

**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE LOS ANDES**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**ESCUELA PROFESIONAL: INGENIERÍA CIVIL**



**Tesis**

**Influencia de la adición de fibra sintética de polipropileno en la resistencia a la penetración y la densidad máxima del afirmado en la ruta AP 103, tramo km**

**2+500 – km 6+400, Abancay 2023**

Asesor:

Ph. D, Vásquez Ramírez, Abbon Alex

Autor:

Portilla Álvarez, Yordy Andrés

Para optar el Título Profesional: Ingeniero Civil

Abancay – Apurímac – Perú

2025

## Acta de sustentación



# Universidad Tecnológica de los Andes

Transformando vidas

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL

### ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TÍTULO PROFESIONAL

Acta N°: 093

En la ciudad de Abancay, a los quince días del mes de **diciembre del 2025**, siendo las **11:00 am** horas, se reunieron los integrantes del Jurado designado por Resolución Directoral N° **1025-2025- EPIC-FI-UTEA-SA** de fecha **04 de diciembre del 2025**, de la Escuela Profesional de Ingeniería Civil de la Facultad de Ingeniería:

Presidente :	Mag. Huanca Astoquilloca, Luis
Dictaminante :	Ing. Cayo Baca, Holguer
Replicante :	Dra. Vera Teves, Rosa Marina

Para evaluar la sustentación, en la modalidad de:

Tesis  Trabajo de suficiencia profesional

Titulada:

**Influencia de la adición de fibra sintética de polipropileno en la resistencia a la penetración y la densidad máxima del afirmado en la ruta AP 103, tramo km 2+500 – km 6+400, Abancay 2023**

Desarrollado por el (los) Bachiller (es):

**Br: Portilla Alvarez, Yordy Andres**

Para optar el Título Profesional de:

Ingeniero Civil

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

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

Emitiéndose el calificativo final de:

Bachiller (Apellidos y Nombres)	Calificación (**)
<b>Portilla Alvarez, Yordy Andres</b>	<b>Aprobado</b>

Siendo las **13:00pm** horas concluyó la sesión, firmando los integrantes del Jurado.

Presidente: Mag. Huanca Astoquilloca, Luis

Dictaminante: Ing. Cayo Baca, Holguer

Replicante: Dra. Vera Teves, Rosa Marina

Abancay 06 de enero del 2026

Se expide la presente conforme al Libro de Actas de Sustentación de Tesis, consignado en los folios N° 377

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

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

# Reporte de similitud






## 19% Similitud general

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

### Filtrado desde el informe

- Bibliografía
- Texto citado
- Coincidencias menores (menos de 8 palabras)

### Fuentes principales

- 15%  Fuentes de Internet
- 3%  Publicaciones
- 16%  Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

### Marcas de integridad

N.º de alertas de integridad para revisión

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

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



## Metadatos

<b>Datos del Autor</b>	
Apellidos y nombres	: Portilla Álvarez, Yordy Andrés
Tipo de Documento de Identidad	: DNI
Numero de Documento de Identidad	: 73345282
URL ORCID	: <a href="https://orcid.org/0009-0003-2399-5709">https://orcid.org/0009-0003-2399-5709</a>
<b>Datos del Asesor</b>	
Apellidos y nombres	: Vásquez Ramírez, Abbon Alex
Tipo de Documento de Identidad	: DNI
Numero de Documento de Identidad	: 06532658
URL ORCID	: <a href="https://orcid.org/0000-0001-7299-5367">https://orcid.org/0000-0001-7299-5367</a>
<b>Datos de investigación</b>	
Facultad	: Ingeniería
Escuela Profesional	: Ingeniería Civil
Línea de Investigación	: Gestión de la Infraestructura para el Desarrollo Sostenible
Rango de años en que se realizó la investigación	: De noviembre de 2023 a junio de 2025
Fuente de financiamiento	: Propia
Porcentaje de similitud	: 19%
URL de OCDE	: <a href="https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#2.01.01">https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#2.01.01</a>

## **Dedicatoria**

Gracias, Dios, por guiar mi vida, indicándome el camino que debo seguir en los buenos momentos y guiando mi camino en la toma de decisiones, dándome las herramientas para continuar.

A mis queridos padres, por su amor y apoyo inquebrantables siendo ejemplo de perseverancia son el cimiento para consolidar mi formación académica y personal. A ellos dedico cada logro, como reflejo de su sacrificio y dedicación.

A mi hermano por ser mi motivación diaria y recordarme la importancia de perseguir los sueños con determinación.

Yordy Andrés Portilla Álvarez

## **Agradecimientos**

Agradezco a mi asesor académico su guía experta, integridad profesional y flexibilidad durante la investigación. Sus evaluaciones pertinentes y respaldo continuo fueron vitales para concluir este estudio.

A mis padres y hermano, por proveer estabilidad emocional y comprensión sólida en fases complejas. Este éxito es colectivo por su compañía innegable

Para terminar, quiero dar las gracias a todos los que me ayudaron a terminar mi tesis, ya fuera directa o indirectamente, con su experiencia, ayuda o apoyo. Cada pequeña cosa que hicisteis contribuyó a que esto fuera posible.

Yordy Andrés Portilla Álvarez

## Resumen

En esta tesis se estudió el efecto de añadir fibra sintética de polipropileno en la resistencia a la penetración y densidad seca máxima del material de pavimento usado en el tramo km 2 500 al km 6 400 de la carretera AP-103 en Abancay. El estudio utilizó un enfoque cuantitativo con un nivel correlacional y un diseño experimental. Se elaboraron cinco mezclas: cuatro con varios porcentajes de fibra (0.1%, 0.5%, 1.0% y 1.5%) y una muestra de referencia, evaluadas mediante pruebas de Proctor modificado y CBR según estándares del Ministerio de transporte y comunicaciones (MTC).

Los hallazgos revelaron que la mezcla con 0.5% de fibra alcanzó el mejor desempeño mecánico, mostrando un CBR de 36.2 kg/cm<sup>2</sup> y densidad máxima seca de 2.16 gr/cm<sup>3</sup>, superando los valores de la muestra patrón (29.1 kg/cm<sup>2</sup> y 1.98 gr/cm<sup>3</sup>). Sin embargo, concentraciones superiores al 1.0% redujeron progresivamente ambos parámetros, evidenciando efectos adversos por sobredosificación.

El estudio determina que 0.5% constituye la dosificación óptima de fibra sintética, al incrementar sustancialmente la capacidad portante y compactabilidad del afirmado, demostrando su viabilidad para estabilizar caminos rurales de carreteras no pavimentadas.

*Palabras clave:* afirmado, resistencia a la penetración, fibra sintética, densidad seca, suelo estabilizado.

## Abstract

This thesis analyzed the impact of incorporating polypropylene synthetic fiber in the penetration resistance and maximum dry density of the pavement material used in the section km 2+500 to km 6+400 of the AP-103 road in Abancay. The study adopted a quantitative approach with correlational level and experimental design. Five mixtures were prepared: four with different percentages of fiber (0.1%, 0.5%, 1.0% and 1.5%) and a standard sample, evaluated using modified Proctor and CBR tests, following the standards of the Ministry of Transportation and Communications (MTC).

The findings revealed that the mixture with 0.5% fiber achieved the best mechanical performance, showing a CBR of 36.2 kg/cm<sup>2</sup> and maximum dry density of 2.16 gr/cm<sup>3</sup>, exceeding the values of the standard sample (29.1 kg/cm<sup>2</sup> and 1.98 gr/cm<sup>3</sup>). However, concentrations higher than 1.0% progressively reduced both parameters, evidencing adverse effects due to overdosage.

The study determined that 0.5% constitutes the optimum dosage of synthetic fiber, as it substantially increases the bearing capacity and compactness of the pavement, demonstrating its viability for stabilizing unpaved rural roads.

*Keywords:* base course, polypropylene fiber, dry density, penetration resistance, soil reinforcement.

## 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 .....	xiii
Índice de anexos.....	xv
<b>I. Introducción .....</b>	<b>16</b>
<b>II. Planteamiento del problema .....</b>	<b>18</b>
2.1. Descripción y formulación del problema .....	18
2.2. Objetivos .....	19
2.2.1. <i>Objetivo general</i> .....	19
2.2.2. <i>Objetivos específicos</i> .....	20
2.3. Justificación e importancia.....	20
2.4. Hipótesis .....	21
2.5. Variables .....	21
<b>III. Marco teórico .....</b>	<b>24</b>

3.1. Antecedentes .....	24
3.2. Bases teóricas .....	27
3.3. Definición de términos .....	47
<b>IV. Metodología.....</b>	<b>53</b>
4.1. Tipo y nivel de investigación.....	53
4.2. Ámbito temporal y espacial .....	54
4.3. Población y muestra .....	54
4.4. Instrumentos .....	56
4.5. Procedimiento .....	56
4.6. Análisis de datos.....	67
4.7. Consideraciones éticas.....	67
<b>V. Resultados y discusión .....</b>	<b>68</b>
<b>VI. Conclusiones.....</b>	<b>99</b>
<b>VII. Recomendaciones .....</b>	<b>101</b>
<b>VIII. Referencias.....</b>	<b>102</b>
<b>IX. Anexos.....</b>	<b>107</b>

## Índice de tablas

<b>Tabla 1</b>	Operacionalización de variables.....	22
<b>Tabla 2</b>	Características de la fibra sintética de polipropileno.....	28
<b>Tabla 3</b>	Tamices de malla cuadrada .....	29
<b>Tabla 4</b>	Cantidad mínima representativa de la muestra total.....	30
<b>Tabla 5</b>	Factor k para determinar el límite líquido .....	32
<b>Tabla 6</b>	Diagrama de decisión para clasificación SUCS .....	35
<b>Tabla 7</b>	La clasificación AASHTO prioriza el comportamiento de suelos en pavimentos	39
<b>Tabla 8</b>	Métodos de ensayo de proctor modificado.....	41
<b>Tabla 9</b>	Velocidad de penetración de la muestra .....	43
<b>Tabla 10</b>	Características de la curva penetración-resistencia .....	44
<b>Tabla 11</b>	Características granulométricas por cada tipo de afirmado.....	46
<b>Tabla 12</b>	Composición de las mezclas necesarias.....	55
<b>Tabla 13</b>	Análisis granulométrico de la cantera .....	69
<b>Tabla 14</b>	Porcentaje de humedad de la muestra de material de cantera .....	71
<b>Tabla 15</b>	Ensayos para determinar el límite líquido.....	72
<b>Tabla 16</b>	Ensayos para determinar el límite plástico.....	72
<b>Tabla 17</b>	Límites de atterberg para determinar el IP .....	73
<b>Tabla 18</b>	Resultado de ensayo de proctor modificado para las muestras .....	74
<b>Tabla 19</b>	Resultados de ensayo CBR - expansión (patrón/adición de polipropileno) ....	76
<b>Tabla 20</b>	Resistencia a la penetración por números de golpe .....	77
<b>Tabla 21</b>	Resultados de ensayo CBR – por N° de golpes (patrón/adición de polipropileno) .....	78
<b>Tabla 22</b>	Resultados de ensayo CBR al 95% y 100% (patrón/adición de polipropileno)	79
<b>Tabla 23</b>	Resumen de datos para la prueba de hipótesis N° 01.....	87
<b>Tabla 24</b>	Prueba de Levene para la homogeneidad de varianzas en la variable densidad .....	88
<b>Tabla 25</b>	Prueba estadística de ANOVA para el CBR 100%.....	89

<b>Tabla 26</b>	Comparación múltiple con el método HSD de tukey para CBR 100% .....	91
<b>Tabla 27</b>	Resumen de datos para la prueba de hipótesis N° 02.....	93
<b>Tabla 28</b>	Prueba de Levene para la homogeneidad de varianzas en la variable M.D.S. .	94
<b>Tabla 29</b>	Análisis de varianza (ANOVA) para la variable M.D.S. ....	95
<b>Tabla 30</b>	Comparación múltiple con el método HSD de tukey.....	97

## Índice de figuras

<b>Figura 1</b> Técnica SUCS para determinar el tipo de suelo mediante un gráfico de casa grande.....	37
<b>Figura 2</b> Utilizando una tabla de plasticidad, el enfoque AASHTO puede identificar el tipo de suelo. ....	40
<b>Figura 3</b> Curva para cálculo de índice de CBR.....	45
<b>Figura 4</b> Muestreo de material para realizar la composición de mezclas .....	57
<b>Figura 5</b> Cuarteo de material.....	57
<b>Figura 6</b> Análisis granulométrico de suelo por tamizado .....	58
<b>Figura 7</b> Ejecución de muestras según norma establecidas .....	60
<b>Figura 8</b> Realización de ensayos previstos para determinar valores de las muestras....	61
<b>Figura 9</b> Proceso de pesar en estado suelto y compactación de la muestra .....	62
<b>Figura 10</b> Pesaje de muestra después de la respectiva compactación .....	63
<b>Figura 11</b> Ensayo de expansión de las muestras .....	65
<b>Figura 12</b> Resistencia a la penetración.....	66
<b>Figura 13</b> Curva granulométrica de material de cantera .....	70
<b>Figura 14</b> Diagrama de fluides para la muestra del material de cantera .....	73
<b>Figura 15</b> Resultado M.D.S. por diferente adición de fibra sintética. ....	75
<b>Figura 16</b> Resultados de ensayo CBR - expansión (patrón//adición de polipropileno) ...	77
<b>Figura 17</b> Resultados de ensayo de CBR - por N° de golpes (patrón/adición de polipropileno).....	78
<b>Figura 18</b> Ensayo CBR al 100% y 95% de M.D.S. ....	79
<b>Figura 19</b> Curva esfuerzo penetración para muestra patrón.....	80
<b>Figura 20</b> Recta de CBR-densidad para muestra patrón .....	80
<b>Figura 21</b> Curva esfuerzo penetración para 0.5% de fibra.....	81
<b>Figura 22</b> Recta de CBR-densidad para 0.1% de fibra .....	81
<b>Figura 23</b> Curva esfuerzo penetración para 0.5% de fibra.....	82
<b>Figura 24</b> Recta de CBR-densidad para 0.5% de fibra .....	82

<b>Figura 25</b>	Curva esfuerzo penetración para 1.0% de fibra.....	83
<b>Figura 26</b>	Recta de CBR-densidad para 1.0% de fibra .....	83
<b>Figura 27</b>	Curva esfuerzo penetración para 1.5% de fibra.....	84
<b>Figura 28</b>	Recta de CBR-densidad para 1.5% de fibra .....	84

## Índice de anexos

<b>Anexo 1</b> Matriz de consistencia.....	109
<b>Anexo 2</b> Matriz de operacionalización de variables.....	110
<b>Anexo 3</b> Panel fotográfico .....	111
<b>Anexo 4</b> Instrumento de obtención de datos .....	124
<b>Anexo 5</b> Evaluación de cantera.....	129
<b>Anexo 6</b> Certificado de calibración de equipos.....	163

## I. Introducción

En ingeniería vial, los afirmados representan una capa estructural esencial para caminos no pavimentados, los materiales granulares del afirmado transfieren las solicitaciones de tránsito a las capas estructurales subyacentes, garantizando la disipación progresiva de esfuerzos. mientras mantienen adecuada transpirabilidad y capacidad de soporte. No obstante, estos materiales granulares sufren deterioro progresivo por factores como tránsito repetido, variaciones de humedad, compactación inadecuada y propiedades geotécnicas del suelo disponible, afectando su desempeño estructural con el tiempo.

Para abordar estas limitaciones, se emplean técnicas de estabilización como la dosificación homogénea de monofilamentos de polipropileno en la mezcla granular optimiza la cohesión interna del material, reduciendo segregación durante el extendido. Al reforzar la matriz del suelo y disminuir la deformación, estas fibras mejoran características importantes como la resistencia a la penetración y la densidad seca máxima. Esta solución destaca por su rentabilidad y sostenibilidad frente a estabilizantes químicos tradicionales, especialmente en zonas rurales con acceso limitado a recursos.

Esta tesis analizo la respuesta mecánica de pavimentos en el tramo km 2+500-6+400 de la vía AP-103 (Abancay, Perú), reforzados con fibras de polipropileno en concentraciones de 0,1% a 1,5%. Mediante ensayos de capacidad de soporte (CBR) y compactación (Proctor modificado), se determina la dosificación óptima para maximizar la resistencia del suelo, generando criterios técnicos aplicables al diseño y rehabilitación de carreteras no asfaltadas.

La tesis se divide en 9 puntos siendo el primero la introducción de la tesis. El segundo apartado presenta el planteamiento del problema, su explicación, los objetivos, la justificación y significado de la tesis, las hipótesis y las variables utilizadas. El marco teórico, los antecedentes, los fundamentos teóricos y la terminología utilizada en esta tesis se desglosan en la tercera sección El marco metodológico se establece en la cuarta sección, en la que también se especifican la población y la muestra, el alcance del estudio, el tipo y el grado de la investigación, y las herramientas necesarias (software estadístico SPSS v.28,

CBR - MTC E 132, y las Pruebas Proctoras Modificadas - MTC E 115), y la secuencia de análisis de datos estructurada en cuatro fases: (1) preparación y caracterización de mezclas, (2) evaluación de propiedades mecánicas, (3) procesamiento estadístico mediante ANOVA ( $\alpha=0.05$ ).

En la quinta parte se encuentra la discusión de los resultados con las tesis que preceden a la presente tesis. La sexta parte contiene las conclusiones alcanzadas en el presente tema de tesis. La séptima parte detalla las recomendaciones alcanzadas. La octava parte se encuentran las referencias utilizadas en la presente tesis y finalmente en la novena parte los anexos utilizados en el presente proyecto.

## II. Planteamiento del problema

### 2.1. Descripción y formulación del problema

A nivel global, las carreteras enfrentan múltiples problemas por el acelerado deterioro de su estado físico, ocasionado mayormente por el uso de materiales que no cumplen con las especificaciones técnicas de cada país, lo que ha llevado a muchas naciones a sustituir la infraestructura dañada para continuar su desarrollo económico y social (Llanos Chimbor, 2019). De acuerdo con Morales Beteta (2018), señala que “esto ocurre por el uso de materiales inapropiados y debido a que, en condiciones secas, por la acción abrasiva de los neumáticos, la superficie de rodadura, hecha de material granular compactado, se desgasta fácilmente.”

SENAMHI (2019) señala que: “las fallas en el suelo producen desastres en Perú por intensas lluvias” (p. 1). En Perú, Quiñones Paucar (2017) señala que: “las carreteras actuales han agotado su vida útil, se han afectado o deteriorado, debido a materiales deficientes, falta de drenaje, estudios de tráfico inexactos, y mala supervisión durante su construcción”.

El corredor AP-103, integrante de la Red Vial Nacional peruana, articula el sector de Abancay (Apurímac) entre los puntos kilométricos 2+500 y 6+400. Este segmento vincula los empalmes PE-3S en Tamburco (inicio) y Huanipaca (término), atravesando las localidades intermedias de Huayllabamba, Karkatera, Sorcca y Ccocha. Este corredor está pavimentado en un 99,72% y tiene una longitud total de 65,895 kilómetros. Las coordenadas UTM desde E:727590, N:8493066 (Moyocorral) hasta E:726529, N:8493095 (Huayllabamba) definen el área de investigación. Según la Dirección Regional de Transportes y Comunicaciones de Apurímac (DRTC, 2023) ha documentado graves deficiencias en la Ruta AP-103 Abancay-Huanipaca, donde el deterioro del afirmado presenta múltiples problemas críticos. Según sus informes técnicos, el mantenimiento vial en la región es insuficientes o inoperativos, lo que impide reparaciones oportunas y agrava el daño en esta vía clave.

La DRTC advierte que los tramos más afectados presentan hundimientos de hasta 40 cm de profundidad, erosión lateral en un 60% del trayecto y pérdida total del material granular en épocas de lluvias, generando cortes vehiculares prolongados. Un estudio de campo de la DRTC (2023) reveló que los drenajes están colapsados, provocando filtraciones que debilitan la estructura del afirmado.

De acuerdo a Chipana Tello (2022) a nivel local, en la carretera Abancay-Huayllabamba, el terreno carece de pavimentación, lo que causa problemas de compactación, reduciendo la estabilidad, flexibilidad y resistencia de la subrasante; se observan fallas de firmeza en el suelo, resultando en un drenaje lento, hinchazón en condiciones húmedas y una baja capacidad de carga, generando desconfianza e inseguridad en conductores y peatones de las comunidades.

#### **- Problema general**

PG. ¿Cuál es la influencia de la adición de fibra sintética de polipropileno en la resistencia a la penetración y la densidad máxima del afirmado en la ruta AP 103, tramo km 2+500 – km 6+400, Abancay 2023?

#### **- Problemas específicos**

PE01. ¿Cuál es la influencia de la adición de fibra sintética de polipropileno en la capacidad de soporte del afirmado en la ruta AP 103, tramo km 2+500 – km 6+400, Abancay 2023?

PE02. ¿Cuál es la influencia de la adición de fibra sintética de polipropileno en la compactación del afirmado en la ruta AP 103, tramo km 2+500 – km 6+400, Abancay 2023?

## **2.2. Objetivos**

### **2.2.1. Objetivo general**

OG. Determinar la influencia de la adición de fibra sintética de polipropileno en la resistencia a la penetración y la densidad máxima del afirmado en la ruta AP 103, tramo km 2+500 – km 6+400, Abancay 2023.

### **2.2.2. Objetivos específicos**

OE01. Evaluar la influencia de la adición de fibra sintética de polipropileno en la capacidad de soporte del afirmado en la ruta AP 103, tramo km 2+500 – km 6+400, Abancay 2023.

OE02. Evaluar la influencia de la adición de fibra sintética de polipropileno en la compactación del afirmado en la ruta AP 103, tramo km 2+500 – km 6+400, Abancay 2023.

