

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE LOS ANDES

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA PROFESIONAL: DE INGENIERÍA CIVIL



Tesis

**Efecto mecánico de suelos arcillosos con adición de polvo de caucho para el
mejoramiento de la subrasante en la Av. Santo Domingo - Abancay - Apurímac,
2022**

Asesor:

Ph.D. Vásquez Ramírez Abbon Alex

Autor:

Tacca Huaracca Fredy

Para optar el Título Profesional:

Ingeniero Civil

Abancay – Apurímac – Perú

2024



Universidad Tecnológica de los Andes

Transformando vidas

ACTA DE EXAMEN DE TITULACIÓN N°031-2024-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:

- | | |
|--------------------------------------|--------------|
| ➤ MSc. Ing. Angel MALDONADO MENDÍVIL | PRESIDENTE |
| ➤ Mag. Marco Antonio GÁLVEZ QUINTANA | DICTAMINANTE |
| ➤ Dr. Wilfredo SOTO PALOMINO | REPLICANTE |

y el (la) postulante al TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO (a) CIVIL,
Bachiller: **TACCA HUARACCA, Fredy con código de matrícula N°201110577-F.**

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 mecánico de suelos arcillosos con adición de polvo de caucho para el mejoramiento de la subrasante en la Av. Santo Domingo -Abancay-Apurimac, 2022", habiendo aprobado con la nota de trece (13).

Se expide, la presente conforme al Libro de Actas de Sustentación de Tesis, consignado en los folios N° 286.

Abancay, 17 de octubre 2024.


MSc. Ing. Angel MALDONADO MENDÍVIL
PRESIDENTE


Mag. Marco Antonio GÁLVEZ QUINTANA
DICTAMINANTE


Dr. Wilfredo SOTO PALOMINO
REPLICANTE

Efecto mecánico de suelos arcillosos con adición de polvo de caucho para el mejoramiento de la subrasante en la Av. Santo Domingo - Abancay - Apurímac, 2022

INFORME DE ORIGINALIDAD

12%	12%	0%	3%
INDICE DE SIMILITUD	FUENTES DE INTERNET	PUBLICACIONES	TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1	hdl.handle.net Fuente de Internet	4%
2	repositorio.utea.edu.pe Fuente de Internet	2%
3	Submitted to Universidad Tecnologica de los Andes Trabajo del estudiante	1%
4	Submitted to Pontificia Universidad Catolica del Ecuador - PUCE Trabajo del estudiante	<1%
5	repositorio.upla.edu.pe Fuente de Internet	<1%
6	repositorio.ucv.edu.pe Fuente de Internet	<1%
7	repositorio.unap.edu.pe Fuente de Internet	<1%
8	repositorio.uandina.edu.pe	

Metadatos

Datos del Autor		
Apellidos y nombres	:	Tacca Huaracca Fredy
Tipo de Documento de Identidad	:	DNI
Número de Documento de Identidad	:	73009224
URL ORCID	:	https://orcid.org/0009-0001-4219-9287
Datos del Asesor		
Apellidos y nombres	:	Vásquez Ramírez Abbon Alex
Tipo de Documento de Identidad	:	DNI
Número de Documento de Identidad	:	06532658
URL ORCID	:	https://orcid.org/0000-0001-7299-5367
Datos de la investigación		
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	la:	2023-2024
Fuente de financiamiento	:	Fondos propios
Porcentaje de similitud	:	12%
URL de OCDE	:	https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#2.01.01

Dedicatoria

A Dios, por llenarme de numerosas bendiciones y darme la capacidad de concretar todas mis metas y anhelos.

A mi familia, especialmente a mis papás y hermanos, que siempre me ayudan a seguir adelante, quienes me brindan la inspiración necesaria para seguir adelante con mis metas, por su comprensión, paciencia, apoyo y por enseñarme valores positivos, así como por su respaldo emocional y su amor incondicional.

Agradecimientos

Mi agradecimiento va para la prestigiosa Universidad Tecnológica de los Andes, donde adquirí conocimientos esenciales y habilidades en los salones de clase, gracias a la dedicación de cada uno de los docentes que me acompañaron en mi carrera de Ingeniería Civil.

Quiero expresar un agradecimiento particular al ingeniero Abbon Alex Vásquez Ramírez, Ph.D., mi sincero agradecimiento a mi asesor, por su esfuerzo y dedicación en dirigir mi trabajo en esta tesis.

Expresar mi gratitud a los ingenieros y académicos de la casa de estudios antes mencionado, quienes desempeñaron un papel importante en mi formación con su apoyo y orientación.

Resumen

La tesis tiene como objetivo principal analizar el efecto mecánico de la adición de polvo de caucho en suelos arcillosos en el índice de resistencia (CBR) de la subrasante, en la Av. Santo Domingo - Abancay - Apurímac, 2022. Se busca una solución que mejore la baja capacidad de soporte en suelos arcillosos. El enfoque es cuantitativo, siguiendo un diseño experimental orientado a la práctica y un nivel explicativo. Las muestras se extrajeron de tres puntos de investigación, seleccionando el tercero por tener mayor contenido de arcilla, clasificado según SUCS como "Arcilla de media plasticidad arenosa".

Se realizó ensayos con adiciones de caucho del 3%, 5%, 7% y 9% en peso de la muestra. De acuerdo con los resultados, el CBR fue evidenciado un incremento significativo, siendo el 7% de caucho el más efectivo, elevando la resistencia del suelo de 5.2% a 11.6%. Se concluye que el caucho contribuye a la mejora del índice de resistencia de la subrasante, elevando su categoría de una insuficiente ($\text{CBR} < 6\%$) a buena ($\text{CBR} > 10\%$) según el MTC.

Palabras clave: Caucho, CBR, Subrasante.

Abstract

The main objective of the thesis is to analyze the mechanical effect of the addition of rubber powder in clay soils on the resistance index (CBR) of the subgrade, on Av. Santo Domingo - Abancay - Apurímac, 2022. A solution is sought that Improve the bearing capacity of low-strength clay soils. The approach is quantitative, following a practice-oriented experimental design and an explanatory level. The samples were extracted from three research points, selecting the third for having the highest clay content, classified according to SUCS as “Clay of medium sandy plasticity.”

Tests were carried out with rubber additions of 3%, 5%, 7% and 9% by weight of the sample. According to the results, CBR showed a significant increase, with 7% rubber being the most effective, raising the soil resistance from 5.2% to 11.6%. It is concluded that rubber contributes to the improvement of the subgrade resistance index, raising its category from insufficient (CBR<6%) to good (CBR>10%) according to the MTC.

Key words: Rubber, CBR, Subgrade.

Índice General

Portada.....	i
Acta de sustentación	ii
Reporte de similitud	iii
Metadatos	iv
Dedicatoria.....	v
Agradecimientos	vi
Resumen	vii
Abstract.....	viii
Índice General.....	ix
Índice de tablas	xi
Índice de Figuras.....	xii
Índice de Anexos.....	xiii
I. Introducción.....	14
II. Planteamiento del problema.....	15
2.1. Descripción y formulación del problema	15
2.2. Objetivos	18
2.2.1 Objetivo General.....	18
2.2.2 Objetivos Específicos.....	18
2.3. Justificación e importancia	18
2.4. Hipótesis	20
2.5. Variables	21

III. Marco Teórico.....	24
3.1. Antecedentes	24
3.2. Bases teóricas.....	29
3.3. Definición de términos	54
IV. Metodología.....	56
4.1. Tipo y nivel de investigación.....	56
4.2. Ámbito temporal y espacial	57
4.3. Población y muestra.....	57
4.4. Instrumentos	59
4.5. Procedimientos	60
4.6. Análisis de datos	62
4.7. Consideraciones éticas	67
V. Resultados y discusión	68
VI. Conclusiones	93
VII. Recomendaciones	95
VIII. Referencias.....	96
IX. Anexos.....	105

Índice de tablas

Tabla 1 Operacionalización de variable	23
Tabla 2 Tamices de malla cuadrada.....	31
Tabla 3 Selección de método Proctor modificado	39
Tabla 4 Lectura de carga (CBR)	44
Tabla 5 Subrasante clasificado en categorías	47
Tabla 6 Aplicación de suelo-caucho	51
Tabla 7 Composición química del caucho	53
Tabla 8 Cantidad total de muestra de suelo y caucho para los ensayos de laboratorio ...	59
Tabla 9 Instrumentos utilizados para cada ensayo	60
Tabla 10 Codificación de la muestra.....	70
Tabla 11 Resultados del análisis granulométrico de las calicatas y caucho.....	72
Tabla 12 Resumen de los hallazgos obtenidos a partir de las calicatas	74
Tabla 13 Proporciones empleadas al material arcilloso más caucho	75
Tabla 14 Resultados del índice de plasticidad (IP)	76
Tabla 15 Resultados del ensayo de Proctor modificado con adición de caucho.	77
Tabla 16 Resultados de CBR con las adiciones de caucho al suelo arcilloso	79
Tabla 17 Resumen de resultados de las adiciones de caucho al suelo arcilloso	81
Tabla 18 Resultados de la hipótesis específica 1 material arcilloso - caucho	86
Tabla 19 Resultados de la hipótesis específica 2 material arcilloso - caucho	88
Tabla 20 Resultados de la hipótesis específica 3 material arcilloso - caucho	91

Índice de Figuras

Figura 1 Gráfico semilogarítmico.....	33
Figura 2 Gráfico semilogarítmica (límite líquido 25 golpes)	36
Figura 3 Representación gráfica de la compactación	41
Figura 4 Cilindro metálico de 6" de diámetro para pruebas de CBR.....	42
Figura 5 Gráfico de esfuerzo vs penetración para 12, 26 y 55 golpes	44
Figura 6 Densidad seca vs CBR	45
Figura 7 Comparación de la deformación del caucho natural y vulcanizado	52
Figura 8 Tabla de datos correspondientes a la distribución "t" de Student.	65
Figura 9 Gráfico bilateral de la distribución "t" de Student.	66
Figura 10 Ubicación de calicatas en estudio Av. Santo Domingo.....	69
Figura 11 Curva granulométrica.....	73
Figura 12 Índice de plasticidad del suelo con adiciones de caucho.....	76
Figura 13 Resultados de la máxima densidad seca del suelo con adición de caucho	78
Figura 14 Resultados del CBR correspondientes a las adiciones de caucho en el suelo arcilloso	80
Figura 15 Evolución del valor de CBR tras las adiciones de caucho al suelo arcilloso	80
Figura 16 Valores estadísticos correspondientes a la hipótesis específica 1.....	87
Figura 17 Gráfico que representa los estadísticos de la hipótesis específica 2	89
Figura 18 Representación gráfica de los estadísticos de la tercera hipótesis específica .	92

Índice de Anexos

Anexo 1. Matriz de consistencia

Anexo 2. Operacionalización de variables

Anexo 3. Evidencias

Anexo 4. Instrumento de validación

Anexo 5. Resultados de laboratorio de suelos

Anexo 6. Certificado de uso de laboratorio de suelos

Anexo 7. Certificados de calibración

I. Introducción

En la construcción de carreteras, para reducir costos, se hace uso del terreno natural o subrasante, que a menudo no soporta de manera efectiva las cargas vehiculares, lo que genera problemas en la capa de rodadura. De acuerdo con el manual de carreteras del MTC (2014), la subrasante debe alcanzar al menos un 6% de CBR para ser utilizada en infraestructura vial. En caso de no cumplir este estándar, se deben implementar mejoras en las cualidades físicas y mecánicas del suelo para asegurar su durabilidad.

En esta tesis se ha planteado la utilización de caucho recuperado de neumáticos como material alternativo, añadiéndolo en diferentes proporciones al suelo arcilloso de la Av. Santo Domingo. Se realizó un estudio en laboratorio para determinar cómo afecta el uso de caucho en la medición del valor de CBR, la máxima densidad seca y la plasticidad, evaluando proporciones del 3%, 5%, 7% y 9% de caucho.

La tesis se organiza en 9 apartados: I. Introducción, que ofrece una visión general del estudio; II. Planteamiento del problema, que incluye la descripción y formulación del problema, el objetivo general y específicos, la justificación, las hipótesis y las variables; III. Marco Teórico, que incluye los antecedentes, las bases teóricas y la definición de términos clave; IV. Metodología, que especifica el tipo y nivel de investigación, ámbito temporal y espacial, población y muestra, instrumentos, procedimientos, análisis de datos y consideraciones éticas; V. Resultados y discusión, que presenta los resultados, la discusión y la prueba de hipótesis; VI. Conclusiones; VII. Recomendaciones, que ofrece sugerencias basadas en los hallazgos; VIII. Referencias, que enumera las fuentes bibliográficas; y IX. Anexos, que incluye anexos relevantes y registros fotográfico.

II. Planteamiento del problema

2.1. Descripción y formulación del problema

2.1.1 Descripción de la realidad problemática

A nivel internacional, en la República de Irak, específicamente en la localidad de Bagdad, se han registrado problemas relacionados con la inestabilidad de suelos. El suelo arcilloso es uno de los tipos de suelo problemáticos que ocupa una parte significativa del lugar, como muchas regiones costeras como la población de Al Amer, donde se encuentran centros industriales y urbanos. En esta zona, se ha registrado la predominancia de suelos arcillosos expansivos que poseen un comportamiento particular, problemas asociados con la resistencia baja del suelo para soportar cargas y cambios volumétricos, lo que provoca deformaciones, ya que al estar saturado sus propiedades mecánicas disminuyen. Además, lo que ha resultado son vías en mal estado y la falla prematura de las mismas bajo cargas repetitivas de tráfico. Esta condición exige reparaciones frecuentes y provoca un aumento en los costos de mantenimiento. Esta problemática es considerada una de las razones determinantes a fin de buscar alternativas de estabilización dirigida a este tipo de suelos. Los objetivos de mejora también consideran el costo y la efectividad. En el contexto actual, hay numerosas investigaciones a nivel internacional que abordan el incremento de las capacidades de resistencia mecánica en suelos de baja calidad, las más estudiadas en la técnica empleada para estabilizar suelos: la cal, asfalto, cemento y diferentes productos químicos. De igual manera, existen estudios que emplean la integración de polímeros naturales y sintéticos, lo cual evidencia un mejoramiento en los aspectos físico-mecánicos del suelo, contribuyendo a garantizar una mayor durabilidad de la vía (Shareef et al., 2023).

Abdullah y Iravanian (2022), mencionan la problemática de los suelos arcillosos en la ciudad de Karbala, Irak. En esta región, el material presente, los suelos arcillosos, tiene una limitada capacidad de soporte y son altamente expansivos, lo que causa asentamientos y fallos en las infraestructuras construidas sobre ellos. Estas propiedades provocan deformaciones y disminución en la durabilidad de las estructuras.

Hernández et al. (2023); en el distrito de Pucallpa, región de Ucayali, en referencia a los problemas geotécnicos, una gran extensión de la ciudad se compone de suelos finos como arcillas y limos. Estos suelos se caracterizan por su alta plasticidad y compresibilidad, generándose cambios volumétricos, lo que complica su utilización en la construcción. Se ha identificado que los suelos arcillosos muestran deficiencias en cuanto a su composición física y resistencia mecánica, lo que les impide soportar grandes cargas sin sufrir deformaciones. Este problema es evidente en el mal estado de muchas vías de transporte sin pavimentar, donde las condiciones del suelo contribuyen a su rápida deterioración.

Asimismo, el Ministerio del Ambiente menciona que en promedio los neumáticos tienen una duración de alrededor de 5 años. Al ser reemplazados, muchos no reciben una disposición final adecuada, ya que frecuentemente terminan en vertederos, en la vía pública, almacenados inapropiadamente, quemados o desechados en cualquier lugar, lo que contribuye a la emisión de CO₂. Cada año, aproximadamente 100,000 toneladas de neumáticos ingresan al mercado peruano. Se estima que se producen cerca de 30,000 toneladas de neumáticos en desuso, pero no existe un sistema adecuado para su disposición final, ni una entidad pública dedicada específicamente al reciclaje del NFU. Esta falta de gestión contribuye al problema ambiental en el país (MINAM, 2020).

López y Ortiz (2018) mencionan que, en el distrito de Abancay - Apurímac, en la Urbanización San Luis, las calles presentan hundimientos notables que dificultan el paso de vehículos. Asimismo, se observan problemas en la subrasante relacionados con la baja calidad del suelo, teniendo hundimientos, agrietamientos o deterioro en la vía. Las vías de esta urbanización, como la Av. Santo Domingo, están a nivel de subrasante, y se aprecia el deterioro de la vía y en condiciones inadecuadas para la transitabilidad, lo que impacta negativamente a los usuarios de esta avenida. Así mismo según un estudio del Instituto Nacional de Defensa Civil - INDECI, titulado "Mapa de Peligros de la Ciudad de Abancay", se ha identificado que la Urbanización San Luis presenta un terreno predominantemente arcilloso. Esta característica geológica hace que la zona sea inestable, con problemas

significativos de baja resistencia del suelo al esfuerzo cortante y deformaciones en la vía. Este tipo de terreno, considerado pobre, a menudo no alcanza los requisitos mínimos necesarios para soportar las cargas vehiculares, lo que genera desafíos críticos para la infraestructura y la seguridad vial en el área estudiada.

En la Av. Santo Domingo, ubicada en la ciudad de Abancay, Apurímac, se enfrenta una problemática que afecta tanto a la infraestructura vial como a la seguridad de sus usuarios. La causa principal de esta situación radica en las deficiencias geotécnicas del suelo, caracterizado por ser un suelo que presenta capacidad de soporte es baja debido a su estructura arcillosa. Este tipo de suelos, al estar expuestos a variaciones de humedad, tienden a expandirse y contraerse, lo que genera inestabilidad y debilita la subrasante, afectando directamente la calidad y funcionalidad de la vía. Como consecuencia, la vía ha experimentado una serie de fallas relacionadas con la capacidad de soporte limitada a lo largo de su recorrido. Entre los problemas más notables se encuentran la formación de baches, ahuellamientos y deformaciones en la capa de rodadura, los cuales no solo reducen la calidad de la infraestructura, sino que además arriesgan la seguridad del usuario de quienes hacen uso de ellos. Estos defectos, en su conjunto, provocan un deterioro acelerado de la vía, reduciendo su vida útil y afectando la transitabilidad.

Después de identificar la problemática de los suelos arcillosos, se planteó en la tesis el uso de caucho de neumáticos fuera de uso (NFU), para determinar cuál es el efecto mecánico en suelo arcilloso con caucho añadido de la capa de subrasante en la Av. Santo Domingo, en referencia al índice de plasticidad, máxima densidad seca y CBR, que son parámetros importantes para evaluar el comportamiento del suelo para obras viales.

2.1.2 Formulación del problema

2.1.2.1 Problema general

¿Cómo influye la adición de polvo de caucho en suelos arcillosos para el mejoramiento del índice de resistencia (CBR) de la subrasante, en la Av. Santo Domingo - Abancay - Apurímac, 2022?

2.1.2.2 Problemas específicos

¿Cómo influye la adición de polvo de caucho en el índice de plasticidad en suelos arcillosos para el mejoramiento de la subrasante en la Av. Santo Domingo - Abancay - Apurímac, 2022?

¿Cómo influye la adición de polvo de caucho en la máxima densidad seca en suelos arcillosos para el mejoramiento de la subrasante en la Av. Santo Domingo - Abancay - Apurímac, 2022?

¿Cómo influye la adición de polvo de caucho en la relación de soporte de California en suelos arcillosos para el mejoramiento de la subrasante en la Av. Santo Domingo - Abancay - Apurímac, 2022?

2.2. Objetivos

2.2.1 Objetivo General

Analizar el efecto mecánico de la adición de polvo de caucho en suelos arcillosos en el índice de resistencia (CBR) de la subrasante, en la Av. Santo Domingo - Abancay - Apurímac, 2022.

2.2.2 Objetivos Específicos

- a) Determinar el índice de plasticidad en suelos arcillosos con adición de polvo de caucho de la subrasante, en la Av. Santo Domingo - Abancay - Apurímac, 2022.
- b) Determinar la máxima densidad seca en suelos arcillosos con adición de polvo de caucho de la subrasante, en la Av. Santo Domingo - Abancay - Apurímac, 2022.
- c) Determinar la relación de soporte de California en suelos arcillosos con adición de polvo de caucho de la subrasante, en la Av. Santo Domingo - Abancay - Apurímac, 2022.

2.3. Justificación e importancia

Se justifica socialmente, ya que la población de la Av. Santo Domingo del distrito de Abancay se beneficia con la mejora de la subrasante, evidenciándose claramente en los resultados obtenidos al mezclar caucho con suelo arcilloso. Con esta tesis se evidenció

que, al incorporar material de caucho, el suelo arcilloso de la avenida satisface los criterios técnicos necesarios para su empleo como material de subrasante para el desarrollo del diseño de la vía y así tener vías de transporte en buen estado frente a la necesidad de la población, lo cual favorece al crecimiento económico y social. La aplicación de soluciones basadas en el reciclaje de materiales contribuye a aumentar la conciencia sobre la sostenibilidad y el uso responsable de recursos, promoviendo prácticas más sostenibles con el medio ambiente.

Se justifica teóricamente, siendo el propósito de aportar conocimientos sobre el mejoramiento del suelo arcilloso con el uso de caucho extraído de neumáticos en desuso, con el fin de optimizar la capacidad de soporte y la durabilidad del suelo. Esta tesis aporta resultados y conclusiones mediante ensayos de laboratorio sobre combinaciones del suelo compuesto de arcilla con porcentajes variables de caucho 3%, 5%, 7% y 9%, tal como se vienen realizando en otros países donde el insumo del caucho reciclado es abundante. La mezcla de suelo arcilloso y caucho de neumáticos mejora su desempeño mecánico con el óptimo parámetro volumétrico, incrementando el índice de CBR. Buscando ampliar el conocimiento sobre las cualidades mecánicas del suelo de arcilla con la implementación de caucho, ya que hay escasos estudios disponibles a nivel local y regional. Es por ello que se buscó profundizar y amplificar los conocimientos en la temática de mejorar los suelos arcillosos con la adición del material caucho para el desarrollo de esta tesis.

Se justifica profesionalmente debido al aporte de nuevas prácticas en ingeniería civil para la estabilización de suelos arcillosos. Actualmente, los ingenieros enfrentan desafíos considerables al trabajar con tipos de suelo con resistencia baja y alta deformabilidad; esto puede comprometer la integridad de las infraestructuras. Así mismo, con la tesis se fortalecen los conocimientos, permitiendo aplicar nuevos procedimientos para abordar los problemas relacionados con suelos arcillosos que presentan déficits en sus parámetros físicos y mecánicos. La tesis recomienda el uso de caucho como método de estabilización del suelo, lo que no solo ofrece una solución técnica viable, sino que también es una opción

sostenible. Esto, a su vez, fomentará al desarrollo y la innovación en el entorno de la ingeniería geotécnica, promoviendo prácticas eficientes y ecológicas donde tras adicionar 3%, 5%, 7% y 9% de caucho al suelo arcilloso se obtiene un comportamiento positivo, mejorando la clasificación en subrasantes insuficientes ($CBR < 6\%$) a una buena ($CBR > 10\%$), de acuerdo con las clasificaciones de subrasante del MTC (2014).

La importancia de esta tesis radica en su contribución a abordar los desafíos técnicos asociados con los suelos arcillosos, caracterizados por su alta plasticidad, baja resistencia y sensibilidad a los cambios de humedad. Estos factores generan inestabilidad en las estructuras viales, afectando la calidad y durabilidad de la infraestructura y, por ende, el desarrollo socioeconómico de las comunidades dependientes de dichas vías. Este estudio no solo identifica de manera precisa los problemas inherentes a este tipo de suelo, sino que también desarrolla soluciones innovadoras, prácticas y económicamente viables para estabilizar y mejorar su desempeño. La aplicación de los resultados de esta investigación tiene un impacto directo en la optimización de las condiciones del suelo, lo que permite construir carreteras más estables, seguras y duraderas. Esto no solo incrementa la capacidad de soporte frente al tráfico pesado, sino que también reduce significativamente los costos asociados al mantenimiento periódico y la rehabilitación de las vías, ampliando la vida útil de la infraestructura. En un contexto más amplio, estas mejoras técnicas repercuten positivamente en el bienestar de las personas, al garantizar vías confiables que facilitan el transporte, promueven la conectividad y fomentan el crecimiento económico. Además, este enfoque es particularmente relevante en el marco de la planificación urbana y rural, ya que enfatiza la importancia de considerar las características geotécnicas del suelo desde las etapas iniciales de diseño y construcción.

2.4. Hipótesis

2.4.1 Hipótesis general

La adición de polvo de caucho (3%, 5%, 7% y 9%) mejora significativamente el índice de resistencia (CBR) en suelos arcillosos de la subrasante, en la Av. Santo Domingo - Abancay - Apurímac, 2022.

