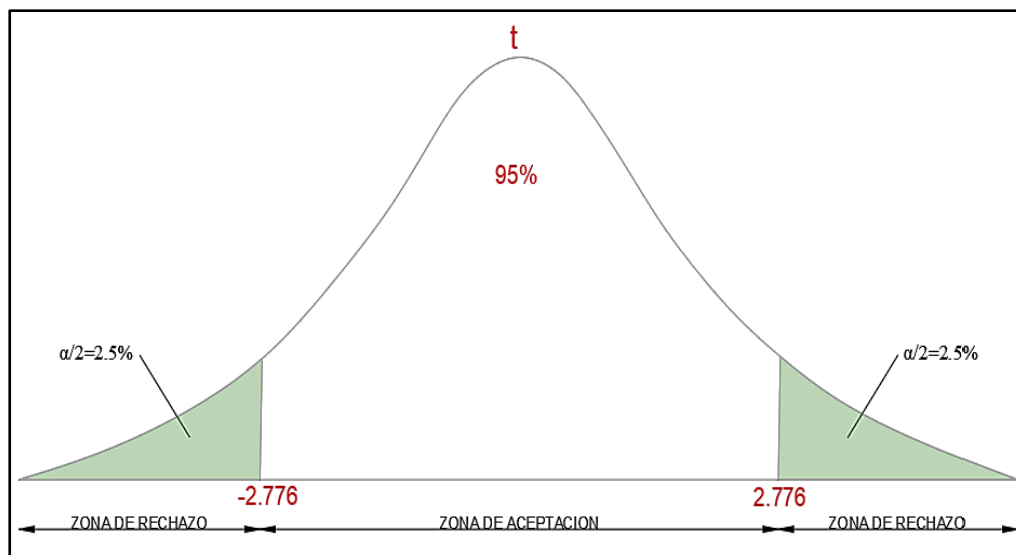
### **5.2.1 Cálculo de la región crítica**

Para el cálculo de la región crítica  $t_t$  se calculará mediante la figura 18, donde que necesitamos  $gl = (n_1 + n_2 - 2)$  es el grado de libertad. Donde,  $n_1 = 3$ ,  $n_2 = 3$  reemplazamos en la expresión anterior, así obtenemos que  $gl = 4$ , y un  $\alpha = 0.025$  el cual es bilateral (de dos colas).

Así mismo se utiliza el cuadro de la figura 18, con el cual se obtiene el  $t_t = \pm 2.776$ , donde que nos indica que se ubicará hacia el área de rechazo puede ubicarse en ambos extremos de la distribución. Esta zona crítica se emplea en todos los exámenes de conjeturas efectuados.

**Figura 37**

Diagrama de la región crítica y la región de la investigación.



*Nota:* En la figura se muestran los valores de las zonas de rechazo, elaboración propia.

## 5.2.2 Hipótesis específica 1

### 5.2.2.1 Planteamiento de la hipótesis

$H_0: [\mu_x = \mu_y]$  La incorporación de plástico reciclado PET y cal, no produce efectos significativos en el valor del CBR del material granular para afirmado de la cantera de Condebamba.

$H_a: [\mu_x \neq \mu_y]$  La incorporación de plástico reciclado PET y cal, produce efectos significativos en el valor del CBR del material granular para afirmado de la cantera de Condebamba.

### 5.2.2.2 Nivel de significancia

Se considera un  $\alpha = 5\% = 0.05$  correspondientemente. Pero como se consideró de dos colas se tomará el  $\alpha = 0.025$ .

### 5.2.2.3 Estadístico

En cuanto al estadístico “ $t_c$ ” se calculó para cada una de las incorporaciones de plástico reciclado PET y cal, el análisis inicial utilizando la información recopilada durante



la etapa preliminar en la incorporación de 1% PET + 1% cal, 2% PET + 2% cal, 3% PET + 3% cal, 4% PET + 4% cal, 5% PET + 5% cal al material granular destinado al afirmado de la cantera de Condebamba, mediante las siguientes fórmulas:

$$t_c = \frac{\bar{x} - \bar{y}}{\sqrt{\frac{s^2}{n_1} + \frac{s^2}{n_2}}}$$

$$s^2 = \frac{\sum(x_i - \bar{x})^2 + \sum(y_i - \bar{y})^2}{n_1 + n_2 - 2}$$

Donde:

$t = t_c$  (“t” calculado).

$\bar{x}$ : Media de la muestra 01 (con adición de ACR)

$\bar{y}$ : Media de la muestra 02 (sin adición de ACR)

$n_1$ : Muestra 01 (con adición de ACR)

$n_2$ : Muestra 02 (sin adición de ACR)

$s^2$ : Desviación estándar

En la siguiente tabla e imagen, se podrá observar a detalle la prueba de hipótesis realizada a la hipótesis específica 1, para las incorporaciones de plástico reciclado PET y cal en diferentes porcentajes del 1%, 2%, 3%, 4%, 5%, al material granular destinado al afirmado de la cantera de Condebamba.

