



UNIVERSIDAD NACIONAL DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

Características físico-mecánicas e hidráulicas del pavimento articulado en la zona oriental de la ciudad de Riobamba.

**Proyecto de Investigación previo a la obtención del título de
Ingeniero Civil**

Autores:

Alvear Broncano, Jonathan Joel
Piñas Valdivieso, Eduardo Francisco

Tutor:

Ing. Hernán Vladimir Pazmiño Chiluiza, MSc.

Riobamba, Ecuador. 2024

DECLARATORIA DE AUTORÍA

Yo, Jonathan Joel Alvear Broncano, con cédula de ciudadanía 0650005614 y Eduardo Francisco Piñas Valdivieso con cédula de ciudadanía 0604334912, autores del trabajo de investigación titulado: **“CARACTERÍSTICAS FÍSICO-MECÁNICAS E HIDRÁULICAS DEL PAVIMENTO ARTICULADO EN LA ZONA ORIENTAL DE LA CIUDAD DE RIOBAMBA”**, certifico que la producción, ideas, opiniones, criterios, contenidos y conclusiones expuestas son de mí exclusiva responsabilidad.

Asimismo, cedo a la Universidad Nacional de Chimborazo, en forma no exclusiva, los derechos para su uso, comunicación pública, distribución, divulgación y/o reproducción total o parcial, por medio físico o digital; en esta cesión se entiende que el cesionario no podrá obtener beneficios económicos. La posible reclamación de terceros respecto de los derechos de autor (a) de la obra referida, será de mi entera responsabilidad; librando a la Universidad Nacional de Chimborazo de posibles obligaciones.

En Riobamba, 31 de julio de 2024.



Jonathan Joel Alvear Broncano
C.I: 0650005614

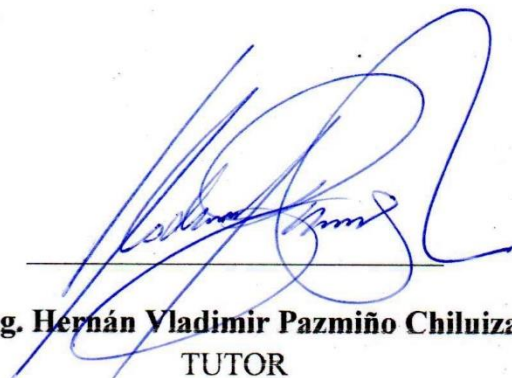


Eduardo Francisco Piñas Valdivieso
C.I: 0604334912

DICTAMEN FAVORABLE DEL PROFESOR TUTOR

Quien suscribe, **Ing. Hernán Vladimir Pazmiño Chiliza Msc.** catedrático adscrito a la Facultad de Ingeniería, por medio del presente documento certifico haber asesorado y revisado el desarrollo del trabajo de investigación “**Características físico-mecánicas e hidráulicas del pavimento articulado en la zona oriental de la ciudad de Riobamba.**”, bajo la autoría de Jonathan Joel Alvear Broncano y Eduardo Francisco Piñas Valdivieso; por lo que se autoriza ejecutar los trámites legales para su sustentación.

Es todo cuanto informar en honor a la verdad; en Riobamba, a los 8 días del mes de octubre de 2024.

A handwritten signature in blue ink, consisting of several large, overlapping loops and flourishes, positioned above a horizontal line.

Ing. Hernán Vladimir Pazmiño Chiliza Mgs.
TUTOR

CERTIFICADO DE LOS MIEMBROS DEL TRIBUNAL

Quienes suscribimos, catedráticos designados Miembros del Tribunal de Grado para la evaluación del trabajo de investigación **Características físico-mecánicas e hidráulicas del pavimento articulado en la zona oriental de la ciudad de Riobamba.**, presentado por Jonathan Joel Alvear Broncano, con cédula de identidad número 0605005614 y Eduardo Francisco Piñas Valdivieso, con cédula de identidad número 0604334912, bajo la tutoría de Mgs. Hernán Vladimir Pazmiño Chiluiza; certificamos que recomendamos la APROBACIÓN de este con fines de titulación. Previamente se ha evaluado el trabajo de investigación y escuchada la sustentación por parte de su autor; no teniendo más nada que observar.

De conformidad a la normativa aplicable firmamos, en Riobamba 22 de noviembre de 2024.

Ing. César Mora, Mgs.
**PRESIDENTE DEL TRIBUNAL DE
GRADO**



Firma

Ing. Carlos Saldaña, Mgs.
**MIEMBRO DEL TRIBUNAL DE
GRADO**



Firma

Ing. Alfonso Arellano, Mgs.
MIEMBRO DEL TRIBUNAL DE GRADO



Firma



Dirección
Académica
VICERRECTORADO ACADÉMICO

en movimiento



UNACH-RGF-01-04-08.15
VERSIÓN 01: 06-09-2021

CERTIFICACIÓN

Que, **ALVEAR BRONCANO JONATHAN JOEL** con CC: **0650005614**, y **PIÑAS VALDIVIESO EDUARDO FRANCISCO** Con CC: **0604334912** estudiante de la Carrera **INGENIERÍA CIVIL**, Facultad de **INGENIERÍA**; han trabajado bajo mi tutoría el trabajo de investigación titulado "**CARACTERÍSTICAS FÍSICO-MECÁNICAS E HIDRÁULICAS DEL PAVIMENTO ARTICULADO EN LA ZONA ORIENTAL DE LA CIUDAD DE RIOBAMBA**", cumple con el 9%, de acuerdo al reporte del sistema Anti plagio **TURNITIN**, porcentaje aceptado de acuerdo a la reglamentación institucional, por consiguiente autorizo continuar con el proceso.

Riobamba, 7 de noviembre de 2024



Ing. Hernán Vladimir Pazmiño Chluiza Mgs
TUTOR

DEDICATORIA

El presente trabajo está dedicado a Dios, ya que con su bendición he logrado concluir con la carrera, a mis padres, Luis y Miriam por su amor incondicional y por ser mi principal fuente de motivación y fortaleza en cada etapa de mi vida, a mi familia, personas quienes me enseñaron el valor del esfuerzo y la perseverancia. A mis amigos, por su constante apoyo y compañía a lo largo de toda mi carrera universitaria ya que su presencia dentro y fuera de las aulas hizo de esta etapa una de las mejores y más llevaderas de mi vida. A todos ustedes, les dedico este logro, con toda la gratitud y amor.

Jonathan J. Alvear. B.

DEDICATORIA

El presente trabajo está dedicado a Dios, Padre de todo, fuente de inspiración y confianza para cumplir con esta meta; a mi padre, Eduardo, ejemplo de paciencia y apoyo, por ser mi principal fuente de motivación, junto con mis hermanas Marcela y Jimena, quienes supieron guiarme y entenderme con amor y fortaleza en cada etapa de mi vida.

A mi familia, especialmente a mi abuelito Gustavo, quien siempre brindó su apoyo y sabiduría, junto a quienes me enseñaron el valor del esfuerzo y la perseverancia.

A mis sobrinos Mishell y Eliam que estuvieron a mi lado apoyando.

A mis amigos Stalin, Kevin, Dennis, Ivanhoe, Salomé, y Joel, ejemplo de hermandad y lealtad, quienes siempre han estado incondicionalmente a mi lado en este largo trayecto; y a los que conocí en la universidad, quienes me brindaron su apoyo dentro y fuera de las aulas.

A todos ustedes, les dedico este logro con toda mi gratitud y amor.

Eduardo. F. Piñas. V.

AGRADECIMIENTO

En primer lugar, agradezco a Dios, por su constante guía y protección a lo largo de mi vida.

A la Universidad Nacional de Chimborazo por brindarme la oportunidad de formarme académicamente, su compromiso con la excelencia educativa y los recursos brindados en cada ciclo académico han sido vitales para el desarrollo profesional.

Agradezco también a mi tutor, Ing. Vladimir Pazmiño por su tiempo y orientación durante todo el proceso de investigación.

A los miembros de tribunal Ing. Alfonso Arellano, quien colaboró en esta investigación, al Ing. César Mora e Ing. Carlos Saldaña, por todos sus comentarios valiosos para la culminación de este trabajo.

Finalmente agradecer a todos mi amigos y compañeros, quienes siempre estuvieron a mi lado ya sea o no en lo académico, sus experiencias y apoyo siempre serán recordados.

Jonathan J. Alvear. B.

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios, quien con su infinito amor y paciencia supo encaminarme en mi misión.

A la Universidad Nacional de Chimborazo por brindarme la oportunidad de formarme académicamente, su compromiso con la excelencia educativa y los recursos brindados en cada ciclo académico han sido vitales para el desarrollo profesional.

Agradezco también a mi tutor, Ing. Vladimir Pazmiño por su tiempo, guía y paciencia durante todo el proceso de investigación.

A los miembros de tribunal Ing. Alfonso Arellano, quien colaboró en esta investigación con su vasta experiencia, al Ing. César Mora e Ing. Carlos Saldaña, por todos sus comentarios valiosos para la culminación de este trabajo.

A la persona que ya no forma parte de mi vida.

Finalmente agradecer a todos mi amigos y compañeros, en especial a Erick y Santiago quienes formaron parte fundamental en la realización de este trabajo y siempre brindaron su apoyo personal, me llevo grandes y maravillosos recuerdos de esta etapa de mi vida.

Eduardo. F. Piñas. V.

ÍNDICE GENERAL

DECLARATORIA DE AUTORÍA	
DICTAMEN FAVORABLE DEL PROFESOR TUTOR	
CERTIFICADO DE LOS MIEMBROS DEL TRIBUNAL	
CERTIFICADO ANTIPLAGIO	
DEDICATORIA	
AGRADECIMIENTO	
ÍNDICE GENERAL	
ÍNDICE DE TABLAS	
ÍNDICE DE FIGURAS	
ÍNDICE DE ANEXOS	
ACRÓNIMOS	
RESUMEN	
ABSTRACT	

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN.....	19
1.1 Antecedentes.....	19
1.2 Zona de Estudio.....	19
1.3 Planteamiento del Problema	20
1.4 Justificación del Problema	21
1.5 Objetivos.....	21
CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO.	22
2.1 Pavimento articulado	22
2.1.1 Generalidades.....	22
2.1.2 Pavimento articulado en el Ecuador.....	22
2.1.3 Estructura del Pavimento Articulado	22
2.2 Propiedades físicas del pavimento articulado	24
2.2.1 Espesor.....	24
2.2.2 Granulometría.....	24
2.2.3 Límites de Atterberg	24
2.2.4 Grado de Compactación.....	24
2.2.5 Densidad	25
2.2.6 Humedad.....	25
2.2.7 Absorción.....	26
2.2.8 Macrotextura	26
2.3 Propiedades mecánicas del pavimento articulado	27
2.3.1 Resistencia característica de adoquines.....	27
2.3.2 Resistencia al desgaste de capa granular	27
2.3.3 Módulo de Rigidez	27
2.3.4 Módulo de Young	27

2.3.5	Relación de Soporte California CBR	27
2.4	Propiedades hidráulicas del pavimento articulado.....	28
2.4.1	Permeabilidad.....	28
2.4.2	Infiltración.....	28
2.4.3	Tasa de infiltración	29
2.4.4	Coefficiente de esorrentía.....	29
CAPÍTULO III. METODOLOGIA.		30
3.1	Tipo de Investigación.....	30
3.2	Diseño de Investigación.....	30
3.3	Técnicas de recolección de Datos	30
3.4	Definición de muestra.....	30
3.4.1	Población	30
3.4.2	Muestra	30
3.4.3	Tipo de muestreo	30
3.4.4	Tamaño de la muestra	30
3.4.5	Ubicación de las muestras	32
3.4.6	Criterios de selección.....	32
3.5	Diagrama metodológico.....	32
3.6	Propiedades físicas del pavimento articulado	33
3.6.1	Granulometría.....	33
3.6.2	Límites de Consistencia	33
3.6.3	Humedad, densidad y absorción.....	33
3.6.4	Proctor	34
3.6.5	Cono de arena.....	34
3.6.6	Equipo EDG (Densímetro eléctrico).....	34
3.7	Propiedades mecánicas del pavimento articulado	36
3.7.1	Compresión de adoquines	36
3.7.2	Abrasión e impacto en la máquina de los ángeles.....	36
3.7.3	Equipo GEOGAUGE.....	37
3.8	Propiedades hidráulicas del pavimento articulado.....	38
3.8.1	Método del Infiltrómetro de doble anillo (UNACH 2024).....	38
CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....		40
4.1	PROPIEDADES FÍSICAS DEL PAVIMENTO ARTICULADO	40
4.1.1	Espesor de las capas.....	40
4.1.2	Absorción.....	40
4.1.3	Granulometría.....	44
4.1.4	Límites de Atterberg	48
4.1.5	Grado de compactación.....	49

4.1.6	Densidades	53
4.1.7	Humedades.....	54
4.2	PROPIEDADES MECÁNICAS DEL PAVIMENTO ARTICULADO.....	55
4.2.1	Resistencia a la compresión de adoquines (fk)	55
4.2.2	Resistencia a la abrasión de capa granular	56
4.2.3	Módulo de Young y módulo de rigidez.....	57
4.2.4	Estimación de CBR.....	57
4.3	PROPIEDADES HIDRÁULICAS DEL PAVIMENTO ARTICULADO	58
4.3.1	Permeabilidad.....	58
4.3.2	Infiltración.....	59
4.3.3	Comportamiento de las curvas de infiltración	61
4.3.4	Coefficientes de Escorrentía.....	61
4.4	COMPARACIÓN ENTRE PROPIEDADES	63
4.5	DISCUSIÓN	65
CAPÍTULO V. CONCLUSIONES y RECOMENDACIONES.....		69
5.1	CONCLUSIONES.....	69
5.2	RECOMENDACIONES	71
BIBLIOGRAFÍA		72
ANEXOS		76

