

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



**Tesis**

**Análisis estructural de pavimentos flexibles sobre subrasantes heterogéneas en la  
carretera Abancay – Andahuaylas, Apurímac 2024**

Asesor:

Mg. Ing. Alarcón Camacho, Erick

Autor:

Ccarhuas Pérez, Richar

Para optar el título profesional de: Ingeniero Civil

Abancay - Apurímac - Perú

2025



# Análisis estructural de pavimentos flexibles sobre subrasantes heterogéneas en la carretera Abancay – Andahuaylas, Apurímac 2024

## INFORME DE ORIGINALIDAD



## FUENTES PRIMARIAS

<b>1</b>	<b>hdl.handle.net</b> Fuente de Internet	<b>3%</b>
<b>2</b>	<b>Submitted to Universidad Tecnológica de los Andes</b> Trabajo del estudiante	<b>1%</b>
<b>3</b>	<b>repositorio.ucv.edu.pe</b> Fuente de Internet	<b>1%</b>
<b>4</b>	<b>docplayer.es</b> Fuente de Internet	<b>&lt;1%</b>
<b>5</b>	<b>repositorio.unj.edu.pe</b> Fuente de Internet	<b>&lt;1%</b>
<b>6</b>	<b>Submitted to Universidad Andina Nestor Caceres Velasquez</b> Trabajo del estudiante	<b>&lt;1%</b>
<b>7</b>	<b>repositorio.utea.edu.pe</b> Fuente de Internet	<b>&lt;1%</b>

**repositorio.upla.edu.pe**

## Metadatos

<b>Datos del autor</b>		
Nombres y Apellidos	:	Richar Ccarhuas Perez
Tipo de Documento de identidad	:	DNI
Numero de Documento de identidad	:	47616039
URL ORCID	:	<a href="https://orcid.org/0009-0000-6625-2356">https://orcid.org/0009-0000-6625-2356</a>
<b>Datos del Asesor</b>		
Nombres y apellidos	:	Mg. Erick Alarcón Camacho
Tipo de Documento de identidad	:	DNI
Numero de Documento de identidad	:	31039703
URL ORCID	:	<a href="https://orcid.org/0000-0003-4294-7481">https://orcid.org/0000-0003-4294-7481</a>
<b>Datos de la Investigación</b>		
Facultad	:	Ingeniería
Escuela profesional	:	Ingeniería Civil
Línea de Investigación	:	Gestión de la Infraestructura para el Desarrollo Sostenible
Rango de años que se realizó la investigación	:	ENERO 2024 – DICIEMBRE 2024
Fuente de financiamiento	:	Autofinanciado
Control de anti plagio (Turnitin)	:	15%
URL de OCDE	:	<a href="https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#3.03.05">https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#3.03.05</a>

## **Dedicatoria**

A mis padres, por su amor sin fronteras, su ejemplo de esfuerzo y sacrificio, que fue mi gran camino e inspiración. Agradecido por apoyarme en mi caminar continuo y por brindarme el ejemplo del trabajo duro y la perseverancia.

A mis hermanos, por estar siempre a mi lado, brindándome su compañía, consejos y motivación en los momentos más difíciles. Su cariño y apoyo han sido fundamentales en mi vida.

A mis amigos, quienes siempre han estado presentes, ofreciéndome su ánimo y confianza en este largo camino. Gracias por su paciencia y por los momentos compartidos que hicieron más livianas las dificultades.

## **Agradecimiento**

Primero, agradezco profundamente al Creador, por brindarme el apoyo, la salud y la sabiduría para lograr este reto.

A mi asesor de tesis, Ing. Erick Alarcón por su capacitación, enseñanza y valiosos consejos en todo el proceso de esta indagación. Sus años de investigación y sabiduría han sido determinantes para la culminación de este trabajo.

A mis docentes de la carrera, por brindarme una formación sólida y siempre estar dispuestos a compartir su conocimiento. Cada uno de ustedes ha dejado una huella importante en mi desarrollo profesional.

Finalmente, agradezco a mi familia, mis progenitores, por ser mi mayor respaldo en cada etapa de este proceso. Sin su amor, sacrificio y constante aliento, este logro no habría sido posible.

## Resumen

El propósito principal es identificar cómo las propiedades geotécnicas variables de la subrasante influyen en el desempeño de los pavimentos, lo que a menudo genera deterioros prematuros y altos costos de mantenimiento. La investigación busca proponer soluciones técnicas para mejorar la resistencia y la durabilidad del pavimento, garantizando así su funcionalidad y sostenibilidad. La metodología se dividió en varias etapas. En primer lugar, se ejecutó un estudio in situ para detectar las características del terreno mediante la realización de calicatas y la recolección de muestras de suelo. Posteriormente, estas muestras se analizaron en laboratorio para determinar propiedades físicas como el índice de capacidad portante (CBR), la granulometría y los límites de consistencia. Además, se llevaron a cabo ensayos de deflectometría en diferentes tramos de la carretera, evaluando la deformación del pavimento bajo cargas dinámicas. La data recaudada fue procesada y analizada. Los resultados evidenciaron que las subrasantes heterogéneas provocan variaciones significativas en la deflexión y en la estabilidad estructural del pavimento. Se identificaron áreas críticas con altos niveles de deformación y baja capacidad portante, lo que sugiere la necesidad de intervenciones como el uso de materiales estabilizantes y el refuerzo de las capas de la estructura vial. En conclusión, estos resultados corroboran que el comportamiento estructural del pavimento está intrínsecamente ligado a la variabilidad de las propiedades de la subrasante del tramo de la vía, sugiriendo una respuesta óptima de la estructura ante las condiciones de heterogeneidad presentes en el suelo.

*Palabras clave:* pavimento flexible, subrasante heterogénea, deflectometría.

## **Abstract**

The main purpose is to identify how variable geotechnical properties of the subgrade influence pavement performance, often leading to premature deterioration and high maintenance costs. The research seeks to propose technical solutions to improve pavement strength and durability, thus ensuring its functionality and sustainability. The methodology was divided into several stages. First, an on-site study was carried out to detect the characteristics of the terrain by excavating test pits and collecting soil samples. These samples were then analysed in the laboratory to determine physical properties such as the bearing capacity index (CBR), particle size distribution and consistency limits. In addition, deflectometry tests were carried out on different sections of the road, evaluating pavement deformation under dynamic loads. The data collected was processed and analysed. The results showed that heterogeneous subgrades cause significant variations in pavement deflection and structural stability. Critical areas with high levels of deformation and low load-bearing capacity were identified, suggesting the need for interventions such as the use of stabilizing materials and the reinforcement of the layers of the road structure. In conclusion, these results corroborate that the structural behavior of the pavement is intrinsically linked to the variability of the properties of the subgrade of the road section, suggesting an optimal response of the structure to the heterogeneous conditions present in the soil.

*Keywords:* flexible pavement, heterogeneous subgrade, deflectometry.

## Índice

<b>Portada.....</b>	<b>i</b>
<b>Acta de sustentación .....</b>	<b>ii</b>
<b>Reporte de similitud .....</b>	<b>iii</b>
<b>Metadatos .....</b>	<b>iv</b>
<b>Dedicatoria .....</b>	<b>v</b>
<b>Agradecimiento.....</b>	<b>vi</b>
<b>Resumen .....</b>	<b>vii</b>
<b>Abstract .....</b>	<b>viii</b>
<b>Índice... ..</b>	<b>ix</b>
<b>Índice de tablas .....</b>	<b>xi</b>
<b>Índice de figuras .....</b>	<b>xiii</b>
<b>I. Introducción .....</b>	<b>14</b>
<b>II. Problema de investigación.....</b>	<b>16</b>
2.1. Descripción y formulación del problema .....	16
2.1.1. Problema general .....	17
2.1.2. Problemas específicos.....	17
2.2. Objetivos .....	18
2.2.1. Objetivo general .....	18
2.2.2. Objetivos específicos .....	18
2.3. Justificación e importancia .....	18
2.4. Hipótesis.....	20
2.5. Variables .....	20
<b>III. Marco teórico .....</b>	<b>24</b>
3.1. Antecedentes de investigación .....	24
3.2. Bases teóricas .....	30
3.2.1. <i>Pavimentos flexibles</i> .....	30
3.2.2. <i>Subrasantes Heterogéneas</i> .....	38
3.2.3. <i>Evaluación estructural</i> .....	47

3.3. Definición de términos .....	50
<b>IV. Metodología.....</b>	<b>52</b>
4.1. Tipo y nivel de investigación .....	52
4.2. Ámbito temporal y espacial.....	53
4.3. Población y muestra.....	53
4.4. Instrumentos .....	54
4.5. Procedimientos .....	54
4.6. Análisis de datos.....	56
4.7. Consideraciones éticas .....	57
<b>V. Resultados y discusión.....</b>	<b>59</b>
<b>VI. Conclusiones.....</b>	<b>99</b>
<b>VII. Recomendaciones.....</b>	<b>101</b>
<b>VIII. Referencias .....</b>	<b>103</b>

## Índice de tablas

<b>Tabla 1</b> Categorías de subrasantes .....	<b>42</b>
<b>Tabla 2</b> Numeración y apertura de tamices .....	<b>43</b>
<b>Tabla 3</b> Clasificación de suelos según Índice de Plasticidad.....	<b>45</b>
<b>Tabla 4</b> Categoría y clasificación de los daños tipo A .....	<b>34</b>
<b>Tabla 5</b> Categoría y clasificación de los daños tipos B .....	<b>36</b>
<b>Tabla 6</b> Acceso al área de estudio.....	<b>60</b>
<b>Tabla 7</b> Aspectos geomorfológicos del terreno .....	<b>61</b>
<b>Tabla 8</b> Localización de las calicatas de estudio .....	<b>62</b>
<b>Tabla 9</b> Determinación de peso volumétrico del suelo.....	<b>63</b>
<b>Tabla 10</b> Determinación de ángulo de fricción y cohesión del suelo.....	<b>64</b>
<b>Tabla 11</b> Parámetros del suelo mediante los ensayos de campo y laboratorio.....	<b>64</b>
<b>Tabla 12</b> Análisis Granulométrico.....	<b>65</b>
<b>Tabla 13</b> Límites de atterberg .....	<b>66</b>
<b>Tabla 14</b> Capacidad portante C-01 .....	<b>72</b>
<b>Tabla 15</b> Capacidad portante C-02 .....	<b>73</b>
<b>Tabla 16</b> Capacidad portante C-03 .....	<b>73</b>
<b>Tabla 17</b> Asentamiento C-01 .....	<b>74</b>
<b>Tabla 18</b> Asentamiento C-02.....	<b>75</b>
<b>Tabla 19</b> Asentamiento C-03.....	<b>75</b>
<b>Tabla 20</b> Colapsabilidad del suelo .....	<b>76</b>
<b>Tabla 21</b> Potencial de Exapansion.....	<b>77</b>
<b>Tabla 22</b> Ubicación de la Cantera.....	<b>79</b>
<b>Tabla 23</b> Límites de Consistencia.....	<b>79</b>
<b>Tabla 24</b> Análisis Granulométrico.....	<b>80</b>
<b>Tabla 25</b> Resultados de material de Cantera .....	<b>81</b>
<b>Tabla 26</b> Requerimientos para sub base .....	<b>82</b>

<b>Tabla 27</b> Evaluacion deflectometrica carril derecho km 23+750 - km 40+250 .....	<b>83</b>
<b>Tabla 28</b> Evaluacion deflectometrica Carril izquierdo km 722+525 al km 724+000 .....	<b>84</b>
<b>Tabla 29</b> Evaluacion deflectometrica Carril izquierdo - Derecho .....	<b>85</b>
<b>Tabla 30</b> Evaluacion deflectometrica Correcciones .....	<b>87</b>
<b>Tabla 31</b> Conteo vehicular y cálculo de numero de ejes equivalentes (8.2tn) (abancay - andahuaylas) .....	<b>88</b>
<b>Tabla 32</b> Resultados de ejes equivalentes.....	<b>89</b>
<b>Tabla 33</b> Resumen de resultados del tramo en estudio.....	<b>90</b>

## Índice de figuras

<b>Figura 01</b> Estructura Típica de Pavimento Flexible .....	<b>33</b>
<b>Figura 02</b> Límites de Atterberg .....	<b>44</b>
<b>Figura 03</b> Curva típica del ensayo de compactación .....	<b>46</b>
<b>Figura 04</b> Ubicación de la zona de estudio.....	<b>59</b>
<b>Figura 05</b> Curva Granulométrica C-01 .....	<b>67</b>
<b>Figura 06</b> Curva Granulométrica C-02.....	<b>68</b>
<b>Figura 07</b> Curva Granulométrica C-03.....	<b>68</b>
<b>Figura 08</b> Perfil estratigráfico C-01.....	<b>69</b>
<b>Figura 09</b> Perfil estratigráfico C-02.....	<b>70</b>
<b>Figura 10</b> Perfil Estratigráfico C-03 .....	<b>71</b>
<b>Figura 11</b> Tabla para la evaluación de suelos colapsables .....	<b>76</b>
<b>Figura 12</b> Ubicación de la cantera .....	<b>78</b>
<b>Figura 13</b> Tabla de clasificación de suelos mediante límites de Atterberg .....	<b>80</b>
<b>Figura 14</b> Gradación para sub base .....	<b>81</b>

## I. Introducción

Esta indagación aborda el análisis estructural de pavimentos flexibles sobre subrasantes heterogéneas en el tramo carretero Abancay – Andahuaylas, ubicado en la región Apurímac, Perú. Este análisis se centra en estimar el comportamiento de los pavimentos flexibles, considerando las características variables del terreno en el que se asienta, lo cual es un desafío frecuente en zonas con condiciones geotécnicas disímiles. La carretera en estudio es de gran relevancia en la comunidad, ya que conecta importantes centros económicos y sociales, por lo que asegurar su adecuada funcionalidad y durabilidad es esencial para el desarrollo regional.

La importancia de realizar este trabajo surge el imperativo de modernizar las vías de transporte en una zona caracterizada por su topografía accidentada y suelos complejos. En el tramo en cuestión, las condiciones del subsuelo son muy diversas, lo que representa un reto significativo para el diseño y mantenimiento de pavimentos. Las subrasantes heterogéneas suelen provocar fallas prematuras en los pavimentos, lo que genera altos costos de mantenimiento y riesgos para la seguridad vial. Por lo tanto, se ha identificado la urgencia de contar con un análisis exhaustivo que permita optimizar el diseño estructural de los pavimentos flexibles, considerando estas variaciones en la subrasante.

La metodología empleada en esta indagación incluyó un enfoque mixto. Primero, se realizó un reconocimiento geotécnico de campo, con la ejecución de calicatas y la toma de especímenes para análisis en laboratorio. Esto permitió caracterizar los aspectos físicos y mecánicos del terreno a lo largo del tramo carretero. Posteriormente, se realizaron ensayos de deflectometría para evaluar la capacidad estructural del pavimento en función de la variabilidad del subsuelo. Con estos datos, se utilizó el modelo de pavimentos flexibles, ajustado a las características específicas de la vía y las condiciones heterogéneas del subsuelo.

El fin de esta indagación es proponer recomendaciones técnicas que mejoren el desempeño de los pavimentos flexibles sobre suelos heterogéneos, garantizando su durabilidad y minimizando los costos de mantenimiento. De manera específica, se estima caracterizar las deficiencias estructurales y plantear soluciones de refuerzo y mejoramiento de las capas del pavimento mediante la variabilidad del terreno. Asimismo, se pretende generar un modelo que permita aplicar estos resultados a otros tramos con condiciones similares en la región.

En cuanto a la estructura del trabajo, este se ha organizado en seis capítulos. En el Cap. I, se plasma la introducción, donde se expone el contexto, el interés y la importancia del tema. El Cap. II dedicado al planeamiento del problema, el cual se describen las dificultades técnicas que enfrentan los pavimentos flexibles en subrasantes heterogéneas y se justifica la necesidad de esta indagación. El Cap. III identifica el marco conceptual, donde se revisan los conceptos fundamentales relacionados con los pavimentos flexibles, subrasantes y el método de análisis estructural. En el Cap. IV, se expone la metodología utilizada, detallando las ejecuciones in situ y laboratorio, así como los métodos de análisis empleados. El Cap. V contiene los resultados del estudio, mostrando la alcanzada en laboratorio y las mediciones de deflexión, junto con el análisis de los mismos. Finalmente, en el Cap. VI, se plasman las conclusiones y recomendaciones, en el cual plasma los hallazgos del estudio y se proponen soluciones para mejorar el desempeño del pavimento en el tramo carretero estudiado.

Este trabajo contribuye significativamente a la optimización de edificación vial en zonas con condiciones geotécnicas complejas, proponiendo soluciones técnicas basadas en un análisis riguroso y fundamentado que pueden replicarse en otros proyectos similares.

## II. Problema de investigación

### 2.1. Descripción y formulación del problema

Múltiples elementos contribuyen al desgaste de la carpeta asfáltica, incluyendo las cargas vehiculares, los procesos constructivos, los componentes utilizados, las condiciones ambientales y el paso del tiempo. Estos elementos impactan directamente en el estado y la durabilidad del pavimento. Aunque es imposible controlar los factores climáticos y el envejecimiento natural, existen alternativas como la regulación de los pesos máximos permitidos, la selección minuciosa de materiales y metodologías innovadoras para evaluar la estructura, pueden ayudar a preservar un pavimento existente (Bhandari y otros, 2023).

De igual manera, el comportamiento mecánico de los suelos afecta significativamente a la capa subrasante (Amakye y otros, 2022), lo cual repercute considerablemente en el funcionamiento de las estructuras pavimentadas en el terreno, generando deterioros estructurales. Entre estas alteraciones destacan el ahuellamiento y el agrietamiento por fatiga, que son las más frecuentes (Harinder, 2022).

La infraestructura vial peruana se divide en tres categorías: las vías nacionales (27,109 km) bajo la administración del MTC, las rutas departamentales (27,505 km) gestionadas por gobiernos regionales, y los caminos vecinales (113,857 km) supervisados por las municipalidades. Respecto a las vías nacionales, se ha evidenciado un progreso significativo en la pavimentación. Los datos del Ministerio de Transportes y Comunicaciones revelan un incremento en la red vial nacional. pavimentada, que evolucionó del 59,9% en 2012 hasta alcanzar el 79,1% en 2018. (MTC, 2020). Sin embargo, el mismo uso de este y las temperaturas y diversos factores hicieron que en la red departamental no sea igual, con totalidad de 3,623 km, se estimó 13.2% de vías (Comex Perú, 2020).

A pesar de esto, un porcentaje superior al 50% de las vías peruanas no cumple con los estándares adecuados de construcción debido a la topografía que dificulta las

construcciones y el costo, desde el 2017 hasta la fecha, ha financiado 2751 intervenciones de pistas que han requerido una inversión de 1798 millones de soles. Esto representa un avance significativo para las 12 regiones ya que es importante precisar que estas vías ayudan al progreso de cada departamento y región que une (El peruano, 2022).

Durante la inspección del tramo Abancay - Andahuaylas, se observará que los habitantes de las localidades y poblados aledaños transitan frecuentemente en ambas direcciones, viéndose afectados por las deficientes condiciones de la vía, las cuales ocasionan daños a sus vehículos. Esta situación fundamenta la importancia de desarrollar esta investigación, que comienza con una evaluación estructural del pavimento flexible en toda la extensión del recorrido. El desarrollo de esta indagación incluye una serie de pruebas técnicas para establecer la técnica constructiva óptima para el tramo estudiado, siendo esencial el seguimiento constante del funcionamiento de las capas de pavimento que conforman la superficie vial y garantizan la movilidad descrita.

Por todo lo planteado anteriormente se plante los siguientes problemas

### **2.1.1. Problema general**

¿Cuál es el análisis estructural de pavimento flexibles sobre subrasantes heterogéneas en la carretera Abancay – Andahuaylas, Apurímac, 2024?

### **2.1.2. Problemas específicos**

**PE-1:** ¿Cuál es el tipo de suelo de la estructura de pavimentos flexible sobre subrasantes heterogéneas en la carretera Abancay – Andahuaylas, Apurímac, 2024?

**PE-2:** ¿Cuál es el índice de capacidad portante (CBR) de la subrasante heterogénea en la carretera Abancay – Andahuaylas, Apurímac, 2024?

**PE-3:** ¿Cuál es la variación de la deflexión para el análisis estructural en pavimentos flexibles sobre subrasantes heterogéneas en la carretera Abancay – Andahuaylas, Apurímac, 2024?

## **2.2. Objetivos**

### **2.2.1. Objetivo general**

Analizar la estructura de los pavimentos flexibles sobre subrasantes heterogéneas en la carretera Abancay – Andahuaylas, Apurímac, 2024.

### **2.2.2. Objetivos específicos**

**OE-1:** Identificar el tipo de suelo de la estructura de pavimentos flexibles sobre subrasantes heterogéneas en la carretera Abancay – Andahuaylas, Apurímac, 2024.

**OE-2:** Determinar el índice de capacidad portante (CBR) de la subrasante heterogénea en la carretera Abancay – Andahuaylas, Apurímac, 2024.

**OE-3:** Determinar la variación de la deflexión de la estructura de pavimentos flexibles sobre subrasantes heterogéneas en la carretera Abancay – Andahuaylas, Apurímac, 2024.

## **2.3. Justificación e importancia**

### **2.3.1 Justificación**

#### **Teórica**

Esta indagación se realizó con el propósito de ampliar el conocimiento existente sobre el desarrollo de los fundamentos conceptuales relacionados con el comportamiento estructural que presentan los pavimentos flexibles cuando se construyen sobre suelos de subrasante no uniformes.

#### **Práctica**

Esta indagación se fundamentó en la necesidad de evaluar, optimizar, medir y establecer las alteraciones que puede experimentar un pavimento flexible en función de los aspectos del suelo de subrasante en el tramo vial que conecta Abancay con Andahuaylas.

## **Metodológica**

Para lograr las metas establecidas, se implementaron diversos métodos investigativos que incluyeron la recopilación de información, realización de mediciones tanto en campo como en laboratorio, utilizando instrumentación especializada. El análisis se complementó con procesamiento de datos mediante hojas de cálculo Excel, lo que permitió evaluar tanto el desempeño estructural del pavimento como las propiedades físicas del suelo de sustrato.

### **2.3.2. Importancia**

Esta indagación es relevante debido a que responde a la exigencia de enfrentar los desafíos que representan las subrasantes heterogéneas, donde las variaciones en las propiedades del terreno pueden afectar significativamente el comportamiento y la vida útil de los pavimentos flexibles. En este tipo de terrenos, las fallas prematuras del pavimento, como grietas, deformaciones y fisuras, son comunes debido a las diferencias en la resistencia de soporte de terreno. Este tipo de problemas no solo genera elevados costos de mantenimiento y rehabilitación, al igual que debilita la seguridad vial y la eficiencia del transporte en la región.

Además, este análisis cobra relevancia porque busca proporcionar un diagnóstico preciso del estado actual del pavimento, así como proponer soluciones técnicas adecuadas que permitan mejorar su rendimiento a largo plazo. La implementación de mejores técnicas de diseño y mantenimiento sobre subrasantes con características heterogéneas no solo optimizará los recursos disponibles, además contribuirá a la sostenibilidad y seguridad de la infraestructura vial.

El estudio también tiene un impacto social y económico significativo, ya que una carretera en mejores condiciones incrementa el bienestar y las condiciones de vida de los habitantes de la zona al facilitar el acceso a servicios, mercados y otras oportunidades de

desarrollo. Asimismo, reduce los tiempos y costos de transporte, lo que beneficia tanto a los usuarios locales como a la industria regional. Por lo tanto, la importancia de este análisis no solo se limita al ámbito técnico, sino que trasciende a la prosperidad de los habitantes y el crecimiento socioeconómico de Apurímac.

## **2.4. Hipótesis**

### **2.4.1 Hipótesis general**

La estructura de los pavimentos flexibles en la carretera Abancay – Andahuaylas, presenta un desempeño condicionado por las características heterogéneas de las subrasantes, influyendo significativamente en su capacidad de carga y durabilidad.

### **2.4.2. Hipótesis específica**

**HE-1:** El tipo de suelo de las subrasantes heterogéneas en la carretera Abancay – Andahuaylas, Apurímac, 2024, puede ser identificado y clasificado según sus propiedades geotécnicas, lo que permitirá determinar su influencia en la estructura de los pavimentos flexibles.

**HE-2:** El índice de capacidad portante (CBR) de las subrasantes heterogéneas en la carretera Abancay – Andahuaylas, puede ser determinado mediante análisis geotécnicos, permitiendo evaluar su capacidad para soportar las cargas del pavimento flexible de manera eficiente.

**HE-3:** La variación de la deflexión en la estructura de pavimentos flexibles sobre subrasantes heterogéneas en la carretera Abancay – Andahuaylas, está directamente influenciada por las diferencias en las propiedades mecánicas y geotécnicas de las subrasantes, lo que afecta el desempeño estructural del pavimento.

## **2.5. Variables**

### **O1: Variable 1: Análisis estructural de pavimento flexible**

El análisis estructural de pavimento flexible es el estudio de las propiedades

y el comportamiento de los pavimentos que están formados por varias capas de materiales, generalmente compuestas de mezclas asfálticas y agregados. Este tipo de pavimento está diseñado para distribuir las cargas vehiculares a través de sus capas y hacia la subrasante de manera eficiente.