**Tabla 23**

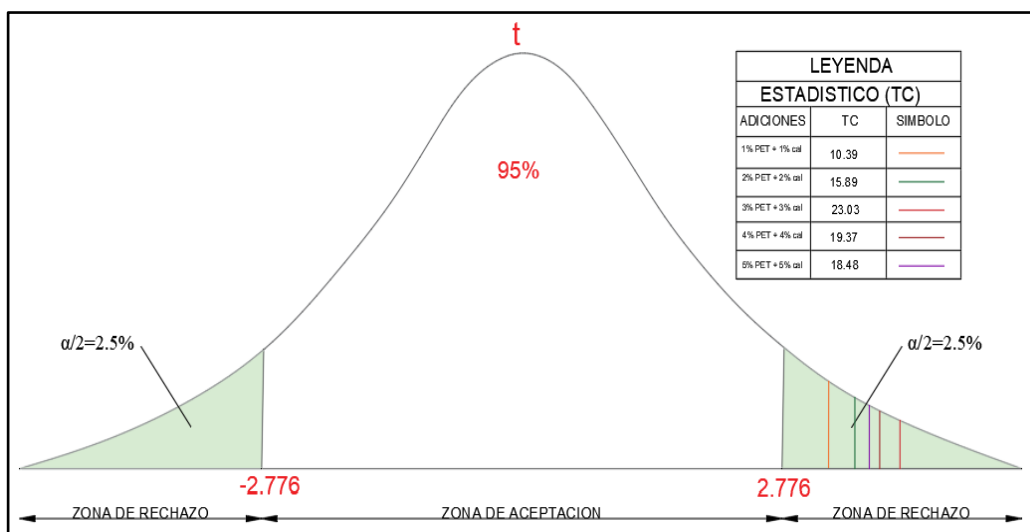
*Resultados de hipótesis específica 1 Afirmado + PET + cal.*

Descripción	Incorporación (Afirmado + PET + cal)				
	(1%PET + 1%cal)	(2%PET + 2%cal)	(3%PET + 3%cal)	(4%PET + 4%cal)	(5%PET + 5%cal)
Planteamiento de hipótesis	$H_0: [\mu_x = \mu_y]$ La incorporación de plástico reciclado PET y cal, no produce efectos significativos en el valor del CBR del material granular para afirmado de la cantera de Condebamba  $H_a: [\mu_x \neq \mu_y]$ La incorporación de plástico reciclado PET y cal, produce efectos significativos en el valor del CBR del material granular para afirmado de la cantera de Condebamba				
Nivel de significación o significancia	0.025				
"t" tabulado	2.776				
Región crítica	$<-\infty; -2.776]$ y $[2.776; +\infty>$				
"t" calculado	10.39	15.89	23.03	19.37	18.48
Condición	Si $t_c \in R.C. \Rightarrow$ Se rechaza $H_0$				
Decisión	Como $t_c \in R.C. \Rightarrow$ Se rechaza $H_0$ y se acepta $H_a=$ La incorporación de plástico reciclado PET y cal al material granular para afirmado de la cantera de Condebamba produce efectos significativos en el valor del CBR.				

*Nota:* Hallazgos estadísticos clave relacionados con la hipótesis específica 1 planteada para las incorporaciones de PET y cal al material para afirmado de la cantera de Condebamba, elaboración propia.

**Figura 38**

*Diagrama de los estadísticos de la hipótesis específica 1 muestra con incorporación de PET y cal.*



*Nota:* Se observan los valores  $t_c$  en la región crítica de las hipótesis realizadas para las diferentes incorporaciones de plástico reciclado PET y cal al material granular destinado al afirmado de la cantera de Condebamba correspondiente a la hipótesis 1, elaboración propia.

Para finalizar se concluye que: La incorporación de plástico reciclado PET y cal, causa efectos en el valor del CBR del material granular destinado al afirmado de la cantera de Condebamba.

Datos numéricos revelan impactos beneficiosos, confirmando la relación causal entre variables analizadas de la incorporación de plástico reciclado PET y cal en el valor del CBR, ya que a mayor incorporación de plástico reciclado PET y cal incrementa en su resistencia de soporte.

### 5.2.3 Hipótesis específica 2

#### 5.2.3.1 Planteamiento de la hipótesis

$H_0: [\mu_x = \mu_y]$  La incorporación de plástico reciclado PET y cal, no produce efectos significativos en la Densidad seca del material granular para afirmado de la cantera de Condebamba.

$H_a: [\mu_x \neq \mu_y]$  La incorporación de plástico reciclado PET y cal, produce efectos significativos en la Densidad seca del material granular para afirmado de la cantera de Condebamba.

### 5.2.3.2 Nivel de significancia

Se considera un  $\alpha = 5\% = 0.05$  correspondientemente. Pero como se consideró de dos colas se tomará el  $\alpha = 0.025$ .

### 5.2.3.3 Estadístico

En cuanto al estadístico “ $t_c$ ” se calculó para cada una de las incorporaciones de plástico reciclado PET y cal, iniciamos analizando la información recopilada en el estudio inicial en la incorporación de 1% PET + 1% cal, 2% PET + 2% cal, 3% PET + 3% cal, 4% PET + 4% cal, 5% PET + 5% cal al material granular para afirmado de la cantera de Condebamba:

$$t_c = \frac{\bar{x} - \bar{y}}{\sqrt{\frac{s^2}{n_1} + \frac{s^2}{n_2}}}$$

$$s^2 = \frac{\sum(x_i - \bar{x})^2 + \sum(y_i - \bar{y})^2}{n_1 + n_2 - 2}$$

Donde:

$t = t_c$  (“ $t$ ” calculado).