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. División de la zona de estudio.	31
Tabla 2. Escala de distribución de partículas.....	33
Tabla 3. Requisitos de gradación de los materiales.	36
Tabla 4. Estructura del Pavimento Articulado.....	40
Tabla 5. Absorción Adoquines Lote 1 (Buen estado).	41
Tabla 6. Absorción Adoquines Lote 2 (Mal Estado).....	41
Tabla 7. Absorción y densidades de las camas de arena.	42
Tabla 8. Resumen de gravedades específicas y absorción de la base.....	42
Tabla 9. Resumen de gravedades específicas y absorciones de las subrasantes.	43
Tabla 10. Granulometría Camas de Arena.	44
Tabla 11. Granulometría Base.	44
Tabla 12. Granulometría Subrasantes.	45
Tabla 13. Resumen de granulometría.....	47
Tabla 14. Límite Líquido de las capas.	48
Tabla 15. Densidades de las capas.....	49
Tabla 16. Ensayo Proctor en camas de arena 50	50
Tabla 17. Ensayo Proctor en base.....	50
Tabla 18. Ensayo Proctor en subrasantes.	51
Tabla 19. Densidades de las capas.....	53
Tabla 20. Humedades de las capas.	54
Tabla 21. Resistencia a la compresión Lote 1 (Buen estado).	55
Tabla 22. Resistencia a la compresión Lote 2 (Mal estado).	55
Tabla 23. Resistencia a la abrasión de la base.	56
Tabla 24. Módulo de Young y módulo de rigidez.	57
Tabla 25. CBR estimado de las capas.	57
Tabla 26. Permeabilidad en pavimento articulado.....	58
Tabla 27. Observaciones y propiedades.....	59
Tabla 28. Comparativa de resultados.....	65

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Zona de estudio	20
Figura 2. Pavimento articulado permeable.....	28
Figura 3. Distribución zonas de estudio.....	31
Figura 4. Diagrama Metodológico.....	32
Figura 5. Infiltrómetro Doble Anillo	38
Figura 6. Caucho - Perfil Burlete Alambrado 341	38
Figura 7. Silicón Blanco ABRD 1200	38
Figura 8. Limpieza del Área de colocación.....	38
Figura 9. Relleno de juntas de adoquín.....	39
Figura 10. Sellado con silicón.....	39
Figura 11. Absorción de capas.....	43
Figura 12. Granulometría Camas de Arena.....	46
Figura 13. Granulometría Base.....	46
Figura 14. Granulometría Subrasantes.....	46
Figura 15. Composición granulométrica.....	47
Figura 16. Límite Líquido.....	48
Figura 17. Grado de Compactación.....	49
Figura 18. Proctor Camas de Arena.....	52
Figura 19. Proctor Base.....	52
Figura 20. Proctor Subrasantes.....	52
Figura 21. Densidades Subrasantes.....	53
Figura 22. Humedades Subrasantes.....	54
Figura 23. Comparación de f'c.....	56
Figura 24. Comparación entre todas las curvas de infiltración.....	60
Figura 25. Comparación entre curvas de infiltración de pavimento en buen estado.....	60
Figura 26. Comparación entre curvas de infiltración de pavimento en mal estado.....	60
Figura 27. Comparación coeficientes de escorrentía.....	61
Figura 28. Comparación coeficientes de escorrentía con normativa.....	62
Figura 29. Comparación C Escorrentía vs Soporte de California.....	63
Figura 30. Comparación C Escorrentía vs Soporte de California.....	63
Figura 31. Comparación Compactación, Infiltración y Soporte de California.....	63

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1. Propiedades del pavimento articulado.	76
Anexo 2. Resultados Absorción y Compresión adoquines.	77
Anexo 3. Resultados Gravedad específica y Absorción.	78
Anexo 4. Resultados Granulometría y Límites de consistencia.	79
Anexo 5. Resultados densidad, humedad y grado de compactación.....	80
Anexo 6. Resultados ensayo Proctor y resistencia a la abrasión.	81
Anexo 7. Resultados Infiltración del pavimento.	82
Anexo 8. Características del pavimento articulado.	83

ACRÓNIMOS.

CBR: California Bearing Ratio.

GEOGAUGE: Equipo eléctrico utilizado para evaluar el índice de CBR.

EDG: Densímetro eléctrico.

C: Coeficiente de escorrentía.

f'c: Resistencia a la compresión.

fm: Resistencia a la compresión promedio.

fk: Resistencia a la compresión característica.

Mr: Módulo de resiliencia.

K: Velocidad de infiltración.

Cu: Coeficiente de uniformidad.

Cc: Coeficiente de curvatura.

TPDA: Tráfico Promedio Diario Anual.

SUCS: Sistema Unificado de Clasificación de Suelos.

INEN: Instituto Ecuatoriano de Normalización.

INEC: Instituto Ecuatoriano de Estadísticas y Censos.

MOP: Ministerio de Obras Públicas.

ASTM: American Society for Testing and Materials.

AASHTO: American Association Standards Highway Transportation Officials.

RESUMEN

Palabras claves: Pavimento articulado, características, físico-mecánicas, hidráulicas, in situ, infiltración.

Los pavimentos articulados se deterioran antes de cumplir su vida útil debido a las deficiencias en los procesos constructivos que en conjunto con el uso de normativas no vigentes provocan que las precipitaciones pluviales afecten de manera negativa la estructura vial. Las circunstancias expuestas ameritan generar un informe en el que se detallen las características físico-mecánicas e hidráulicas del pavimento articulado en la zona oriental de la ciudad de Riobamba. Esta investigación presenta los resultados de dichas características con ensayos realizados in situ mediante el uso de equipos eléctricos, así como también, resultados ensayados en laboratorio destacando que la estructura vial en la mayoría de las zonas de análisis contaba con un pavimento subdimensionado. Se evidencia que las muestras obtenidas cumplen con las características físicas, mientras que, en las mecánicas, un lote de muestras no cumple con la resistencia a la compresión característica. En lo que corresponde a densidades y capacidad portante, los porcentajes están muy por debajo de lo estipulado en la normativa. El análisis de las propiedades hidráulicas indica coeficientes de escorrentía dentro del rango establecido en la normativa, superando por poco el rango máximo en una zona de pavimento articulado de buen estado. Es importante comparar estos resultados con el fin de optimizar el diseño de la estructura vial considerando las propiedades físico-mecánicas e hidráulicas en los sistemas de drenaje mejorando la calidad de vida del sector y controlando los procesos constructivos.

ABSTRACT

Interlocking pavements deteriorate before reaching their useful life due to deficiencies in construction processes, which, combined with the use of outdated regulations, cause rainfall to affect the road structure negatively. The circumstances presented warrant the creation of a report detailing the physical-mechanical and hydraulic characteristics of the interlocking pavement in the eastern part of the city of Riobamba. This research presents the results of these characteristics with in-situ tests carried out using electric equipment, as well as laboratory-tested results, highlighting that the road structure in most of the analyzed areas had an undersized pavement. The samples obtained meet the physical characteristics, while, in terms of mechanical properties, a batch of samples does not meet the characteristic compressive strength. Regarding densities and bearing capacity, the percentages are well below those stipulated in the regulations. The analysis of hydraulic properties indicates runoff coefficients within the range established by the regulations, slightly exceeding the maximum range in one area of well-preserved interlocking pavement. It is important to compare these results to optimize the road structure design, considering the physical-mechanical and hydraulic properties in the drainage systems to improve the quality of life in the area and to control construction processes.

Keywords: Interlocking pavement, road structure, physical-mechanical properties, hydraulic characteristics, in situ conditions, Runoff coefficient.



Financado electrónicamente por:
DARIO JAVIER
CUTIOPALA LEON

Reviewed by:
Mg. Dario Javier Cutiopala Leon
ENGLISH PROFESSOR
c.c. 0604581066

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN.

1.1 Antecedentes

Regionalmente los pavimentos utilizados en la construcción de vías y carreteras se construyen de soluciones tanto flexibles como rígidas, y un porcentaje significativo corresponde a pavimentos del tipo articulado.(Rodríguez, 1998)

Es importante considerar que este tipo de pavimento responde de manera diferente a la combinación entre cargas de tráfico y a la escorrentía superficial generada por las precipitaciones locales. En nuestra localidad, diversas áreas residenciales, comerciales, turísticas y barrios populares cuentan con accesos pavimentados, siendo común el uso de superficies adoquinadas.

En los últimos años se ha verificado de manera general un deterioro temprano de las superficies de los adoquines a pesar del cumplimiento de los requerimientos normativos establecidos en la norma ecuatoriana (INEN, 2016)

Dada la influencia de estas condiciones en el pavimento, se plantea el presente trabajo de investigación para indagar sobre las propiedades físico-mecánicas e hidráulicas de los pavimentos articulados en la zona oriental de Riobamba, con el objetivo de establecer su relación con las características hidráulicas propias de las condiciones de la ciudad.

1.2 Zona de Estudio

El Cantón Riobamba según la información brindada en el censo del año 2022 cuenta con una población aproximada de 260882 personas, las cuales hacen uso de las vías urbanas tanto de caminos secundarios como principales, a lo largo de la zona oriental de la ciudad se puede destacar en su mayoría pavimentos del tipo articulado (INEC, 2022).

La zona oriental comprende una malla vial con una longitud aproximada de 47 Km de extensión.

El mapeo de la zona contiene los alrededores de las avenidas Edelberto Bonilla Oleas y Lizarzaburu, la malla abarca los principales barrios de análisis de norte a sur de la ciudad; con características geométricas, físicas e hidráulicas entre lugares a analizar.

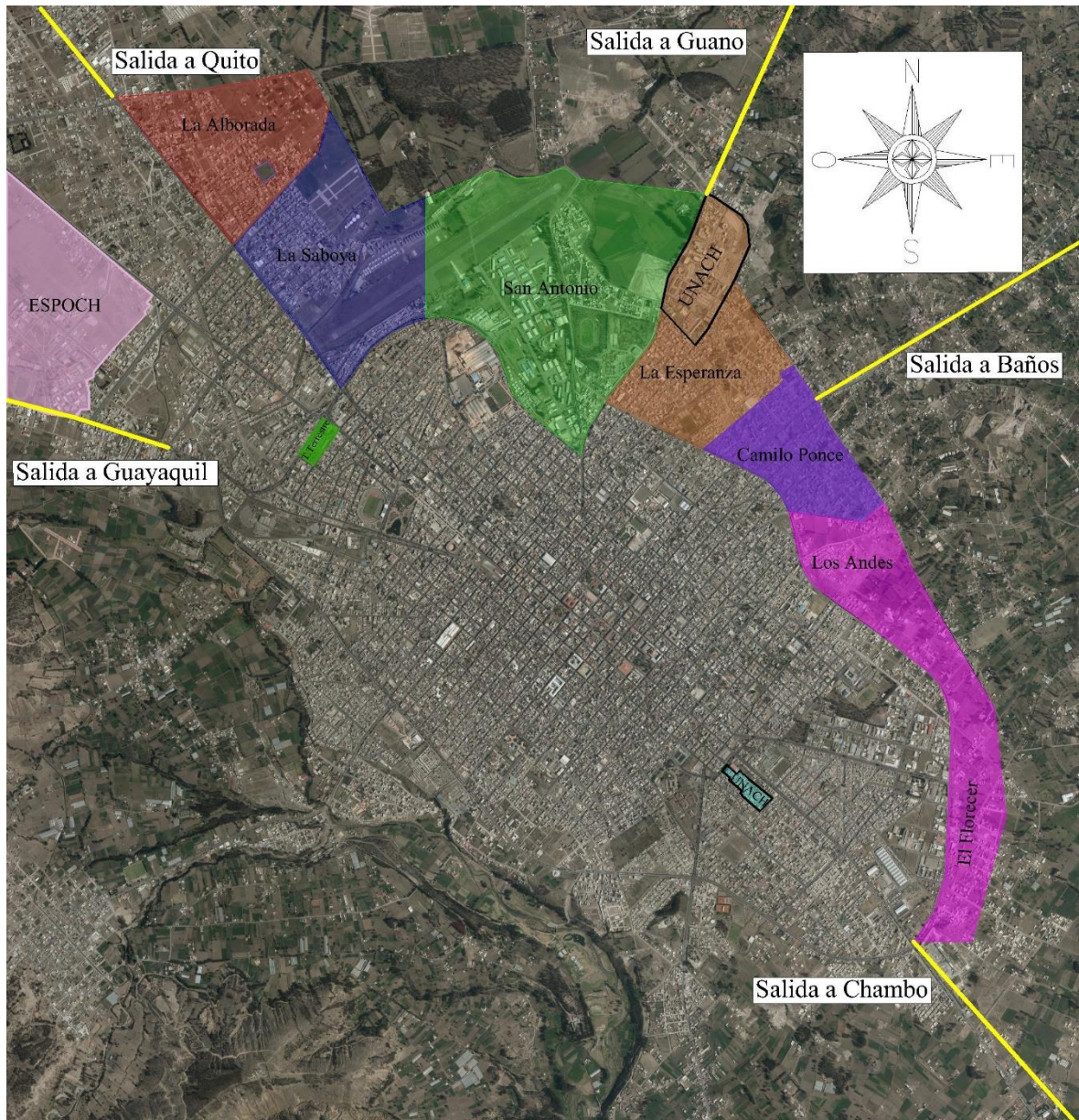


Figura 1. Zona de estudio

1.3 Planteamiento del Problema

La zona oriental de la ciudad de Riobamba comprendida por los barrios: La Alborada, La Saboya, San Antonio, La Esperanza, Camilo Ponce, Los Andes, El Florecer, entre otros, tiene definida una red vial con pavimento articulado que muestra diferentes tipos de deterioro. La escorrentía superficial resultado de lluvias irregulares en su intensidad y periodicidad afectan el sistema de drenaje vial provocando saturación de las alcantarillas y la calzada de rodadura. A este efecto se suman las acciones del tránsito pesado dado que es una zona importante de movimiento comercial. (Marquez, 2023).

Cuando los efectos del TPDA se añaden a las condiciones climáticas presentes en el pavimento, se presenta una variación en las características físico-mecánicas de la estructura

vial registrados por las normativas vigentes que afectan directamente en su diseño y futuro proceso constructivo, teniendo como consecuencia una reducción en su vida útil.

Para lo cual se plantea la siguiente pregunta de investigación: ¿Cómo influye las características físico-mecánicas del pavimento articulado y su relación con las características hidráulicas?