### **2.3. Justificación e importancia**

Desde un punto de vista teórico, el trabajo contribuye al área de la mecánica de suelos reforzados al ofrecer evidencias experimentales de cómo la incorporación de fibra de polipropileno al material granular altera sus propiedades físicas y resistentes. Los resultados adquiridos amplían el ámbito de aplicación de los modelos de estabilización sin ligantes convencionales al permitir contrastar hipótesis previas sobre el impacto de los aditivos sintéticos en el índice CBR y la densidad seca.

Técnicamente, la adición de fibras sintéticas no requiere maquinaria especializada ni altera sustancialmente los procesos constructivos convencionales. Su implementación puede realizarse en campo mediante procedimientos sencillos de mezcla y compactación, lo que representa una alternativa operativa eficiente para entidades responsables del mantenimiento vial. Esta investigación proporciona valores específicos de comportamiento del afirmado reforzado, puede utilizarse como norma de diseño para autopistas de poco tráfico o proyectos de carreteras rurales.

Desde un enfoque técnico-social, la mejora del afirmado mediante técnicas de refuerzo contribuye directamente a la conservación funcional de vías que conectan centros poblados, zonas agrícolas y servicios básicos. La mayor continuidad del tráfico se traduce en un menor número de fallos estructurales causados por el aumento de la capacidad portante, reducción de tiempos de traslado y menor aislamiento para comunidades rurales. Esto genera beneficios indirectos en salud, educación y productividad local.

En términos de sostenibilidad, el uso de fibras sintéticas como aditivo estabilizante permite extender la vida útil de la capa granular sin recurrir a tratamientos químicos

agresivos ni a intervenciones estructurales de gran escala. Además, reduce la necesidad de extracción de nuevo material de cantera, minimizando el impacto ambiental asociado al acopio, transporte y disposición de suelos. Por lo tanto, esta técnica contribuye al enfoque de infraestructura vial con menor huella ecológica.

Esta investigación constituye un aporte significativo al campo de la ingeniería vial, ya que los resultados experimentales sobre el uso de fibras de polipropileno en afirmados (según normativa MTC) sentarán las bases para:

- a) Establecer un paradigma metodológico replicable en estudios de estabilización de suelos,
- b) Generar precedentes técnico-académicos que sustenten futuras tesis de grado e investigaciones aplicadas, y
- c) Validar criterios de dosificación óptima (0.1% - 1.5% peso) para la rehabilitación de caminos rurales en la región andina peruana.

## **2.4. Hipótesis**

### **- Hipótesis general**

HG. La adición de fibra sintética de polipropileno influye significativamente en la resistencia a la penetración y la densidad máxima del afirmado en la ruta AP 103, tramo km 2+500 – km 6+400, Abancay 2023.

### **- Hipótesis específica**

HE01. La adición de fibra sintética de polipropileno influye significativamente en la capacidad de soporte del afirmado en la ruta AP 103, tramo km 2+500 – km 6+400, Abancay 2023.

HE02. La adición de fibra sintética de polipropileno influye significativamente en la compactación del afirmado en la ruta AP 103, tramo km 2+500 – km 6+400, Abancay 2023.

## **2.5. Variables**

V.D: Resistencia a la penetración y densidad máxima.

V.I: Fibra sintética de polipropileno.

Tabla 1

## Operacionalización de variables

Variable	Definición conceptual	Definición operacional	Dimensiones	Indicadores	Escala de medición	Instrumentos
Variable independiente: Fibra sintética de polipropileno	"El compuesto polimérico denominado fibra de polipropileno se caracteriza por presentar una fase dispersa constituida por fibras continuas o discretas de este polímero, las cuales se encuentran integradas dentro de una matriz de naturaleza plástica" (Tex Delta, s/f).	Los estudios han demostrado que el rendimiento de estas fibras demuestra que añadir más fibras a un suelo aumenta su densidad y su resistencia a la penetración.	Dosificación en porcentaje de fibra sintética de polipropileno	0% de F.S.P.	Porcentaje en peso (%)	Balanza de precisión
				0.1 % de F.S.P.		
				0.5 % de F.S.P.		
				1.0 % de F.S.P.		
Variable dependiente: Resistencia a la penetración y densidad máxima	La capacidad de resistir la penetración en afirmados corresponde con la aptitud de una base granular compactada (mezcla suelo-grava) para absorber tensiones generadas por cargas estáticas o	En conforme del Manual Ensayos de Materiales (2016), los especímenes de origen canterano serán sometidos a procesos de homogeneización y caracterización en laboratorio para cuantificar sus propiedades mecánicas	Capacidad de soporte	1.5 % de F.S.P.	(%)	Prensa CBR
				CBR al 0.1"		
				Optimo contenido de humedad		
			compactación	Densidad máxima seca	g/cm <sup>3</sup> ,	Proctor modificado

Variable	Definición conceptual	Definición operacional	Dimensiones	Indicadores	Escala de medición	Instrumentos
	<p>dinámicas desarrollar deformaciones permanentes significativas, conforme estándar ASTM D1883-21 (Ensayo CBR).</p>	<p>sin fundamentales: densidad seca máxima mediante Proctor Modificado (MTC E 115) e índice CBR para resistencia a penetración (MTC E 132), con el objetivo de verificar su aptitud como material granular en la construcción de la capa superficial del afirmado para carreteras no pavimentadas según parámetros dentro de la norma.</p>				

*Nota.* Como se observa se describe las variables, así como sus definiciones, dimensiones, indicadores e instrumentos los cuales hacen representación de los parámetros de la variable independiente como dependiente conllevando a la caracterización para su evaluación correspondiente sometidos a distintas combinaciones.

### **III. Marco teórico**

#### **3.1. Antecedentes**

##### **3.1.1. A nivel internacional**

De acuerdo con Aguirre y Fuel (2020) en su tesis "Mejora de propiedades mecánicas de suelos finos con residuos de fibras vegetales". El objetivo principal era encontrar la cantidad óptima de inclusión de fibra natural en suelos finos para aumentar la resistencia mecánica. La tesis utilizó una técnica cuantitativa del tipo aplicado con un diseño experimental. Las proporciones de fibra del 1,5% al 2,0% mejoraron considerablemente la respuesta tensión-deformación del suelo, dando como resultado una resistencia máxima a la compresión de 8,1 kg/cm<sup>2</sup> con un contenido de fibra del 2%. Al mismo tiempo, se encontró que el 27% era la humedad ideal de la mezcla para una máxima adherencia fibra-suelo. Los resultados concluyeron que las fibras vegetales aumentan la resistencia a la compresión y la capacidad portante de los suelos finos.

De acuerdo con Eduardo et al. (2020) en la investigación "Estabilización de afirmado con ceniza de cascarilla de café para aplicar en suelos de construcción de vías" analizó el impacto de adicionar ceniza de cascarilla de café (CCC) en suelos granulares para afirmado. El análisis fue cuantitativo y experimental reveló que la inclusión progresiva de CCC en proporciones del 4%, 8% y 14% afecta considerablemente a la densidad seca máxima (M.D.S), con valores de 2,020 g/cm<sup>3</sup>, 2,050 g/cm<sup>3</sup> y 1,994 g/cm<sup>3</sup>, respectivamente. Se descubrió que el máximo rendimiento mecánico se obtenía con una adición del 8%, que mejoraba la compactación, pero dosis mayores provocaban una disminución de la densidad, presumiblemente debido a una inclusión excesiva de material fino. Se concluye que la utilización de la ceniza de cascarilla de café en porcentajes del 8% estabiliza el afirmado para ser incorporada en la estructura del pavimento flexible.

Según Serrato y Cabezas (2019) en la tesis "Evaluación de la resistencia de un suelo grueso reforzado con fibras de coco", se analizó la variación en la resistencia al corte al adicionar fibras de coco, comparando con la muestra virgen. El estudio implementó una metodología tipo aplicada con enfoque mixto. La primera evaluación del suelo natural arrojó

un valor CBR del 2,2%, inadecuado para su uso en la construcción de carreteras. La adición de un 1% de fibra de coco aumentó la resistencia del material gracias a la acción de refuerzo de las fibras, que mejoraron la trabazón interna y redujeron la deformación. No obstante, no se alcanzaron los valores mínimos exigidos por la normativa INVIAS, por lo que se sugiere una revisión de proporciones y condiciones de mezcla para futuros ensayos.

De acuerdo con Carvajal et al. (2019), la investigación “Mejoramiento del material de afirmado de la cantera La Esmeralda con ceniza de cascarilla de arroz y escombro reciclado” ceniza de cascarilla de arroz (CCA). La metodología fue cuantitativa, de tipo experimental, con un diseño explicativo. Los resultados indicaron que la muestra sin adición (0% CCA) tenía un CBR al 100% M.D.S. de 11,45%. Cuando se utilizó CCA en cantidades de 5%, 10% y 15%, el CBR fue de 55,16%, 46,19% y 26,98%, respectivamente. Se descubrió que la proporción ideal era del 5%, lo que produjo la mayor mejora de la capacidad portante. Los niveles superiores redujeron el rendimiento del material debido a la saturación de los componentes finos.

En su estudio experimental sobre suelos expansivos como indican Soltani et al. (2018) evaluaron la capacidad de fibras en forma de cinta (de 2,5 mm y 7 mm de ancho) para mitigar el hinchamiento, utilizando contenidos de 0,5 %, 1 % y 1,5 %, cada uno con dos relaciones de aspecto. Los resultados mostraron que la mejoría en el potencial y la presión de hinchazón fue una función directa del contenido y la longitud de la fibra, siendo el contenido el factor más determinante; además, la fibra más ancha resultó más eficiente. El estudio concluyó que, considerando conjuntamente las características de hinchazón y compresión, el contenido óptimo fue de 0,5 % para ambos tipos de fibra, aunque incorporaciones de hasta 1 % podrían ser aceptables si las deformaciones por compresión no son una preocupación prioritaria.

### **3.1.2. A nivel nacional**

En la investigación titulada “Uso de fibras de polipropileno para reforzar suelos arcillosos en Palian – Huancayo”, Arrelucé y Solís (2021) evaluaron la modificación de las propiedades mecánicas de un suelo arcilloso mediante la incorporación de fibras sintéticas

de polipropileno en distintos porcentajes. El estudio experimental determinó que, al incrementar el contenido de fibra, se produce una reducción en la densidad seca máxima de 1,82 a 1,72 g/cm<sup>3</sup> junto con un aumento en la humedad óptima de compactación, la cual varió de 15,19 % a 19,41 %. En términos de resistencia, el suelo sin refuerzo presentó un valor de 3,05 kg/cm<sup>2</sup>, mientras que con una dosificación del 0,4 % de fibra se alcanzó 4,32 kg/cm<sup>2</sup>, lo que representa una mejora del 41,64 % en la capacidad portante. Con base en estos hallazgos, se valida la efectividad de las fibras de polipropileno como material de refuerzo para la estabilización de suelos cohesivos.

Cabrejos y Murga (2021), en su estudio “Estabilización de afirmados con residuos de lubricantes automotrices en el camino rural de Cambio Puente – Chimbote”, plantearon el uso de aceite quemado como estabilizante no convencional para afirmados. Mediante una metodología experimental cuantitativa, evaluaron tres proporciones de aditivo (1.5%, 3% y 4.5%) en muestras de las canteras Víbora y Guadalupito. Los ensayos revelaron que el 3% de aceite optimizó el comportamiento mecánico, obteniendo valores CBR de 87.45% (Víbora) y 156.42% (Guadalupito). El estudio demuestra que este residuo vehicular mejora significativamente la resistencia del afirmado sin afectar su estabilidad estructural.

De acuerdo con Quevedo Sánchez (2020) en el estudio “Efecto del jugo de *saccharum officinarum* en el acondicionamiento de suelos para vías, Moyobamba”, se analizó el impacto del jugo de caña sobre el CBR y la densidad de un material de afirmado. Mediante un tipo de investigación aplicada y diseño experimental los estudios de laboratorio revelaron que, sin adición, el CBR al 95% era del 71,00%. La adición de 2%, 5% y 10% aumentó el CBR a 74,00%, 18,00% y 4,40%, respectivamente. En cuanto a la M.D.S., se observó un incremento con 10% (2.355 g/cm<sup>3</sup>), aunque la resistencia disminuyó. La dosificación de 2% fue identificada como óptima para mejorar el afirmado sin sacrificar estabilidad mecánica.

Para Mamani y Lazarte (2019) En su artículo “Fibra sintética en caminos afirmados y su impacto en propiedades mecánicas, Región Puno.”, se examinó el comportamiento mecánico del afirmado en el camino vecinal Jipata - Umuchi al adicionar fibra sintética en

proporción de 0.10%. Donde el nivel fue experimental, aplicativa y correlacional. El vehículo de diseño (camión C2) mostró un aumento del 32,20% en el ángulo de fricción, un descenso del 23,64% en la cohesión y un aumento del 29,08% en la resistencia al cizallamiento. El estudio reveló que el uso de fibra en cantidades reducidas aumenta en gran medida la longevidad del pavimento al mejorar la resistencia a las cargas de cizallamiento.

### **3.1.3. A nivel local**

De acuerdo a Gómez Villa (2023) en la tesis “Evaluación de la capa de afirmado con polímero acrilamida y cemento, Ocobamba, Chincheros, Apurímac”, evaluó el efecto combinado del polímero acrilamida (0.3 g/litro) y cemento Portland (0.5%, 1.0% y 1.5%) en el rendimiento del afirmado. El CBR de la muestra sin aditivos fue de 37%, mientras que los especímenes con aditivos alcanzaron 72%, 80% y 104%, respectivamente. Las pruebas de cizallamiento directo dieron como resultado un ángulo de fricción de 31,40° y una cohesividad de 0,101 kg/cm<sup>2</sup>. La impermeabilidad también mejoró, y la combinación más satisfactoria incluyó 0,3 g/l de polímero y 1,5% de cemento.

Según Huamaní y Condori (2018) la investigación “Uso del estabilizador Z con polímero en el aumento del valor CBR del material afirmado en la carretera AP-103”, tuvo como finalidad comprobar la mejora del CBR al utilizar un estabilizador sintético. Utilizando una técnica experimental y comparativa, se descubrió que con la muestra estándar al 95% M.D.S., el CBR era del 12,55%, aumentando al 13,09% con el estabilizador. A su vez, al 100% de compactación, el CBR aumentó del 15,44% al 18,57%. Estos resultados sugieren que la adición del polímero Z mejora la capacidad portante del pavimento, aunque modestamente.

## **3.2. Bases teóricas**

### **- Fibra sintética de polipropileno**

El hormigón suele reforzarse con fibras sintéticas de polipropileno para controlar la fisuración durante el fraguado, aunque este material también ha sido estudiado por su

potencial para mejorar propiedades geotécnicas del suelo (Chema Ultra Fina, 2017). Entre las especificaciones técnicas reportadas para esta fibra se encuentran:

**Tabla 2**

*Características de la fibra sintética de polipropileno*

Ítem	Descripción
Fibra base	Polipropileno 100% virgen (sin contenido reciclado)
Configuración	Monofilamento (estructura monolaminar continua)
Densidad	0.91 gramos por centímetro cubico
Fusión	160°C (equivalente a 320°F)
Inicio de combustión	590°C (equivalente a 1094°F)
Comportamiento hídrico	Nula absorción de humedad Alto desempeño frente a agentes ácidos y alcalinos.
Resistencia química	alcalinos.
Resistencia a la tracción	70 ksi (480 megapascales)
Formato disponible	Segmentos cortos de 13 milímetros (0.5 pulgadas) y 19 milímetros (0.75 pulgadas)
Rigidez (Módulo elástico)	1230 ksi (4.48 gigapascales)

*Nota.* Se detalla las características de la fibra de polipropileno como la resistencia a la torsión, módulo de elasticidad la longitud de los filamentos entre otros utilizadas para la elaboración de la tesis. Adaptado de (Chema Ultra Fina, 2017).

**- Análisis de parámetros físicos en suelos**

Análisis granulométrico por tamizado (MTC E 107)

El Manual de Ensayo de Materiales (2016), a través de la normativa MTC E 107, establece un protocolo experimental para caracterizar la composición granulométrica de muestras de suelo. Este método exige el uso de instrumental calibrado que incluye juegos de tamices certificados, dispositivos de medición de masa de alta sensibilidad, equipos de

deseccación térmica, y elementos auxiliares de contención y limpieza. La finalidad esencial de la prueba radica en determinar cuantitativamente, mediante procesos de cribado, la fracción másica de partículas que atraviesan la abertura del tamiz con denominación #200. Dicha medición representa un índice crítico para la sistematización categorial y el análisis del comportamiento físico-mecánico de los suelos en contextos ingenieriles.

**Tabla 3**

*Tamices de malla cuadrada*

Categoría	Designación	Abertura (mm)
Gruesos	3"	75
	2"	50.8
(> 25 mm)	1½"	38.1
	1"	25.4
Medios	¾"	19
	⅜"	9.5
(1-25 mm)	#4	4.76
	#10	2
Finos	#20	0.84
	#40	0.425
(< 1 mm)	#60	0.25
	#140	0.106
	#200	0.075

*Nota.* Se muestra las aberturas según los tamices para realizar el análisis granulométrico y que el material pase por cada una de ellas y sean retenidas respectivamente adaptado del (Manual Ensayo de Materiales, 2016).

En el análisis granulométrico estándar, el cálculo del retenido acumulado porcentual por malla implica: (1) registrar la masa retenida individualmente en cada tamiz, (2) dividir este valor entre la masa seca total de la muestra (previa desecación termostática), y (3) escalar el resultado a porcentaje mediante factor 100. Este resultado permite trazar la curva

de distribución granulométrica y estimar la gradación granulométrica del material examinado, factor determinante para su categorización geotécnica y su validación como componente de la consolidación del suelo según el MTC:

$$\% \text{ Retenido parcial} = \frac{\text{Masa acumulado en el tamiz}}{\text{Masa seca total del material}} \times 100 \dots \dots (1)$$

Asimismo, puede utilizarse la siguiente fórmula para calcular la proporción de material que pasa a través del tamiz de 0,074 mm (n.º 200):

$$\% \text{ Pasa } 0.074 = \frac{\text{Peso total} - \text{Peso retenido en el tamiz de } 0.074}{\text{Peso total}} \times 100 \dots \dots (2)$$

#### Contenido de humedad (MTC E 108)

La norma técnica MTC E 108 especifica el procedimiento para determinar el porcentaje de agua presente en una muestra de suelo mediante su desecación en horno. Este método se fundamenta en la comparación entre la masa inicial de la muestra húmeda y su masa final tras el secado, siendo la diferencia entre ambos valores equivalente al peso del agua eliminada. La ejecución de este ensayo requiere los siguientes elementos:

#### Tabla 4

##### *Cantidad mínima representativa de la muestra total*

Tamaño máximo nominal (pasa al 100%)	Apertura del tamiz de referencia	Masa mínima de muestra húmeda (precisión ±0.1%)	Masa mínima de muestra húmeda (precisión ±1%)
≤ 2 mm	2,0 mm (Tamiz N.º 10)	20 g	20 g*
4,75 mm	4,76 mm (Tamiz N.º 4)	100 g	20 g*
9,5 mm	9,525 mm (0,375 pulg.)	500 g	50 g
19,0 mm	19,05 mm (0,75 pulg.)	2,5 kg	250 g
37,5 mm	38,1 mm (1,5 pulg.)	10 kg	1 kg
75,0 mm	76,2 mm (3,0 pulg.)	50 kg	5 kg

*Nota.* Se observa la masa mínima recomendada según el tamaño máximo de la partícula que pasa por cada diferente malla y poder realizar los ensayos sin preocupaciones adaptado del (Manual Ensayo de Materiales, 2016).

Consecuente de determinar las cantidades necesarias para una correcta ejecución del ensayo se determina:

$$W = \frac{\text{Masa de agua libre}}{\text{Masa del solido seco estabilizado}} \times 100 \dots\dots(3)$$

$$W = \frac{M_{CWS} - M_{CS}}{M_{CS} - M_C} \times 100 = \frac{M_W}{M_S} \times 100 \dots\dots(4)$$

Siendo:

- W: refleja el contenido de humedad del suelo, representado en porcentaje.
- $M_{CWS}$ : representa el peso combinado del contenedor y de la muestra de suelo en estado húmedo, medido en gramos.
- $M_{CS}$ : es el peso combinado del contenedor y del suelo seco tras el secado en estufa, expresado en gramos.
- $M_C$ : es la masa del contenedor vacío, expresada en gramos.
- $M_W$ : es el peso del agua evaporada durante el proceso de secado, calculado como la diferencia entre los pesos en húmedo y en seco, expresada en gramos.
- $M_S$ : es la masa de las partículas sólidas del suelo, medida en gramos después del secado completo de la muestra.

Limite líquido (MTC E 110)

El método de ensayo normalizado MTC E 110 define la operación de percusión del aparato conocido como cuchara de Casagrande como técnica para determinar el contenido de agua. Este procedimiento especifica que el mecanismo debe percutir la cazuela porta muestras un total de veinticinco ocasiones, descendiendo desde una altura calibrada de un centímetro y manteniendo una cadencia de dos percusiones por segundo.

El límite líquido se determina utilizando una de las siguientes ecuaciones:

$$LL = W^n \left( \frac{N}{25} \right)^{0.121} \quad \text{o} \quad LL = kW^n \dots\dots(5)$$

Siendo:

- N: número de golpes necesarios, correspondientes a un contenido de humedad específico, para que la ranura producida en la muestra se cierre completamente.
- W<sup>n</sup>: porcentaje del contenido de humedad del suelo que está relacionado con el número de golpes que se anotaron.
- k: constante determinada a partir de los valores tabulados en el Anexo A, utilizada para ajustar la curva del límite líquido.

**Tabla 5**

*Factor k para determinar el límite líquido*

Número de impactos	Factor de normalización	Rango de aplicación
20-24	0.974-0.995	Ajuste positivo
<b>25</b>	<b>1</b>	Valor de referencia
26-30	1.005-1.022	Ajuste negativo

*Nota.* El factor k para un número específico de impactos y el factor para calcular el límite líquido MTC (2016) se muestran y determinar con detalle los valores necesarios según (MTC, 2016) .