### **Dimensiones**

#### **Deflexión del pavimento**

La deflexión del pavimento se refiere a la deformación vertical que experimenta la superficie del pavimento bajo la aplicación de una carga. Este fenómeno es una indicación de la rigidez y resistencia del pavimento. La medida de la deflexión proporciona información sobre la capacidad estructural del pavimento y su desempeño ante el tráfico y las cargas dinámicas.

#### **O2: Variable 2: Subrasantes heterogéneas**

Las subrasantes heterogéneas se refieren a las capas de suelo sobre las que se construye el pavimento y que presentan variaciones significativas en sus propiedades físicas y mecánicas. Estas variaciones pueden incluir diferencias en la densidad, humedad, composición y resistencia del suelo. La heterogeneidad de la subrasante puede afectar de manera significativa el rendimiento del pavimento, ya que algunas áreas pueden ser más susceptibles a la deformación o al asentamiento que otras.

### **Dimensiones**

#### **Composición del suelo**

La composición del suelo se refiere a los diferentes materiales que lo conforman, incluyendo minerales, materia orgánica, agua y aire. Esta composición varía según el tipo de suelo (arcilloso, arenoso, limoso, etc.) y afecta sus propiedades físicas y mecánicas, así como su comportamiento bajo cargas.

### **Índice de capacidad portante**

La capacidad de soporte (CBR, California Bearing Ratio), la compresibilidad y la rigidez. Estas propiedades son esenciales para el diseño y la evaluación de estructuras de pavimento, ya que determinan la capacidad del suelo para soportar y distribuir cargas sin sufrir deformaciones excesivas.

**Tabla 1***Operacionalización de variables*

<b>Variable</b>	<b>Dimensiones</b>	<b>Indicadores</b>	<b>Escala</b>	<b>Valor</b>
<b>Análisis estructural de pavimento flexible</b> Evaluación del comportamiento del pavimento flexible bajo condiciones de carga y su capacidad para soportar el tráfico vehicular sin sufrir deformaciones excesivas. (Huang, 2005)	<b>Deflexión del pavimento</b> La deflexión del pavimento se refiere a la deformación vertical que experimenta la superficie del pavimento bajo la aplicación de una carga. Este fenómeno es una indicación de la rigidez y resistencia del pavimento. La medida de la deflexión proporciona información sobre la capacidad estructural del pavimento y su desempeño ante el tráfico y las cargas dinámicas. (Sanchez, 2018)	✓ Máxima deflexión ✓ Deflexión residual ✓ Perfil de deflexión ✓ Curvatura de deflexión	Intervalo	mm
	<b>Composición del suelo</b> La composición del suelo se refiere a los diferentes materiales que lo conforman, incluyendo minerales, materia orgánica, agua y aire. Esta composición varía según el tipo de suelo (arcilloso, arenoso, limoso, etc.) y afecta sus propiedades físicas y mecánicas, así como su comportamiento bajo cargas. La composición del suelo es crucial para determinar su capacidad de soporte y su interacción con las estructuras de pavimento. (Gomez, 2019)	<b>Índice de capacidad portante</b> Índice de Capacidad Portante de California, es un método utilizado en ingeniería civil para evaluar la resistencia al corte y la capacidad de soporte de suelos o materiales de base empleados en la construcción de pavimentos. (Ramirez, 2019)	Tipo de suelo (arcilloso, arenoso, etc.)  - CBR (California Bearing Ratio)	Nominal

*Nota.* Esta tabla constituye una tabla prototípica, ya que organiza de manera sistemática los elementos esenciales de las variables de

investigación, facilitando su análisis y aplicación en el desarrollo del estudio. Fuente : Elaboración propia

### III. Marco teórico

#### 3.1. Antecedentes de investigación

##### 3.1.1. A nivel internacional

Bhandari (2023) La investigación titulada “*Understanding the influence of structural factors and traffic loads on the behavior of flexible pavements*” tuvo como objetivo analizar el efecto de los factores estructurales, las cargas vehiculares y las condiciones ambientales en el desempeño de los pavimentos flexibles. Se evaluaron variables como el tipo y espesor de la base, la capa asfáltica, la subrasante, la carga de tráfico, la edad del pavimento, la precipitación y la temperatura. La metodología combinó modelos estadísticos y de aprendizaje automático, como los modelos lineales generalizados (GLM), la regresión logística binaria (BLR) y el enfoque de bosque aleatorio (RF), empleando datos del *Programa de Desempeño de Pavimentos a Largo Plazo (LTPP)*. Los resultados evidenciaron que el modelo RF fue el más preciso, identificando al espesor y tipo de base como factores determinantes en la formación de surcos, rugosidad y grietas. En conclusión, se demostró la utilidad de estos modelos para optimizar el diseño y mantenimiento de pavimentos flexibles.

Deng et al. (2021) La investigación titulada “*Análisis del estado de degradación en pavimentos flexibles mediante la medición de deflexiones causadas por cargas dinámicas*” tuvo como objetivo evaluar el deterioro estructural de los pavimentos flexibles a partir del estudio de deflexiones generadas por cargas móviles. El deterioro se asoció con la aparición de microfisuras, correspondientes a la fase de iniciación de grietas, evidenciada por la reducción del módulo dinámico y el aumento del ángulo de fase. La metodología incluyó la creación de un modelo tridimensional (3D) de elementos finitos y un modelo bidimensional (2D) asimétrico basado en inteligencia artificial, los cuales permitieron analizar los perfiles de deflexión y el desfase entre la

carga y los picos de deflexión. Los resultados demostraron que el ángulo de retraso se relaciona directamente con el grado de deterioro, la velocidad de carga y las propiedades del pavimento. En conclusión, este parámetro se propone como un indicador eficaz para la evaluación rápida del estado de pavimentos mediante ensayos no destructivos.

Peng et al. (2020) La investigación titulada “*Study of the foundation soil in asphalt pavements: influence of humidity conditions and tension states*” tuvo como objetivo analizar cómo las condiciones de humedad y los estados de tensión afectan el desempeño estructural de los pavimentos flexibles. Para ello, se desarrolló y validó un modelo analítico y un subprograma UMAT que integraron las relaciones no lineales entre humedad y estrés en los suelos de subrasante. Mediante el uso combinado de los softwares GEOSTUDIO, ABAQUS y MATLAB, se simuló la distribución del contenido de humedad y su influencia en el módulo resiliente. Los resultados mostraron que la variación de humedad impacta significativamente en la distribución de tensiones y deflexiones del pavimento, siendo mayor el módulo resiliente en áreas cercanas al punto de carga. Además, se evidenció un incremento notable en la deflexión y las tensiones bajo condiciones de equilibrio de humedad. En conclusión, el modelo propuesto constituye una herramienta eficaz para optimizar el diseño y mantenimiento de pavimentos flexibles.

Kumar y Prasad (2020) La investigación titulada “*Mechanistic methodological proposal for the study and sizing of bicap flexible pavements*” tuvo como objetivo formular una metodología mecanicista para analizar y diseñar pavimentos flexibles de dos capas, considerando deflexiones en la superficie y en la interfaz entre capas. Se aplicaron modelaciones tridimensionales por elementos finitos en ABAQUS, integrando parámetros como la geometría de contacto del neumático, las propiedades elásticas de la base granular, el espesor del pavimento y la relación entre los módulos

elásticos del pavimento y del suelo de fundación. Los resultados indicaron que la relación de Poisson entre la base granular y la subrasante tuvo un efecto mínimo en las respuestas estructurales. Para simplificar el análisis, se desarrollaron coeficientes de deflexión mediante diagramas normalizados basados en las proporciones de módulos elásticos y espesores. En conclusión, las deflexiones superficiales e interfaciales se identificaron como factores críticos en el diseño estructural, aportando una herramienta práctica para optimizar el desempeño de pavimentos bicapa.

Burgués y Benalcázar (2020) La investigación titulada *“Estudio comparativo de costos para la estructura vial Nanegal-Palmitopamba (Pichincha): análisis de pavimento flexible utilizando membrana sintética, mejoramiento de suelo base y diseño tradicional”* tuvo como objetivo comparar los costos y la eficiencia estructural de tres métodos: uso de membranas sintéticas, mejoramiento químico de la subrasante y diseño tradicional sin mejoramiento. La metodología se basó en un diseño estructural que garantizara la estabilidad del pavimento ante cargas vehiculares, evitando deformaciones permanentes. Se analizó la aplicación del estabilizador químico Tecofix, una sustancia líquida que forma un recubrimiento polimérico sobre las partículas arcillosas del suelo, logrando un desempeño similar al de la cal o el cemento, pero sin problemas de fisuras ni limitaciones por material orgánico o sulfatos. Los resultados económicos indicaron que la aplicación del método con Tecofix alcanzó una inversión total de 2,097,566.05 dólares, concluyéndose que representa una alternativa técnica, económica y sostenible para optimizar la durabilidad y el desempeño del pavimento flexible.

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

Flores (2023) La investigación titulada *“Caracterización del desempeño estructural de la vía Juliaca - Caracoto (Puno, 2021): influencia de las condiciones del*

*suelo subyacente en pavimentos flexibles*” tuvo como objetivo analizar cómo varía la respuesta estructural de los pavimentos flexibles según el tipo de suelo de la subrasante. Se empleó un enfoque explicativo y experimental, aplicando ensayos con la viga Benkelman conforme a las normas vigentes. Los resultados mostraron diferencias notables: el suelo tipo A-2 presentó deflexiones de hasta  $0.58 \times 10^{-2}$  mm y el tipo A-4 alcanzó  $0.81 \times 10^{-2}$  mm, con una fatiga estructural crítica de  $\sigma_Z = 3.46$  TN/m<sup>2</sup>. Además, el 98.33% de los puntos analizados cumplió con el radio de curvatura requerido, mientras que el 1.66% no lo hizo. En cuanto al estado general, el 38% de los tramos fue deficiente, el 16% regular y el 46% mostró buen desempeño. En conclusión, se resaltó la importancia de los estudios de suelo previos para garantizar pavimentos duraderos y estables.

Quispe y Mendoza (2022) La investigación titulada “*Estudio de la respuesta mecánica en la capa base del suelo de un pavimento flexible tradicional, ubicado en la carretera San Juan del Oro – Quispicanchis, en la región Puno*” tuvo como objetivo analizar el comportamiento de la subrasante y su influencia en el desempeño estructural del pavimento. Se aplicó un método científico de tipo práctico con diseño preexperimental, mediante ensayos de laboratorio y evaluación in situ. Los resultados revelaron daños estructurales significativos en el pavimento, aunque el suelo presentó un índice de plasticidad promedio de 9.5%, indicando alta humedad, pero soporte adecuado como subrasante. Con base en los análisis, se propuso un diseño según AASHTO-93, con 38 cm de subbase, 34 cm de base y 5 cm de capa asfáltica. Se concluyó que las fallas no se debieron al terreno general, sino a sectores con subrasantes críticas, destacándose la importancia de evaluaciones localizadas para optimizar el diseño y la durabilidad del pavimento.

Lino (2021) La investigación titulada “*Evaluación de la respuesta mecánica del pavimento flexible utilizando técnicas no invasivas entre los kilómetros 62+000 y 63+000 en la vía Federico Basadre, región Ucayali durante el año 2021*” tuvo como objetivo analizar el comportamiento estructural del pavimento flexible mediante métodos no destructivos. Se aplicó un enfoque científico de tipo aplicado, nivel explicativo y diseño cuasi experimental. Los resultados mostraron una deflexión promedio de  $56 \times 10^{-2}$  mm, con una deflexión admisible de  $60.83 \times 10^{-2}$  mm y una crítica de  $75.54 \times 10^{-2}$  mm. La subrasante presentó 100% de comportamiento regular o deficiente, mientras que la estructura general del pavimento mostró 50% buen desempeño y 50% deficiente. El análisis estructural indicó que el 50% del pavimento tenía calidad regular-buena. En conclusión, el tramo presentó un comportamiento estructural equilibrado, evidenciando la utilidad de las técnicas no invasivas para diagnosticar el estado del pavimento y planificar intervenciones que aseguren su durabilidad.

Carahuatay (2020) La investigación titulada “*Análisis de la respuesta mecánica del pavimento flexible en el tramo Chaquilpampa-Santa Rosa de Chaquil de la ruta Cajamarca-Celendín-Balsas, mediante la medición de deflexiones*” tuvo como objetivo evaluar la respuesta estructural del pavimento flexible en un tramo de 5 km de esta vía nacional rehabilitada en 2012. La metodología consistió en mediciones de campo con el deflectómetro Benkelman, aplicando una carga de 8.2 toneladas sobre el eje trasero de un camión y registrando 101 puntos de medición cada 100 metros. Los datos fueron analizados bajo el método CONREVIAl. Los resultados indicaron una deflexión característica de  $67 \times 10^{-2}$  mm, inferior a la admisible de  $71 \times 10^{-2}$  mm, y un radio de curvatura promedio de 333.28 m, superior al mínimo requerido. En conclusión, el pavimento presentó un comportamiento estructural bueno, confirmando la eficacia de

las obras de rehabilitación y destacando la relevancia de las evaluaciones deflectométricas periódicas para preservar la funcionalidad vial.

Apumayta (2020) La investigación titulada “*Análisis de la respuesta mecánica del pavimento flexible y su vinculación con las características de los suelos que componen la estructura vial en el segmento Calachota - Ayauca, provincia de Yauyos, durante el año 2020*” tuvo como objetivo analizar la relación entre el comportamiento estructural del pavimento flexible y las propiedades de los suelos de fundación en cuatro sectores de la carretera. La metodología se basó en un análisis deflectométrico mediante la Viga Benkelman, evaluando las deformaciones durante el proceso constructivo y verificando el cumplimiento de las normas técnicas del proyecto. Los resultados mostraron que las deformaciones fueron menores a los límites máximos permitidos y disminuyeron progresivamente con la incorporación de las capas del pavimento. Además, se evidenciaron variaciones en las deflexiones según las características del suelo. En conclusión, el estudio confirmó la conformidad técnica del proceso constructivo y destacó la importancia del monitoreo estructural continuo para garantizar pavimentos duraderos y funcionales.

Olivera (2020) La investigación titulada “*Estudio del funcionamiento estructural de la carpeta asfáltica sobre diferentes tipos de subrasante en la ruta Abancay-Cusco, Apurímac, 2020*” tuvo como objetivo evaluar la capacidad estructural del pavimento flexible considerando la variabilidad de la subrasante en tres sectores específicos: Willcuypata (km 786+000), Soqllaccasa (km 843+000) y San Antonio (km 778+000). Se aplicó una metodología de tipo aplicada, realizando mediciones de deflexión con la Viga Benkelman y análisis estructural de la subrasante. Los resultados mostraron que el tramo Soqllaccasa (CL) presentó un CBR de 7.88%, evidenciando un mal comportamiento estructural; en cambio, Willcuypata (SM) alcanzó un CBR de

34.82%, reflejando un desempeño adecuado, y San Antonio (CL) mostró resultados aceptables. En conclusión, los sectores San Antonio y Willcuypata registraron buena capacidad estructural, mientras que Soqllaccasa presentó deficiencias, resaltando la necesidad de considerar la heterogeneidad del suelo de subrasante en el diseño y evaluación de carreteras para asegurar su durabilidad.

### ***3.1.3. A nivel regional y local***

No se encontraron estudios similares a nivel Local ni regional

## **3.2. Bases teóricas**

### ***3.2.1. Pavimentos flexibles***

La composición de esta clase de pavimentos se distingue por tener una capa superficial de mezcla asfáltica o material bituminoso, sustentada por niveles de material granular. La calidad de estos estratos granulares tiende a disminuir según su cercanía a la subrasante, lo cual responde a la atenuación de las tensiones generadas por el tránsito vehicular a mayor profundidad (Huang, 2005).

Según Das (2019), la estabilidad de los pavimentos flexibles depende del adecuado diseño y calidad de las capas estructurales, así como de la capacidad portante del suelo de subrasante. Un pavimento flexible es aquel que utiliza materiales bituminosos para la capa superficial, combinados con bases y subbases granulares, diseñados para disipar las cargas del tráfico mediante un comportamiento elástico. Este tipo de pavimento presenta una alta sensibilidad a las condiciones ambientales, como la humedad y la temperatura.

Como señalan Roberts et al. (1996), las propiedades mecánicas de los materiales y las condiciones de carga influyen directamente en el desempeño y vida útil de este tipo de pavimento. El pavimento flexible es un sistema constructivo empleado en infraestructura vial, compuesto por varias capas superpuestas que

incluyen materiales como mezclas asfálticas, bases y subbases granulares. Este diseño permite la distribución gradual de las cargas, reduciendo las tensiones transmitidas al suelo de subrasante.

### **Dimensión de la variable pavimento flexible**

#### **Deflexión del pavimento**

Massenlli y de Paiva (2019) señalan que la deflexión destaca como uno de los principales indicadores utilizados para evaluar el deterioro estructural y la resistencia a la fatiga en pavimentos. Este parámetro describe la deformación vertical que se produce en la superficie del vial cuando está sometida a cargas de vehículos. La medición de las deflexiones resulta crucial para establecer el estado estructural y la condición general del pavimento, ya que una deflexión excesiva puede indicar una posible falla o deterioro en las capas que lo componen.

Según Triviño y Moll (2022), Uno de los principales indicadores para evaluar el deterioro estructural y monitorear la durabilidad del pavimento frente a la fatiga es la medición de la deflexión. Este parámetro representa cómo responde elásticamente la estructura del pavimento cuando se le aplican cargas, reflejando su capacidad para distribuir y soportar dichas cargas sin sufrir daños permanentes. Este indicador es esencial en la evaluación no destructiva de pavimentos, permitiendo identificar áreas que requieren mantenimiento o rehabilitación.

#### **Estructura del pavimento flexible**

**Concreto asfáltico:** representa la capa más externa de la estructura vial. Sus tres propósitos fundamentales son: ofrecer una superficie de rodadura uniforme que garantice un tránsito seguro, evitar la penetración del agua hacia el interior de la estructura mediante su impermeabilización, y soportar las fuerzas provocadas por la circulación vehicular.

**Base Granular:** actúa sosteniendo la superficie asfáltica mientras distribuye de manera apropiada las presiones del tráfico vehicular hacia las capas subyacentes.

**Sub-base:** es crucial pues permite reducir costos al incorporar materiales de menor costo en cierta proporción del pavimento. Los constructores pueden evaluar, según el precio y calidad de los materiales disponibles, si implementan solo base o incorporar también sub-base. A pesar de que agregar una sub-base puede aumentar el grosor total de la estructura, esta decisión frecuentemente deriva en un diseño más económico.

Un rol adicional de la Sub-base es servir como elemento separador entre la base y la subrasante, evitando que los materiales finos migren hacia arriba y comprometan la integridad estructural de la base. Esta capa tiene la capacidad de absorber las deformaciones provocadas por los cambios de temperatura o contenido de agua en la subrasante, impidiendo que estos movimientos afecten la superficie asfáltica. Como parte del sistema estructural, también participa en la transferencia de cargas hacia la subrasante. permitir el drenaje y evitar el ascenso capilar del agua.

### **Subrasante**

Representa el estrato inferior que da soporte a las capas estructurales del pavimento, y su profundidad está determinada por el límite de influencia de las cargas vehiculares. Dependiendo de las condiciones del terreno original, esta capa puede conformarse ya sea con el suelo natural correctamente preparado o con material de préstamo.

**Figura 1***Estructura Típica de Pavimento Flexible*

*Nota.* Esta figura constituye un ejemplo de figura prototípica, ya que presenta un modelo general que ilustra los elementos esenciales de un pavimento flexible. Fuente (David y Paull, 1998)

**Evaluación de pavimentos**

El diagnóstico del estado de pavimentos consiste en generar un documento técnico que describe las condiciones presentes en la superficie vial. Esta información permite planificar estratégicamente las acciones de conservación y reparación necesarias para prolongar la durabilidad del pavimento. Por este motivo, es fundamental seleccionar técnicas de evaluación que sean tanto objetivas como apropiadas para el ambiente específico donde se encuentra la vía (Armijos, 2010).

**Importancia de la evaluación de pavimentos**

Según Arrieta (2017) El valor esencial de evaluar los pavimentos reside en su capacidad para identificar oportunamente las fallas en la superficie vial, facilitando así la ejecución de intervenciones correctivas. Este enfoque preventivo asegura una experiencia óptima para los usuarios mientras se optimiza la inversión en trabajos de rehabilitación.

## Métodos de evaluación de pavimentos

Aunque el campo de evaluación de pavimentos flexibles cuenta con numerosas metodologías, en esta investigación nos concentraremos en detallar el procedimiento específico que se ha elegido aplicar.

### Clasificación y cuantificación de los daños

Se trata de una metodología de fácil uso que logra distinguir claramente los deterioros estructurales de los funcionales. El sistema categoriza las fallas del pavimento asfáltico en dos grupos fundamentales (A y B), evaluando su gravedad mediante una escala de tres niveles: bajo (identificado como 1), medio (marcado como 2) y alto (señalado como 3).

- **Fallas Estructurales Tipo “A”:**

El deterioro estructural del pavimento se evidencia cuando su capacidad de soporte es inadecuada, lo que resulta en la aparición de grietas y alteraciones en su forma debido al uso repetitivo (Pinilla, 2008).

**Tabla 2**

*Categoría y clasificación de los daños tipo A*

<b>Tipo A</b>	
Deformaciones y Hundimientos	Hundimientos en la superficie
	Hundimientos que siguen el eje longitudinal
	Hundimientos que cruzan transversalmente
Agrietamientos	Grietas extendidas a lo largo del pavimento por desgaste
	Grietas con patrón similar a la piel de cocodrilo
Deterioros Superficiales	Desperfectos y reparaciones en la superficie

*Nota.* Esta tabla constituye una tabla prototípica, ya que organiza de manera sistemática los tipos de fallas más frecuentes en pavimentos flexibles, facilitando su interpretación y diagnóstico en estudios de evaluación estructural vial. Fuente:(Pinilla, 2008).

- **Fallas Funcionales Tipo “B”**

Estas deficiencias tienen su raíz en el proceso constructivo y necesitan arreglos que sustancialmente no se relacionan con la resistencia estructural del pavimento. Su aparición se debe principalmente a irregularidades durante la construcción y características particulares del sitio, que el tráfico vehicular ayuda a Revelar las manifestaciones más comunes incluyen agrietamientos no relacionados con la fatiga del material, cavidades circulares (ojos de pescado), pérdida de material superficial y exudaciones.

La evaluación de la condición del pavimento se realiza mediante un valor adimensional conocido como Índice de Deterioro Superficial (Is), que se calcula considerando la proporción de área dañada respecto a la longitud completa del segmento vial evaluado. Este índice mantiene una relación inversa con la calidad del pavimento: cuanto más alto es el Is, peor es el estado de la superficie de rodamiento. (Huilcapi y Pucha, 2015).

**Tabla 3**  
*Categoría y clasificación de los daños tipos B*

	<b>Tipo B</b>
Fracturas	Rotura longitudinal en los puntos de unión constructiva Quiebre transversal en las juntas de construcción Agrietamiento por efectos térmicos en la construcción Grieta con forma de parábola Ruptura en los límites del pavimento
Deformaciones	Cambios en el nivel o forma original
Pérdida de material	Cavidades circulares en la superficie Deterioro de la capa adhesiva Separación del material granular Eliminación de la capa superficial
Afloramiento	Desgaste visible del agregado Aparición de líquidos en la superficie Emergencia de material de unión Surgimiento de agua
Otros Deterioros	Pérdida de material en los bordes Desnivel entre la vía principal y el borde Desgaste de los bordes laterales Separación de los componentes

*Nota.* Esta tabla constituye una tabla prototípica, ya que presenta de forma sistemática los deterioros estructurales de tipo moderado a severo que comprometen la funcionalidad y durabilidad del pavimento flexible. Fuente: (Pinilla, 2008)

### **Evaluación estructural de pavimentos flexibles**

La valoración de la estructura del pavimento se centra en medir la resistencia del conjunto vial durante cualquier momento de su periodo operativo. Este análisis sirve para determinar y cuantificar qué intervenciones de rehabilitación son necesarias, ya sea porque el pavimento está llegando al final de su vida funcional o porque se requiere adaptarlo a diferentes condiciones de carga vehicular.

El análisis estructural del pavimento integra dos procesos esenciales: la recolección de datos sobre deformaciones mediante técnicas de inspección estructural, y el posterior procesamiento de esta información a través de metodologías de retrocálculo para obtener conclusiones definitivas.

La evolución tecnológica ha transformado significativamente las técnicas de inspección estructural, priorizando tres aspectos clave: mayor productividad en las evaluaciones, una recopilación más ordenada y sistemática de las características del pavimento, y la minimización del daño tanto físico como operativo durante el estudio. Es importante destacar que, durante estas mediciones, se deben tener en cuenta diversos elementos que podrían llevar a interpretaciones erróneas de los datos obtenidos:

**Temperatura.** Es fundamental ajustar las mediciones de deflexión según las condiciones térmicas presentes durante las pruebas, evaluando cómo el pavimento responde a los cambios de temperatura.

**Humedad.** El contenido de agua impacta significativamente en las capas inferiores del pavimento (bases, subbases y subrasantes), ya que sus materiales constituyentes pueden ser altamente sensibles a la presencia de humedad.