1.4 Justificación del Problema

Las vías de circulación urbana se han diseñado con el fin de garantizar un drenaje apropiado que no comprometa las características mecánicas del pavimento así como efectos de hidroplaneo que pueden desembocar en accidentes que comprometan la seguridad de los conductores y pobladores de la zona. Sin embargo, por factores como la acumulación de basura y los escasos de mantenimiento de las vías provocan que el agua producto de lluvias se infiltre en el pavimento modificando sus características físicas y mecánicas.

El determinar las características físicas, mecánicas e hidráulicas del pavimento articulado en este estado permitirá conocer en primera instancia el estado del pavimento; observar los factores que intervienen en la infiltración y el valor del coeficiente de escorrentía en la zona de estudio para poder compararlo con los valores vigentes en la normativa para optimizar el dimensionamiento de los componentes viales ajustado a las condiciones locales.

1.5 Objetivos

General

Determinar las principales características físico-mecánicas del pavimento basado en un muestreo en la zona oriental de la ciudad de Riobamba y medir las propiedades hidráulicas.

Específicos

- Determinar las características físico-mecánicas del pavimento articulado realizando ensayos en campo.
- Analizar las propiedades hidráulicas del pavimento aplicando métodos convencionales de testeo.
- Comparar los resultados obtenidos para evidenciar los factores que influyen en el escurrimiento superficial.

CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO.

2.1 Pavimento articulado

2.1.1 Generalidades

El pavimento articulado se caracteriza por estar compuesto de pequeños trozos, comúnmente llamados adoquines, que se unen de manera articulada. Estos adoquines se apoyan sobre el terreno natural y, tras contar con una base sólida, se coloca una cama de arena, la cual también se introduce en las juntas mediante vibración. Esta disposición permite que el pavimento tenga una función drenante, facilitando el paso del agua a través de las juntas y evitando la acumulación de agua en la superficie (Casiano, 2016).

2.1.2 Pavimento articulado en el Ecuador

En Ecuador, donde abundan las elevaciones de terreno y la topografía montañosa es predominante, el adoquinado emerge como una opción de pavimento favorable debido a su proceso constructivo. A diferencia del asfalto, cuyo proceso constructivo se ve afectado por la inclinación del terreno, el adoquinado se adapta constructivamente mejor a estas condiciones, lo que lo convierte en una elección práctica y eficiente para calles de tercer orden. El adoquinado destaca por su costo accesible en comparación con alternativas como los pavimentos rígidos o flexibles, siendo una ventaja a la económico y de desarrollo vial (CivilGeeks, 2017).

En este apartado también se abordan el cumplimiento de los requisitos normativos, en donde se tomó en cuenta lo expuesto en las normas INEN 3040, MOP - 001-F 2002.

2.1.3 Estructura del Pavimento Articulado

El pavimento articulado se compone de seis partes importantes para su correcto funcionamiento, se caracteriza por trabajar de manera mancomunada al brindar un sistema que combine la durabilidad del concreto con la flexibilidad de otros tipos de pavimento, en algunas ocasiones dependiendo del tipo de tráfico de la zona se puede omitir algunas capas granulares. Las capas son las siguientes

2.1.3.1 Capa de rodadura de adoquines de concreto

Es la capa que soporta directamente las cargas vehiculares, por lo que se ve expuesta a la abrasión y a factores climáticos. Se compone de elementos prefabricados de hormigón llamados adoquines, que tienen un espesor uniforme y forma de prisma para que encajen

entre sí al ser colocados. Los adoquines pueden tener un bisel o ser lisos. Su resistencia está directamente relacionada con los materiales empleados para su fabricación (MOP, 2002).

2.1.3.2 Sello de Arena

Se compone de una capa de arena fina, utilizada para llenar las juntas entre los adoquines. Esta capa garantiza que tanto la flexión como la capacidad portante del pavimento tengan un buen comportamiento. La cantidad de material en las juntas estará directamente relacionada con el tipo de pavimento, ya sea que posea juntas pequeñas u ordinarias (MOP, 2002).

2.1.3.3 Cama de Arena

Se define como una capa de arena gruesa con un espesor ligero, entre 30 mm y 40 mm. La arena sobre la cual se colocan los adoquines no debe estar compactada, sino en estado suelto. Es de suma importancia que la granulometría de la capa sea uniforme para facilitar la colocación de los adoquines y permitir la infiltración del agua (MOP, 2002).

2.1.3.4 Base

Se considera la capa principal del pavimento, ya que proporciona una óptima estabilidad y mayor capacidad estructural. Esta capa se coloca directamente bajo la cama de arena y sobre la subbase o subrasante según el caso. Dependiendo de los requerimientos del tráfico, las bases pueden ser tratadas con un material granular junto con un ligante asfáltico o hidráulico para tráfico medio y alto. Por otra parte, para tráfico bajo, se emplean bases no tratadas, utilizando únicamente material granular (MOP, 2002).

2.1.3.5 Subbase

Se define como una capa compuesta de material granular que se ubica debajo de la base. Dependiendo de las necesidades, esta capa puede ser estabilizada o tratada. Esta capa puede omitirse únicamente para vías de tráfico ligero, ya que puede ser reemplazada con un tratamiento de la subrasante (MOP, 2002).

2.1.3.6 Subrasante

Es la parte más profunda del pavimento sobre ella se sitúa toda la estructura del pavimento, se compone por suelo natural perfilado producto del movimiento de tierras, puede contar con tratamiento de ser el caso para mejorar su capacidad portante, las características de la capa se relacionan directamente con la geografía del lugar (Spinel, 2003).

2.2 Propiedades físicas del pavimento articulado

2.2.1 Espesor

El espesor se define como la medida vertical de cada capa del pavimento, las cuales tienen una función específica para la distribución de las cargas de tránsito y se relacionan con la vida útil del pavimento, al contar con los espesores apropiados se puede prevenir deformaciones y fallas prematuras, además de aumentar la seguridad reducir los costos de mantenimiento y largo plazo.

2.2.2 Granulometría

Se define como la distribución del tamaño de las partículas en un agregado. El análisis resultante muestra los porcentajes de material que pasan a través de un conjunto de tamices con aberturas normadas, las cuales indican el tamaño de las partículas. La granulometría se considera una característica principal que influye en las propiedades mecánicas y físicas del agregado (INEN, 2011).

2.2.3 Límites de Atterberg

Los límites de Atterberg son ensayos de laboratorio que determinan el rango de humedad en el cual el suelo permanece en estado plástico, permitiendo su clasificación según el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS). Los ensayos requieren remoldear la muestra de suelo, lo que destruye su estructura original, por lo que es esencial complementar los resultados con una descripción del suelo en sus condiciones naturales (Bowles, 2013).

2.2.4 Grado de Compactación

2.2.4.1 In Situ

La compactación es el proceso que tiene como objetivo aumentar la densidad de un suelo ya que se “juntan” las partículas sólidas y se reduce el volumen de aire, dicho de otro modo, el grado de compactación se define como la masa de sólidos por volumen unitario de un suelo.

Se emplean equipos eléctricos como el Electrical Density Gauge (EDG) y métodos como el cono de arena para la determinación del grado in situ de las capas de pavimento. Los rellenos alcanzarán por capas de 0.2 m de espesor se compactarán al 95 % de la prueba de Proctor o el 80% de la densidad relativa (MTOP, 2013a).

2.2.4.2 Ensayo Proctor

El ensayo de compactación de suelo tiene como objetivo determinar la humedad óptima de compactación para una determinada energía de compactación, donde la humedad óptima es aquella en la cual la densidad del suelo es máxima. La compactación del suelo, que aumenta su densidad, ofrece beneficios como la reducción de la compresibilidad, el incremento de la resistencia al corte y la disminución de la permeabilidad. Se considera un método clave para mejorar las propiedades del suelo, estudiar la compactación en la construcción de pavimentos, y caracterizar adecuadamente el material (ASTM, 2014b).

2.2.5 Densidad

2.2.5.1 Densidad Máxima Seca

Es el valor máximo que se obtiene al someter un suelo con baja humedad a incrementos sucesivos en su contenido de agua, aplicando cada vez la misma energía de compactación. El peso volumétrico del suelo aumenta debido a la acción lubricante del agua, hasta que el peso volumétrico del material seco alcanza su valor máximo. Este valor se obtiene mediante los métodos de prueba Proctor estándar y modificado (ASTM, 2014b).

2.2.5.2 Densidad In situ

La densidad in situ permite conocer la densidad natural del suelo en su estado original y verificar el grado de compactación en rellenos artificiales. Es especialmente útil para suelos sin cohesión, como gravas y arenas, que no permiten obtener muestras inalteradas. La verificación de la densidad in situ en suelos naturales o compactados se realiza mediante métodos como el cono de arena o equipos nucleares y eléctricos (Estela, 2017).

2.2.6 Humedad

2.2.6.1 In situ

Es la cantidad total de agua que contiene la muestra de agregado al momento de efectuar la determinación de su masa, se lo conoce también como contenido de humedad, representa el porcentaje de masa de agua que contiene la muestra respecto a su masa total (Bowles, 2013).

2.2.6.2 Óptima

Es la cantidad ideal de agua que debe añadirse al suelo para lograr su compactación máxima bajo una energía de compactación específica., resultando en una densidad máxima (ASTM, 2014b).

2.2.7 Absorción

2.2.7.1 Capa de rodadura de adoquines

El índice de absorción de agua en los adoquines se define como la capacidad del adoquín para absorber agua en sus poros. Se calcula comparando la diferencia entre el peso de la muestra saturada y el peso de la muestra seca, en relación con el peso de la muestra seca, y se expresa en forma de porcentaje (INEN, 2016).

2.2.7.2 Capas de árido

Es una característica física de los materiales en donde un líquido penetra y llena los poros permeables de un agregado. Esta capacidad se refiere a la habilidad del material para captar y retener agua. Esta propiedad es necesaria para entender el comportamiento del material en condiciones de humedad y su influencia en la durabilidad y resistencia de las estructuras donde se utiliza (INEN, 2010b).

2.2.8 Macrotextura

La macrotextura de un pavimento está compuesta por las irregularidades más grandes y la elevación de las partículas con respecto a la superficie base. Su propósito es permitir que el agua superficial se drene adecuadamente en la zona de contacto entre el neumático y el pavimento. Esta característica puede variar de áspera a lisa, y un aumento en la macrotextura disminuye el riesgo de acumulación de agua y salpicaduras, además de asegurar una buena fricción a altas velocidades, lo que mejora la seguridad en condiciones de lluvia.

La normativa NEVI 12 establece una profundidad mínima de macrotextura de 0.3 mm para pavimentos flexibles. No obstante, no se especifica un valor para otros tipos de pavimentos. Por otro lado, el Manual de Carreteras de Chile establece para cualquier pavimento un valor mayor, de 0.6 mm, lo que implica que, según esta última normativa, la macrotextura del pavimento debe ser más gruesa (MTO, 2013b).

2.3 Propiedades mecánicas del pavimento articulado

2.3.1 Resistencia característica de adoquines

La resistencia a la compresión se define como una propiedad mecánica que evalúa la capacidad del adoquín para soportar esfuerzos de compresión aplicados externamente. Este parámetro determine la magnitud de la carga máxima que el adoquín puede soportar antes de la falla o rotura, su valor se expresa en megapascales (MPa).

Se calcula por medio del ensayo de compresión y debe ajustarse a los parámetros establecidos por la norma INEN 1488 (INEN, 1986).

2.3.2 Resistencia al desgaste de capa granular

Los agregados deben ser capaces de resistir el desgaste y la degradación. Esta resistencia es indispensable durante la vida útil del pavimento, ya que las condiciones de esfuerzo y deformación son severas. La estructura del pavimento distribuye estos esfuerzos, reduciendo su intensidad desde la superficie hasta la subrasante (ASTM & AASHTO, 2012) .

2.3.3 Módulo de Rigidez

El módulo de resiliencia (M_r) es una medida de la rigidez del suelo de subrasante, es decir, la capacidad que tiene el suelo para soportar distintas cargas estáticas sin llegar a deformarse (Bojórquez, 2022).

2.3.4 Módulo de Young

El módulo de Young de un suelo es el parámetro elástico con el cual se mide la capacidad de asentamiento, estiramiento y deformaciones elásticas producidas por cargas estáticas. En mecánica de suelos sirve como medida de la tenacidad del material (García, 2014).

2.3.5 Relación de Soporte California CBR

El ensayo California Bearing Ratio (CBR) es un método para medir la capacidad del suelo como subrasante, sub-base y base en el diseño de pavimentos. Este ensayo empírico se realiza en condiciones controladas de humedad y densidad. Es uno de los parámetros esenciales obtenidos en estudios geotécnicos antes de diseñar y construir carreteras. A pesar de que los métodos modernos de diseño de pavimentos utilizan parámetros más precisos para medir la resistencia del suelo, el CBR sigue siendo popular debido a su facilidad y simplicidad de ejecución (Sanchez, 2023).

2.4 Propiedades hidráulicas del pavimento articulado

2.4.1 Permeabilidad

Evaluar la infiltración en pavimentos articulados toma aspectos físicos e hidráulicos del tipo de pavimento, en este caso la separación de las juntas, el tipo de material y el espesor del adoquín forman parte esencial para comprender como se relacionan estos factores.

En el estudio de Hassani A, se destaca su sistema de drenaje que permite el tránsito de agua hacia la subrasante y es capaz de eliminar la contaminación del agua de escorrentía al pasar por las juntas y la cama de arena. (Hassani et al., 2010)

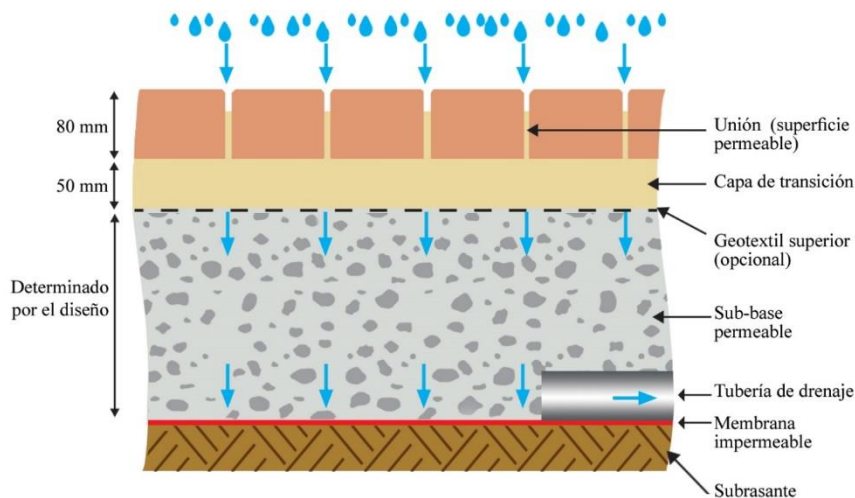


Figura 2. Pavimento articulado permeable.