$\bar{x}$ : Media de la muestra 01 (con adición de ACR)

$\bar{y}$ : Media de la muestra 02 (sin adición de ACR)

$n_1$ : Muestra 01 (con adición de ACR)

$n_2$ : Muestra 02 (sin adición de ACR)

$s^2$ : Desviación estándar

En la siguiente tabla e imagen, se podrá observar a detalle la prueba de hipótesis realizada a la hipótesis específica 2, para las incorporaciones de plástico reciclado PET y

cal en diferentes porcentajes del 1%, 2%, 3%, 4%, 5%, al material granular destinado al afirmado de la cantera de Condebamba.

**Tabla 24**

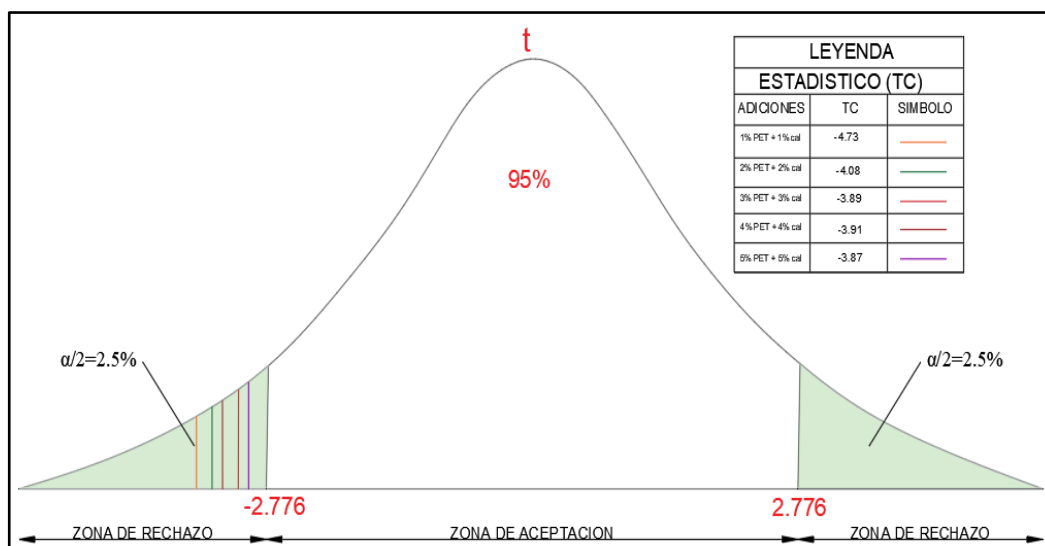
*Resultado de la hipótesis específica 2 afirmado + PET + cal.*

Descripción	Incorporación (Afirmado + PET + cal)				
	(1%PET + 1%cal)	(2%PET + 2%cal)	(3%PET + 3%cal)	(4%PET + 4%cal)	(5%PET + 5%cal)
Planteamiento de hipótesis	$H_0: [\mu_x = \mu_y]$ La incorporación de plástico reciclado PET y cal, no produce efectos significativos en la Densidad seca del material granular para afirmado de la cantera de Condebamba. $H_a: [\mu_x \neq \mu_y]$ La incorporación de plástico reciclado PET y cal, produce efectos significativos en la Densidad seca del material granular para afirmado de la cantera de Condebamba.				
Nivel de significación o significancia	0.025				
"t" tabulado	2.776				
Región crítica	$<-\infty; -2.776]$ y $[2.776; +\infty>$				
"t" calculado	-4.73	-4.08	-3.89	-3.91	-3.87
Condición	Si $t_c \in R.C. \Rightarrow$ Se rechaza $H_0$				
Decisión	Como $t_c \in R.C. \Rightarrow$ Se rechaza $H_0$ y se acepta $H_a$ = La incorporación de plástico reciclado PET y cal al material granular para afirmado de la cantera de Condebamba produce efectos significativos en la Densidad seca.				

*Nota:* Hallazgos estadísticos clave relacionados con la hipótesis específica 2 planteada para las incorporaciones de PET y cal al material para afirmado de la cantera de Condebamba, elaboración propia.

**Figura 39**

*Diagrama de los estadísticos de la hipótesis específica 2 muestra con incorporación de PET y cal.*



*Nota:* Se observan los valores  $t_c$  en la región crítica de las hipótesis realizadas para las diferentes incorporaciones de plástico reciclado PET y cal al material granular destinado al afirmado de la cantera de Condebamba correspondiente a la hipótesis 2, elaboración propia.

Para finalizar se concluye que: La incorporación de plástico reciclado PET y cal, causa efectos en la Densidad seca del material granular destinado al afirmado de la cantera de Condebamba.