2.4.2 Hipótesis específicas

- a) La adición de polvo de caucho influye significativamente en el índice de plasticidad en suelos arcillosos para el mejoramiento de la subrasante en la Av. Santo Domingo - Abancay - Apurímac, 2022.
- b) La adición de polvo de caucho influye significativamente en la máxima densidad seca en suelos arcillosos para el mejoramiento de la subrasante en la Av. Santo Domingo - Abancay - Apurímac, 2022.
- c) La adición de polvo de caucho influye significativamente en la relación de soporte de California en suelos arcillosos para el mejoramiento de la subrasante en la Av. Santo Domingo - Abancay - Apurímac, 2022.

2.5. Variables

Variable independiente: Polvo de caucho

Material producido a partir del triturado de neumáticos en desuso, compuesto principalmente por caucho vulcanizado obtenido durante este proceso. El caucho es un polímero, ya sea natural o sintético, conocido por su elasticidad y resistencia, y se emplea en diversas aplicaciones gracias a sus características excepcionales. La extracción del caucho natural proviene del árbol como el *Hevea brasiliensis* y el *Ficus*, mientras que el caucho sintético se produce por medio de fuentes petroquímicas o combustible fósil, para que este material se utilice en neumáticos, se combina con diversos materiales y agentes químicos. El principal procedimiento al que se somete el caucho es la vulcanización, que implica exponerlo a altas temperaturas en conjunto con azufre para obtener resistencia térmica y mayor dureza. Esto le proporciona estabilidad térmica, la trituración se presenta como la forma más económica de llevar a cabo el reciclaje (Shinde et al., 2019).

Variable dependiente: Mejoramiento de la subrasante

La estabilización o mejoramiento del suelo es una etapa clave para optimizar los parámetros físicos y mecánicos, mejorando su habilidad para soportar cargas y resistencia

a las deformaciones. Este proceso involucra la aplicación de métodos mecánicos combinados con la inclusión de aditivos, que pueden ser de origen químico, natural o sintético. La estabilización es fundamental en terrenos problemáticos, como los suelos arcillosos, que suelen tener baja capacidad de carga, alta plasticidad y gran susceptibilidad a las variaciones de humedad. Entre las técnicas más empleadas para mejorar la estabilidad del suelo, se incluyen adiciones de cemento, cal y otros compuestos, que modifican las propiedades del terreno, haciéndolo más estable y apto para la construcción vial. Además, en algunos casos se emplean otros aditivos como polímeros sintéticos, cenizas volátiles o residuos industriales, que no solo optimizan las propiedades mecánicas del terreno, sino que además promueven una construcción más sostenible al reutilizar materiales de desecho. En resumen, el mejoramiento del terreno es un proceso esencial para optimizar la infraestructura vial, permitiendo que suelos naturalmente inestables se conviertan en bases más fuertes y duraderas para la construcción de carreteras. Con el uso adecuado de aditivos y técnicas mecánicas, se garantiza una infraestructura más resistente, con menores costos de mantenimiento y una vida útil prolongada (MTC, 2018).

Tabla 1

Operacionalización de variable

Variables	Definición conceptual	Definición operacional	Dimensiones	Indicadores	Instrumento
Variable independiente: polvo de caucho	El material obtenido de la trituration de neumáticos fuera de uso consiste en gran medida en caucho vulcanizado (Shinde et al., 2019).	Se mide como porcentaje en función al peso seco de la muestra de suelo, dosificando (S + 0 % polvo de caucho, S+ 3 % polvo de caucho, S+ 5 % polvo de caucho, S + 7 % polvo de caucho, S + 9 % polvo de caucho), utilizando balanza de precisión para medir la cantidad de caucho y suelo seco.	-Dosificación	-S + 3 % polvo de caucho -S + 5 % polvo de caucho -S + 7 % polvo de caucho -S + 9 % polvo de caucho	Fichas de laboratorio -Manual de ensayo de materiales (MTC, 2016). -Manual de procedimientos analíticos para suelos y agregados de construcción (Salvador, 2014).
Variable dependiente: Mejoramiento de la subrasante	Mejoramiento de las propiedades del suelo a través de procedimientos mecánicos e incorporación de productos químicos, naturales o sintéticos. Tales estabilizaciones, por lo general, se realizan en las superficies de rodadura o capas inferiores de la carretera (MTC, 2018, p.12). El índice de plasticidad (IP), el rango en el que un suelo muestra comportamiento plástico se define por su contenido de humedad, calculado como la diferencia numérica entre su límite líquido y límite plástico (NTP 339.129, 2019, p. 4). La densidad máxima seca es el valor más elevada que se obtiene en una curva de compactación, utilizando un esfuerzo preestablecido, ya sea estándar o modificado (MTC, 2018, p. 16). El valor relativo de soporte de un suelo o material se evalúa a través de la penetración de una fuerza aplicada en una masa de suelo (MTC, 2016, p. 248).	El índice de plasticidad se mide realizando el ensayo de límites de Atterberg, la máxima densidad seca se determina mediante el ensayo Proctor modificado, el valor relativo de soporte se determina con el ensayo de CBR en muestras compactadas a diferentes niveles de energía.	-Índice de plasticidad -Máxima densidad seca -Relación de soporte de california (CBR)	límite líquido - límite plástico = IP (%) Proctor modificado: (óptimo contenido de humedad (%) y máxima densidad seca: (g/cm³)) Resistencia a la penetración (%)	Fichas de laboratorio MTC E 110, MTC E 111 MTC E 115 MTC E 132

Nota. Elaboración propia.

III. Marco Teórico

3.1. Antecedentes

3.1.1 A nivel internacional

Según Valipour et al. (2021), en su artículo científico titulado “*Aplicación de fibras poliméricas de neumáticos reciclados y fibras de vidrio para refuerzo de arcilla*”, con el objetivo principal; evaluar cómo las fibras de neumáticos reciclados (RTPF) y las fibras de vidrio (GF) influyen en la resistencia y la plasticidad de las arcillas. Planteando una metodología experimental tipo aplicada. A fin de obtener los resultados; se llevaron a cabo experimentos en suelos arcillosos usando diversas concentraciones de RTPF y GF (0,5%, 1,0% y 1,5%) y longitudes de 0.5 y 1 cm de fibras incorporadas en las adiciones. Los análisis minuciosos de los datos provenientes de la prueba de corte directo indicaron que 0,5% de RTPF la resistencia al corte aumentó de 55 kPa a 65 kPa, mientras que 1,0% permaneció estable en 55 kPa, y 1,5% disminuyó de 55 kPa a 50 kPa. Para la GF de 10 mm, el porcentaje óptimo fue 1,0%, logrando de 55 kPa a 105 kPa. En conclusión, la resistencia más alta del suelo arcilloso se alcanzó con 0,5% de RTPF y 1,0% de GF.

Gupta y Choubey (2021), realizaron un estudio con el objetivo de mejorar suelos arcillosos, utilizando caucho de neumáticos triturado y cemento para incrementar su capacidad de soporte. La metodología empleada fue un diseño experimental del tipo aplicado que consistió en mezclar caucho triturado (5%, 10%, 15%) con cemento (2%, 4%), realizando pruebas de CBR y compresión no confinada para evaluar los efectos. El caucho utilizado tenía tamaños 2-3 mm de espesor. Los resultados mostraron que el CBR del suelo original de 1.86% se incrementó a 13.17% con la mezcla óptima de 4% de cemento y 5% de caucho. Además, la resistencia a la compresión aumentó de 15 kPa a 248 kPa. Concluyeron que esta combinación mejora significativamente la resistencia y capacidad de soporte del suelo, permitiendo una reducción en el grosor de las capas de pavimento, lo que se traduce en menores costos de construcción. Este enfoque es especialmente valioso en regiones donde el suelo tiene propiedades problemáticas, como alta expansión y

contracción, y ofrece una solución sostenible al utilizar materiales de desecho como el caucho.

Shinde et al. (2019), en su artículo científico *“Estabilización de suelo y grano de caucho mediante el uso de la prueba CBR”*. Plantearon como objetivo principal; estabilizar el suelo con grano de caucho evaluando su efecto en el CBR. Empleo una metodología de tipo aplicada, con un diseño experimental y nivel explicativo. Con el resultado obtenido; al incluir grano de caucho en cantidades de 0%, 5%, 10% y 15%, la muestra 01 al adicionar se tiene un aumento en el índice de CBR con el 10% de incorporación de caucho pasando de 8.32% a 9.24%, respectivamente, la muestra 02 se tiene un aumento en el valor de CBR con el 10% de aplicación de caucho pasando de 6.93% a 9.71%. Finalmente, se concluyó que el mayor incremento en el CBR se logra al combinar el suelo con un 10% de partículas de caucho, identificado como el porcentaje óptimo.

Según Akbarimehr y Aflaki (2018), propusieron como objetivo principal estudiar el efecto del granulo de caucho en las propiedades geotécnicas de los suelos arcillosos. Planteando una metodología experimental basada en un enfoque cuantitativo. Los resultados al incorporar gránulos de neumáticos en cantidades de 5%, 10%, 15%, 20%, 25% y 30% que pasa el tamiz N° 40, en suelo del tipo arcilloso de alta plasticidad la aplicación respectiva del granulo de neumáticos se evidenció que hubo un decrecimiento en el IP, pasando de 47% a 45.5%, 44.5%, 45.5%, 44%, 42.5%, 40.5%. Asimismo, en el suelo arcillosos de baja plasticidad la disminución en el IP fue de 16% a 14%, 12%, 10%, 9.5%, 9%, 8.5% respectivamente tras incorporar caucho. Finalmente, se concluyó que su uso es aconsejable en suelos arcillosos debido a su capacidad para disminuir los límites de plasticidad y su potencial como aditivo para mejorar estos suelos.

Kalavakkam (2018), estableció como objetivo principal; determinar si el uso de caucho reciclado en suelos arcillosos mejora el CBR, planteando la metodología experimental, enfoque cuantitativo, nivel explicativo. Arribando a un resultado al añadir caucho triturado en proporciones de 10%, 15%, 20%, 30%, 40% y 50%, se alcanzó el

mayor incremento en el índice de resistencia con el 15% de material caucho. En el suelo 01, el CBR aumentó de 5.8% a 7.9%, mientras que en el suelo 02 subió de 6.9% a 8%. La resistencia al corte también mostró su máximo con un 15% de caucho, elevándose de 160 kPa a 260 kPa en la muestra 01 y de 190 kPa a 263 kPa en la muestra 02. En conclusión, el caucho reciclado utilizado como estabilizante del suelo mejora tanto el valor relativo de soporte y el esfuerzo cortante.

3.1.2 A nivel nacional

Palacios y Villanueva (2023), establecieron como objetivo principal; mejorar el CBR en suelos arcillosos empleando partículas de caucho reciclado de neumáticos, usando la metodología experimental del tipo aplicada. Las proporciones de caucho son (5%, 10%, y 15%). El espécimen patrón, categorizada como arcilla de plasticidad media, el índice de plasticidad fue de 18.7%, disminuyendo a 17.2%, 16.2%, y 16% al agregar caucho. El parámetro de la densidad, expresada en g/cm³, inicial es de 1.789 se redujo ligeramente a 1.77, 1.681 y 1.673. El valor de CBR patrón fue de 5.9%, mejorando a 8.6%, 8%, y 7.4% tras la adición del caucho. En conclusión, el índice de resistencia mejoró, alcanzando un CBR de 8.6% al añadir 5% de partículas de caucho de 2mm de tamaño.

Menciona Gutiérrez y Rojas (2020), plantearon como objetivo principal; determinar los efectos del granulo de caucho en la estabilidad de la subrasante en suelos cohesivos, usando un enfoque metodológico aplicado y un diseño experimental. Se efectuaron pruebas añadiendo partículas de caucho en proporciones de 1.2 a 2.4, 3.6, 4.8, 6, y 7.2 por ciento. El espécimen analizado, clasificada como arcilla arenosa de baja plasticidad, mostró un aumento notable en el índice de resistencia (CBR) después de la adición del material caucho, identificado el 4.8% como la dosificación más efectiva, registrando un aumento en la resistencia del suelo que pasó del 2.7% al 7.9%. En conclusión, el uso de partículas de caucho de 4.75 mm a 2 mm aumentó la calidad mecánica del suelo cohesivo.

Así mismo Guevara (2020), establecieron como objetivo; determinar el efecto que tiene el caucho en polvo sobre la resistencia de la subrasante de la avenida Carlos Augusto

Salaverry, Chiclayo. Empleo la metodología; tipo aplicada, diseño experimental. Evidenciándose en los resultados, se mostró que el suelo analizado se clasificó como arcilla limo arenosa, registrando un IP del 5.4% y un CBR inicial de 5.07%. Al incorporar caucho con una granulometría de 2 a 0.075 mm en porcentajes de 5%, 10% y 15%, se determinó que el 15% fue la dosificación óptima, logrando un incremento del CBR de 5.07% a 12.01%, un decrecimiento en la máxima densidad de 1.928 g/cm³ a 1.891 g/cm³. En conclusión, el caucho mejora el valor de CBR, siendo aplicable para la estabilización de la subrasante.

Tenemos a Huamán y Muguerza (2019), plantearon como objetivo principal; determinar el efecto del granulo de caucho en la resistencia a la penetración (CBR) de suelos cohesivos. Su metodología; experimental del tipo aplicada. Los resultados tras añadir caucho en porcentajes de 5%, 10% y 15%, el CBR se incrementó con un 10% de caucho, lo que se identificó como la proporción óptima, incrementando la resistencia del suelo de 3% a 10.4% de CBR. En conclusión, el caucho granulado de 2 mm es beneficioso para mejorar suelos cohesivos.

Alvarez y Gutiérrez (2019), establecieron como objetivo; Analizar si el uso de caucho en polvo reciclado puede optimizar las propiedades mecánicas y físicas de suelos arcillosos, se planteó la metodología; experimental del tipo aplicada, para evaluar el efectos de un sustrato arcilloso tras el añadido de caucho, como resultados obtenidos; con la proporción de caucho de granulometría desde 2 mm hasta 0,075 mm, adicionándose en porcentajes de 1.5%, 2.5% y 3.5%, la muestra patrón se registró un CBR del 3.2% y al adicionar partículas de caucho respectivamente se tiene 5%, 8.7% y 9.4% de CBR y así mismo se obtuvo disminución en el índice de plasticidad obteniéndose resultados del 11%, 9% y 8%, concluyendo que la mezcla incrementó el porcentaje de CBR de 3.2% a 9.4%, mejorando las propiedades de soporte del suelo.

3.1.3 A nivel regional y local

López y Ortiz (2018), plantearon como objetivo principal; estabilizar el suelo de las calles Molinopata y Santo Domingo en la urbanización San Luis añadiendo cal, para su uso

como subrasante en pavimentos, según las normas vigentes. La metodología experimental del tipo aplicado fue utilizada para proporcionar soluciones prácticas a problemas específicos, arribando aun resultado; los suelos de las calicatas 01 y 02 fueron clasificados como arena limo arcilloso (SC-SM) y arena limosa (SM), con valores de CBR iniciales de 8.75% y 16.75%, respectivamente. Se crearon especímenes con varias proporciones de cal en escalas de 0, 2, 4, 6, y 8 por ciento en relación al peso del suelo seco, y se encontró que al añadir 8% de cal, el CBR aumentó a 145.00% en la muestra 01 y a 69% en la muestra 02. En conclusión, al evaluar el suelo estabilizado con cal respecto a su estado original, se notó una menor plasticidad y expansión, además de una mejora significativa en el CBR, siendo el 8% de cal una dosificación satisfactoria para la estabilización del suelo.

Al no contar con investigaciones previas locales o regionales referente a la estabilización de suelos de arcilla con la aplicación de caucho, esta tesis adquiere un valor significativo, dado que aborda un tema novedoso y relevante para la región. Su importancia radica en que sentará una base sólida para futuras investigaciones, contribuyendo el avance de nuevos estudios orientados a mejorar las cualidades de los terrenos arcillosos, que son comunes en la zona, a través de la utilización del caucho reciclado como material estabilizante. Esta investigación busca identificar el efecto particular del polvo de caucho en la resistencia de los suelos arcillosos, analizando cómo su incorporación del material caucho influye en su capacidad de soporte para la infraestructura vial. Siendo una de las primeras investigaciones de esta naturaleza en el ámbito local, proporcionará información valiosa que puede ser utilizada como referencia en proyectos futuros que busquen soluciones sostenibles y eficientes para la mejora de suelos. Además, responde a una problemática real y concreta de la localidad, lo que refuerza su pertinencia y utilidad práctica. Así, la tesis no solo aportará conocimiento científico, sino que también tendrá un impacto positivo en el desarrollo de nuevas técnicas de estabilización de suelos. Su relevancia radica en que contribuirá de manera importante al desarrollo de futuras investigaciones. Con el fin de identificar el efecto del polvo de caucho en la resistencia de

los suelos arcillosos. Así mismo, la investigación se formuló en referencia a la problemática local descrita.

3.2. Bases teóricas

3.2.1 Subrasante

Superficie nivelada del terreno después de la remoción de tierra se conoce como subrasante, que sirve de base para la correcta formación del pavimento o afirmado, esta capa es una parte integral, situada entre el suelo nivelado y la estructura superior, esta capa asegura una conexión efectiva, Se constituye por suelos con propiedades adecuadas para el propósito y compactados en capas para proporcionar un soporte firme. Su estabilidad es fundamental para soportar las cargas producidas por el flujo del tráfico. La resistencia de carga de la subrasante, combinada con el volumen de flujo vehicular y las cualidades de los materiales usados en la capa de rodadura, son aspectos fundamentales en la planificación de la estructura que se instalará sobre ella (MTC, 2014).

La subrasante es la capa sobre la que se colocan tanto el pavimento como las demás capas de la vía. Al estar formada por suelo o roca, a menudo presenta variaciones en sus características a lo largo del proyecto, lo que puede influir significativamente en la estabilidad y durabilidad de la infraestructura vial. Dado que los pavimentos distribuyen las tensiones de tráfico a la subrasante, sus propiedades son determinantes en el diseño y espesor de las capas superiores, además de afectar directamente la capacidad de soporte de la estructura vial en condiciones reales de uso. Por ello, es crucial estudiar bien las propiedades de la subrasante antes de iniciar un proyecto de pavimentación, evaluando factores como su resistencia, plasticidad y capacidad de drenaje, que influyen en el desempeño general de la vía. Un análisis detallado permite anticipar y mitigar problemas futuros, optimizando tanto los costos como la funcionalidad de la vía (Caltrans, 2022).

3.2.1.1 Propiedades físicas

Los aspectos físicos del suelo son fundamentales para entender su comportamiento en su estado natural, sin necesidad de aplicar esfuerzos externos, ya que describen cómo

el suelo interactúa con el agua, el aire y otros elementos. Entre las propiedades más relevantes en ingeniería civil están la granulometría o gradación, que examina cómo se distribuyen las partículas, crucial para la compactación y capacidad de soporte del suelo; la humedad, que evidencia el nivel de humedad presente en el terreno y su influencia en la estabilidad bajo carga; y su plasticidad, que establece la capacidad del suelo de deformarse sin que se formen grietas, siendo especialmente importante en suelos arcillosos, ya que permite predecir su comportamiento ante cambios en el contenido de agua y su estabilidad estructural. Estas propiedades permiten diseñar vías y estructuras más seguras y duraderas, minimizando problemas como asentamientos o fallas. Además, la densidad natural del suelo, que describe la relación entre la masa y el volumen en su estado no alterado, se mide mediante el ensayo de densidad in situ, conocido también como ensayo del cono de arena (WSDOT, 2013)

Según Bautista y Aguilera (2023), la composición mineral de suelo es vital en la caracterización de sus propiedades físicas, así como por su capacidad para drenar y almacenar agua, y su nivel de plasticidad. Estas propiedades se evalúan en laboratorio mediante diversos ensayos, tales como determinación de la humedad, granulometría, la consistencia, entre otros. Los ensayos más estudiados que se realizan para entender las cualidades físicas estos procedimientos proporcionan información clave sobre el comportamiento del suelo en diversas condiciones, lo que es esencial para el diseño de infraestructuras seguras y estables, se deben realizar los siguientes procedimientos para analizar las aptitudes físicas del suelo:

- Análisis granulométrico
- Índice de humedad
- Límites líquidos
- Límites plásticos

A. Análisis granulométrico

La clasificación de suelos se realiza mediante el estudio de la distribución de sus partículas. Esta clasificación es fundamental para comprender cómo se comportará el suelo

bajo diferentes cargas y condiciones. El suelo se clasifica según los porcentajes de partículas como grava, arena, limo y arcilla, cada uno con su tamaño característico. En los estratos de grano grueso, como la grava y la arena, se evalúa la gradación, la cual puede ser bien graduada (cuando existe una variedad de tamaños de partículas) o mal graduada (cuando predomina un solo tamaño). En suelos más finos, como los limos y las arcillas, se consideran características como la plasticidad, que influyen en su comportamiento frente a la humedad (WSDOT, 2013).

El proceso de tamizado que determina la distribución de tamaños según la norma MTC E 107 se lleva a cabo utilizando una serie de tamices, los cuales permiten clasificar las diferentes fracciones del suelo, como grava gruesa (3" a 3/4"), grava fina (3/4" a N° 4), arena gruesa (N° 4 a N° 10), arena media (N° 10 a N° 40), arena fina (N° 40 a N° 200) y partículas finas (pasan la malla N° 200). Este proceso es esencial para clasificar las variadas dimensiones de las partículas que forman el suelo y su uso en proyectos de ingeniería.

Tabla 2

Tamices de malla cuadrada

Tamiz	Aberturas (mm)
3.00"	75
2.00 "	50.8
1 ½"	38.1
1.00"	25.4
¾"	19.0
3/8"	9.5
N° 4.00	4.76
N° 10.00	2.00
N° 20.00	0.84
N° 40.00	0.425

Nº 60.00	0.260
Nº 140.00	0.106
Nº 200.00	0.075

Nota. Referencia adaptada de (MTC, 2016).

El equipo utilizado es:

- balanza digital que detecta variaciones de 0,01 g y 0,1 g
- Estufar (horno)
- La elección de los tamices de malla cuadrada será conforme a lo indicado en la tabla 02
- Recipientes utilizados para el manejo y la precisión en el pesaje de muestras
- Cepillos utilizados para la limpieza durante los ensayos

La muestra:

- Preparar la muestra de manera homogénea mediante mezclado, y luego dividirla en cuatro fracciones para obtener la proporción necesaria para la prueba.
- El procedimiento de tamizado se realiza con la muestra completa o en parte, según las características de los materiales finos, se separan los finos mediante el proceso de lavado, secar y tamizar la muestra con una serie de tamices.

Procedimiento:

- Se utilizan tamices de 3", 2", 1 1/2", 1", 3/4", 3/8" de pulgada y Nº 4 para las fracciones que quedan retenidas en la malla Nº 4.
- El proceso de tamizado se lleva a cabo manualmente o utilizando medios mecánicos.
- El procedimiento implica pesar cada fracción retenida con una balanza electrónica y registrar la cantidad en el tamiz Nº 4. La prueba se considera aceptable si los pesos sumados de las fracciones corresponden al peso inicial de la muestra, con una variación permitida del 1%.
- La fracción que atraviesa el tamiz Nº 4 se someterá a lavado usando una criba Nº 200, con un mínimo de 115 g para arenas y 65 g para arcillas y limos. Una vez que se complete el lavado y secado, utilizando una serie de cribas de grano fino, se realiza el tamizado de la muestra.