2.4.2 Infiltración

2.4.2.1 En función del tipo de pavimento

La capa de rodadura, formada por bloques de adoquines, es altamente permeable debido a que los adoquines cuentan con espesores uniformes e iguales. Su diseño prismático permite un encaje perfecto entre ellos cuando se colocan sobre una superficie plana, dejando únicamente juntas entre los bloques, lo que facilita una mayor infiltración de agua en comparación con otros tipos de pavimentos. Por esta razón, es importante seleccionar adecuadamente los materiales para cada capa del pavimento, para prevenir hundimientos o fallas causadas por la saturación de las capas inferiores (Palacios, 2016).

2.4.2.2 En función de los estratos del pavimento

La infiltración del agua en el suelo es el proceso mediante el cual el agua de lluvia o de riego penetra la superficie del suelo y se mueve hacia sus capas inferiores. La velocidad de infiltración varía según la textura del suelo, siendo más rápida en suelos arenosos y más lenta en suelos arcillosos. Inicialmente, un suelo seco absorbe agua rápidamente, pero la velocidad

de infiltración disminuye a medida que el suelo se satura, hasta alcanzar un valor constante llamado velocidad de infiltración básica o estabilizada (Loyola et al., 2014).

2.4.3 Tasa de infiltración

Comprende al movimiento del agua a través de la superficie interior del suelo. Este flujo de agua no es uniforme sobre toda el área perpendicular al flujo, es decir, los componentes horizontal y vertical de la velocidad varían de punto a otro en la sección transversal de la masa del suelo. La tasa de infiltración, mide la velocidad a la que el agua penetra en el suelo, afectando la distribución de humedad en el suelo y la disponibilidad de agua para las plantas y la recarga de acuíferos, así como la prevención de la erosión y el control del escurrimiento superficial (Palacios, 2016).

2.4.4 Coeficiente de escorrentía

El coeficiente de escorrentía representa la fracción de agua de lluvia que genera escorrentía superficial después de que el suelo se ha saturado. Su valor depende de las características del terreno que afectan la infiltración del agua. Los métodos para calcular este coeficiente varían en fiabilidad y complejidad, aumentando ambas con la cantidad de información utilizada (Ibañez et al., 2010).

CAPÍTULO III. METODOLOGIA.

3.1 Tipo de Investigación.

Esta investigación tiene un enfoque de campo y cuantitativo, ya que los resultados numéricos se obtendrán mediante ensayos in situ junto con pruebas realizadas en laboratorio.

3.2 Diseño de Investigación

El diseño de la investigación es cuantitativo y descriptivo, donde se describen las características físicas, mecánicas e hidráulicas del pavimento articulado con resultados numéricos obtenidos con ensayos realizados en campo y en laboratorio, que serán tabulados y graficados para una mejor interpretación.

3.3 Técnicas de recolección de Datos

Las técnicas utilizadas para determinar las muestras sometidas a estudio han sido mediante la observación no estructurada en donde se prioriza los elementos que visualmente se encuentren en mejor o peor estado.

3.4 Definición de muestra

3.4.1 Población

La población de esta investigación está enfocada a la estructura del pavimento que comprende la zona oriental de la ciudad de Riobamba.

3.4.2 Muestra

La muestra seleccionada consiste en la estructura del pavimento de seis zonas que componen la malla vial de pavimento articulado en la zona oriental de Riobamba.

3.4.3 Tipo de muestreo

El tipo de muestreo aplicado ha sido estratificado y no sistemático, al realizar una división entre las zonas correspondientes de norte a sur por barrios de la zona oriental de la ciudad de Riobamba y al no seguir un orden determinado en la selección de las capas de rodadura.

3.4.4 Tamaño de la muestra

La malla vial de la zona oriental de Riobamba se obtuvo mediante un recorrido en auto, se midió las zonas que contaban con pavimento articulado teniendo un total de 47 km lineales de pavimento (entre calles principales y secundarias), en un área de aproximadamente 7 km².

Dada esta gran extensión, se ha optado por dividir la zona en seis áreas, ya que las condiciones del pavimento difieren entre ellas. Para su mejor comprensión se ha dotado de un color para cada área, cubriendo el norte, centro y sur de la ciudad, para tomar los puntos de ensayo. A continuación, se muestra la distribución de las zonas.

Tabla 1. División de la zona de estudio.

Zona	Color	Ubicación	Referencia
1	Rojo	Norte	Luciano Andrade Marín y Padre Manuel Orozco
2	Azul	Norte	Joaquín Gallegos Lara y Medardo Ángel Silva
3	Verde	Oeste	S/N Entre Lirios Y Begonias
4	Naranja	Oeste	Juan de Dios Martínez y S/N
5	Violeta	Oeste	El País y El Condor
6	Magenta	Sur	Belice y Jamaica

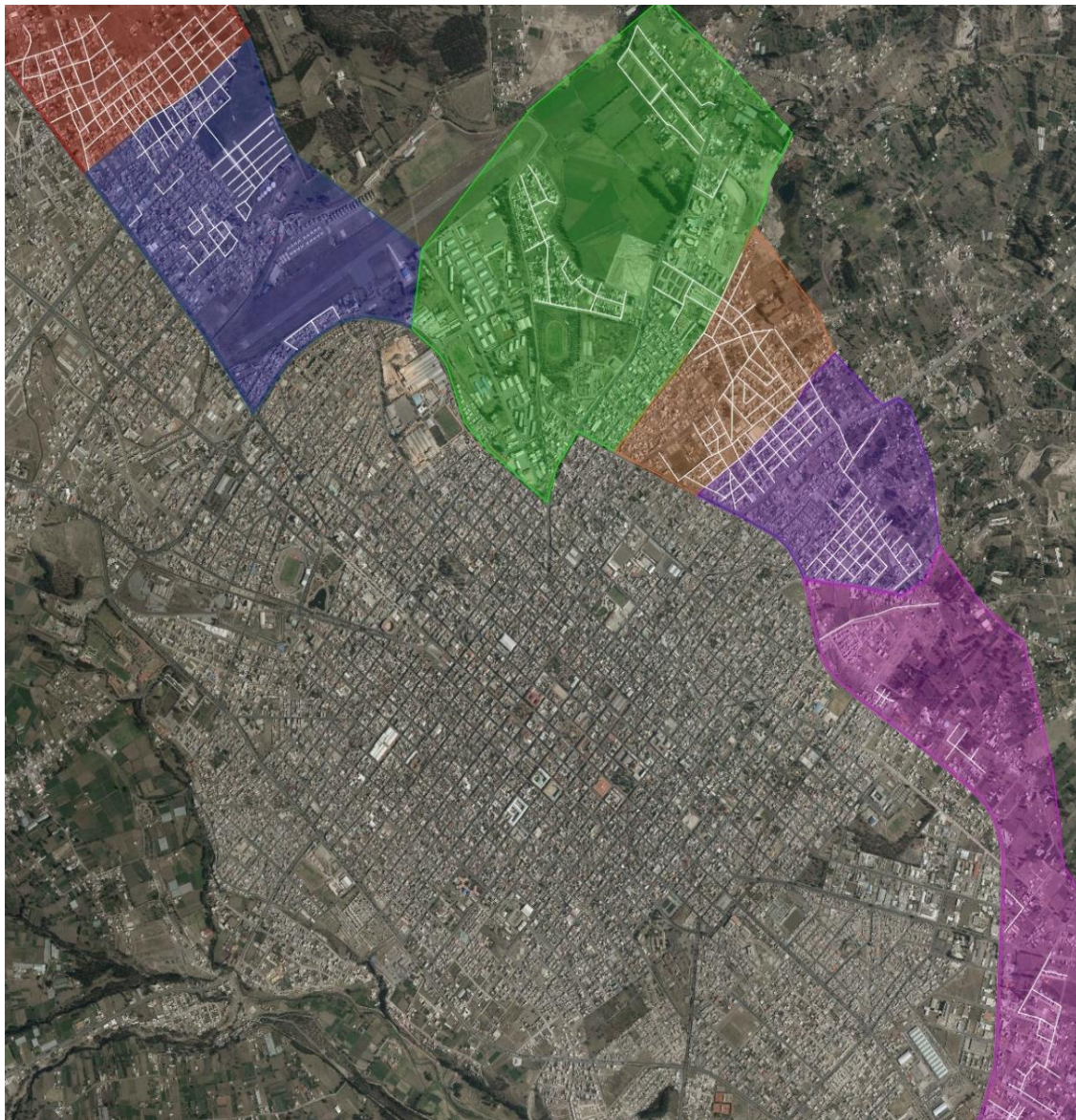


Figura 3. Distribución zonas de estudio.

3.4.5 Ubicación de las muestras

Se identificaron los puntos de estudio para extraer muestras para cada zona indicada junto con el análisis de las propiedades in situ y la prueba de infiltración, para escoger el punto se tomó como criterio la malla vial de la zona y se escogió por observación las calles más representativas de cada zona, esto se detalla mejor en la figura 3, donde se aprecia las seis zonas de estudio.

3.4.6 Criterios de selección

Se determinó mediante una inspección visual el estado de los adoquines estudiados, se tomó el punto más representativo de la calle más extensa longitudinalmente de cada zona y que cuente con una mayor fluencia de tráfico. Se clasificó en tres grupos: Buen estado, Regular y Mal estado. La muestra considerada de Buen estado con juntas apropiadamente rellenas, sin presencia de vegetación o basura y sin evidenciar un desgaste a simple vista en los adoquines como agrietamientos o cizalladuras, el estado Regular presenta juntas con poco relleno pero sin la presencia de vegetación o basura, sumado a un poco desgaste y rugosidades en el adoquín, por último, las zonas consideradas en Mal estado presentan juntas con basura o vegetación y una superficie con visible deterioro, agrietamiento, cizalladuras y desnivel en distintos tramos viales.

Otros factores considerados son: calles principales o secundarias, baches existentes, sistema de drenaje y tráfico de la zona.

3.5 Diagrama metodológico

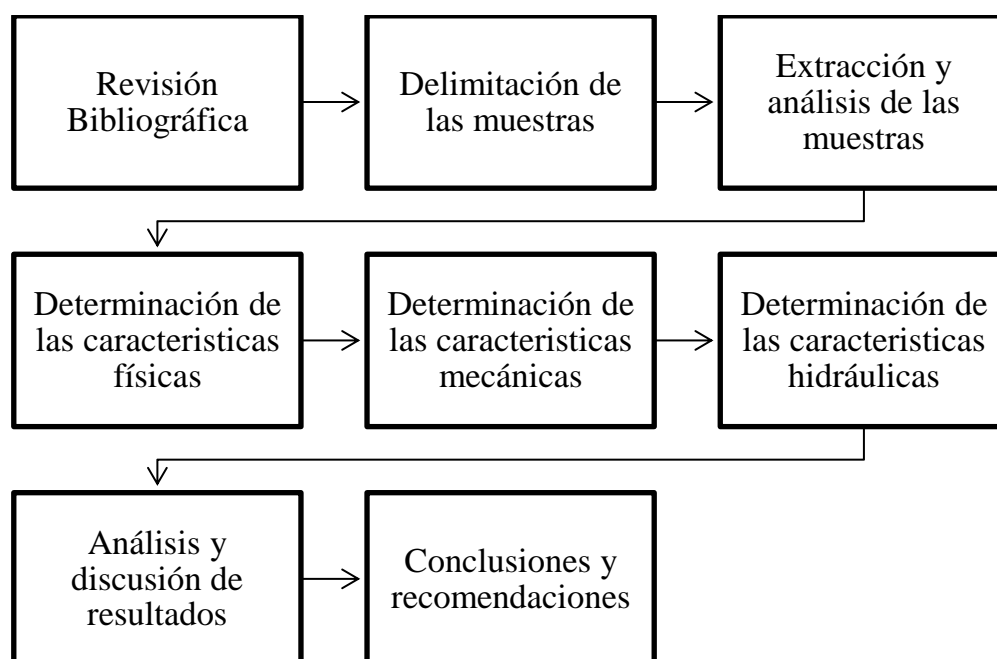


Figura 4. Diagrama Metodológico.

3.6 Propiedades físicas del pavimento articulado

Todos los procesos contemplados para la determinación de las propiedades del pavimento articulado se pueden visualizar en el anexo 1.

3.6.1 Granulometría

Las partículas del agregado se separan por tamaño usando una serie de tamices con aberturas en orden descendente. Las masas de las partículas que quedan en cada tamiz, expresadas como un porcentaje de la masa total, permiten determinar la distribución del tamaño de partículas (INEN, 2011).

Siguiendo los procedimientos de la norma NTE INEN 0696, se muestra la denominación para los distintos tamaños de material granular en las capas de árido del pavimento.

Tabla 2. Escala de distribución de partículas

Denominación	Rango de Tamices	
	Pasa	Retiene
Grava Gruesa	1" 1/2	3/4"
Grava Fina	1/2"	N° 4
Arena Gruesa	N° 40	N° 100
Arena Fina	N° 100	N° 200
Material Fino	N° 200	-

3.6.2 Límites de Consistencia

Consiste en dos métodos de ensayo para determina el contenido de agua de un suelo en dos puntos críticos: en el límite entre su comportamiento líquido y plástico, utilizando la Copa de Casagrande para medir la fluencia del suelo bajo condiciones normalizadas con un número específico de golpes; y en el límite entre su comportamiento plástico y sólido, empleando el proceso de rolado para evaporar gradualmente el agua hasta que el suelo comienza a fisurarse o disgregarse (INEN, 1982).

Se tomo en cuenta los procedimientos señalados en las normas NTE INEN 0691-0692 para obtener el resultado del límite líquido y plástico respectivamente.