Al incorporar 1%, 2%, 3%, 4%, 5% de PET y cal causa efectos en la Densidad seca, según el proceso estadístico, influye de manera negativa la incorporación de plástico reciclado PET y cal al valor de la Densidad seca, ya que a mayor incorporación de plástico reciclado PET y cal la Densidad seca continúa bajando su valor.

## 5.2.4 Hipótesis específica 3

### 5.2.4.1 Planteamiento de la hipótesis

$H_0: [\mu_x = \mu_y]$  La incorporación de plástico reciclado PET y cal, no produce efectos significativos en el Contenido de humedad óptima del material granular para afirmado de la cantera de Condebamba.

$H_a: [\mu_x \neq \mu_y]$  La incorporación de plástico reciclado PET y cal, produce efectos significativos en Contenido de humedad óptima del material granular para afirmado de la cantera de Condebamba.

#### 5.2.4.2 Nivel de significancia

Se considera un  $\alpha = 5\% = 0.05$  correspondientemente. Pero como se consideró de dos colas se tomará el  $\alpha = 0.025$ .

#### 5.2.4.3 Estadístico

En cuanto al estadístico “ $t_c$ ” se calculó para cada una de las incorporaciones de plástico reciclado PET y cal, se empezó para el primer caso por los datos obtenidos en la incorporación de 1% PET + 1% cal, 2% PET + 2% cal, 3% PET + 3% cal, 4% PET + 4% cal, 5% PET + 5% cal al material granular para afirmado de la cantera de Condebamba, mediante las siguientes fórmulas:

$$t_c = \frac{\bar{x} - \bar{y}}{\sqrt{\frac{s^2}{n_1} + \frac{s^2}{n_2}}}$$

$$s^2 = \frac{\sum(x_i - \bar{x})^2 + \sum(y_i - \bar{y})^2}{n_1 + n_2 - 2}$$

Donde:

$t = t_c$  (“ $t$ ” calculado).

$\bar{x}$ : Media de la muestra 01 (con adición de ACR)

$\bar{y}$ : Media de la muestra 02 (sin adición de ACR)

$n_1$ : Muestra 01 (con adición de ACR)

$n_2$ : Muestra 02 (sin adición de ACR)

$s^2$ : Desviación estándar

En la siguiente tabla e imagen, se podrá observar a detalle la prueba de hipótesis realizada a la hipótesis específica 3, para las incorporaciones de plástico reciclado PET y

cal en diferentes porcentajes del 1%, 2%, 3%, 4%, 5%, al material granular destinado al afirmado de la cantera de Condebamba.

**Tabla 25**

*Resultados de la hipótesis 3 afirmado + PET + cal.*

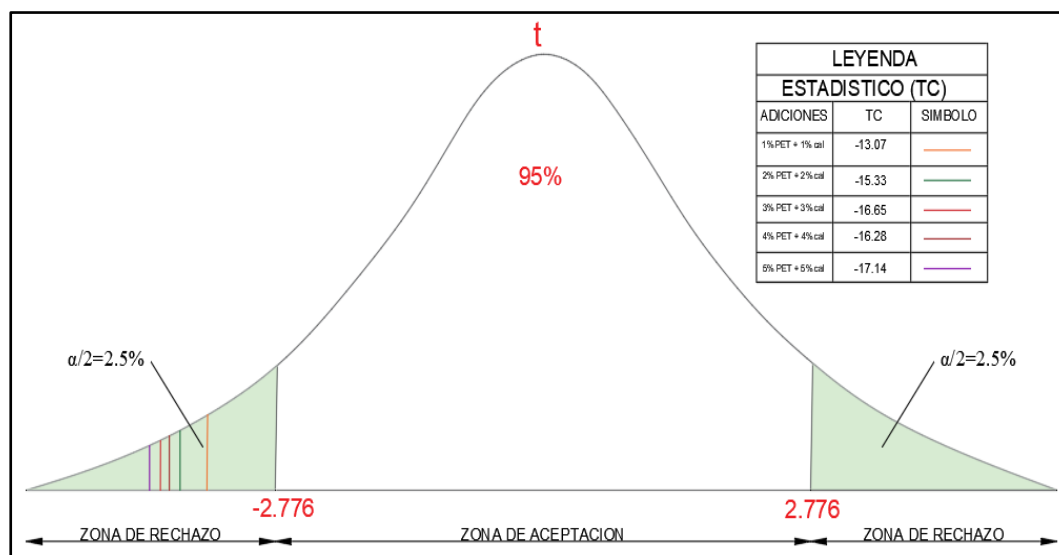
Descripción	Incorporación (Afirmado + PET + cal)				
	(1%PET + 1%cal)	(2%PET + 2%cal)	(3%PET + 3%cal)	(4%PET + 4%cal)	(5%PET + 5%cal)
Planteamiento de hipótesis	$H_0: [\mu_x = \mu_y]$ La incorporación de plástico reciclado PET y cal, no produce efectos significativos en la Contenido de humedad optima del material granular para afirmado de la cantera de Condebamba. $H_a: [\mu_x \neq \mu_y]$ La incorporación de plástico reciclado PET y cal produce efectos significativos en el Contenido de humedad optima del material granular para afirmado de la cantera de Condebamba.				
Nivel de significación o significancia	0.025				
"t" tabulado	2.776				
Región crítica	$<-\infty; -2.776]$ y $[2.776; +\infty>$				
"t" calculado	-13.07	-15.33	-16.65	-16.28	-17.14
Condición	Si $t_c \in R.C. \Rightarrow$ Se rechaza $H_0$				
Decisión	Como $t_c \in R.C. \Rightarrow$ Se rechaza $H_0$ y se acepta $H_a$ = La incorporación de plástico reciclado PET y cal al material granular para afirmado de la cantera de Condebamba produce efectos significativos en el Contenido de humedad optima.				