Límite plástico (MTC E 111)

Para determinar el límite plástico de un suelo en condiciones de laboratorio, la norma MTC E 111 prescribe un procedimiento basado en la conformación manual de rollos. Este método consiste en amasar y moldear la muestra hasta obtener cilindros de aproximadamente 3.2 milímetros de espesor, los cuales deben luego rodarse de forma continua entre la superficie palmar y una placa lisa, preservando su integridad estructural sin que se fisuren o fragmenten. El valor del límite plástico se obtiene aplicando la siguiente ecuación:

$$\text{Límite plástico} = \frac{\text{Masa inicial del espécimen húmedo}}{\text{Masa final tras secado a } 110 \pm 5^{\circ}\text{C}} \times 100 \dots \dots (7)$$

### Índice de plasticidad (MTC E 111)

La norma MTC E-111 define al índice de plasticidad (IP) como un parámetro derivado que cuantifica la amplitud del rango de humedad en el cual un suelo exhibe comportamiento plástico. En términos concretos, este índice se calcula mediante la diferencia aritmética entre dos valores característicos determinados experimentalmente: el límite líquido (LL) y el límite plástico (LP). La relación que expresa este cálculo es la siguiente:

$$IP = LL - LP \dots\dots\dots (8)$$

Siendo:

- IP: Medida de plasticidad de suelo
- LL: Contenido hídrico que define el estado líquido
- LP: Contenido hídrico que define el estado plástico

Este valor es esencial para clasificar los suelos porque permite determinar el grado de finos cohesivos y de plasticidad, que afecta al comportamiento geotécnico de los suelos y a su idoneidad como material estructural.

### Clasificación de Suelos

El enfoque jerárquico de la clasificación de suelos predice la respuesta ingenieril de los materiales terrestres clasificándolos en función de sus cualidades índice, como el comportamiento plástico y la distribución granulométrica.

### Sistema unificado de clasificación de suelos (SUCS)

En 1942 se creó el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS) por el destacado ingeniero geotécnico Arthur Casagrande, como parte de las investigaciones realizadas en épocas de conflicto bélico. Consecuentemente, dada su eficacia y rigor técnico, fue adoptado como estándar internacional abarcando áreas no previstas e ingresando al área de innovación como es la ingeniería civil, particularmente de proyectos geotécnicos.

Los dos pilares analíticos fundamentales del Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS), reconocido por las Normas Técnicas Peruanas, son su comportamiento

plástico evaluado por los límites de Atterberg y el examen mecánico por tamizado. Para su ejecución emplea una simbología estandarizada compuesta por dos letras. Mientras la segunda letra describe características complementarias como el grado de gradación o plasticidad (W para bien gradado, P para mal gradado, L para baja plasticidad y H para alta plasticidad), la primera letra identifica el componente predominante (G para gravas, S para arenas, M para limos, C para arcillas y O para materiales orgánicos).

La clasificación mediante el sistema SUCS fundamenta su categorización tras realizar ensayos pertinentes, como el análisis granulométrico según ASTM D422 y establecer los valores de los límites atterberg conforme a (MTC, 2016). Una vez obtenidos estos parámetros, se procede a la consulta de las tablas de clasificación SUCS estandarizadas en la norma ASTM D2487, las cuales permiten asignar la denominación correspondiente al material analizado. La caracterización técnica de los suelos en proyectos de ingeniería requiere este procedimiento metódico de categorización, que arroja datos importantes para aplicaciones geotécnicas como el análisis de estabilidad de taludes, la construcción de terraplenes y el diseño de cimentaciones.

Tabla 6

## Diagrama de decisión para clasificación SUCS

Categoría Principal	Subdivisión	Símbolo	Denominación del Grupo	Criterios Determinantes	
SUELOS GRANULARES	>50% retenido en tamiz #200 GRAVAS ( $\geq 50\%$ fracción >#4)	- <5% finos	GW	Grava bien graduada	$Cu \geq 4$ $1 \leq Cc \leq 3$
			GP	Grava pobremente graduada	$Cu < 4$ ó $Cc \notin [1,3]$
	- >12% finos	GM	Grava limosa	Finos en zona ML (carta de plasticidad)	
		GC	Grava arcillosa	Finos en zona CL (carta de plasticidad)	
		GC-GM	Grava arcillo-limosa	Finos en zona CL-ML	
		GW-GM/GC	Grava bien grad. con finos	Cumple GW + plasticidad finos	
	- 5-12% finos (dual)	GP-GM/GC	Grava pobre grad. con finos	Cumple GP + plasticidad finos	
		ARENAS ( $\geq 50\%$ fracción $\leq$ #4)	- <5% finos	SW	Arena bien graduada
	SP	Arena pobremente graduada		$Cu < 6$ ó $Cc \notin [1,3]$	
	- >12% finos	SM	Arena limosa	Finos en zona ML	
		SC	Arena arcillosa	Finos en zona CL	
		SC-SM	Arena arcillo-limosa	Finos en zona CL-ML	

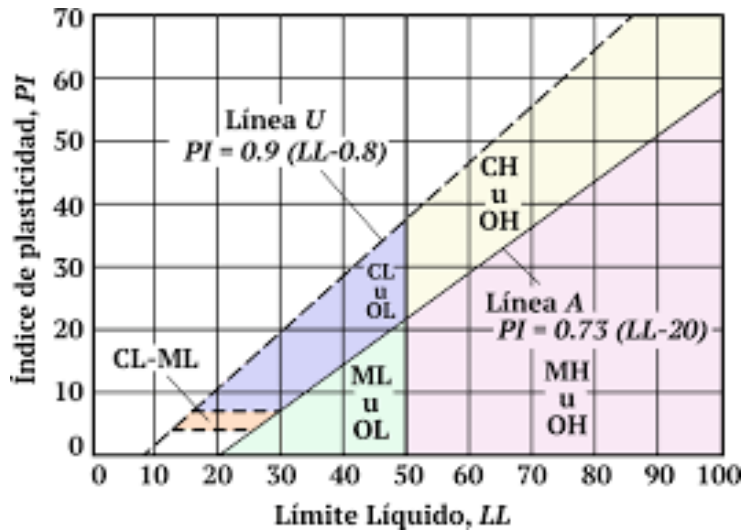
Categoría Principal	Subdivisión	Símbolo	Denominación del Grupo	Criterios Determinantes	
SUELOS FINOS	- 5-12% finos (dual)	SW-SM/SC	Arena bien grad. con finos	Cumple SW + plasticidad finos	
		SP-SM/SC	Arena pobre grad. con finos	Cumple SP + plasticidad finos	
	≥50% pasa tamiz #200 LL < 50%	CL	Arcilla de baja plasticidad	IP >7 y sobre línea A	
		ML	Limo inorgánico	IP < 4 o bajo línea A	
		CL-ML	Transición arcilla-limo	4 ≤ IP ≤ 7 (zona dual)	
		OL	Suelo orgánico plástico	(LLhorno/LLnatural)<0.75	
		LL ≥ 50%	CH	Arcilla de alta plasticidad	Sobre línea A
			MH	Limo elástico	Bajo línea A
	MATERIA ORGÁNICA	-	OH	Suelo orgánico plástico	(LLhorno/LLnatural)<0.75
			Pt	Turba	Identificación organoléptica: color oscuro, olor, textura fibrosa

*Nota.* Como se muestra, los suelos granulares se clasifican según su distribución granulométrica y plasticidad de finos. En suelos finos, el límite líquido (LL) y posición relativa a la línea A en la carta de Casagrande son determinantes, distinguiéndose materiales orgánicos cuando la relación  $LL_{\text{horno}}/LL_{\text{natural}} < 0.75$ . D24 según fue adaptada de la siguiente la norma ASTM D248

Del mismo modo, a partir de la información recopilada, el enfoque de clasificación SUCS utiliza el siguiente ábaco para identificar el tipo de suelo:

**Figura 1**

*Técnica SUCS para determinar el tipo de suelo mediante un gráfico de casa grande*



*Nota.* El gráfico de plasticidad utilizado para categorizar los suelos ASTM D2487 se observa en la Figura en cuestión de tal manera que se pueda utilizar con los valores extraído de los ensayos. Según la carta de plasticidad SUCS.

El esquema de categorización AASHTO

Una de las metodologías más comunes en ingeniería vial para establecer si los suelos son adecuados para capas estructurales como subrasantes, subbases y bases de pavimento es el sistema de categorización propuesto por Hogentogler y Terzaghi en 1928 y codificado posteriormente como ASTM D-3282. Este método, a veces denominado clasificación AASHTO, divide los suelos en las categorías A-1 a A-8 en función de su contenido en finos y su comportamiento mecánico.

Los suelos granulares se definen por tener menos o igual al 35% de la masa total de la muestra en partículas finas (material que pasa el tamiz N°200, o 0,075 mm). La metodología AASHTO clasifica estos materiales en los siguientes grupos primarios:

Suelos finos arcillo-limosos: Con cualidades plásticas más notables, pero también con finos de hasta el 35%. Se les asignan los grupos A-4, A-5, A-6 o A-7 en función de su índice de plasticidad y límite líquido.

Materiales orgánicos: Materiales térreos con concentraciones significativas de compuestos orgánicos, que presentan comportamiento no estructural y se agrupan bajo la designación A-8.

En cuanto a los suelos arcillosos, la norma distingue entre:

Limos de baja plasticidad cuando la medida del índice de plasticidad (IP) es igual o inferior a 10.

Arcillas de plasticidad media a alta, cuando el IP es igual o mayor a 11.

Esta clasificación geotécnica resulta fundamental para predecir la respuesta del suelo ante cargas dinámicas vehiculares y fluctuaciones de humedad ambiental. Además, establece criterios decisivos para definir estrategias de diseño de capas estructurales y seleccionar técnicas de estabilización eficaces en proyectos viales, conforme a normativas MTC 2016.

**Tabla 7**

*La clasificación AASHTO prioriza el comportamiento de suelos en pavimentos*

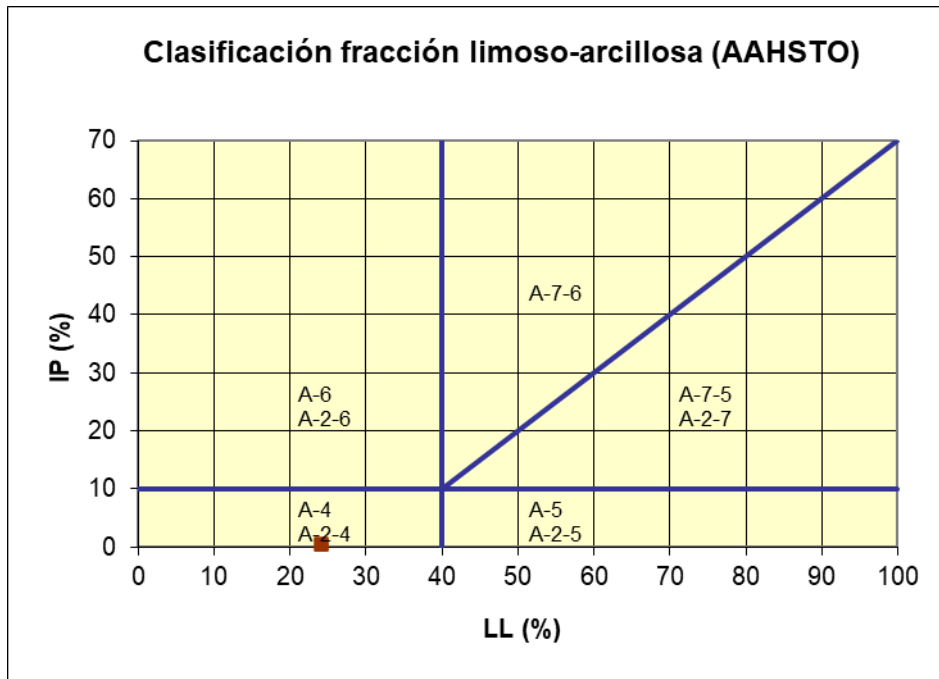
Categoría	Grupo	Requisitos Granulométricos (% pasa)	Propiedades			
			Fracción Fina (Tamiz #40)	Material Dominante	Aptitud Subrasante	
		#10 (2mm)	#40 (0.425mm)	#200 (0.075mm)	Lím. Líquido (LL)	Índ. Plasticidad ad (IP)
GRANULARES (≤35% pasa #200)	A-1-a	≤50	≤30	≤15	-	≤6
	A-1-b	-	≤50	≤25	-	≤6
	A-3	-	-	≤10	-	NP (1)
	A-2-4	-	≥51	≤35	≤40	≤10
	A-2-5	-	-	≤35	≥41	≤10
	A-2-6	-	-	≤35	≤40	≥11
	A-2-7	-	-	≤35	≥41	≥11
FINOS (>35% pasa #200)	A-4	-	-	>35	≤40	≤10
	A-5	-	-	>35	≥41	≤10 (2)
	A-6	-	-	>35	≤40	≥11
	A-7- 5/6	-	-	>35	≥41	≥11 (3)

*Nota.* Se detalla en cuestión que se puede determinar la clasificación de suelos determinado las características físicas de las muestras ensayadas en el laboratorio.

Adaptación realizada a la Asociación Española de Carreteras.

**Figura 2**

Utilizando una tabla de plasticidad, el enfoque AASHTO puede identificar el tipo de suelo.



*Nota.* Es posible determinar a qué categoría pertenece el material investigado observando el gráfico de la carta de plasticidad con los valores extraídos de los ensayos pertinentes: Asociación Española de Carreteras.

#### - Ensayos para determinar las propiedades mecánicas de los suelos

Ensayo Proctor Modificado (MTC E 115)

Dado que los errores metodológicos proporcionarían resultados que no representarían fielmente el comportamiento del suelo in situ, es necesario seguir estrictamente el procedimiento estándar MTC E-115 para la adecuada valoración de la compactación a través del ensayo Proctor Modificado. Estos factores son esenciales para la validez de los resultados:

**Tabla 8***Métodos de ensayo de proctor modificado*

Parámetro	Método A	Método B	Método C
Diámetro del molde	101.6 mm (4")	101.6 mm (4")	152.4 mm (6")
Tamaño máximo de partícula	≤ 4.75 mm (Malla #4)	≤ 9.5 mm (Malla 3/8")	≤ 19.0 mm (Malla 3/4")
Capas de compactación	5 capas	5 capas	5 capas
Golpes/capa	25 golpes/capa	25 golpes/capa	56 golpes/capa
Criterio de selección	≤ 20% retenido en tamiz 4.75 mm (Nº 4)	> 20% retenido en tamiz 4.75 mm y ≤ 20% retenido en tamiz 9.5 mm (3/8")	> 20% retenido en tamiz 9.5 mm (3/8") y ≤ 30% retenido en tamiz 19.0 mm (3/4")
Uso típico	Suelos finos o granulares con bajo contenido de grava	Suelos con grava pequeña (≤ 9.5 mm)	Suelos con grava gruesa (≤ 19.0 mm)
Notas adicionales	Método predeterminado si no se especifica. Puede usarse B o C si el material cumple.	No aplicable si > 20% retenido en tamiz 3/8". Puede usarse C si el material cumple.	No compatible con moldes de 101.6 mm (solo 152.4 mm).

*Nota.* Se observa los métodos A, B y C para realizar el ensayo de proctor modificado teniendo en consideración el porcentaje que pasa y retenidos según el ensayo de granulometría según la tabla adaptada de (MTC, 2016).

Seguidamente ya prepara la muestra se determina peso unitario seco con la siguiente formula:

$$\rho_m = 1000 \times \frac{M_t - M_{md}}{V} \dots\dots(9)$$

Siendo:

- $\rho_m$ : representa la densidad húmeda del espécimen compactado, expresada en mega gramos por metro cúbico ( $Mg/m^3$ )
- $M_t$ : corresponde a la masa total del molde con el suelo compactado en estado húmedo, medida en kilogramos (kg)
- $M_{md}$ : indica la masa del molde de compactación vacío, también en kilogramos (kg), la cual debe ser conocida previamente para el cálculo.
- $V$ : es el volumen interno del molde de compactación.

$$\rho_d = \frac{\rho_m}{1 + \frac{W}{100}} \dots\dots(10)$$

Siendo:

- $\rho_d$ : corresponde a la densidad seca del espécimen compactado, expresada en mega gramos por metro cúbico ( $Mg/m^3$ ). Una vez eliminado el contenido de humedad, esta cifra muestra la relación entre la masa de sólidos del suelo y todo el volumen ocupado por la muestra.
- $\rho_m$ : representa la densidad húmeda del espécimen compactado, expresada en mega gramos por metro cúbico ( $Mg/m^3$ )
- $W$ : es el contenido de agua (%).

#### Ensayo de CBR (MTC E 132)

Para la ejecución del ensayo CBR en laboratorio se tiene en consideración (MTC, 2016), se debe ejercer presión en el pistón de penetración con una prensa que tenga un gato mecánico o sistema similar, asegurando una velocidad constante de avance de 1.27 mm por minuto (equivalente a 0.05"). En el caso de prensas manuales que no permiten un control automático de dicha velocidad, esta se regulará manualmente mediante la lectura

del deformímetro de penetración, complementado con la utilización de un cronómetro. Durante el procedimiento, se registrarán las cargas correspondientes a distintas profundidades de penetración.

**Tabla 9**

*Velocidad de penetración de la muestra*

Díámetro / Abertura (mm)	Equivalencia en pulgadas (")
0,63 mm	0,025" (aproximadamente 1/40")
1,27 mm	0,050" (1/20")
1,90 mm	0,075" (aproximadamente 3/40")
2,54 mm	0,100" (1/10")
3,17 mm	0,125" (1/8")
3,81 mm	0,150" (3/20")
5,08 mm	0,200" (1/5")
7,62 mm	0,300" (3/10")
10,16 mm	0,400" (2/5")
12,70 mm	0,500" (1/2")

*Nota.* Se observa los parámetros de velocidad de penetración que se realiza en el ensayo de CBR en función de las pulgadas y el tiempo determinado según Manual ensayo de materiales (MTC, 2016).

A continuación, se utiliza la siguiente fórmula para calcular la humedad de compactación:

$$\% \text{ de agua a adicionar} = \frac{H-h}{100+h} \dots\dots(11)$$

Siendo:

- $P_d$ : Humedad objetivo
- $P_m$ : Humedad inicial del suelo

Para luego poder determinar la expansión con la siguiente formula:

$$\% \text{ Incremento porcentual de altura de saturación} = \frac{L2-L1}{127} \dots\dots(12)$$

donde:

- L2: altura inicial de la proba antes de la hidratación
- L1: altura estabilizada tras proceso de hinchamiento

Para determinar el CBR (California Bearing Ratio) bajo las condiciones especificadas, se debe seguir el siguiente procedimiento técnico normalizado:

### Tabla 10

#### *Características de la curva penetración-resistencia*

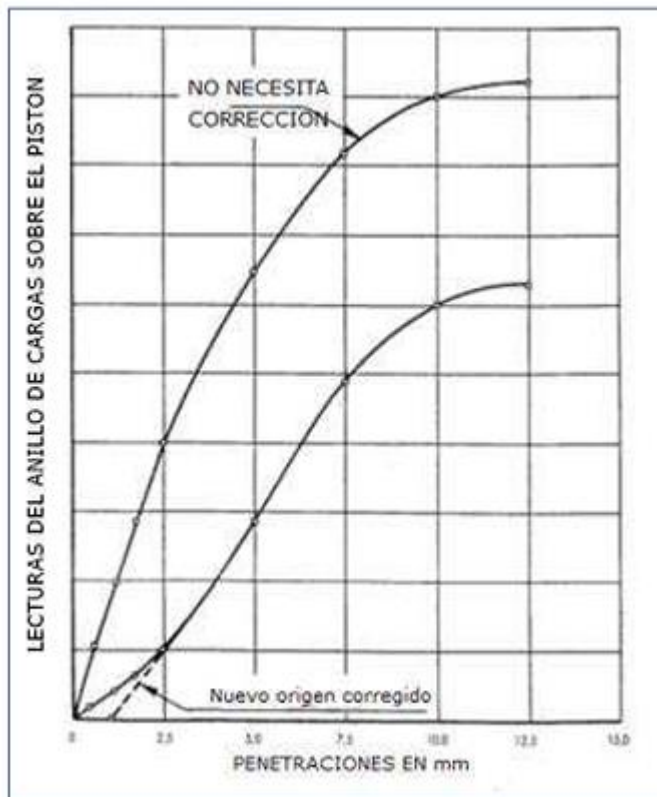
$\Delta h$ (mm)	P (MPa)	Equivalencias
2.54	6.9	70.31 kgf/cm <sup>2</sup> = 1,000 psi
5.08	10.35	105.46 kgf/cm <sup>2</sup> = 1,500 psi

*Nota.* Se puede observar las características de penetración y presión para 0.1" Y 0.2" y su equivalencia y determinar su determinada curvatura y graficar consecuentemente según él (MTC, 2016).

Y poder realizar una correcta lectura para el cálculo de índice de CBR de la siguiente figura:

**Figura 3**

Curva para cálculo de índice de CBR



*Nota.* Se observa la curva para determinar el índice de CBR en función de la penetración y la carga del pistón para realizar de ser necesario alguna corrección (MTC, 2016).

### Parámetros del afirmado

El afirmado debe cumplir con las siguientes características:

**Tabla 11***Características granulométricas por cada tipo de afirmado*

Tamiz	Tránsito Tipo 1 (<50 veh/día)	Tránsito Tipo 2 (51-100 veh/día)	Tránsito Tipo 3 (101-200 veh/día)
50 mm (2")	100	100	-
37.5 mm (1½")	-	95-100	100
25 mm (1")	50-80	75-95	90-100
19 mm (¾")	-	-	65-100
12.5 mm (½")	-	-	-
9.5 mm (⅜")	-	40-75	45-80
4.75 mm (N°4)	20-50	30-60	30-65
2.36 mm (N°8)	-	-	-
2.00 mm (N°10)	-	20-45	22-52
0.425 mm (N°40)	-	15-30	15-35
0.075 mm (N°200)	04-12	05-15	05-20
Índice	04-09	04-09	04-09
Plasticidad			

*Nota.* Se observa los parámetros que deben cumplir los distintos tipos de afirmados para categorizarlo según corresponda (MTC, 2014).