3.6.3 Humedad, densidad y absorción

Estos métodos de ensayo se emplean para determinar la densidad promedio de una muestra de árido, excluyendo el volumen de vacíos entre partículas. La densidad puede expresarse como seca al horno (SH), saturada superficialmente seca (SSS) o como densidad aparente. De manera similar, la densidad relativa (gravedad específica) se expresa como SH, SSS o como densidad relativa aparente (gravedad específica aparente). La densidad SH y la

densidad relativa SH se obtienen después de secar el árido, mientras que la densidad SSS, la densidad relativa SSS y la absorción se determinan después de saturar el árido en agua durante un período (INEN, 2010).

Se presentan dos métodos alternativos según el tipo de árido. Debido a los resultados de granulometría, se identificó para las camas de arena y subrasante el método señalado en la norma INEN 0856, al ser material fino. Por otro lado, para la única base encontrada en este estudio, se empleó el método señalado en la norma INEN 0857.

3.6.4 Proctor

El ensayo de compactación Proctor determina la relación entre el contenido de agua y el peso unitario seco del suelo, empleando un martillo normado para aplicar una fuerza de compactación específica (ASTM, 2014b).

Se presentan tres métodos alternativos de ensayo (A, B y C) basados en el tamaño del molde y la fracción de material retenido en los tamices de $\frac{3}{4}$ in. (19.0 mm) y No. 4 (4.75 mm). Para las pruebas de compactación se utilizaron los procedimientos descritos en la norma ASTM D1557-07. Cabe destacar que, debido a los resultados de la granulometría, se empleó el método A para las camas de arena y subrasantes, y el método B para la base y subbase.

3.6.5 Cono de arena

El método consiste en colocar la arena calibrada dentro del instrumento cono y arena, y una vez esté lleno en su totalidad se procederá a pesarlo. Luego, se coloca la placa metálica y, con ayuda de una comba y cincel, se inicia la excavación. Durante la excavación, todo lo extraído debe ser guardado en una bolsa para luego ser pesado (polvo, grava, agregado fino). En caso de encontrar grava, la muestra deberá pasar por el tamiz 20 y $\frac{3}{4}$, y lo retenido se pesará por separado. Una vez concluida la excavación, se coloca el aparato cono y arena sobre la base metálica, abriendo la válvula. Cuando la caída de la arena se detiene, se cierra la válvula y se levanta el aparato sin presionarlo para pesar el contenido restante. Finalmente, la muestra se lleva al laboratorio para determinar el contenido de humedad (ASTM, 2014a).

Se tomo en cuenta los procedimientos señalados en la norma ASTM D 1556-82 obtener el resultado del grado de compactación.

3.6.6 Equipo EDG (Densímetro eléctrico)

El método eléctrico para encontrar la densidad in situ se apoya del Medidor de Densidad Eléctrica H-4114C (EDG en inglés) que es un dispositivo portátil y no nuclear diseñado para

medir la humedad y la densidad de los suelos compactados en carreteras y cimientos. Alimentado por baterías, puede ser utilizado en cualquier lugar. Su interfaz amigable guía al usuario a través de cada paso del proceso de prueba y avisa cuando los resultados no se ajustan a las curvas preestablecidas para el material evaluado. Por lo tanto mediante este método se puede adquirir de manera más eficaz y exacta las propiedades del suelo (Humbolt, 2010).

El EDG mide las propiedades dieléctricas eléctricas y los niveles de humedad del suelo compactado utilizando frecuencias de radio altas que viajan entre dardos insertados en el suelo a ensayar. Para esto, se apoya en los resultados de otros ensayos como referencia de calibración. Durante el ensayo, se crean al menos tres lecturas eléctricas que se almacenan en un "modelo de suelo". Se emplea la determinación de densidad por el método del cono de arena y los valores de humedad óptima y la densidad máxima del ensayo de compactación Proctor. A partir de estos datos, se crea un "sitio de trabajo" en donde se pueden determinar las propiedades necesarias del suelo por medio de las lecturas y compararlas con el "modelo de suelo" creado previamente.

El procedimiento consiste en identificar la zona de estudio para generar el "modelo de suelo", instalar los dardos en el punto con ayuda del plato de soporte y colocar sobre este el sensor de medición. Se conectan los cables del equipo, el sensor de suelo y el de temperatura. Con ayuda de las pinzas, se sujeta los dardos en sentido opuesto y se realiza una primera lectura (A-A). Después, se intercambia las pinzas para realizar una segunda lectura (B-B). Se ingresa los datos obtenidos (densidad y humedad) en el equipo, junto con los de los otros ensayos mencionados, para verificar el ajuste de la curva generada en el equipo y asegurarse de que el FIT no sea mayor a 0.70. Si no es el caso, se debe establecer otro "sitio de trabajo" y repetir las lecturas. Es importante destacar que se debe evitar el contacto entre los cables para garantizar la exactitud de los resultados.

Los dardos pueden venir con longitudes entre 4" y 12". Tienen un diseño que facilita el contacto con el suelo para obtener mediciones precisas. Sin embargo, debido a esta peculiaridad de los dardos, no es posible realizar un ensayo exitoso en las camas de arena del pavimento, ya que la longitud de los dardos es mayor al espesor máximo encontrado para las camas de arena, que es de 8.5 cm. Por lo tanto, este ensayo se empleó únicamente para la medición y análisis de las siguientes capas del pavimento: base y subrasante.

3.7 Propiedades mecánicas del pavimento articulado

3.7.1 Compresión de adoquines

El cálculo de la resistencia a compresión característica f_k consiste en someter al adoquín a una carga creciente hasta la falla. Se debe verificar que los adoquines estén saturados con 24 horas de anticipación. De cada una de las probetas, se registran sus dimensiones para encontrar el área. Luego, con la ayuda de dos tablas de triplay, se coloca el adoquín en la máquina, asegurándose de que esté centrado y de que la carga se transmita de manera uniforme por toda la cara del adoquín. La carga debe ser constante, para el cálculo de f_k se siguen los lineamientos de la norma NTE INEN 1485 y los adoquines deben cumplir con los requisitos expuestos en NTE INEN 1488.

3.7.2 Abrasión e impacto en la máquina de los ángeles

El cálculo de la resistencia a la abrasión se obtiene por medio del ensayo de desgaste de los ángeles que se basa en los lineamientos de las normas ASTM C-131 y AASHTO T96.

El método consiste en medir la degradación de los áridos de una capa granular de pavimento, el material se degrada dentro de un tambor de acero con un número específico de esferas de acero según la gradación de la muestra, a medida que la máquina va dando revoluciones, las esferas caen sobre el material generando un efecto de impacto y trituración constante; después de cumplir las revoluciones necesarias se retira y tamiza para medir la degradación del porcentaje de pérdida.

La tabla 3 expone requisitos de gradación de los materiales en la norma ASTM D1241.

Tabla 3. Requisitos de gradación de los materiales.

Requisitos de gradación de los materiales						
Tamaño de Tamiz	Tipo I			Tipo II		
	Gradación A	Gradación B	Gradación C	Gradación D	Gradación E	Gradación F
2" (50 mm)	100	100	-	-	-	-
1" (25 mm)	-	75 a 95	100	100	100	100
3/8" (9.5 mm)	30 a 65	40 a 75	-	60 a 100	-	-
Nº 4 (4.75 mm)	25 a 55	30 a 60	35 a 65	50 a 85	55 a 100	70 a 100
Nº 10 (2.00 mm)	15 a 40	20 a 45	25 a 50	40 a 70	40 a 100	55 a 100
Nº 40 (425 µm)	8 a 20	15 a 30	15 a 30	25 a 45	20 a 50	30 a 70
Nº 200 (075 µm)	2 a 8	5 a 15	5 a 15	8 a 15	6 a 15	8 a 15

En nuestro estudio el cálculo de la resistencia a la abrasión se realizó únicamente para la base de la zona 6 al ser el único material posible a ensayar. Por medio de los resultados de

la granulometría, se pudo clasificar la gradación de la base como tipo A, al ajustarse la curva granulométrica a los rangos expuestos anteriormente. Para el ensayo se empleó 12 esferas de acero.

3.7.3 Equipo GEOGAUGE

El California Bearing Ratio (CBR) se realizará con ayuda de la Humbolt GeoGauge que es una herramienta avanzada utilizada para medir la impedancia mecánica de materiales en la superficie del suelo. Su funcionamiento consiste en aplicar pequeñas deflexiones a frecuencias de estado estacionario entre 100 y 196 Hz, lo que permite determinar la rigidez del suelo. Este proceso mide la fuerza y la deflexión resultante, derivando módulos importantes como el módulo de cizalla y el módulo volumétrico. Con un peso de aproximadamente 10 kg, el equipo se coloca directamente en la superficie del suelo usando una base de anillo, sin penetrar el suelo. Los datos recolectados se pueden almacenar automáticamente para análisis posteriores, optimizando así los procesos de construcción y garantizando la seguridad operativa.

La metodología de medición del GeoGauge es eficaz porque detecta pequeñas deflexiones bajo cargas mínimas, a diferencia de los métodos tradicionales que requieren grandes fuerzas. El equipo vibra para generar cambios pequeños en la carga aplicada, permitiendo calcular los módulos de Young y corte, así como el coeficiente de Poisson. Utilizado principalmente en campo para la preparación del suelo en proyectos de construcción, el GeoGauge mide suelos secos y cohesivos con deflexiones superficiales de menos de 10 mm, imitando condiciones típicas del Módulo Resiliente. (Humboldt, 2010) Para la relación de módulo de Young y CBR se utilizó la ecuación planteada por Urquiza (2019), cabe resaltar que el módulo resiliente debe estar expresado en las unidades libras/pulgadas cuadradas (en inglés PSI) y con valores por encima de 7138.8 psi, de lo contrario, la fórmula tendrá resultados negativos.

$$MR(psi) = 7138.8e^{0.0203(\%CBR)} \quad (1)$$

De la misma forma, en la investigación de Casco & Salcán (2024), se hace uso de las siguientes fórmulas para la rigidez y CBR de las capas del pavimento.

$$MR = 10 * CBR^{0.73} \quad (2)$$

$$CBR = 0.0039(8.672Kg)^2 - 5.75 \quad (3)$$

3.8 Propiedades hidráulicas del pavimento articulado

3.8.1 Método del Infiltrómetro de doble anillo (UNACH 2024)

Uno de los métodos empleados para hallar la infiltración y escurrimiento se encuentra en la norma ASTM D-3385-03 para nuestra investigación se ha optado por adaptar este ensayo a las condiciones locales. A continuación, se describen las características del equipo.

Las dimensiones de los anillos son, el diámetro interior cuenta con una longitud de 250 mm, mientras que el anillo exterior con 450 mm, ambos con una altura de 600 mm.

Los anillos se confeccionaron con acero galvanizado contando con un peso de 22.5 kg y un espesor de 1.5 mm.

Para evitar posibles filtraciones al alrededor de los anillos, se añadió en la parte inferior de los anillos un caucho (burlete) impermeabilizante con alma metálica, se optó por esta alternativa debido a su adaptabilidad y garantía frente a la contención de agua.



Figura 5. Infiltrómetro Doble Anillo



Figura 6. Caucho - Perfil Burlete Alambrado 341



Figura 7. Silicón Blanco ABRD 1200



Figura 8. Limpieza del Área de colocación

El procedimiento consiste en la colocación de 2 anillos nivelados formados por cilindros metálicos concéntricos en el suelo, los anillos deben estar uno dentro de otro y ambos llenos

parcialmente de agua, se debe verificar que primero se llene el cilindro exterior, después distribuir un peso de 60 Kg en cuatro lados del infiltrómetro (15 Kg por lado) con el fin de impedir la fuga lateral de agua. El proceso se puede visualizar en el anexo 1.

El pavimento articulado se caracteriza por tener juntas entre adoquines las cuales facilitarían la infiltración y fuga del agua a los alrededores del adoquín, sin embargo para poder evitar eso tras realizar pruebas se constató el uso de “Silicón Blanco ABRD 1200” para sellar las juntas de los adoquines, para este tipo de pavimento necesariamente se emplea este tipo de silicona en las juntas entre adoquines, aproximadamente 1 cm de silicón por junta, ya que al usar otro tipo de silicón puede ocasionar fugas al no ser tan resistente como se observa en la figura 10.



Figura 9. Relleno de juntas de adoquín



Figura 10. Sellado con silicón.

CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se llevaron a cabo ensayos con muestras de cada capa de pavimento: cama de arena, base y la subrasante de cada zona. Para la capa de rodadura, se analizó dos lotes (10 unidades cada uno) de adoquines: uno conformado por pavimento en buen estado y otro en mal estado, de esta forma se podrá destacar y comparar los resultados de las propiedades de la capa de rodadura.

4.1 PROPIEDADES FÍSICAS DEL PAVIMENTO ARTICULADO

4.1.1 Espesor de las capas

En la presente tabla se muestran los espesores de las capas a analizar.

Tabla 4. Estructura del Pavimento Articulado.

Estructura del Pavimento Articulado						
Capa	Z1	Z2	Z3	Z4	Z5	Z6
Espesor Adoquín [cm]	8.00	8.00	8.00	8.50	7.50	8.00
Cama de Arena [cm]	3.00	4.00	5.00	-	4.00	5.00
Base [cm]	-	-	-	-	-	15.00
Observaciones	B	B	B	C	B	A

A : No hay observaciones
B : No se encontró base o subbase
C : Se encontró únicamente subrasante

En la inspección de las zonas de estudio se encontró las siguientes observaciones: en la zona 2, la subrasante se encontraba mezclada con restos de cerámica. Por otro lado, la zona 4 destacó por tener únicamente subrasante y adoquín. En todas las zonas, a excepción de la zona 6, se carecía de un material base de pavimento.

4.1.2 Absorción

4.1.2.1 Adoquines

Se muestra a continuación los datos obtenidos en el ensayo de absorción, el lote 1 está conformado por adoquines de zonas con pavimento en buen estado, teniendo: 4 adoquines de la zona 1 y 3 adoquines de la zona 2 y 6 respectivamente.

Tabla 5. Absorción Adoquines Lote 1 (Buen estado).