*Nota:* Hallazgos estadísticos clave relacionados con la hipótesis específica 3 planteada para las incorporaciones de PET y cal al material para afirmado de la cantera de Condebamba, elaboración propia.



**Figura 40**

Diagrama de los estadísticos de la hipótesis específica 3 muestra con incorporación de PET y cal.



Nota: Se observan los valores  $t_c$  en la región crítica de las hipótesis realizadas para las diferentes incorporaciones de plástico reciclado PET y cal al material granular destinado al afirmado de la cantera de Condebamba correspondiente a la hipótesis 3, elaboración propia.

Para finalizar se concluye que: La incorporación de plástico reciclado PET y cal, produce efectos significativos en el contenido de humedad óptima en el material granular destinado al afirmado de la cantera de Condebamba. Según el proceso estadístico, produce efectos de manera positiva la variación de la humedad óptima con diferentes variaciones por acción de la cal el contenido de humedad óptima tiende a aumentar debido al calor de hidratación.

**Tabla 26**

*Resumen de decisiones tomadas para las pruebas de hipótesis.*

<b>Descripción</b>	<b>Planteamiento de hipótesis</b>	<b>Decisión</b>
Hipótesis 1	<p><math>H_0: [\mu_x = \mu_y]</math> La incorporación de plástico reciclado PET y cal, no produce efectos significativos en el valor del CBR del material granular para afirmado de la cantera de Condebamba.</p> <p><math>H_a: [\mu_x \neq \mu_y]</math> La incorporación de plástico reciclado PET y cal, produce efectos significativos en el valor del CBR del material granular para afirmado de la cantera de Condebamba.</p>	<p>La incorporación de plástico reciclado PET y cal, causa efectos en el valor del CBR del material granular para afirmado de la cantera de Condebamba.</p>
Hipótesis 2	<p><math>H_0: [\mu_x = \mu_y]</math> La incorporación de plástico reciclado PET y cal, no produce efectos significativos en la Densidad seca del material granular para afirmado de la cantera de Condebamba.</p> <p><math>H_a: [\mu_x \neq \mu_y]</math> La incorporación de plástico reciclado PET y cal, produce efectos significativos en la Densidad seca del material granular para afirmado de la cantera de Condebamba.</p>	<p>La incorporación de plástico reciclado PET y cal, causa efectos en la Densidad seca del material granular para afirmado de la cantera de Condebamba.</p>
Hipótesis 3	<p><math>H_0: [\mu_x = \mu_y]</math> La incorporación de plástico reciclado PET y cal, no produce efectos significativos en la Contenido de humedad óptima del material granular para afirmado de la cantera de Condebamba.</p> <p><math>H_a: [\mu_x \neq \mu_y]</math> La incorporación de plástico reciclado PET y cal produce efectos significativos en el Contenido de humedad óptima del material granular para afirmado de la cantera de Condebamba.</p>	<p>La incorporación de plástico reciclado PET y cal, causa efectos en la Humedad óptima del material granular para afirmado de la cantera de Condebamba.</p>

*Nota:* Elaboración propia.

## VI. Conclusiones

Tras haber ejecutado los análisis sobre los efectos de la incorporación de plástico reciclado PET y cal al material granular para afirmado de la cantera de Condebamba, se concluye lo siguiente:

1. Los efectos de la incorporación de plástico reciclado PET y cal al material granular destinado al afirmado de la cantera de Condebamba en el valor de CBR se pudo observar que de manera positiva en todos los porcentajes de incorporación que se consideraron en la tesis, donde que estas incorporaciones de 1% PET + 1% cal, 2% PET + 2% cal, 3% PET + 3% cal, 4% PET + 4% cal, 5% PET + 5% cal, al material granular destinado al afirmado de la cantera de Condebamba, se obtuvieron los valores de CBR al 100% los siguientes resultados: 30.33%, 54.33%, 78.00%, 64.33%, 57.33% respectivamente para cada incorporación según lo mostrado en la tabla 21 y figura 35. Donde que dichas incorporaciones incrementan su resistencia al soporte en el valor del CBR. Es así que la combinación óptima es de 3% PET + 3% cal, obteniendo un valor de 78.00% la siguiente combinación de 4% PET + 4% cal y a partir de dicha combinación empieza a decrecer la resistencia de soporte de suelo obteniéndose un valor de 30.33%. Es así que se evidencia que dichos resultados son superiores al valor del CBR del material granulara para afirmado de la cartera de Condebamba con un valor del CBR de 16.67%.
2. Los efectos de la incorporación de plástico reciclado PET y cal al material granular destinado al afirmado de la cantera de Condebamba en la Densidad seca se pudo observar que de manera positiva en todos los porcentajes de incorporación que se consideraron en la investigación , donde que estas incorporaciones de 1% PET + 1% cal, 2% PET + 2% cal, 3% PET + 3% cal, 4% PET + 4% cal, 5% PET + 5% cal, al material granular destinado al afirmado de la cantera de Condebamba, se