Cálculos:

- Se emplea una fórmula para calcular el porcentaje de material retenido en cada malla.

$$\% \text{ retenido} = \frac{\text{peso retenido en el tamiz}}{\text{peso total de la muestra}} \times 100 \quad (1)$$

- Para determinar el porcentaje de material que atraviesa la malla N° 200, se usa la fórmula correspondiente.

$$\% \text{ pasante la N° 200} = \frac{\text{peso total} - \text{peso retenido en la malla N° 200}}{\text{peso total}} \times 100 \quad (2)$$

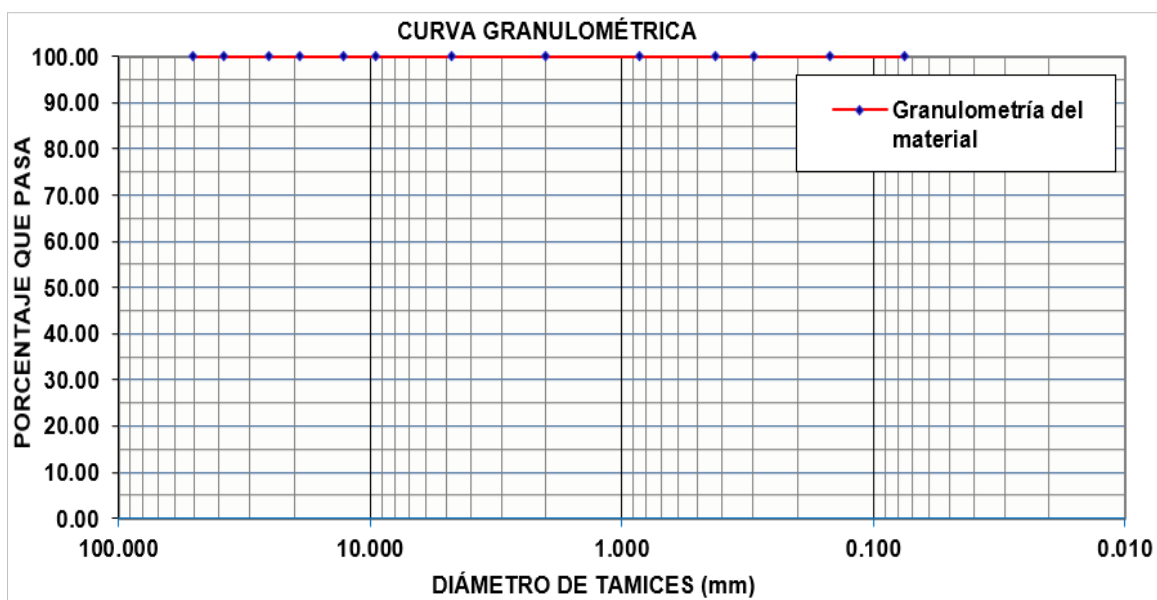
- Para calcular el porcentaje que pasa.

$$\% \text{ pasa} = 100 - \% \text{ retenido acumulado} \quad (3)$$

- En un gráfico semilogarítmico, los resultados se representan colocando los diámetros de las mallas se indican en el eje horizontal (abscisas) y los porcentajes acumulados pasantes en el eje vertical (ordenadas), La ilustración en la Figura 1 muestra lo descrito.

Figura 1

Gráfico semilogarítmico



Nota. Se visualiza ejemplo de tabla semilogarítmica. Elaboración propia.

B. Contenido de humedad %

La cantidad de agua del suelo, medida como un porcentaje, indica el contenido de humedad. Esta medición es utilizada para evaluar las condiciones del terreno (MTC, 2016).

C. Límites de Atterberg

Son un conjunto de pruebas que evalúan la manera en que los suelos finos se comportan según su nivel de humedad, fundamentales en la ingeniería civil para la clasificación de suelos. Estos límites incluyen el límite líquido (LL), que define el punto donde el suelo pasa de un estado plástico a líquido, y el límite plástico (LP), que establece el punto donde el suelo deja de ser plástico y se vuelve semisólido. El índice de plasticidad (IP), que es la diferencia entre el LL y el LP, mide la capacidad del suelo para deformarse sin fracturarse. Estas propiedades ayudan a predecir cómo el suelo reaccionará bajo diferentes condiciones de humedad y carga, lo que es crucial para la estabilidad de las estructuras en proyectos de infraestructura (INDOT, 2019).

El uso del índice de plasticidad (IP) para clasificar suelos es básico en ingeniería civil, permitiendo evaluar cómo los suelos responden a cambios de humedad. El IP mide la deformabilidad del suelo sin que este se fracture. Cuando el IP es mayor que 20 ($IP > 20$), el suelo presenta una plasticidad alta y se considera un suelo muy arcilloso, lo que indica que será más flexible pero también más propenso a cambios significativos con variaciones de humedad. Si el IP está entre 7 y 20 ($7 < IP \leq 20$), el suelo se clasifica como de plasticidad media, y generalmente es un suelo arcilloso, lo que significa que tiene una capacidad moderada de deformación. En suelos con $IP \leq 7$, la plasticidad es baja, y se trata de suelos poco arcillosos, los cuales tienen una menor capacidad de deformación, pero son más estables ante cambios de humedad. Finalmente, si el IP es 0 ($IP = 0$), el suelo es no plástico y exento de arcillas, lo que implica que no se deformará bajo condiciones normales. Esta clasificación es crucial para el diseño y construcción de estructuras, ya que permite prever el comportamiento del suelo y tomar decisiones informadas sobre su manejo en diferentes condiciones ambientales. El IP recomendado para suelos que se utilizan en subrasantes es de 10 o menos, lo que se considera apropiado. Esto se debe a que los suelos con un IP bajo tienden a ser menos susceptibles a los cambios de humedad, lo que los hace más estables y adecuados para soportar las cargas aplicadas. En particular, los suelos con un

IP superior a 10 presentan un mayor riesgo de expansividad, lo que puede generar problemas de estabilidad y deformaciones, especialmente bajo condiciones de humedad. Por esta razón, es recomendable que estos suelos sean estabilizados o incluso reemplazados si se van a utilizar como subrasantes. Este criterio es esencial para garantizar que los suelos de subrasante proporcionen un soporte adecuado a las capas superiores de la vía, evitando problemas estructurales y aumentando la durabilidad de la infraestructura vial (MTC, 2014, p. 34).

Son ensayos que permiten evaluar cómo los suelos finos se comportan al interactuar con la humedad. Estos límites establecen los contenidos de humedad que marcan las transiciones entre diferentes estados de consistencia en suelos cohesivos. Estas pruebas son aplicables exclusivamente a suelos finos, por la presencia de partículas pequeñas y vacíos, que potencian la adherencia entre ellas (MTC, 2016).

Se usa la copa de Casagrande para establecer el límite líquido del suelo, con una medición de humedad obtenida mediante 25 golpes. Se denomina límite plástico al rango de humedad donde el suelo se rompe al hacer rollitos de 3.2 mm de diámetro, si no se pueden determinar, se considerará que el suelo es no plástico (MTC, 2016).

Según lo establecido en el MTC E 110, se procede la medición del límite líquido.

Equipos:

- Envases de porcelana
- Cuchara de Casagrande
- Ranurador
- Contenedores metálicos
- Balanza electrónica con capacidad de detectar variaciones de hasta 0,01 g
- Equipo de secado calibrado a $110\pm 5^{\circ}\text{C}$

Muestras:

- Se elige una porción de entre 150 y 200 gramos de la muestra representativa que atraviesa a través de la criba N° 40.

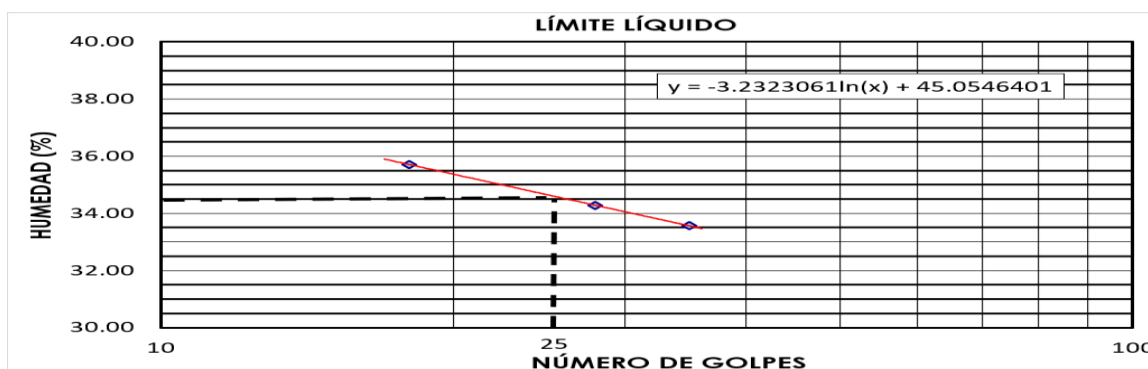
Procedimiento:

- Método multipunto; una fracción de la muestra húmeda se introduce en la cuchara de Casagrande, comprimiéndola y extendiéndola uniformemente utilizando la espátula. Se esparce a lo largo de la copa hasta llegar a una altura de 1cm, creando una superficie nivelada. A continuación, se realiza una división en el centro utilizando el ranurador. Iniciar el movimiento con la manivela de la copa y contar el número de golpes necesarios para cubrir una abertura de 13 mm y registrar la cantidad de golpes empleados.
- Realice 03 ensayos: el primero debe ubicarse en un rango entre 25 y 35 golpes; el segundo valor debe ubicarse entre 20 y 30 golpes; y el tercero, entre 15 y 25 golpes. Para hallar la humedad, se emplea la siguiente ecuación.

$$W(\%) = \frac{\text{peso del suelo humedo} - \text{peso del suelo seco}}{\text{peso del suelo seco}} \times 100 = \frac{W_w}{W_s} \times 100 \quad (4)$$

Figura 2

Gráfico semilogarítmica (límite líquido 25 golpes)



Nota. Se visualiza ejemplo de gráfico semilogarítmica. Elaboración propia.

Según lo estipulado en el MTC E 1111, se efectúa la determinación del límite plástico (LP).

Equipos:

- Vidrio con superficie esmerilada
- Espátula
- Contenedor de porcelana
- Balanza con lectura electrónica y una sensibilidad de 0,01 g

- Horno 110 ± 5 °C.

Muestra:

- Material procesado cuidadosamente mediante tamizado con el tamiz N° 40, asegurando que el ensayo se realice únicamente con las partículas que han pasado a través de este tamiz.

Procedimiento:

- La muestra se le da forma de rollitos con los dedos encima del vidrio esmerilado dándole forma de cilindro.
- En caso de que no se generen grietas antes de que se logren 3,2 mm de diámetro, será necesario repetir el procedimiento hasta que se formen grietas de aproximadamente ese diámetro.
- Poner la muestra en el horno y, una vez seca, registrar su peso.

Fórmula para la determinación del LP.

$$LP = \frac{\text{peso del suelo humedo} - \text{peso del suelo seco}}{\text{peso del suelo seco}} \times 100 \quad (5)$$

Fórmula para la determinación del IP.

$$IP = LL - LP \quad (6)$$

3.2.1.2 Propiedades mecánicas

Las propiedades mecánicas del suelo se refieren a su comportamiento bajo la aplicación de fuerzas externas o cargas, evaluado a través de ensayos específicos. Estas propiedades incluyen la resistencia al corte, medida con ensayos triaxiales, que determina la capacidad del suelo para resistir deslizamientos bajo presión, y la compresibilidad, obtenida mediante el ensayo de consolidación, que predice cómo se compactará el suelo bajo cargas prolongadas, un factor clave en el diseño de infraestructuras. La densidad seca, evaluada por el ensayo Proctor modificado, garantiza que el suelo esté adecuadamente compactado para soportar cargas estructurales. Además, el ensayo de relación de soporte California es fundamental para evaluar la capacidad de soporte de suelos en proyectos de carreteras y pavimentos. Estas propiedades son esenciales en la

ingeniería civil porque describen cómo el suelo se comporta bajo cargas aplicadas, asegurando la estabilidad y durabilidad de las estructuras, lo cual requiere ensayos específicos para determinar su respuesta bajo diferentes condiciones (INDOT, 2019).

Según González y Pérez (2023), las propiedades mecánicas del suelo describen cómo se comportan las masas de suelo cuando se les aplican distintos tipos de fuerzas. Estas propiedades están influenciadas por la naturaleza de los granos del suelo, la tensión presente, el contenido de agua, densidad entre otros. Las propiedades mecánicas más estudiadas en obras viales son las que establecen las leyes relacionadas con la resistencia y el comportamiento, se evalúan mediante los siguientes ensayos.

- Proctor modificado
- Relación de Soportes de California

A. Proctor modificado

El ensayo Proctor modificado es un procedimiento esencial, usado principalmente en proyectos viales, que mide la densidad máxima y el contenido ideal de humedad. Con este ensayo se asegura que el suelo esté adecuadamente compactado para resistir las cargas y esfuerzos que las infraestructuras viales, como las carreteras, impondrán sobre él. A diferencia del Proctor estándar, el Proctor modificado utiliza un mayor esfuerzo de compactación usando un pisón de 10 lb dejando caer desde 18" de altura, lo que permite alcanzar una mayor densidad con menor humedad. Este proceso es particularmente útil en suelos arcillosos y limosos. En las obras viales, el ensayo es esencial para garantizar que el suelo tenga la capacidad de soporte necesaria, previniendo problemas como asentamientos o deformaciones en la superficie, que podrían comprometer la durabilidad y seguridad de la vía. Este método asegura que el suelo esté adecuadamente compactado, proporcionando una base estable y resistente para soportar las cargas del tráfico y los factores ambientales (INDOT, 2019).

Se realiza la compactación del suelo mediante la aplicación de una energía mejorada de 2700 kN-m/m^3 ($56000 \text{ lb-pie/pie}^3$), cuyo propósito es reducir los vacíos

internos y, de esta forma, optimizar las propiedades mecánicas del suelo. Para llevar a cabo este ensayo, se utilizan tres métodos designados como A, B y C. En el primer método, el material es compactado después de pasar por el tamiz N° 4, dentro de un recipiente de 4" de diámetro, utilizando 5 capas y aplicando 25 golpes por cada capa. En el segundo método, el material utilizado pasa por el tamiz de 3/8", manteniendo el mismo esquema de capas y golpes que en el primer método, utilizando el mismo molde. Por último, el tercer método compacta el material que pasa por la malla de 3/4", utilizando un recipiente más grande, de 6" de diámetro, con 5 capas y aplicando 56 golpes por cada capa. Este ensayo es fundamental para evaluar la capacidad del suelo de soportar cargas en proyectos de construcción e infraestructura (MTC, 2016).

Tabla 3

Selección de método Proctor modificado

Métodos	A		B		C	
	Ret.	Tamiz	Ret.	Tamiz N°4>	Ret.	Tamiz 3/8"
Uso	N°4 ≤ 20%.		20% y Ret. Tamiz 3/8" ≤ 20%.		> 20% y Ret. Tamiz 3/4" ≤ 30%.	
Usar material que pasa el tamiz:	N° 4		3/8"		3/4"	
Diámetro del molde	4"		4"		6"	
N° de capas	5		5		5	
N° de golpes	25		25		56	

Nota. Referencia manual de ensayo de materiales (MTC, 2016).

Materiales:

- Una regla metálica
- Cucharas, espátula, tamices 3/4", 3/8", N°4.

Equipos:

- Molde cilíndrico de 4" de diámetro y altura de 4.584".
- Molde cilíndrico de 6" de diámetro y altura de 4.584".
- Un martillo, como mecanismo de impacto, cae desde 18" con un peso de $4,54 \pm 0,01$ kg ($10 \pm 0,02$ lb).
- Instrumento de pesaje con una precisión de 1 g.
- Estufa configurada para conservar una temperatura de 110 ± 5 °C.

Procedimiento:

- Elegir el molde apropiado según el método a utilizar (A, B o C).
- Calcular el volumen del molde.
- Realizar al menos cuatro pruebas con diferentes contenidos de agua, asegurándose de que el incremento de humedad no supere el 4%. A fin de establecer la curva de compactación, las pruebas deben alinearse con el contenido óptimo de humedad.
- Para los métodos A y B, se deben usar un mínimo de 2.3 kg de suelo tamizado, mientras que el método C requiere 5.9 kg.
- Registrar el peso del molde.
- Ensamblar el collarín y el molde en la base.
- Llevar a cabo la compactación en cinco capas, manteniendo una altura similar para cada capa.
- Al finalizar la compactación, retire el collarín y utilice una regla metálica para nivelar el espécimen.
- Tomar nota del peso del espécimen y del molde, y extraer una porción para evaluar la humedad.

Cálculos:

- Cálculo del contenido de agua en porcentaje.

$$\% \text{ de agua} = \frac{\text{peso del agua}}{\text{peso material seco}} \times 100 \quad (7)$$

- El cálculo de la densidad seca requiere que se determine previamente la densidad húmeda.

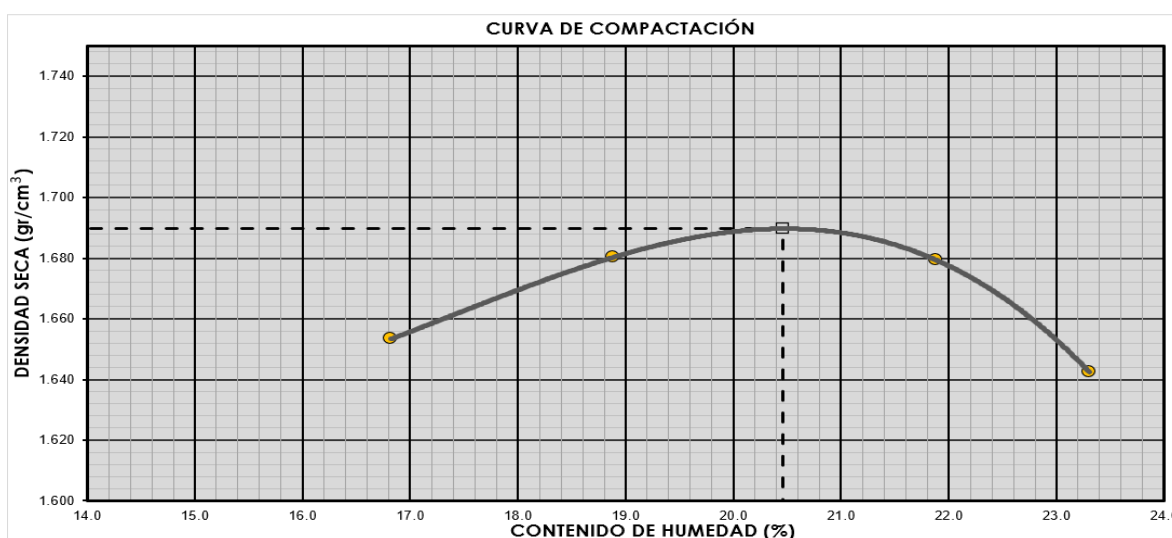
$$\rho_{\text{húmeda}} \left(\frac{\text{gr}}{\text{cm}^3} \right) = \frac{(\text{peso del molde} + \text{suelo compactado}) - \text{peso del molde}}{\text{volumen del molde}} \quad (8)$$

$$\rho_{\text{seca}} \left(\frac{\text{gr}}{\text{cm}^3} \right) = \frac{\rho_{\text{húmeda}}}{1 + \frac{\% \text{ Agua}}{100}} \quad (9)$$

- La relación entre el contenido de humedad y la densidad seca del suelo se evidencia en la curva de compactación presentada en la Figura 3. Este gráfico resulta esencial para determinar el nivel de humedad adecuado que permite alcanzar la máxima densidad en los ensayos de compactación.

Figura 3

Representación gráfica de la compactación



Nota. Se visualiza la curva de compactación en el gráfico. Elaboración propia.

B. Relación de Soporte de California (CBR)

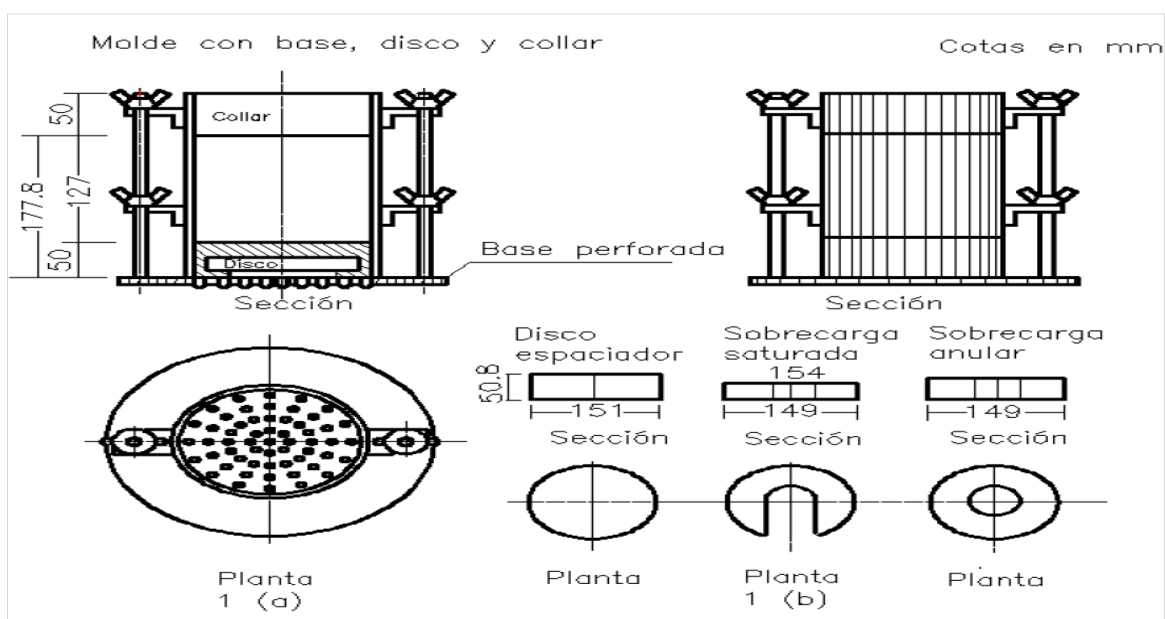
El ensayo de CBR se emplea para evaluar la capacidad de soporte de un suelo compactado comparándolo con un material de referencia, como la piedra triturada, que tiene un CBR del 100%. Su principal aplicación es medir la resistencia de suelos con partículas de hasta 19 mm, permitiendo determinar si el suelo puede soportar las cargas vehiculares adecuadamente. Durante la prueba, se ejerce una carga en el suelo mediante

un pistón que penetra a una velocidad constante de 0.05" por minuto, registrando la fuerza a profundidades, entre 0.1" y 0.2". Los resultados obtenidos permiten calcular el grosor óptimo de las capas de subrasante, base y subbase para el pavimento, asegurando así la durabilidad del proyecto y optimizando los costos. Un CBR elevado indica que el suelo tiene una mayor capacidad de carga, reduciendo la necesidad de usar capas adicionales de material en la construcción (Wimalasena & Gallage, 2022).

La capacidad de soporte de un suelo se mide a través de la penetración de una carga. Para esto, se utiliza el ensayo CBR, que sigue la norma MTC E 132 y determina la resistencia de la subrasante con penetraciones de 0.1" y 0.2". Este método es crucial en proyectos viales para entender cómo se comporta el suelo bajo condiciones de carga (MTC, 2016).

Figura 4

Cilindro metálico de 6" de diámetro para pruebas de CBR



Nota. Referencia (MTC, 2016, p. 249).

Procedimiento de ensayo siguiendo la normatividad MTC E 132.

Equipos:

- Una prensa con capacidad de 44,5 kN (10,000 lbf), ya sea manual o automática, diseñada para ajustar el desplazamiento entre la base y la cabeza a una velocidad constante de

0,05" por minuto, y debe estar equipada con un acoplamiento para un transductor de presión.

- El molde cilíndrico debe tener un diámetro de 6" y una altura de 7", con un collarín de 2 pulgadas de altura.
- Tamiz $\frac{3}{4}$ " y N°4.
- Martillo de 4.5 kg (10 lb).
- Espaciador circular de metal.
- Herramienta enrasadora y de nivelación metálico.
- Papel filtro para situar en cada molde.
- Placa metálica perforada con un vástago ajustable en altura y tornillo central. Las perforaciones no deben exceder 1.6 mm y están distribuidas a intervalos uniformes.
- Trípode.
- Deformímetro con precisión de lectura de 0.01 mm.
- Pesas metálicas de 2.27 kg con una tolerancia de ± 0.02 kg.
- Un tanque de agua para el proceso de inmersión.

Fórmula para la determinación de la expansión:

$$\% \text{ Expansión} = \frac{L_f - L_i}{h} \times 100 \quad (10)$$

Donde:

L_i : lectura inicial (mm)

L_f : lectura final (mm)

h : altura de molde

Procedimiento:

- Ubica la muestra con sus sobrecargas en la base de la prensa. Ajusta el equipo para asegurar que la muestra esté centrada y que la carga de asiento se distribuya correctamente.

- Con la muestra en la prensa CBR, usa dos transductores de presión: el primero para registrar la carga y el segundo para medir la deformación.
- La penetración del pistón debe llevarse a cabo a una velocidad constante de 0.05" por minuto.
- Realiza las lecturas de acuerdo con las especificaciones de la Tabla 3.