Muestra	Medidas de la muestra					Peso saturado [Kg]	Peso seco [Kg]	Índice de absorción de agua [%]
	Arista larga [cm]	Arista corta [cm]	Ancho [cm]	Bisel [cm]	Espesor [cm]			
1	23.5	18	23.5	5	8.0	8.77	8.64	5.31%
2	23.5	18	23.5	5	8.3	8.76	8.44	4.67%
3	23	18	23	5	8.1	8.94	8.59	4.05%
4	23.5	18	23.5	5	8.3	9.26	8.98	3.12%
5	23.5	18	23.5	5	8.0	9.35	9.06	4.59%
6	23	18	23	5	7.9	8.82	8.39	2.82%
7	24	15.8	22	4	8.0	8.90	8.14	4.15%
8	23.5	18	23.5	5	8.3	8.47	8.24	3.82%
9	23.5	18	23	5	8.1	9.07	8.78	5.03%
10	23	18	23	5	8.1	8.47	8.26	3.88%
Promedio								4.14%

Por otra parte, el lote 2 se conforma por adoquines de zonas con pavimento en mal estado, teniendo: 4 adoquines de la zona 3 y 3 adoquines de la zona 4 y 5 respectivamente.

Tabla 6. Absorción Adoquines Lote 2 (Mal Estado).

Muestra	Medidas de la muestra					Peso saturado [Kg]	Peso seco [Kg]	Índice de absorción de agua [%]
	Arista larga [cm]	Arista corta [cm]	Ancho [cm]	Bisel [cm]	Espesor [cm]			
1	23	17	22	4	7.6	8.77	8.64	1.45%
2	23	16	21	4.5	8.5	8.76	8.44	3.80%
3	23	16	21	4	8.8	8.94	8.59	4.11%
4	25	17	23	4.5	8.0	9.26	8.98	3.19%
5	24.5	17	22.5	4	8.3	9.35	9.06	3.24%
6	25	16	23	4	7.5	8.82	8.39	5.10%
7	24.5	16	23	4	8.4	8.90	8.14	9.30%
8	24	15	21.5	4	7.6	8.47	8.24	2.72%
9	24	17	22	4	7.9	9.07	8.78	3.27%
10	24	16	22	4	7.5	8.47	8.26	2.65%
Promedio								3.88%

Se puede evidenciar un índice de absorción promedio de 4.14% para el Lote 1, al ser el grupo de adoquines en buen estado, es evidente que cumplirían con el porcentaje máximo permitido de 6% expuesto en la norma NTE INEN 1488. Sin embargo, los resultados del Lote 2 a pesar de contar con adoquines troceados, agrietados y desgastados, contó con un

porcentaje menor de 3.88% cumpliendo con este requisito de calidad. Se detalla esta información en el anexo 2

4.1.2.2 Áridos

Los resultados de la gravedad específica en los distintos estados y absorción de las capas de árido se muestran a continuación. Se detalla en el anexo 3.

Tabla 7. Absorción y densidades de las camas de arena.

Camas de Arena								
Características	Z1	Z2	Z3	Z4	Z5	Z6	Desviación	Promedio
							Estándar	Muestras
Gravedad específica SH [-]	2.53	2.52	2.59	-	2.63	2.67	0.12	2.59
Gravedad específica en estado SSS [-]	2.56	2.61	2.62	-	2.68	2.72	0.12	2.64
Gravedad específica aparente [-]	2.61	2.70	2.67	-	2.76	2.80	0.13	2.71
Porcentaje Absorción [%]	2.47	2.59	2.74	-	2.04	1.98	0.33	2.36

Los valores presentados para las gravedades específicas en los diferentes estados para las camas de arena oscilan entre 2.4 y 2.8. Se encontraron similitudes en los valores para las zonas 1, 2 y 3, tanto en densidades como en absorción. Esto indica que el material empleado en las camas de arena es el mismo en todas las zonas de estudio, exceptuando la zona 4 que carece de esta capa. Por otra parte se evidencia que la muestra de la zona 3 de pavimento en mal estado, cuenta con la mayor absorción, con un 2.74%, al contrario de la zona 6 de pavimento en buen estado, que tuvo la menor absorción, con un 1.98% y a su vez contando con la gravedad específica aparente más alta de 2.80.

Tabla 8. Resumen de gravedades específicas y absorción de la base.

Base						
Características	Z1	Z2	Z3	Z4	Z5	Z6
Gravedad específica SH [-]	-	-	-	-	-	2.53
Gravedad específica en estado SSS [-]	-	-	-	-	-	2.69
Gravedad específica aparente [-]	-	-	-	-	-	3.03
Porcentaje Absorción [%]	-	-	-	-	-	6.61

La tabla 8 muestra las densidades de la base obtenidas en laboratorio, los cuales se encuentran aproximadamente entre 2.5 y 3.1, siendo la gravedad específica aparente la máxima con un valor de 3.03 y en estado seco al horno la menor con 2.53. La base cuenta con una absorción del 6.61 % siendo esta la capa de pavimento con mayor porcentaje de absorción en comparación a las demás zonas.

Tabla 9. Resumen de gravedades específicas y absorciones de las subrasantes.

Características	Subrasantes						Desviación Estándar	Promedio Muestras
	Z1	Z2	Z3	Z4	Z5	Z6		
Gravedad específica SH [-]	2.48	2.36	2.38	2.35	2.30	2.32	0.06	2.37
Gravedad específica en estado SSS [-]	2.51	2.41	2.49	2.49	2.35	2.37	0.07	2.44
Gravedad específica aparente [-]	2.75	2.48	2.71	2.74	2.42	2.44	0.14	2.56
Porcentaje Absorción [%]	2.04	1.97	2.88	2.88	2.46	2.67	0.40	2.48

Los valores calculados para las gravedades específicas en los diferentes estados para las subrasantes oscilan entre 2.3 y 2.7. Se observaron similitudes en los valores para todas las zonas, excepto en la zona 1, donde se registró un valor superior en densidad y menor en absorción, esto sugiere que solo la zona 1 presenta una subrasante diferente, lo cual puede explicarse por su ubicación al norte de la ciudad, donde se observan variaciones en la morfología del suelo. La subrasante con mayor absorción fue la de la zona 3, con un 2.88%, mientras que la de la zona 2 presentó la menor absorción, con un 1.97 %.

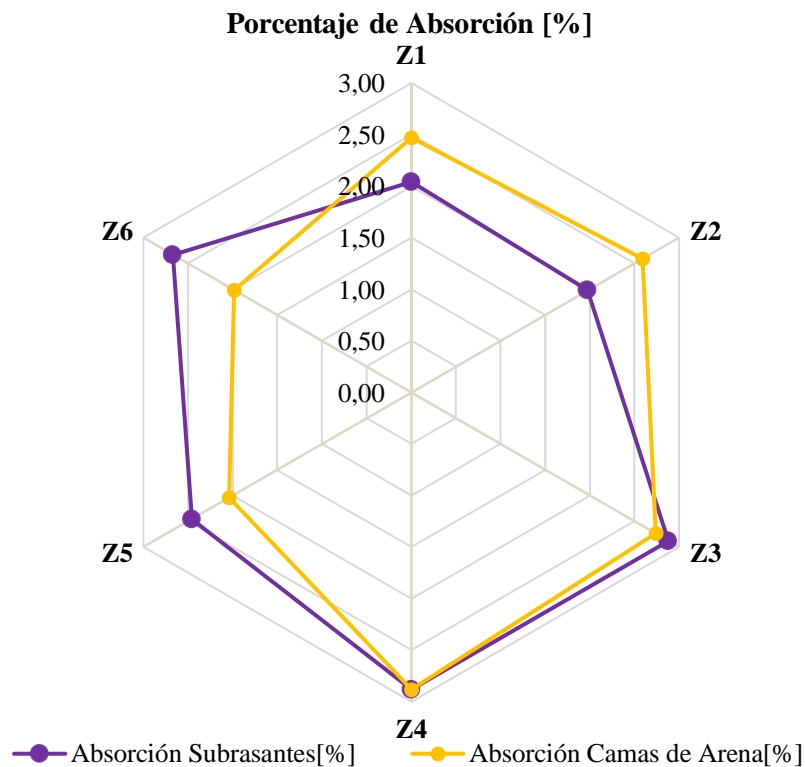


Figura 11. Absorción de capas.

En la figura 11 se presenta una comparación del porcentaje de absorción, donde se destaca que en las zonas 1 y 2 la capa con mayor absorción corresponde a la cama de arena, mientras que en las demás zonas la subrasante presenta los valores más altos de absorción.

4.1.3 Granulometría

A continuación, se puede evidenciar los resultados de granulometría, los valores de Cu, Cc y su clasificación SUCS y AASHTO de las capas del pavimento. Se detalla en anexo 4.

Tabla 10. Granulometría Camas de Arena.

Tamiz	Abertura tamiz [mm]	Porcentaje pasa[%]						Denominación
		Z1	Z2	Z3	Z4	Z5	Z6	
1/2"	12.5	100.00	100.00	100.00	-	100.00	100.00	Grava Fina
3/8"	9.5	98.91	99.62	100.00	-	100.00	100.00	
No 4	4.75	93.88	99.02	91.81	-	88.65	81.59	Arena Gruesa
No 10	2	84.70	98.30	85.29	-	69.38	71.53	
No 40	0.425	63.39	87.29	64.86	-	39.96	55.33	Arena Fina
No 100	0.15	32.62	34.19	32.30	-	19.08	30.58	
No 200	0.075	15.26	9.17	15.54	-	7.73	11.87	Material Fino
Coefficiente de Curvatura (CC)		0.67	0.81	0.69	-	0.66	0.32	
Coefficiente de Uniformidad (CU)		5.36	3.94	5.26	-	16.45	12.29	
Clasificación SUCS		SP	SP	SP	-	SP	SP	
Clasificación AASHTO		A-3	A-3	A-3	-	A-3	A-3	

Tabla 11. Granulometría Base.

Tamiz	Abertura tamiz [mm]	Porcentaje pasa[%]						Denominación
		Z1	Z2	Z3	Z4	Z5	Z6	
2"	50.400	-	-	-	-	-	100.000	Grava Gruesa
1" 1/2"	38.100	-	-	-	-	-	82.068	
1"	25.000	-	-	-	-	-	65.262	
3/4"	19.000	-	-	-	-	-	57.669	Grava Fina
1/2"	12.5	-	-	-	-	-	51.403	
3/8"	9.5	-	-	-	-	-	50.407	
No 4	4.75	-	-	-	-	-	30.574	Arena Gruesa
No 10	2	-	-	-	-	-	28.764	
No 40	0.425	-	-	-	-	-	26.350	Arena Fina
No 100	0.15	-	-	-	-	-	13.678	
No 200	0.075	-	-	-	-	-	4.124	Material Fino
Coefficiente de Curvatura (CC)		-	-	-	-	-	5.56	
Coefficiente de Uniformidad (CU)		-	-	-	-	-	160.43	
Clasificación de Base		-	-	-	-	-	Clase 2	
Clasificación SUCS		-	-	-	-	-	GP	
Clasificación AASHTO		-	-	-	-	-	A-1-a	