obtuvieron los valores de Densidad seca máxima los siguientes resultados: 2.231gr/cm<sup>3</sup>, 2.196gr/cm<sup>3</sup>, 2.185gr/cm<sup>3</sup>, 2.188gr/cm<sup>3</sup>, 2.184gr/cm<sup>3</sup> respectivamente para cada incorporación según los mostrados en la tabla 20 y figura 32. Donde que dichas incorporaciones favorecen positivamente debido a que mientras mayor la incorporación de plástico reciclado PET y cal el peso volumétrico del suelo disminuye, inversamente con el óptimo contenido de humedad tiende a crecer con cada incorporación de plástico reciclado PET y cal con respecto a la Densidad seca del material granular destinado al afirmado de la cantera de Condebamba con un valor de 2.269gr/cm<sup>3</sup>.

3. Los efectos de la incorporación de plástico reciclado PET y cal al material granular destinado al afirmado de la cantera de Condebamba en la Humedad optima se pudo observar que de manera positiva en todos los porcentajes de incorporación que se consideraron en la tesis , donde que estas incorporaciones de 1% PET + 1% cal, 2% PET + 2% cal, 3% PET + 3% cal, 4% PET + 4% cal, 5% PET + 5% cal, al material granular destinado al afirmado de la cantera de Condebamba, se obtuvieron los valores de Humedad optima los siguiente resultados son: 9.10%, 10.81%, 11.35%, 11.22%, 11.42% respectivamente para cada incorporación según los mostrados en la tabla y figura 32. Donde que dichas incorporaciones favorecen positivamente en la capacidad de compactación, resistencia a la sequedad y mayor uniformidad, respecto a la Humedad optima del material granular destinado al afirmado de la cantera de Condebamba con un valor de 7.24%.

4. Los efectos de la incorporación de plástico reciclado PET y cal al material granular destinado al afirmado de la cantera de Condebamba, en el valor de CBR, Densidad seca, Humedad optima, se concluyó que; los efectos son de manera positiva en todos los porcentajes de incorporación que se consideraron en la tesis. Por lo que se concluye que mejora en mayor proporción las propiedades físicas y mecánicas.

## **VII. Recomendaciones**

1. Sugerencia evaluar índice CBR con variadas proporciones de aditivos en suelos que varíen entre 3%, 4% y 5%. Relacionados al plástico reciclado PET y cal.
2. En investigaciones venideras sobre temas afines, se aconseja emplear intervalos de análisis más precisos considerando rangos de 3%, 3.5%, 4%, 4.5%, 5%, 5.5%, para obtener resultados más detallados del porcentaje de incorporación de plástico reciclado PET y cal.
3. Se recomienda de acuerdo a la altitud determina las características del proyecto, que se aumente la humedad óptima según se va incrementado la incorporación de plástico reciclado PET y cal al material granular destinado al afirmado así alcanzar la meta deseada a lo requerido por la norma EG-2013.
4. Debido a que el plástico reciclado PET triturado es considerado como residuo la obtención de este mismo debería ser más factible, por lo que se recomienda el uso de este material a nivel nacional en trochas carrozables, asfaltados o pavimentación, como opción debido a su bajo costo, disminuir la contaminación ambiental y evitar destruir ecosistemas.

### VIII. Referencias

- Almeida, F. D., & Gallego, J. (2020). *Evaluation of mechanical properties of asphalt mixtures with recycled PET*. *Construction and Building Materials*, 261, 119865.
- Andaluz López, R. S. (2022). *Estudio del efecto de la ceniza de cáscara de arroz en las propiedades físico-mecánicas en suelos finos de subrasante* (Bachelor's thesis, Universidad Técnica de Ambato. Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica, Carrera de Ingeniería Civil).
- ARANDA, PABLO. *Efecto de la adición de hidróxido de calcio sobre mezclas con alta sustitución de cemento por ceniza volante. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de València. Valencia, España. 2014.*
- Arora, P., Patil, V. B., Bajpai, P. K., Saini, A., & Gopalan, R. (2019). *Efecto del tamaño de partícula de carbonato de calcio en las propiedades mecánicas de las mezclas de PET/PP*. *Journal of Applied Polymer Science*, 136(26), 47614.
- Bowles, J. E. (1981). *Manual de laboratorio de suelos en Ingeniería Civil*. México: Mc Graw.
- Braja M., D. (2012). *Fundamentos de Ingeniería Geotécnica*. México.
- Campoverde Vélez, M. G., & Yaguarshungo Gualli, C. A. (2022). *Suelo cemento con adición de fibra de plástico y fibra de cáscara de maní en caminos vecinales* (Bachelor's thesis, Guayaquil: ULVR, 2022.).
- Caxi Paredes, D. E., & Mamani Sullca, A. G. C. (2021). *Estudio de la influencia del tereftalato de polietileno (PET) y polopropileno (PP) en concretos convencionales para su aplicación en pavimentos rígidos*.
- Celi Yanchapata K. (2021) *Estabilización de suelos granulares de subrasante con finos de Tereftalato de Polietileno (PET), Polipropileno (PP) y Polietileno (PE)*. *Universidad Técnica de Ambato, Ambato, Ecuador.*