Tabla 4*Lectura de carga (CBR)*

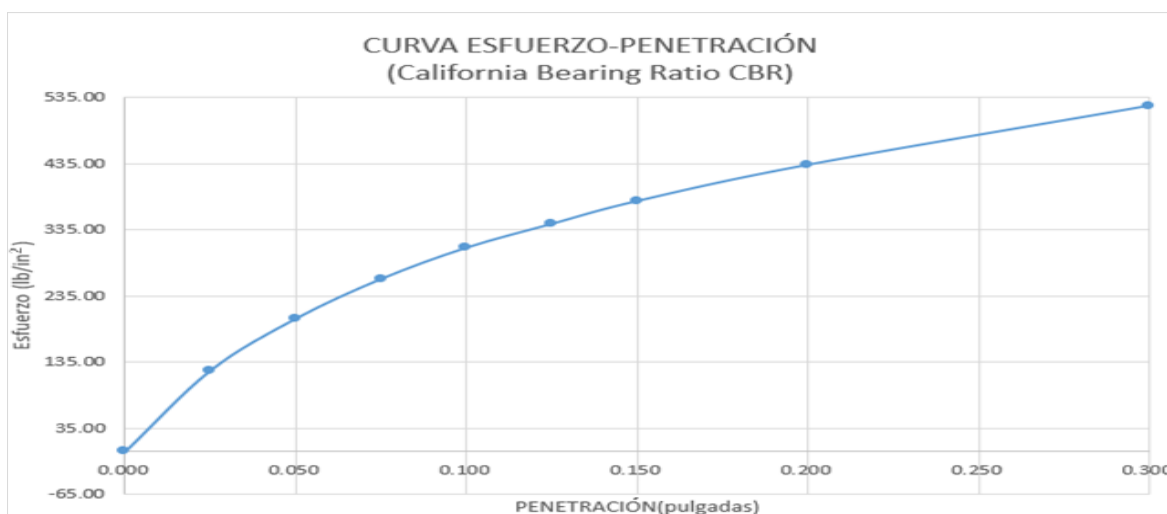
Pulg.	mm	Esfuerzo patrón
0.1	2.54	1000 lb/pulg ²
0.2	5.08	1500 lb/pulg ²

Nota. valores de penetración estándar de la piedra de California (MTC, 2016).

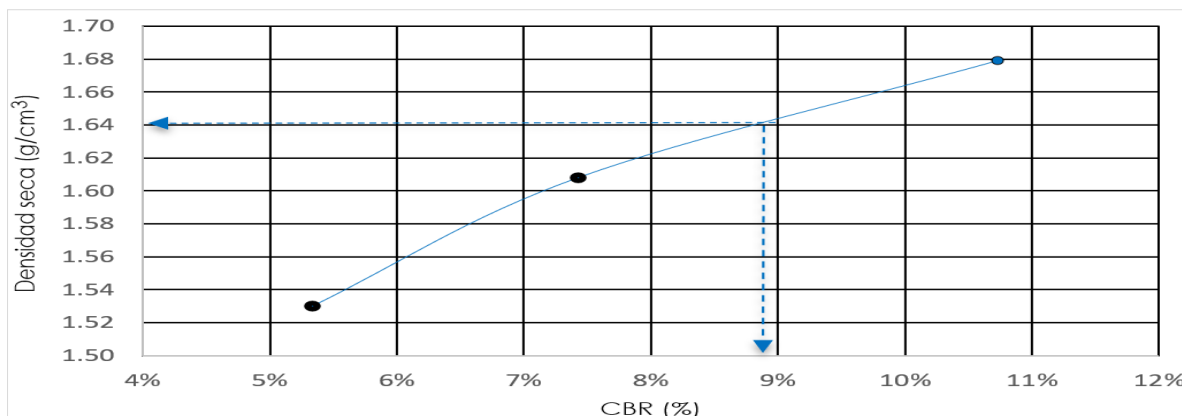
- El cálculo del CBR a una penetración de 0.1" se realiza mediante la fórmula:

$$CBR = \frac{\text{Esfuerzo en el suelo ensayado}}{\text{Esfuerzo patrón } (1000 \frac{\text{lb}}{\text{pulg}^2})} \times 100 \quad (11)$$

- Con los valores registrados, se generará una curva que relaciona el CBR con la densidad seca. El CBR será determinado al 95% de la MDS alcanzada mediante la prueba Proctor modificada, tal como se observa en las figuras 5 y 6. Esta información es crucial para conocer el comportamiento del suelo en condiciones óptimas de compactación

Figura 5*Gráfico de esfuerzo vs penetración para 12, 26 y 55 golpes*

Nota. Se visualiza ejemplo de gráfico de penetración vs carga. Elaboración propia.

Figura 6*Densidad seca vs CBR*

Nota. Gráfico que muestra la densidad seca frente al CBR. Elaboración propia.

3.2.1.3 Capacidad de soporte de la subrasante

La capacidad de soporte es una característica fundamental en la construcción de infraestructuras, ya que constituye la base sobre la que se edifican carreteras, pavimentos y otros tipos de obras civiles. Un suelo con capacidad de soporte apropiado asegura que las cargas impuestas, tanto estáticas como dinámicas, sean distribuidas de manera uniforme, minimizando el riesgo de asentamientos irregulares o deformaciones. Esta propiedad es crucial, sobre todo en el diseño y la construcción de carreteras, donde el constante tránsito vehicular y las variaciones climáticas pueden afectar la integridad de la estructura si el suelo no ha sido preparado adecuadamente. En este contexto, la subrasante juega un rol crítico. Es la capa final del terreno, que debe ser nivelada y ajustada con precisión mediante movimientos de tierra, como los procesos de corte y relleno. Estos movimientos de tierra no solo buscan darle una superficie plana y uniforme al terreno, sino también mejorar sus características mecánicas, para que sea capaz de soportar las cargas ocasionadas por el tráfico y los factores ambientales. Sobre esta capa es donde se colocará el pavimento o afirmado, que finalmente soportará el paso de los vehículos. El tratamiento adecuado de la subrasante es, por tanto, con el fin de mantener la estabilidad de la infraestructura a largo plazo. Una subrasante mal preparada puede llevar a fallos estructurales, tales como baches, fisuras o hundimientos, lo que incrementaría

significativamente los costos de mantenimiento y reduciría la vida útil de la vía. Además, una subrasante bien compactada no solo proporciona una base sólida para el pavimento, sino que también mejora la resistencia a las variaciones de humedad y temperatura, factores que pueden debilitar el suelo si no se manejan adecuadamente. Por estas razones, el manejo y preparación de la subrasante debe ser un proceso cuidadoso y planificado, con controles de calidad rigurosos que aseguren que el terreno está en condiciones óptimas antes de proceder con la construcción de las capas superiores de la carretera (MTC, 2013, p. 23).

La capacidad de soporte de la subrasante es un factor determinante en el diseño y construcción de infraestructuras viales, ya que influye directamente en la estabilidad y durabilidad de las capas superiores del pavimento. Esta capacidad se refiere a la habilidad de la subrasante para soportar las cargas vehiculares sin experimentar deformaciones excesivas que comprometan la estructura. Para garantizar que el suelo subyacente pueda cumplir adecuadamente con esta función, es esencial recurrir a la estabilización de suelos, un proceso que permite mejorar propiedades claves como la plasticidad, la resistencia al corte, y la capacidad de carga del suelo. La implementación de técnicas de estabilización no solo aumenta la resistencia de la subrasante, sino que también prolonga la vida útil del pavimento, evitando fallas prematuras como deformaciones permanentes o fisuras. El manual de carreteras incluye una serie de métodos de estabilización que abarcan desde el uso de aditivos químicos hasta procedimientos mecánicos que refuerzan el comportamiento del suelo bajo cargas repetitivas. Una correcta evaluación y tratamiento de la subrasante es esencial para asegurar la viabilidad y eficiencia a largo plazo de cualquier proyecto vial, permitiendo que las carreteras resistan de manera efectiva las exigencias del tráfico continuo (ADOT, 2005).

Los materiales ideales para la formación de la subrasante deben tener un CBR de al menos 6%. Si el CBR es bajo, indicando una subrasante deficiente, se debe realizar la estabilización del suelo. Entre las soluciones se encuentran estabilizaciones mecánicas, químicas, con geosintéticos, sustitución del suelo, elevación de la subrasante, modificación

del trazado vial, y optar por la alternativa más conveniente técnica y económicamente (MTC, 2013, p. 40).

Tabla 5

Subrasante clasificado en categorías

Categoría	CBR ₁
S ₀ : Subrasante ₁ inadecuadas	CBR ₁ <3%
S ₁ : Subrasante ₂ insuficientes	CBR ₂ ≥3% a CBR ₁ <6%
S ₂ : Subrasante ₃ regular ₁	CBR ₃ ≥6% a CBR ₂ <10%
S ₃ : Subrasante ₄ buenas	CBR ₄ ≥10% a CBR ₃ <20%
S ₄ : Subrasante ₅ muy buena ₁	CBR ₅ ≥20% a CBR ₄ <30%
S ₅ : Subrasante ₆ excelentes	CBR ₆ ≥30%

Nota. Materiales aptos para capa de subrasante CBR ≥6% (MTC, 2014, p. 120).

3.2.1.4 Criterio geotécnicos para estabilizar suelos

Varios criterios son esenciales para el mejoramiento de un suelo: a) La subrasante debe ser estabilizada si es inadecuada o presenta áreas húmedas o blandas, utilizando métodos como la estabilización mecánica, con aditivos o geosintéticos. b) La estabilización es crucial si la subrasante es arcillosa o limosa, lo que facilita la penetración de humedad en la capa granular. c) La calidad de la subrasante en relación con la napa freática debe ser evaluada. d) En altitudes superiores a 4000 metros, el efecto de las heladas sobre el suelo debe ser considerado. e) Antes de proceder, es fundamental identificar el tipo de suelo. f) Al elegir el método de estabilización más adecuado, deben considerarse factores

como el tipo de suelo, el uso previsto, la experiencia en estabilización, la disponibilidad de aditivos y los costos (MTC, 2014, p. 89).

Los criterios geotécnicos para estabilizar suelos se centran en evaluar las propiedades del terreno, con el objetivo de definir el método de estabilización más adecuado. En primer lugar, es crucial identificar el tipo de suelo, especialmente en el caso de suelos arcillosos o limosos, que tienden a ser sensibles a la humedad y requieren un tratamiento adicional. También es necesario considerar la influencia de la napa freática, ya que un alto nivel de agua subterránea puede comprometer la estabilidad del suelo. En áreas donde se presentan heladas o en altitudes elevadas, se debe tomar en cuenta la alteración térmica. Los métodos de estabilización incluyen el uso de aditivos químicos, que fortalecen la unión entre las partículas y la capacidad de carga, además de técnicas mecánicas como la compactación y el empleo de geosintéticos, que refuerzan el suelo y controlan la erosión. Por último, la viabilidad de estos métodos se ve influenciada por los materiales disponibles y los costos, lo que debe considerarse para mantener la eficiencia y la resistencia de la infraestructura (Caltrans, 2021).

3.2.1.5 Tipos de estabilización de suelos

La estabilización de suelos tiene como fin optimizar sus características físico-mecánicas, utilizando tanto métodos mecánicos como productos químicos, naturales o sintéticos (MTC, 2014, p. 89).

Para suelos de subrasante que no cumplen con los requisitos, se utilizan métodos de estabilización. Los tipos de estabilización incluyen: a) Estabilización mecánica: Mejora el suelo mediante compactación, disminuyendo los espacios vacíos sin alterar su estructura. b) Estabilización combinada: el suelo existente se mezcla con material de préstamo, escarificando hasta una profundidad de 15 cm para añadir el nuevo material, que debe cumplir con requisitos específicos. c) Sustitución de suelos: reemplaza el suelo existente con material nuevo, removiendo completamente el suelo antiguo y compactando el nuevo material en capas hasta alcanzar los estándares exigidos. d) Estabilización

química: emplea aditivos químicos para mejorar el comportamiento del suelo, reduciendo su plasticidad y variaciones en la expansión y contracción. Polímeros, derivados del petróleo, cloruro de sodio, cal, cemento, escoria de fundición y calcio se cuentan entre los materiales que se utilizan (MTC, 2014).

3.2.2 Polvo de caucho

El caucho en polvo se obtiene a través del procesamiento de trituración y separación de los materiales provenientes de llantas usadas de vehículos de transporte. Este procedimiento permite la obtención de un material que consiste en caucho vulcanizado. Cabe destacar que este producto no presenta toxicidad alguna, lo que lo hace seguro para su uso en diversas aplicaciones. El proceso implica descomponer las llantas en fragmentos más pequeños, separando las distintas capas y materiales que componen el neumático. Posteriormente, el caucho extraído se refina hasta alcanzar una consistencia en polvo, lo cual permite su incorporación en múltiples procesos industriales sin riesgo tóxico (Shinde et al., 2019).

El caucho en polvo, también conocido como caucho reciclado, se obtiene a partir de neumáticos fuera de uso, los cuales son recolectados y sometidos a un proceso de trituración mecánica. Este proceso descompone los neumáticos en partículas pequeñas, generalmente de menos de 19 mm, lo que permite su fácil incorporación en diversas aplicaciones, particularmente en la ingeniería civil. El caucho triturado se emplea principalmente en la construcción de carreteras mediante su adición en mezclas asfálticas, formando lo que se conoce como asfalto modificado con caucho. Este material mejora significativamente las propiedades del pavimento, aumentando su flexibilidad y resistencia a las cargas vehiculares. Además, reduce la formación de grietas y deformaciones, prolongando la vida útil del pavimento. El uso de caucho reciclado también presenta un beneficio ambiental, ya que contribuye a la reducción de residuos de neumáticos, proporcionando una solución sostenible para la gestión de desechos y la mejora de infraestructuras (Harrington, 2005).

3.2.2.1 Propiedades del caucho

El caucho de neumáticos fuera de uso (NFU) posee propiedades que lo hacen adecuado para aplicaciones en ingeniería civil. Su flexibilidad, durabilidad y resistencia a la abrasión le otorgan ventajas en el uso como material en capas de pavimento y rellenos ligeros. Además, su capacidad para absorber energía y su baja densidad comparado con agregados convencionales lo hacen ideal para terraplenes y otros proyectos de infraestructura. En el pavimento flexible, el caucho se incorpora a emulsiones asfálticas o mezclas de asfalto para mejorar su desempeño del pavimento. Esta combinación de caucho con asfalto incrementa la resistencia a la fatiga, reduce el agrietamiento y mejora su flexibilidad de la capa de rodadura, contribuyendo a una mayor durabilidad. Estas características hacen del caucho reciclado un material sustentable y eficiente en proyectos viales, al mismo tiempo que ayuda a reducir el impacto ambiental al reutilizar neumáticos desechados (DOT, 2004).

Según SIGNUS (2020), el caucho proveniente de neumáticos, ya sea en su forma entera, triturada o granulada, presenta una serie de propiedades. Entre sus características, destaca la absorción de impactos, evidenciada en una mejora de la resistencia al desgaste abrasivo, lo que mejora la durabilidad del material y su resistencia a deformaciones provocadas por el tráfico. Además, su impermeabilidad ha sido demostrada al mezclarse con mezclas bituminosas, endureciendo la capa asfáltica y reduciendo los efectos adversos de la infiltración de agua, lo cual es crucial en áreas húmedas. El caucho también posee una capacidad de absorción acústica y de vibraciones, utilizada para mitigar el ruido y las vibraciones del tráfico, mejorando la calidad de vida en zonas urbanas y reduciendo el impacto sobre las estructuras. Sin embargo, el uso del caucho en suelos, es esencial determinar el porcentaje adecuado de caucho en las mezclas, ya que su exceso podría alterar las propiedades estructurales del suelo. A continuación, se exponen las ventajas de combinar suelo y caucho, según diversos estudios realizados.

Tabla 6*Aplicación de suelo-caucho*

Aplicación	Descripción	Referencia	Ventajas	Porcentaje
Suelo-caucho	Suelo arcilloso altamente compresible	AHINAV, 2015-India	-Mayor capacidad de soporte.	Porcentajes en rangos de 1 -16%
	Suelo arcilloso	ARAM, s.f.-Iraq	-Disminución del material botaderos	
	Grava arcillosa limosa	Prasad y Prasada, 2009 – India	Iniciativa a nuevas aplicaciones del material o nuevo material.	
	Arena arcillosa	Swarma y Paleru, 2015 - India	-Mas económico.	

Nota. Información recolectada de estudios previos (Gutierrez & Rojas, 2020).

El cuadro previo muestra que añadir caucho a los suelos tiene un efecto favorable, actuando como un estabilizador eficiente debido a sus propiedades mecánicas, como su índice de resistencia, que presenta un valor adecuado. Asimismo, puede mezclarse con otros estabilizantes para alcanzar los criterios requeridos para su aplicación como subrasante. Esto subraya que el caucho reciclado puede alterar sus propiedades mecánicas en el suelo, según se ha demostrado en estudios y en mezclas bituminosa (Gutierrez & Rojas, 2020).

3.2.2.2 Vulcanización y composición del caucho

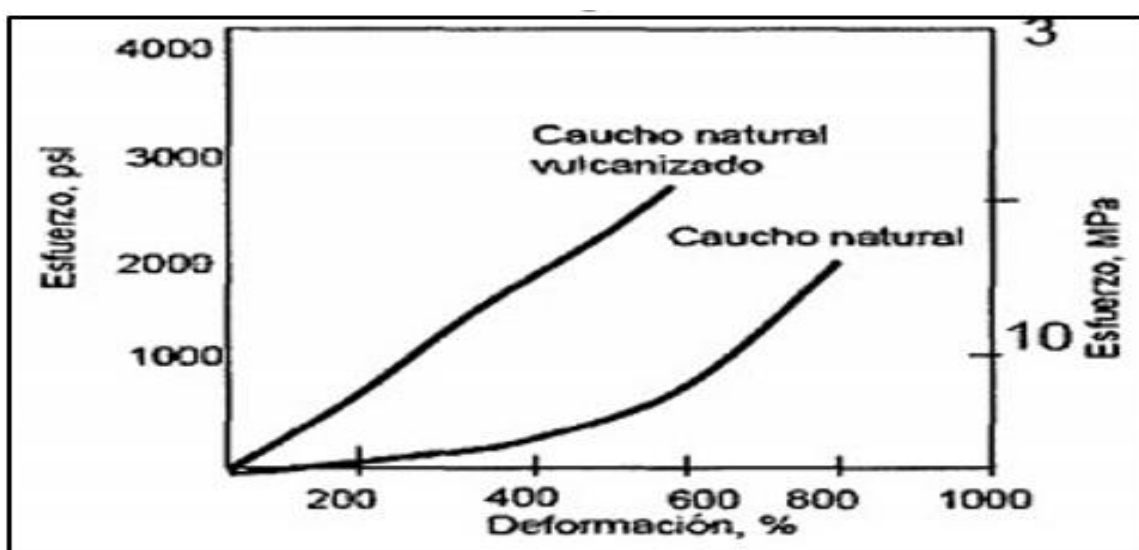
El proceso de vulcanización del caucho es una reacción química que transforma el caucho natural y sintético en materiales más resistentes y elásticos. Al agregar azufre y aceleradores orgánicos, se crean enlaces cruzados entre las cadenas de polímeros, lo que incrementa la durabilidad, la elasticidad y la resistencia al desgaste del caucho. Este proceso también previene la degradación y mejora las propiedades térmicas del caucho, por lo que es adecuado para aplicaciones que demandan resistencia a situaciones extremas y uso prolongado en diversas industrias (Coran, 2013).

Tras mezclarse con diferentes materiales y agentes químicos, el caucho es sometido a vulcanización, un proceso en el que se calienta junto con azufre a temperaturas altas, resultando en un material que es más resistente al calor, más duro, e irreversible térmicamente (Guevara, 2020).

Durante la fase final de su procesamiento, el caucho natural se somete a temperaturas elevadas y añadido el azufre lo transforma en un material con mejor elasticidad y mayor resistencia a deformarse y a prueba de agua. El gráfico siguiente muestra que el caucho natural puede deformarse hasta un 800% antes de alcanzar su límite de esfuerzo, que es aproximadamente 2500 psi (≈ 17.2 MPa). Esto indica su alta flexibilidad y capacidad de estiramiento bajo carga. En cambio, el caucho vulcanizado, debido a su proceso de vulcanización, se vuelve más rígido y resistente, lo que se refleja en su curva más empinada. Alcanza una menor deformación máxima, alrededor de 600%, y puede soportar un esfuerzo mayor de 3000 psi (≈ 20.7 MPa). Esto demuestra que el caucho vulcanizado, aunque puede soportar cargas más elevadas, se deforma menos, haciéndolo más adecuado para aplicaciones que requieren alta resistencia y baja deformación (Gutierrez & Rojas, 2020).

Figura 7

Comparación de la deformación del caucho natural y vulcanizado



Nota. Referencia gestión y reciclaje integral de neumáticos (GRIN, 2017).

Para mejorar el caucho antes de la vulcanización, se agregan suavizantes que facilitan su manejo, magnesio y óxido de zinc que logran reducir significativamente la duración del proceso de vulcanización, y antioxidantes que protegen el material contra la degradación causada por el oxígeno y el ozono. Este ozono, a su vez, mejora la resistencia a la abrasión y la tensión, reforzando la durabilidad del caucho en condiciones exigentes (Castro, 2008).

La tabla 7 muestra los diferentes componentes químicos del caucho, que pueden ajustarse dependiendo de la aplicación prevista.

Tabla 7

Composición química del caucho

Elementos	%
Hidrogeno	5-7
Nitrógeno	1.5
Carbono	70-83
Azufre	1.2-1.9
Color	0.1-0.8
Oxigeno	5
Hierro	5-18
Zinc	1.2-2.7
Otros	5

Nota. Referencia gestión y reciclaje integral de neumáticos (GRIN, 2017).

3.2.2.3 Tipos de caucho y su aplicación en el mejoramiento de suelos

La mejora de suelos mediante caucho triturado es una técnica innovadora en la ingeniería civil que refuerza las propiedades del terreno. Con este enfoque, se incrementa la capacidad de carga del suelo, mejorando su resistencia frente a las cargas aplicadas, al mismo tiempo que optimiza su elasticidad para absorber mejor las vibraciones producidas por cargas dinámicas, como el tráfico o la maquinaria pesada, lo que reduce los

asentamientos y proporciona mayor estabilidad. Un aspecto fundamental para el éxito de esta técnica es la selección adecuada del tamaño y la dosificación de las partículas de caucho. Se ha demostrado que el tamaño de las partículas varía entre 4.75 mm y 2 mm, dependiendo de las características del suelo, mientras que las proporciones de caucho en la mezcla suelen oscilar entre el 5% y el 20% en peso, logrando así un incremento en su resistencia. Además de los beneficios técnicos, este método contribuye significativamente a la sostenibilidad al darle un nuevo uso a materiales desechado, lo que reduce la cantidad de residuos en vertederos, botaderos, talleres mecánicos, entre otros. Esta práctica no solo mejora el rendimiento del suelo, sino que también promueve una construcción más ecológica y económica, alineándose con los principios de la gestión sostenible de residuos (IOSR, 2016).

En varios estudios, se ha analizado cómo diferentes formas de caucho como polvo, triturado, granular, tiras y ovoidal afectan el índice de resistencia en suelos naturales y modificados con caucho reciclado. Aunque se ha notado una ligera mejora, es necesario establecer los rangos óptimos de cantidad, tamaño y forma del caucho. Un estudio realizado en la India, por ejemplo, evaluó el efecto del caucho triturado en un suelo arcilloso altamente compresible, utilizando el material del tamiz N°40 en proporciones de 0%, 6%, 8%, 10%, 12% y 14%, logrando un aumento en el CBR. Otra investigación en Cajamarca incorporó caucho granular reciclado a un suelo arcilloso para pavimentos, alcanzando un índice CBR de 41% con un 60% de material reciclado, mostrando mejoras significativas, aunque el tamaño específico del caucho no se detalló (Gutierrez & Rojas, 2020).

3.3. Definición de términos

Arcillas: Partículas finas, cuyo tamaño es inferior a 0,002 mm, formadas mediante la transformación física y química de rocas y minerales a lo largo del tiempo (MTC, 2018).

Suelos expansivos: Los suelos arcillosos expansivos se deforman con la presencia de agua, causando cambios de volumen que pueden comprometer la estabilidad de las estructuras construidas sobre ellos (MTC, 2018).

Asentamiento: Desplazamiento vertical, o asentamiento del suelo, se produce debido a factores como la compresión por cargas, variaciones en la humedad o una compactación inadecuada. (MTC, 2018).

Bache: Desgaste por el tráfico vehicular y la desintegración localizada resultan en una depresión en la superficie de rodadura (MTC, 2018).

Análisis granulométrico: Método para analizar la distribución de los tamaños de las partículas en un material, determinando su granulometría de manera cuantitativa (MTC, 2018).

Calicata: Proceso de excavación que permite investigar la estratigrafía del suelo a diferentes profundidades (MTC, 2018).

CBR: Es una medida que determina cómo un suelo o material resiste la penetración de una fuerza en su masa, denominado valor relativo de soporte (MTC, 2018).

Compactación: Proceso, ya sea manual o mecánicamente, que busca disminuir el espacio vacío dentro de un suelo para aumentar su densidad y estabilidad (MTC, 2018).