Además, debe cumplir las siguientes normas de calidad:

- Límite máximo de líquido: 35% (MTC E 110)
- El valor mínimo del CBR debe ser: 40% (MTC E 132)

De acuerdo con las normas técnicas, los resultados del ensayo CBR deben evaluarse según la compactación lograda en relación con el 100% de la densidad seca máxima (M.D.S.) y teniendo en cuenta una penetración estándar de 0,1 pulgadas (2,5 mm). Los criterios técnicos establecen que el índice de plasticidad (IP), un parámetro complementario fundamental, debe tener un valor mínimo de 4 y no superar 12 a menos que se aporte una investigación técnica exhaustiva del comportamiento del suelo en circunstancias de carga.

### **3.3. Definición de términos**

#### **Ahuellamiento:**

El Ministerio de Transporte y Comunicaciones (2014) define en su Manual de diseño de carreteras no pavimentadas como ahuellamiento: "La deformación longitudinal progresiva en el rodaje de afirmados", caracterizada por surcos paralelos al flujo vehicular, generada por cargas repetidas sobre materiales granulares con compactación insuficiente o alta plasticidad ( $\geq 12\%$  pasante tamiz #200), cuyas profundidades superiores a 15 mm comprometen la seguridad vial y requieren mantenimiento correctivo"

#### **Afirmado:**

En el contexto de la ingeniería de carreteras, el afirmado es una capa estructural fundamental dentro del paquete de pavimento. Su definición técnica, conforme a los glosarios especializados, lo identifica como un estrato de material granular ya sea de origen natural, procesado o estabilizado que se dispone y compacta bajo rigurosas especificaciones. El control preciso de su composición granulométrica es esencial, pues esta le otorga la resistencia mecánica necesaria para distribuir y soportar las cargas dinámicas generadas por el tráfico vehicular, transfiriendo los esfuerzos de manera adecuada a las capas inferiores. Su función principal puede resumirse en servir como una plataforma de soporte estructural.

Cumpliendo para ello con un requisito fundamental: el material debe contener una proporción adecuada de partículas finas que actúen como agente aglutinante, asegurando así la cohesión estructural interna entre las partículas del conjunto granular.

### **Capa de Afirmado**

Conforme a lo indicado en el Manual de Carreteras No Pavimentadas de Bajo Tráfico (MTC, 2014), la elección del material para la capa de afirmado se fundamenta en dos criterios técnicos esenciales: el tamaño máximo de las partículas del agregado y el contenido de material fino, especialmente la fracción arcillosa, necesaria para asegurar la cohesión y estabilidad del conjunto. Estos parámetros granulométricos son cruciales para el rendimiento estructural del pavimento.

La naturaleza del material empleado puede presentar variaciones significativas según sus características in situ, ya se trate de canteras, depósitos aluviales o bancos naturales. El manual enfatiza que la fracción fina, especialmente la componente arcillosa, cumple una función cementante esencial al proporcionar cohesión interna al material granular. Sin embargo, su contenido debe estar cuidadosamente balanceado para evitar comprometer la permeabilidad y resistencia del conjunto.

La distribución granulométrica del material resulta crítica, por que mide directamente sus características mecánicas sometidas de la parte superficial de la carretera no pavimentada. No obstante, en la práctica ingenieril, la selección final del material también debe considerar factores económicos y logísticos relacionados con la disponibilidad local de recursos, que cumplan con las especificaciones técnicas. El manual proporciona los lineamientos para lograr este equilibrio óptimo entre requerimientos técnicos y viabilidad constructiva.

### **Tipos de Afirmado**

El manual de diseño para vías de bajo tránsito (MTC, 2014) establece que la selección del sistema de pavimentación se fundamenta en el Índice Medio Diario (IMD) de vehículos. Este indicador de intensidad circulatoria sirve como criterio técnico principal para diferenciar cuatro configuraciones estructurales posibles. En consecuencia, el valor del IMD determina de manera integral tanto el dimensionamiento de las capas estructurales como la especificación del tipo de pavimento más idóneo, constituyéndose así en el elemento rector del proceso de diseño.

**Afirmado Tipo 1**

Con un índice de plasticidad máximo de 9, este tipo de pavimento se considera equiparable a la grava o al material granular natural elegido mediante un procedimiento de agitación. Un índice de plasticidad de hasta 12 puede permitirse en circunstancias específicas técnicamente justificables. Está diseñado principalmente para carreteras T0 e I0, o aquellas por las que circulan menos de 50 coches al día.

**Afirmado Tipo 2**

Este material es equivalente a una grava natural o agregado granular que ha sido sometido a agitación o selección mecánica, con un índice de plasticidad no superior a 9 y, en raros casos, hasta 12 cuando está técnicamente soportado. Se aconseja su uso en carreteras de clase T2, que tienen volúmenes de tráfico moderados, de 51 a 100 coches al día de media.

**Afirmado Tipo 3**

Corresponde a un granulado o grava natural que ha sufrido agitación o trituración. Aunque puede permitirse un valor de hasta 12 con razones técnicas, el índice de plasticidad no debe ser superior a 9. Está pensado para su uso en carreteras de clase T3, por las que se espera que circulen entre 101 y 200 coches al día.

**Afirmado Tipo 4**

Se refiere a una sustancia granulada que ha sido molida o triturada., con un límite de plasticidad de hasta 9, y posibilidad de incrementarlo hasta 12 si existe una razón técnica que lo sustente. Es apto para vías clasificadas como T4, las cuales soportan un tránsito medio diario proyectado entre 201 y 400 vehículos.

**Análisis granulométrico del suelo:**

El análisis granulométrico es un ensayo fundamental en la mecánica de suelos, cuya finalidad es cuantificar la proporción en que se presentan las partículas de diferentes tamaños dentro de una muestra. Este procedimiento de laboratorio, descrito en la literatura clásica de la especialidad, se basa en el fraccionamiento del material mediante un conjunto de tamices normalizados. Cuando el suelo contiene una fracción fina significativa, es

necesario realizar un proceso de lavado sobre el tamiz de referencia de menor abertura (N° 200) para asegurar la separación precisa de estos componentes.

### **Carretera no pavimentada**

El manual técnico para el dimensionamiento de vías sin pavimentar y con bajo nivel de tráfico, publicado por el Ministerio de Transportes y Comunicaciones (MTC) en el año 2014, establece los criterios y procedimientos de diseño para este tipo de infraestructura, donde una carretera no pavimentada es una vía compuesta en su mayor parte por materiales granulares naturales o procesados y destinada al tráfico de vehículos. (grava, arena, tierra), sin capas asfálticas u hormigón, lo que la hace más susceptible a deterioros por factores climáticos y tránsito, requiriendo mantenimiento periódico para conservar su funcionalidad.

### **CBR: (california bearing ratio)**

Según la American Society for Testing and Materials ASTM D1883-21 ASTM (2021) en la norma ASTM D1883, el CBR se expresa como: "El porcentaje de resistencia a la penetración de un material en comparación con un material patrón (piedra triturada), evaluado a 0.1 y 0.2 pulgadas (2.54 y 5.08 mm) de penetración, utilizado para diseñar espesores de pavimentos flexibles y rígidos"

### **Cohesión:**

Según Fernandez (2006), la cohesión en mecánica de suelos corresponde a la propiedad interna que confiere resistencia al corte mediante fuerzas de atracción entre las partículas del suelo. Este fenómeno depende directamente de la densidad de contactos entre partículas adyacentes dentro de la matriz del suelo. En consecuencia, un aumento en la dimensión media de las partículas que tiende a reducir el área superficial específica puede, bajo ciertas condiciones granulométricas y de compactación, generar un incremento en la magnitud de la cohesión debido a una redistribución de los puntos de contacto y de las fuerzas internas.

### **Compactación:**

El mejoramiento de las propiedades ingenieriles de un suelo mediante la compactación es un proceso técnico fundamental. Según lo estipulado en la norma ASTM D1557-21, esta técnica consiste en aplicar energía mecánica controlada ya sea por impacto, vibración o presión estática para reducir el volumen de vacíos dentro de la masa de suelo. El resultado principal de este procedimiento es un aumento de la densidad del material en estado seco, lo que se traduce directamente en una mayor capacidad de carga y un mejor desempeño estructural para soportar esfuerzos.

#### **Fibra sintética:**

De acuerdo con Mexibras (2023), las fibras sintéticas se definen como filamentos textiles obtenidos mediante la transformación química de derivados del petróleo. Su naturaleza es exclusivamente antropogénica, ya que tanto su materia prima como su proceso de fabricación que incluye la síntesis del polímero y la formación de la hebra se realizan de forma integral en entornos industriales, sin involucrar materias primas de origen biológico en ninguna etapa de su producción. Esta condición las distingue fundamentalmente tanto de las fibras naturales como de las fibras artificiales, las cuales se originan, total o parcialmente, a partir de recursos naturales.

#### **Proctor modificado**

El Ensayo Proctor Modificado es un procedimiento de laboratorio estandarizado cuyo objetivo es determinar las condiciones ideales para compactar suelos bajo elevados niveles de energía. Los parámetros clave que se obtienen son el valor pico de densidad en estado seco ( $\gamma_{dmax}$ ) y el porcentaje de agua que permite alcanzarlo, conocido como contenido de humedad óptimo (CHO), conforme a lo establecido en la norma ASTM D698-12 (2021). La técnica emplea un molde de volumen calibrado de 2.320 cm<sup>3</sup> y un pisón de 4.535 kg de masa, el cual se deja caer en caída libre desde una altura fija de 457 mm para impartir la energía de compactación especificada por el método.

De acuerdo con el protocolo operativo, el espécimen se consolida en cinco (05) coberturas de grosor uniforme utilizando el martillo compactador, y cada capa recibe exactamente 25 golpes. Este proceso garantiza que la energía de compactación se

distribuya uniformemente por todo el suelo. La metodología descrita se encuentra formalmente reglamentada por la norma ASTM D698-12 (ASTM International, 2021), que especifica los criterios de preparación de muestras, condiciones ambientales y tolerancias permitidas durante la ejecución del ensayo.

**Suelo cohesivo:**

Se trata de suelos constituidos por partículas de tamaño muy reducido, en los cuales predominan los fenómenos de interacción superficial de tipo electroquímico. Este comportamiento es característico de materiales plásticos como las arcillas, donde las partículas presentan una fuerte tendencia a aglomerarse entre sí, según lo expuesto por (Juarez y Rico, 2005).

**Suelos estabilizados:**

Este tipo de suelo se caracteriza por presentar deficiencias en su estabilidad y capacidad portante, lo que determina que no reúna las condiciones necesarias para su empleo directo en la capa de afirmado de una carretera. De acuerdo con las directrices establecidas en el manual para el diseño de carreteras no pavimentadas de bajo volumen de tránsito (MTC, 2014), se requiere la aplicación de un proceso de estabilización que consiste en la incorporación de agentes estabilizadores como cemento, cal u otros aditivos de naturaleza química o iónica con el fin de modificar y mejorar sus propiedades mecánicas e hidráulicas.

**Suelos expansivos:**

De acuerdo con lo estipulado en la Norma Técnica Peruana E.050 (2020), los suelos susceptibles a la absorción de agua experimentan un aumento significativo de volumen al humedecerse, lo cual genera esfuerzos de expansión que pueden comprometer la estabilidad y seguridad de las estructuras cimentadas sobre ellos.

## **IV. Metodología**

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

#### **- Tipo de investigación**

De acuerdo con Muñoz Razo (2011), la investigación aplicada denominada también tecnológica, empírica o práctica se caracteriza por la utilización sistemática del conocimiento teórico generado por la investigación básica, con el objetivo de abordar y resolver problemáticas concretas de naturaleza técnica y empírica. Su finalidad principal es la transferencia tecnológica y la innovación, orientada a potenciar el desarrollo y la competitividad de los diversos sectores productivos de bienes y servicios dentro de la sociedad.

Según lo expuesto la tesis actual es de tipo aplicado por que con la utilización de la fibra sintética de polipropileno se quiere mejorar las propiedades mecánicas del afirmado lo cual conlleva mejorar la ruta AP 103, tramo km 2+500 – km 6+400.

#### **-Nivel de investigación**

Desde la perspectiva metodológica establecida por Hernández y Mendoza (2018), la investigación de alcance explicativo se orienta específicamente a la identificación y análisis de los determinantes causales que subyacen a un fenómeno. Su objetivo fundamental es desentrañar las relaciones causales, superando así los límites de los estudios que se centran únicamente en la descripción de variables o en el establecimiento de correlaciones entre ellas, para responder de manera rigurosa a los "por qué" de los eventos.

Por lo antes mencionado esta investigación se enmarca en el nivel explicativo por que busca probar una relación causal (fibra – propiedades mecánicas).

#### **- Diseño de investigación**

Según lo expuesto por Muñoz Razo (2011), el objetivo principal de una investigación experimental es reproducir un fenómeno en un entorno de laboratorio controlado, de modo que se puedan modificar sistemáticamente una o varias variables independientes y observar su impacto en el comportamiento del fenómeno. Este método, que pretende

reproducir fielmente las situaciones reales en las que se utilizará el objeto de la investigación, requiere un diseño sistemático y un control estricto de las circunstancias de la prueba.

Por las razones expuestas, la presente tesis tiene carácter experimental por que se manipulara las variables con el propósito de mejorar la resistencia a la penetración y densidad máxima de la ruta AP 103, tramo km 2+500 – 6+400.

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

##### **- Ámbito temporal**

La elaboración de esta tesis se realizó entre los años 2023 y 2025.

##### **- Ámbito espacial**

El segmento de la carretera AP-103 comprendido entre el kilómetro 2+500 y el km 6+400, que se encuentra en la provincia de Abancay y el departamento de Apurímac.

#### **4.3. Población y muestra**

##### **- Población**

Desde el marco teórico de Hernández y Mendoza (2018), la población se concibe como el conjunto completo de individuos o elementos que poseen propiedades comunes. En el contexto de esta investigación, este concepto se operacionaliza como el universo o espacio de posibles combinaciones de afirmado que pueden fabricarse a partir del material granular específico extraído de la cantera KM 16+040, ubicada en la zona de influencia del proyecto (tramo km 2+500 al km 6+400 de la ruta AP-103, Abancay). Esta definición conceptual trasciende una delimitación espacial o geográfica convencional, centrándose de manera específica en la unidad material fundamental que constituye el objeto de estudio y de intervención experimental en el laboratorio.

##### **- Muestra**

La muestra es un subconjunto de la población, seleccionado para ser analizado y del cual se infieren conclusiones sobre el todo (Rivas Tovar, 2017). En este estudio, la muestra estuvo constituida por 15 especímenes o unidades experimentales,

correspondientes a cinco tratamientos distintos con tres réplicas cada uno, tal como se detalla en la Tabla 12:

**Tabla 12**

*Composición de las mezclas necesarias*

Tratamiento	Descripción de la mezcla	Número de réplicas	Total de especímenes
1	Material de cantera (muestra patrón o control)	3	3
2	Material de cantera + 0.1% de fibra sintética de polipropileno (F.S.P.)	3	3
3	Material de cantera + 0.5% de F.S.P.	3	3
4	Material de cantera + 1.0% de F.S.P.	3	3
5	Material de cantera + 1.5% de F.S.P.	3	3
<b>Total</b>			<b>15</b>

*Nota.* Las tres réplicas por tratamiento permiten estimar la variabilidad experimental y dotar de robustez estadística al análisis de los resultados.

#### **-Muestreo**

El muestreo no probabilístico es un enfoque metodológico en el que los elementos de la muestra son elegidos con base en criterios deliberados establecidos por el investigador, y no a través de un mecanismo aleatorio. Como explica Rivas Tovar (2017), esta elección intencional introduce una direccionalidad inherente al diseño. Dicha direccionalidad puede responder a factores pragmáticos del diseño de investigación, a restricciones de recursos o al supuesto teórico de que la no aplicación de mecanismos

aleatorios no invalida necesariamente la solidez de los hallazgos ni su posible extrapolación a un contexto más amplio.

En este caso, la selección de la cantera KM 16+040 se basó en su cercanía al tramo de estudio, su representatividad como fuente de material para el afirmado de la zona, y la necesidad de obtener material homogenizado para un experimento controlado.

#### **4.4. Instrumentos**

Por otro lado, la técnica a emplearse en la presente tesis será la de observación, sus instrumentos serán las fichas de recolección de datos comprendidos en la (MTC, 2016) con los siguientes ensayos:

- La prueba de granulometría por tamizado (MTC E 107).
- La prueba del contenido de humedad (MTC E 108).
- La prueba del límite líquido (MTC E 110).
- La prueba del límite plástico (MTC E 111).
- La prueba del índice de plasticidad (MTC E 111).
- El MTC E-115 es el ensayo de compactación Proctor modificado.
- El ensayo CBR (MTC E-132).

#### **4.5. Procedimiento**

##### **- Descripción del trabajo de campo**

Análisis granulométrico de suelo por tamizado (MTC E 107).

Se identificó la cantera para realizar el muestreo de las cuales se extrajeron muestras representativas.

Para obtener una masa homogénea, se selecciona una muestra representativa del material y se seca al aire o en un horno a  $110 \pm 5$  °C.

**Figura 4**

*Muestreo de material para realizar la composición de mezclas*



*Nota.* Se realiza la recolección de muestras en la cantera dentro del área de influencia del proyecto realizando la recolección de muestras y preparándolas para su respectivo transporte.

En cumplimiento de los requisitos técnicos pertinentes, las muestras recogidas sobre el terreno se llevaron al laboratorio para someterlas a las pruebas diseñadas para la caracterización mecánica y física del material.

**Figura 5**

*Cuarteo de material*



*Nota.* Se realiza el cuarteo de material para poder elaborar los ensayos de manera eficiente disgregando el material de manera eficiente.

Se eligieron dos muestras de cuatro para someterlas al procedimiento de tamizado adecuado con el fin de determinar el análisis granulométrico del suelo mediante tamizado.

### Figura 6

#### *Análisis granulométrico de suelo por tamizado*



*Nota.* Se observa el resultado de los ensayos de granulométricos dicho material retenido en cada malla anteriormente descrita y con dicho resultado verificando las propiedades físicas de la muestra. Elaboración propia.

Contenido de humedad (MTC E 108).

Según la norma MTC E-108, la determinación de la humedad se realiza mediante (1) el despiece de una muestra representativa, (2) el secado en estufa hasta masa constante a  $105 \pm 5^\circ\text{C}$ , (3) el cálculo gravimétrico preciso y (4) la validación por duplicado, un proceso que garantiza la precisión técnica respetando las cualidades inherentes al material.

Posteriormente, se realizaron mediciones gravimétricas precisas, registrando tanto el peso inicial de las muestras en su estado húmedo como el peso final después del proceso de secado. La diferencia entre estos valores permitió calcular cuantitativamente el ensayo programado, descrita como porcentaje de humedad del material. Todo el

procedimiento se realizó rigurosamente de acuerdo a lo estipulado en la normativa técnica pertinente (MTC, 2016), garantizando así la certeza y fiabilidad de los resultados logrados.

Limite líquido y limite plástico (MTC E 110 – 111).

Primero, se realizó la prueba del límite líquido con la fracción de suelo que pasó por el tamiz N° 40 después de haber sido aireado hasta alcanzar las condiciones naturales de humedad. Este porcentaje se humedeció cuidadosamente y se amasó hasta que adquirió una consistencia plástica que permitió manipularlo en el aparato Casagrande.

Según la norma MTC E-110, el ensayo de límite líquido tiene como objetivo principal identificar el nivel crítico de humedad donde un suelo se vuelve plástico a líquido. Para garantizar la repetibilidad de los resultados, se sigue una metodología sistemática para emitir este juicio.

Primero se prepara la muestra y luego se coloca cuidadosamente en el vaso del aparato Casagrande para iniciar la operación. La muestra se dibuja con una ranura centrada con precisión utilizando un separador normalizado. A continuación, el vaso se eleva y desciende cuidadosamente desde una altura precisa de un centímetro, produciendo golpes repetidos a un ritmo de unos dos por segundo. El material se cizalla como resultado de este movimiento mecánico.

El criterio fundamental de la prueba es contar los golpes requeridos para que los dos segmentos de suelo, separados por la ranura, colapsen y se unan en su base a lo largo de una distancia predeterminada. Tras esta etapa, se recoge una muestra representativa del material para utilizar el método gravimétrico convencional que consiste en secarlo en un horno y comparar los pesos previos y posteriores al secado para evaluar su humedad.

**Figura 7**

*Ejecución de muestras según norma establecidas*



*Nota.* De la imagen se observa el material preparado para realizar los ensayos correspondientes a la norma antes mencionada que son límite líquido y plástico para determinar sus características propias. Elaboración propia.

Durante la ejecución del ensayo de límite plástico se observaron rigurosamente los procedimientos de la norma técnica MTC E-111. Para asegurar condiciones iniciales consistentes, primero se elaboraron muestras de suelo representativas y se deshidrataban en un horno a temperatura controlada.

Para realizar la prueba se utilizó la porción de tierra que superó completamente el tamiz N°40 (0,425 mm de abertura). Esta muestra se acondicionó con humedad controlada hasta que alcanzó la consistencia ideal para la prueba. Para crear pequeños hilos de unos 3,2 mm de diámetro, el proceso consistió en amasar físicamente partes del material sobre una superficie plana ejerciendo una presión moderada entre la palma de la mano y la base de trabajo.