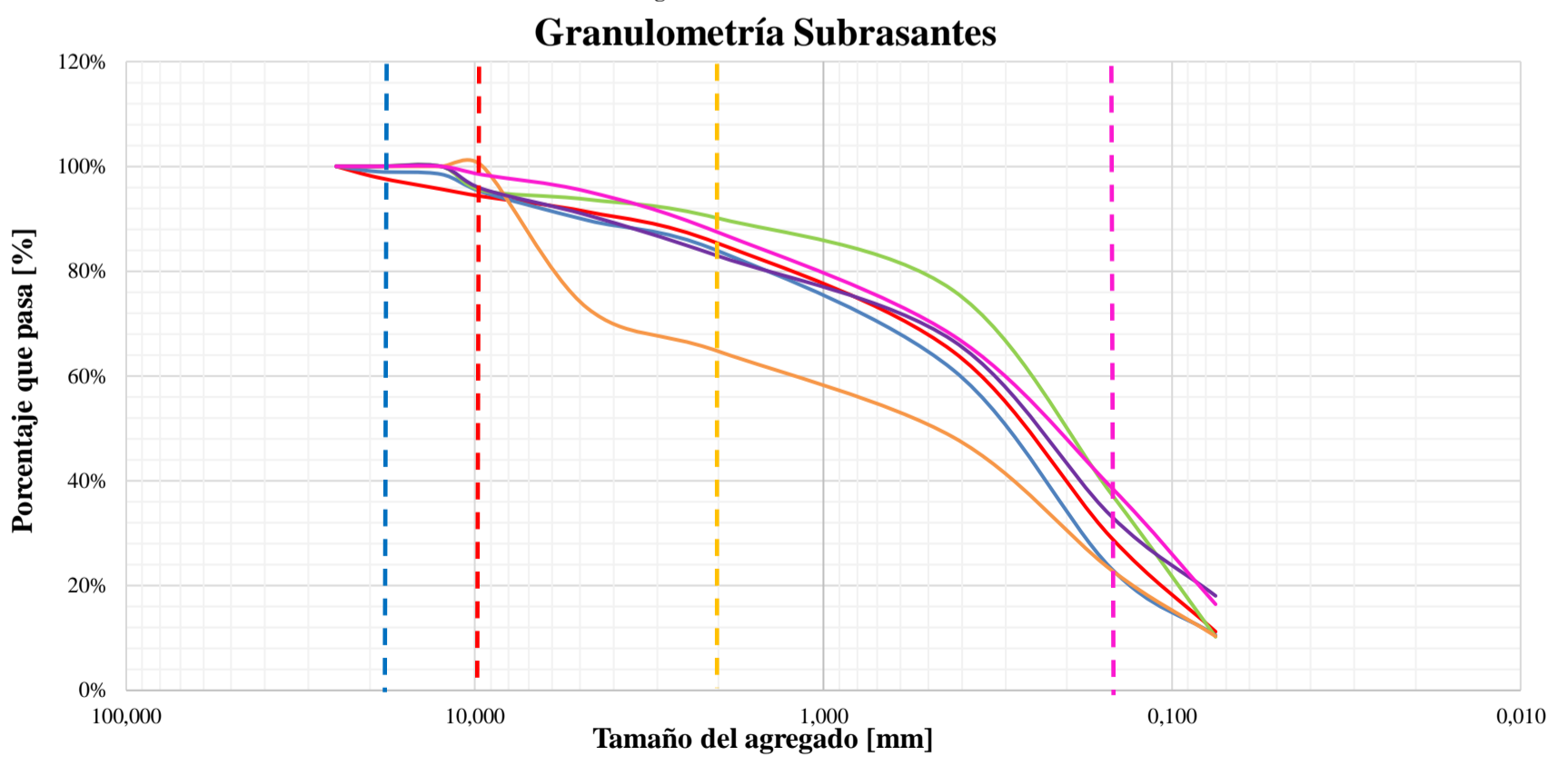
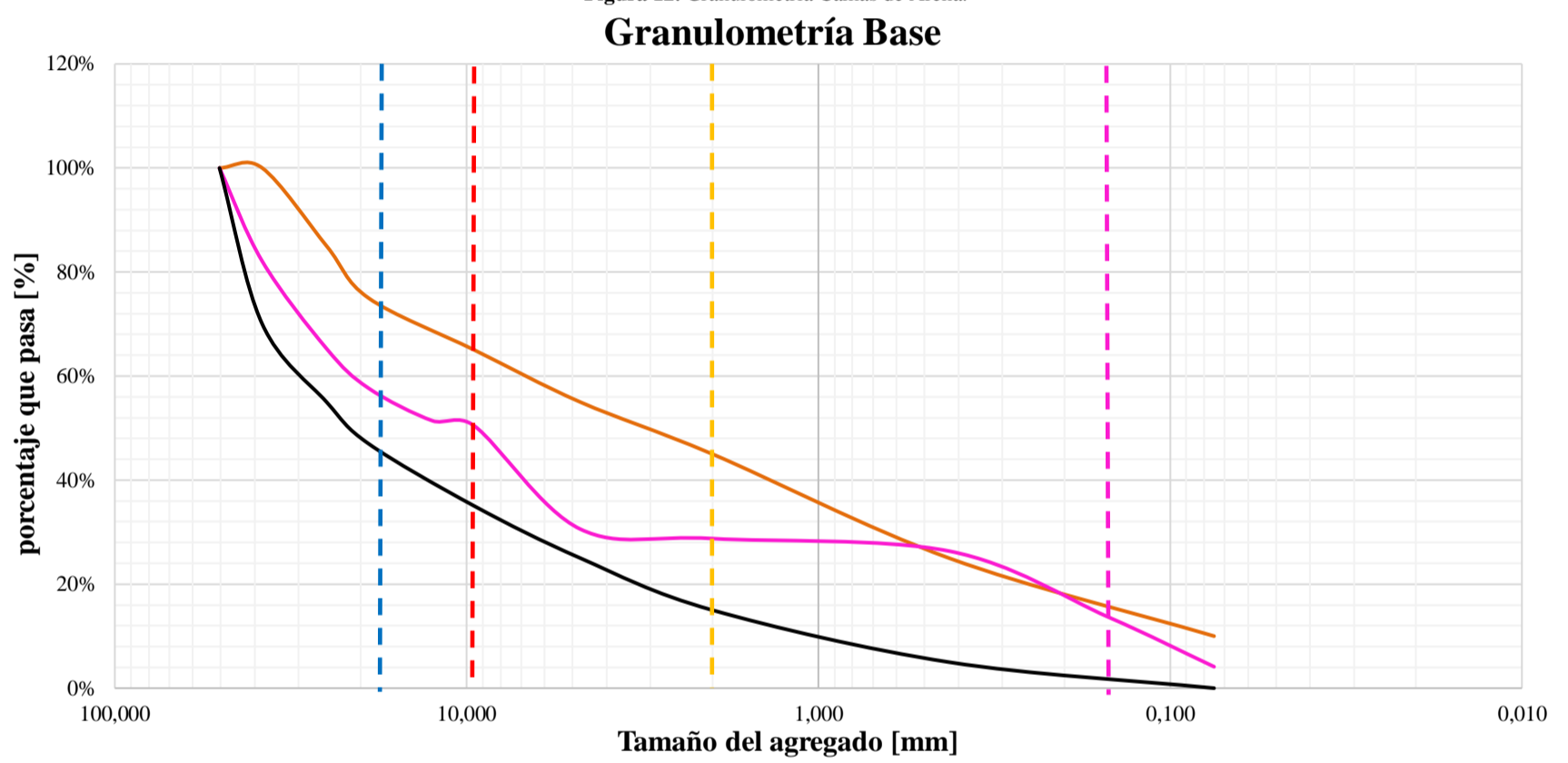
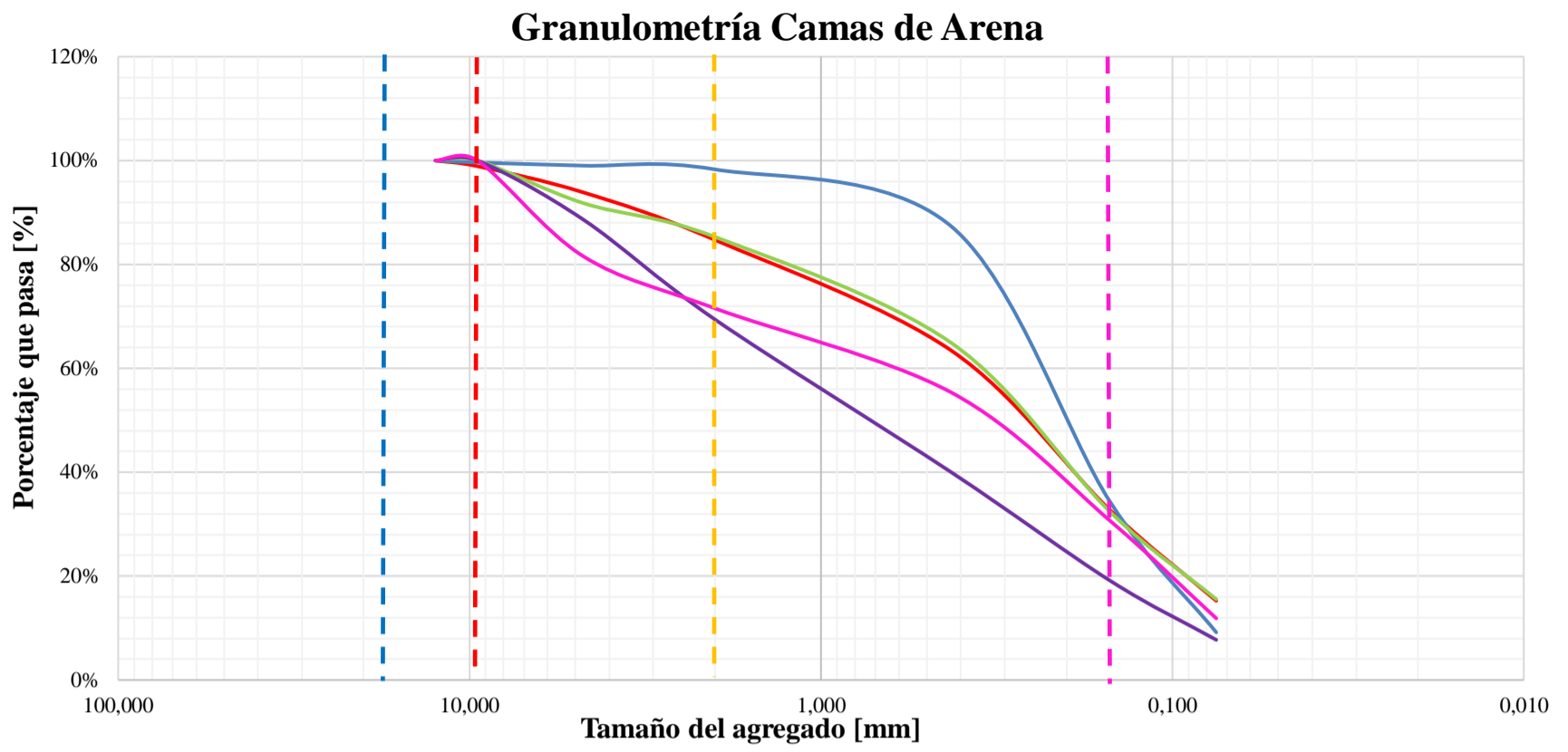
Tabla 12. Granulometría Subrasantes.

Tamiz	Abertura tamiz [mm]	Porcentaje pasa[%]						Denominación
		Z1	Z2	Z3	Z4	Z5	Z6	
1"	25.000	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	Grava Gruesa
3/4"	19.000	97.88	99.00	100.00	100.00	100.00	100.00	
1/2"	12.500	95.66	98.50	100.00	100.00	100.00	100.00	Grava Fina
3/8"	9.500	94.25	95.10	95.39	100.00	95.69	98.40	
No 4	4.750	91.32	89.70	93.69	72.92	90.68	95.19	Arena Gruesa
No 10	2.000	85.27	83.83	90.08	64.69	82.87	87.37	
No 40	0.425	64.68	61.17	76.35	48.35	66.73	67.74	Arena Fina
No 100	0.150	29.26	23.38	37.68	23.07	33.37	38.88	
No 200	0.075	11.20	10.52	10.22	10.33	18.04	16.43	Material Fino
Coefficiente de Curvatura (CC)		0.84	1.56	0.75	0.51	0.65	0.59	
Coefficiente de Uniformidad (CU)		5.32	5.59	4.42	21.24	5.10	4.87	
Clasificación SUCS		SP	SP	SP	SP	SP	SP	
Clasificación AASHTO		A-3	A-3	A-3	A-3	A-3	A-3	

Se puede evidenciar la gradación de las capas de pavimento, las camas de arena se componen en su mayoría de arenas finas y de material fino, a excepción de la zona 5 que cuenta con mayor porcentaje de arenas gruesas. Al no cumplir con las condiciones específicas de Cc y Cu, estas arenas se consideran de baja graduación.

El análisis granulométrico de la base nos muestra una abundancia de partículas gruesas, las gravas gruesas y el material fino superan el 30% de la muestra total. De la misma forma, al no contar con plasticidad ni cumplir con los requisitos de buena graduación se clasifica como una grava pobremente graduada.

Por otro lado las subrasantes indican una composición similar a las camas de arena, con un menor porcentaje tanto de arenas finas como de material fino, se destaca la zona 4, ya que en la misma presenta una mayor abundancia de partículas finas y la ausencia de gravas.



Legenda de las curvas:
— Z1
— Z2
— Z3
— Z4
— Z5
— Z6
— Límite Superior

- - - Grava gruesa (19 mm)
- - - Grava fina (9.5 mm)
- - - Arena Gruesa (2 mm)
- - - Arena Fina (0.15 mm)
— Límite Inferior

A continuación, se detalla la composición de partículas de cada capa analizada.

Tabla 13. Resumen de granulometría.

Resumen de granulometría						
Camas de arena						
Tipo	Z1	Z2	Z3	Z4	Z5	Z6
Gravas Gruesas [%]	-	-	-	-	-	-
Gravas Finas [%]	1.12	0.38	-	-	-	-
Arenas Gruesas [%]	14.2	1.33	14.71	-	30.62	28.47
Arenas Finas [%]	52.06	64.11	52.99	-	50.3	40.95
Material Fino [%]	32.62	34.19	32.31	-	19.08	30.58
Base						
Tipo	Z1	Z2	Z3	Z4	Z5	Z6
Gravas Gruesas [%]	-	-	-	-	-	34.73
Gravas Finas [%]	-	-	-	-	-	14.85
Arenas Gruesas [%]	-	-	-	-	-	21.64
Arenas Finas [%]	-	-	-	-	-	15.11
Material Fino [%]	-	-	-	-	-	13.69
Subrasantes						
Tipo	Z1	Z2	Z3	Z4	Z5	Z6
Gravas Gruesas [%]	2.12	1	-	-	-	-
Gravas Finas [%]	3.63	3.9	4.61	-	4.31	1.6
Arenas Gruesas [%]	8.98	11.27	5.31	35.31	12.83	11.02
Arenas Finas [%]	56	60.45	52.41	41.63	49.5	48.5
Material Fino [%]	29.26	23.38	37.68	23.07	33.37	38.88

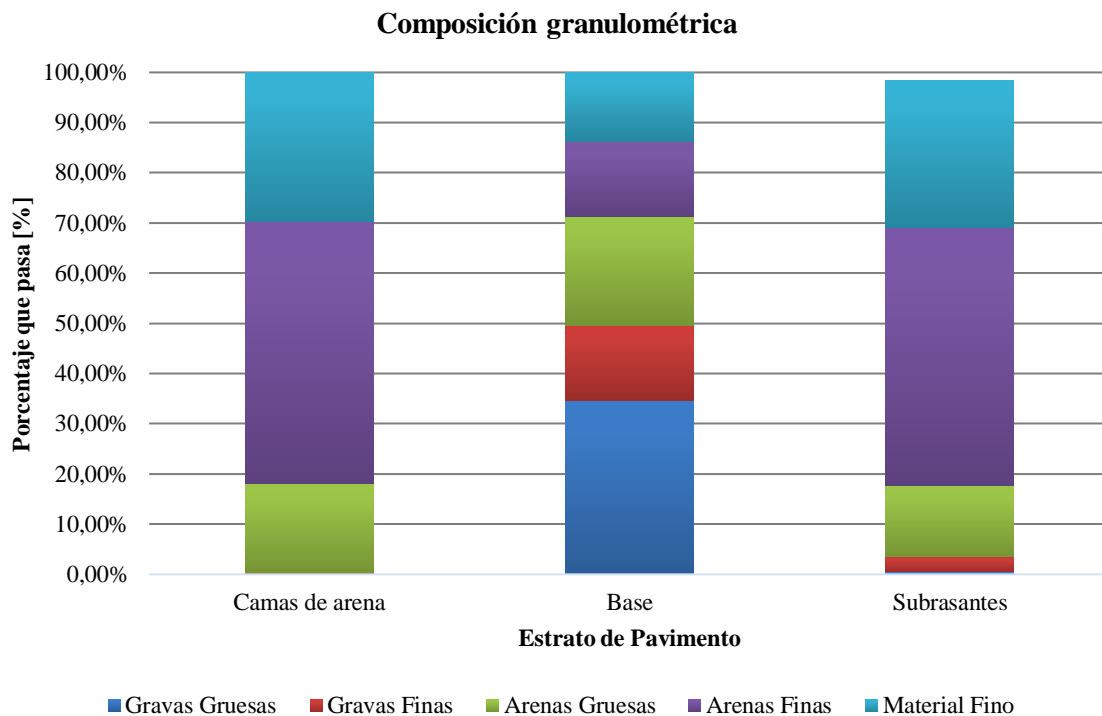


Figura 15. Composición granulométrica.