Densidad: Se define como la proporción de masa dentro de un volumen dado de un material (MTC, 2018).

Límite líquido: Nivel de humedad en el suelo que lo posiciona en el punto de cambio entre ser plástico y ser líquido (MTC, 2018).

Límite plástico: Cantidad de agua presente en un suelo cuando este se encuentra entre su estado plástico y semi sólido (MTC, 2018).

Subrasante: Superficie final de la carretera, resultante del movimiento de tierras ya sea por corte o relleno, que sirve como base directa para la colocación de la estructura del pavimento, garantizando su estabilidad y soporte (MTC, 2018).

Curva granulométrica: Gráfico de análisis granulométrico que muestra cómo se distribuyen las partículas de distintos tamaños en el suelo, utilizando las aberturas de los tamices en el eje horizontal con una escala logarítmica, y los porcentajes de partículas acumuladas que pasan representados en el eje vertical (MTC, 2018).

IV. Metodología

4.1. Tipo y nivel de investigación

4.1.1 Tipo de investigación

Es de tipo aplicada; según Borja (2016), se dirige a resolver problemas específicos dentro de una realidad problemática, actuando directamente para modificarla. Se enfoca en la aplicación práctica e inmediata, dirigido a resolver problemas a través de estrategias prácticas, aplicar sus aportes para mejorar estrategias y actuaciones concretas. Promueve el desarrollo y mejoramiento de estas estrategias, fomentando la creatividad e innovación. Su propósito es práctico y aplicable, y los aportes deben ser útiles para mejorar la realidad o resolver problemas específicos en un contexto determinado (p. 10).

La presente tesis se clasifica como de tipo aplicada, ya que su fin es resolver un problema práctico relacionado con la estabilización de suelos arcillosos en la subrasante de la Av. Santo Domingo, Abancay. A través de la adición de caucho, se busca mejorar las propiedades mecánicas del suelo, con el fin de aumentar la durabilidad y estabilidad de la infraestructura vial. Este tipo de investigación no solo genera nuevos conocimientos, sino que también tiene una aplicación directa en el campo de la ingeniería civil, proporcionando una solución eficiente y sostenible al problema de la baja resistencia de los suelos arcillosos. utilizando conocimientos teóricos y científicos existentes para abordarlos de manera directa en casos prácticos reales. Se basa en fuentes de información como libros de geotecnia, mecánica de suelos y manuales de ensayo de laboratorio de suelos. El objetivo es aplicar métodos de mejoramiento de suelos, específicamente en estabilizar y mejorar el suelo arcilloso con la finalidad de usarse como material de subrasante en el pavimento.

4.1.2 Nivel de investigación

El nivel de investigación es explicativo, según Arias (2006) la investigación explicativa se dedica a indagar el porqué de los eventos, explorando la relación entre causa y efecto. Este enfoque puede investigar tanto las causas como los efectos (experimental)

mediante la formulación y prueba de hipótesis. Las conclusiones de estos estudios proporcionan un entendimiento más avanzado y completo del tema (p. 26).

La tesis se ubica en el nivel explicativo, porque no solo mide las propiedades del suelo arcilloso estabilizado con caucho, sino que también pretende explicar las causas de las mejoras que se observan. Se analizará por qué el caucho reciclado afecta la capacidad de soporte y otras propiedades del suelo. Este enfoque no se limita a la descripción de resultados, sino que explora los mecanismos físicos y mecánicos que generan cambios en la densidad, plasticidad y resistencia del suelo. A través de pruebas experimentales, se analizará cómo el caucho mejora el suelo estudiado.

4.1.3 Diseño de investigación

El diseño de investigación es experimental, según Borja (2016), se enfoca en verificar hipótesis mediante la manipulación intencionada de la variable independiente, con el fin de observar su efecto en la variable dependiente. Este proceso permite identificar relaciones de causa y efecto, asegurando que los resultados sean precisos gracias a controles internos rigurosos (p. 26).

4.2. Ámbito temporal y espacial

4.2.1 Temporal

La tesis está delimitada al año 2023, cubriendo cada etapa, desde la extracción de muestras hasta la realización de pruebas en laboratorio y el análisis final.

4.2.1 Espacial

La investigación se desarrolló en la Av. Santo Domingo, abarcando del Km 0+000 al Km 0+400 en la Urbanización San Luis, dentro del distrito de Abancay, provincia de Abancay, Apurímac.

4.3. Población y muestra

4.3.1 Población

La población o universo es el término que se usa para identificar el conjunto completo de sujetos o elementos en un estudio de investigación (Borja, 2016, p. 30).

Siendo nuestra población finita la subrasante determinada desde el km 0+00 al km 0+400 de la Av. Santo Domingo de la ciudad de Abancay, región Apurímac.

4.3.2 Muestra

La muestra de estudio se refiere a un subconjunto selecto de la población general del que se recopilan datos, con la intención de que estos resultados reflejen las características de toda la población (Borja, 2016, p. 30).

Con base en la Norma Técnica CE.010 Pavimentos Urbanos (2010), establece la recomendación de llevar a cabo tres puntos de investigación como referencia mínima. En la presente tesis, se han seleccionado tres puntos de investigación en la subrasante de la Av. Santo Domingo, de la ciudad de Abancay, identificados como C-01, C-02 y C-03. Estas muestras fueron obtenidas en diferentes ubicaciones estratégicas con el fin de obtener una representación adecuada de las condiciones del suelo.

4.3.3 Muestreo

En el muestreo no probabilístico, las unidades o elementos se eligen según la preferencia o el criterio del investigador (Martínez, 2012, p. 9).

En la presente tesis, se han seleccionado tres puntos de investigación en la subrasante, según la Norma Técnica CE.010 (MTC, 2010), donde se indica como mínimo tres puntos de investigación. Para un tipo de vía local, dicha norma especifica que, en un área de 1800 m², corresponde realizar al menos 01 punto de investigación. Sin embargo, dado que nuestra área de estudio es de 2400 m², corresponde realizar al menos 02 puntos de investigación. A pesar de ello, para asegurar la representatividad de los resultados y seguir los lineamientos detallados, se decidió realizar 03 puntos de investigación, tal como también lo aclara la norma. Para llevar a cabo el muestreo en la vía en estudio, se excavaron tres calicatas a una profundidad de 1.50 m, logrando extraer tres muestras representativas. Estas muestras fueron trasladadas al laboratorio para realizar los análisis necesario correspondientes.

Para la investigación, se realizó los ensayos correspondientes con las muestras de suelo arcilloso de la Av. Santo Domingo; y el material caucho en polvo se izó el requerimiento de la empresa INDUSTRIALES RAMOS. La cantidad de muestra se estableció con base en el total de ensayos planificados. Se ha utilizado el manual de ensayo de materiales como referencia, y los procedimientos específicos se detallan en la tabla a continuación:

Tabla 8

Cantidad total de muestra de suelo y caucho para los ensayos de laboratorio

Tipo de muestra	Cantidad (kg)
Muestra de suelo	350
Caucho triturado	20
Total	370

Nota. Total, de muestra requerido para efectuar los diferentes ensayos de laboratorio.
Elaboración propia.

4.4. Instrumentos

4.4.1 Instrumentos de recolección de datos

Instrumentos utilizados por el investigador para anotar datos o información sobre las variables que se están investigando (Hernández, Fernández, & Baptista, 2014, p. 199).

En el desarrollo de la tesis, se usaron formatos de ensayos de laboratorio para registrar los resultados, además de herramientas como Microsoft Excel y Microsoft Word para una gestión eficaz de los datos. Las fotografías tomadas durante el proceso ayudan a verificar el trabajo y a resguardar la información recopilada.

Durante los trabajos en laboratorio se utilizó como instrumento o formatos de ensayo de mecánica de suelos; a continuación, se detalla:

Tabla 9*Instrumentos utilizados para cada ensayo*

Ensayos	Instrumento utilizado	Norma técnica utilizado
Granulometría	Formatos de granulometría	MTC E 107
Contenido de humedad	Formato de contenido de humedad	MTC E 108
Límites de consistencia	Formato de límite líquido y límite plástico	MTC E 110 MTC E 111
Proctor modificado	Formato de Proctor modificado	MTC E 115
CBR	Formatos de CBR	MTC E 132

Nota. Se detallan los instrumentos y guías empleadas en los experimentos de laboratorio. Elaboración propia.

4.5.1 Técnica de recolección de datos

La observación se caracteriza por una percepción dirigida y metódica de hechos o fenómenos. En investigaciones de ingeniería, es fundamental que la información observada se registre de forma precisa en los formatos de recolección de datos establecidos (Borja, 2016, p. 33).

La técnica de observación se emplea para la recopilación de datos en el presente estudio, medición y documentación plasmando en formatos estándares o formatos de registro utilizados en el laboratorio de suelos.

4.5. Procedimientos

4.5.1 Procedimientos estadísticos

Las pruebas de hipótesis, conocidas también como pruebas de significación, tienen el propósito de analizar las afirmaciones respecto a los parámetros estadísticos de una

población. Es esencial que las hipótesis estén bien formuladas, ya que el análisis estadístico indicará si deben ser aceptadas o rechazadas (Martínez, 2012, p. 324).

En esta tesis, se han considerado tanto hipótesis nulas como alternativas. La elección de cuál utilizar depende del objetivo específico de la prueba. Se explicará a continuación en qué se diferencian las dos hipótesis.

-Hipótesis nula H_0 : $[\mu_x = \mu_y]$: es la suposición de partida utilizada en los análisis estadísticos. Representa una afirmación que se plantea inicialmente con el objetivo de ser evaluada mediante la recolección y análisis de datos. Esta hipótesis se establece para probar si existe suficiente evidencia en contra de ella, permitiendo así rechazarla si los datos muestran una diferencia significativa. Generalmente, la hipótesis nula propone que no hay ningún efecto, cambio o relación entre las variables estudiadas, lo que implica que cualquier variación observada es atribuible al azar o a factores no controlados. Si los resultados del análisis estadístico no proporcionan evidencia suficiente para rechazarla, se confirma que no se observan diferencias significativas entre las condiciones estudiadas. De esta manera, la hipótesis nula funciona como un punto de referencia neutral, a partir de la comparación de los resultados con esta base, se decide si es pertinente adoptar la hipótesis alternativa que indica la presencia de un efecto o relación significativa entre las variables estudiadas (Martínez, 2012, p. 328).

-Hipótesis alterna H_a : $[\mu_x > \mu_y]$, $[\mu_x < \mu_y]$, $[\mu_x \neq \mu_y]$: es la que se plantea en contradicción con la hipótesis nula (H_0), sugiriendo que los datos recolectados brindan la evidencia necesaria para rechazar H_0 , indicando que no es válida. Dependiendo del tipo de prueba estadística que se aplique, la hipótesis alterna puede adoptar distintas formas. En una prueba unilateral, se verifica si el parámetro es mayor o menor que un valor de referencia. Una prueba unilateral a la derecha se realiza cuando el parámetro es mayor, y si es menor, la prueba es unilateral hacia la izquierda. Por otro lado, en una prueba bilateral, se investiga si el parámetro es simplemente diferente (ya sea mayor o menor) respecto al valor esperado, sin asumir previamente la dirección del cambio. Este tipo de prueba permite

considerar tanto aumentos como disminuciones del parámetro. En definitiva, la hipótesis alterna permite analizar si hay una diferencia significativa en oposición a la hipótesis nula, y el tipo de prueba (unilateral o bilateral) determina si se analiza un incremento, una disminución o una diferencia general en el parámetro estudiado (Martínez, 2012, p. 328).

La verificación de las hipótesis nulas se llevó a cabo utilizando pruebas estadísticas paramétricas, con la distribución t de Student para comparar dos medias muestrales, ya que no se conocía cómo influiría el caucho en la muestra estudiada.

4.6. Análisis de datos

4.6.1 Análisis de datos en las pruebas de hipótesis

Martínez (2012), ofrece un enfoque detallado para el desarrollo de test de hipótesis en su libro denominado estadística y muestreo, explicando el proceso de manera detallada. Los criterios para utilizar la prueba t de Student son los siguientes: en primer lugar, esta prueba es adecuada cuando el tamaño de la muestra es de 30 o menor. Además, la prueba t necesita que los datos sigan una distribución normal, lo que implica que la población de la que provienen los datos debe cumplir con el supuesto de normalidad. En tercer lugar, es aplicable cuando la varianza poblacional es desconocida. Estos criterios aseguran la validez de la prueba y permiten realizar inferencias precisas sobre la población, proporcionando una descripción exhaustiva del proceso.

- Plantear la hipótesis para la investigación.
- Establecer el nivel de significancia.
- Calcular la varianza.
- Seleccionar el método estadístico y la prueba adecuada.
- Determinar los puntos críticos y las áreas de rechazo.
- Aplicar las fórmulas necesarias para calcular los datos muestrales.
- Hacer una decisión sobre la hipótesis, aceptándola o rechazándola.

El siguiente procedimiento detalla el proceso para desarrollar las pruebas de hipótesis planteadas. Se debe señalar que se llevaron a cabo pruebas para cada una de las hipótesis específicas relacionadas con los materiales de subrasante, tanto al añadir caucho como los que no lo contienen, en las muestras bajo análisis.

a) Planteamiento de la hipótesis

La elección de una prueba bilateral para la hipótesis se basa en la necesidad de medir el efecto de la adición de caucho en el material arcilloso. Dado que el polvo de caucho puede influir tanto de manera positiva como negativa en las propiedades del material, esta prueba es esencial para analizar ambos resultados posibles. Esta metodología permite evaluar cualquier aumento o disminución en las características del suelo, como su resistencia o plasticidad, asegurando un análisis completo del impacto del caucho. Utilizar una prueba bilateral asegura que no se pasen por alto posibles efectos adversos o beneficiosos que puedan surgir de la interacción del caucho con el suelo.

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

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

Donde:

$$H_0 = \text{hipótesis nula.}$$

$$H_a = \text{hipótesis alterna.}$$

b) Nivel de significancia

Representado por alfa, suele ser del 1%, 5% o 10%, aunque puede ajustarse a cualquier valor según las necesidades de la investigación.

c) Estadístico

Para comparar dos medias muestrales, se hizo uso de la distribución “t” de Student y el estadístico fue calculado aplicando la fórmula que se detalla a continuación:

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

$$t = s^2 = \frac{\sum(x_i - \bar{x})^2 + \sum(y_i - \bar{y})^2}{n_1 + n_2 - 2} = \frac{(n_1 - 1)s_x^2 + (n_2 - 1)s_y^2}{n_1 + n_2 - 2}$$

Donde:

t : El estadístico t calculado se expresa como t_c.

$\bar{x}$: Media de la muestra 1, que no incluye la adición de caucho.

$\bar{y}$: Media de la muestra 2, que incluye la adición de caucho.

n₁: Primera muestra (sin adición de caucho).

n₂: Segunda muestra (con mezcla de caucho).

s_x²: varianza de la primera muestra.

s_y²: varianza de la segunda muestra.

s²: Varianza agrupada.

d) Determinación de la región crítica

Dado que no se conoce el efecto de incorporar caucho en el suelo arcilloso, se decidió realizar una prueba bilateral de dos colas para analizar tanto los posibles efectos positivos como negativos. Esto es importante porque el impacto del caucho en el suelo puede ir en cualquiera de las dos direcciones, por lo que se evaluaron ambas colas. El nivel de significancia se estableció en 5% por cada cola, lo que resulta en un 10% total de significancia, quedando un 90% de confianza. Esto significa que los resultados que se alejen del 90% de los valores aceptados podrían indicar diferencias significativas. La región crítica se determinó utilizando el valor "t" tabulado, basado en el nivel de confianza y el tamaño de la muestra. Este valor establece el rango donde los resultados pueden considerarse significativos para tomar decisiones estadísticas. Este enfoque asegura que los cambios en las propiedades del suelo, como resistencia, plasticidad y densidad, sean evaluados rigurosamente. Así, la prueba bilateral de dos colas con un nivel de significancia del 10% total permite un análisis completo de los efectos del caucho en el suelo arcilloso, con la región crítica calculada mediante el valor "t" tabulado.

Figura 8

Tabla de datos correspondientes a la distribución "t" de Student.

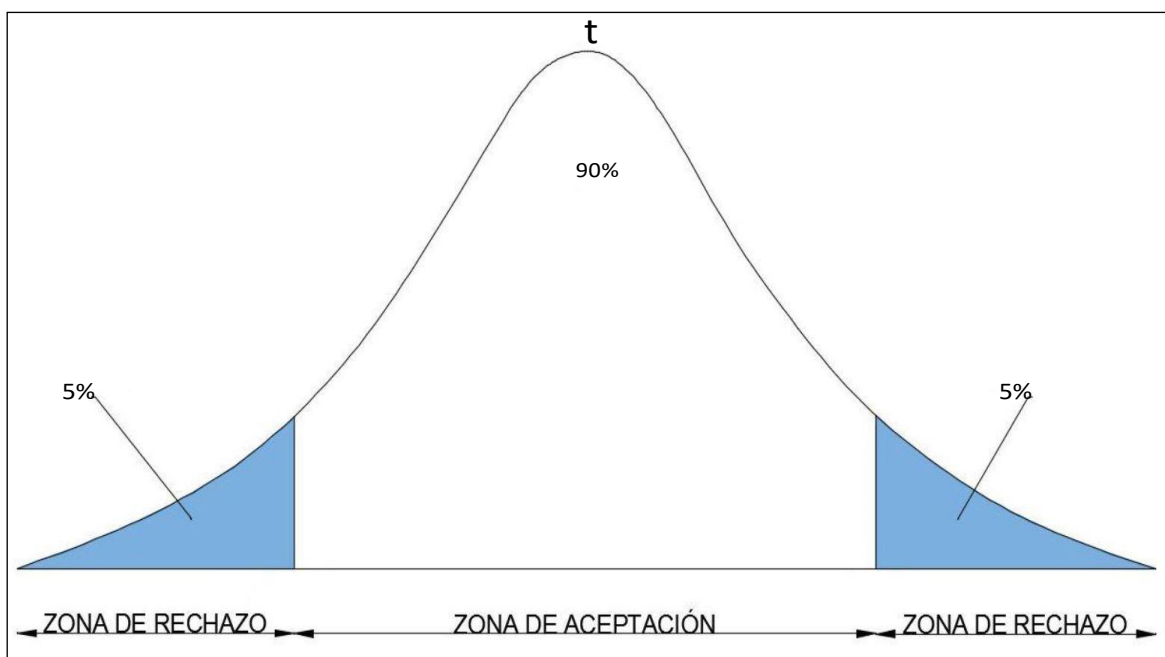
		$\alpha/2$												
		0,0005	0,001	0,005	0,01	0,025	0,05	0,1	0,2	0,25	0,3	0,4	0,45	0,475
v grados de libertad	1	636,619	318,309	63,657	31,821	12,706	6,314	3,078	1,376	1,000	0,727	0,325	0,158	0,079
	2	31,599	22,327	9,925	6,965	4,303	2,920	1,886	1,061	0,816	0,617	0,289	0,142	0,071
	3	12,924	10,215	5,841	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	0,688	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
	α	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. Valores de referencia para el establecimiento de la región crítica en la distribución "t" (Martínez, 2012).

La tabla presentada es una tabla de distribución "t" de Student, utilizada en el ámbito estadístico para realizar pruebas de hipótesis, especialmente cuando las muestras son pequeñas o cuando no se conoce la varianza poblacional. Esta tabla permite obtener los valores críticos de t en función de los grados de libertad (v) y los niveles de significancia (α), los cuales son esenciales para determinar si se rechaza o no una hipótesis nula. A medida que los grados de libertad aumentan, la distribución t se aproxima progresivamente a la distribución normal. En esta tabla, los valores de referencia proporcionan el umbral necesario para comparar con el estadístico t calculado (t_c) y tomar decisiones sobre la significancia estadística en una prueba t (Martínez, 2012).

Figura 9

Gráfico bilateral de la distribución "t" de Student.



Nota. En pruebas bilaterales, la distribución "t" delimita las zonas con un 5% de significancia en ambos extremos (Martínez, 2012).

La Figura 9 proporcionará los valores necesarios para determinar la región crítica t_t (t tabulado o t crítico).

Para llevar esto a cabo, se requiere de los siguientes datos:

$gl = (n_1 + n_2 - 2)$ grados de libertad.

Donde:

n_1 = cantidad de datos para la muestra sin incorporación de caucho.

n_2 = cantidad de datos para la muestra con incorporación de caucho.

α = nivel de significación.

e) Adoptar una decisión

La decisión de aceptar o rechazar la hipótesis nula se basa en los resultados del estadístico calculado y el nivel de significancia previamente definido. Esta decisión está directamente relacionada con la región crítica, que establece un umbral para la interpretación de los resultados. Cuando el valor del estadístico cae en la región crítica, se rechaza la hipótesis nula (H_0) y se acepta la hipótesis alternativa (H_a), indicando que los

datos proporcionan evidencia de un efecto o relación significativa. Si el valor no cae en esta región, se acepta H_0 , lo que significa que los resultados no proporcionan evidencia suficiente para rechazarla. Este proceso asegura que cualquier conclusión esté respaldada por un análisis riguroso y un criterio claro, minimizando la posibilidad de errores de interpretación.

4.7. Consideraciones éticas

En el desarrollo de la tesis, se respetaron las normas éticas que enfatiza la transparencia, el compromiso, la responsabilidad y el respeto, basándose en estudios previos que han sido validados y citados correctamente conforme a las normas APA. Con el propósito de evitar el plagio, se ha reconocido y respetado la propiedad intelectual de los autores que proporcionaron información clave para la elaboración de la tesis.

Finalmente, la tesis también se elaboró siguiendo los lineamientos éticos establecidos y utilizando como referencia el manual de ensayos de materiales del MTC. Este manual proporcionó una guía clave para la definición de los objetivos de la investigación, asegurando que todos los procedimientos se realizaran con el máximo rigor técnico y científico. La aplicación de estos principios no solo permitió obtener resultados precisos, sino también coherentes y válidos, garantizando que los métodos utilizados fueran confiables. Además, el respeto a las normas éticas y a los procedimientos recomendados en el manual contribuyó a que los datos obtenidos fueran manejados con integridad y transparencia, lo cual es esencial para la credibilidad de la investigación. Todo esto ayudó a mantener un enfoque ético a lo largo del estudio, asegurando que la interpretación y el análisis de las variables se hicieran de manera responsable y precisa, sin comprometer los valores fundamentales de honestidad y respeto hacia los resultados. La atención a estos principios éticos fue un aspecto clave que permitió validar las conclusiones obtenidas y proporcionar recomendaciones basadas en datos confiables y bien fundamentados.

V. Resultados y discusión

5.1. Resultados

5.1.1 Ubicación de la vía y muestreo de material

Para la adecuada conformación de subrasantes en pavimentos, es fundamental identificar y seleccionar lugares con aptitudes favorables que garanticen la estabilidad de la estructura vial. Esto implica evaluar exhaustivamente las propiedades del material a utilizar, como su resistencia, índice de plasticidad y capacidad de drenaje, asegurando que cumpla con los estándares técnicos establecidos. Además, es esencial verificar que el material tenga una buena capacidad de soporte y se ajuste a los requisitos mínimos especificados en el manual de carreteras del MTC, ya que estas características influyen directamente en la durabilidad y desempeño de las vías. Una correcta selección y preparación del material contribuyen a prevenir deformaciones, aumentar la vida útil del pavimento y reducir los costos asociados al mantenimiento.

El trabajo de campo se centró en la identificación del material arcilloso en la Av. Santo Domingo de la ciudad de Abancay, Apurímac, con el objetivo de evaluar su idoneidad para aplicaciones en infraestructura vial. Se tomaron muestras representativas de la subrasante en tres puntos estratégicos, cuidadosamente seleccionados y etiquetados como C-01, C-02 y C-03, asegurando su representatividad en función de las características del terreno. Estas muestras fueron trasladadas al laboratorio bajo condiciones controladas para someterse a una serie de ensayos específicos siguiendo los manuales de ensayos de laboratorio de suelos conforme al MTC y a las normativas vigentes. Los ensayos realizados, que incluyeron pruebas de capacidad de soporte, plasticidad y granulometría, son fundamentales para determinar las propiedades críticas del suelo. Estos análisis permiten verificar si el material cumple con las exigencias mínimas para su uso en la conformación de subrasante, garantizando que cumpla con los estándares técnicos requeridos y alineándose con los objetivos establecidos en la tesis.

Figura 10

Ubicación de calicatas en estudio Av. Santo Domingo



Nota. Elaboración propia.

Ubicación: Av. Santo Domingo, Abancay, Apurímac.