Se verificó que los hilos formados del material de cantera no presenten anomalías o verificar el comportamiento de este. El punto final del ensayo se consideró alcanzado cuando los hilos comenzaron a fracturarse sin presentar agrietamiento visible,

indicando que el suelo había perdido su plasticidad. En este momento crítico, se selecciona las muestras aleatorias para seguidamente ser secado en estufa y determinar el contenido de humedad, valor que corresponde al límite plástico del material.

### Figura 8

*Realización de ensayos previstos para determinar valores de las muestras*



*Nota.* Se observa las muestras, lista para ser introducidas al horno y verificar el peso después de 24 horas y determinar el contenido de humedad natural de las muestras.

#### Compactación de Proctor Modificado (MTC E 115).

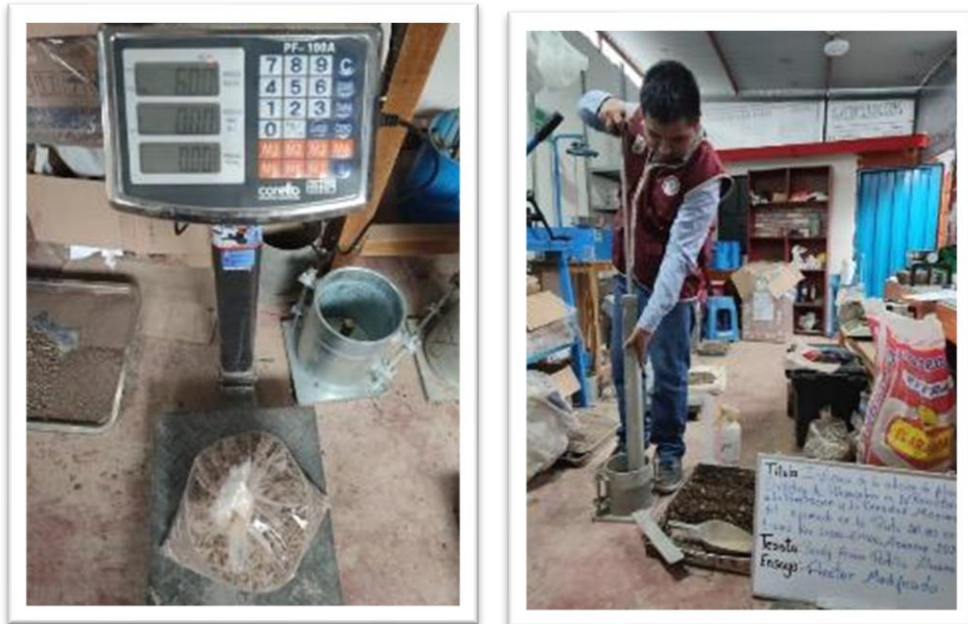
Se eligieron cuatro muestras de suelo para la prueba de compactación Proctor modificada; estas muestras se habían tamizado previamente a través de un tamiz de  $\frac{3}{4}$ " para asegurarse de que el material estaba libre de partículas gruesas que pudieran cambiar el resultado del procedimiento. Cada muestra, que pesaba seis kilos, se guardó en una bolsa separada a la que se añadió la cantidad adecuada de agua para conseguir distintos niveles de humedad.

La compactación se ejecutó bajo estricta adherencia al protocolo establecido por la norma MTC E-115. El procedimiento empleó un pisón de 4.535 kg de masa y un molde cilíndrico de dimensiones normalizadas. Con el objetivo de lograr una aplicación uniforme de la energía de compactación en toda la masa de suelo, cada espécimen se preparó estratificando el material en cinco niveles horizontales consecutivos, sobre cada uno de los cuales se aplicaron, de manera sistemática, 56 impactos del martillo. Para obtener datos

coherentes para la creación de la curva de compactación, este proceso metódico se repitió para cada muestra.

### Figura 9

*Proceso de pesar en estado suelto y compactación de la muestra*



*Nota.* Del grafico se observa el pesaje de la masa del material para poder ejecutar los ensayos de compactación por el método correspondiente según granulometría y verificando los materiales a usar.

**Figura 10**

*Pesaje de muestra después de la respectiva compactación*



*Nota.* Se observa la actividad de pesar la muestra resultante de la compactación para verificar el ensayo de proctor retirando el anillo y determinar las propiedades mecánicas.

#### CBR DE SUELOS

El CBR habitualmente se ejecuta de muestras compactadas utilizando el contenido óptimo hídrico previamente determinado. Su objetivo principal busca cuantificar valores como la resistencia del suelo a la penetración, comparando la presión requerida para lograr una determinada profundidad en la muestra ensayada con la presión que se necesitaría para alcanzar esa misma profundidad en un material estándar, compuesto por grava triturada bien graduada.

Como parámetro adimensional porcentual, el CBR compara el comportamiento mecánico del terreno con un estándar de referencia. Su valor resulta crítico en el diseño de pavimentos al analizar la respuesta estructural de cada nivel (subrasante, sub-base, base granular), garantizando la estabilidad del sistema vial ante solicitudes externas.

En términos técnicos, este parámetro es un indicador clave para determinar el comportamiento mecánico del suelo bajo cargas vehiculares. Su adecuada comprensión permite determinar los grosores precisos para cada estrato del pavimento, asegurando la

longevidad y el funcionamiento de la vía. Además, el valor obtenido sirve como base para seleccionar los materiales más apropiados y definir las necesidades de compactación requeridas en obra.

En la práctica ingenieril, este porcentaje se utiliza como referencia para predecir el desempeño a largo plazo de la estructura vial. Su aplicación permite optimizar los recursos disponibles, asegurando que satisfaga las exigencias técnicas y normativas exigidos para cada tipo de vía, desde caminos rurales hasta carreteras de alto tránsito.

### EXPANSIÓN

En esta fase del ensayo, se inicia colocando un disco de papel filtro en la parte superior del espécimen compacto, seguidamente se coloca una placa perforada con su vástago central. Sobre ella se ubican los pesos y sobrepesos requeridos para replicar las condiciones de carga que se aplican durante la saturación.

A continuación, se incorpora un extensómetro montado sobre un trípode rígido, que permite registrar con precisión las variaciones de altura del espécimen durante el proceso de absorción de agua.

La muestra, ya acondicionada, se introduce cuidadosamente en un recipiente con agua, donde permanece completamente sumergida por un período continuo de cuatro días. En este periodo, se llevan a cabo mediciones diarias de los extensómetros con la finalidad de supervisar las variaciones volumétricas que ocurran hasta llegar a un estado de saturación estable, o sea, cuando las variaciones de expansión se detengan.

Cumplido el tiempo establecido, el molde es movido de la poza para luego escurrir durante uno y cinco minutos, y se elimina el exceso de agua superficial. Luego, se retiran los sobrepesos aplicados y se procede a pesar el espécimen en estado saturado, lo cual permite estimar el recurso hídrico adicionado a la muestra. Finalmente, se puede ejecutar la fase de penetración con el pistón de carga.

## Figura 11

### *Ensayo de expansión de las muestras*



*Nota.* Se observa las muestras sumergidas para determinar la expansión de las muestras por 96 horas con el dial para analizar el comportamiento de las muestras. Elaboración propia.

### PENETRACIÓN

Una vez saturada la muestra y finalizada la etapa de inmersión, se reinstalan los sobrepesos sobre la superficie del espécimen, simulando los esfuerzos que normalmente actúan en los afirmados de las carreteras no pavimentadas.

A continuación, el molde que alberga la muestra se sitúa meticulosamente en la base de carga de la prensa CBR, garantizando que esté correctamente orientado en relación al eje del pistón. El gato hidráulico eleva la plataforma hasta que el pistón se encuentra en contacto con la superficie del suelo, provocando una presión inicial. En este momento, se calibra el indicador de carga y el extensómetro de penetración se ajusta a cero.

Se realiza la aplicación de la carga de penetración mediante el sistema hidráulico de la prensa, manteniendo una velocidad constante de 0.05 pulgadas por minuto (equivalente a 1.27 mm/min), conforme a lo dictado por la reglamentación. En el progreso

del pistón, se anotan las cargas relacionadas con penetraciones concretas de 0.025", 0.050", 0.075", 0.100", 0.300", 0.400" y 0.500".

Una vez concluida la fase de penetración, se procede al retiro del molde de la prensa de carga. A continuación, se extrae una porción representativa del suelo circundante al área afectada por el pistón, el cual es necesario para validar las condiciones de saturación bajo las que fue ejecutado el ensayo.

Finalmente, se calcula el valor del índice CBR para cada molde, comparando las cargas aplicadas a 1 pulgada y 2 pulgadas de penetración con las fuerzas estándar de referencia (1,000 psi para 0.1" y 1,500 psi para 0.2", respectivamente). El valor que resulte más alto entre ambos se considera como el CBR representativo del ensayo.

### **Figura 12**

#### *Resistencia a la penetración*



*Nota.* En la figura se visualiza al tesista junto al asesor verificando el ensayo descrito anteriormente culminado una combinación de F.S.P.

#### **4.6. Análisis de datos**

De acuerdo con el marco metodológico establecido por Levin y Rubin (2004), el proceso de análisis de datos consiste en la aplicación sistemática de métodos estadísticos con el propósito de interpretar información muestral y realizar inferencias válidas sobre una población. En el desarrollo de la presente investigación, este análisis se llevó a cabo mediante la elaboración de representaciones gráficas y tabulares en Microsoft Excel, complementadas con el procesamiento estadístico especializado ejecutado en el software IBM SPSS, herramientas que permitieron un tratamiento riguroso de la información experimental.

#### **4.7. Consideraciones éticas**

La ejecución de esta tesis se rigió por los principios éticos fundamentales y los protocolos establecidos para la tesis, garantizando en todo momento el respeto integral hacia los derechos, la dignidad, la cultura y la autonomía de cada una de las personas que participaron en las etapas de recolección de información y datos.

## **V. Resultados y discusión**

### **- Resultados**

#### ***Evaluación granulométrica***

La caracterización de la distribución de partículas en las muestras de suelo se llevó a cabo mediante la aplicación rigurosa de la norma técnica MTC E-107 para el análisis granulométrico por tamizado. Esta metodología regulada requirió del procesamiento metódico de las muestras utilizando una serie de tamices de abertura calibrada, cumpliendo con todas las prescripciones metrológicas y secuencias operativas que la normativa estipula.

A partir de los resultados cuantitativos generados en el laboratorio, se procedió a la elaboración de la correspondiente curva granulométrica. Este diagrama de distribución se erige como un instrumento de diagnóstico esencial dentro de la mecánica de suelos, ya que posibilita la inferencia de múltiples atributos ingenieriles fundamentales del material, tales como:

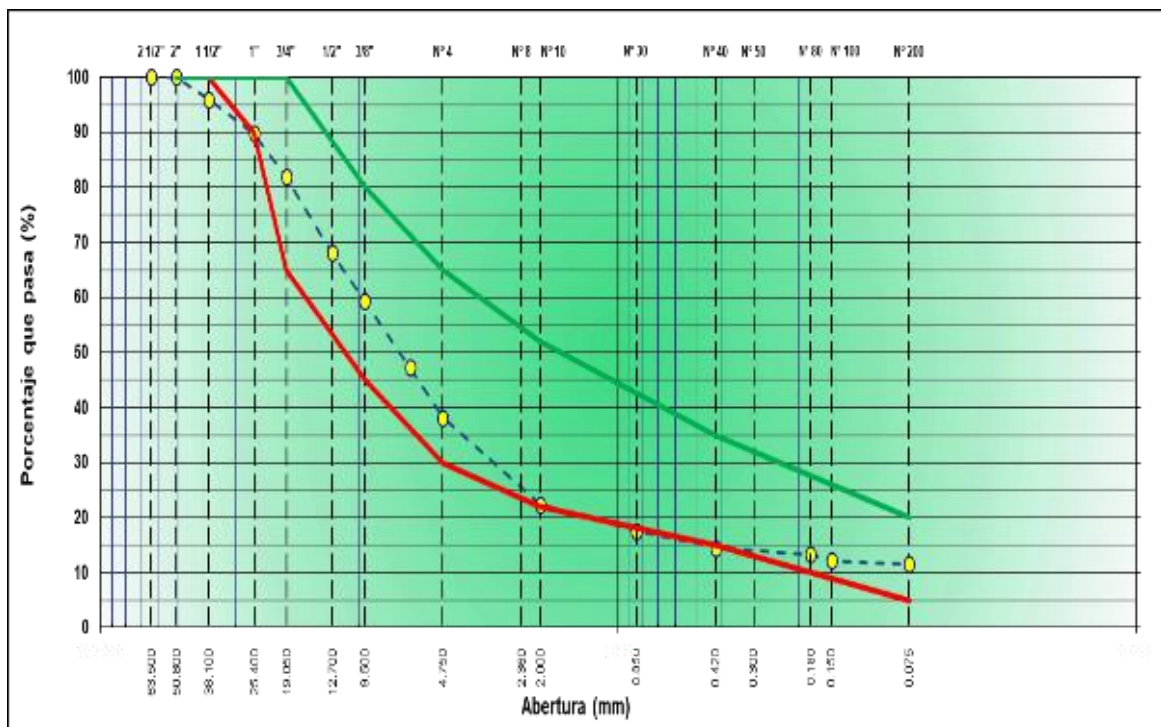
**Tabla 13***Análisis granulométrico de la cantera*

Malla	Abertura(mm)	Masa Retenida (g)	% Retenido parcial	% Retenido acumulado	% que pasa
3"	76.200				<b>100.0</b>
2 1/2"	63.500	0.0	0.0	0.0	<b>100.0</b>
2"	50.800	0.0	0.0	0.0	<b>100.0</b>
1 1/2"	38.100	202.0	4.0	4.0	<b>96.0</b>
1"	25.400	319.0	6.3	10.3	<b>89.7</b>
3/4"	19.050	391.0	7.7	18.1	<b>81.9</b>
5/8"	16.000			18.1	
0.53"	13.200			18.1	
1/2"	12.700	696.0	13.8	31.9	<b>68.1</b>
3/8"	9.500	448.0	8.9	40.7	<b>59.3</b>
0.265"	6.700			40.7	
1/4"	6.350	602.1	11.9	52.7	<b>47.3</b>
# 4	4.750	460.2	9.1	61.8	<b>38.2</b>
# 8	2.360			61.8	
# 10	2.000	800.3	15.9	77.6	<b>22.4</b>
# 16	1.190			77.6	
# 20	0.850	241.1	4.8	82.4	<b>17.6</b>
# 30	0.600			82.4	
# 40	0.420	154.2	3.1	85.5	<b>14.5</b>
# 50	0.300			85.5	
# 80	0.180	64.0	1.3	86.7	<b>13.3</b>
# 100	0.150	52.3	1.0	87.8	<b>12.2</b>
# 200	0.075	31.1	0.6	88.4	<b>11.6</b>
< # 200	FONDO	3.1	0.1	88.5	<b>11.5</b>
<b>TOTAL</b>		<b>4,464.4</b>	<b>88.5</b>		

*Nota.* En el presente cuadro se muestra los pesos retenidos y pesos que pasan por cada malla y su respectivo porcentaje. Adaptable según el (MTC, 2016)

Figura 13

Curva granulométrica de material de cantera



Nota. Del gráfico que se muestra se observa la relación del porcentaje que pasa en función de cada abertura con dichos datos se grafica la curva granulométrica.

Elaboración propia.

#### Contenido de humedad

La determinación del contenido higroscópico del suelo se realizó mediante el método estandarizado establecido en la norma MTC E-108: "Evaluación de la humedad del suelo". Para este objetivo, se escogieron submuestras significativas adquiridas durante la etapa de muestreo en campo, que fueron sometidas a un proceso de desecación en una estufa de laboratorio. Este procedimiento se llevó a cabo bajo condiciones de temperatura reguladas, permaneciendo en  $105 \pm 5$  °C hasta lograr una masa estable, asegurando así la eliminación total del agua libre existente en el material

**Tabla 14***Porcentaje de humedad de la muestra de material de cantera*

Ensayo N.º	Masa total húmeda con tara (g)	Masa total seca con tara (g)	Masa de la tara (g)	Masa de agua (g)	Masa de suelo seco (g)	Contenido de humedad (%)
1	1002.2	918.3	134	83.9	784.3	10.7
2	988.8	907.1	134	81.7	773.1	10.6
3	1005.1	920.5	134	84.6	786.5	10.8
<b>Promedio</b>						<b>10.7</b>

*Nota.* Se muestran los datos para determinar el contenido de humedad teniendo en consideración el promedio de estas luego de 20 horas en el horno. (MTC, 2016).

### **Límites de atterberg**

#### Limite líquido y plástico

Para determinar los parámetros de consistencia que definen el comportamiento plástico de un suelo, se aplicaron los métodos estandarizados descritos en las normas MTC E-110, para el límite líquido (LL), y MTC E-111, para el límite plástico (LP) y el índice de plasticidad (IP). Estos ensayos permiten cuantificar el intervalo específico de contenido de agua en el cual el material es capaz de deformarse plásticamente sin romperse. Dicha información es un criterio diagnóstico fundamental para la caracterización y clasificación geotécnica sistemática de los suelos.

**Tabla 15***Ensayos para determinar el límite líquido*

N.º de recipiente	Masa total húmeda (g)	Masa total seca (g)	Masa del recipiente (g)	Masa de agua (g)	Masa de suelo seco (g)	Humedad (%)	N.º de golpes
2	67.15	61.74	43.11	5.41	18.63	29.04	19
4	67.7	62.33	43.23	5.37	19.1	28.12	29
7	65.73	60.66	42.4	5.07	18.26	27.77	34

*Nota.* Se observa los datos necesarios elaborados en laboratorio en la cuchara de casagrande con sus respectivos golpes necesarios. (MTC, 2016).

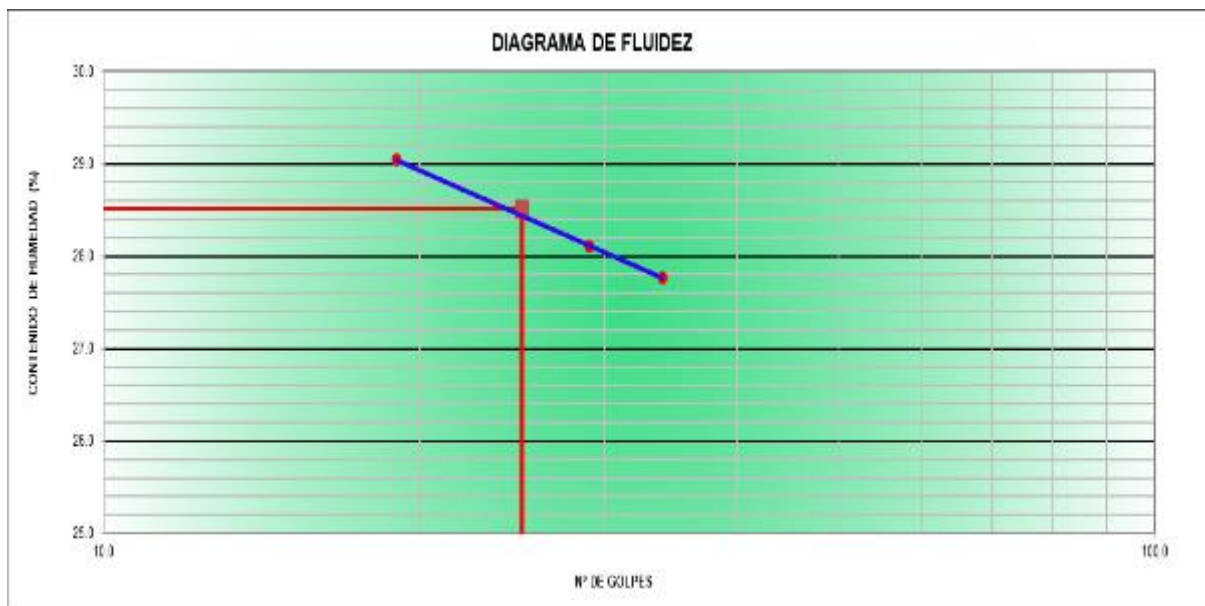
**Tabla 16***Ensayos para determinar el límite plástico*

N.º de recipiente	Masa total húmeda (g)	Masa total seca (g)	Masa del recipiente (g)	Masa de agua (g)	Masa de suelo seco (g)	Humedad (%)
3	48.22	47.66	44.54	0.56	3.12	17.95
5	46.63	46.07	42.86	0.56	3.21	17.45
2	45.85	45.28	43.55	0.57	3.21	17.76

*Nota.* Se observa los datos obtenidos de realizar en laboratorio del porcentaje de humedad dichos ensayos respaldados por la norma técnica peruana (MTC, 2016)

**Figura 14**

*Diagrama de fluides para la muestra del material de cantera*



*Nota.* Se observa el diagrama de fluides obtenido de las pruebas de laboratorio en relación al contenido de humedad y N° de golpes en la cuchara de casagrande.

Elaboración propia.

**Tabla 17**

*Límites de atterberg para determinar el IP*

Descripción	Unidad	Valor
<i>Límite líquido</i>	%	29
<i>Límite plástico</i>	%	18
<i>Índice de plasticidad</i>		11

*Nota.* Se detalla el IP necesario para poder realizar la clasificación de suelos por el método SUCS y AASHTO y verificar según las características mecánicas de las muestras. Elaboración propia.