**Tiempo de carga.** El tiempo durante el cual se aplica la carga afecta considerablemente los valores de deflexión medidos:

- **Materiales ligados con cemento asfáltico:** Su comportamiento está altamente condicionado por el período de aplicación de carga, debido a las propiedades viscoelásticas del asfalto. Esta influencia disminuye cuando las temperaturas son bajas.
- **Materiales ligados con cemento hidráulico:** Cuando se aplican algunas veces a cargas dinámicas, estos materiales pueden presentar un módulo hasta dos veces mayor que su módulo estático. Este efecto se reduce conforme aumenta el módulo general del material.
- **Suelos finos:** Estos materiales exhiben una mayor resistencia cuando se someten a cargas dinámicas.

### **3.2.2. Subrasantes Heterogéneas**

La base fundamental de cualquier estructura de pavimento es conocida como sub-rasante, que es el terreno natural sobre el cual se construirá. Para determinar si este suelo es adecuado para la construcción, es necesario realizar un análisis exhaustivo de sus características físicas y mecánicas. Este análisis se lleva a cabo mediante diversos ensayos de laboratorio que incluyen la medición del nivel de humedad, el estudio de la distribución del tamaño de las partículas y la determinación de los límites de Atterberg. Además, se realizan pruebas como el Proctor Modificado para evaluar la compactación y CBR. También se efectúan pruebas in situ como el Penetrómetro (DCP) y el ensayo de placa de carga. Los hallazgos de estas evaluaciones permiten determinar si el suelo puede utilizarse directamente o si requiere algún tipo de tratamiento previo a la construcción (Gavilanes, 2012).

Según Ospina-García et al. (2020), la variabilidad en las propiedades de la subrasante puede afectar significativamente la estabilidad y durabilidad de las vías, siendo esencial su adecuada caracterización y, en caso necesario, su mejoramiento mediante técnicas de estabilización. Una subrasante heterogénea se refiere a una capa de suelo situada bajo una estructura de pavimento que presenta variabilidad en sus propiedades físicas y mecánicas a lo largo de su extensión. Esta heterogeneidad puede manifestarse en diferencias de composición granulométrica, contenido de humedad, plasticidad y capacidad de soporte, lo que influye directamente en el comportamiento y desempeño del pavimento construido sobre ella.

#### **Dimensiones de la variable subrasantes heterogéneas**

##### **Composición del suelo**

La composición del suelo se refiere a la proporción y naturaleza de los componentes sólidos, líquidos y gaseosos que lo constituyen. Típicamente, un suelo

ideal está compuesto por aproximadamente 45% de minerales (arena, limo y arcilla), 25% de agua, 25% de aire y 5% de materia orgánica. Los aspectos físicos, químicos y biológicos del terreno están directamente determinadas por los elementos que lo conforman. Esta constitución es fundamental pues define tanto el nivel de fertilidad del terreno como su aptitud para permitir el desarrollo y crecimiento de las plantas (Montaño y Navarro, 2018).

La composición del suelo abarca la distribución de sus fases sólida, líquida y gaseosa. La fase sólida incluye partículas minerales y materia orgánica; la fase líquida corresponde al agua del suelo, que contiene nutrientes disueltos; y la fase gaseosa se refiere al aire presente en los poros del suelo. La interacción y equilibrio entre estas fases determinan las características del suelo, como su estructura, porosidad y capacidad de retención de agua, aspectos fundamentales para su manejo y conservación (Rivera, 2022).

### **Propiedades mecánicas**

El comportamiento de un material cuando se le aplican cargas o fuerzas desde el exterior se conoce como sus propiedades mecánicas. Estos atributos son cruciales ya que establecen hasta qué punto el material puede soportar ser deformado o romperse cuando se somete a distintos tipos de esfuerzos, e incluyen características como resistencia, dureza, ductilidad, tenacidad y elasticidad. La evaluación de estas propiedades es esencial para seleccionar materiales adecuados en aplicaciones estructurales y de ingeniería (Piraquive, 2018).

Los atributos del suelo se pueden clasificar en dos grupos principales: **Características físicas:** estas se emplean como criterios para elegir materiales, establecer requisitos de construcción y verificar que se cumplan los estándares de calidad.

**Características mecánicas:** permiten evaluar y determinar el nivel de idoneidad de los materiales para:

### **Tipos de Suelos de Sub Rasante**

#### **Suelos Granulares**

De acuerdo con Powrie (2010), existen diversos sistemas para categorizar los tipos de suelo, como los establecidos por AASHTO y USCS, los cuales presentan variaciones mínimas entre sí (p.65).

Terzaghi (2013) define al suelo granular como aquel compuesto por diminutas partículas rocosas cuyo diámetro oscila entre 0,05 y dos milímetros, destacándolo como el suelo de menor peso entre todas las variedades existentes.

Por su parte, Ranjan (1996) enfatiza que la ubicación geográfica de los suelos cohesivos juega un papel fundamental en su comportamiento. Señala además que factores como la profundidad y la actividad arcillosa son elementos cruciales que influyen en el desarrollo de las características ingenieriles del suelo (p.430).

#### **Suelo mixto**

Cano (2020) describe que los suelos mixtos se caracterizan por contener una combinación de partículas tanto cohesivas como granulares. Esta variedad de suelo, también conocida como suelos intermedios, se puede encontrar frecuentemente tanto en formaciones naturales como en construcciones artificiales realizadas por el ser humano.

### **Comportamiento estructural**

Características del comportamiento estructural

#### **Evaluación de subrasante**

Los proyectos de ingeniería civil invariablemente se cimientan sobre el terreno natural, y en numerosos casos, el suelo mismo sirve como material constructivo. Por

esta razón, el campo de la mecánica de suelos resulta fundamental, ya que mediante sus análisis podemos determinar la verdadera naturaleza del subsuelo, identificando sus componentes (ya sean arenas, arcillas o formaciones rocosas). Resulta crucial realizar una evaluación exhaustiva del terreno antes de iniciar cualquier construcción, pues esto permite identificar sus propiedades y definir las metodologías constructivas más apropiadas. Este proceso preventivo es esencial para garantizar la estabilidad de la estructura y evitar problemas futuros como asentamientos o grietas, tanto durante el proceso constructivo como en la vida útil de la obra (Salazar, 2015).

### **Pruebas de laboratorio**

La verificación de la calidad de los materiales se ha convertido en un requisito esencial en la construcción civil moderna. El nivel de control requerido varía según la envergadura del proyecto constructivo. Para cualquier obra de ingeniería civil, es necesario conocer ciertos parámetros fundamentales del terreno. La mayoría de estas características se determinan mediante diversos ensayos realizados bajo condiciones controladas en laboratorio. Entre estas pruebas, destaca por su particular relevancia en este proyecto la medición del CBR del suelo, que se describirá a continuación (Salazar, 2015).

### **CBR del suelo**

La prueba CBR tiene como propósito determinar cómo se comportan los suelos que se utilizan principalmente como fundación en obras viales, incluyendo carreteras y pistas de aterrizaje. Esta prueba establece la evaluación entre el valor CBR y la densidad seca que se obtiene en el terreno.

Esta evaluación determina cuánta resistencia tiene el suelo al esfuerzo cortante cuando se controlan factores como la humedad y la densidad. De acuerdo con la ASTM, que lo regula bajo el código ASTM D 1883-73, este procedimiento se conoce

simplemente como "Relación de soporte". Se utiliza para evaluar comparativamente la calidad de suelos destinados a subrasante y ciertos materiales para sub-bases y bases granulares. Es aplicable solo a materiales donde la porción que atraviesa el tamiz de 50 mm y queda retenida en el de 20 mm no supera el 20% del total. Si bien el ensayo puede realizarse tanto en campo como en laboratorio, la versión in situ no es muy común (Salazar, 2015).

**Tabla 4**  
*Categorías de subrasantes*

<b>Categorías de subrasante</b>	
<b>Subrasantes</b>	<b>CBR</b>
S <sub>0</sub> : Subrante inadecuada	CBR < 3%
S <sub>1</sub> : Subrante Pobre	De CBR ≥ 3% a CBR < 6%
S <sub>2</sub> : Subrante Regular	De CBR ≥ 6% a CBR < 10%
S <sub>3</sub> : Subrante Buena	De CBR ≥ 10% a CBR < 20%
S <sub>4</sub> : Subrante Muy buena	De CBR ≥ 20% a CBR < 30%
S <sub>5</sub> : Subrante Extraordinaria	De CBR ≥ 30%

*Nota.* Esta tabla constituye una tabla prototípica, ya que presenta de forma clara y jerarquizada los intervalos de capacidad portante utilizados en el diseño y evaluación de pavimentos flexibles conforme a criterios geotécnicos. Fuente:(MTC, 2014)

### **Determinación del contenido de humedad**

Este parámetro físico resulta fundamental en el ámbito de la construcción civil, ya que las características mecánicas y la capacidad de resistencia del suelo están directamente influenciadas por su contenido de agua. El proceso para obtener esta medida es relativamente simple y se expresa como un porcentaje que representa la proporción entre el peso del agua presente en la muestra y el peso de los componentes sólidos del suelo.

### **Análisis granulométrico**

Es un procedimiento que permite identificar y categorizar la distribución de los diferentes tamaños de partículas que componen una muestra de suelo. Este proceso facilita la clasificación del suelo según estándares establecidos como AASHTO o SUCS. La relevancia de este ensayo radica en que constituye un criterio fundamental para determinar

si un suelo es apto para diversas aplicaciones en ingeniería civil, como su uso en bases y sub-bases de vías, en la construcción de presas terreras, en sistemas de drenaje, entre otros. La metodología empleada consiste en hacer pasar el material por una serie de tamices estandarizados, organizados de mayor a menor abertura, para determinar la proporción de partículas de cada tamaño (Salazar, 2015).

**Tabla 5**

*Numeración y apertura de tamices*

<b>Tamaño y numero de tamices</b>		
<b>Tamiz (Pulg.)</b>	<b>Tamiz (mm)</b>	<b>Tipo de suelo</b>
3"	76.200	Grava
2"	50.800	
1 1/2"	38.100	
1"	25.400	
3/4"	19.050	
1/2"	12.700	
3/8"	9.525	
1/4"	6.350	Arena
N°4	4.750	
N°10	2.000	
N°20	0.850	Arena media
N°40	0.425	
N°50	0.297	Arena fina
N°100	0.149	
N°200	0.075	

*Nota.* Esta tabla constituye una tabla prototípica, ya que organiza de manera sistemática la información normalizada de los tamices estándar empleados en ensayos de laboratorio según normas ASTM o NTP. Fuente: (Salazar 2015)

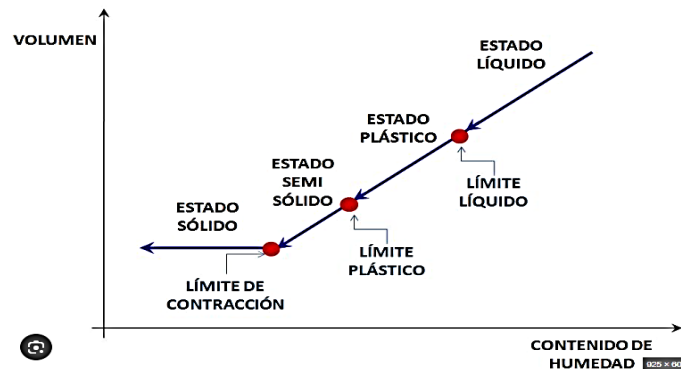
### **Límites de consistencia**

También conocidos como límites de Atterberg, son parámetros que sirven para entender cómo se comportan los suelos compuestos principalmente por partículas finas. Este método de caracterización se fundamenta en el principio de que estos suelos pueden presentar cuatro estados distintos de consistencia, que dependen de su contenido de humedad. Cuando el suelo está seco, se encuentra en estado sólido, ya medida que se le va agregando agua, transita progresivamente por los estados semisólido, plástico y líquido. Los

puntos específicos de humedad donde el suelo cambia de un estado a otro se denominan límites de Atterberg (Salazar, 2015).

## Figura 2

### Límites de Atterberg



*Nota.* Esta figura constituye una figura prototípica, ya que representa de manera esquemática y general los cambios de comportamiento del suelo en función de su contenido de agua, siendo aplicable a estudios de mecánica de suelos y clasificación geotécnica. Fuente: (Frankie, 2023)

La presencia de arcilla en un suelo merece especial atención, particularmente cuando se trata de la sub rasante o de elementos estructurales del pavimento, pues su cantidad puede representar un factor de riesgo considerable. Esto se debe principalmente a que el material arcilloso tiene una alta reactividad con el agua, lo que puede afectar significativamente sus propiedades y comportamiento.

- **Límite plástico:** representa el punto de transición entre los estados semisólidos y plástico del suelo, según la definición de Atterberg. Este investigador descubrió que la plasticidad es la propiedad que permite al suelo deformarse sin que se produzcan grietas ni recuperación elástica de su forma. Para determinar este límite, se mide el porcentaje de humedad en el momento exacto en que pequeños rollos de suelo de 3 mm de diámetro empiezan a mostrar agrietamiento.
- **Límite líquido:** marca el punto de transición donde el suelo pasa del estado plástico

al semilíquido. Su medición se realiza empleando el dispositivo conocido como cuchara de Casagrande, donde se determina el contenido de humedad necesario para que una ranura de 13 mm en la muestra de suelo se cierre después de aplicar exactamente 25 golpes.

- **Límite de retracción o contracción:** señala la frontera entre los estados sólido y semisólido del suelo. Este se define como el contenido de humedad que se alcanza cuando se ha agregado la cantidad necesaria de agua para ocupar todos los espacios vacíos en una muestra de suelo seco. Es importante destacar que este límite representa el punto máximo de humedad en el cual el suelo puede perder agua sin que esto resulte en una reducción de su volumen (Salazar, 2015).

**Tabla 6**

*Clasificación de suelos según Índice de Plasticidad*

<b>Características según plasticidad</b>		
<b>Índice de plasticidad</b>	<b>Plasticidad</b>	<b>Características</b>
IP > 20	Alta	Suelos muy arcillosos
IP ≤ 20    IP > 7	Media	Suelos Arcillosos
IP < 7	Baja	Suelos poco arcillosos
IP = 0	No plástico (NP)	Suelos Exentos de Arcilla

*Nota.* Esta tabla constituye una tabla prototípica, ya que presenta de manera clara los rangos de plasticidad definidos por los límites de Atterberg, herramienta fundamental para la clasificación y caracterización geotécnica de suelos. Fuente: (MTC, 2014).

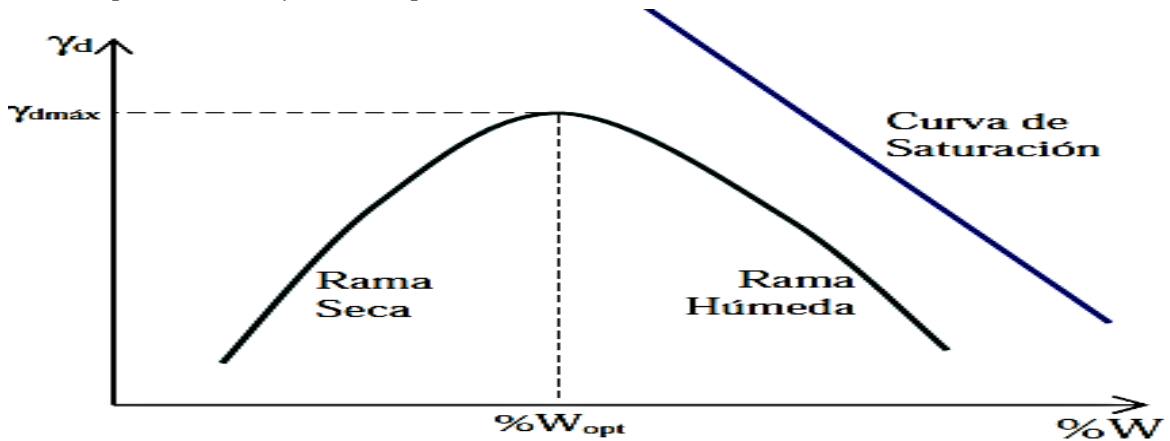
### **Ensayos de compactación del suelo**

Implican un procedimiento artificial mediante el cual se fuerza a las partículas del suelo a establecer un contacto más estrecho entre sí. Esto se logra reducir los espacios vacíos a través de métodos mecánicos, lo que resulta en una mejora significativa de las características ingenieriles del material. Este proceso es fundamental en la ingeniería civil porque permite incrementar la resistencia del suelo y reducir su tendencia a la deformación.

Estos beneficios se consiguen mediante técnicas específicas que aumentan el peso específico seco del suelo mientras disminuyen sus espacios vacíos (Salazar, 2015).

**Figura 3**

*Curva típica del ensayo de compactación*



*Nota.* Esta figura constituye una figura prototípica, ya que ilustra de manera general el comportamiento del suelo durante el proceso de compactación, siendo esencial en estudios de mecánica de suelos y control de calidad en obras geotécnicas. Fuente: (Salazar, 2015).

#### **Beneficios de la compactación:**

- **Mejora la resistencia del suelo a las presiones:** Cuando hay espacios vacíos en el suelo, este se vuelve más débil y menos capaz de sostener pesos importantes. Sin embargo, cuando las partículas están densamente compactadas, el terreno adquiere mayor capacidad para resistir cargas pesadas, ya que los granos del suelo se distribuyen mejor la presión entre sí.
- **Previene que el terreno se hunda:** Cuando una construcción se realiza sobre suelo no compactado o compactado de manera irregular, existe el riesgo de que el terreno ceda, provocando deformaciones en la estructura (conocidas como asentamientos diferenciales). Estas deformaciones son especialmente peligrosas cuando el hundimiento es más pronunciado en un lado o esquina, lo que puede resultar en agrietamientos o incluso en el colapso total de la estructura.
- **Controla el flujo de agua:** Un terreno debidamente compactado tiene menor

permeabilidad, lo que significa que el agua no puede penetrar tan fácilmente. Esto permite un mejor control y regulación del drenaje del agua superficial.

- **Minimiza los cambios volumétricos del suelo:** En suelos no compactados, el agua puede filtrarse fácilmente en los espacios vacíos, lo que causa que el terreno se expanda durante las temporadas lluviosas y se contraiga en épocas secas. Este ciclo de expansión y contracción puede ser perjudicial para las estructuras construidas sobre el suelo.
- **Protege contra los efectos del congelamiento:** Cuando el agua se congela, aumenta su volumen, lo que puede causar que el pavimento se deforme y que aparezcan grietas en paredes y pisos. Al reducir los espacios donde el agua puede acumularse, la compactación del suelo disminuye significativamente el riesgo de estos daños causados por las heladas (Salazar, 2015).

### ***3.2.3. Evaluación estructural***

Los métodos tradicionales para evaluar la condición estructural de pavimentos implican realizar excavaciones, extraer muestras para análisis de laboratorio y estudiar cada material de forma independiente, antes de integrar los resultados para comprender el sistema completo del pavimento. Sin embargo, este enfoque resulta ineficiente debido a su lentitud y naturaleza invasiva que daña la estructura existente (Hoffman, 1985).

En contraste, los nuevos métodos de evaluación implementan tecnología no destructiva (NDT), que se basa en el análisis de las deformaciones superficiales del pavimento. Esta técnica moderna ofrece múltiples ventajas: es sencilla de aplicar, rápida de ejecutar, económicamente viable y, principalmente, preserva la integridad estructural del pavimento al no ser invasiva. El método se fundamenta en el análisis del patrón de deflexiones (también llamado cuenco de deflexiones), y para interpretar

estos datos de manera objetiva, se utiliza un modelo matemático que permite comparar el comportamiento del conjunto pavimento-subrasante.

### **Evaluación estructural basada en ensayos destructivos**

Los métodos de evaluación estructural destructiva consisten en técnicas que requieren modificar o dañar el pavimento en puntos específicos para su análisis. De entre las distintas pruebas destructivas que se emplean para determinar la capacidad portadora de la estructura existente, destaca principalmente:

**La apertura de pozos de exploración.** Esta técnica constituye el método convencional para recopilar datos de diseño, y su propósito principal es analizar las características y propiedades de los materiales que componen las diferentes capas del pavimento, información esencial tanto para el diseño inicial como para la posterior evaluación estructural (Thenoux, 2020).

**Extracción de testigos.** Utiliza un equipo especial de perforación para extraer muestras cilíndricas de las capas superiores del pavimento. Esta técnica se limita principalmente a los materiales asfálticos y de concreto, y permite determinar tanto el grosor de las capas como evaluar las características mecánicas y resistencia de los materiales cementados.

**Placa de carga.** es un método que evalúa la capacidad de soporte en diferentes niveles: desde la subrasante y las capas base, hasta la estructura completa del pavimento, empleando placas de gran diámetro. Sin embargo, su aplicación en pavimentos existentes presenta importantes limitaciones prácticas y económicas, ya que requiere la excavación de calicatas de gran tamaño. Debido a estas desventajas, este método ha ido perdiendo relevancia y uso en la práctica actual.

**Penetrómetro Dinámico de Cono.** es un instrumento que facilita la evaluación rápida in situ de las propiedades de las capas inferiores del pavimento,

incluyendo tanto la subrasante como las bases granulares. Su funcionamiento se fundamenta en el impacto de un peso que se deja caer desde una altura específica, provocando que una punta cónica penetre en el suelo. El ensayo mide la profundidad de penetración del cono por cada serie de golpes de soporte (conocida como PR), y este valor se correlaciona directamente con los índices de CBR del material analizado.

### **Evaluación estructural basada en ensayos no destructivos**

Son aquellos que permiten analizar la resistencia estructural de un pavimento sin necesidad de alterar o dañar su estructura. Estos procedimientos se clasifican en dos categorías principales: aquellos basados en la medición de deflexiones y los que utilizan evaluaciones empíricas (Thenoux, 2020).

**Medidas de Deflexión:** son procedimientos que evalúan la respuesta elástica del pavimento. Consiste en aplicar fuerzas controladas sobre la superficie, ya sea de forma estática o dinámica, para provocar deformaciones temporales en el material. Una característica fundamental de estas deformaciones es su naturaleza reversible: el pavimento recupera su forma original cuando se retira la fuerza aplicada.

Para realizar estas mediciones se emplean diversos instrumentos especializados, entre los que se encuentran la tradicional Viga Benkelman, el Deflectómetro, el sistema Dynaflect, y el más avanzado Deflectómetro de Impacto o FWD (Falling Weight Deflectometer). Cada uno de estos equipos permite obtener datos precisos sobre el comportamiento elástico del pavimento.

**Evaluaciones Empíricas:** que se clasifica dentro de las Evaluaciones Empíricas, es un sistema de análisis que se distingue de las pruebas físicas tradicionales. En lugar de realizar ensayos directos, este enfoque se centra en estudiar la evaluación entre dos factores clave: el deterioro estructural que ha sufrido el pavimento y la cantidad acumulada de cargas de tráfico que han circulado sobre él a lo largo del tiempo.

Es decir, examina cómo el uso real de la vía ha impactado en la degradación de su estructura (Thenoux, 2020).

### 3.3. Definición de términos

- **Capas granulares:** son los estratos compuestos por materiales extraídos de canteras que deben cumplir con las especificaciones técnicas establecidas en la norma CE.010, tanto en sus propiedades físicas como químicas y mecánicas. Estos materiales se utilizan para construir la base y subbase del pavimento.
- **Carga vehicular:** representa el peso que los vehículos transmiten al pavimento a través del punto donde las llantas hacen contacto con la superficie (Falcon, 2019).
- **Carpeta asfáltica:** Se conoce como capa superior del pavimento, que está compuesta por una mezcla de agregados pétreos con una granulometría específica y materiales bituminosos (Guitierres y Bravo, 2007).
- **Deflexión:** se refiere al cambio en el grosor que experimenta el pavimento entre su estado inicial y final cuando se le aplica una carga (Deng y otros, 2021).
- **Deformación:** describe las alteraciones temporales del espesor del pavimento causadas por el peso de los vehículos, con la característica de que el material regresa a su estado original cuando se retira la carga (Deng y otros, 2021).
- **Desempeño estructural:** hace referencia a cómo responde la estructura del pavimento cuando está sometida a las cargas de los vehículos (Deng y otros, 2021).
- **Esfuerzo vertical:** es la fuerza que se distribuye internamente en la estructura a lo largo del eje Y, generada por el peso de los vehículos (Berazain, 2022).
- **Estados tensionales:** son las reacciones que se generan dentro del pavimento cuando se aplican las cargas del tráfico. Estos incluyen los esfuerzos y deformaciones verticales, las deformaciones radiales y las deflexiones (Berazain, 2022).
- **Material para base y sub base:** se utilizan agregados de cantera que deben satisfacer

criterios específicos establecidos en la norma NE. 010(Higuera, 2010).

- **Método AASHTO 93:** es una metodología empírica desarrollada para calcular los espesores necesarios en pavimentos flexibles, calculando en observaciones realizadas en tramos de prueba (Garcia, 2015).
- **Método racional:** es una técnica analítica para estudiar y evaluar estructuras de pavimento. Se fundamenta en la hipótesis de Boussinesq y utiliza ecuaciones que transforman un sistema de Múltiples capas en uno de capa única, permitiendo calcular los esfuerzos, deformaciones y deflexiones en el modelo estudiado.
- **Modelo de pavimento:** representa una estructura diseñada específicamente para cierto volumen de tráfico y condiciones particulares de subrasante. Sus dimensiones se determinan siguiendo el método AASHTO 1993, como se detalla en el manual PT-62 del ICG. (CE.10 PAvimentos Urbanos)
- **Pavimento:** es una estructura diseñada para atenuar los estados tensionales generados por el tráfico vehicular. Debe mantener un comportamiento estructural adecuado durante su vida útil y garantizar condiciones óptimas de circulación (CE.10 PAvimentos Urbanos).
- **Subrasante:** es el terreno natural sobre el cual se construyen las diferentes capas que conforman el pavimento. (CE.10 PAvimentos Urbanos).