- Chanda, M., & Roy, S. K. (2018). *Desarrollo y caracterización de nanocompuestos de tereftalato de polietileno/carbonato de calcio*. *Revista de materiales compuestos termoplásticos*, 31(3), 375-396.
- Cómite técnico permanente de geotécnica. (1999). NTP 339.134:1999 Suelos (1ra ed.). Lima,*
- Crespo Villalaz, C. (2004). *Mecánica de Suelos y Cimentaciones (quinta edición ed.). México: Limusa.*
- Fernández, Marta. *Impacto del uso de cal en la estabilización de suelos para la construcción de carreteras en zonas de alto tráfico: análisis de caso en la región de Cataluña, España*. Tesis de pregrado, Universidad Politécnica de Cataluña, 2011.
- Ferreira, M. J., Villagra, M. M., Felisberti, M. I., & Mauler, R. S. (2013). *Preparación y caracterización de nanocompuestos de poli (tereftalato de etileno) /carbonato de calcio*. *Ciencia de los materiales e ingeniería: C*, 33(8), 4899-4908.
- Flores Cruz, P. D., & Mayta Calci, R. (2022). *Mejoramiento de las propiedades físicas y mecánicas incorporando PET y cal en la subrasante de la carretera Unocolla, Puno-2022* (Universidad Cesar Vallejo, Facultad de Ingeniería Civil).
- García, David. *Análisis comparativo del comportamiento de suelos estabilizados con cal en la construcción de carreteras urbanas y rurales*. Tesis de pregrado, Universidad Nacional Autónoma de México, 2014.
- Gavilanes Loor, S. D. (2023). *Análisis del efecto de la adición de partículas de tereftalato de polietileno (PET) en mezclas asfálticas en frío* (Bachelor's thesis, Universidad Técnica de Ambato. Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica, Carrera de Ingeniería Civil).



- Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C., & Baptista Lucio, P. (2014). *Metodología de la investigación* (Sexta Edición ed.). McGRAW-HILL. Hill de México S.A.
- Hossain, Z., & Lastra-González, P. (2019). *Potential Use of Recycled Plastic in Asphalt Mixtures: A Review*. *Materials*, 12(4), 612.
- INDECOPI. (25 de Noviembre de 1998). NTP 339.127. *Método de ensayo para determinar contenido de humedad*. Lima, Lima, Perú.
- INDECOPI. (26 de Junio 2014). NTP 339.129. *Método de ensayo para determinar el límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad del suelo*. Lima, Lima, Perú.
- Jhoel Paul. (2021). *Estudio de la estabilización de una subrasante arcillosa con cal para la carretera Canta - Huayllay Km 57-59*. Tesis de bachiller, Universidad Andina del Cusco.
- Khonakdar, H. A., Jafari, S. H., Wagenknecht, U., & Davachi, S. M. (2007). *Calcium carbonate nanoparticles as reinforcement for poly (ethylene terephthalate) polymer*. *Composites Science and Technology*, 67(9), 1773-1779.
- Manuel Gerardo Parra Gómez (2018) *Estabilización de un suelo con cal y ceniza volante*. (tesis de pregrado). Universidad Católica de Colombia, Bogotá, Colombia.
- Martínez, Ana. *Desarrollo de una metodología para la estabilización de suelos con cal en la construcción de carreteras en zonas de alto tráfico*. Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Valencia, 2015.
- Martínez, E. (2017). *Aplicación de plástico reciclado en la estabilización de suelos para la construcción de sub-bases de carreteras*. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Ministerio de Transportes y Comunicaciones. (2008). *Manual de Diseño de carreteras no Pavimentadas de bajo volumen de Tránsito*, Lima.

- Ministerio de Transportes y Comunicaciones. (2013). *Manual de Carretera: Especificaciones Técnicas generales para la construcción*, Lima.
- Ministerio de Transportes y Comunicaciones. (2013). *Manuel de Especificaciones Técnicas Generales para Construcción de Carreteras no Pavimentadas de bajo volumen de Tránsito*, Lima.
- Ministerio del Ambiente Perú. Lucía Ruiz, O. (Mayo de 2019). *Medio Ambiente y Contaminación*. (T. Perú, Entrevistador)
- MTC. (2013). *Manual de Carreteras: Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos. Sección: Suelos y Pavimentos*. Lima.
- MTC. (2016). *Manual de Ensayo de Materiales. Lima: Infraestructura vial del MTC*.
- MTC. (2018). *Glosario de términos de uso frecuente en proyectos de infraestructura vial*, Lima.
- MTC. (2018). *Manual de carreteras diseño geométrico DG-2018*. Lima.
- Naranjo Gonzales J. G. (2019) *Impacto en la adición de tereftalato de polietileno PET en mezcla asfálticas finas FAM*. Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia.
- Nieto Vega J. S. (2019) *Evaluación del uso de aditivo no tradicionales como estabilizadores de suelos limosos para caminos productivos de bajo volumen tránsito*. Universidad Técnica Federico Santa María, Valparaíso, Chile.
- Obando Ortiz, J. C. (2022). *Tecnologías de reciclaje de plástico PET para la aplicación en pavimentos flexibles de ciclovías en Colombia*. Tesis de grado, Universidad Militar Nueva Granada, Colombia.
- Oseni, J. E., Badmus, A. A., Salim, R., & Yusuff, R. (2020). *Mechanical and Durability Properties of Bitumen Polymer Modified Binder Incorporating Recycled Polyethylene Terephthalate (PET) Fiber*. International Journal of Civil Engineering and Technology, 11(2), 123-131.