A. Categorización de suelos

- Tipificación SUCS

GP-GC

- Tipificación AASHTO

A-2-6-(0)

Ensayo de compactación proctor modificado

El programa experimental desarrollado comprendió la realización del Ensayo Proctor Modificado, ejecutado con estricta sujeción a los lineamientos técnicos de la norma MTC E-115. Esta metodología de laboratorio se implementó con el propósito central de establecer los parámetros de compactación ideales para el material en estudio, los cuales son fundamentales para el diseño geotécnico: su densidad máxima en estado seco y el correspondiente contenido de humedad óptimo:

**Tabla 18**

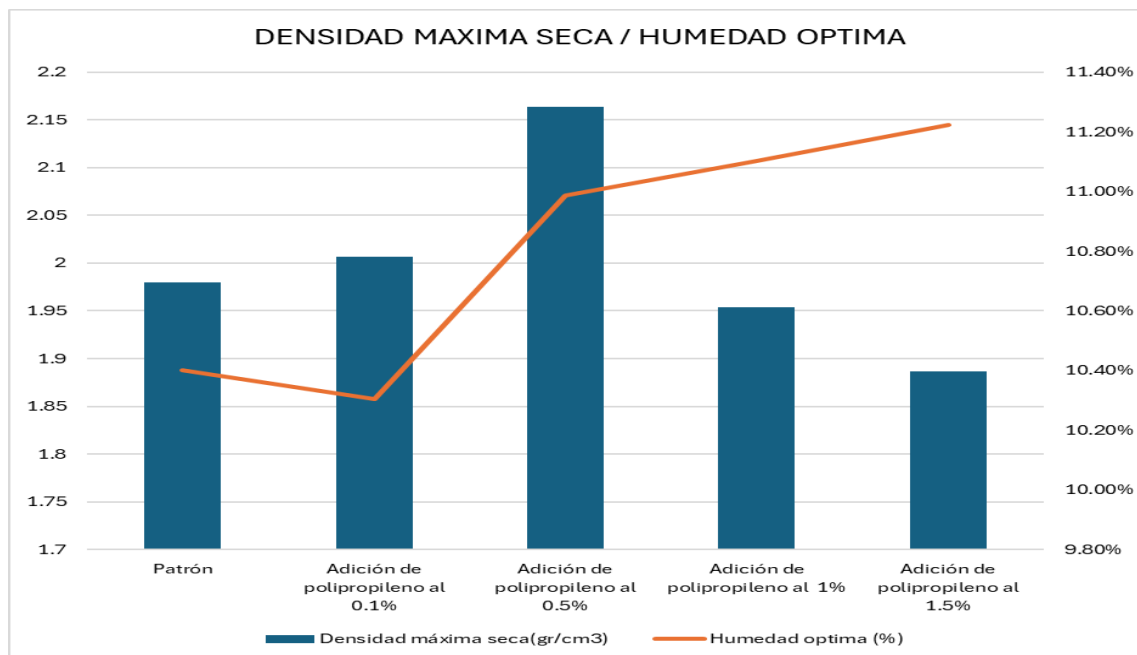
*Resultado de ensayo de proctor modificado para las muestras*

Muestra	M.D.S. (gr/cm <sup>3</sup> )	Humedad optima (%)
Patrón	1.98	10.40%
Adición de polipropileno al 0.1%	2.01	10.30%
Adición de polipropileno al 0.5%	2.16	10.99%
Adición de polipropileno al 1%	1.95	11.10%
Adición de polipropileno al 1.5%	1.89	11.22%

*Nota.* Se detalla la M.D.S. y la humedad requerida para cada combinación de adición de fibra con su respectiva humedad optima por combinación hecha. Elaboración propia.

**Figura 15**

*Resultado M.D.S. por diferente adición de fibra sintética.*



*Nota.* Se observa el comportamiento de M.D.S. y su evolución en adicionar F.S.P. en diferentes porcentajes. Elaboración propia.

### **CBR en laboratorio**

El experimento de CBR (California Bearing Ratio) se realizó de acuerdo con el protocolo establecido en la MTC E-132: "CBR de suelos - Método de laboratorio", con la finalidad de evaluar el rendimiento estructural del afirmado al ser reforzado con diversas proporciones de fibra sintética de polipropileno. El objetivo del ensayo fue determinar la dosificación que brinde la máxima capacidad de soporte del material, lo que permitirá mejorar su rendimiento bajo condiciones de carga, dependiendo del contenido de aditivo añadido.

Para tal fin, se desarrollaron múltiples pruebas experimentales, considerando las siguientes proporciones de adición del material sintético en relación al peso seco del suelo: 0.0% (muestra patrón), 0.1%, 0.5%, 1.0% y 1.5%. Cada combinación fue sujeta a una compactación total de la densidad seca máxima previamente alcanzada a través del

ensayo Proctor modificado. Luego, se realizó el ensayo CBR bajo condiciones reguladas para documentar el valor de resistencia a la penetración asignado a cada dosificación:

- Mezcla de referencia (sin aditivo): muestra patrón sin incorporación de fibra sintética.
- Combinación con 0.1% de fibra: proporción correspondiente al 0.1 % del peso del suelo en estado suelto.
- Combinación 0.5% de fibra: proporción equivalente al 0.5 % respecto al peso del suelo seco.
- Combinación con 1.0% de fibra: adición del 1.0 % del peso del material base antes de compactación.
- Combinación con 1.5% de fibra: tratamiento con 1.5 % del peso del suelo, aplicado en su condición suelta.

**Tabla 19**

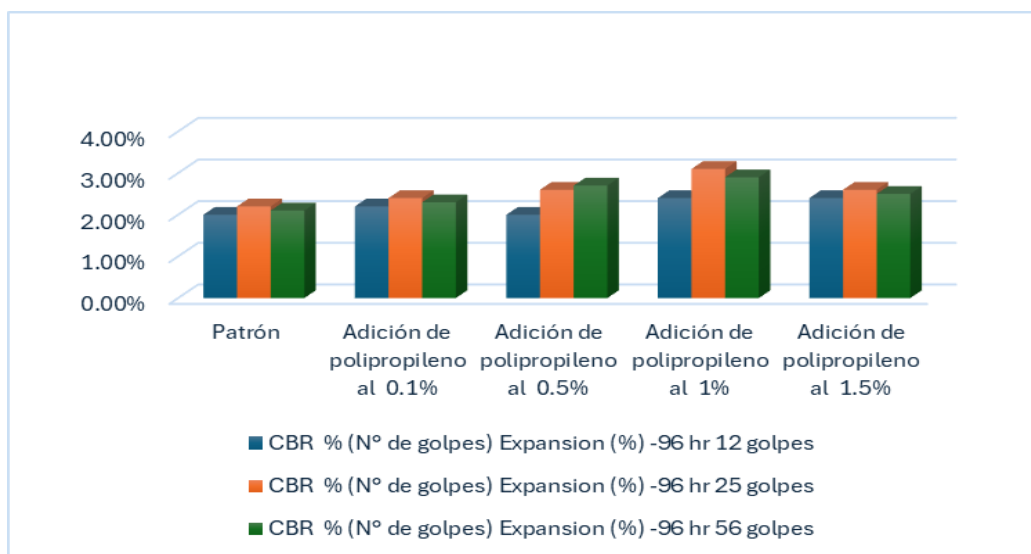
*Resultados de ensayo CBR - expansión (patrón/adicción de polipropileno)*

Muestra	Expansión (%) - 96 horas		
	12 golpes	25 golpes	56 golpes
Referencia (suelo no tratado)	2	2.2	2.1
Suelo + 0.1% F.S.P.	2.2	2.4	2.3
Suelo + 0.5% F.S.P.	2	2.6	2.7
Suelo + 1.0% F.S.P.	2.4	3.1	2.9
Suelo + 1.5% F.S.P.	2.4	2.6	2.5

*Nota.* Se observa el CBR por cada adición de fibra sintética de polipropileno en relación al número de golpes. Elaboración propia.

**Figura 16**

*Resultados de ensayo CBR - expansión (patrón//adición de polipropileno)*



*Nota.* Se observa la expansión de las muestras en un lapso de 96 hrs con su respectiva adición de fibra sintética de polipropileno. Elaboración propia.

Del mismo modo se determinó la resistencia a la penetración por números de golpe de 12, 25 y 56 con relación de 1" y 2" respectivamente

**Tabla 20**

*Resistencia a la penetración por números de golpe*

Muestra	pulg	Resistencia a la penetración por número de golpes kg/cm <sup>2</sup>		
		12 golpes	25 golpes	56 golpes
Patrón	1"	6.1	16.5	29.1
	2"	10.5	28.3	47.2
Adición de polipropileno al 0.1%	1"	9.1	16.2	26
	2"	15.8	26.1	46
Adición de polipropileno al 0.5%	1"	7.3	20.9	36.2
	2"	12.5	35.1	64.3
Adición de polipropileno al 1%	1"	9.5	17.9	26.6
	2"	16.6	31.2	45.2
Adición de polipropileno al 1.5%	1"	8.9	15.4	24.6
	2"	16.6	29.9	40.7

*Nota.* Se observa los resultados del CBR (resistencia a la penetración) por número de golpes de 1" y 2" con los golpes necesarios que son 12, 25 y 56 lo cual sirvió para determinar el porcentaje de CBR. Elaboración propia.

Del mismo modo su equivalente en porcentaje según los parámetros de los afirmados

**Tabla 21**

*Resultados de ensayo CBR – por N° de golpes (patrón/adición de polipropileno)*

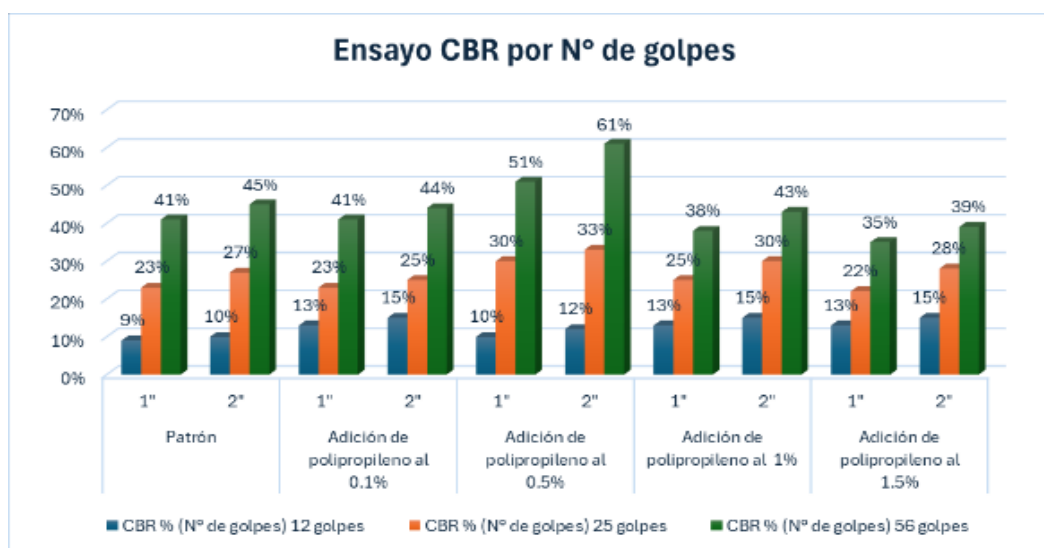
Muestra	pulg	CBR % (N° de golpes)		
		12 golpes	25 golpes	56 golpes
Patrón	1"	9%	23%	41%
	2"	10%	27%	45%
Adición de polipropileno al 0.1%	1"	13%	23%	41%
	2"	15%	25%	44%
Adición de polipropileno al 0.5%	1"	10%	30%	51%
	2"	12%	33%	61%
Adición de polipropileno al 1%	1"	13%	25%	38%
	2"	15%	30%	43%
Adición de polipropileno al 1.5%	1"	13%	22%	35%
	2"	15%	28%	39%

*Nota.* Se observa los resultados del CBR por número de golpes de 1" y 2" con los golpes necesarios que son 12, 25 y 56 lo cual sirvió para determinar el porcentaje de CBR.

Elaboración propia.

**Figura 17**

Resultados de ensayo de CBR - por N° de golpes (patrón/adición de polipropileno)



*Nota.* Se observa el porcentaje del CBR de 1" y 2" por cada adición de fibra sintética de polipropileno en relación al número de golpes. Elaboración propia.

**Tabla 22**

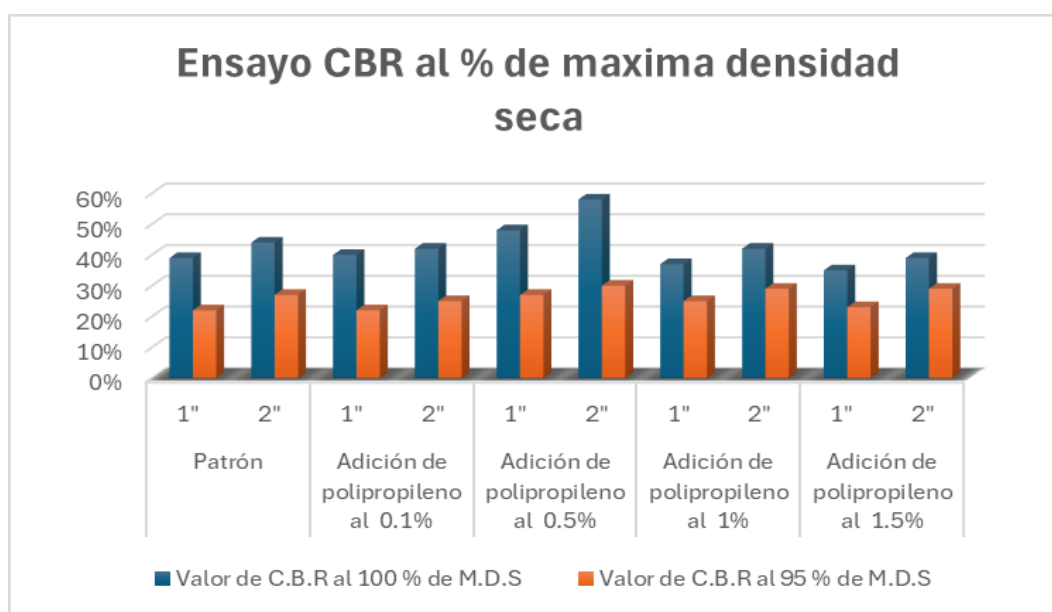
*Resultados de ensayo CBR al 95% y 100% (patrón/adicción de polipropileno)*

Muestra	pulg	Valor de C.B.R.	
		al 100 % de M.D.S.	al 95 % de M.D.S.
Patrón	1"	39%	22%
	2"	44%	27%
Adición de polipropileno al 0.1%	1"	40%	22%
	2"	42%	25%
Adición de polipropileno al 0.5%	1"	48%	27%
	2"	58%	30%
Adición de polipropileno al 1%	1"	37%	25%
	2"	42%	29%
Adición de polipropileno al 1.5%	1"	35%	23%
	2"	39%	29%

*Nota.* Se observa el porcentaje del CBR de 1" y 2" por cada adición de fibra sintética de polipropileno en relación a la M.D.S al 95% y 100%. Elaboración propia.

**Figura 18**

*Ensayo CBR al 100% y 95% de M.D.S.*

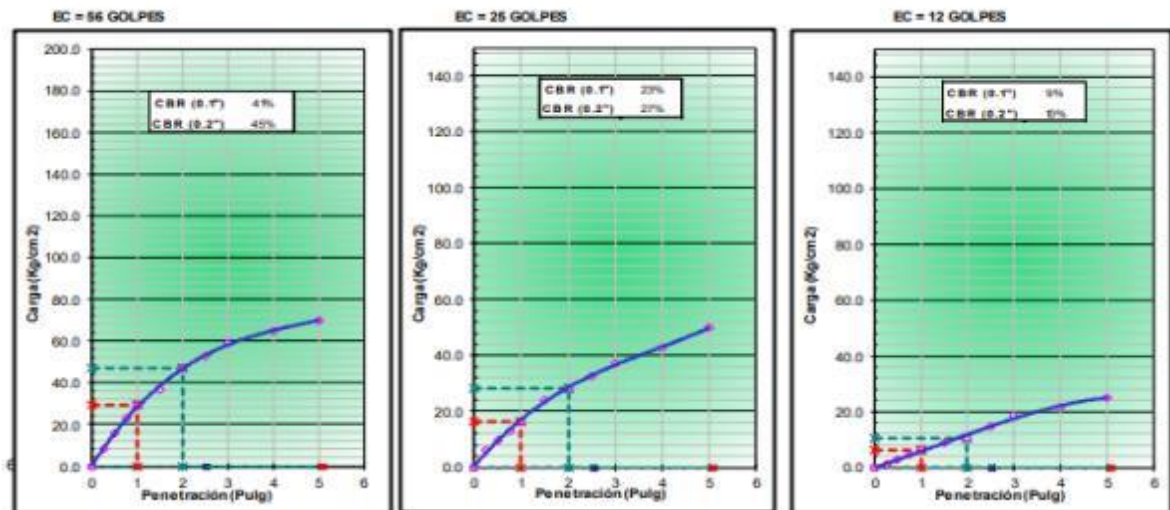


Nota. Resultados del CBR de 1" y 2" al 100% y 95% por cada combinación de adición de fibra sintética de polipropileno. Elaboración propia.

CBR sin adición de fibra (muestra patrón)

**Figura 19**

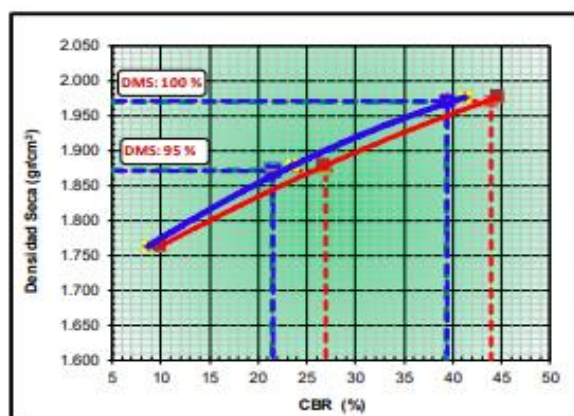
Curva esfuerzo penetración para muestra patrón



Nota. Para la curva de esfuerzo penetración sin adición de fibra, se llevaron a cabo tres pruebas de CBR con 56 golpes, 25 golpes y 12 golpes. Elaboración propia.

**Figura 20**

Recta de CBR-densidad para muestra patrón

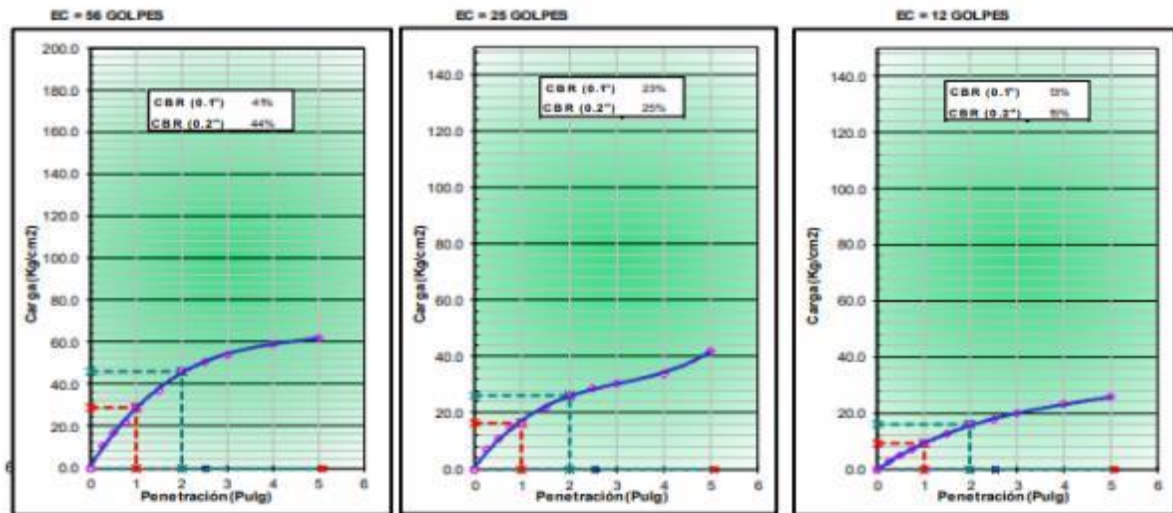


Nota. Del diagrama, se registró un CBR del 22% para una compactación del 95% con densidad seca de 1.872 gr/cm<sup>3</sup>. Asimismo, con un 100% de compactación y densidad seca de 1.97 gr/cm<sup>3</sup>, se obtuvo un CBR del 39%. Elaboración propia.

CBR con dosificación de fibra de al 0.1% del peso de afirmado suelto

**Figura 21**

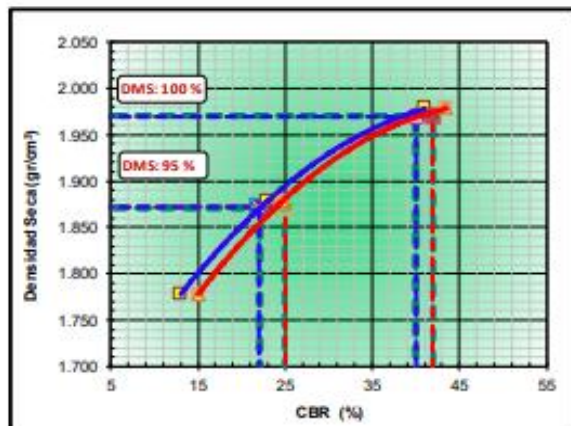
*Curva esfuerzo penetración para 0.5% de fibra*



*Nota.* Se realizaron tres pruebas de CBR para la curva de esfuerzo de penetración del 0.1% con fibra, empleando 56, 25 y 12 golpes. Elaboración propia.