## IV. Metodología

### 4.1. Tipo y nivel de investigación

Esta investigación es de tipo aplicada porque se enfoca en resolver un problema específico y práctico en un contexto real. En este caso, el problema es la evaluación del comportamiento estructural de pavimentos flexibles en la carretera Abancay – Andahuaylas, que presenta una subrasante heterogénea. La investigación aplicada se caracteriza por utilizar el conocimiento existente y las teorías desarrolladas para abordar situaciones concretas, con el objetivo de generar soluciones efectivas y aplicables directamente en el campo (Ñaupas, et al. , 2019).

La investigación es de naturaleza explicativa porque busca comprender las causas y efectos asociados al desempeño estructural de pavimentos flexibles en condiciones de subrasantes heterogéneas. Este enfoque trasciende la mera descripción o relación de variables, ya que su objetivo principal es identificar, analizar y explicar los mecanismos que generan el comportamiento observado en el pavimento bajo las condiciones geotécnicas y de tránsito específicas de la región de estudio (Tamayo, 2020). La investigación explicativa se caracteriza por:

La investigación se centra en explicar cómo las propiedades heterogéneas de las subrasantes (diferencias en resistencia, capacidad portante, contenido de humedad, etc.) influyen en el comportamiento estructural del pavimento flexible.

A través del análisis estructural, se examina el impacto combinado de las condiciones del subsuelo, el diseño del pavimento y las cargas dinámicas del tránsito. Esto permite identificar qué factores específicos contribuyen al desempeño positivo o

Al explicar las interacciones entre las propiedades de la subrasante y las capas del pavimento, la investigación genera conocimiento útil para proponer soluciones adaptadas al contexto geotécnico de la carretera Abancay-Andahuaylas. Esto implica ir

más allá de la simple observación para comprender el porqué de los problemas y cómo resolverlos.

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

### **Temporal**

La investigación se desarrollará en un tiempo promedio de 06 meses dando inicio de junio del año 2024

### **Espacial**

Es el espacio geográfico acotado, dentro del cual están situados el tema y el problema a investigar. Este estudio se llevará a cabo en el pavimento flexible del recorrido Abancay – Andahuaylas los cuales recorren 150 kilómetros evaluando tramos que se consideran de mayor relevancia.

## **4.3. Población y muestra**

### **4.3.1. Población**

La población de estudio para esta investigación comprende todos los tramos de la carretera Abancay – Andahuaylas en la región de Apurímac que son 150 km aproximadamente que presentan pavimentos flexibles construidos sobre subrasantes heterogéneas. Esto incluye tanto las secciones ya existentes como las recientemente construidas, abarcando diversas condiciones geográficas y tipos de suelo encontrados a lo largo de la carretera (Arias, 2021).

### **4.3.2. Muestra**

La muestra para el estudio será una selección representativa de los tramos de la carretera Abancay – Andahuaylas, que se eligen en base a ciertos criterios específicos, tales como:

**Variabilidad de la subrasante:** Se incluirán tramos con diferentes tipos de subrasantes heterogéneas para asegurar una representación adecuada de las condiciones del suelo.

**Condiciones del pavimento:** Se seleccionarán tramos con distintos estados de conservación del pavimento, desde los más nuevos hasta los más deteriorados.

**Accesibilidad y seguridad:** Se considerarán tramos que sean accesibles y seguros para realizar las mediciones y evaluaciones necesarias.

El análisis deflectométrico será una herramienta clave para evaluar la muestra seleccionada, permitiendo obtener datos precisos sobre el comportamiento estructural del pavimento en las distintas condiciones de subrasante presentes.

#### **4.4. Instrumentos**

##### **Instrumentos**

Deflectómetro: Para medir la deflexión del pavimento bajo carga.

Herramientas de medición geométrica: Para determinar el radio de curvatura del pavimento.

Pruebas de laboratorio: Para analizar la composición del suelo, incluyendo pruebas de granulometría.

Pruebas de CBR: Para evaluar la resistencia y capacidad de soporte del suelo.

#### **4.5. Procedimientos**

##### **4.5.1. Investigación Geotécnica de Campo**

- **Reconocimiento del terreno:** Se llevará a cabo un reconocimiento preliminar de la carretera en estudio, identificando las características geológicas, geomorfológicas y las pendientes del terreno, tal como se detalla en el Informe de Mecánica de Suelos.
- **Calicatas exploratorias:** Se realizarán excavaciones en puntos estratégicos a lo largo del tramo Abancay – Andahuaylas para evaluar la estratigrafía de la subrasante. Las calicatas deben alcanzar profundidades de hasta 1.50 metros y

se tomarán muestras disturbadas para análisis de laboratorio, siguiendo las normativas del MTC.

#### **4.5.2. Ensayos de Laboratorio**

**Análisis granulométrico:** Se llevará a cabo para determinar la distribución de tamaños de partículas de suelo en cada muestra tomada, utilizando tamices hasta de 74 mm.

**Ensayo Proctor Modificado:** Para determinar la relación entre el contenido de agua y la densidad seca máxima del suelo, el ensayo de compactación se realizará siguiendo las especificaciones del Manual de Ensayos del MTC.

**Índice de Plasticidad y Límite Líquido:** Para caracterizar el comportamiento del suelo ante la variabilidad de humedad, se medirán los límites líquido y plástico de las muestras utilizando las normas ASTM.

**CBR (California Bearing Ratio):** El ensayo de CBR será esencial para evaluar la capacidad de soporte del suelo en diferentes condiciones de compactación, determinando su aptitud para ser utilizado en la estructura del pavimento.

#### **4.5.3. Medición de Deflexiones**

- Se llevo a cabo una evaluación estructural del pavimento existente utilizando la Viga Benkelman, realizando mediciones de deflexión bajo carga para identificar la capacidad de soporte del pavimento. Las mediciones se tomarán cada 50 metros a lo largo del tramo crítico definido.
- El ensayo se realizó bajo la carga de un eje posterior de 8.2 toneladas y presión de inflado de 80 PSI. Se registrarán las deflexiones en varios puntos para construir una curva de deflexión, evaluando la condición estructural del pavimento.

#### 4.5.4. Análisis de resultados

- **Determinación de la deflexión característica:** Con los datos de las mediciones de deflexión, se calculará la deflexión característica ( $D_c$ ) para cada sección del pavimento utilizando métodos estadísticos, como la media y la desviación estándar.
- **Comparación con deflexiones admisibles:** Los resultados obtenidos se compararán con las deflexiones admisibles calculadas según el método Conrevial, considerando los ejes equivalentes de carga.

#### 4.6. Análisis de datos

##### **Recolección de Datos:**

- **Deflectometría:** Se utilizará el análisis deflectométrico para medir la respuesta estructural del pavimento flexible ante cargas aplicadas, capturando datos de deflexión en puntos específicos de la carretera Abancay Andahuaylas.
- **Ensayos de Campo:** Se realizar pruebas in situ, como la apertura de pozos de exploración, para evaluar las condiciones de la subrasante y el comportamiento del pavimento bajo cargas reales.

##### **Análisis de Datos:**

- **Análisis Descriptivo:** Se utilizará técnicas descriptivas para resumir y presentar los datos recolectados, como medidas de tendencia central (media, mediana) y de dispersión (desviación estándar).
- **Comparación y Validación:** Se comparará los resultados obtenidos con modelos teóricos y validará los datos mediante la calibración de los modelos numéricos con los resultados de los ensayos de campo.

**Presentación de Datos:**

- **Gráficos y Tablas:** Se utilizará gráficos (curvas de deflexión, histogramas) y tablas para visualizar los datos de manera clara y concisa.
- **Informes Técnicos:** Se elaborará informes detallados que incluyan la metodología, resultados, análisis y conclusiones, acompañados de las representaciones gráficas y tabulares.

**Software y Herramientas:**

- **Herramientas Estadísticas:** Utilizar software estadístico como SPSS o R para el análisis descriptivo y la interpretación de datos.
- **GIS:** Integrar sistemas de información geográfica (GIS) para la creación de mapas y la visualización espacial de los datos recolectados.

Estos métodos y técnicas asegurarán un análisis riguroso y una presentación clara de los datos recolectados, proporcionando información valiosa para la evaluación y mejora del pavimento flexible en la carretera Abancay – Andahuaylas.

**4.7. Consideraciones éticas**

**Respeto al entorno y a las comunidades locales:** Durante el desarrollo del análisis estructural de pavimentos, se velará por el respeto al entorno y las comunidades aledañas a la carretera Abancay – Andahuaylas. No se realizarán intervenciones que puedan generar daños ambientales irreversibles ni afectar la calidad de vida de las personas que residen cerca de la zona de estudio. Además, se buscará la autorización de las comunidades y autoridades locales cuando sea necesario.

**Transparencia en los métodos y resultados:** Se garantizará la total transparencia en los métodos empleados y los resultados obtenidos. La información recogida será procesada y reportada de forma honesta y sin alteraciones que puedan inducir a errores o conclusiones erróneas. En caso de hallarse limitaciones en los datos

o resultados, estas serán claramente especificadas en los informes correspondientes.

**Confidencialidad de los datos:** En el caso de que la investigación requiera la recopilación de información personal de los trabajadores o residentes de la zona, se asegurará la protección de su privacidad. Los datos personales serán manejados bajo estrictos criterios de confidencialidad y solo se utilizarán para los fines específicos del estudio, de acuerdo con las normativas nacionales vigentes sobre protección de datos.

## V. Resultados y discusión

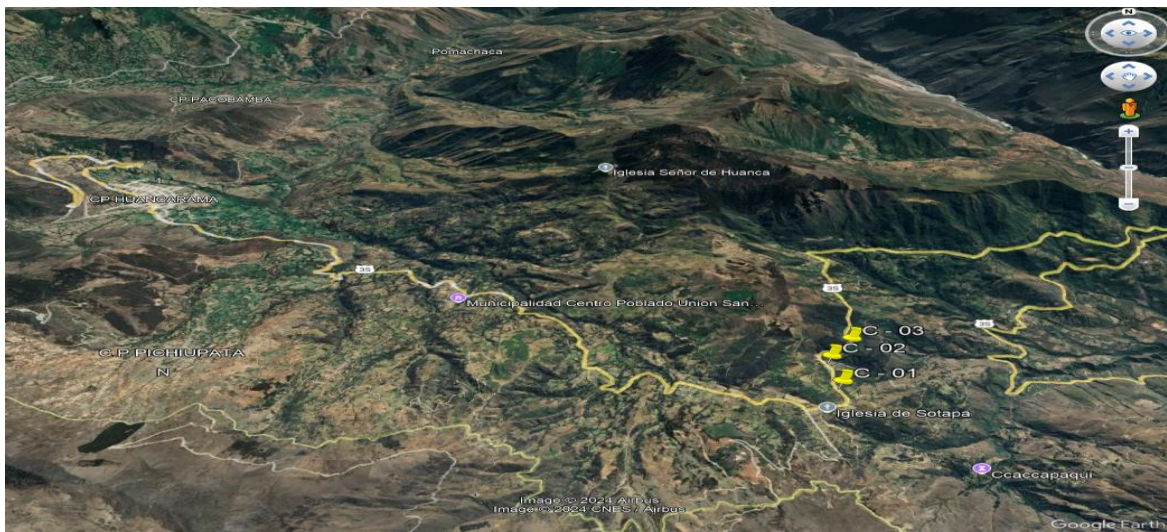
### 5.1 Resultados

#### Ubicación

**La zona del presente estudio se encuentra ubicada en el distrito de Huancarama, provincia de Andahuaylas, Región Apurímac.**

#### Figura 4

*Ubicación de la zona de estudio*



*Nota.* Esta imagen constituye una figura prototípica, ya que representa de forma general la localización espacial del área de estudio, permitiendo contextualizar la distribución de los puntos de muestreo y su relación con el entorno geográfico. Fuente: Google Maps (2024).

#### Acceso al área de estudio

La ciudad de Abancay se articula mediante un sistema de transporte terrestre. El acceso por vía terrestre desde la plaza de armas hasta el lugar del proyecto es por un tramo de 49.3 Km. Y un tiempo de recorrido de 1 h 06 min. Aproximadamente.

**Tabla 7***Acceso al área de estudio*

<b>Desde</b>	<b>Hasta</b>	<b>Distancia (km)</b>	<b>Tipo de vía</b>	<b>Tiempo (min)</b>
Plaza de Armas Abancay, Jr. Lima 401, Abancay 03001	Sotapa - Huancarama, Andahuaylas, Perú	49.3 km	Asfaltada	1.06 min

*Nota.* Esta tabla constituye una tabla prototípica, ya que organiza información geográfica y de desplazamiento de manera estructurada, facilitando la comprensión de la ubicación y accesibilidad entre los puntos de interés en el contexto del estudio. Fuente: Laboratorios METROASPHALT SAC 2024.

### **Aspectos geomorfológicos**

#### **Pendientes del terreno**

La forma del terreno fue transformada por intensos procesos tectónicos que incluyeron importantes fuerzas de presión y compresión. Estos procesos generaron pliegues y fallas que están directamente vinculados con la actividad tectónica y el proceso de elevación de los Andes. Estas alteraciones modificaron significativamente la configuración del valle, que más tarde fue recubierto por materiales provenientes tanto de la actividad glacial-fluvial como de depósitos aluviales.

La región de Apurímac experimenta actualmente importantes transformaciones en su geografía. Su territorio, caracterizado por valles entre montañas y elevadas cumbres con pronunciadas pendientes, está sufriendo notables modificaciones en la composición y estructura de sus suelos. Estos cambios se manifiestan tanto en su forma como en sus propiedades edáficas, principalmente debido a intensos procesos de erosión. La degradación del suelo ocurre por la acción combinada de fenómenos naturales y factores externos, siendo particularmente vulnerable a la erosión debido a su topografía. Esta susceptibilidad se ve agravada por una intensa actividad geodinámica externa, impulsada por variaciones

climáticas que provocan la fragmentación de rocas, tanto por cambios de temperatura (termoclastismo de exfoliación) como por la acción del agua (hidroclastismo).

**Tabla 8**

*Aspectos geomorfológicos del terreno*

Grandes unidades Geomorfológicas	Características generales		Procesos Morfodinámicos actuales
	Factores geodinámicos	Formas originadas	
Cadena montañosa	Elementos relacionados con el relieve del terreno, la composición y ordenamiento de las capas geológicas, así como la forma en que estas capas están distribuidas.	Montañas denudativas y disectadas, zonas de cárcavas y escarpas.	Remoción en masa, socavamientos, deslizamientos, erosión fluvial y erosión de taludes.
Altiplanicies disectadas	Estratigráficos y climatológicos	Cambios bruscos de temperatura en el tipo rocoso superficial	Superficies estructurales y onduladas
Laderas empinadas	Factores topográficos, stratigráficos y litológicos.	Zonas fracturadas e inestabilidad de taludes	Desgaste progresivo tanto de las pendientes naturales como de las zonas bajas donde se acumulan sedimentos al pie de las montañas.
Valle de fondo amplio	Hidrológicos, escorrentías de agua superficial.	Terrazas aluviales y conos de deyección.	Desprendimientos de tierra y rocas en áreas que presentan inestabilidad geológica
Valle intermedio	Factores hidrológicos, topográficos. Escorrentía superficial.	Zonas de escarpa, canales de drenaje.	Erosión de laderas
Valle encañonado	Paredes de la roca	Zonas de escarpas y barrancos	Erosión de las escarpas y derrumbes.

*Nota.* Esta tabla constituye una tabla prototípica, ya que organiza de manera estructurada la información geomorfológica, facilitando el análisis comparativo de las unidades del relieve y su influencia en la estabilidad del terreno. Fuente: Laboratorios METROASPHALT SAC. 2024.

## Localización de las calicatas de estudio

Se ha realizado un reconocimiento del área del proyecto para la distribución de las calicatas, se han efectuado un total de un (01) punto de exploración, realizándose (03) calicatas a cielo abierto basado en la norma técnica peruana NTP E.050 Suelos y Cimentación. De acuerdo a las áreas donde se emplaza las estructuras de concreto armado y para los fines del proyecto. La profundidad mínima de excavación alcanzó 1.50 m. El resumen de la ubicación de los puntos de investigación se muestra a continuación:

### 5.1.1. Identificación del tipo de suelo de la estructura de pavimentos flexibles sobre subrasantes heterogéneas en la carretera Abancay – Andahuaylas

**Tabla 9**

*Localización de las calicatas de estudio*

N° calicata	Profundidad (m)	Este	Norte
<b>C – 01</b>	1.50 m	714092.00 m	8486444.00 m
<b>C – 02</b>	1.50 m	714048.00 m	8486894.00 m
<b>C – 03</b>	1.50 m	714290.00 m	8487235.00 m

*Nota.* Esta tabla constituye una tabla prototípica, ya que organiza la información básica de ubicación y profundidad de los puntos de excavación, necesaria para la caracterización del suelo en estudios de mecánica de suelos o control de calidad en obras civiles. Fuente: Laboratorios METROASPHALT SAC 2024.

**CALICATA 01:** En este punto se ha verificado que hay una capa de cobertura o primer estrato de 0.20 m de estrato está compuesto por materia orgánica y suelos antrópicos (contaminado con restos de residuos ajenos a un estrato de formación natural), como último estrato predominante de 0.20 m a 1.50 m son Grava mal Graduada con Arcilla GC y GP , con presencia de boloneras de hasta  $\geq 4$  “pulgadas, las partículas son de forma angulares, en condición natural tienen una coloración Pardo Gris y su compacidad de este estrato es buenos a medida que se va adentrando en ella. En esta calicata se ha alcanzado una profundidad máxima de 1.50 m.

**CALICATA 02:** En este punto se ha verificado que hay una capa de cobertura o primer estrato de 0.20 m de estrato está compuesto por materia orgánica y suelos antrópicos (contaminado con restos de residuos ajenos a un estrato de formación natural), como último estrato predominante de 0.20 m a 1.50 m son Grava mal Graduada con Arcilla GP y GC , con presencia de boloneras de hasta  $\geq 4$  “pulgadas, las partículas son de forma angulares, en condición natural tienen una coloración Pardo Gris y su compacidad de este estrato es buenos a medida que se va adentrando en ella. En esta calicata se ha alcanzado una profundidad máxima de 1.50 m.

**CALICATA 03:** En este punto se ha verificado que hay una capa de cobertura o primer estrato de 0.30 m de estrato está compuesto por materia orgánica y suelos antrópicos (contaminado con restos de residuos ajenos a un estrato de formación natural), como último estrato predominante de 0.30 m a 1.50 m son Gravas Arcillosas GC, con presencia de boloneras de hasta  $\geq 2$  “pulgadas, las partículas son de forma angulares, en condición natural tienen una coloración Pardo Rojizo y su compacidad de este estrato es buenos a medida que se va adentrando en ella. En esta calicata se ha alcanzado una profundidad máx. de 1.50 m.

### **Resultados de los ensayos realizados a las calicatas**

Se han realizado los ensayos para la determinación del peso volumétrico del suelo, así como también la determinación del número de golpes ante la penetración dinámica ligera y ensayos de corte directo, para los cuales se tienen los siguientes resultados:

**Tabla 10**

*Determinación de peso volumétrico del suelo*

<b>Nº Calicata</b>	<b>Estrato</b>	<b>Peso volumétrico natural (TN/M<sup>3</sup>)</b>	<b>Peso volumétrico natural seco (TN/M<sup>3</sup>)</b>
C – 01	E – 02	1.84	1.77
C – 02	E – 02	1.86	1.75
C – 03	E – 02	1.85	1.68

*Nota.* Esta tabla constituye una tabla prototípica, ya que organiza de manera estandarizada los resultados del ensayo de densidad, fundamental en el análisis físico del suelo para obras viales y geotécnicas. Fuente: Laboratorios METROASPHALT SAC 2024.

El Peso volumétrico natural y seco se utilizan principalmente para evaluar la capacidad de carga del terreno, densidad y compacidad teniendo que C-01 y c-02 tienen los valores más altos que indica que el material tiene mayor densidad a comparación de C-03.

**Tabla 11**

*Determinación de ángulo de fricción y cohesión del suelo*

N° Calicata	Estrato	Ángulo de fricción Corregido (°)	Cohesión (TN/M <sup>3</sup> )
C – 01	E – 02	17.81	0.25
C – 02	E – 02	21.06	0.28
C – 03	E – 02	20.90	0.39

*Nota.* Esta tabla constituye una tabla prototípica, ya que organiza de manera clara los resultados de los ensayos triaxiales o de corte directo, esenciales en el análisis geotécnico.

Fuente: Laboratorios METROASPHALT SAC. 2024.

El Angulo de fricción interna del suelo se ha obtenido por medio del ensayo de corte directo.

La cohesión del suelo se ha determinado mediante el ensayo de corte directo ya que este brinda mayor confiabilidad para la determinación de dicho parámetro obteniendo valores normales para el tipo de suelo estudiado.

**Tabla 12**

*Parámetros del suelo mediante los ensayos de campo y laboratorio*

N° de calicata	Estrato	Peso volumétrico natural (tn/m <sup>3</sup> )	Peso volumétrico natural seco (tn/m <sup>3</sup> )	Angulo de fricción Corregido (°)*	Cohesión (tn/m <sup>3</sup> )
C – 01	E – 02	1.84	1.77	17.81	0.25
C – 02	E – 02	1.86	1.75	21.06	0.28
C – 03	E – 02	1.85	1.68	20.90	0.39

*Nota.* Esta tabla constituye una tabla prototípica, ya que integra de forma sistemática los resultados más representativos de las propiedades físicas y mecánicas del suelo, esenciales para el análisis geotécnico y la evaluación estructural del pavimento. Fuente: Laboratorios METROASPHALT SAC. 2024.

Se presenta los valores de los diferentes parámetros del suelo obtenido por medio de los diferentes ensayos realizados tanto in situ como en laboratorio hasta una profundidad de 1.50 m en las tres calicatas.

**Tabla 13**

*Análisis Granulométrico*

<b>Análisis granulométrico</b>									
<b>Identificación</b>		<b>Análisis granulométrico</b>					<b>Contenido</b>		
<b>Cal.</b>	<b>Estra.</b>	<b>% que pasa la malla n°</b>					<b>Grava</b>	<b>Arena</b>	<b>Finos</b>
N°	N°	N°4	N°10	N°40	N°100	N°200	%		
C – 01	E – 02	28.39	21.79	15.35	11.44	10.13	71.61	18.26	10.13
C – 02	E – 02	34.52	24.27	15.58	11.88	11.01	65.48	23.51	11.01
C – 03	E – 02	84.51	68.22	45.46	38.25	36.86	15.49	47.65	36.86

*Nota.* Esta tabla constituye una tabla prototípica, ya que organiza de manera técnica los resultados del ensayo granulométrico, fundamental para la clasificación del suelo según las normas ASTM D422 y SUCS, permitiendo determinar su comportamiento mecánico en pavimentos y cimentaciones. Fuente: Laboratorios METROASPHALT SAC.2024.

La prueba granulométrica permite establecer la distribución porcentual de las diferentes fracciones del suelo utilizando una serie de tamices estandarizados, que van desde 4 pulgadas hasta el tamiz número 200. Para clasificar los suelos según el tamaño de sus partículas, se emplea el tamiz N ° 200 como punto de separación entre materiales gruesos y finos. La clasificación específica establece que el material considerado como grava es aquel que queda retenido entre los tamices de 75 milímetros y el N° 10. Por su parte, la arena corresponde al material que se retiene entre los tamices N° 10 y N° 200. Finalmente, las partículas más finas que atraviesan el tamiz N° 200 se clasifican como limo y arcilla.