Coordenadas:

-C1 Este: 727357, Norte: 8491530, altura: 2379 msnm

-C2 Este: 727392, Norte: 8491674, altura: 2381 msnm

-C3 Este: 727554, Norte: 8491776, altura: 2382 msnm

5.1.2 Muestreo de calicatas

En el proceso de toma de muestras de las calicatas, se tuvieron en cuenta los ensayos necesarios para garantizar que la cantidad obtenida fuera suficiente y representativa, permitiendo así un análisis detallado en el laboratorio. Estos ensayos no solo buscaban asegurar la representatividad de las muestras, sino también obtener un volumen adecuado que reflejara con precisión las características del terreno en estudio. Durante el proceso, se implementaron técnicas rigurosas de muestreo para minimizar

errores y asegurar que las muestras extraídas conservaran las propiedades originales del suelo, evitando cualquier tipo de alteración o contaminación. Además, cada una de las muestras fue codificada y debidamente identificada para facilitar su manejo y análisis posterior en el laboratorio. Este proceso de codificación también permitió llevar un control exhaustivo sobre cada muestra, asegurando que los resultados obtenidos en los análisis pudieran ser trazables y asociados de forma precisa con su origen. De esta manera, se garantizó la fiabilidad de los datos obtenidos y la correcta interpretación de los resultados. Las muestras fueron codificadas y se identificaron de la siguiente manera:

Tabla 10

Codificación de la muestra

Codificación	Descripción
C-01	M-1
C-02	M-2
C-03	M-3

Nota. Asignación de códigos para las muestras analizadas. Elaboración propia.

5.1.3 Estudio de las propiedades físicas y mecánicas

Es crucial para determinar sus aptitudes en aplicaciones específicas. Este análisis proporciona una comprensión detallada de cómo el material responde a diferentes condiciones y cargas, asegurando que cumpla con los estándares técnicos y normativos requeridos. Evaluar estas propiedades permite garantizar que el material sea adecuado para su uso previsto, optimizando así su rendimiento y durabilidad en proyectos de ingeniería civil.

Con el fin de lograr una caracterización exhaustiva de las muestras utilizadas en esta tesis y cumplir con los objetivos establecidos, se llevaron a cabo los ensayos necesarios conforme a las normas vigentes para el material de subrasante. Estos ensayos fueron fundamentales para obtener una comprensión completa de las propiedades del material, permitiendo que los datos recopilados proporcionaran información confiable para

el análisis y las conclusiones del estudio. El cumplimiento riguroso de las normas técnicas aseguraba la calidad de los resultados obtenidos. Las pruebas efectuadas fueron:

- Análisis granulométrico
- Contenido de humedad
- Límites de consistencia
- Proctor modificado
- CBR

Se efectuaron los ensayos necesarios para las muestras representativas de los tres puntos de investigación y las diversas adiciones de caucho, siguiendo los procedimientos establecidos por las normas del sector vial. Estas pruebas incluyeron análisis del valor relativo de soporte, densidad, y plasticidad, donde se utilizó caucho en proporciones variables para evaluar su impacto en las propiedades del suelo. También se realizaron pruebas adicionales de compactación para identificar cómo el caucho afecta la estabilidad general del material tratado. Se realizó una comparación detallada entre los resultados del material sin adición y los obtenidos con caucho en diferentes proporciones, destacándose mejoras significativas en la capacidad de soporte del suelo tras las incorporaciones del material caucho. Además, se observó una disminución en la plasticidad del suelo tratado, lo que sugiere una mayor estabilidad frente a deformaciones. Los datos obtenidos permitieron determinar cómo la adición de caucho no solo influye en la mejora del comportamiento mecánico del suelo, sino que también contribuye a la sostenibilidad mediante la reutilización de materiales reciclados, mostrando su viabilidad para futuras aplicaciones en infraestructura vial más eficiente y duradera.

5.1.4 Análisis granulométrico MTC E 107

En la tabla que sigue se encuentran los resultados obtenidos de la distribución del tamaño de las partículas.

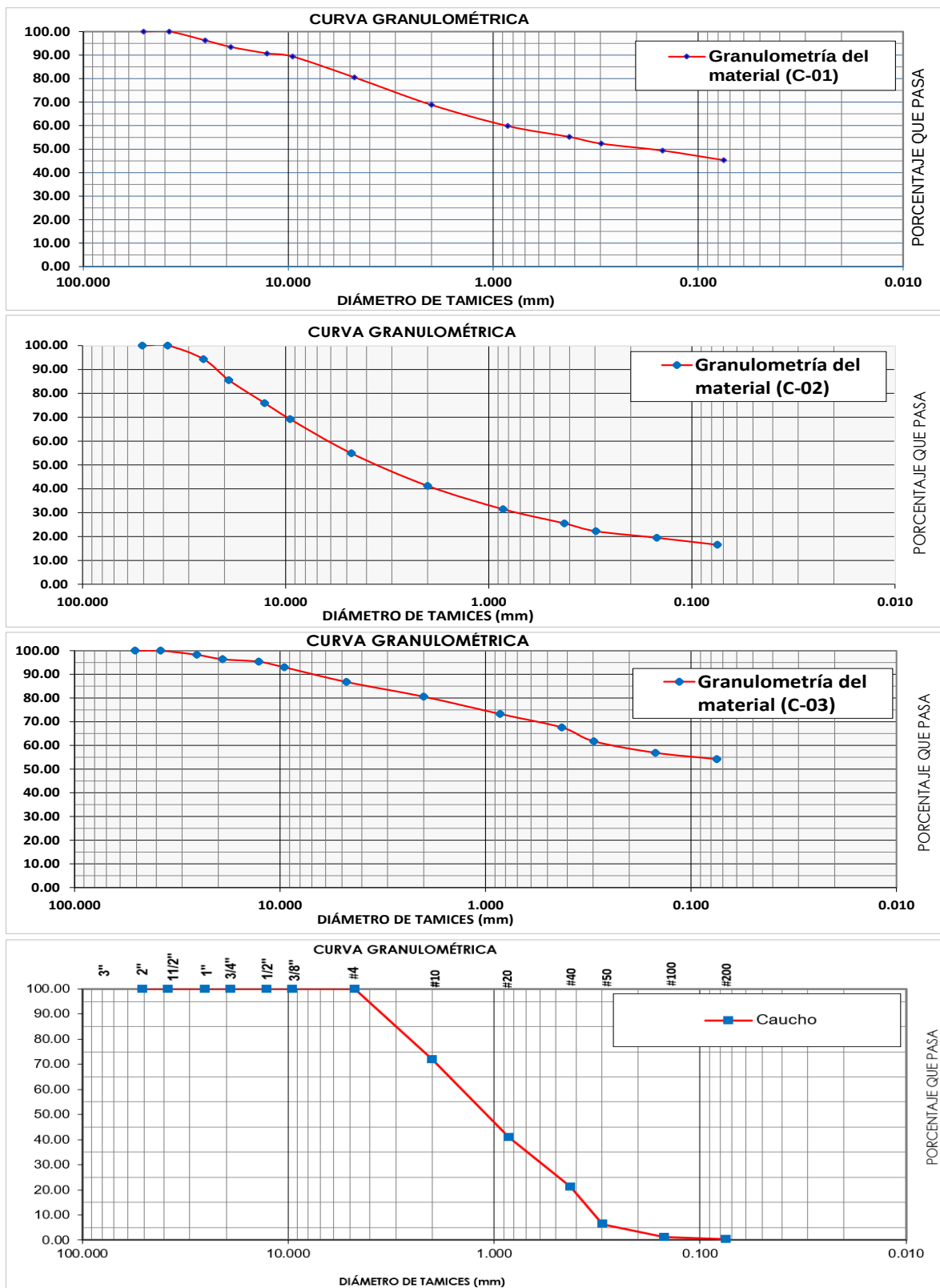
Tabla 11*Resultados del análisis granulométrico de las calicatas y caucho*

		Calicata			
		C-01	C-02	C-03	caucho
Tamiz	Abertura (mm)	% Que Pasa	% Que Pasa	% Que Pasa	% Que Pasa
3"	75.000	100.00	100.00	100.00	100.00
2"	50.800	100.00	100.00	100.00	100.00
1 1/2"	38.100	100.00	100.00	100.00	100.00
1"	25.400	96.23	94.36	98.26	100.00
3/4"	19.050	93.44	85.54	96.39	100.00
1/2"	12.700	90.71	75.93	95.37	100.00
3/8"	9.525	89.38	69.22	92.98	100.00
Nº4	4.750	80.49	54.90	86.78	100.00
Nº10	2.000	68.82	41.25	80.58	71.92
Nº20	0.850	59.84	31.47	73.27	41.05
Nº40	0.425	55.20	25.55	67.56	21.30
Nº50	0.297	52.35	22.26	61.73	6.37
Nº100	0.149	49.38	19.50	56.87	1.10
Nº200	0.075	45.32	16.58	54.22	0.33

Nota. Distribución porcentual del material pasante. Elaboración propia.

Figura 11

Curva granulométrica



Resultados de las calicatas

El estudio implicó la realización de calicatas para recolectar muestras del subsuelo, las cuales fueron analizadas para conocer la distribución de partículas, porcentaje de humedad, límites de consistencia, densidad máxima y CBR. Estos resultados permiten evaluar la capacidad de soporte del material y su adecuación para su uso, asegurando el cumplimiento de los requisitos normativos y garantizando su estabilidad y calidad.

Tabla 12

Resumen de los hallazgos obtenidos a partir de las calicatas

Especificaciones	Resultados		
	C-01	C-02	C-03
Profundidad Progresiva (Km)	1.5 0+000	1.5 0+200	1.5 0+400
Grava (%)	19.51	45.10	13.22
Arena (%)	35.17	38.32	32.56
Finos (%)	45.32	16.58	54.22
Contenido de humedad (%)	15.35	3.3	16.67
Límite líquido (%)	35.57	24.79	34.65
Límite plástico (%)	24.88	19.51	23.79
Índice de plasticidad (%)	10.69	5.28	10.86
Clasificación SUCS	Arena arcillosa (SC)	Grava arcilloso-limosa con arena (GC-GM)	Arcilla de media plasticidad arenosa (CL)
Clasificación AASHTO	Suelo arcilloso (A-6)	Fragmentos de roca, grava y arena (A-1-b)	Suelo arcilloso (A-6)
Densidad máxima seca (g/cm ³)	2.015	2.158	1.690
Humedad óptima (%)	14.31	11.700	20.46
CBR al 95% MDS	8.10	10.00	5.20

Nota. Resumen de resultados de ensayos realizados. Elaboración propia.

5.1.5 Adiciones de caucho al suelo arcilloso

Se incorporó caucho de neumáticos reciclados, con tamaños de las partículas que están comprendidos entre 4.75 mm y 0.075 mm, previamente tamizado a través de las mallas N° 4 y N° 200. Los ensayos se realizaron en la calicata C-03 para determinar su efecto en los límites de Atterberg, la densidad según el Proctor modificado, y la resistencia CBR. La elección de la calicata C-03 se debió a su importancia para los objetivos de este estudio, dado que, de acuerdo con la clasificación, presenta un suelo arcilloso de plasticidad media y arenosa. Además, se observó que, en comparación con las calicatas C-01 y C-02, que mostraron un CBR de subrasantes de calidad regular a buena, la calicata C-03 tenía las condiciones más desfavorables, haciendo crucial su evaluación detallada.

Para cumplir con los objetivos del estudio, se efectuaron diversas dosificaciones de caucho en el suelo para obtener datos más completos y detallados. A través de este enfoque, se evaluaron los efectos de diferentes porcentajes de caucho añadido en las propiedades del suelo, proporcionando información crucial para hallar el porcentaje más adecuado de caucho. La experimentación detallada facilitó la determinación precisa de cómo la incorporación de caucho afecta las características del suelo, permitiendo así ajustar las proporciones para optimizar el desempeño y la estabilidad del material en aplicaciones prácticas.

Se efectuaron varias combinaciones de suelo arcilloso con caucho, según se muestra en la Tabla 12, para analizar sus características tanto físicas como mecánicas.

Tabla 13

Proporciones empleadas al material arcilloso más caucho

% caucho	Muestra
3%	C-03
5%	C-03
7%	C-03
9%	C-03

Nota. En la tabla se muestran las proporciones de caucho para la C-03. Elaboración propia.

El cálculo de las proporciones de caucho añadidas al material arcilloso se estableció sobre el peso inicial de la muestra en condición seca, y se establecieron 4 niveles de adición de caucho en el estudio.

5.1.6. Valores obtenidos para el índice de plasticidad (IP)

Los resultados ofrecen una visión clara sobre las propiedades de plasticidad del suelo y su respuesta a variaciones en la humedad.

Tabla 14

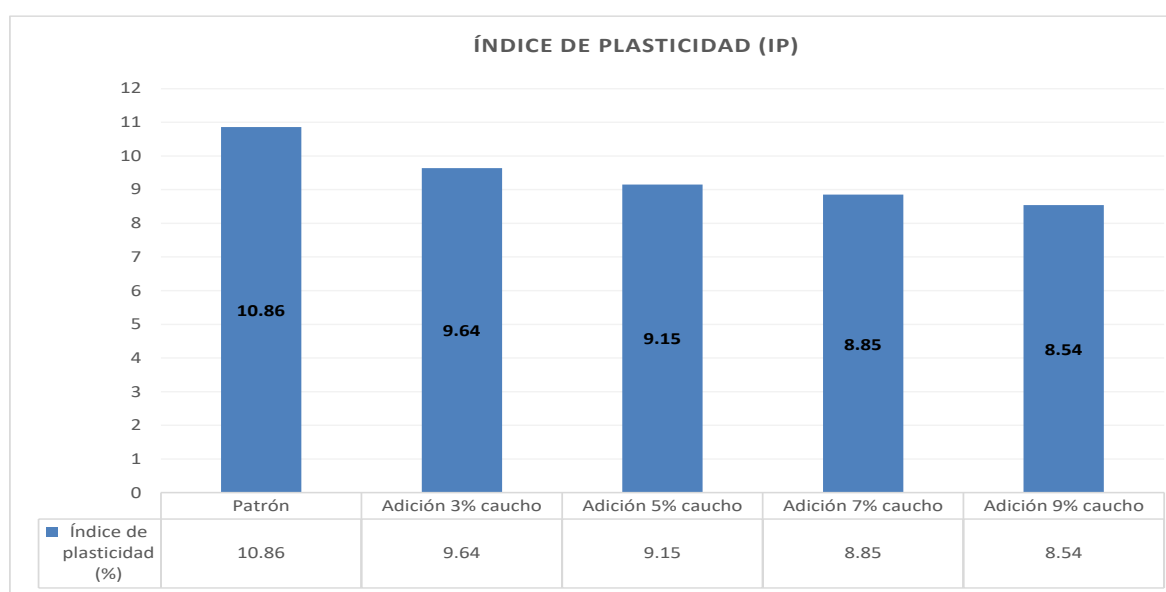
Resultados del índice de plasticidad (IP)

Combinación suelo-caucho	LL (%)	LP (%)	IP (%)
C-03(Patrón)	34.65	23.79	10.86
Suelo + 3% de caucho	34.16	24.52	9.64
Suelo + 5% de caucho	33.3	24.15	9.15
Suelo + 7% de caucho	32.74	23.89	8.85
Suelo + 9% de caucho	32.28	23.74	8.54

Nota. La incorporación de caucho en el material lleva a una disminución del IP. Elaboración propia.

Figura 12

Índice de plasticidad del suelo con adiciones de caucho



Nota. En el gráfico se visualiza IP al adicionar el material caucho. Elaboración propia.

Los resultados revelan que las adiciones de caucho al suelo arcilloso reducen el IP. El valor disminuyó de 10.86% en la muestra sin caucho a 8.54% con una proporción de 9% de caucho, las adiciones de caucho reducen la plasticidad del suelo, haciéndolo menos susceptible a cambios de volumen con la humedad. El caucho, al no poseer características cohesivas ni plásticas, reduce la plasticidad del suelo. Su tamaño de partícula, que es mayor en comparación con el de la arcilla, también altera la estructura interna del suelo.

5.1.7 Resultados del ensayo Proctor modificado

A través del ensayo, se obtienen resultados que definen la densidad seca máxima y la cantidad de humedad ideal para lograr una compactación adecuada del suelo. Estos datos son fundamentales para asegurar que el terreno ofrezca una base sólida y estable, capaz de soportar las cargas proyectadas de manera eficiente. Además, esta información es clave para optimizar los procesos constructivos, ya que permite ajustar las condiciones del suelo en obra y garantizar su durabilidad a largo plazo, reduciendo posibles asentamientos o fallas estructurales..

Tabla 15

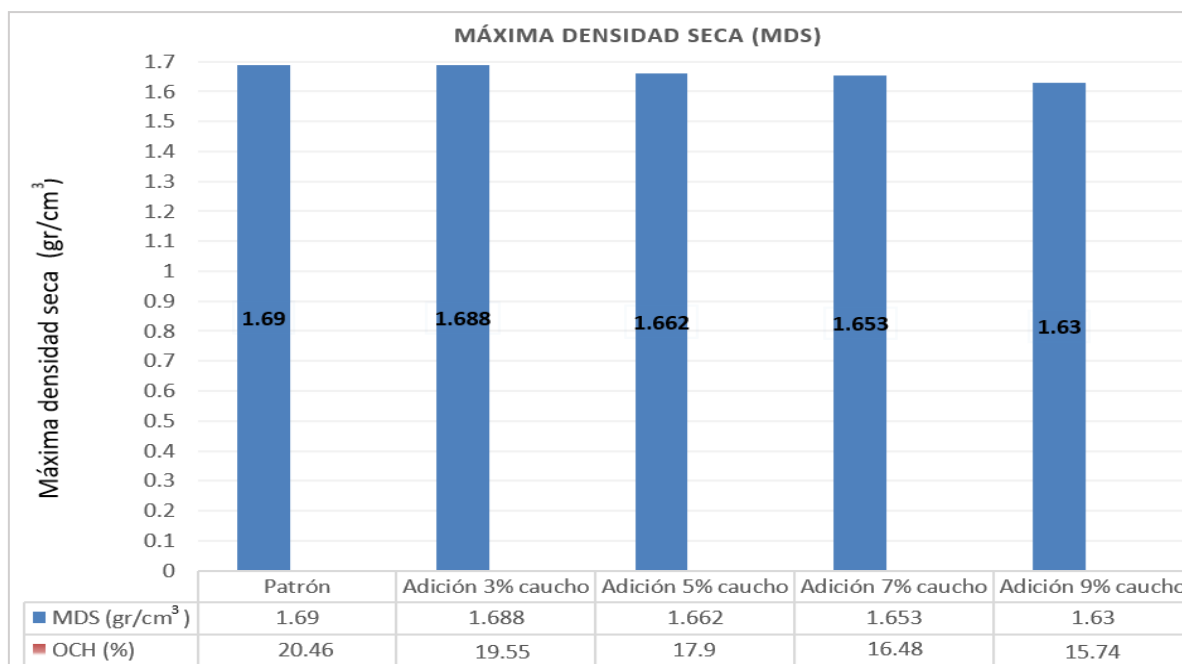
Resultados del ensayo de Proctor modificado con adición de caucho.

suelos más caucho (%)	Humedad optima	Máxima densidad seca (MDS)
C-03(Patrón)	20.46 %	1.690 g/cm ³
Suelo + 3% de caucho	19.55 %	1.688 g/cm ³
Suelo + 5% de caucho	17.90 %	1.662 g/cm ³
Suelo + 7% de caucho	16.48 %	1.653 g/cm ³
Suelo + 9% de caucho	15.74 %	1.630 g/cm ³

Nota. Los valores corresponden a la MDS y la humedad óptima. Elaboración propia.

Figura 13

Resultados de la máxima densidad seca del suelo con adición de caucho



Nota. Los resultados muestran que la máxima densidad seca del suelo disminuye ligeramente con el aumento de la adición de caucho en diferentes proporciones. Elaboración propia.

Según los resultados obtenidos en el ensayo de compactación, se evidencia una disminución en el peso volumétrico del suelo con el incremento de las adiciones de caucho. La disminución de la densidad es un efecto observado cuando se introducen materiales ligeros y menos densos como el caucho en las mezclas de suelo, ya que el caucho es un material con una densidad significativamente menor que la de los suelos.

La figura 13 muestra los resultados del estudio sobre la influencia de la adición de caucho en la máxima densidad seca (MDS) del suelo. Al añadir diferentes porcentajes de caucho (3%, 5%, 7%, y 9%), se observa una tendencia decreciente en la MDS a medida que aumenta la cantidad de caucho. La densidad del suelo sin aditivos (patrón) es de 1.69 g/cm³, mientras que con un 3% de caucho disminuye a 1.688 g/cm³, con un 5% a 1.662 g/cm³, con un 7% a 1.653 g/cm³, y con un 9% alcanza 1.63 g/cm³. La disminución observada podría explicarse por las propiedades del caucho, al tener un menor peso

específico. Además, se observa una reducción en el contenido óptimo de humedad (OCH), que baja del 20.46% en la muestra patrón a 15.74% con un 9% de caucho. Este comportamiento puede atribuirse a la baja capacidad del caucho para absorber y retener agua, lo que reduce la capacidad de retención de agua en el suelo.

5.1.8 Resultados del ensayo CBR (suelo con caucho)

Para los ensayos de CBR, se siguieron los protocolos establecidos en el manual MTC E 132.

Se prepararon tres especímenes compactados utilizando la humedad óptima determinada en el ensayo Proctor modificado. Cada muestra fue compactada bajo energías de 55, 26, y 12 golpes respectivamente. Tras la compactación, los especímenes fueron sometidos a un proceso de saturación, el cual se extendió durante 4 días. Al finalizar el periodo de inmersión, los especímenes son sometidos a la prensa CBR con el propósito de medir la resistencia a la penetración en el suelo compactado.

Tabla 16

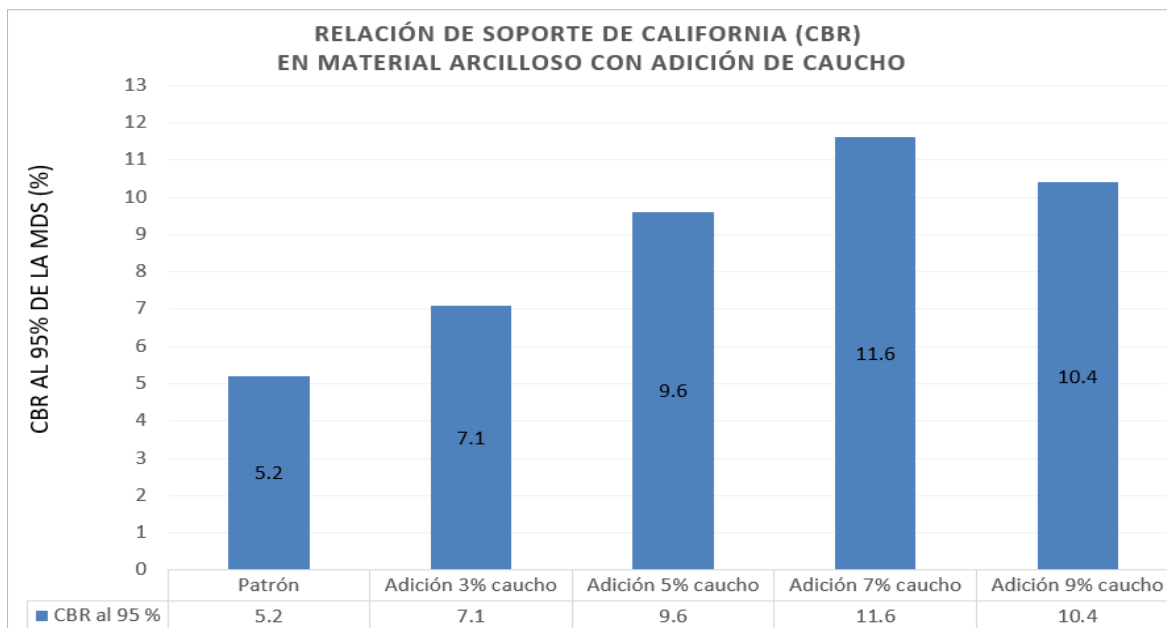
Resultados de CBR con las adiciones de caucho al suelo arcilloso

Combinación suelo-caucho	CBR al 95% de la MDS (%)
C-03(Patrón)	5.2
Suelo + 3% de caucho	7.1
Suelo + 5% de caucho	9.6
Suelo + 7% de caucho	11.6
Suelo + 9% de caucho	10.4

Nota. Los resultados indicados corresponden al ensayo de CBR. Realización propia.