**Figura 22**

*Recta de CBR-densidad para 0.1% de fibra*

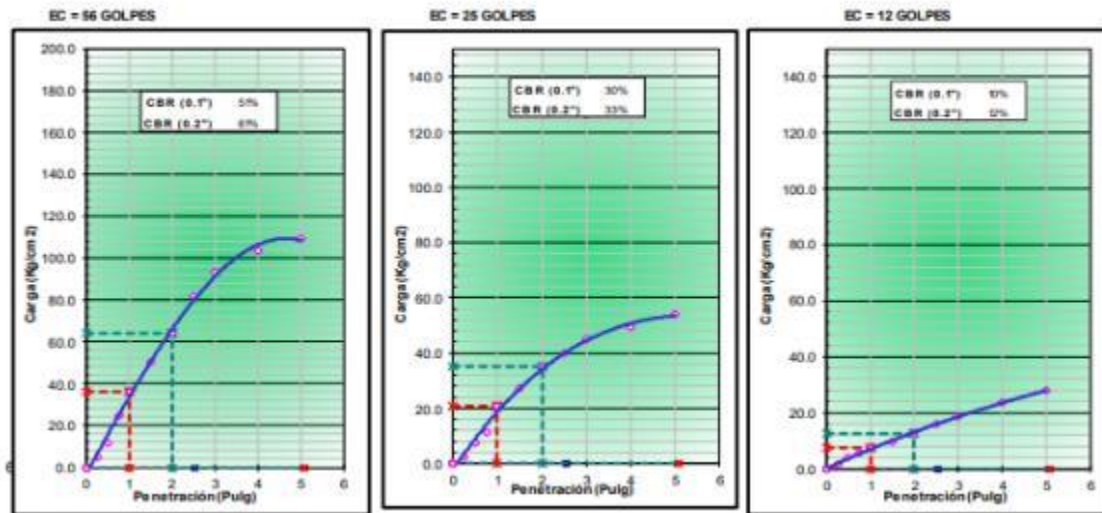


*Nota.* Del diagrama, se registró un CBR del 22% para una compactación del 95% con densidad seca de 1.872 gr/cm<sup>3</sup>. Asimismo, con un 100% de compactación y una densidad seca de 1.97 gr/cm<sup>3</sup>, se alcanzó un CBR del 40%. Elaboración propia.

CBR con dosificación de fibra de al 0.5% del peso de afirmado suelto

**Figura 23**

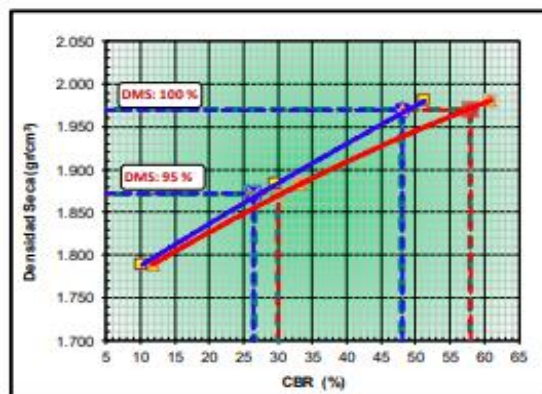
*Curva esfuerzo penetración para 0.5% de fibra*



*Nota.* Se llevaron a cabo tres pruebas de CBR para el caso de curva de esfuerzo penetración del 0.5% con adición de fibra, utilizando 56 golpes, 25 golpes y 12 golpes, tal como se muestra en la figura. Elaboración propia.

**Figura 24**

*Recta de CBR-densidad para 0.5% de fibra*

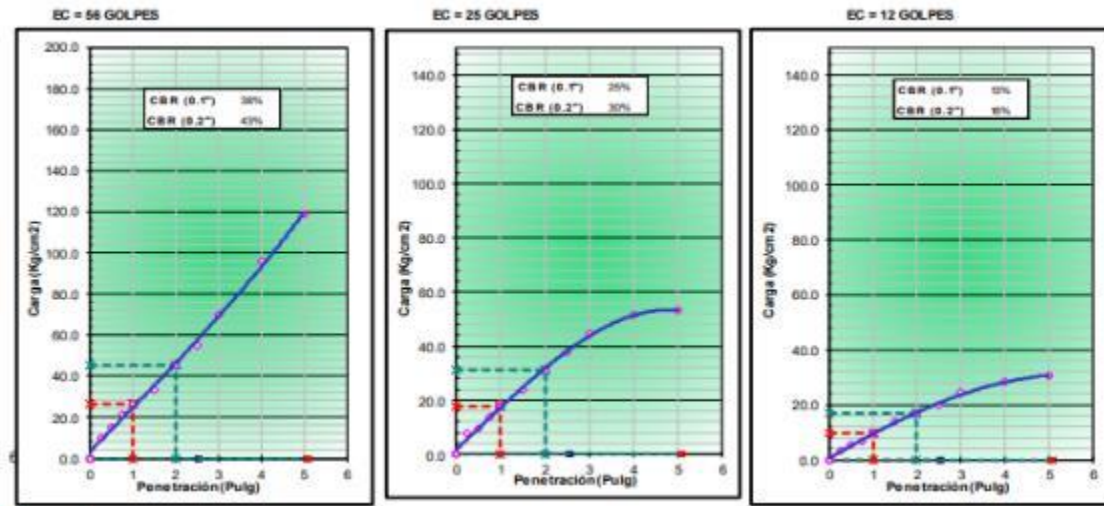


*Nota.* En el diagrama, se registró un CBR del 27% para un grado de compactación del 95% con una densidad seca de 1.872 gr/cm<sup>3</sup>. De igual forma, para un grado de compactación del 100%, con una densidad seca de 1.97 gr/cm<sup>3</sup>, se logró un CBR del 48%. Elaboración propia.

CBR con dosificación de fibra de al 1.0% del peso de afirmado suelto

**Figura 25**

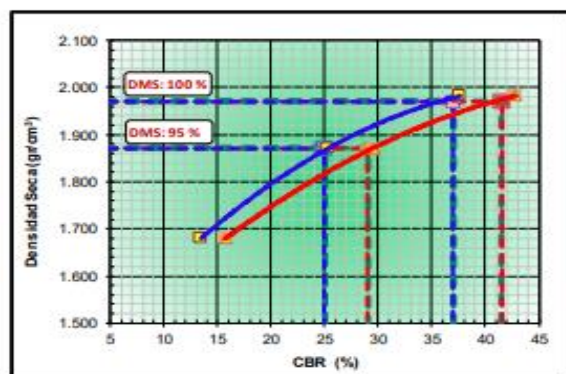
*Curva esfuerzo penetración para 1.0% de fibra*



*Nota.* Para la curva de penetración de esfuerzo del 1.0% con adición de fibra, se llevaron a cabo tres pruebas de CBR con 56 golpes, 25 golpes y 12 golpes, tal como se muestra en la figura. Elaboración propia.

**Figura 26**

*Recta de CBR-densidad para 1.0% de fibra*

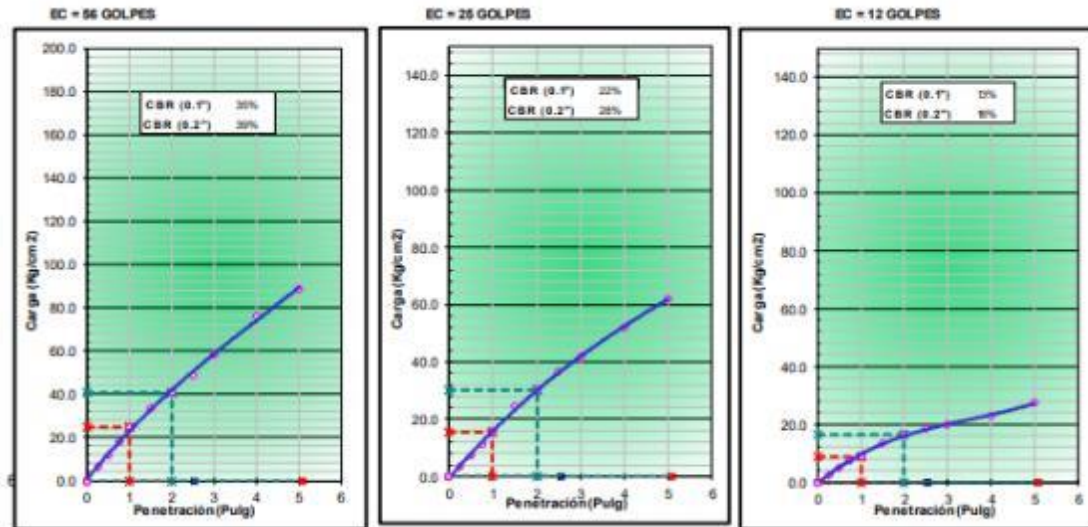


*Nota.* Para un grado de compactación del 95% con una densidad seca de 1.872 gr/cm<sup>3</sup>, se registró un CBR del 25%. De igual forma, para un grado de compactación del 100% con una densidad seca de 1.97 gr/cm<sup>3</sup>, se logró un CBR del 37%. Elaboración propia.

CBR con dosificación de fibra de al 1.5% del peso de afirmado suelto

**Figura 27**

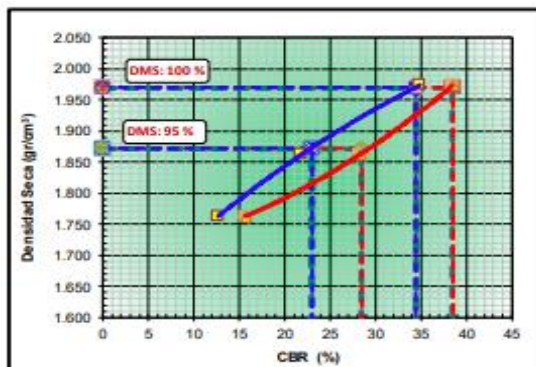
Curva esfuerzo penetración para 1.5% de fibra



*Nota.* Para la curva de penetración del esfuerzo con 1.5% de fibra añadida, se llevaron a cabo tres pruebas de CBR con 56 golpes, 25 golpes y 12 golpes, tal como se muestra en la figura. Elaboración propia.

**Figura 28**

Recta de CBR-densidad para 1.5% de fibra



*Nota.* En el diagrama, se registró un CBR del 25% para un nivel de compactación del 95% con una densidad seca de 1.872 g/cm<sup>3</sup>. Asimismo, con un grado de compactación del 100% y una densidad seca de 1.97 gr/cm<sup>3</sup>, se obtuvo un CBR del 35%. Elaboración propia.

## - Discusión

Los hallazgos de este estudio permiten sostener que la adición de fibra sintética de polipropileno tiene un impacto positivo en las características mecánicas del afirmado, particularmente en la resistencia a la penetración y la densidad seca máxima, cuando se emplean dosificaciones del 0.1% y 0.5% en relación al peso del suelo. Sin embargo, al superar dicho umbral, es decir, con contenidos del 1.0% y 1.5% se observa una disminución progresiva en ambas propiedades.

Mamani y Lazarte reportaron aumentos graduales en el CBR con dosificaciones de 0.10%, 0.5% y 1.0% (14.03%, 18.90% y 24.23%, respectivamente), pero una caída drástica del 29.32% con 2.0%. Sus hallazgos coinciden con los de este estudio en la identificación de una dosificación óptima alrededor del 0.5%, donde la fibra actúa como refuerzo efectivo. Sin embargo, en el presente trabajo, la dosificación del 1.0% ya mostró un efecto detrimental, lo que sugiere que el material granular de la ruta AP 103 podría ser más sensible a incrementos en el contenido de fibra. Esta diferencia podría atribuirse a variaciones en la composición granulométrica del material de base o en las condiciones de compactación.

La mejora con 0.5% se explica por la formación de una red tridimensional de fibras que entrelaza las partículas granulares, aumentando la cohesión aparente y distribuyendo eficientemente los esfuerzos de corte. En cambio, con dosificaciones superiores al 0.5%, el exceso de fibra actúa como un material flexible que impide el contacto partícula-partícula, creando macro-vacíos y reduciendo la rigidez del conjunto. Esto coincide con la observación de Mamani y Lazarte sobre la pérdida de cohesión con dosis excesivas.

Arrelucé y Solís, en su estudio con suelos arcillosos, observaron una disminución continua en la densidad seca (de 1.82 a 1.72 g/cm<sup>3</sup>) conforme aumentaba el contenido de fibra. Este estudio corrobora ese comportamiento para dosificaciones altas (1.0% y 1.5%), pero identifica un incremento en la densidad con dosis bajas (0.1% y 0.5%). La discrepancia en dosis bajas podría deberse a la naturaleza del material: en suelos granulares (como el afirmado de la AP 103), una cantidad óptima de fibra puede llenar vacíos y mejorar la

compactación, mientras que en arcillas, la fibra podría interferir con la cohesión natural desde dosis más bajas.

Con 0.5% de fibra, se logra una distribución homogénea que permite una reorganización eficaz de las partículas durante la compactación, llenando espacios vacíos y aumentando la densidad. Por el contrario, con 1.0% y 1.5%, el exceso de fibra genera una estructura esponjosa que impide la compactación adecuada, creando vacíos y reduciendo la densidad. Esto se alinea con los hallazgos de Arrelucé y Solís, donde el aumento de fibra llevó a una menor compactabilidad.

En conjunto, los resultados de este estudio son consistentes con la literatura previa, pero destacan la importancia de caracterizar el material de base para determinar la dosificación óptima. Tanto Mamani y Lazarte (2019) como Arrelucé y Solís (2021) apoyan la noción de que el refuerzo con fibra sintética tiene un umbral crítico, del cual las propiedades mecánicas se ven comprometidas. La novedad de este trabajo radica en cuantificar este umbral para el material granular de la ruta AP 103, estableciendo que el 0.5% es la dosificación más efectiva para mejorar simultáneamente la resistencia y la densidad.

### **Contraste estadístico de variables**

- **Hipótesis N°1**

**Hi:** La adición de fibra sintética de polipropileno influye significativamente en el CBR al 0.1" del afirmado en la ruta AP 103, tramo km 2+500 – km 6+400, Abancay 2023.

**Ho:** La adición de fibra sintética de polipropileno no influye significativamente en el CBR al 0.1" del afirmado en la ruta AP 103, tramo km 2+500 – km 6+400, Abancay 2023.

En este análisis, se empleó el test estadístico ANOVA (Análisis de Varianza) para evaluar la hipótesis, dado que hay más de dos muestras independientes. En este caso específico, se examinaron cuatro grupos de datos vinculados a distintos porcentajes de incorporación de fibra sintética de polipropileno. Esta herramienta estadística posibilita establecer si hay variaciones importantes en las medias de las propiedades evaluadas

(densidad seca máxima y CBR) entre las diferentes dosificaciones, bajo un nivel de significancia establecido con anterioridad.

**Tabla 23**

*Resumen de datos para la prueba de hipótesis N° 01*

Adición de polipropileno (%)	CBR al 95%	CBR al 100%
0	20 %	38 %
0	22 %	39 %
0	24 %	40 %
0.1	22 %	40 %
0.1	23 %	39 %
0.1	21 %	41 %
0.5	29 %	46 %
0.5	25 %	48 %
0.5	27 %	50 %
1	24 %	36 %
1	25 %	37 %
1	26 %	38 %
1.5	23 %	35 %
1.5	23 %	34 %
1.5	23 %	36 %

*Nota.* CBR al 95% Y 100% por cada combinación de adición de fibra sintética de polipropileno la cual se tomará en consideración el 100%. Elaboración propia.

El análisis de varianza (ANOVA) se aplicó como método estadístico para determinar si existían diferencias significativas en los valores del Índice CBR correspondientes al 100% de la densidad seca máxima. Este análisis se configuró con un umbral de significación estadística ( $\alpha$ ) de 0.05. La interpretación de los datos se fundamentó en la evaluación de los resultados de la prueba frente a los siguientes criterios interpretativos:

- Si se determina que el valor de F obtenido supera al valor crítico de F, se concluye que existen diferencias estadísticamente significativas entre los grupos, por lo tanto, se rechaza la hipótesis nula.
- En cambio, si el valor de F es inferior al valor crítico, no se observan variaciones significativas, lo que conduce a aceptar la hipótesis nula.

Asimismo:

- Si se obtiene un valor p inferior a 0.05, se considera que los resultados son significativos, descartando así la hipótesis nula.
- Si el coeficiente p supera los 0.05, no se detecta significancia estadística, por lo que se asume la hipótesis de cero.

a) Evaluación de uniformidad en la varianza de Levene

**Tabla 24**

*Prueba de Levene para la homogeneidad de varianzas en la variable densidad*

Método de cálculo	Estadístico de Levene	gl1	gl2	Sig.
Basado en la media	1.4	4	10	0.303
Basado en la mediana	1.4	4	10	0.303
Basado en la mediana con gl ajustado	1.4	4	5.882	0.34
Basado en la media recortada	1.4	4	10	0.303

*Nota.* Se puede observar la prueba de homogeneidad de varianzas para ver si tienen la misma distribución en gl1 y gl2 en el estadístico de Levene. Software SPSS;

- Prueba basada en la media:
  - Estadístico de Levene: 1.400
  - Sig.=0.303

- Interpretación: Como  $p=0.303>0.05$ , no se rechaza  $H_0$ . Esto sugiere que las varianzas entre los grupos son homogéneas cuando se evalúa en función de la media.
- Prueba basada en la mediana:
  - Estadístico de Levene: 1.400
  - Sig.=0.303
  - Interpretación: Como  $p=0.303>0.05$ , no se rechaza  $H_0$ . Esto indica que no hay evidencia suficiente para afirmar que las varianzas sean diferentes en este caso.
- Prueba basada en la mediana con gl ajustados:
  - Estadístico de Levene: 1.400
  - Sig.=0.340
  - Interpretación: Como  $p=0.340>0.05$ , tampoco se rechaza  $H_0$ . Esto sugiere que las varianzas son homogéneas en este enfoque.
- Prueba basada en la media recortada:
  - Estadístico de Levene: 1.400
  - Sig.=0.303
  - Interpretación: Como  $p=0.303>0.05$ , no se rechaza  $H_0$ . Esto sugiere que hay homogeneidad de varianzas bajo este enfoque

b) Prueba de ANOVA

**Tabla 25**

*Prueba estadística de ANOVA para el CBR 100%*

Fuente de variación	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Entre grupos	56.4	4	14.1	7.05	0.006
Dentro de los grupos	20	10	2		
Total	76.4	14			

*Nota.* datos proporcionados del programa de la suma de cuadrados y su media cuadrática necesarios para determinar la prueba de hipótesis. Software SPSS

Resultado:

- Los resultados del análisis de varianza indican un rechazo de la hipótesis nula, dado que el valor p obtenido es inferior al nivel de significancia predefinido ( $\alpha = 0.05$ ). Este hallazgo evidencia la existencia de variaciones estadísticamente significativas en la respuesta de los grupos bajo estudio. En consecuencia, se infiere que la incorporación de fibra de polipropileno tiene una influencia significativa sobre el valor del CBR en el afirmado del tramo correspondiente al kilómetro 2 500+000 al 6 400+000 de la carretera AP-103, en la provincia de Abancay.
- c) Comparación múltiple con el método HSD de Tukey

**Tabla 26**

*Comparación múltiple con el método HSD de tukey para CBR 100%*

Comparaciones múltiples						
Variable dependiente: densidad						
HSD Tukey						
(I) % de Adición	(J) % de Adición	Diferencia de medias (I-J)	Desv. Error	Sig.	Intervalo de confianza al 95%	
					Límite inferior	Límite superior
00	.10	0.000	1.15470	1.000	-3.8002	3.8002
	.50	-5.000	1.15470	.010	-8.8002	-1.1998
	1.00	-3.000	1.15470	.144	-6.8002	0.8002
	1.50	-1.000	1.15470	.903	-4.8002	2.8002
.10	.00	0.000	1.15470	1.000	-3.8002	3.8002
	.50	-5.000	1.15470	.010	-8.8002	-1.1998
	1.00	-3.000	1.15470	.144	-6.8002	0.8002
	1.50	-1.000	1.15470	.903	-4.8002	2.8002
.50	.00	5.000	1.15470	.010	1.1998	8.8002
	.10	5.000	1.15470	.010	1.1998	8.8002
	1.00	2.000	1.15470	.458	-1.8002	5.8002
	1.50	4.000	1.15470	.038	0.1998	7.8002
1.00	.00	3.000	1.15470	.144	-0.8002	6.8002
	.10	3.000	1.15470	.144	-0.8002	6.8002
	.50	-2.000	1.15470	.458	-5.8002	1.8002
	1.50	2.000	1.15470	.458	-1.8002	5.8002
1.50	.00	1.000	1.15470	.903	-2.8002	4.8002
	.10	1.000	1.15470	.903	-2.8002	4.8002
	.50	-4.000	1.15470	.038	-7.8002	-0.1998
	1.00	-2.000	1.15470	.458	-5.8002	1.8002

Nota. Se detalla la comparación múltiple de las diferentes adiciones fibra sintética de polipropileno con un intervalo de confianza del 95%. Software SPSS

Resultado:

Al llevar a cabo las comparaciones, nos centraremos en la muestra de referencia y las adiciones correspondientes:

- Patrón vs 0.1%: se registró un valor de  $p = 1.000$ , superior a 0.05, lo que señala que la adición de 0.1% de fibra sintética no genera una variación estadísticamente relevante en la densidad del afirmado en comparación con el material sin refuerzo.
- Patrón vs 0.5%: el resultado obtenido fue  $p = 0.001$ , inferior al nivel de significancia de 0.05, por lo que se deduce que la adición de 0.5% de fibra de polipropileno produce un impacto relevante en el aumento de la densidad seca máxima del afirmado.
- Patrón vs 1.0%: cuando  $p = 0.144$ , que supera 0.05, se establece que la adición de 1.0% de fibra no genera una variación estadísticamente relevante en relación con la muestra sin aditivo.
- Patrón vs 1.5%: el estudio mostró  $p = 0.903$ , igualmente superior a 0.05, lo que señala que la utilización de 1.5% de fibra sintética no ejerce un efecto relevante en la densidad seca máxima del material de declarado.

- **Hipótesis N°2**

**Hi:** la adición de fibra sintética de polipropileno influye significativamente en la densidad máxima del afirmado en la ruta AP 103, tramo km 2+500 – km 6+400, Abancay 2023.

**Ho:** la adición de fibra sintética de polipropileno no influye significativamente en la densidad máxima del afirmado en la ruta AP 103, tramo km 2+500 – km 6+400, Abancay 2023.

Asimismo, para el proceso de contrastación estadística de la hipótesis, se aplicó la técnica de análisis de varianza (ANOVA), ya que el estudio contempla más de dos grupos de comparación independientes. En este caso específico, se evaluaron cuatro muestras con distintas proporciones de fibra sintética de polipropileno, lo que justifica el uso de esta herramienta estadística. El ANOVA ayuda a identificar diferencias significativas en las medias de los resultados (densidad seca máxima y CBR), asociadas a los niveles de adición del aditivo.