**Tabla 14**  
*Límites de atterberg*

<b>Límites de atterberg, humedad y clasificación</b>							
<b>Identificación</b>		<b>Límites de plasticidad, %</b>			<b>Hum. Nat</b>	<b>Clasificación</b>	
<b>Cal.</b>	<b>Muest.</b>					<b>SUCS</b>	<b>ASTHO</b>
<b>N°</b>	<b>N°</b>	<b>LL</b>	<b>LP</b>	<b>IP</b>	<b>W<sub>n</sub> %</b>		
C - 01	E - 02	21.21	0	21.21	3.97	GP GC	A-2-6
C - 02	E - 02	21.10	0	21.10	6.34	GP GC	A-2-6
C - 03	E - 02	19.15	11.2	7.95	9.95	GC	A-4

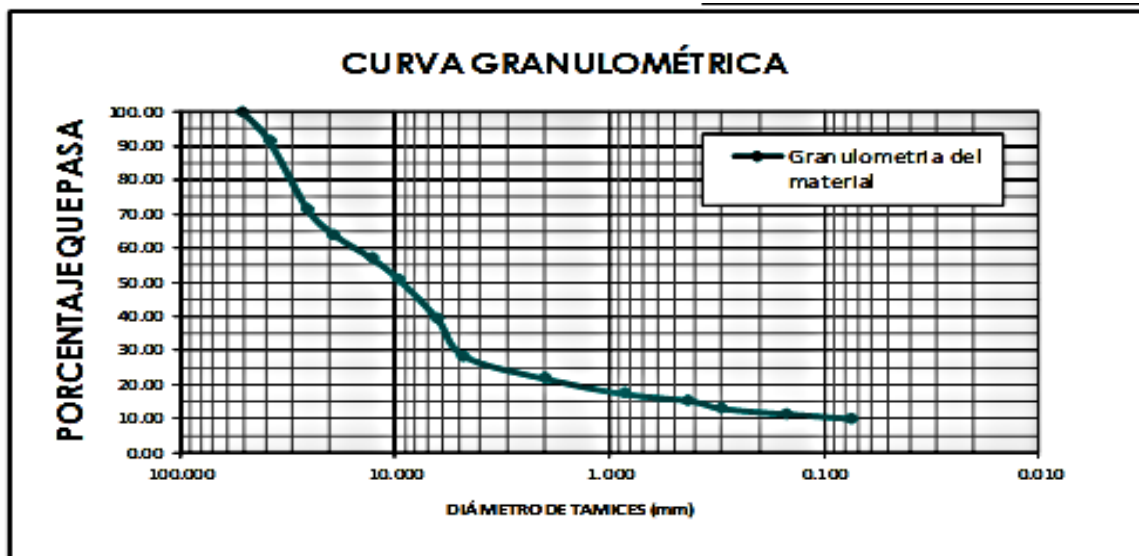
*Nota.* En cuanto a la clasificación SUCS, los suelos de C-01 y C-02 corresponden a GP-GC (gravas mal graduadas con finos arcillosos), mientras que el de C-03 pertenece a la clase GC (grava arcillosa). Según AASHTO, los dos primeros se clasifican como A-2-6, adecuados para subrasantes de calidad media, y el tercero como A-4, representativo de materiales más finos y con menor capacidad de soporte. Fuente: Laboratorios METROASPHALT SAC.2024.

Los suelos se clasifican en ocho grupos, A-1 a A-8. Los grupos principales A-1, A-2 y A-3 representan los suelos de grano grueso y los A-4, A-5, A-6 y A-7 representa suelos de grano fino. A-8 se identifican mediante inspección visual. Y teniendo en cuenta los rangos de LL y IP para los grupos A-4, A-5 A-6 y A-7. Teniendo como resultado de las muestras estudiadas:

C -01 - grava mal graduada con arcilla (GP GC)

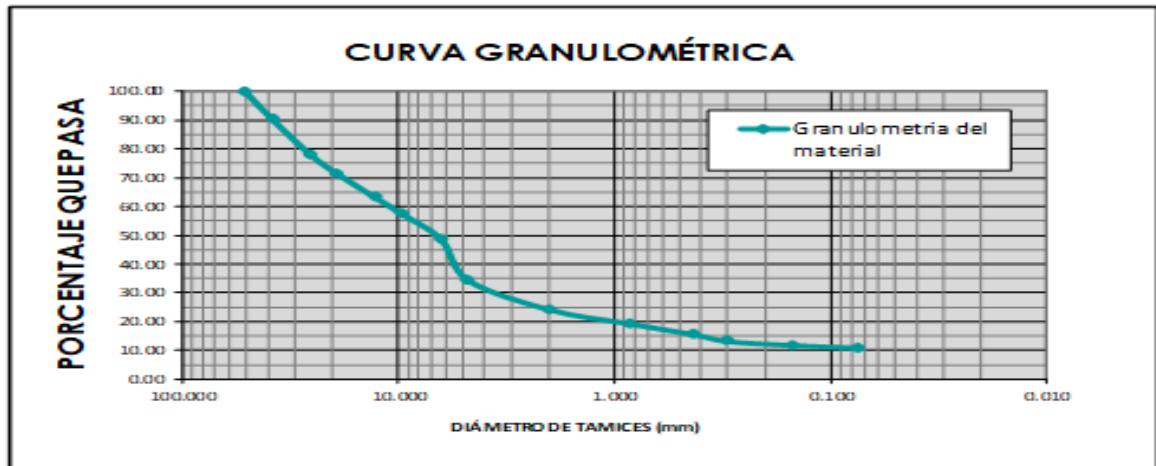
C -02 - grava mal graduada con arcilla (GP GC)

C -03 - grava arcilla con arena (GC)

**Figura 5***Curva Granulométrica C-01*

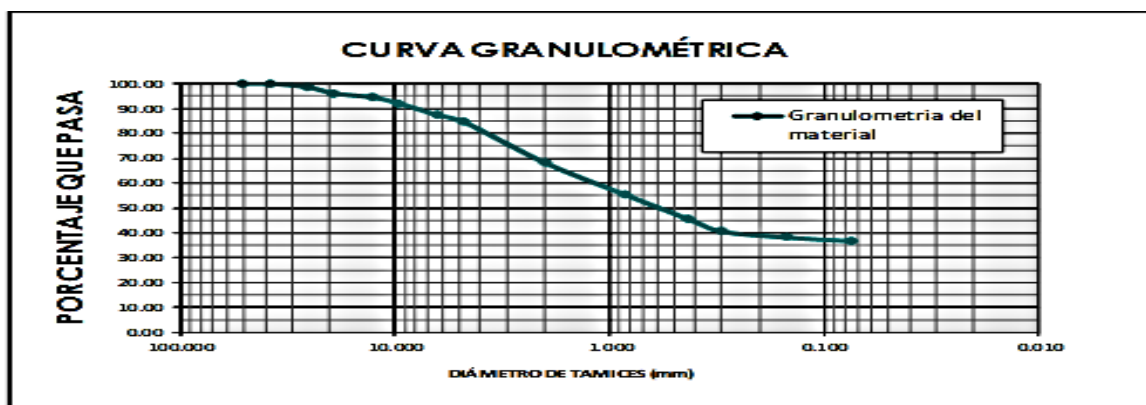
*Nota.* Esta figura constituye una figura prototípica, ya que representa de manera estándar la relación granulométrica de un suelo o agregado, permitiendo clasificarlo según normas técnicas como ASTM D422 o NTP 339.128. Fuente: Laboratorios METROASPHALT SAC.2024.

Se presenta la curva granulométrica de la calicata C-01 clasificada como GC GP estos suelos tienen una buena proporción de grava y arena, lo que sugiere que pueden ofrecer una buena capacidad de carga y drenaje.

**Figura 6***Curva Granulométrica C-02*

*Nota.* Esta figura constituye una figura prototípica, ya que representa de manera estándar la relación granulométrica de un suelo o agregado, permitiendo clasificarlo según normas técnicas como ASTM D422 o NTP 339.128. Fuente: Laboratorios METROASPHALT SAC.2024.

Se presenta la curva granulométrica de la calicata C-02 clasificada como GC GP estos suelos tienen una buena proporción de grava y arena, lo que sugiere que pueden ofrecer una buena capacidad de carga y drenaje.

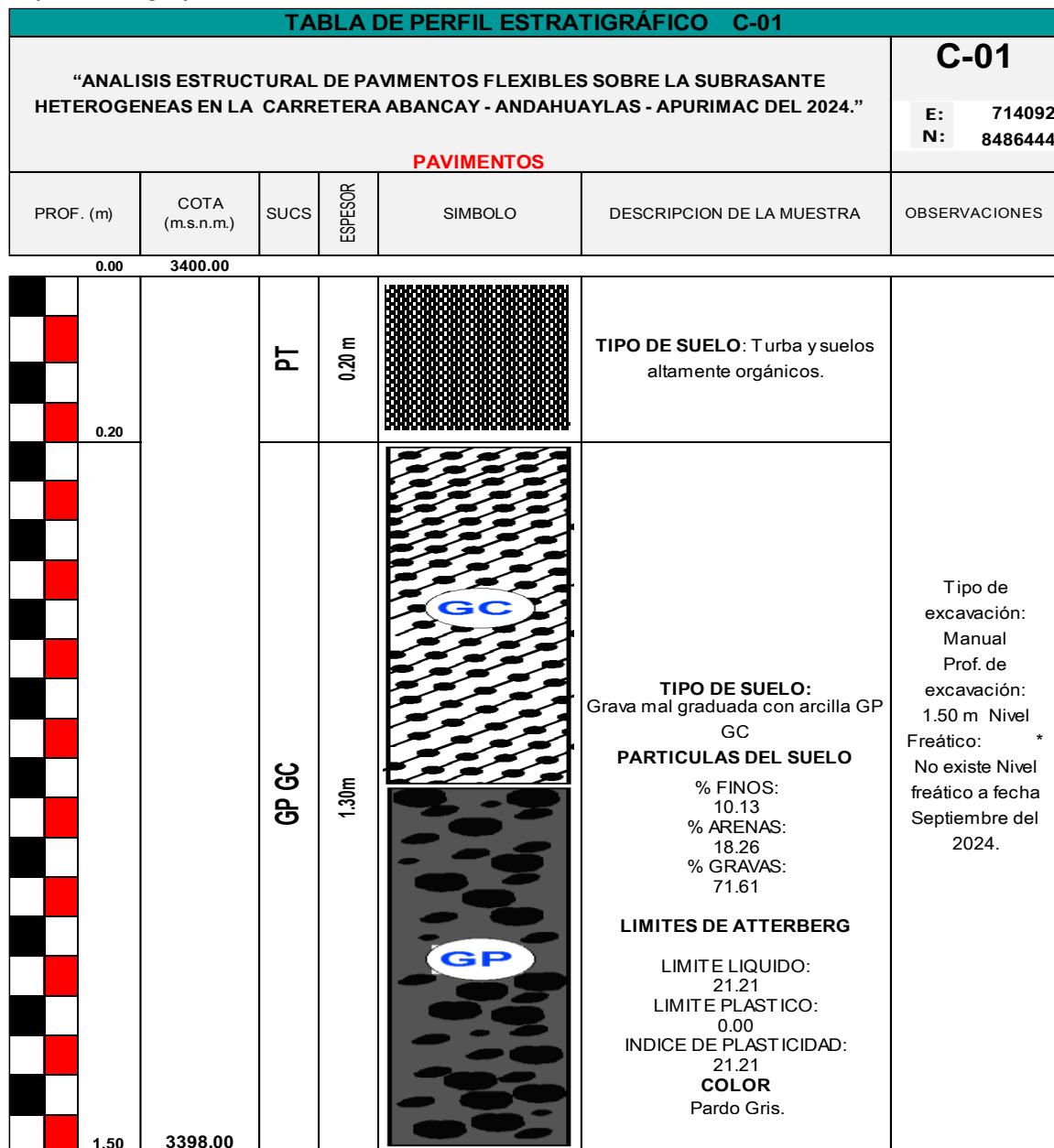
**Figura 7***Curva Granulométrica C-03*

*Nota.* Esta figura constituye una figura prototípica, ya que representa de manera estándar la relación granulométrica de un suelo o agregado, permitiendo clasificarlo según normas técnicas como ASTM D422 o NTP 339.128. Fuente: Laboratorios METROASPHALT SAC.2024.

Se presenta la curva granulométrica de la calicata C-03 clasificada como GC que presenta una alta cantidad de finos, lo que podría indicar un comportamiento más plástico y menos permeable.

**Figura 8**

*Perfil estratigráfico C-01*

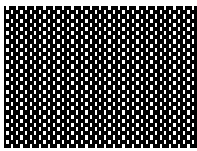
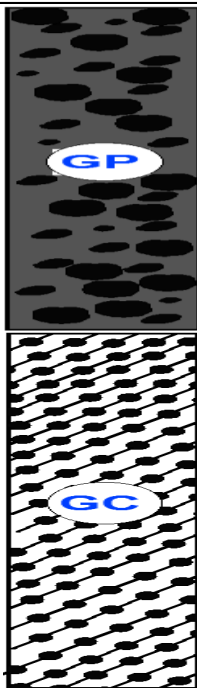


*Nota.* Esta figura constituye una figura prototípica, ya que refleja el modelo estándar utilizado para interpretar la distribución granulométrica de materiales de construcción, siguiendo procedimientos normativos como la ASTM D422 o la NTP 339.128. Fuente: Laboratorios METROASPHALT SAC.2024.

El perfil del suelo registrado en las calicatas hasta la profundidad de investigación, está conformado de la siguiente forma: El primer estrato de 0.20 m está conformado por suelos orgánicos y turbas, el segundo estrato hasta 1.50 m por gravas mal graduadas con arcillas.

**Figura 9**

*Perfil estratigráfico C-02*

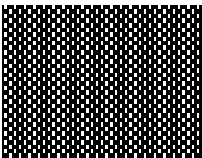
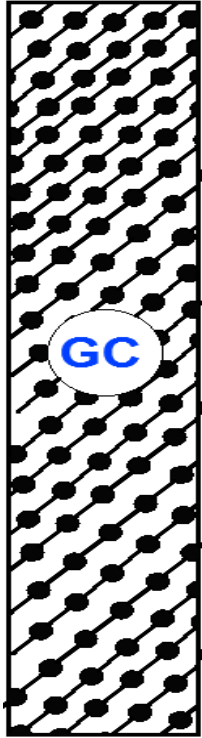
TABLA DE PERFIL ESTRATIGRÁFICO C-02						
"ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE PAVIMENTOS FLEXIBLES SOBRE LA SUBRASANTE HETEROGENEAS EN LA CARRETERA ABANCAY - ANDAHUAYLAS - APURIMAC DEL 2024."						<b>C-02</b>
<b>PAVIMENTO</b>						E: 714048 N: 8486894
PROF. (m)	COTA (m.s.n.m.)	SUCS	ESPESOR	SIMBOLO	DESCRIPCION DE LA MUESTRA	OBSERVACIONES
0.00	3389.00					
0.20		PT	0.20 m		TIPO DE SUELO: Turba y suelos altamente orgánicos.	
1.50	3387.00	GP GC	1.30 m		TIPO DE SUELO: Grava mal graduada con arcilla GP GC PARTICULAS DEL SUELO % FINOS: 11.01 % ARENAS: 23.51 % GRAVAS: 65.48 LIMITES DE ATTERBERG LIMITE LIQUIDO: 21.10 LIMITE PLASTICO: 0.00 INDICE DE PLASTICIDAD: 21.10 COLOR Pardo Gris.	Tipo de excavación: Manual Prof. de excavación: 1.50 m Nivel Freático: * No existe Nivel freático a fecha Septiembre del 2024.

*Nota.* Esta figura constituye una figura prototípica, ya que refleja el modelo estándar utilizado para interpretar la distribución granulométrica de materiales de construcción, siguiendo procedimientos normativos como la ASTM D422 o la NTP 339.128. Fuente: Laboratorios METROASPHALT SAC.2024.

El perfil del suelo registrado en las calicatas hasta la profundidad de investigación, está conformado de la siguiente forma: El primer estrato de 0.20 m está conformado por suelos orgánicos y turbas, el segundo estrato hasta 1.50 m por gravas mal graduadas con arcillas.

**Figura 10**

*Perfil Estratigráfico C-03*

TABLA DE PERFIL ESTRATIGRÁFICO C-03						
"ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE PAVIMENTOS FLEXIBLES SOBRE LA SUBRASANTE HETEROGENEAS EN LA CARRETERA ABANCAY - ANDAHUAYLAS - APURIMAC DEL 2024."						<b>C-03</b>
<b>PAVIMENTO</b>						E: 714290 N: 8487235
PROF. (m)	COTA (m.s.n.m.)	SUCS	ESPESOR	SIMBOLO	DESCRIPCION DE LA MUESTRA	OBSERVACIONES
0.00	3342.00					
0.30		PT	0.30 m		TIPO DE SUELO: Turba y suelos altamente orgánicos.	
1.50	3340.00	GC	1.20 m		<p>TIPO DE SUELO: Grava arcillosa con arena GC</p> <p><b>PARTICULAS DEL SUELO</b></p> <p>% FINOS: 36.86 % ARENAS: 47.65 % GRAVAS: 15.49</p> <p><b>LIMITES DE ATTERBERG</b></p> <p>LIMITE LIQUIDO: 19.15 LIMITE PLASTICO: 11.20 INDICE DE PLASTICIDAD: 7.95 <b>COLOR</b> Pardo Rojizo.</p>	Tipo de excavación: Manual Prof. de excavación: 1.50 m Nivel Freático: No existe Nivel freático a fecha Septiembre del 2024. *

*Nota.* Esta figura constituye una figura prototípica, ya que refleja el modelo estándar utilizado para interpretar la distribución granulométrica de materiales de construcción, siguiendo procedimientos normativos como la ASTM D422 o la NTP 339.128. Fuente: Laboratorios METROASPHALT SAC.2024.

El perfil del suelo registrado en las calicatas hasta la profundidad de investigación, está conformado de la siguiente forma: El primer estrato de 0.30 m está conformado por suelos orgánicos y turbas, el segundo estrato hasta 1.50 m por gravas arcillosas con arenas.

**Tabla 15**

*Capacidad portante C-01*

<b>Capacidad de carga para diferentes profundidades y anchos (kg/cm<sup>2</sup>)</b>					
<b>Prof. (m)</b>	<b>Ancho (m)</b>				
	1.00	1.20	1.50	1.80	2.00
0.80	1.19	1.24	1.32	1.40	1.45
0.90	1.26	1.31	1.39	1.46	1.51
1.00	1.32	1.37	1.45	1.53	1.58
1.10	1.39	1.44	1.52	1.59	1.65
1.20	1.45	1.51	1.58	1.66	1.71
1.30	1.52	1.57	1.65	1.73	1.78
1.40	1.59	1.64	1.72	1.79	1.84
1.50	1.65	1.70	<b>1.78</b>	1.86	1.91

*Nota.* Esta tabla constituye una tabla prototípica, pues organiza sistemáticamente los resultados del análisis de capacidad portante, herramienta fundamental para el diseño geotécnico de cimentaciones superficiales, garantizando la estabilidad estructural y evitando asentamientos diferenciales. Fuente: Laboratorios METROASPHALT SAC.2024.

Como se observa en la tabla de capacidad de carga, los valores en kg/cm<sup>2</sup> aumentan tanto con la profundidad como con el ancho del pavimento. A una profundidad de 1.50 m, la capacidad portante es de 1.78 kg/cm<sup>2</sup> para un ancho de 1.50 m, aumentando a 1.91 kg/cm<sup>2</sup> para un ancho de 2.00 m. Según las normativas de diseño de pavimentos, el ancho mínimo recomendado para pavimentos flexibles es de 1.50 m.

**Tabla 16***Capacidad portante C-02*

<b>Capacidad de carga para diferentes profundidades y anchos (kg/cm<sup>2</sup>)</b>					
<b>Prof. (m)</b>	<b>Ancho (m)</b>				
	1.00	1.20	1.50	1.80	2.00
0.80	1.19	1.24	1.32	1.39	1.44
0.90	1.25	1.31	1.38	1.45	1.51
1.00	1.32	1.37	1.45	1.52	1.57
1.10	1.39	1.44	1.51	1.59	1.64
1.20	1.45	1.50	1.58	1.66	1.71
1.30	1.52	1.57	1.64	1.72	1.78
1.40	1.58	1.63	1.71	1.79	1.84
1.50	1.65	1.70	<b>1.78</b>	1.85	1.90

*Nota.* Esta tabla es considerada una tabla prototípica, pues organiza de forma sistemática los resultados de cálculo que sirven de base para el diseño de cimentaciones superficiales, asegurando la estabilidad estructural y la eficiencia constructiva. Fuente: Laboratorios METROASPHALT SAC.2024.

Como se observa en la tabla de capacidad de carga, los valores en kg/cm<sup>2</sup> aumentan con la profundidad y el ancho del pavimento. A una profundidad de 1.50 m, la capacidad portante es de 1.78 kg/cm<sup>2</sup> para un ancho de 1.50 m y alcanza hasta 1.90 kg/cm<sup>2</sup> para un ancho de 2.00 m.

**Tabla 17***Capacidad portante C-03*

<b>Capacidad de carga para diferentes profundidades y anchos (kg/cm<sup>2</sup>)</b>					
<b>Prof. (m)</b>	<b>Ancho (m)</b>				
	1.00	1.20	1.50	1.80	2.00
0.80	1.18	1.23	1.30	1.37	1.42
1.00	1.31	1.36	1.43	1.51	1.55
1.20	1.44	1.49	1.56	1.64	1.69
1.40	1.57	1.68	1.70	1.77	1.82
1.50	1.64	1.69	<b>1.76</b>	1.83	1.88
1.60	1.71	1.75	1.83	1.90	1.95
1.80	1.84	1.89	1.96	2.03	2.08
2.00	1.97	2.02	2.09	2.16	2.21

*Nota.* Esta es una tabla prototípica, pues organiza de manera clara y sistemática los resultados obtenidos del análisis geotécnico, facilitando la interpretación de los valores empleados en el diseño y dimensionamiento de cimentaciones superficiales, garantizando la estabilidad estructural y el rendimiento del suelo. Fuente: Laboratorios METROASPHALT SAC.2024.

Como se observa en la tabla de capacidad de carga de C-03, los valores de capacidad portante en kg/cm<sup>2</sup> aumentan con el incremento de la profundidad y el ancho del pavimento. para una profundidad de 1.50 m y un ancho de 1.50 m la capacidad es 1.76 kg/cm<sup>2</sup>. mientras que a un ancho de 2.00 m, esta capacidad aumenta a 1.88 kg/cm<sup>2</sup>. Según las normativas de diseño de pavimentos, el ancho mínimo recomendado para pavimentos flexibles es de 1.50 m.

**Tabla 18**  
*Asentamiento C-01*

Asentamientos en cm										
Prof (m)	Ancho (m)									
	1.00		1.20		1.50		1.80		2.00	
	Cen	Ezq	Cen	Ezq	Cen	Ezq	Cen	Ezq	Cen	Ezq
0.80	0.24	0.12	0.30	0.15	0.40	0.20	0.51	0.25	0.59	0.30
0.90	0.25	0.13	0.32	0.16	0.43	0.21	0.54	0.27	0.62	0.31
1.00	0.20	0.10	0.34	0.17	0.44	0.22	0.56	0.28	0.64	0.32
1.10	0.14	0.07	0.35	0.18	0.46	0.23	0.58	0.29	0.67	0.34
1.20	0.15	0.07	0.28	0.14	0.48	0.24	0.61	0.30	0.70	0.35
1.30	0.15	0.08	0.19	0.10	0.50	0.25	0.63	0.32	0.73	0.36
1.40	0.16	0.08	0.20	0.10	0.53	0.25	0.66	0.33	0.75	0.38
1.50	0.17	0.08	0.21	0.10	<b>0.41</b>	<b>0.20</b>	0.68	0.34	0.78	0.39

*Nota.* Esta es una tabla prototípica, pues organiza sistemáticamente la información de los ensayos o cálculos realizados, permitiendo analizar la uniformidad y magnitud de los asentamientos en función de la geometría de la cimentación, información esencial para garantizar la estabilidad estructural y evitar fallas por asentamientos diferenciales. Fuente: Laboratorios METROASPHALT SAC.2024.

Los asentamientos calculados para la calicata C-01 varían en función del ancho del pavimento y la profundidad a la que se mide. A una profundidad de 1.50 m, el ancho de 1.50 m muestra un asentamiento central de 0.41 cm y un asentamiento a la izquierda de 0.20 cm, lo que indica un comportamiento favorable en comparación con los anchos más amplios.

**Tabla 19**  
Asentamiento C-02

°Asentamientos en cm										
Prof (m)	Ancho (m)									
	1.00		1.20		1.50		1.80		2.00	
	Cen	Ezq	Cen	Ezq	Cen	Ezq	Cen	Ezq	Cen	Ezq
0.80	0.24	0.12	0.30	0.15	0.40	0.20	0.51	0.25	0.59	0.29
0.90	0.25	0.13	0.32	0.16	0.42	0.21	0.54	0.27	0.62	0.31
1.00	0.20	0.10	0.34	0.17	0.44	0.22	0.56	0.28	0.64	0.32
1.10	0.14	0.07	0.35	0.18	0.46	0.23	0.58	0.29	0.67	0.33
1.20	0.15	0.07	0.28	0.14	0.05	0.24	0.51	0.30	0.70	0.35
1.30	0.15	0.08	0.19	0.10	0.50	0.25	0.53	0.32	0.72	0.36
1.40	0.16	0.08	0.20	0.10	0.52	0.26	0.66	0.33	0.75	0.38
1.50	0.17	0.08	0.21	0.10	<b>0.41</b>	<b>0.20</b>	0.68	0.34	0.77	0.39

*Nota.* Esta es una tabla prototípica, ya que organiza y presenta de manera estructurada los resultados numéricos derivados del análisis de deformaciones, permitiendo una interpretación directa del comportamiento mecánico del suelo bajo carga. Fuente: Laboratorios METROASPHALT SAC.2024.

Como se observa en la tabla de asentamientos para C-02, varían según el ancho del pavimento y la profundidad considerada. A una profundidad de 1.50 m, el ancho de 1.50 m presenta un asentamiento central de 0.41 cm y un asentamiento a la izquierda de 0.20 cm .