- Parra Gómez M. G, (2018) *estabilización de un suelo con cal y ceniza volante. (tesis de pregrado). Universidad Católica de Colombia, Bogotá, Colombia.*
- Pérez, José. *Estudio de la influencia de la cal en la mejora de propiedades de suelos para la construcción de carreteras en climas húmedos.* Tesis doctoral, Universidad de Santiago de Compostela, 2012.
- Pérez, Laura. *Efectos de la estabilización con cal en la resistencia y durabilidad de subbases de carreteras: estudio experimental y análisis numérico.* Tesis de pregrado, Universidad Politécnica de Madrid, 2017.
- Perú.*
- Pivsa-Art, S., Sombatsompop, N., & Chaochanchaikul, K. (2018). *Propiedades mecánicas, térmicas y morfológicas de mezclas de poli (tereftalato de etileno) /carbonato de calcio recicladas moldeadas por inyección.* Revista de tecnología de vinilo y aditivos, 24(3), 211-221.
- Quispe Serrano E. & Sañac Vilca M. (2019). *Influencia de la incorporación de plástico reciclado – PET en el mejoramiento del suelo a nivel de subrasante en la prolongación de la Av. Micaela Bastidas, Tamburco – Abancay, 2018. (Tesis de Pregrado). Universidad Tecnológica de los Andes, Abancay, Apurímac, Perú.*
- Reunion de ingenieros. (1975). Mecánica de suelos. Barcelona: Editores Técnicos Asociados*
- Rodríguez, A. (2018). *Evaluación de la resistencia mecánica y durabilidad de mezclas asfálticas con incorporación de plástico reciclado PET.* Universidad de Buenos Aires.
- Rodríguez, Carlos. *Impacto ambiental y económico del uso de cal en carreteras: análisis de caso en la región de Andalucía, España.* Tesis de maestría, Universidad de Sevilla, 2016.

- Sánchez, María. *Evaluación de la resistencia al corte y compactación de suelos estabilizados con cal para su aplicación en subbases de carreteras*. Tesis de maestría, Universidad de Buenos Aires, 2013.
- Srinivasa, C. V., Veeraragavan, A., & Patil, B. D. (2019). *Utilization of Waste Plastic in Bituminous Mixes for Road Construction*. *International Journal of Engineering Research and Technology*, 12(7), 1048-1052.
- Subramanian, S., & Sen, M. (2019). Utilization of waste plastic bottles in asphalt pavement. *Materials Today: Proceedings*, 18, 4654-4661.
- Tamayo, T. M. (2003). *El proceso de la investigación científica*. México: LIMUSA S.A.
- Trujillo Martínez, M. J., Obando Paz, J. A., & Guerrero Guerrero, J. S. (2024). Evaluación del comportamiento de una mezcla asfáltica drenante, con adiciones de pellets de plástico reciclado para implementarse en una carpeta de rodadura.
- Trujillo, María. *Evaluación del comportamiento mecánico de suelos estabilizados con cal en el diseño de pavimentos flexibles*. Tesis de maestría, Universidad Nacional de Ingeniería, 2019.
- Velázquez, Daniel. *Estabilización de suelos mediante el uso de cal en la construcción de carreteras: Estudio de caso en la región de Puno, Perú*. Tesis de pregrado, Universidad Nacional del Altiplano, 2020.
- Yauli Cárdenas, R. N. (2022). *Estabilización con adición de PET triturado en subrasantes de baja calidad en el Jr. Mantaro, distrito de Pichari-Cusco*, 2021.
- Zambrano Sierra, F. G. (2022). *Análisis comparativo de la capacidad de soporte a nivel de subrasante en suelos arcillosos incorporando ceniza de Saccharum Officinarum y activador alcalino en la trocha carrozable Sahuanay–Umaccata Tamburco Abancay 2021 (Universidad Tecnológica de los Andes)*.

**IX. Anexos**

**Anexo 1.** Matriz de consistencia

**Anexo 2.** Matriz de operacionalización de variables

**Anexo 3.** Instrumentos de recolección

**Anexo 4.** Resultados de laboratorio, base de datos

**Anexo 5.** Juicio de expertos

**Anexo 6.** Avance de la tesis con evidencias fotográficas

**Anexo 7.** Certificados de calibración

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