**Tabla 27**

*Resumen de datos para la prueba de hipótesis N° 02*

Adición de polipropileno (%)	Densidad máxima seca(gr/cm <sup>3</sup> )
0	1.97
0	1.99
0	1.98
0.1	1.99
0.1	2.01
0.1	2.02
0.5	2.15
0.5	2.1
0.5	2.24
1	1.95
1	1.95
1	1.96
1.5	1.85
1.5	1.9
1.5	1.91

*Nota.* Se muestra los datos de la densidad máxima seca para las distintas clases de adición dichos valores serán usados para determinar la prueba de hipótesis. Elaboración propia.

Se utilizó un grado de significancia del 5% ( $\alpha = 0.05$ ), que equivale a un 95% de confianza estadística. La evaluación de los resultados logrados mediante la prueba ANOVA se llevó a cabo basándose en los siguientes criterios:

- Si el estadístico F calculado supera el valor crítico de F, se considera que existen diferencias significativas entre los grupos, lo que lleva a rechazar la hipótesis nula.

- Por otro lado, si el valor de F es menor al valor crítico, no se observan diferencias relevantes, por lo que se asume la hipótesis nula.

De forma adicional:

- Si p es inferior a 0.05, se asume que hay significación estadística, lo que implica el rechazo de la hipótesis nula.
- Si la p es superior a 0.05, no se detecta una diferencia relevante entre los grupos, por lo que se asume la hipótesis de cero.

d) ensayo de uniformidad de las varianzas de Levene

**Tabla 28**

*Prueba de Levene para la homogeneidad de varianzas en la variable M.D.S.*

Método de cálculo	Estadístico de Levene	gl1	gl2	Sig.
Basado en la media	3.902	4	10	.037
Basado en la mediana	1.483	4	10	.279
Basado en la mediana con gl ajustado	1.483	4	3.628	.367
Basado en la media recortada	3.696	4	10	.043

*Nota.* se observa la varianza y nivel de significancia de gl1 y gl2 en la estadística de Levene para determinar la prueba estadística. Software SPSS;

- Prueba paramétrica en función de la media:
  - Estadístico de Levene fue: 3.902
  - Sig.=0.037
  - Interpretación: Como  $p=0.037 < 0.05$ , se rechaza  $H_0$ . Esto sugiere que las varianzas entre los grupos no son homogéneas cuando se evalúa en función de la media.
- Prueba paramétrica en función de la mediana:
  - Estadístico de Levene fue: 1.483
  - Sig.=0.279

- Interpretación: Como  $p=0.279>0.05$ , no se rechaza  $H_0$ . Esto indica que no hay evidencia suficiente para afirmar que las varianzas sean diferentes en este caso.
- Prueba basada en la mediana con gl ajustados:
  - Estadístico de Levene: 1.483
  - Sig.=0.367
  - Interpretación: Como  $p=0.367>0.05$ , tampoco se rechaza  $H_0$ . Esto sugiere que las varianzas son homogéneas en este enfoque.
- Prueba basada en la media recortada:
  - Estadístico de Levene: 3.696
  - Sig.=0.043
  - Interpretación: Como  $p=0.043<0.05$ , se rechaza  $H_0$ . Esto sugiere que no hay homogeneidad de varianzas bajo este enfoque

e) Prueba de ANOVA

**Tabla 29**

*Análisis de varianza (ANOVA) para la variable M.D.S.*

Fuente de variación	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Entre grupos	0.125	4	0.031	23.979	0
Dentro de los grupos	0.013	10	0.001		
Total	0.138	14			

*Nota.* Se realizará la prueba estadística de ANOVA con sus respectivos análisis a la densidad seca y verificar su nivel de significancia. Software SPSS.

Resultado:

- El análisis estadístico inferencial arrojó un valor p inferior al nivel de significancia establecido de 0.05, fundamentando así el rechazo de la

hipótesis nula. Este resultado confirma que la adición de fibra de polipropileno genera una modificación estadísticamente significativa en la densidad seca máxima alcanzable del afirmado, un efecto particularmente observable en el tramo comprendido entre los kilómetros 2+500 y 6+400 de la carretera AP-103).

- f) Diversas comparaciones con el método HSD de Tukey. múltiple con el método HSD de Tukey

**Tabla 30**

Comparación múltiple con el método HSD de tukey

Comparaciones múltiples						
Variable dependiente: Densidad máxima seca						
HSD Tukey						
(I) % de Adición	(J) % de Adición	Diferencia de medias (I-J)	Desv. Error	Sig.	Intervalo de confianza al 95%	
					Límite inferior	Límite superior
.00	.10	-.026667	.029439	.888	-.12355	.07022
	.50	-.183333*	.029439	.001	-.28022	-.08645
	1.00	.020000	.029439	.957	-.07689	.11689
	1.50	.093333	.029439	.060	-.00355	.19022
.10	.00	.026667	.029439	.888	-.07022	.12355
	.50	-.156667*	.029439	.002	-.25355	-.05978
	1.00	.046667	.029439	.537	-.05022	.14355
	1.50	.120000*	.029439	.015	.02311	.21689
.50	.00	.183333*	.029439	.001	.08645	.28022
	.10	.156667*	.029439	.002	.05978	.25355
	1.00	.203333*	.029439	.000	.10645	.30022
	1.50	.276667*	.029439	.000	.17978	.37355
1.00	.00	-.020000	.029439	.957	-.11689	.07689
	.10	-.046667	.029439	.537	-.14355	.05022
	.50	-.203333*	.029439	.000	-.30022	-.10645
	1.50	.073333	.029439	.169	-.02355	.17022
1.50	.00	-.093333	.029439	.060	-.19022	.00355
	.10	-.120000*	.029439	.015	-.21689	-.02311
	.50	-.276667*	.029439	.000	-.37355	-.17978
	1.00	-.073333	.029439	.169	-.17022	.02355

\*. La diferencia de medias es significativa en el nivel 0.05.

Nota. Se observa la comparación múltiple entre las diferentes combinaciones de adición de fibra sintética de polipropileno con un intervalo de confianza del 95%. *Software SPSS*

Resultado:

Al realizar las comparaciones nos enfocaremos entre la muestra patrón y las adiciones respectivamente:

- Patrón vs 0.1%: se registró un valor de  $p = 0.888$ , que sobrepasa el límite de 0.05, lo que señala que la adición de 0.1% de fibra no ejerce un impacto relevante en la densidad del afirmado en comparación con la muestra sin refuerzo.
- Patrón vs 0.5%: el valor de  $p = 0.001$  es inferior a 0.05, por lo que se deduce que la adición de 0.5% de fibra artificial tiene un impacto notable en el aumento de la densidad seca máxima del material.
- Patrón vs 1.0%: con un valor de  $p = 0.957$ , el estudio no muestra alteraciones significativas, por lo que la adición de 1.0% de fibra no produce una variación de relevancia estadística.
- Patrón vs 1.5%: se obtuvo un valor de  $p = 0.060$ , el cual es ligeramente superior al límite de significancia, por lo que la adición de 1.5% de fibra no se considera estadísticamente significativa, aunque se aproxima al umbral establecido.

## VI. Conclusiones

Según los ensayos efectuados y el evaluación del efecto de la inclusión de fibra sintética de polipropileno en el material de afirmado en la ruta AP 103, se deduce:

1. Se determinó que la incorporación de fibra sintética de polipropileno al material de cantera para el afirmado de la ruta AP 103 tiene un impacto significativo al añadir dicha fibra, positivamente en porcentajes del 0.5%, y de una leve variación en la adición de 0.1% y fue decreciendo en porcentajes mayores a estos con respecto a los resultados obtenido en el ensayo de C.B.R para evaluar la resistencia a la penetración y el impacto en la relación de máxima densidad seca con la humedad óptima con adiciones mejoradas del 0.1% y 0.5%, y leve reducción de valores para las adiciones de 1% y 1.5%. según los resultados obtenido se entiende la incorporación del 0.5% de fibra sintética de polipropileno ofrece los mejores resultados en la mejora de propiedades del afirmado, constituyendo una alternativa viable.
2. Se analizó el impacto de incorporar fibra sintética de polipropileno en el material de cantera destinado al afirmado de la ruta AP 103, en la resistencia a la penetración en base al valor de C.B.R (56 golpes), donde se observa que la muestra patrón tiene un 29.1 kg/cm<sup>2</sup>, adicionar 0.1% de fibra de polipropileno se obtiene 26 kg/cm<sup>2</sup> en cual genera un demerito de 3.1 kg/cm<sup>2</sup> con respecto a la muestra patrón, para la adición de 0.5% se obtiene 36.2 kg/cm<sup>2</sup> teniendo una mejora del 7.1 kg/cm<sup>2</sup> en relación a la muestra patrón, para la adición de 1% se obtiene 26.6 kg/cm<sup>2</sup> teniendo un demerito del 2.5 kg/cm<sup>2</sup> y para la adición del 1.5% se obtienen 24.6 kg/cm<sup>2</sup> teniendo un valor desfavorable reduciendo 4.5 kg/cm<sup>2</sup>.
3. Se analizó el impacto de incorporar fibra sintética de polipropileno en el material de cantera para el afirmado de la ruta AP 103; en la relación de máxima densidad seca y humedad óptima, se nota que considerando el valor de la muestra patrón de 1.98 gr/cm<sup>3</sup>, donde tenemos que la adición de fibra sintética

de polipropileno mejora para la adición de 0.1% (2.01 gr/cm<sup>3</sup>) el cual representa el 101.5 % respecto al de la muestra patrón. Para la adición de 0.5% (2.16 gr/cm<sup>3</sup>) el cual representa el 109.1 % respecto al de la muestra patrón; por otro lado, las la adición de esta fibra reduce los valores con las adiciones de 1% (1.95 gr/cm<sup>3</sup>) el cual representa el 98.5 % respecto al de la muestra patrón y el 1.5% (1.89 gr/cm<sup>3</sup>) el cual representa el 98.5 % respecto al de la muestra patrón.

## **VII. Recomendaciones**

1. Se aconseja la utilización de fibra sintética de polipropileno para optimizar el afirmado en las distintas vías afirmadas, además de su aplicación en varios componentes de la estructura del suelo de una vía, teniendo en cuenta que el material de cantera satisfaga los requisitos básicos que establece la normativa peruana.
2. Se recomienda usar fibra sintética de polipropileno para mejorar las propiedades mecánicas del afirmado, buscando extender la durabilidad de las carreteras no pavimentadas, además de disminuir los gastos de mantenimiento al prolongar su duración.
3. Se recomienda para futuras tesis considerar el uso de materiales que funcionen como aditivos para mejorar el diseño y ejecutar proyectos viales donde se requieran materiales de bajo costo y sostenibles, en especial en regiones con condiciones climáticas adversas

## VIII. Referencias

Aguirre Fuelantala, G. A., y Fuel Valencia, J. F. (2020). *Mejoramiento de las propiedades mecánicas de suelos finos mediante la adición de residuos provenientes de fibras vegetales*. [tesis de pregrado, Universidad Militar Nueva Granada]. Repositorio Institucional. <https://repository.umng.edu.co/server/api/core/bitstreams/ab3a368c-d86f-46cf-bd8c-7fc264e6b021/content>

Arrelucé Montenegro, S., y Solís Larrauri, G. L. (2021). *Incorporación de fibras de polipropileno como método de reforzamiento de suelos arcillosos en Palian - Huancayo*. [Tesis de pregrado, Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas]. Repositorio institucional. [https://repositorioacademico.upc.edu.pe/bitstream/handle/10757/656164/Arrelucé\\_MS.pdf?sequence=3&isAllowed=y](https://repositorioacademico.upc.edu.pe/bitstream/handle/10757/656164/Arrelucé_MS.pdf?sequence=3&isAllowed=y)

ASTM International. (2021). *Standard test method for CBR (California Bearing Ratio) of laboratory-compacted soils (ASTM D1883-21)*. <https://www.astm.org/d1883-21.html>

ASTM International. (2021). *Standard test methods for laboratory compaction characteristics of soil using standard effort (ASTM D698-12)*. <https://www.astm.org/d0698-12r21.html>

ASTM International. (2021). *tandard test methods for laboratory compaction characteristics of soil using modified effort (56,000 ft-lbf/ft<sup>3</sup> (2,700 kN-m/m<sup>3</sup>))*. ASTM D1557-21. <https://www.astm.org/d1557.html>

Cabrejos García, J. J., y Murga Rivera, J. W. (2021). *Estabilización de afirmados con residuos de lubricantes vehicular en el camino rural del Centro Poblado de Cambio Puente – Chimbote*. [Tesis de pregrado, Universidad nacional del santa]. Archivo digital. <https://repositorioslatinoamericanos.uchile.cl/handle/2250/6569013>

Carvajal Ortigón, N. A., Zarate Ramírez, J. G., y Rincón Plazas, D. A. (2019).

*Mejoramiento del material de afirmado de la cantera la esmeralda mediante la adición de ceniza de cascarilla de arroz y material reciclado de escombros.* [Tesis de pregrado, Universidad Cooperativa de Colombia]. Repositorio institucional. <https://hdl.handle.net/20.500.12494/13832>

Chema Ultra Fina. (2017). *Fibra de polipropileno para refuerzo en mortero y concretos.*

<https://www.chema.com.pe/assets/productos/ficha-tecnica/HT%20CHEMA%20FIBRA%20ULTRAFINA%20V01.2017.pdf>

Chipana Tello, E. (2022). *Propiedades físico mecánicas en sub rasante con adición de ceniza de fibra de coco en la carretera Abancay - Huayllabamba, Apurímac - 2022* [tesis de pregrado, Universidad tecnológica de los andes]. Repositorio institucional. <https://hdl.handle.net/20.500.12692/98425>

Dirección Regional de Transportes y Comunicaciones. (2023). *Informe técnico del estado actual de la Red Vial Regional – Ruta AP-103.* Gobierno Regional de Apurímac. <https://drtcapurimac.gob.pe/portal/titular-de-transportes-se-reune-con-autoridades-de-tacmara-y-huanipaca/>

Eduardo Vargas, Y., Maritza Gutierrez, Y., y Rojas Marulanda, J. R. (2020). *Estabilización de afirmado con ceniza proveniente de desechos de cascarilla de café para aplicar en suelos de construcción de vías.* [Tesis de pregrado, Universidad cooperativa de Colombia]. Repositorio institucional. <https://repository.ucc.edu.co/server/api/core/bitstreams/e811ce6e-5fcb-41f6-9f8b-84231d7821dc/content>

Fernandez, C. (2006). *Estudio experimental de refuerzo de suelos con fibras sintéticas.* España. <https://rabida.uhu.es/dspace/bitstream/handle/10272/8602/Estudio-experimental.pdf?sequence=2>

- Gomez Villa, I. (2023). *Análisis de la capa de afirmado con la adición de polímero acrilamida y cemento, Ocobamba, Chincheros, Apurímac 2023*. [Tesis de pregrado, Universidad Cesar Vallejo]. Repositorio institucional. <https://hdl.handle.net/20.500.12692/133314>
- Goñas Labajos, O. (2019). *Estabilización de suelos con cenizas de carbón para uso como subrasante mejorada*. [Tesis de pregrado, Universidad Toribio Rodrigues de Mendoza de Amazonas]. Archivo digital. <https://hdl.handle.net/20.500.14077/1801>
- Guzman Guevara, C. J. (2022). *Lineamientos para la implementación de un sistema de gestión de activos sostenible, en la infraestructura de transporte carretero departamental*. [Tesis de posgrado, Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito]. Repositorio institucional <https://repositorio.escuelaing.edu.co/handle/001/2182>
- Hernandez Sampieri, R., y Mendoza Torrez, C. P. (2018). *Metodología de la investigación. Las rutas cuantitativa, cualitativa mixta*. Ciudad de Mexico, Mexico. <https://doi.org/10.22201/fesc.20072236e.2019.10.18.6>
- Huamaní Gamarra, Z., y Condori Ñahuinlla, V. (2018). *Aplicación del estabilizador Z con polímero en el incremento del valor del CBR del material utilizado como afirmado en la carretera departamental ap-103, tramo puente Ullpuhuaycco – Karkatera (I= 14.050 kms) Abancay-Apurímac 2018*. [tesis de pregrado, Universidad tecnológica de los andes]. Repositorio institucional. <https://hdl.handle.net/20.500.14512/133>
- Juarez Badillo, E., y Rico Rodriguez, A. (2005). *Mecanica de Suelos Fundamentos de la mecanica de suelos*. Mexico. <https://veteranos1927.wordpress.com/wp-content/uploads/2014/05/mecanica-de-suelos-tomo-1-juarez-badillo.pdf>
- Levin, R., y Rubin, D. S. (2004). *Estadística para administración y economía*. Edición Séptima.

<https://books.google.co.ve/books?id=uPhtNCqC4isC&printsec=frontcover&hl=es#v=onepage&q&f=false>

Llanos Chimbor, L. (2019). *Factores que más influyen en el deterioro de las carreteras no pavimentadas (afirmadas) de Cajamarca – Santa Barbara, Cajamarca – Tres Molinos, Cajamarca – Cumbe Mayo, Cajamarca 2017 [tesis de pregrado, Universidad Privada del Norte]*. Archivo digital. <https://hdl.handle.net/11537/23558>

Mamani Mamani, F. P., y Lazarte Velarde, F. A. (2019). *Fibra sintética en vías a nivel de afirmado y su efecto en sus propiedades mecánicas, Región Puno*. REVISTA VERITAS ET SCIENTIA - UPT, 8(1), pp. 1091 – 1098.  
<https://doi.org/10.47796/ves.v8i1.113>

Mexibras. (2023). *Manual técnico de fibras sintéticas para construcción*. <https://q-mexibras.com.mx/fibras-sinteticas/>

Morales Beteta, S. M. (2018). *Impacto económico de los estabilizantes de suelo ENZIMA PZ-22X Y POLY-SES en la conservación de la superficie de rodadura de la carretera no pavimentada Huánuco-Marabamba (tesis de posgrado, Universidad Nacional Hermilio Valdizán)*. Archivo digital.  
<https://hdl.handle.net/20.500.13080/4083>

Ministerio de Transporte y comunicaciones. (2008). *Glosario de terminos de uso frecuente en proyectos de infraestructura vial*.  
[http://transparencia.mtc.gob.pe/idm\\_docs/normas\\_legales/1\\_0\\_1556.pdf](http://transparencia.mtc.gob.pe/idm_docs/normas_legales/1_0_1556.pdf)

Ministerio de Transporte y comunicaciones. (2014). *Manual para el diseño de carreteras no pavimentados de bajo volumen de tránsito*, Lima, Peru. Edicion 2014.  
<https://www.sutran.gob.pe/wp-content/uploads/2015/08/manualdedisenodecarreterasnopavimentadasdebajovolumentransito.pdf>

- Ministerio de Transporte y comunicaciones. (2016). *Manual Ensayo de Materiales, Lima, Peru*.  
[https://portal.mtc.gob.pe/transportes/caminos/normas\\_carreteras/documentos/manuales/Manual%20Ensayo%20de%20Materiales.pdf](https://portal.mtc.gob.pe/transportes/caminos/normas_carreteras/documentos/manuales/Manual%20Ensayo%20de%20Materiales.pdf)
- Muñoz Razo, C. (2011). *Como elaborar y asesorar una investigacion de tesis*. Mexico.  
<https://www.indesgua.org.gt/wp-content/uploads/2016/08/Carlos-Muñoz-Razo-Como-elaborar-y-asesorar-una-investigacion-de-tesis-2Edicion.pdf>
- Norma Técnica Peruana E.050. (2020). *Reglamento Nacional de Edificaciones. Suelos y cimentaciones*. Lima, Peru.  
<https://drive.google.com/file/d/1XdLUkwUqDXsulQgSbFsJ-J9BTt4u3Hp5/view>
- Quevedo Sánchez, K. A. (2020). *Influencia del jugo de saccharum officinarum en el afirmado del tipo procesado en los suelos para infraestructuras viales, Moyobamba, 2020*. [Tesis de pregrado, Universidad Cesar Vallejo]. Repositorio institucional. <https://hdl.handle.net/20.500.12692/51519>
- Quiñones Paucar, K. (2017). *Diagnóstico y diseño vial del pavimento flexible: Avenida Alfonso Ugarte (tramo: Carretera Central – Avenida Ferrocarril), en el Distrito de Hualhuas, Provincia de Huancayo 2016 (tesis de pregrado, Universidad Peruana los Andes)*. Archivo digital. <https://hdl.handle.net/20.500.12848/265>
- Rivas Tovar, L. (2017). *Elaboracion de tesis. Estructura y metodologia*. Mexico.  
<https://es.scribd.com/document/451468511/>
- SENAMHI. (2019). *Movimiento en masas por lluvias intensas en el Perú. 2019*. Lima, Peru. <https://www.senamhi.gob.pe/load/file/01401SENA-81.pdf>
- Serrato Chaguala, Y. F., y Cabezas Chávez, E. J. (2019). *Evaluación de la resistencia de un suelo grueso reforzado con fibras de coco (cocotero, cocos nucifera)*. [Tesis de Pregrado, Universidad Piloto de Colombia Seccional de Alto Magdalena].

Repositorio Institucional.

<https://repository.unipiloto.edu.co/handle/20.500.12277/6481>

Soltani, A., Deng, A., & Taheri, A. (2018). *Swell–compression characteristics of a fiber–reinforced expansive soil. Geotextiles and Geomembranes.*

<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2017.11.009>

Terzaghi, K., y Peck, R. (1976). *Mecánica de Suelos en la Ingeniería Práctica* (2da ed.).

Limusa.

Tex Delta. (s/f). *Aplicaciones y ventajas del uso de fibras de polipropileno.*

<https://texdelta.com/blog/aplicaciones-y-ventajas-del-uso-de-fibras-de-polipropileno/>

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.