**Tabla 20**  
Asentamiento C-03

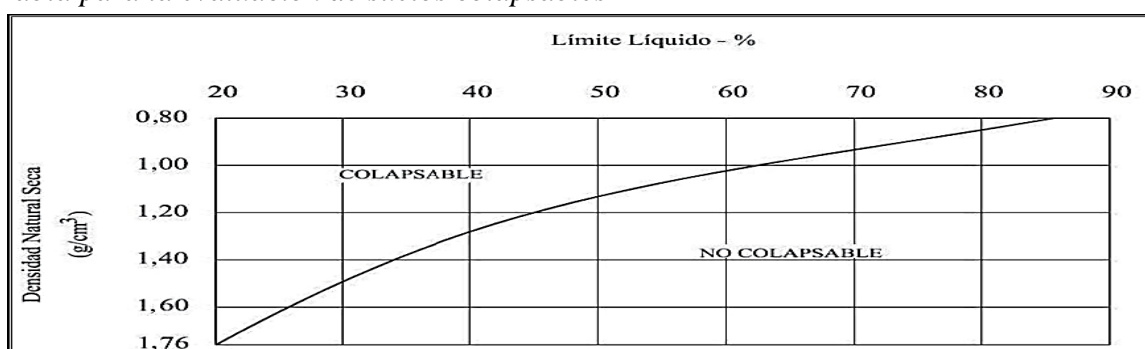
°Asentamientos en cm										
Prof (m)	Ancho (m)									
	1.00		1.20		1.50		1.80		2.00	
	Cen	Ezq	Cen	Ezq	Cen	Ezq	Cen	Ezq	Cen	Ezq
0.80	0.24	0.12	0.30	0.15	0.40	0.20	0.50	0.25	0.58	0.29
1.00	0.20	0.10	0.33	0.17	0.44	0.22	0.55	0.28	0.63	0.32
1.20	0.15	0.07	0.27	0.14	0.48	0.24	0.60	0.30	0.69	0.37
1.40	0.16	0.08	0.20	0.10	0.52	0.26	0.65	0.32	0.74	0.37
1.50	0.17	0.08	0.21	0.10	<b>0.40</b>	<b>0.20</b>	0.67	0.34	0.77	0.38
1.60	0.17	0.09	0.21	0.11	0.28	0.14	0.70	0.35	0.79	0.40
1.80	0.19	0.09	0.23	0.12	0.30	0.15	0.56	0.28	0.85	0.42
2.00	0.20	0.10	0.25	0.12	0.32	0.16	0.40	0.20	0.68	0.34

*Nota.* Esta es una tabla prototípica, ya que organiza la información experimental de manera clara, permitiendo analizar el comportamiento diferencial del terreno y su relación con las dimensiones geométricas de la zapata. Fuente: Laboratorios METROASPHALT SAC.2024.

Los asentamientos calculados para la calicata C-03 Como se observa en la tabla a diferentes anchos y a una profundidad de 1.50 m muestran variaciones significativas. En particular, el ancho de 1.50 m presenta los asentamientos más bajos, con valores de 0.40 cm en el centro y 0.20 cm a la izquierda. A medida que aumenta el ancho, los asentamientos tienden a incrementarse.

**Figura 11**

*Tabla para la evaluación de suelos colapsables*



*Nota.* Esta figura constituye una figura prototípica, ya que sintetiza el criterio gráfico más comúnmente empleado para clasificar suelos susceptibles al colapso, especialmente en zonas áridas o semiáridas. Fuente: Braja M. Das

Según la NTP E.050 se puede evaluar un suelo colpasable dependiendo de la densidad de este en relación con el límite líquido, encontrando que el suelo de la zona activa de punto del proyecto no se encuentra dentro de los suelos colapsables.

**Tabla 21**

*Colapsabilidad del suelo*

Calicata	Estrato	Densidad natural seca Kg/cm <sup>3</sup>	Límite líquido %	Suelo colapsable
C - 01	E - 02	1.84	21.21	No
C - 02	E - 02	1.86	21.1	No
C - 03	E - 02	1.85	20.4	No

*Nota.* Esta es una tabla prototípica, ya que organiza la información esencial para evaluar la estabilidad volumétrica del suelo ante cambios de humedad. Permite interpretar de manera directa la seguridad geotécnica del terreno, aspecto clave en el diseño de cimentaciones superficiales o estructuras viales. Fuente: Laboratorios METROASPHALT SAC.2024.

Como se observa en la tabla las densidades naturales secas son similares, con valores de 1.84 kg/cm<sup>3</sup>, 1.86 kg/cm<sup>3</sup> y 1.85 kg/cm<sup>3</sup>, Los límites líquidos son 21.21% en C-01, 21.1% en C-02 y 20.4% en C-03, siendo C-03 el más bajo, lo que sugiere un comportamiento ligeramente más estable frente a la humedad. Esto indica que el material estudiado no presenta riesgo de colapsar.

**Tabla 22**

*Potencial de Expansión*

<b>Calicata</b>	<b>Estrato</b>	<b>Índice plástico %</b>	<b>Potencial de expansión</b>
C – 01	E – 02	-	<b>Bajo</b>
C – 02	E – 02	-	<b>Bajo</b>
C – 03	E – 02	11.20	<b>Medio</b>

*Nota.* Esta es una tabla prototípica, ya que organiza los resultados de los ensayos de límites de Atterberg para identificar el grado de plasticidad y expansión de los suelos. Dicha información es esencial en estudios geotécnicos, pues permite determinar la estabilidad volumétrica del terreno y su adecuación para cimentaciones o estructuras viales. Fuente: Laboratorios METROASPHALT SAC.2024.

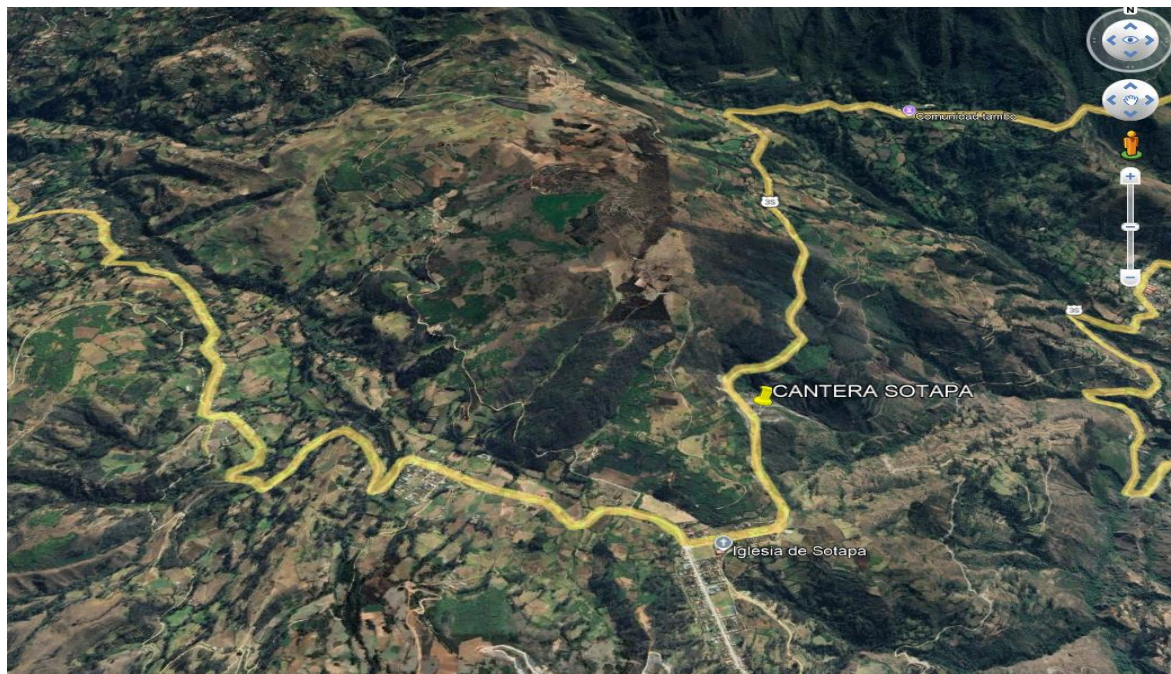
Los problemas por cambio de volumen son causados por suelos que contienen una cantidad significativa de mineral montmorillonita y que normalmente exhiben límites líquidos superiores a 50 %, los índices de plasticidad elevados. Observando que los materiales evaluados de C-01 Y C-02 no presentan índice de plasticidad Y C-03 Con un IP de 11.20% clasificándolos con un potencial de expansión bajo y medio.

## 5.1.2. Determinación del índice de capacidad portante de la subrasante heterogénea

### Cantera Sotapa

#### Figura 12

*Ubicación de la cantera*



*Nota.* Esta imagen constituye una figura prototípica, ya que ilustra la localización espacial del área de aprovechamiento de materiales, permitiendo contextualizar su relación con el territorio y las rutas de comunicación cercanas. Fuente: Google Maps(2024).

#### Ubicación de la Cantera

Para evaluar la Sub-base y considerando tanto las condiciones del terreno como los objetivos del proyecto, se realizó la excavación de una calicata (pozo exploratorio abierto). Este pozo se excavó con el propósito de verificar la uniformidad del material presente en el sitio. . La excavación se extendió hasta alcanzar una profundidad de 1.50 metros, durante la cual se recolectaron muestras alteradas del suelo. Cada material encontrado fue sometido a un proceso de identificación y descripción visual, siguiendo los procedimientos establecidos en la norma técnica peruana NTP. 339.150, y se registraron las coordenadas correspondientes al punto de muestreo:

**Tabla 23***Ubicación de la Cantera*

Cantera	Profundidad (m)	Este	Norte	Cota
Sotapa	1.50	714048.00	8486894.00	3358

*Nota.* Esta es una tabla prototípica, ya que organiza información técnica básica utilizada en la caracterización de materiales de préstamo o de subrasante, permitiendo establecer su relación con las condiciones topográficas y ambientales del sitio de extracción. Fuente: Laboratorios METROASPHALT SAC.2024.

Las pruebas realizadas en laboratorio para analizar las propiedades físicas y mecánicas de los materiales extraídos de las canteras se llevaron a cabo siguiendo los protocolos establecidos en la normativa que se encuentra vigente. Estos Los ensayos corresponden a los requerimientos señalados en las especificaciones técnicas generales actuales para la construcción de pavimentos en zonas urbanas).

**Tabla 24***Límites de Consistencia*

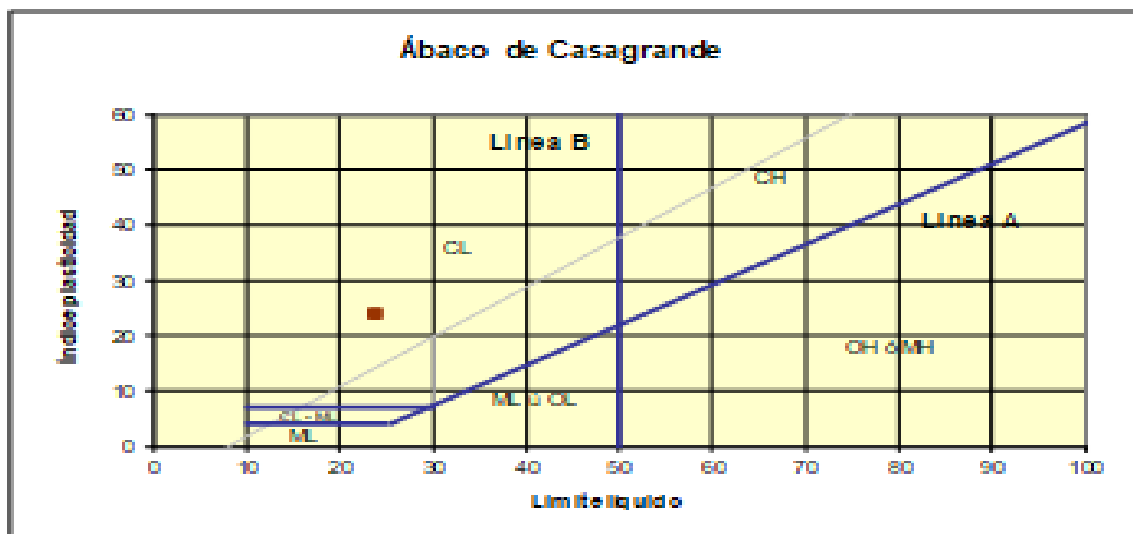
Límites de atterberg, humedad y clasificación							
Identificación		Límites de plasticidad, %			Hum. Nat	Clasificación	
Cal.	Muest.	LL	LP	IP	W <sub>n</sub> %	Sucs	Astho
N°	N°						
C – 01	E – 02	23.86	0	23.86	19.56	GM	A-2-6

*Nota.* De acuerdo con los sistemas de clasificación SUCS (Unified Soil Classification System) y AASHTO, el suelo fue identificado como GM (Grava limosa o arenosa con finos no plásticos). Fuente: Laboratorios METROASPHALT SAC.2024.

Como se observa en el límite líquido, el límite plástico, y el índice de plasticidad del suelo evaluado no tiene Limite plástico la cual en conjunto con otras propiedades de suelo nos ayudan a evaluar la compresibilidad, permeabilidad, compactibilidad, contracción-expansión y resistencia al corte del suelo, estando por debajo de los requisitos mínimos para material de subbase.

**Figura 13**

Tabla de clasificación de suelos mediante límites de Atterberg



Nota. Esta figura constituye una figura prototípica, ya que representa el método estándar empleado para clasificar los suelos según sus propiedades de consistencia. Fuente: Laboratorios METROASPHALT SAC.2024.

Los límites de atterberg nos indica el comportamiento de los suelos finos en diferentes condiciones de humedad clasificando la muestra estudiada en un suelo GM.

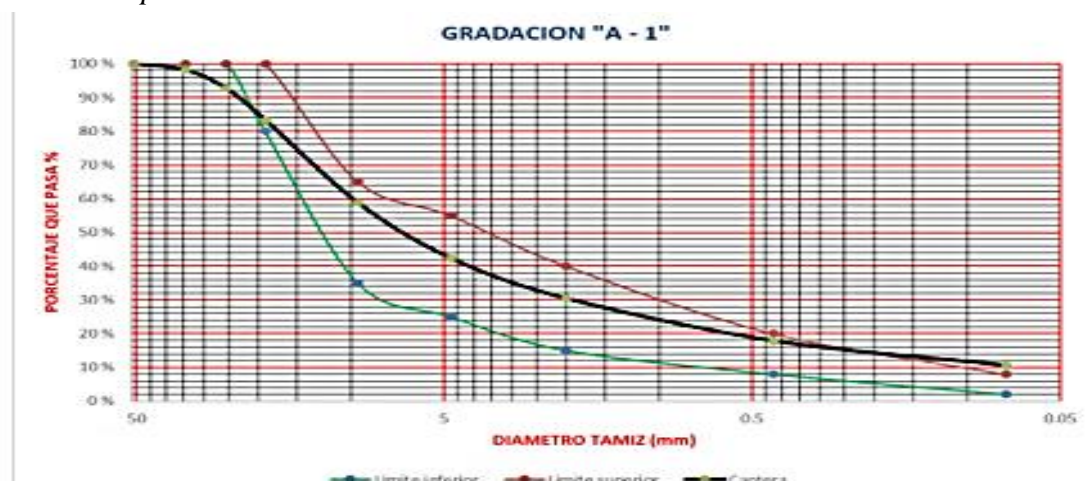
**Tabla 25**

Análisis Granulométrico

Análisis granulométrico									
Identificación		Análisis granulométrico					Contenido		
Cal.	Estra.	% que pasa la malla n°					Grava	Arena	Finos
N°	N°	N°4	N°10	N°40	N°100	N°200	%		
39.36	33.35	22.52	18.05	17.04	17.04	22.32	60.64	39.36	33.35

Nota. La tabla presenta los resultados del análisis granulométrico correspondiente al material del estrato E-02, obtenido en la calicata evaluada. Los valores muestran el porcentaje que pasa por las mallas N°4, N°10, N°40, N°100 y N°200, junto con el contenido porcentual de grava, arena y finos. Fuente: Laboratorios METROASPHALT SAC.2024.

Para el material de subbase, una vez culminado los ensayos de laboratorio de la cantera de la cantera en estudio se obtuvo los siguientes propiedades físicas y mecánicas:

**Figura 14***Gradación para sub base*

*Nota.* Esta figura constituye una figura prototípica, ya que representa el formato estándar utilizado para verificar si un material cumple con las especificaciones granulométricas requeridas para capas de base o subbase en pavimentos. Fuente: Laboratorios METROASPHALT SAC.2024.

Como se observa el material de la cantera evaluada tiene una curva granulométrica que cumplen y están ajustadas a las franjas granulométricas que establece la “CE. 010 pavimentos Urbanos”, en cuanto a lo referente de control de calidad en la granulometría.

**Tabla 26***Resultados de material de Cantera*

Características	Cantera Sotapa Chaspur
Clasificación	GP.GM
Humedad Natural (%)	6.19
Límite líquido (%)	23.86
Límite plástico (%)	0.00
Índice de plasticidad	31.57
Abrasión de los Ángeles (%)	36.78
Densidad Máxima Seca (gr/cm <sup>3</sup> )	2.16
Contenido Óptimo de Agua (COA) (%)	7.05
California Bearing Ratio 95% (CBR) (%)	60.00
California Bearing Ratio 100% (CBR) (%)	82.69
Peso específico de la grava mayor a 3/4" (gr/cm <sup>3</sup> )	2.52

*Nota.* La tabla presenta las propiedades físico-mecánicas del material proveniente de la Cantera Sotapa Chaspur, empleado en la evaluación geotécnica. Fuente: Laboratorios METROASPHALT SAC.2024.

Observando los resultados del material evaluado, CUMPLE en todo excepto en Índice plástico que son requerimientos de las Especificaciones Técnicas para ser empleados como material de Sub Base. Su buena capacidad de carga (CBR) y bajo índice de plasticidad son especialmente favorables para la estabilidad y durabilidad de la infraestructura vial.

**Tabla 27**  
*Requerimientos para sub base*

Ensayos	Cantera: Sotapa		Observación
	Resultados	Especificación	
Granulometría.	<b>A-2-6</b>	Huso	<b>Cumple</b>
Limite Liquido (%).	<b>23.86</b>	25 máx.	<b>Cumple</b>
Índice Plástico (%).	<b>0</b>	4 máx.	<b>No cumple</b>
Abrasión (%).	<b>36.78</b>	50 máx.	<b>Cumple</b>
CBR AL 100 (%).	<b>82.69</b>	30 mín.	<b>Cumple</b>

*Nota.* La tabla presenta los resultados comparativos de los ensayos de control de calidad del material proveniente de la cantera Sotapa, contrastados con las especificaciones técnicas establecidas para subbase granular. Los parámetros evaluados incluyen granulometría, límite líquido, índice plástico, abrasión y CBR al 100%. Fuente: Laboratorios METROASPHALT SAC.2024.

Según requerimientos el CBR min es de 40%, teniendo un CBR de 82.69% al 100%, Abrasión máxima de 50%, teniendo 36.78% de desgaste, IP máx. de 6% y LL de máximo 25%, teniendo un IP de 0 y un LL de 23.86 se puede concluir que el material estudiado CUMPLE en todo excepto en Índice plástico.

**5.1.3. Determinar la variación de la deflexión de la estructura de pavimentos flexibles sobre subrasantes heterogéneas en la carretera Abancay – Andahuaylas Evaluación deflectométrica**

**Tabla 28**

*Evaluación deflectométrica carril derecho km 722+525 - km 723+525*

Progresiva (km)	Lectura del dial						Temperaturas		Hora	Espesor		
	Primer dial						Segundo dial			AMB (°C)	PLATAF (°C)	r (cm)
	L-0 0.01 mm	L-25 0.01 mm	L-50 0.01 mm	L-75 0.01 mm	L-100 0.01 mm	L-500 0.01 mm	L1 0.01 mm	L2 0.01 mm				
722+525	0	2	3	3	3	4	0	3	12:42:00	16	23	10.0
722+575	0	1	2	2	3	3	0	2	12:44:00	16	18.8	10.0
722+625	0	6	8	8	8	9	0	5	12:46:00	16	19.6	10.0
722+675	0	1	2	2	2	3	0	2	12:48:00	16	18.5	10.0
722+725	0	1	3	3	4	7	0	4	12:50:00	16	18.3	10.0
722+775	0	5	7	7	9	10	0	7	12:52:00	16	18.2	10.0
722+825	0	4	4	7	7	7	0	5	12:54:00	16	18.1	10.0
722+875	0	3	5	6	7	9	0	6	12:56:00	16	17.6	10.0
722+925	0	3	5	7	8	9	0	6	12:58:00	16	17.9	10.0
722+975	0	5	7	9	10	11	0	7	13:00:00	16	17.8	10.0
723+025	0	7	9	11	13	15	0	9	13:02:00	16	18	10.0
723+075	0	4	5	5	6	6	0	3	13:04:00	16	17.9	10.0
723+125	0	4	6	7	8	8	0	4	13:06:00	16	17.6	10.0
723+175	0	5	7	8	8	8	0	4	13:08:00	16	17.5	10.0
723+225	0	3	4	5	5	6	0	4	13:10:00	16	15.7	10.0
723+275	0	1	2	3	4	5	0	3	13:12:00	16	14.4	10.0
723+325	0	3	7	9	10	11	0	8	13:14:00	16	16.4	10.0

*Nota.* Los resultados obtenidos permiten concluir que la capa ensayada presenta una compactación adecuada y homogénea, cumpliendo con las condiciones requeridas para garantizar la capacidad estructural y durabilidad del material granular evaluado. Fuente: Laboratorios METROASPHALT SAC.2024.

En el carril derecho, se observa que para un periodo de evaluación de  $n=5$  años, la deflexión característica entre las progresivas 722+525 al 723+525 ( $D_c=34.9 \times 10^{-2}$  mm), y es menor que la deflexión admisible ( $D_a=78.69 \times 10^{-2}$  mm), por lo tanto, se considera que la capacidad estructural del pavimento tiene una vida remanente, o que aún no ha llegado al final de su periodo de diseño, por lo tanto, la capacidad estructural del pavimento es adecuada.

**Tabla 29**

*Evaluación deflectométrica Carril izquierdo km 722+500 al km 723+500*

Progresiva (km)	Lectura del dial						Temperaturas		Hora	Temperaturas		Espesor (cm)
	Primer dial						Segundo dial			AMB. (°C)	PLATAF. (°C)	
	L-0 0.01 mm	L-25 0.01 mm	L-50 0.01 mm	L-75 0.01 mm	L-100 0.01 mm	L-500 0.01 mm	L1 0.01 mm	L2 0.01 mm				
723+500	0	5	6	8	8	9	0	6	16:58:00	16	20.6	10.0
723+450	0	4	5	5	7	8	0	5	16:56:00	16	18.9	10.0
723+400	0	6	6	7	7	7	0	4	16:54:00	18	19.6	10.0
723+350	0	4	5	10	10	13	0	7	16:52:00	18	18.8	10.0
723+300	0	1	1	2	2	3	0	2	16:50:00	18	21.9	10.0
723+250	0	2	5	6	6	8	0	6	16:48:00	18	18.9	10.0
723+200	0	4	6	7	7	8	0	5	16:46:00	18	22.5	10.0
723+150	0	6	7	7	8	8	0	5	16:44:00	18	26.1	10.0
723+100	0	4	5	6	6	7	0	5	16:42:00	18	26.4	10.0
723+050	0	2	3	4	5	6	0	4	16:40:00	18	26.4	10.0
723+000	0	2	3	3	3	3	0	2	16:38:00	18	26.7	10.0
722+950	0	6	7	9	9	9	0	6	16:36:00	20	25.7	10.0
722+900	0	2	3	3	4	4	0	2	16:34:00	20	24.7	10.0
722+850	0	1	2	3	3	4	0	2	16:32:00	20	25.9	10.0
722+800	0	4	6	9	9	10	0	6	16:30:00	14	12.1	10.0
722+750	0	1	1	2	2	3	0	2	16:28:00	14	12.1	10.0
722+700	0	1	2	3	3	3	0	2	16:26:00	14	12.1	10.0
722+650	0	1	3	3	3	4	0	2	16:24:00	14	12.1	10.0
722+600	0	3	3	4	4	5	0	3	16:22:00	14	12.1	10.0

*Nota.* Los resultados permiten inferir que la capa de material analizada presenta condiciones óptimas de compactación, sin variaciones significativas que afecten su densidad o espesor, garantizando así la estabilidad y resistencia estructural de la base o subbase evaluada. Fuente::

Laboratorios METROASPHALT SAC.2024.

En el carril izquierdo, para un periodo de evaluación de 5 años, en los sectores evaluados: Prog. 723+500 al 722+500 la deflexión característica es de  $29.2 \times 10^{-2}$  mm, y es menor que la deflexión admisible ( $D_a = 78.69 \times 10^{-2}$  mm), por lo tanto, se considera que la capacidad estructural del pavimento tiene un remanente, por lo tanto, la capacidad estructural del pavimento es adecuada.