Figura 14

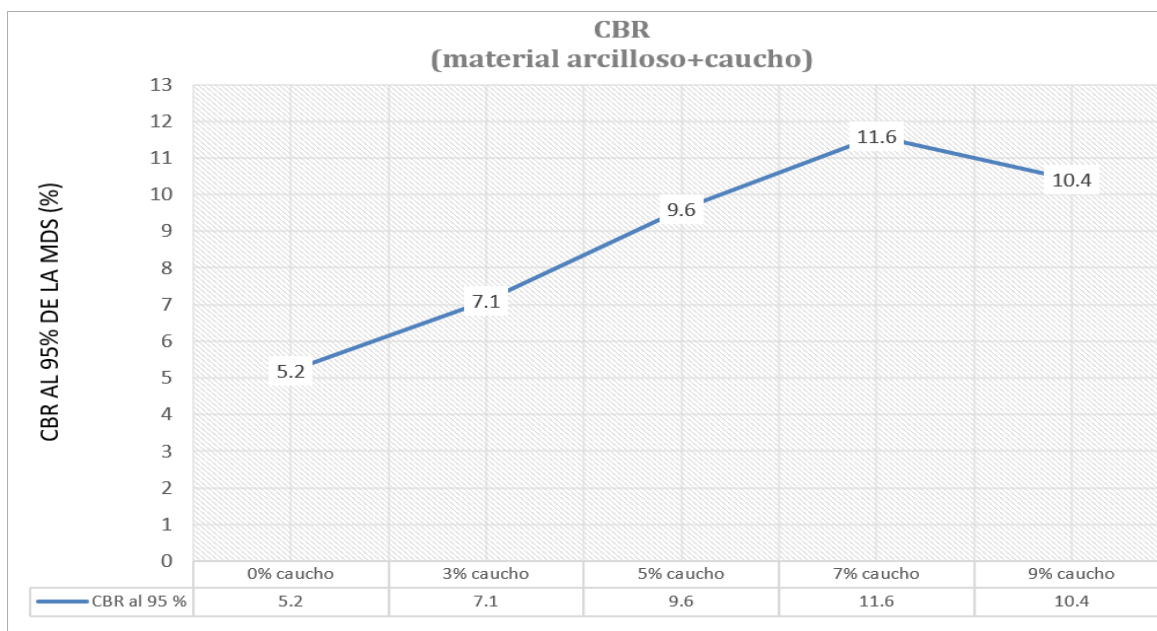
Resultados del CBR correspondientes a las adiciones de caucho en el suelo arcilloso



Nota. La figura detalla la variación en los valores de CBR según las diversas adiciones de caucho realizadas al suelo arcilloso. Realización propia.

Figura 15

Evolución del valor de CBR tras las adiciones de caucho al suelo arcilloso



Nota. La gráfica muestra la evolución del CBR conforme a las diferentes combinaciones de caucho en el suelo estudiado. Realización propia.

La gráfica presentada muestra cómo varía el CBR en función de diferentes combinaciones de caucho en un suelo arcilloso. Este tipo de análisis es fundamental para establecer la capacidad de soporte del suelo y evaluar la influencia de aditivos como el caucho en su comportamiento. El 7% de caucho resultó ser la dosificación más eficiente, logrando un CBR de 11.6%, lo que indica una mejora significativa en las cualidades del suelo. Sin embargo, al incrementar la adición de caucho al 9%, se observa una disminución en el valor del CBR, alcanzando 10.4%, lo que sugiere que una mayor cantidad de caucho no necesariamente mejora las propiedades del suelo, y podría generar una reducción en su capacidad de soporte. Esta información es clave para establecer las proporciones adecuadas en el uso de caucho como aditivo en proyectos de construcción, garantizando la estabilidad y resistencia de las infraestructuras.

Resumen de resultados de las adiciones de caucho al suelo arcilloso

Tabla 17

Resumen de resultados de las adiciones de caucho al suelo arcilloso

Características del suelo adicionando caucho	Resultados				
	Patrón (C-03)	Adición 3% caucho	Adición 5% caucho	Adición 7% caucho	Adición 9% caucho
Límite líquido (%)	34.65	34.16	33.3	32.74	32.28
Límite plástico (%)	23.79	24.52	24.15	23.89	23.74
Índice de plasticidad (%)	10.86	9.64	9.15	8.85	8.54
Densidad máxima seca (g/cm ³)	1.690	1.688	1.662	1.653	1.630
Humedad óptima (%)	20.46	19.55	17.90	16.48	15.74
CBR al 95% de la MDS	5.2	7.1	9.6	11.6	10.4

Nota. Resumen de los ensayos realizados con adiciones de caucho al suelo arcilloso.

Realización propia.

5.2. Discusión de resultados

Dado que el CBR obtenido en la calicata C-03 fue de 5.2%, cifra que se encuentra por debajo del umbral mínimo de 6% establecido por el MTC, lo cual indica que el material no cumple con los requisitos necesarios para su uso como material de subrasante, se procedió a realizar una serie de ensayos adicionales. En estos ensayos, se incorporaron diferentes proporciones de material caucho (3%, 5%, 7% y 9%) con el fin de ver su efecto en el valor de CBR.

a) Respecto al valor de índice de plasticidad (IP):

Respecto al IP, la calicata 03 (patrón) presentó un valor de 10.86%. A continuación, se detallan los resultados para las combinaciones evaluadas: 9.64%, 9.15%, 8.85% y 8.54% según lo mostrado en la Tabla 13, causando una disminución en el IP con cada combinación en: -1.22%, -1.71%, -2.01% y -2.32% con respecto al valor de IP del suelo arcilloso patrón (sin combinación). El IP muestra un decrecimiento, ya que el caucho no presenta plasticidad, siendo su valor de IP de 0%, el caucho, que no tiene la misma capacidad para retener agua ni para deformarse plásticamente y al ser un material no cohesivo y no plástico, reduce la plasticidad del suelo, esto ocurre porque el caucho no interactúa químicamente con el agua como lo hacen las partículas de arcilla, así mismo el caucho tiende a ser más grande en tamaño de partícula en comparación con las partículas de arcilla, lo cual interfiere con la estructura del suelo y disminuye su capacidad para retener agua. Esto resulta a un suelo que es menos susceptible a cambios en volumen con variaciones de humedad, reduciendo así el IP.

En su investigación de Palacios y Villanueva (2023), en dicha investigación se utilizaron combinaciones en distintas dosificaciones (5%, 10% y 15%), la muestra patrón tiene un IP de 18.7 % y al adicionar caucho se obtuvieron resultados del IP de 17.2%, 16.2%, 16%. En su investigación dichos valores decrecen tras adicionar el caucho, concluyen que la adición del caucho disminuye el índice de plasticidad.

En su investigación de Alvarez y Gutiérrez (2019), en dicha investigación se utilizaron combinaciones en distintas dosificaciones (1.5%, 2.5% y 3.5%), la muestra patrón

tiene un IP de 13% y al adicionar caucho se obtuvieron resultados del IP de 11%, 9%, 8%. En su investigación dichos valores decrecen tras adicionar el caucho, concluyen que la adición del caucho disminuye el índice de plasticidad.

b) En lo que corresponde al valor de la máxima densidad seca (MDS):

Respecto a la MDS, la calicata 03 (patrón) mostró un valor de 1.69 g/cm³, y los resultados obtenidos de las combinaciones fueron 1.688 g/cm³, 1.662 g/cm³, 1.653 g/cm³ y 1.63 g/cm³, de acuerdo a lo mostrado en la Tabla 14, generando una ligera disminución gradual con cada combinación con respecto al valor de MDS del suelo sin combinación. La reducción de la MDS es un efecto observado cuando se introducen materiales ligeros y menos densos como el caucho en las mezclas de suelo, ya que el caucho es un material con una densidad significativamente menor a que la de los suelos.

En su investigación Palacios y Villanueva (2023), en dicha investigación se utilizaron combinaciones de caucho con tamaño de 2mm, con dosificaciones del (5%, 10% y 15%); la MDS de la muestra patrón es de 1.789 g/cm³, mientras que con la adición de caucho se alcanzaron resultados de 1.77 g/cm³, 1.681 g/cm³ y 1.673 g/cm³. En su investigación dichos valores decrecen tras adicionar el caucho, concluyen que la adición del caucho se aprecia una disminución ligera de la MDS.

En su investigación Huamán y Muguera (2019), en dicha investigación se utilizaron combinaciones en distintas dosificaciones (5%, 10% y 15%); la MDS de la muestra patrón fue de 1.81 g/cm³, mientras que los valores tras la adición de caucho fueron de 1.74 g/cm³, 1.68 g/cm³ y 1.61 g/cm³. En su investigación dichos valores decrecen tras adicionar el caucho, concluyen que la adición del caucho se aprecia una disminución significativa en la MDS.

c) En lo que corresponde al valor de CBR:

Para la calicata C-03 (patrón), el valor de CBR obtenido fue de 5.2%, tras las adiciones realizadas en proporciones (3%, 5%, 7% y 9%) de caucho, se obtuvieron valores de CBR de: 7.1%, 9.6%, 11.6% y 10.4% según lo mostrado en la Tabla 15, generando incrementos con cada combinación en: 1.9%, 4.4%, 6.4% y 5.2%, siendo el 7% de adición

el óptimo ya que aumenta de 5.2% a 11.6% con respecto al valor de CBR del suelo arcilloso patrón (sin combinación). Esto ocurre debido a que el caucho tiende a ser más grande en tamaño de partícula en comparación con las partículas de arcilla, lo cual interfiere con la estructura del suelo, actuando como refuerzo dentro de la matriz del suelo, mejorando la interacción entre las partículas del suelo y aumentando a mejorar la capacidad del suelo para distribuir cargas, resultando en un mayor CBR.

En su investigación de Gutiérrez y Rojas (2020), en dicha investigación se utilizaron combinaciones en distintas dosificaciones (1.2%, 2.4%, 3.6%, 4.8%, 6% y 7.2%); obtuvieron resultados de CBR de 3.70%, 5.00%, 7.30%, 7.90%, 6.10% y 3.10%. En su investigación dichos valores crecen, tras la incorporación de 1.2%, 2.4%, 3.6% y 4.8% de caucho, se encontró que el 4.8% es la cantidad óptima, elevando la resistencia del suelo de 2.7% a 7.9%. Esto demuestra que el caucho mejora el CBR, transformando su categoría de subrasante de inadecuada a regular. Los resultados se obtuvieron utilizando caucho con tamaños de 4.75 mm a 2 mm.

En su investigación de Alvarez y Gutiérrez (2019), en dicha investigación se utilizaron combinaciones en distintas dosificaciones (1.5%, 2.5% y 3.5%); se registró un CBR de 3.20% en la muestra patrón y al incorporar caucho se obtuvieron resultados de CBR de 5.0%, 8.7%, 9.4%. En su investigación dichos valores crecen tras adicionar el caucho, concluye que el suelo arcilloso mejoró su clasificación de subrasante, pasando de inadecuada a regular. Los efectos se observaron con caucho de tamaños de 2 mm a 0.075 mm.

En su investigación Huamán y Muguerza (2019), en dicha investigación se utilizaron combinaciones en distintas dosificaciones (5%, 10% y 15%); la muestra patrón tiene un CBR de 3% y al añadir caucho se obtuvieron resultados de CBR de 6.4%, 10.4% y 8%. En su investigación dichos valores crecen tras adicionar el caucho, concluyen que la adición del caucho óptimo es el 10%, incrementando su resistencia de un 3% a un 10.4% de CBR, los resultados fueron alcanzados utilizando caucho de 2 mm.

5.3. Prueba de hipótesis

5.3.1 hipótesis general

H_0 : La adición de polvo de caucho (3%, 5%, 7% y 9%) no influye significativamente en el índice de resistencia (CBR) en suelos arcillosos para el mejoramiento de la subrasante en la Av. Santo Domingo - Abancay - Apurímac, 2022.

H_a : La adición de polvo de caucho (3%,5%,7%,9%) influye significativamente en el índice de resistencia (CBR) en suelos arcillosos para el mejoramiento de la subrasante en la Av. Santo Domingo - Abancay - Apurímac, 2022.

5.3.2 Prueba de hipótesis específica

5.3.2.1. Planteamiento de la hipótesis 1

H_0 : $[\mu_x = \mu_y]$ La adición de polvo de caucho, no influye significativamente en el valor de índice de plasticidad en suelos arcillosos para el mejoramiento de la subrasante en la Av. Santo Domingo – Abancay - Apurímac, 2022.

H_a : $[\mu_x \neq \mu_y]$ La adición de polvo de caucho, influye significativamente en el valor de índice de plasticidad en suelos arcillosos para el mejoramiento de la subrasante en la Av. Santo Domingo - Abancay - Apurímac, 2022.

A. Nivel de significación

Considerándose $\alpha=0.10/2=0.05$ por ser de dos colas.

B. Estadístico

Para el estadístico “ t_c ” se calculó para cada una de los datos obtenidos de las adiciones de caucho (3%, 5%, 7% y 9%) en el suelo arcilloso de la calicata C-03.

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

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

Donde:

t_c = "t" calculado

$\bar{x}$: Media obtenida de la muestra 01

$\bar{y}$: Media obtenida de la muestra 02

n_1 : Cantidad de muestra 01

n_2 : Cantidad de muestra 02

s^2 : Varianza agrupada

Las tablas e imágenes presentadas a continuación describen la prueba de hipótesis realizada para la hipótesis específica 1, relacionada con las adiciones de caucho al suelo arcilloso de la calicata C-03.

Hipótesis específica 1: resultados del material arcilloso combinado con caucho.

Tabla 18

Resultados de la hipótesis específica 1 material arcilloso - caucho

Descripción	Resultados			
	Adición 3% caucho	Adición 5% caucho	Adición 7% caucho	Adición 9% caucho
Nivel de significación	0.05			
Valor crítico	2.13			
Región crítica	< -∞; -2.13] y [2.13; +∞ >			
"t" calculado	1.19	1.56	2.31	2.63
p-valor	0.150	0.09	0.040	0.029
Condición	Si $t_c \in \text{R.C.} \Rightarrow \text{Se rechaza } H_0$			

Como t_c cae en la región de aceptación (R.A.) para la adición de 3% y 5% de caucho, se acepta H_0 , lo que indica que no influye significativamente en el IP.

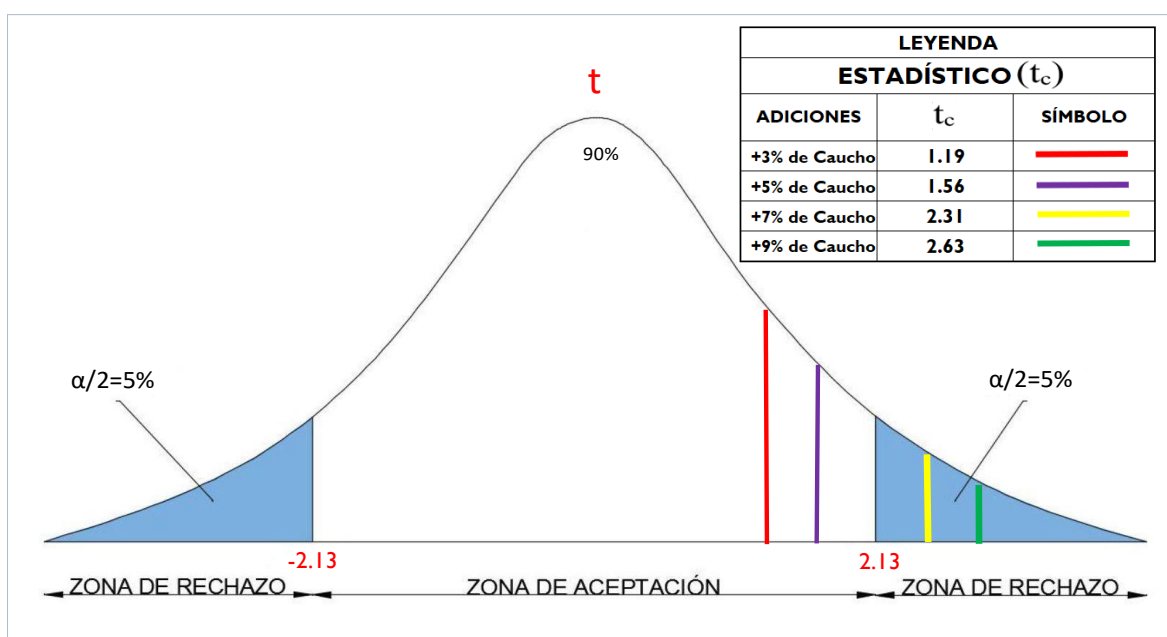
Decisión

Dado que t_c se encuentra en la región crítica (R.C.), se rechaza H_0 y se acepta H_a , lo que indica que los porcentajes de 7% y 9% de caucho influyen significativamente en el IP.

Nota. Descripción de los resultados estadísticos correspondientes a la hipótesis específica 1. Elaboración propia.

Figura 16

Valores estadísticos correspondientes a la hipótesis específica 1



Nota. Valores de t_c en las zonas crítica y de aceptación. Elaboración propia.

Se concluye que existe evidencia estadística de que, a través del análisis comparativo, se determinó que la adición de caucho tiene un efecto significativo sobre el IP del material arcilloso, revelando una diferencia estadísticamente importante. Los resultados indican que la adición del 7% y 9% de caucho provoca un cambio relevante, confirmando la influencia del caucho en su IP.

El gráfico presentado y los resultados estadísticos demuestran cómo la adición de diferentes porcentajes de caucho influye en el IP del suelo arcilloso. La hipótesis nula (H_0) es rechazada para las adiciones de 7% y 9% de caucho, lo que indica que estos niveles de caucho generan un cambio significativo en el comportamiento plástico del suelo. El análisis estadístico, representado por el valor crítico t_c , dado que este valor t_c cae dentro de una la región crítica, el análisis confirma que agregar caucho cambia las características del suelo de una manera significativa y comprobable.

5.3.2.2. Prueba de hipótesis específica 2

$H_0: [\mu_x = \mu_y]$ La adición de polvo de caucho, no influye significativamente en la máxima densidad seca en suelos arcillosos para el mejoramiento de la subrasante en la Av. Santo Domingo - Abancay - Apurímac, 2022.

$H_a: [\mu_x \neq \mu_y]$ La adición de polvo de caucho, influye significativamente en la máxima densidad seca en suelos arcillosos para el mejoramiento de la subrasante en la Av. Santo Domingo - Abancay - Apurímac, 2022.

A. Nivel de significancia.

Considerándose $\alpha=0.10/2=0.05$ por ser de dos colas.

B. Estadístico.

Se calculó el estadístico " t_c " para cada uno de los datos obtenidos de las adiciones de caucho mencionado en el ítem 4.6.1, se muestran los resultados en la siguiente tabla:

Tabla 19

Resultados de la hipótesis específica 2 material arcilloso - caucho

Descripción	Resultados			
	Adición 3%	Adición 5%	Adición 7%	Adición 9%
	caucho	caucho	caucho	caucho
Nivel de significación	0.05			

Valor crítico	1.94			
Región crítica	$<-\infty; -1.94]$ y $[1.94; +\infty>$			
"t" calculado	-0.02	1.68	2.41	3.98
p-valor	0.491	0.071	0.026	0.003
Condición	Si $t_c \in \text{R.C.} \Rightarrow \text{Se rechaza } H_0$			

Dado que el 3% y 5% de caucho se encuentran en la región de aceptación (R.A.), se acepta la hipótesis nula (H_0), lo que significa que estos porcentajes de caucho no influye significativamente en la densidad seca máxima.

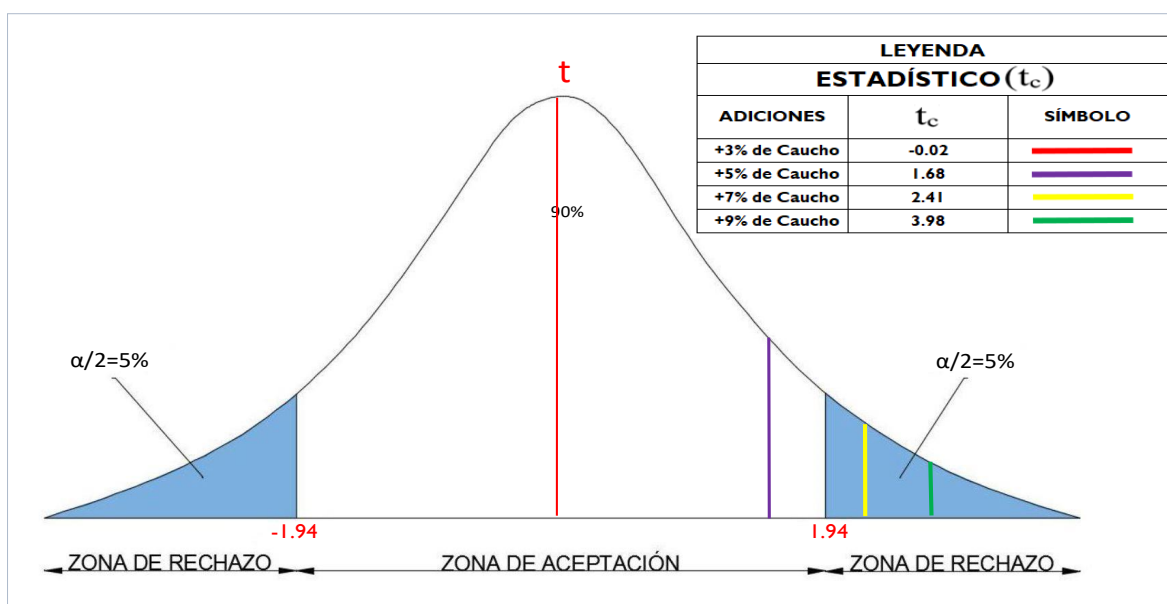
Decisión

Dado que la adición del 7% y 9% de caucho se sitúa en la región crítica (R.C.), se rechaza H_0 y se acepta H_a , lo que demuestra su influencia significativa en la densidad seca máxima.

Nota. Resumen estadístico de la hipótesis específica 2. Elaboración propia.

Figura 17

Gráfico que representa los estadísticos de la hipótesis específica 2



Nota. Los valores t_c se presentan en las regiones de rechazo y de aceptación para la hipótesis 2. Elaboración propia.

Los resultados confirman que el caucho de neumáticos fuera de uso influye significativamente en la densidad seca máxima del material arcilloso, y la evidencia estadística respalda que la adición del 7% y 9% de caucho tiene un impacto notable en la MDS.

El gráfico presentado muestra los valores de t_c para diferentes porcentajes de caucho añadido al suelo arcilloso, comparados con la densidad seca máxima (MDS). Este análisis revela que la inclusión de 7% y 9% de caucho tiene un efecto significativo en la MDS, lo cual es respaldado por los resultados estadísticos que colocan estos valores en la zona de rechazo, lo que significa que la hipótesis nula (H_0) es rechazada y se acepta la hipótesis alternativa (H_a). La evidencia estadística, representada por los valores críticos de t_c , proporciona una base sólida para implementar estas adiciones en proyectos de infraestructura, garantizando que los materiales utilizados cumplan con los requisitos de rendimiento y resistencia.

5.3.2.3. Prueba de hipótesis específica 3

H_0 : $[\mu_x = \mu_y]$ La adición de polvo de caucho, no influye significativamente en el valor de CBR en suelos arcillosos para el mejoramiento de la subrasante en la Av. Santo Domingo – Abancay - Apurímac, 2022.

H_a : $[\mu_x \neq \mu_y]$ La adición de polvo de caucho, influye significativamente en el valor de CBR en suelos arcillosos para el mejoramiento de la subrasante en la Av. Santo Domingo – Abancay - Apurímac, 2022.

A. Nivel de significancia

Considerándose $\alpha=0.10/2=0.05$ por ser de dos colas.

B. Estadístico

El cálculo del estadístico se llevó a cabo utilizando la fórmula indicada en el ítem 4.6.1, y los resultados se exponen en la tabla siguientes.