**Tabla 30***Evaluación deflectométrica Carril izquierdo - Derecho*

Progresiva (Km)	Lectura del dial						Parámetros de evaluación				Temperaturas		Espesor (cm)	
	L-0 0.01 mm	L-25 0.01 mm	Primer dial		Segundo dial		Do	D25	Rc	Amb.	Plataf.			
			L-50 0.01 mm	L-75 0.01 mm	L-100 0.01 mm	L-500 0.01 mm	L1 0.01 mm	L2 0.01 mm	0.01 mm	0.01 mm	m	(°c)	(°c)	
722+500	0	3	3	3	4	4	0	2	16	8	391	14	12.1	10
722+525	0	2	3	3	3	4	0	3	16	12	781	16	23	10
722+550	0	1	2	2	2	2	0	1	8	4	781	14	12.1	10
722+575	0	1	2	2	3	3	0	2	12	8	781	16	18.8	10
722+600	0	3	3	4	4	5	0	3	20	12	391	14	12.1	10
722+625	0	6	8	8	8	9	0	5	36	20	195	16	19.6	10
722+650	0	1	3	3	3	4	0	2	16	8	391	14	12.1	10
722+675	0	1	2	2	2	3	0	2	12	8	781	16	18.5	10
722+700	0	1	2	3	3	3	0	2	12	8	781	14	12.1	10
722+725	0	1	3	3	4	7	0	4	28	16	260	16	18.3	10
722+750	0	1	1	2	2	3	0	2	12	8	781	14	12.1	10
722+775	0	5	7	7	9	10	0	7	40	28	260	16	18.2	10
722+800	0	4	6	9	9	10	0	6	40	24	195	14	12.1	10
722+825	0	4	4	7	7	7	0	5	28	20	391	16	18.1	10
722+850	0	1	2	3	3	4	0	2	16	8	391	20	25.9	10
722+875	0	3	5	6	7	9	0	6	36	24	260	16	17.6	10
722+900	0	2	3	3	4	4	0	2	16	8	391	20	24.7	10
722+925	0	3	5	7	8	9	0	6	36	24	260	16	17.9	10

722+950	0	6	7	9	9	9	0	6	36	24	260	20	25.7	10
722+975	0	5	7	9	10	11	0	7	44	28	195	16	17.8	10
723+000	0	2	3	3	3	3	0	2	12	8	781	18	26.7	10
723+025	0	7	9	11	13	15	0	9	60	36	130	16	18	10
723+050	0	2	3	4	5	6	0	4	24	16	391	18	26.4	10
723+075	0	4	5	5	6	6	0	3	24	12	260	16	17.9	10
723+100	0	4	5	6	6	7	0	5	28	20	391	18	26.4	10
723+125	0	4	6	7	8	8	0	4	32	16	195	16	17.6	10
723+150	0	6	7	7	8	8	0	5	32	20	260	18	26.1	10
723+175	0	5	7	8	8	8	0	4	32	16	195	16	17.5	10
723+200	0	4	6	7	7	8	0	5	32	20	260	18	22.5	10
723+225	0	3	4	5	5	6	0	4	24	16	391	16	15.7	10
723+250	0	2	5	6	6	8	0	6	32	24	391	18	18.9	10
723+275	0	1	2	3	4	5	0	3	20	12	391	16	14.4	10
723+300	0	1	1	2	2	3	0	2	12	8	781	18	21.9	10
723+325	0	3	7	9	10	11	0	8	44	32	260	16	16.4	10
723+350	0	4	5	10	10	13	0	7	52	28	130	18	18.8	10
723+375	0	4	6	7	8	9	0	7	36	28	391	16	14.2	10
723+400	0	6	6	7	7	7	0	4	28	16	260	18	19.6	10
723+425	0	3	4	5	5	7	0	5	28	20	391	16	14.4	10
723+450	0	4	5	5	7	8	0	5	32	20	260	16	18.9	10
723+475	0	2	4	6	6	7	0	4	28	16	260	16	16.3	10
723+500	0	5	6	8	8	9	0	6	36	24	260	16	20.6	10
723+525	0	1	2	2	3	3	0	2	12	8	781	16	15.7	10

*Nota.* Los resultados indican que el material mantiene una densidad uniforme y adecuada resistencia estructural a lo largo del tramo evaluado, sin presentar desviaciones significativas en los parámetros de control. En conjunto, las mediciones permiten concluir que la compactación cumple con los estándares técnicos requeridos, asegurando la estabilidad y durabilidad de la capa granular. Fuente: Laboratorios METROASPHALT SAC.2024.

**Tabla 31**  
*Evaluacion deflectometrica Correcciones*

<b>Correcciones</b>				
<b>Do</b>	<b>Do</b>	<b>D25</b>	<b>D25</b>	<b>Rccorr</b>
corr x temp 20°C	corr x estacion	corr x temp 20°C	corr x estacion	(m)
17	18	9	9	360
16	16	12	12	805
9	9	4	5	720
12	12	8	8	772
22	22	13	13	360
36	36	20	20	195
17	18	9	9	360
12	12	8	8	770
13	13	9	9	720
28	29	16	17	256
13	13	9	9	720
41	41	29	29	256
43	44	26	26	180
29	29	20	21	383
15	15	8	8	414
37	37	25	25	254
15	16	8	8	409
37	37	25	25	255
34	34	23	23	275
45	45	29	29	191
11	12	7	8	834
61	61	37	37	128
23	23	15	15	416
25	25	12	13	255
26	27	19	19	416
33	33	16	17	191
30	30	19	19	276
33	33	16	17	190
31	31	20	20	267
25	25	17	17	374
32	33	24	25	386
21	21	13	13	369
12	12	8	8	796
46	46	33	33	251
53	53	28	29	129
38	38	30	30	368
28	28	16	16	259
30	30	21	21	369
32	33	20	20	258
29	29	17	17	251
36	36	24	24	262
13	13	8	9	748

*Nota.* Los resultados corregidos confirman que el material analizado mantiene uniformidad

en densidad y resistencia. Fuente: Laboratorios METROASPHALT SAC.2024.

**Tabla 32***Conteo vehicular y cálculo de número de ejes equivalentes (8.2tn)*

	Ómnibus			camiones			Semi trayler						Total	Acumulado	Total		
	2E	3E	4E	2E	3E	4E	282	283	382	383	2T3	3T2				3T3	
Índice Medio Diario Anual	88	71	18	245	33	9	1	12	21	9	1	4	3	675			
Fc x Fp	2.32400	2.595	1.158400	1.56800	2.664	3.655	2.619	5.175	3.714	3.29	2.82	4.997	3.915				
Tasa de crecimiento =r	2.50	0	2.50	3.0	3	0	3	3	3	3	2.5	3	3				
R/100 = r	0.025	0	0.025	0.030	0.030	0	0.03	0.03	0.03	0.03	0.025	0.03	0.03				
Factor de crecimiento	1.025	1.000	1.025	1.030	1.030	1.000	1.030	1.030	1.030	1.030	1.025	1.030	1.030				
Días del año	365	365	365	365	365	365	365	365	365	365	365	365	365				
IMDaxFcxFpx 365/2	2010	37.323	33625	5203	70.109	16.044	6.02	478	11.333	14.234	101.472	513	3.648	2.143	302.146	302.146	302E+05
	2011	38.257	33625	5334	72.212	16.525	6.020	492	11.673	14.661	104.516	526	3.757	2.208	309.806	611.952	6.12E+05
	2012	39.213	33625	5467	74.379	17.021	6.020	507	12.023	15.01	107.651	539	3.87	2.274	317.690	929.642	930E+05
	2013	40.193	33625	5604	76.610	17.5.2	6.020	522	12.384	15.554	110.881	553	3.986	2.342	325.805	1.255.447	1.26E+05
	2014	41.198	33625	5744	48.909	18.058	6.020	538	12.756	16.020	114.207	567	4.106	2.412	334.158	1.589.606	1.59E+06
	2015	42.228	33625	5887	81.276	18.599	6.020	554	13.138	16.501	117.634	581	4.229	2.485	342.756	1.932.362	1.93E+06
	2016	43.366	33625	6034	83.714	19.157	6.020	571	13.532	16.996	121.163	595	4.356	2.559	351.606	2.283.968	2.28E+06
	2017	44.366	33625	6185	86.225	19.732	6.020	588	13.938	17.506	124.798	610	4.486	2.636	360.715	2.644.683	2.64E+06
	2018	45.475	33625	6340	88.812	20.324	6.020	605	14.357	18.031	128.541	625	4.621	2.715	370.092	3.014.775	3.01E+06
	2019	46.612	33625	6498	91.477	20.934	6.020	624	14.787	18.572	132.398	641	4.76	2.767	379.743	3.394.518	3.39E+06
	2020	47.777	33625	6661	94.221	21.562	6.020	642	15.231	19.129	136.37	657	4.902	2.881	389.677	3.784.195	3.78E+06
	2021	48.972	33.625	6.827	97.048	22.209	6.020	662	15.688	19.703	140.461	673	5.049	2.967	399.903	4.184.098	4.18E+06
	2022	50.163	33.625	6.998	99.959	22.875	6.020	681	16.159	20.294	144.675	690	5.201	3.053	410.428	4.594.526	4.59E+06
	2023	51.451	33.625	7.173	102.958	23.561	6.020	702	16.643	20.903	149.015	708	5.357	3.148	421.262	5.015.788	5.02E+06
	2024	52.737	33.625	7.352	106.046	24.268	6.020	723	17.143	21.530	153.485	725	5.518	3.242	432.414	5.448.202	5.45E+06
	2025	54.055	33.625	7.536	109.228	24.996	6.020	745	17.657	22.176	158.09	743	5.683	3.339	443.893	5.892.095	5.89E+06
	2026	55.407	33.625	7.725	112.505	25.746	6.020	767	18.187	22.841	162.832	762	5.854	3.440	455.709	6.347.804	6.35E+06
	2027	56.792	33.625	7.918	115.88	26.518	6.020	790	18.732	23.526	167.717	781	6.029	3.543	467.871	6.815.676	6.82E+06
	2028	58.212	33.625	8.116	119.356	27.314	6.020	814	19.294	24.232	172.749	800	6.21	3.649	480.391	7.296.066	7.30E+06
	2029	59.667	33.625	8.318	122.937	28.133	6.020	838	19.873	24.959	177.931	820	6.396	3.759	493.277	7.789.344	7.79E+06

*Nota.* La proyección del tránsito es fundamental para el diseño estructural del pavimento, ya que permite estimar la demanda futura de carga

que deberá soportar la subrasante y las capas de refuerzo. Fuente: Laboratorios METROASPHALT SAC.2024.

**Tabla 33**  
*Resultados de ejes equivalentes*

Tramo	Descripción	Código Estación	Descripción Tramo	Localización	Esal (05 años)	Esal (10 años)	Esal (15 años)	Esal (20 años)
Tramo I	Cusco - Pisac	EEP10	Cusco - Pisac	Puente Pisac	2.66+E05	5.26+E05	8.25+E05	1.10+E06
Tramo II	Urubamba - Chincheros - Cachimayo	EEP12	Urubamba - Cachimayo	Chincheros	4.79+E05	9.45+E05	1.48+E06	1.97+E06
Tramo III -A	Urcos - Sicuani	EEP5	Combapata - Sicuani	Tocorma	2.02+E06	3.96+E06	6.16+E06	8.15+E06
		EEP6	Urcos - Combopata	Cusipata	1.94+E06	3.82+E06	5.97+E06	7.92+E06
Tramo II - B	Sicuani - La raya	EEP4	Sicuani - La raya	Aduana Sicuani	1.93+E06	3.78+E06	5.89+E06	7.79+E06
	Yauri - San Genaro	EEP1	Espinar - El descanso	Espinar	3.56+E05	7.03+E05	1.10+E06	1.47+E06
Tramo IV	San Genaro - El Descanso	EEP2	El descanso - O-Dv Langui	El descanso	2.46+E05	4.86+E05	7.62+E05	1.01+E06
	Sicuani - Colpahuayco	EEP3	El descanso - Sicuani	Dv Sicuani	2.60+E05	5.14+E05	8.06+E05	1.07+E06
Tramo V	Yauri - San Genaro	EEP1	Espinar - El descanso - Espinar	Espinar	3.56+E05	7.03+E05	1.10+E06	1.47+E06
	El descanso - Lang Li	EEP3	El descanso - Dv Sicuani	Dv Sicuani	2.60+E05	5.14+E05	8.06+E05	1.07+E06
Tramo VI	Langui - Colpahuayco	EEP3	El descanso - Dv Sicuani	Dv Sicuani	2.60+E05	5.14+E05	8.06+E05	1.07+E06
Tramo VII	Huacarpay - Pisac - Huaran	EEP11	Huacarpay - Pisac - Huaran	Pisac	4.41+E05	8.67+E05	1.35+E06	1.79+E06
Tramo VIII -A	Huaran - Ollantaytambo - Peñas - Alfamayo	EEP8	Huaran - Ollantaytambo	San Agustin	4.79+E05	9.45+E05	1.48+E06	1.97+E06
		EEP7	Ollantaytambo - Peñas	Rumra	4.30+E05	8.47+E05	1.33+E06	1.76+E06

*Nota.* La tabla muestra la proyección del tránsito expresado en ejes equivalentes (Esal) para distintos tramos viales del corredor Cusco–Sicuani–Espinar–Ollantaytambo, considerando horizontes de 5, 10, 15 y 20 años. Cada tramo está identificado con su respectivo código de estación (EEP), descripción, y localización geográfica, lo que permite establecer el nivel de carga esperado sobre la infraestructura en función del crecimiento vehicular y de las condiciones operativas. Fuente: Laboratorios METROASPHALT SAC.2024.

**Tabla 34***Resumen de resultados del tramo en estudio*

Descripción	N (años)	Carretera Abancay - Andahuaylas	
		I	I
Tramo			
Carril		Derecho	Izquierdo
Progresiva inicial		722+525	723+500
Progresiva final		723+525	722+500
Deflex. Promedio. X 10 <sup>2</sup>		29.9	24.38
Desviacion estandar		3.01	2.91
Deflex. Caract. X 10 <sup>2</sup>		34.9	29.2
Esal (2028)		3.00e+06	3.00e+06
Deflex. Admisible x 10 <sup>2</sup>	5	0.787	0.787
Radio de curvatura re (m)		372.02	424.73

*Nota.* Los resultados confirman que el tramo evaluado mantiene un adecuado desempeño estructural, siendo su rigidez compatible con las cargas proyectadas. No obstante, se recomienda un monitoreo periódico de deflexiones para anticipar zonas con posible pérdida de soporte y garantizar la durabilidad funcional del pavimento a lo largo del periodo de diseño. Fuente: Laboratorios METROASPHALT SAC.2024.

El sector que presenta deflexiones características mayores, corresponde al carril derecho, debido a que este carril es el que recibe mayor carga de tráfico vehicular (Abancay – Andahuaylas) o vehículos pesados, pero ambos carriles, presentan deflexiones por debajo de la deflexión admisibles, a lo largo de todo el tramo evaluado. en su totalidad de evaluaciones.

### **Contrastación de hipótesis**

#### **Hipótesis general**

La estructura de los pavimentos flexibles en la carretera Abancay – Andahuaylas, presenta un desempeño condicionado por las características heterogéneas de las subrasantes, influyendo significativamente en su capacidad de carga y durabilidad.

#### **Hipótesis formuladas**

##### **Hipótesis Nula (H<sub>0</sub>):**

Las características heterogéneas de las subrasantes no influyen significativamente en el

desempeño, capacidad de carga ni durabilidad de los pavimentos flexibles en la carretera Abancay–Andahuaylas.

### **Hipótesis Alternativa (H<sub>1</sub>):**

Las características heterogéneas de las subrasantes influyen significativamente en el desempeño, capacidad de carga y durabilidad de los pavimentos flexibles en la carretera Abancay–Andahuaylas.

### **Interpretación de los datos**

#### **Deflexiones observadas:**

Los valores ( $34.9 \times 10^{-2}$  mm y  $29.2 \times 10^{-2}$  mm) están dentro de los límites admisibles. Esto indica un buen desempeño estructural, aunque existe variabilidad entre los carriles, posiblemente vinculada a la heterogeneidad de la subrasante.

#### **Capacidad portante:**

El incremento con la profundidad, alcanzando hasta 1.91 kg/cm<sup>2</sup>, demuestra que las secciones profundas ofrecen mayor estabilidad, influenciada por las propiedades mecánicas del suelo.

#### **Asentamientos:**

Las mayores deformaciones en pavimentos más anchos sugieren que el ancho también interactúa con la heterogeneidad de la subrasante, afectando la distribución de cargas.

#### **Propiedades del suelo:**

Peso volumétrico (1.84-1.86 TN/m<sup>3</sup>): Refleja una buena densidad de los materiales.

Ángulo de fricción (17.81°-21.06°): Valores medios-altos que indican estabilidad al corte.

Cohesión (0.25-0.39 TN/m<sup>3</sup>): Los suelos con mayor cohesión ofrecen una mejor resistencia estructural.

### **Conclusión**

Estas propiedades confirman que las diferencias en el suelo influyen directamente en el

desempeño estructural. Los datos proporcionados corroboran que las propiedades heterogéneas de las subrasantes tienen un impacto significativo en el comportamiento del pavimento, respaldando la hipótesis alternativa ( $H_1$ ). Se evidencia que suelos con mayor cohesión y ángulo de fricción contribuyen a una mejor capacidad portante y menor deformación, lo que sugiere que la heterogeneidad puede gestionarse para optimizar el diseño del pavimento.

### **Hipótesis específica 1**

#### **Premisa 1**

El tipo de suelo de las subrasantes heterogéneas en la carretera Abancay – Andahuaylas, Apurímac, 2024, puede ser identificado y clasificado según sus propiedades geotécnicas, lo que permitirá determinar su influencia en la estructura de los pavimentos flexibles.

#### **Formulación de hipótesis:**

##### **Hipótesis nula ( $H_0$ )**

Las propiedades geotécnicas (como granulometría y plasticidad) de los suelos no tienen un impacto significativo en la estructura de los pavimentos flexibles.

##### **Hipótesis alternativa ( $H_1$ )**

Las propiedades geotécnicas (como granulometría y plasticidad) de los suelos tienen un impacto significativo en la estructura de los pavimentos flexibles.

#### **Análisis de datos disponibles:**

Clasificación de los suelos identificados en las calicatas (C-01, C-02, y C-03) según los sistemas SUCS y AASHTO.

Comparación de las propiedades geotécnicas observadas, destacando las diferencias entre la grava mal graduada con arcilla (GP-GC) y la grava arcillosa (GC) con mayor contenido de finos.

**Evaluación del impacto en el pavimento:** Al relacionar las propiedades de los suelos (como el mayor contenido de finos en C-03) con parámetros clave del pavimento flexible, como estabilidad, capacidad portante, y permeabilidad.

Evaluar cómo el comportamiento más plástico y la menor permeabilidad del suelo GC podrían influir en el desempeño estructural del pavimento en esos tramos.

### **Conclusión**

las características de los suelos heterogéneos afectan el desempeño del pavimento.

### **Hipótesis específica 2**

#### **Premisa 2**

El índice de capacidad portante (CBR) de las subrasantes heterogéneas en la carretera Abancay – Andahuaylas, puede ser determinado mediante análisis geotécnicos, permitiendo evaluar su capacidad para soportar las cargas del pavimento flexible de manera eficiente.

#### **Formulación de hipótesis:**

##### **Hipótesis nula ( $H_0$ )**

Los valores de CBR obtenidos no tienen un impacto significativo en la capacidad de las subrasantes para soportar las cargas del pavimento flexible.

##### **Hipótesis alternativa ( $H_1$ )**

Los valores de CBR obtenidos tienen un impacto significativo en la capacidad de las subrasantes para soportar las cargas del pavimento flexible.

#### **Análisis de los datos del CBR:**

Al evaluar el valor CBR de 82.69% obtenido para el material de la cantera Sotapa en relación con el estándar mínimo de 30%.

#### **Impacto en el diseño del pavimento flexible:**

Al estimar cómo este material puede contribuir a la redistribución eficiente de cargas y **reducir la deformación estructural del pavimento.**

## **Conclusión**

los valores de CBR de la cantera Sotapa cumplen con los requerimientos estructurales para ser utilizados como sub-base o base en pavimentos flexibles.

Identificar cómo este material puede influir en el desempeño general de la estructura vial.

## **Hipótesis específica 3**

### **Premisa 3**

La variación de la deflexión en la estructura de pavimentos flexibles sobre subrasantes heterogéneas en la carretera Abancay – Andahuaylas, está directamente influenciada por las diferencias en las propiedades mecánicas y geotécnicas de las subrasantes, lo que afecta el desempeño estructural del pavimento.

### **Formulación de hipótesis:**

#### **Hipótesis nula ( $H_0$ )**

Las diferencias en las propiedades mecánicas y geotécnicas de las subrasantes no tienen un impacto significativo en la variación de la deflexión del pavimento flexible.

#### **Hipótesis alternativa ( $H_1$ )**

Las diferencias en las propiedades mecánicas y geotécnicas de las subrasantes tienen un impacto significativo en la variación de la deflexión del pavimento flexible.

### **Análisis de los datos de deflexión:**

Al examinar las deflexiones características obtenidas ( $34.9 \times 10^{-2}$  mm) en relación con el límite admisible ( $78.69 \times 10^{-2}$  mm).

### **Relación con las propiedades geotécnicas:**

Proponer una correlación entre las propiedades de las subrasantes (CBR, cohesión, densidad, contenido de finos, etc.) y las deflexiones medidas y analizar cómo la heterogeneidad de las subrasantes puede estar vinculada a las variaciones observadas en los valores de deflexión.

## **Conclusión**

La capacidad estructural del pavimento es adecuada para las condiciones actuales y si las subrasantes heterogéneas influyen de manera crítica en el desempeño del pavimento y las propiedades mecánicas y geotécnicas de las subrasantes tienen un impacto significativo en las deflexiones medidas.

## **5.2. Discusiones**

Bhandari (2023) exploró los efectos de factores estructurales, carga de tráfico y condiciones ambientales en el desempeño del pavimento. Mediante un análisis de variables como el tipo de base, el espesor de las capas de concreto asfáltico y subrasante, así como la carga de tráfico y condiciones climáticas, empleó modelos estadísticos avanzados como GLM y RF. Bhandari concluyó que el espesor y tipo de base impactan significativamente en el surco y agrietamiento del pavimento, y destacó la importancia de estos modelos en el diseño de estructuras viales. Al contrastarlo con la investigación en Huancarama, ambos estudios subrayan la relevancia del espesor y la carga de tráfico. Sin embargo, en Huancarama se aplica un análisis más local, enfocado en la variabilidad de calidad del suelo y la aplicación de métodos de deflexión que no integran modelado estadístico avanzado. Esto sugiere que, aunque ambas investigaciones coinciden en que un diseño estructural adecuado es crucial para mitigar el deterioro, el estudio de Huancarama mantiene un enfoque más contextualizado a su geografía.

Seguidamente, Deng et al. (2021) analizaron el deterioro de pavimentos mediante perfiles de deflexión bajo cargas en movimiento, aplicando un modelo tridimensional de elementos finitos para representar el comportamiento del pavimento ante distintas velocidades y propiedades estructurales. Los autores destacaron que el ángulo de retraso entre carga y deflexión está vinculado al grado de deterioro, y propusieron el uso de dispositivos END para optimizar el monitoreo estructural. En comparación con Huancarama,

donde se evalúan deflexiones sin modelos tridimensionales complejos, el estudio de Deng et al. ofrece una metodología que captura con mayor precisión la respuesta del pavimento a cargas dinámicas, aunque ambos trabajos coinciden en la importancia de las propiedades de la subrasante. La aplicación de modelos tridimensionales avanzados podría, no obstante, ser limitada en Huancarama por los recursos y el contexto específico de evaluación.

Asimismo, Peng et al. (2020) abordaron la simulación de la estructura del pavimento flexible considerando humedad y estrés en la subrasante, utilizando modelos de elementos finitos y software especializado como GEOSTUDIO y ABAQUS. Sus resultados indicaron que la distribución de humedad afecta el módulo resiliente del suelo y, consecuentemente, la respuesta estructural. Este antecedente se diferencia del estudio en Huancarama, que no incorpora de forma explícita el impacto de la humedad, enfocándose en cambio en la evaluación local mediante deflectometría. Aunque ambos trabajos resaltan la importancia de la subrasante, el uso de herramientas avanzadas como las propuestas por Peng et al. podría aportar un nivel adicional de precisión, particularmente en climas variables como los de la región de Huancarama.

Posteriormente, Kumar y Prasad (2020) propusieron una formulación para determinar deflexiones en sistemas de pavimento flexible de dos capas, considerando las interacciones entre la subrasante y la capa de rodadura. A través de un modelo mecanicista en ABAQUS, evaluaron el impacto de los módulos de base y subrasante, así como la huella del neumático. En comparación, el estudio en Huancarama utiliza deflectometría sin un enfoque mecanicista, analizando el comportamiento estructural sin desglosar interacciones específicas entre capas. Ambos estudios valoran las deflexiones para el diseño de pavimentos, pero el modelo mecanicista de Kumar y Prasad sugiere un análisis más detallado de las interacciones de capa, lo cual podría enriquecer los resultados en Huancarama al mejorar la precisión del modelado estructural.

Por otro lado, Burgués y Benalcázar (2020) realizaron un análisis de costos de alternativas estructurales para la vía Nanegal-Palmitopamba, evaluando el uso de membrana sintética, el mejoramiento de la subrasante y el método sin mejoramiento. Concluyeron que la estabilización química con Tecofix era la opción más eficiente en cuanto a costo-beneficio. En contraste, el análisis en Huancarama se enfoca exclusivamente en la evaluación estructural, sin considerar el aspecto económico. Aunque ambos trabajos destacan la importancia del tratamiento de la subrasante, el enfoque económico de Burgués y Benalcázar aporta una perspectiva que podría complementar el estudio de Huancarama en proyectos de optimización de recursos, proporcionando una base para análisis de viabilidad económica en futuras intervenciones.

En otro contexto, Flores (2023) analizó la variabilidad en el comportamiento estructural de pavimentos en la carretera Juliaca-Caracoto, evaluando cómo los distintos tipos de suelo de subrasante influyen en las deflexiones. Este estudio, que emplea ensayos de laboratorio y de campo, enfatiza la necesidad de caracterizar la variabilidad del suelo para asegurar la estabilidad del pavimento a largo plazo. Al compararlo con Huancarama, ambos estudios reconocen el papel crítico de la subrasante en el comportamiento del pavimento. No obstante, el análisis de Flores, al abordar más detalladamente los tipos de suelo, podría enriquecer el enfoque de Huancarama mediante una caracterización más específica que permita anticipar zonas de riesgo y optimizar la resistencia de la estructura.

De igual manera, Quispe y Mendoza (2022) investigaron el comportamiento de la subrasante en la red vial San Juan del Oro-Quispicanchis, identificando un alto contenido de humedad y elevado índice de plasticidad, lo cual impacta en la estabilidad del pavimento. Este antecedente aporta una caracterización profunda de la humedad y plasticidad de la subrasante, aspectos que no se desarrollan en el estudio de Huancarama. Al incorporar estos factores, el análisis en Huancarama podría adquirir mayor precisión en la identificación de

segmentos críticos, especialmente en tramos expuestos a climas extremos, mejorando el diseño y la durabilidad del pavimento.

Por su parte, Lino (2021) evaluó el comportamiento estructural del pavimento en la carretera Federico Basadre mediante técnicas de deflexión, destacando cómo la variación de temperatura influye en las deflexiones observadas. Su estudio concluyó que el método no destructivo es eficaz para identificar tramos deteriorados y recomendó su aplicación en el monitoreo preventivo. Comparado con Huancarama, donde la temperatura no se considera un factor evaluativo, el antecedente de Lino aporta un enfoque complementario, resaltando la importancia de incluir la variación térmica en la evaluación, particularmente en climas variables, para mejorar la planificación de mantenimiento a largo plazo.

Finalmente, Apumayta (2020) exploró el comportamiento de la subrasante en la carretera Calachota-Ayauca, evaluando las deflexiones durante la fase de construcción para verificar la disminución de estas en cada capa. Concluyó que el control de deflexiones en la construcción es fundamental para la estabilidad a largo plazo. En contraste, el estudio en Huancarama se centra en el análisis posconstrucción, sin verificar deflexiones en etapas tempranas.

## VI. Conclusiones

### Conclusión general

El análisis estructural de la carretera Abancay–Andahuaylas muestra que los pavimentos flexibles presentan un desempeño adecuado sobre subrasantes heterogéneas, con deflexiones características en ambos carriles ( $34.9 \times 10^{-2}$  mm y  $29.2 \times 10^{-2}$  mm) dentro de los límites admisibles, indicando una vida útil remanente significativa. La capacidad portante incrementa con la profundidad, alcanzando hasta  $1.91 \text{ kg/cm}^2$ , lo que sugiere mayor estabilidad en secciones profundas. Los asentamientos, que varían según el ancho del pavimento, reflejan que estructuras más anchas tienden a tener mayores deformaciones. Además, las propiedades mecánicas del suelo, como el peso volumétrico ( $1.84\text{-}1.86 \text{ TN/m}^3$ ), el ángulo de fricción ( $17.81^\circ\text{-}21.06^\circ$ ) y la cohesión ( $0.25\text{-}0.39 \text{ TN/m}^3$ ), reflejan que los suelos con mayor cohesión y ángulo de fricción exhiben mayor resistencia estructural, lo que influye en la estabilidad general del pavimento. Estos resultados corroboran que el comportamiento estructural del pavimento está intrínsecamente ligado a la variabilidad de las propiedades de la subrasante en la región, sugiriendo una respuesta óptima de la estructura ante las condiciones de heterogeneidad presentes en el suelo.

### Conclusiones específicas

- Los análisis granulométricos y límites de Atterberg en las calicatas identificaron suelos como grava mal graduada con arcilla (GP GC) y grava arcillosa (GC). En las calicatas C-01 y C-02, se observó una estructura de GP GC, mientras que C-03 mostró una composición de GC con mayor contenido de finos, lo que puede indicar un comportamiento más plástico y menor permeabilidad. Este análisis cuantitativo asegura la clasificación de suelos y permite comprender su impacto en el pavimento.
- El CBR (California Bearing Ratio) obtenido para el material de la cantera Sotapa es de 82.69%, superando ampliamente el valor mínimo especificado de 30%. Este

resultado indica una excelente capacidad de soporte del material, lo que lo hace altamente adecuado para ser utilizado como sub-base en la construcción de pavimentos. Este elevado valor de CBR asegura que el material puede resistir cargas pesadas y distribuir las de manera eficiente, contribuyendo a la estabilidad y durabilidad de la estructura vial.

- La evaluación deflectométrica en la carretera Abancay–Andahuaylas muestra que las deflexiones características son menores a la deflexión admisible, lo que indica que el pavimento mantiene una capacidad estructural adecuada. Para el carril derecho, la deflexión característica obtenida fue de  $34.9 \times 10^{-2}$ , ambas por debajo del límite admisible de  $78.69 \times 10^{-2}$ . Estos valores sugieren una variación favorable en la deflexión que respalda la estabilidad del pavimento bajo las cargas actuales.

## VII. Recomendaciones

Se recomienda implementar un plan integral de monitoreo y mantenimiento del pavimento en la carretera Abancay–Andahuaylas, enfocado en la variabilidad de las subrasantes heterogéneas, con especial atención a las secciones de mayor ancho y profundidad. Este plan debería incluir el monitoreo periódico de deflexiones y asentamientos para asegurar que los valores se mantengan dentro de los límites admisibles, garantizando así una vida útil remanente significativa. Además, es fundamental ajustar el diseño estructural y las técnicas de refuerzo en función de las propiedades mecánicas específicas del suelo (peso volumétrico, ángulo de fricción y cohesión), optimizando la estabilidad del pavimento en aquellas áreas donde la cohesión y el ángulo de fricción son menores. Este enfoque permitirá que el pavimento responda de manera óptima a las condiciones de heterogeneidad de las subrasantes, asegurando una estructura durable y estable frente a las demandas del tráfico y condiciones ambientales de la región.

Se recomienda ajustar el diseño del pavimento y las estrategias de drenaje en función de las características específicas del suelo identificadas en las calicatas. Dado que las zonas con grava arcillosa (GC) y mayor contenido de finos en la calicata C-03 presentan mayor plasticidad y menor permeabilidad, estas áreas requieren especial atención para evitar acumulación de agua y reducir el riesgo de deformaciones.

Se recomienda el uso del material de la cantera Sotapa como sub-base en la construcción de pavimentos, debido a su excelente capacidad de soporte demostrada por un CBR del 82.69%, muy superior al valor mínimo requerido de 30%. Este material garantiza una adecuada resistencia frente a cargas pesadas y una eficiente distribución de esfuerzos, lo que contribuirá significativamente a la estabilidad y durabilidad de las estructuras viales.

Se recomienda mantener un programa de monitoreo periódico de las deflexiones en la carretera Abancay–Andahuaylas, dado que los valores actuales (con una deflexión característica de  $34.9 \times 10^{-2}$  mm en el carril derecho) se encuentran por debajo del límite admisible de  $78.69 \times 10^{-2}$  mm, lo que indica una adecuada capacidad estructural del pavimento bajo las cargas actuales. Este monitoreo permitirá observar cualquier cambio en las deflexiones a lo largo del tiempo, asegurando que el pavimento continúe operando dentro de los parámetros de estabilidad estructural, y facilitando una intervención oportuna en caso de detectar un aumento en las deflexiones que pudiera comprometer su integridad.

## VIII. Referencias

- Álvarez, M. G. (2021). *El Proceso de Investigación*. <http://file:///C:/Users/OS/Downloads/MENDEZ%20ALVAREZ%20Metodologia%20Investigacion%20Ciencias%20Economicas%20y%20Administrat-1.pdf>
- Amakye, S., Abbey, S., & Booth, A. (2022). *Road Pavement Thickness and Construction Depth Optimization Using Treated and Untreated Artificially-Synthesized Expansive Road Subgrade Materials with Varying Plasticity Index*. University of South Wales. <https://doi.org/https://www.mdpi.com/1996-1944/15/8/2773>
- Apumayta, D. (2020). *Determinación del comportamiento estructural del pavimento flexible y su relación de los suelos conformantes de la plataforma vial, tramo Calachota - Ayauca, Yauyos, 2020*. Universidad Cesar Vallejo. <https://doi.org/https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/59626>
- ARCC. (2023). *75 obras fueron reactivadas con financiamiento de la ARCC en 10 regiones*. Autoridad para la Reconstrucción con Cambios. <https://doi.org/https://www.gob.pe/institucion/rcc/noticias/887507-75-obras-fueron-reactivadas-con-financiamiento-de-la-arcc-en-10-regiones>
- Arias, j. l. (2021). *diseño y metodología de la investigación*. [https://gc.scalahed.com/recursos/files/r161r/w26022w/Arias\\_S2.pdf](https://gc.scalahed.com/recursos/files/r161r/w26022w/Arias_S2.pdf)
- Armijos, C. (2010). *Evaluación Superficial de algunas Calles de la Ciudad de Loja*. Ecuador. <https://doi.org/https://dspace.utpl.edu.ec/bitstream/123456789/1484/3/Tesis.pdf>
- Arrieta, J. (2017). *Evaluación del pavimento mediante el método pavement condition index en un sistema de Conformación geográfica para calcular costos de mantenimiento, caso avenida los constructores- La Molina*. San Martín de Porres. <https://doi.org/https://360enconcreto.com/blog/detalle/importancia-y-ventajas-del-pavimento-en-concreto/>
- Braja, M. (2019). *Principles of foundation engineering*. <https://rexresearch1.com/ConstructionFoundationLibrary/PrinciplesFoundationEngineering.pdf>
- Berazain, E. (2022). *Distribución de esfuerzos en el Suelo*. Researchgate. [https://doi.org/https://www.researchgate.net/publication/366389851\\_Distribucion\\_de\\_esfuerzos\\_en\\_el\\_suelo](https://doi.org/https://www.researchgate.net/publication/366389851_Distribucion_de_esfuerzos_en_el_suelo)
- Bhandari, S., Luo, X., & Wang, F. (2023). *Understanding the effects of structural factors and traffic loading on flexible pavement performance*. International Journal of Transportation Science and Technology. <https://doi.org/https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2046043022000211>
- Burgues, A., & Benal, G. (2020). *Análisis de costos de la estructura del pavimento flexible de la vía Nanegal- Palmitopamba, provincia de Pichincha, considerando tres alternativas: membrana sintética, mejoramiento de la subrasante y sin mejoramiento*. Pontificia Universidad Católica del Ecuador. [https://doi.org/https://repositorio.continental.edu.pe/bitstream/20.500.12394/13050/7/IV\\_FIN\\_105\\_TE\\_Silva\\_Chucuya\\_2023.pdf](https://doi.org/https://repositorio.continental.edu.pe/bitstream/20.500.12394/13050/7/IV_FIN_105_TE_Silva_Chucuya_2023.pdf)
- CE.10 PAVIMENTOS Urbanos. (s.f.). *Norma Técnica*. Norma técnica. [https://doi.org/https://cdn-web.construccion.org/normas/files/tecnicas/Pavimentos\\_Urbanos.pdf](https://doi.org/https://cdn-web.construccion.org/normas/files/tecnicas/Pavimentos_Urbanos.pdf)
- Comex Perú. (2020). *Infraestructura vial: gobiernos subnacionales estancados*. <https://doi.org/https://www.comexperu.org.pe/articulo/infraestructura-vial-gobiernos-subnacionales-estancados>

- Deng, Y., Luo, X., Zhang, Y., & Lytton, R. (2021). *Evaluation of flexible pavement deterioration conditions using deflection profiles under moving loads*. *Transportation Geotechnics* Volume 26, January 2021, 100434. <https://doi.org/https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2214391220303226>
- El peruano. (2022). *Reconstrucción de más de 2,300 obras de pistas y veredas fue terminada en 12 regiones*. El Peruano. <https://doi.org/https://www.elperuano.pe/noticia/197398-reconstruccion-de-mas-de-2300-obras-de-pistas-y-veredas-fue-terminada-en-12-regiones>
- Espinoza, R. (2021). *Geometría aplicada a la ingeniería Vial*. Lima. [https://www.researchgate.net/publication/393471798\\_Analisis\\_del\\_diseno\\_geometrico\\_de\\_vias\\_revision\\_y\\_tendencias\\_actuales\\_en\\_la\\_literatura\\_academica](https://www.researchgate.net/publication/393471798_Analisis_del_diseno_geometrico_de_vias_revision_y_tendencias_actuales_en_la_literatura_academica)
- Falcon, J. (2019). *Evaluación del impacto de la carga vehicular sobre la estructura del pavimento flexible en la Av. Javier Prado Este, La Molina – Lima, 2019*. Universidad Cesar Vallejo. [https://doi.org/https://repositorio.ucv.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12692/35497/B\\_Falcon\\_HJB.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://doi.org/https://repositorio.ucv.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12692/35497/B_Falcon_HJB.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Fernández, M. (2020). *Determinación del comportamiento estructural del pavimento flexible de la carretera Cajamarca-Celendín-Balsas, tramo Chaquilpampa-Santa Rosa de Chaquil, mediante el análisis deflectométrico*. Universidad Nacional de Cajamarca. <https://doi.org/https://repositorio.unc.edu.pe/handle/20.500.14074/3733>
- Flores, L. (2023). *Evaluación del comportamiento estructural de pavimentos flexibles según suelo de subrasante, carretera Juliaca - Caracoto, Puno 2021*. <https://repositorio.continental.edu.pe/handle/20.500.12394/12536>, Ed.) *Cusco: Universidad Continental*.
- Frankie, F. (2023). *Estudios Geotécnicos*. Geosupport. <https://doi.org/https://estudiosgeotecnicos.info/index.php/descriptores-geotecnicos-5-plasticidad-limites-de-atterberg-y-consistencia/>
- Gallardo, R. Q., & Cuanalo, O. (2017). *Characterization of types of failures on pavements of Ocaña city - North Santander*. Universidad Francisco de Paula Santander. <https://doi.org/https://revistas.ufps.edu.co/index.php/ingenio/article/view/2134>
- García, A. (2015). *Diseño de pavimento asfáltico por el método AASHTO 93 empleando el software DISAASHTO93*. Universidad Militar Nueva GRANADA. <https://doi.org/https://core.ac.uk/download/pdf/143451539.pdf>
- García, C. (2012). *Diagnóstico del estado situacional de la vía: av. argentina - av. 24 de junio por el método: índice de condición de pavimentos-2012*. <https://doi.org/https://repositorio.upla.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12848/256/Garcia%20Suasnabar%20Ricardo%20Miguel.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Gomez, A. (2019). *Física y química del suelo*. [https://www.smcsmx.org/files/2023/LIBRO\\_3\\_2023.pdf](https://www.smcsmx.org/files/2023/LIBRO_3_2023.pdf)
- Guitierrez, G., & Bravo, J. (2007). *Tendido de Carpeta Asfáltica*. <https://doi.org/http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/handle/132.248.52.100/16368>
- Guzman, A. (2016). *El especialista en transporte, el Mgtr. Julián Rivera, comenta la importancia de una adecuada infraestructura vial en el país*. Universidad De Plura. <https://doi.org/https://www.udep.edu.pe/hoy/2015/12/la-red-vial-es-imprescindible-para-el-desarrollo-y-crecimiento-de-un-pais/>
- Harinder, C. (2022). *Materials Today : Proceedings Evaluation of different types of soil subgrade using glass powder for Low-Volume Roads ( LVRs )*,. *ScienceDirect*

- Volume 62/ part 6.  
<https://doi.org/https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2214785322031455>
- Higuera, C. (2010). *Nociones Sobre Métodos de Diseños de Estructuras de Pavimentos de Carreteras*. Grupo Imprenta y Publicaciones. <https://doi.org/https://es.scribd.com/document/340439312/Nociones-sobre-metodos-de-diseno-de-estructuras-de-pavimentos-para-carreteras-V2-Higuera-pdf>
- Huang, Y. (2005). *Pavement analysis and design (Segunda ed.)*. Pearson Education Hall. <https://doi.org/https://www.amazon.com/-/es/Yang-H-Huang/dp/8131721248>
- Huilcapi, L., & Pucha, K. (2015). *Análisis Comparativo de los métodos de evaluación funcional de pavimentos flexibles en las vías García Moreno y Panamericana Sur del cantón Colta - Provincia de Chimborazo*. Universidad Nacional de Chimborazo. <https://doi.org/http://dspace.unach.edu.ec/handle/51000/565>
- Kandhal, R. (1996). *Hot mix asphalt materials, mixture design and construction*. Research and Education Foundation. [https://www.academia.edu/31826639/Hot\\_Mix\\_Aspphalt\\_Material\\_Mixture\\_Design\\_and\\_Construction\\_Kandhal](https://www.academia.edu/31826639/Hot_Mix_Aspphalt_Material_Mixture_Design_and_Construction_Kandhal)
- Kumar, A., & Prasad, J. (2020). *Analysis and design of two layered flexible pavement systems: A new mechanistic approach*. Computers and Geotechnics Volume 117,. <https://doi.org/https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0266352X19303027>
- Lino, K. (2021). *Comportamiento estructural del pavimento flexible mediante método no destructivo del km. 62+000 al km. 63+000 de la Carretera Federico Basadre, Ucayali 2021*. Universidad Cesar Vallejo. <https://doi.org/https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/79263>
- Massenlli, G., & De Paiva, C. (2019). *Influencia de la deflexión superficial en pavimentos flexibles con subrasante de baja resistencia*. Revista chilena de ingeniería, 27(4), 613-624. [https://doi.org/https://www.scielo.cl/scielo.php?pid=S0718-33052019000400613&script=sci\\_arttext&utm\\_source=chatgpt.com](https://doi.org/https://www.scielo.cl/scielo.php?pid=S0718-33052019000400613&script=sci_arttext&utm_source=chatgpt.com)
- Massenlli, S., & Paiva, C. (2019). *Influencia de la deflexión superficial en pavimentos flexibles con subrasante de baja resistencia*. [https://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0718-33052019000400613](https://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-33052019000400613), Ed.) Brsail: Universidade Estadual de Campinas.
- Melo Piraquive, C. (2018). *Propiedades mecánicas de los materiales: Ensayos de tracción*. Fundacion universitaria, 14(2). <https://doi.org/https://repositorio.konradlorenz.edu.co/handle/001/853>
- Montaño A, & Navarro Rangel, M. d. (2018). *The soil and its multifunctionality: What happens down there?* Revista Científica Multidisciplinaria de Prospectiva, 25(3). <https://doi.org/https://doi.org/10.30878/ces.v25n3a9>
- Montejo, A. (2002). *Ingeniería de Pavimentos para Carreteras*. Universidad Católica de Colombia Ediciones y Publicaciones. [https://doi.org/https://www.academia.edu/22782711/Ingenieria\\_de\\_pavimentos\\_Alfonso\\_Montejo\\_Fonseca](https://doi.org/https://www.academia.edu/22782711/Ingenieria_de_pavimentos_Alfonso_Montejo_Fonseca)
- MTC. (2014). *Manual de carreteras suelos geología, geotecnia, y pavimentos*. MTC. [https://doi.org/https://portal.mtc.gob.pe/transportes/caminos/normas\\_carreteras/MTC%20NORMAS/ARCH\\_PDF/MAN\\_7%20SGGP-2014.pdf](https://doi.org/https://portal.mtc.gob.pe/transportes/caminos/normas_carreteras/MTC%20NORMAS/ARCH_PDF/MAN_7%20SGGP-2014.pdf)
- MTC. (2020). *Clasificador de Rutas*. Ministerio de Transportes y comunicaciones. <https://doi.org/https://portal.mtc.gob.pe/transportes/caminos/rutas.html>
- Olivera, P. (2020). *Comportamiento estructural del pavimento flexible de la carretera Abancay-Cusco, sobre la sub rasantes heterogéneas, Apurímac, 2020*. Universidad

- Cesar Vallejo.  
[https://doi.org/https://alicia.concytec.gob.pe/vufind/Record/UCVV\\_25b098bf9e8372b8bc9eb9f63d2d517f/Details](https://doi.org/https://alicia.concytec.gob.pe/vufind/Record/UCVV_25b098bf9e8372b8bc9eb9f63d2d517f/Details)
- Ordero, M., & Lopez, A. (2019). *Análisis estructural del pavimento flexible en la calle la fortaleza entre by pass y avenida Miraflores del cantón Portoviejo*. Universidad Estatal del Sur de Manabi.  
<https://doi.org/https://repositorio.unesum.edu.ec/handle/53000/1389>
- Ospina, G. (2020). *Mejoramiento de subrasantes de tipo arcilloso mediante la adición de escoria de acero*. Revista de Investigación, Desarrollo e Innovación., 11(1), 185-196.  
[https://doi.org/https://revistas.uptc.edu.co/index.php/investigacion\\_duitama/article/view/11692](https://doi.org/https://revistas.uptc.edu.co/index.php/investigacion_duitama/article/view/11692)
- Palomino, C., & Salazar, D. (2019). *Análisis comparativo de metodologías de evaluación VIZIR y PCI (Parte B), aplicado a la estructura de pavimento de una vía urbana, en el barrio Chicó Norte (localidad Chapinero)*. Universidad Militar Nueva Granada.  
<https://doi.org/https://repository.unimilitar.edu.co/handle/10654/17863?show=full>
- Peng, J., Zhang, J., Li, J., & Yao, Y. (2020). *Modeling humidity and stress-dependent subgrade soils in flexible pavements*. Computers and Geotechnics Volume 120, .  
<https://doi.org/https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0266352X1930477X>
- Pinilla, J. (2008). *Auscultación, calificación del estado superficial y evaluación económica de la carretera sector Puente de la Libertad - Maltería desde el K0+000 hasta el K6+000 (código 5006)*. Universidad de Colombia.  
<https://doi.org/https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/3473?show=full>
- Quispe, E., & Mendoza, N. (2022). *Análisis del comportamiento en la subrasante de un pavimento flexible convencional, red vial San Juan del Oro – Quispicanchis, Puno*. Puno: Universidad Peruana Union.  
<https://doi.org/https://repositorio.upeu.edu.pe/handle/20.500.12840/6067>
- Ramirez. (2019). *Propiedades mecánicas de materiales de construcción*. Editorial técnica civil.  
<https://libros.jdc.edu.co/index.php/editorial/catalog/download/40/41/252?inline=1>
- Rivera, M. (2022). *Caracterización e importancia*. Puerto Madero Editorial Académica.  
<https://doi.org/https://dialnet.unirioja.es/servlet/libro?codigo=933019&utm>
- Rondón, A., & Reyes, F. (2022). *Pavimentos Materiales, construcción y diseño*. Ecoe Ediciones.  
<https://doi.org/https://www.ecoediciones.com/wp-content/uploads/2022/05/Pavimentos-materiales-construccion-y-diseno-contenido.pdf>
- Salazar Cordova, G. (2015). *Estudio de las Condiciones de la Vía Pasa - La Dolorosa - Lirio Langogín - Mocaló de las Parroquias Pasa y San Fernando, Cantón Ambato, Provincia de Tungurahua para Satisfacer las Necesidades del Lugar*. Universidad Técnica de ambato.  
<https://doi.org/https://repositorio.uta.edu.ec/handle/123456789/11813>
- Sampier, R. H. (2019). *Metodología de la investigación*.  
[https://apiperiodico.jalisco.gob.mx/api/sites/periodicooficial.jalisco.gob.mx/files/metodologia\\_de\\_la\\_investigacion\\_-\\_roberto\\_hernandez\\_sampieri.pdf](https://apiperiodico.jalisco.gob.mx/api/sites/periodicooficial.jalisco.gob.mx/files/metodologia_de_la_investigacion_-_roberto_hernandez_sampieri.pdf)
- Sanchez. (2018). *Mecánica del pavimento*.
- SCT. (2001). *Manual Estadístico del Sector Transporte*. Instituto Mexicano del Transporte.  
<https://doi.org/https://imt.mx/archivos/Publicaciones/Manual/mn2001.pdf>
- Tamayo., M. T. (2020). *Metodología de la Investigación: Guía para la Realización de Trabajos Académicos*.  
<https://avdiaz.wordpress.com/wp-content/uploads/2010/09/metodologia-formal-investigacion-cientifica.pdf>

- Thenoux, G. (2020). *Aplicación de una nueva metodología para el control de compactación de suelos: Clegg Hammer*. Pontificia Universidad Católica de Chile. Departamento de Ingeniería de Construcción. <https://doi.org/https://revistaingenieriaconstruccion.uc.cl/index.php/ric/article/view/17943>
- Trivino, R., & Moll Martinez, R. (2022). *Evaluación deflectométrica en pavimentos flexibles mediante la viga Benkelman*. Revista Científica y Tecnológica UPSE, 8(3), 203-224. <https://doi.org/file:///C:/Users/PC/Downloads/Dialnet-EvaluacionDeflectometricaEnPavimentosFlexiblesMedi-8637931.pdf>
- Voronin, B. F., & Villalobos-Hernández, G. (2012). *Especificaciones en el cálculo del radio de curvatura de la leva del mecanismo plano*. Científica,, 16(2), 75-82. <https://doi.org/www.redalyc.org/articulo.oa?id=61425146003>

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