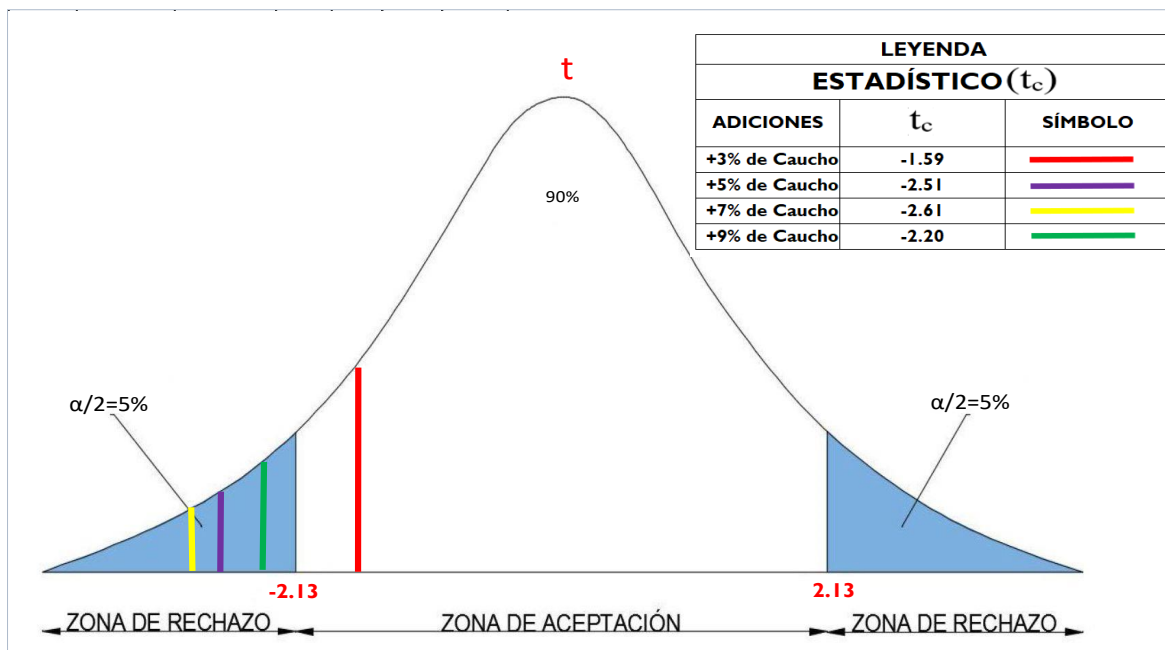
Tabla 20*Resultados de la hipótesis específica 3 material arcilloso - caucho*

Descripción	Resultados			
	Adición 3%	Adición 5%	Adición 7%	Adición 9%
	caucho	caucho	caucho	caucho
Nivel de significación	0.05			
Valor crítico	2.13			
Región crítica	$<-\infty; -2.13]$ y $[2.13; +\infty>$			
"t" calculado	-1.59	-2.51	-2.61	-2.20
p-valor	0.093	0.03	0.029	0.04
Condición	Si $t_c \in R.C. \Rightarrow$ Se rechaza H_0			
Decisión	La adición de un 3% de caucho sitúa al valor de t_c en la zona de aceptación, permitiendo validar la hipótesis nula (H_0), lo que indica que este porcentaje de caucho no influye significativamente en el CBR.			
	Con la adición de 5%, 7% y 9% de caucho, el valor de t_c está en la zona crítica (R.C.), lo que lleva a rechazar H_0 y aceptar la hipótesis alternativa (H_a), lo que indica que estos porcentajes de caucho sí influyen significativamente en el CBR.			

Nota. Resumen de los resultados estadísticos obtenidos. Elaboración propia.

Figura 18

Representación gráfica de los estadísticos de la tercera hipótesis específica



Nota. Los valores t_c están representados en las regiones crítica y de aceptación para las hipótesis tres específica. Elaboración propia.

Finalmente, se establece que añadir caucho tiene un impacto significativo en el valor de CBR del material arcilloso. Los resultados estadísticos demuestran que la incorporación de caucho en proporciones del 5%, 7%, y 9% influye de manera positiva en el valor de CBR, evidenciado por el aumento en comparación con el suelo sin adición.

Los datos presentados en el gráfico revelan que la incorporación de caucho, en proporciones del 5%, 7%, y 9%, tiene un efecto positivo en el CBR del material arcilloso, mejorando sus propiedades mecánicas. Este aumento en el CBR sugiere que el caucho reciclado de neumáticos proporciona una mayor resistencia y estabilidad al suelo en comparación con el material no tratado. La evidencia estadística respalda estas conclusiones, demostrando que la inclusión de caucho es una estrategia efectiva para optimizar el rendimiento de suelos arcillosos en proyectos de infraestructura, mejorando su capacidad de carga y prolongando la durabilidad de las estructuras construidas sobre ellos.

VI. Conclusiones

A partir de los resultados obtenidos en los diversos ensayos de laboratorio y del análisis detallado sobre la influencia del caucho en suelos arcillosos, es posible extraer conclusiones significativas que contribuyen a una mejor comprensión del del mejoramiento del suelo arcilloso. Estas conclusiones responden de manera directa a los objetivos específicos planteados en la tesis y, al mismo tiempo, ofrecen información relevante para su aplicación en proyectos de infraestructura vial. El análisis realizado permite identificar tanto las ventajas como las limitaciones de la adición de caucho, proporcionando una visión clara de su influencia en aspectos clave como la plasticidad, la densidad y CBR. A continuación, se presentan los principales hallazgos relacionados con los objetivos específicos 1, 2 y 3, estableciendo así las bases para futuras investigaciones y aplicaciones prácticas.

Conclusión del objetivo general

Finalmente, se analizó el efecto de la adición del 3%, 5%, 7% y 9% de caucho, encontrado que este tiene un efecto estadísticamente significativo en el índice de resistencia (CBR), se tiene evidencia estadística reflejando en un incremento respecto al suelo patrón, siendo el 7% de adición de caucho la óptima dosificación para el mejoramiento de la subrasante, aumentando el valor relativo de soporte de 5.2% a 11.6%.

Se concluye que la incorporación de caucho al suelo arcilloso mejora la capacidad de soporte (CBR) logrando valores que cumplen y superan el mínimo del 6% establecido por el Manual de Carreteras del MTC (2014).

Conclusión del objetivo específico 1

Se determinó cómo la adición de caucho afecta el valor del índice de plasticidad en el material arcilloso, se identificó que los porcentajes de adición de 3%, 5%, 7% y 9% afectan el índice de plasticidad, con valores resultantes de 9.64%, 9.15%, 8.85% y 8.54% en comparación con el valor inicial de 10.86%, según se detalla en la Tabla 13. Debido a que el caucho no es un material cohesivo ni plástico, reduce la plasticidad del suelo. Además,

sus partículas más grandes interfieren con la estructura del suelo, diferenciándose de las partículas más pequeñas de arcilla. Según el MTC (2014), para obtener un buen rendimiento del suelo en términos de CBR, el índice de plasticidad debe ser menor o igual a 10, ya que esto asegura una mayor capacidad de soporte de carga y una menor susceptibilidad a los cambios de humedad. Por lo tanto, en proyectos de infraestructura vial, es recomendable sustituir o estabilizar suelos con un IP superior a este valor para garantizar la durabilidad del pavimento. En este contexto, los resultados obtenidos están dentro de los rangos establecidos por la norma, lo que permite concluir que la adición de caucho mejora las condiciones del suelo, haciéndolo más apto para ser utilizado como subrasante en proyectos viales.

Conclusión del objetivo específico 2

Se determinó la influencia de la adición del caucho al material arcilloso en el valor de la máxima densidad seca a través de adiciones del 3%, 5%, 7% y 9%. Los resultados fueron 1.688 g/cm³, 1.662 g/cm³, 1.653 g/cm³ y 1.630 g/cm³, respectivamente, según la Tabla 14. Estos valores decrecen respecto al valor inicial de 1.69 g/cm³, dado que el caucho posee una densidad significativamente menor.

Conclusión del objetivo específico 3

Se determinó la influencia de la incorporación de caucho al material arcilloso, concluyendo que dicha adición influye significativamente en el valor del CBR, obteniendo valores de 7.10%, 9.60%, 11.60% y 10.40% para adiciones de 3%, 5%, 7% y 9% de caucho, respectivamente, según lo mostrado en la Tabla 15. La evidencia estadística confirma que el caucho tiene un impacto significativo, incrementando de manera notable el CBR del material. El 7% es la combinación óptima, logrando un valor de 11.60%, la mayor mejora en comparación con las demás proporciones, cumpliendo con las especificaciones del MTC.

VII. Recomendaciones

1. Se recomienda de manera general puesto que los valores de CBR obtenidos de la adición de caucho de neumáticos fuera de uso superan el mínimo recomendado por la norma CBR mínimo:6% para capas de subrasante (ver Tabla 4). Según los datos obtenidos, este material es apto y recomendable para emplearse como subrasante.
2. Dado que la adición de caucho reduce el índice de plasticidad del suelo arcilloso, es recomendable considerar este tratamiento en proyectos de infraestructura vial donde la reducción de la plasticidad del suelo sea deseable para mejorar la estabilidad y manejabilidad del suelo para su compactación, especialmente en suelos que tienden a ser altamente plásticos. Además, se sugiere realizar estudios para optimizar el porcentaje y granulometría de caucho añadido.
3. Dado que incorporar caucho en el suelo arcilloso reduce ligeramente la máxima densidad seca, se recomienda combinar el caucho con estabilizadores como la cal, cemento, emulsión asfáltica, etc. para compensar esta disminución. Además, ajustar las proporciones de caucho y aditivos según las necesidades del proyecto ayudará a optimizar los resultados y equilibrar la densidad.
4. Dado que la adición de caucho al suelo arcilloso ha demostrado mejoras significativas en el CBR, con una proporción óptima del 7%, se recomienda aplicar esta proporción de caucho en suelos que clasifican como arcilla de media plasticidad arenosa (CL). El suelo estabilizado con esta mezcla es adecuado para ser utilizado como capa de subrasante en pavimentaciones. Además, se recomienda realizar estudios con diferentes granulometrías de caucho para determinar la incorporación ideal que permita maximizar el CBR.

VIII. Referencias

- Abdullah, S., & Iravanian, A. (2022). "Using Waste Ceramic Dust in Stabilization of Clay Soils". *Revista Internacional de Ingeniería y Tecnología de la Construcción Sostenible (ICESCET)*, 68-80. doi:10.30880/ijscet.2022.13.01.007
- ADOT. (2005). Construction Manual. "Arizona Department of Transportation", 300-307. https://azdot.gov/sites/default/files/construction-manual/CMchapter_3.pdf
- Akbarimehr, D., & Aflaki, E. (2018). "Un estudio experimental sobre el efecto del polvo de neumáticos en las propiedades geotécnicas de los suelos arcillosos". Irán: CEJ. doi:10.28991/cej-0309118
- Alvarez, B. N., & Gutierrez, G. J. (2019). "Estudio experimental del efecto mecánico de un suelo arcilloso al adicionar polvo de caucho para aplicaciones geotécnica". Perú: Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas (UPC). <https://repositorioacademico.upc.edu.pe/handle/10757/648723>
- Álvarez, C. S. (2020). "utilización de granulo de caucho pulverizado proveniente de llantas usadas como solución para reforzar los suelos blandos de subrasante en la sabana de Bogota". Bogotá. <http://repositorio.uan.edu.co/bitstream/123456789/2256/1/2020SergioAndresAlvarezCastelblanco.pdf>
- Arias, F. G. (2006). "El proyecto de investigación introducción a la metodología científica". Caracas: Episteme, C.A. <https://abacoenred.org/wp-content/uploads/2019/02/El-proyecto-de-investigaci%C3%B3n-F.G.-Arias-2012-pdf-1.pdf>
- Bautista, F., & Aguilera, A. (2023). "Propiedades del suelo y procesos". México: Ciudad Universitaria UNAM. https://www.smcsmx.org/files/2023/LIBRO_2_2023.pdf
- Borja, S. M. (2016). "Metodología de Investigación Científica para ingeniería Civil". Lima: Universidad Continental.

https://www.academia.edu/33692697/Metodolog%C3%ADa_de_Investigaci%C3%B3n_Cient%C3%ADfica_para_ingenier%C3%ADa_Civil

Buendía, E. L., Colás, B. M., & Hernández, P. F. (2006). *"Métodos de investigación en psicopedagogía"*. Madrid.

https://www.academia.edu/115313718/M%C3%A9todos_de_Investigaci%C3%B3n_en_Psicopedagog%C3%ADa_Leonor_Buend%C3%ADa_E_Pilar_Col%C3%A1s_B_Fuensanta_Hern%C3%A1nez_P

Caltrans. (2021). "Departamento de Transporte de California". *Geotechnical Manual - Soil Correlations*.

<https://dot.ca.gov/-/media/dot-media/programs/engineering/documents/geotechnical-services/202103-gm-soilcorrelations-a11y.pdf>

Caltrans. (2022). "Departamento de Transporte de California". *Highway Design Manual*, 660-666.

<https://dot.ca.gov/-/media/dot-media/programs/design/documents/chp0660-a11y.pdf>

Conza, B. H., & Díaz, R. B. (2021). *"Diseño de pavimento flexible incorporando polvo de caucho en la subrasante en la Avenida las Palmas, Pachacamac-2021"*. Lima: Universidad César Vallejo.

<https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/81338>

Coran, A. (2013). "The Science and Technology of Rubber". *Academic Press*.
https://hero.epa.gov/hero/index.cfm/reference/details/reference_id/5697282

Cubas, C. D. (2019). *"Resistencia mecánica de un material para afirmado incorporando caucho en diferentes porcentajes"*. Cajamarca: Universidad Privada del Norte.
<https://repositorio.upn.edu.pe/bitstream/handle/11537/22306/Cubas%20Castro%20Diego%20Fernando.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

- Das, B. M. (2001). *"Fundamentos de Ingeniería geotécnica"*. Mexico: RPK.
<https://www.geologiaviva.info/wp-content/uploads/2022/01/fundamentos-de-ingenieria-geotecnica-BMD.pdf>
- Díaz, S. K., & Torres, F. R. (2019). *"Incorporación de partículas de caucho de neumáticos para mejorar las propiedades mecánicas en suelos arcillosos"*. Jaén: Universidad Nacional de Jaén. <https://core.ac.uk/download/pdf/270319053.pdf>
- DOT. (2004). "Department of Transportation". *Use of Scrap Tires in Civil Engineering Applications*, 68. <https://highways.dot.gov/publications/public-roads/summer-2004/scrap-tires-roadways>
- Duque, E. G., & Escobar, P. C. (2002). *"Clasificación de suelos"*. Manizales. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/3375>
- Eslami, A., Rahai, A., Akbarimehr, D., & Karakouzian, M. (2023). *"Características de deformación de las mezclas de arcilla y polvo de desecho de caucho"*. Irán: Multidisciplinary Digital Publishing Institute. <https://www.mdpi.com/2071-1050/15/16/12384>
- González, M., & Pérez, M. (2023). "Análisis de las propiedades mecánicas de un suelo expansivo para la autoconstrucción de una vivienda de interés social". *ALCONPAT*, 13(3), 312-327. doi:<https://doi.org/10.21041/ra.v13i3.660>
- GRIN. (2017). "Gestión y reciclaje integral de neumáticos". https://s3-us-west-2.amazonaws.com/ungc-production/attachments/cop_2017/415111/original/COP_-_GRIN_2017.pdf?1504284683
- Guevara, P. B. (2020). *"Influencia del caucho sintético SBR en polvo en la subrasante de la Av. Carlos Augusto Salaverry en la provincia de Chiclayo - 2020"*. Perú: Universidad Cesar Vallejo. <https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/82873?locale-attribute=es>

- Gupta, H. K., & Choubey, M. (2021). *"Soil Stabilization Using Waste Shredded Rubber Tyre Chips with Addition of Cement"*. India: Kamla Nehru Institute of Technology.
<https://ijcrt.org/papers/IJCRT2109227.pdf>
- Gutierrez, S. F., & Rojas, M. H. (2020). *"Influencia de la adición de caucho granular en las características mecánicas de la subrasante en suelos cohesivos, Lima – 2020"*. Lima: Universidad Cesar Vallejo.
[https://repositorio.ucv.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12692/76304/Gutierrez_SF U-Rojas_MHF-SD.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repositorio.ucv.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12692/76304/Gutierrez_SF_U-Rojas_MHF-SD.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Harrington, J. (2005). "Use of recycled materials like scrap tires in highway applications". *Federal Highway Administration*. <https://highways.dot.gov/public-roads/januaryfebruary-2005/recycled-roadways>
- Hernández, A. M., Escalaya, A. M., & Vega, L. R. (2023). "Caracterización geotécnica de los suelos arcillosos de Pucallpa". (U. R. Palma, Ed.) *Perfiles de Ingeniería*. doi:<https://doi.org/10.31381/perfilesingenieria.v19i20.6312>
- Hernández, S. R., Fernández, C. C., & Baptista, L. M. (2014). *"Metodología de la Investigación"*. México: Mc Graw Hill. <https://www.esup.edu.pe/wp-content/uploads/2020/12/2.%20Hernandez,%20Fernandez%20y%20Baptista-Metodolog%C3%ADa%20Investigacion%20Cientifica%206ta%20ed.pdf>
- Huamán, C. R., & Muguerza, Z. K. (2019). *"Influencia del caucho granulado en suelos cohesivos relacionado a la propiedad de la resistencia a la penetración (CBR), 2019."*. Lima: Universidad Cesar Vallejo.
<https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/44767>
- INDOT. (2019). "Indiana Department of Transportation". *Manual de diseño geotécnico de Indiana*, 1-19.
https://www.in.gov/indot/engineering/files/geotech_design_manual_ch05-lab_testing.pdf

- IOSR. (2016). "Improvement of Soil Characteristics Using Shredded Rubber". *Journal of Mechanical and Civil Engineering*, 44-48. <https://www.iosrjournals.org/iosr-jmce/papers/vol13-issue2/Version-1/H1302014448.pdf>
- Kalavakkam, C. (2018). *"Tensión-deformación y características de penetración de la arcilla modificada con caucho triturado"*. India: Scielo. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0121-11292018000300065
- Kokila, G. B. (2017). *"Investigación Experimental sobre Estabilización de Suelos Utilizando Migas de Caucho en Suelo Expansivo"*. <https://www.neliti.com/publications/262827/experimental-investigation-on-soil-stabilisation-using-rubber-crumbs-on-expansiv>
- López, O. J. (2013). *"Suelos arcillosos reforzados con materiales de plástico reciclado (PET)"*. ANTIOQUIA: María Jaqueline Espinosa Rodríguez. https://repository.eia.edu.co/bitstream/handle/11190/265/LopezJose_2013_SuelosArcillososReforzados.pdf?sequence=7&isAllowed=y
- López, S. J., & Ortiz, P. G. (2018). *"Estabilización de suelos arcillosos con cal para el tratamiento de la subrasante en las calles de la urbanización San Luis de la ciudad de Abancay"*. Abancay. https://alicia.concytec.gob.pe/vufind/Record/UTEA_342cdeb4cf232808b40b4ac9ba4fb6f3
- Martínez, B. C. (2012). *"Estadística y muestreo"*. Bogotá. https://www.academia.edu/39626329/Estad%C3%ADstica_y_muestreo_Ciro_Mart%C3%ADnez_Bencardino_13ED
- Melquiades, E. J. (2022). *"Estabilización de suelos de fundación arcillosa con extracto de Schinu Molle para subrasante, km 26+800 carretera Huánuco – Punto Unión, 2021"*. Huanuco: Universidad Nacional "Hermilio Valdizán".

<https://repositorio.unheval.edu.pe/bitstream/handle/20.500.13080/7758/TIC00308E88.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

- MTC. (2010). *"Norma Técnica CE.010: Pavimentos Urbanos"*. Lima, Perú: Ministerio de Transportes y Comunicaciones. https://cdn-web.construccion.org/normas/files/tecnicas/Pavimentos_Urbanos.pdf
- MTC. (2014). *"Manual de carreteras diseño geométrico DG-2014"*. http://transparencia.mtc.gob.pe/idm_docs/normas_legales/1_0_3580.pdf
- MTC. (2014). *"Manual de carreteras: suelos, geología, geotecnia y pavimentos. sección suelos y pavimentos"*. Perú: Ministerio de Transportes y Comunicaciones. https://drive.google.com/file/d/1p9kERBPq09HX-a5nb_EbY_sMKq_paKDM/view
- MTC. (2016). *"Glosario de términos de uso frecuente en proyectos de infraestructura vial"*. Perú: N° 660-2008-MTC/02. http://transparencia.mtc.gob.pe/idm_docs/normas_legales/1_0_1556.pdf
- MTC. (2016). *"Manual de ensayo de materiales"*. Perú: Ministerio de Transportes y Comunicaciones. https://drive.google.com/file/d/1Am1jUdFkZerWNuzyX8CxljoBghSde6d_/view
- MTC. (2018). *"Glosario de términos de uso frecuente en proyectos de infraestructura vial"*. Lima: Ministerio de Transportes y Comunicaciones. <https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/4980603/Glosario%20de%20T%C3%A9rminos%20de%20Uso%20Frecuente%20en%20los%20Proyectos%20de%20Infraestructura%20Val.pdf?v=1692114711>
- NTP 339.129. (2019). *"Método de ensayo para determinar el límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad de suelos"*. Peru: Dirección de Normalización - INACAL. <https://www.inacal.gob.pe/cid/categoria/normas-tecnicas-peruanas>

NTP 339.145. (2019). *"Método de ensayo de CBR (Relación de Soporte de California)"*.

Per: Dirección de Normalización - INACAL.

<https://www.inacal.gob.pe/cid/categoria/normas-tecnicas-peruanas>

Palacios, N. D., & Villanueva, H. P. (2023). *"Mejoramiento de la subrasante arcillosa adicionando caucho granular de neumáticos reciclados, en el km 5 de la carretera Santo Tomás, en el distrito de San Juan Bautista, provincia de Maynas, departamento de Loreto"*. Loreto: Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas .

https://upc.aws.openrepository.com/bitstream/handle/10757/668920/Palacios_ND.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Paredes, S. V., & Laica, M. J. (2016). *Influencia de la inclusión de polímero reciclado (caucho) en las propiedades mecánicas de una sub base*. Ambato: Universidad Técnica de Ambato. <https://repositorio.uta.edu.ec/handle/123456789/24440>

Patiño Ycaza, J. J. (2017). *"Estabilización del suelo mediante adiciones de caucho reciclado"*. Guayaquil: Universidad Católica de Santiago de Guayaquil. doi:3317/9159

Pimienta, P. J., & Orden, H. A. (2017). *"Metodología de la investigación"*. México: Pearson. <http://repositorio.uasb.edu.bo:8080/handle/54000/1268>

Ramírez, A. A., Guanuchi, O. L., Cahuana, T. R., Vera, T. R., & Holgado, T. J. (2023). *"Métodos de investigación científica"*. Perú: INUDI-PERÚ. doi:10.35622/inudi.b.094

Rezabala, D. M., & Ortiz, H. E. (2023). *"Propuesta de estabilización con cal y cemento para subrasante con presencia de suelos arcillosos ubicada en la vía Tosagua-Chone sector bachillero"*. Ecuador: Ciencias de la Educación. doi:10.23857/dc.v9i3.3518

Salvador, J. H. (2014). *"Manual de procedimientos analíticos para suelos y agregados de construcción"*. Piura: Universidad de Piura.

<https://pirhua.udep.edu.pe/backend/api/core/bitstreams/404e5a16-d9f5-40c6-88fd-339d92c1b1d6/content>

Shareef, A. H., Neami, M. A., & Rahil, F. H. (2023). "Field Simulation Technique to Enhance the Mechanical Strength and Elemental Composition of Soft Clay Soil Using Thermal Treatment". *Minerales*, 2-24. doi:<https://doi.org/10.3390/min14010041>

Shinde, R. S., Kamble, D., & Ambi, R. (2019). "*Estabilización de suelo y grano de caucho mediante el uso de la prueba CBR*". India: IJRESM. https://www.ijresm.com/Vol.2_2019/Vol2_Iss3_March19/IJRESM_V2_I3_248.pdf

SIGNUS. (2020). "Sistema integrado de gestión de neumáticos usados". <https://www.signus.es/>

Ubidia, P. L. (2019). "*Diseño de pavimento flexible con la utilización de polvo de caucho reciclado para minimizar la generación de fisuras del Jr. Jorge Chávez cdra. 01-09 Ciudad de Tarapoto San Martín*". Tarapoto: Universidad Cesar Vallejo. https://repositorio.ucv.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12692/31570/Ubidia_PLE.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Valipour, M., Shourijeh, P., & Mohammadinia, A. (2021). "*Aplicación de fibras poliméricas de neumáticos reciclados y fibras de vidrio para refuerzo de arcilla*". Irán: Universidad Tecnológica de Shiraz, Shiraz, Irán. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2214391220303627>

Vargas, C. Z. (2009). "*La investigación aplicada: una forma de conocer las realidades con evidencia científica*". Costa Rica: Revista Educación. <https://www.redalyc.org/pdf/440/44015082010.pdf>

Wimalasena, K., & Gallage, C. (2022). "Predicting California Bearing Ratio (CBR) Value of a Selected Subgrade Material". *Road and Airfield Pavement Technology*, 547-558. https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-87379-0_41

WSDOT. (2013). "Washington State Department of Transportation". *Soil and Rock Classification and Logging*. <https://wsdot.wa.gov/publications/manuals/fulltext/M46-03/Chapter4.pdf>

WSDOT. (2013). "Washington State Department of Transportation". *Engineering Properties of Soil and Rock*, 5-46. <https://wsdot.wa.gov/publications/manuals/fulltext/M46-03/Chapter5.pdf>

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.