En la figura 13 se muestra el promedio de la composición de cada capa de pavimento, se puede constatar que tanto las camadas de arena como subrasantes se componen de partículas finas, a excepción de la subrasante de la zona 1 que cuenta con un porcentaje mínimo de

gravas gruesas. Excluyendo el análisis de la base, se evidencia que a pesar de ser capas diferentes de pavimento, la granulometría señala gradaciones similares entre muestras, con arenas finas como principal componente de las capas, esto se puede deber a que pertenecen a la misma zona geográfica.

4.1.4 Límites de Atterberg

Los límites de Atterberg obtenidos fueron únicamente el límite líquido, ya que no se logró concretar el ensayo del límite de plasticidad debido a la ausencia de esta propiedad en un suelo arenoso. Se detalla en anexo 4.

Tabla 14. Límite Líquido de las capas.

Límite Líquido							
Capa	Z1	Z2	Z3	Z4	Z5	Z6	Promedio
Cama de Arena [%]	17.91	22.39	18.62	-	21.47	17.66	19.61
Base [%]	-	-	-	-	-	17.41	17.41
Subrasante [%]	21.15	16.31	18.70	19.07	18.87	22.86	19.49

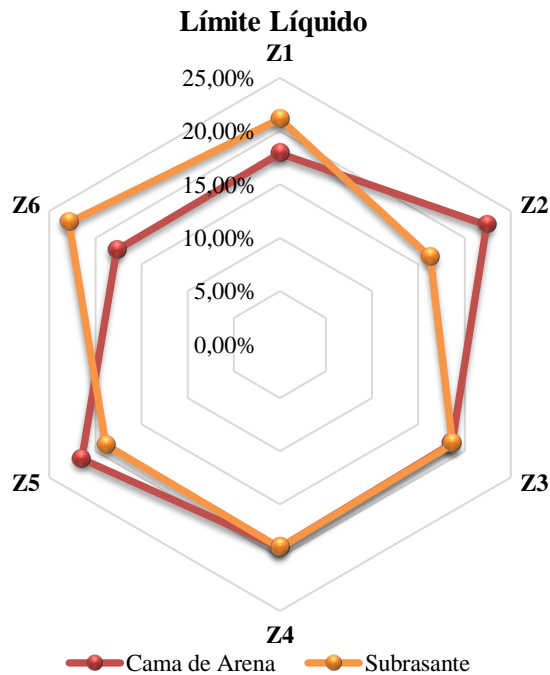


Figura 16. Límite Líquido.

Tras el ensayo para la obtención de los límites de Atterberg, se logró constatar que el material perteneciente a las camas de arena y subrasantes es considerado como arena de baja graduación según la clasificación SUCS. Con el cálculo del límite líquido, se puede determinar que estas arenas pertenecen al grupo A-3 según la AASHTO, por otra parte, al ser arena, tanto la base como la subrasante no es posible determinar el límite plástico. De la misma forma la base se ha considerado una grava de baja graduación según la SUCS, perteneciente al grupo A-1-a según su clasificación AASHTO.

4.1.5 Grado de compactación

4.1.5.1 In Situ

Mediante los métodos de Cono de arena y densímetro eléctrico se obtuvo el porcentaje de compactación in situ, dando como resultado los siguientes valores para la base y subrasantes de cada zona. Se detalla en el anexo 5.

Tabla 15. Densidades de los estratos.

Grado de compactación							
Estrato	Ensayo	Z1	Z2	Z3	Z4	Z5	Z6
Base	Cono de Arena [%]	-	-	-	-	-	81.1
	EDG [%]	-	-	-	-	-	87.3
Subrasante	Cono de Arena [%]	87.23	75.84	69.14	67.9	69.58	71.45
	EDG [%]	77.5	74.5	60.5	61.4	71.5	62.6

Los resultados para la base de la zona 6 señalan un porcentaje de compactación entre el 80 y 90%, en comparativa al valor encontrado en laboratorio mediante el ensayo Proctor.

Las zonas 2 y 1 presentan una compactación mayor al 70%, siendo esta última la zona con el mayor grado de compactación, con un 87.23% según el método del cono de arena y un 77.5% según el densímetro eléctrico. Por otra parte, las zonas restantes no alcanzan este porcentaje, especialmente la zona 3, que tiene un grado de compactación de 69.14% y de 60.5% respectivamente, siendo la menos compactada de todas las subrasantes analizadas.

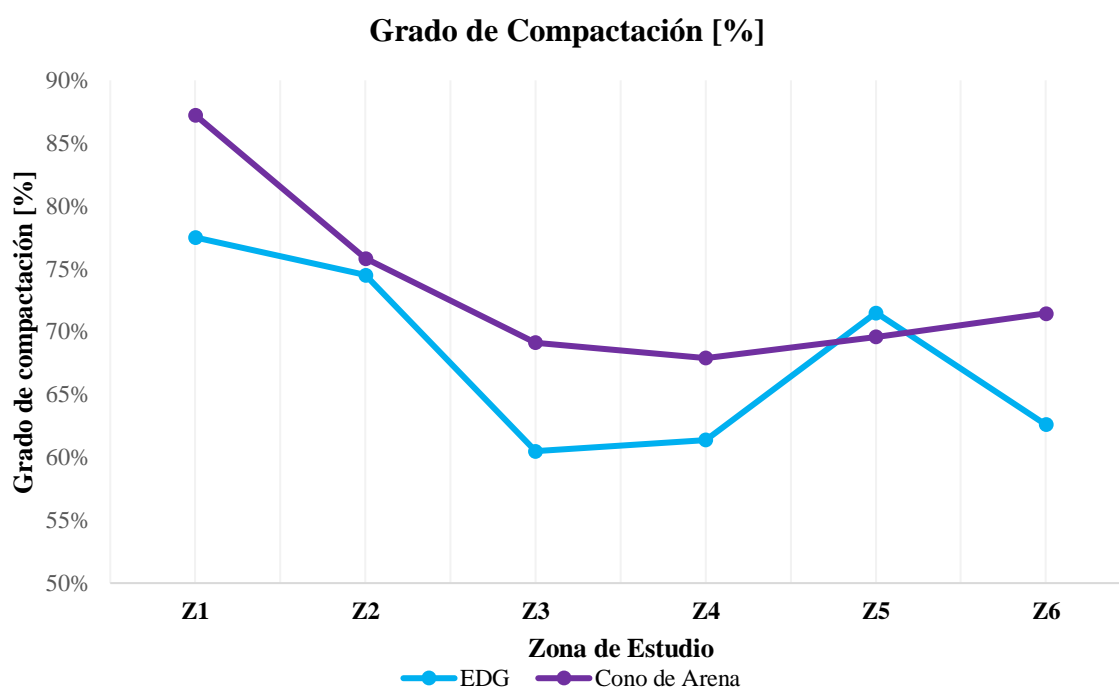


Figura 17. Grado de Compactación.

En la figura 17 se presenta una comparación del grado de compactación obtenido mediante ambos métodos de estudio. Se observa que el grado de compactación obtenido por el cono de arena es superior al del densímetro eléctrico, excepto de la zona 5, donde se registra un valor mayor. En las zonas 2 y 5, los grados de compactación son muy similares en ambos métodos, lo que puede atribuirse a la pérdida de material en forma de polvo al medir los pesos utilizados para los cálculos.

Las zonas 1 y 6 muestran la mayor divergencia entre métodos, con una variación del 10%.

Se evidencia que el grado de compactación disminuye de norte a sur, lo que sugiere que en la parte norte de la ciudad se tomó mayor precaución durante el proceso de compactación de la subrasante.

4.1.5.2 Ensayo Proctor

En la siguiente tabla se puede evidenciar los resultados del ensayo de compactación Proctor, se muestran los valores de la densidad máxima seca y humedad óptima de las capas del pavimento con sus respectivos diagramas de compactación.

Tabla 16. Ensayo Proctor en camas de arena

Ensayo Proctor Camas de arena							
Característica	Z1	Z2	Z3	Z4	Z5	Z6	Promedio
Humedad [%]	11.57	12.17	10.82	-	14.13	10.20	11.78
Densidad Seca Máxima [g/cm ³]	1.80	1.50	1.81	-	1.64	1.83	1.72

En la figura 18 se muestran los valores obtenidos de las Camas de arena de las distintas zonas ensayadas, donde el valor máximo de densidad seca pertenece a la zona 6 con un valor de 1.83 g/cm³ debido a la mejor compactación presente del pavimento en la única zona que tiene base, además se puede evidenciar que esta zona comparte características y valores de densidad seca y humedad óptima con la zona 1 y 3, mientras que, el valor mínimo pertenece a la zona 2 con un valor de 1.50 g/cm³ y la humedad óptima se encuentra en un rango de valores entre 10 y 15%.

Tabla 17. Ensayo Proctor en base

Ensayo Proctor Base						
Característica	Z1	Z2	Z3	Z4	Z5	Z6
Humedad [%]	-	-	-	-	-	9.39
Densidad Seca Máxima [g/cm ³]	-	-	-	-	-	1.77

El ensayo de compactación se llevó a cabo con el material perteneciente a la base del pavimento de la zona 6, donde se encontró una densidad seca máxima de 1.77 g/cm³ y una humedad óptima de 9.39%, como se muestra en el diagrama de compactación Proctor en la figura 19. Se detalla el ensayo en anexo 6.

Tabla 18. Ensayo Proctor en subrasantes.

Ensayo Proctor Subrasantes							
Característica	Z1	Z2	Z3	Z4	Z5	Z6	Promedio
Humedad [%]	11.94	13.10	11.17	12.89	12.30	14.72	12.65
Densidad Seca Máxima [g/cm ³]	1.67	1.75	1.74	1.75	1.79	1.68	1.73

En la figura 20 se muestran los valores encontrados para las subrasantes del pavimento, el valor máximo de densidad seca pertenece a la zona 5 con un valor de 1.79 g/cm³, por otro lado, el valor mínimo pertenece a la zona 1 con un valor de 1.67 g/cm³ y la humedad óptima se encuentra en un rango de valores entre 11 y 15%.

Cabe destacar que las curvas de compactación pertenecientes a las zonas 2, 3 y 4 tienen valores similares tanto en densidad máxima como en humedad óptima.

DIAGRAMA DE ENSAYO PROCTOR (CAMAS DE ARENA)

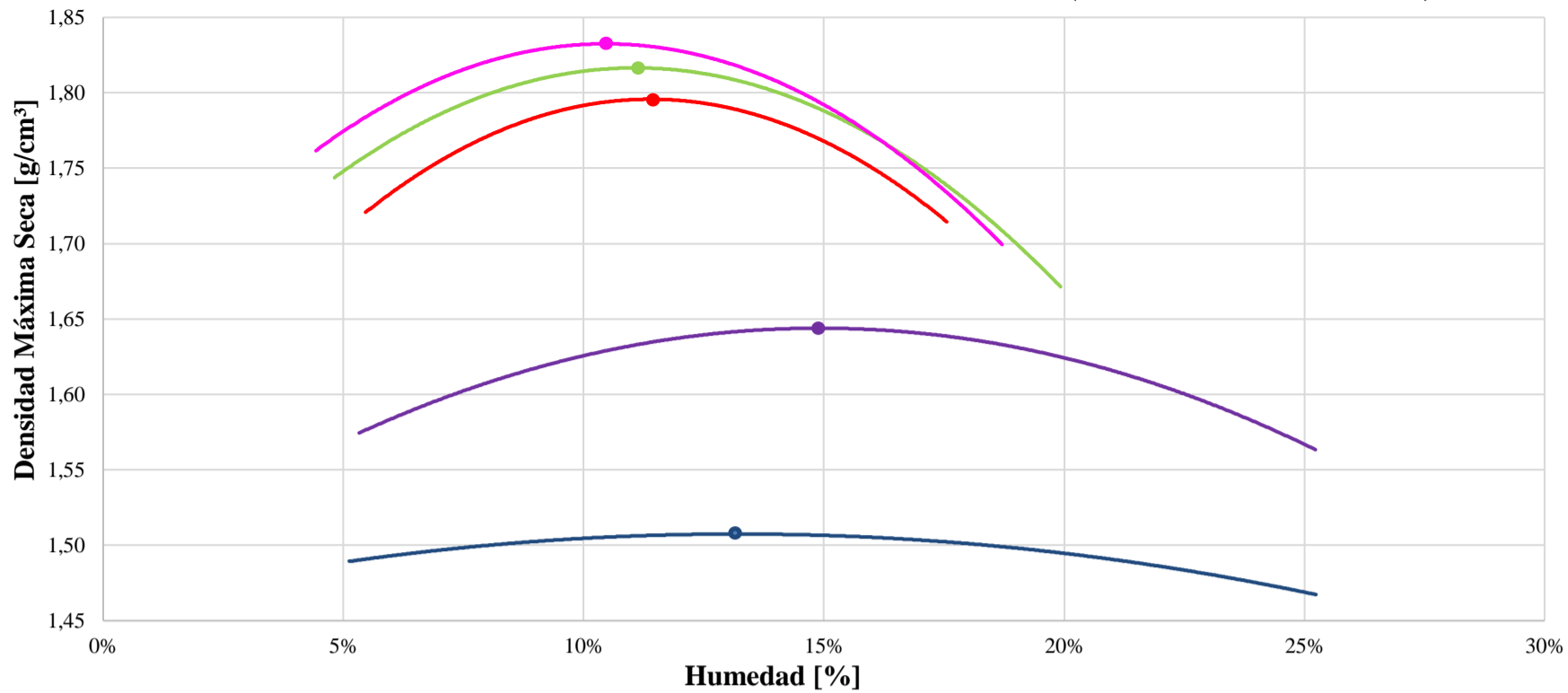


Figura 18. Proctor Camas de Arena.

DIAGRAMA DE ENSAYO PROCTOR (BASE)

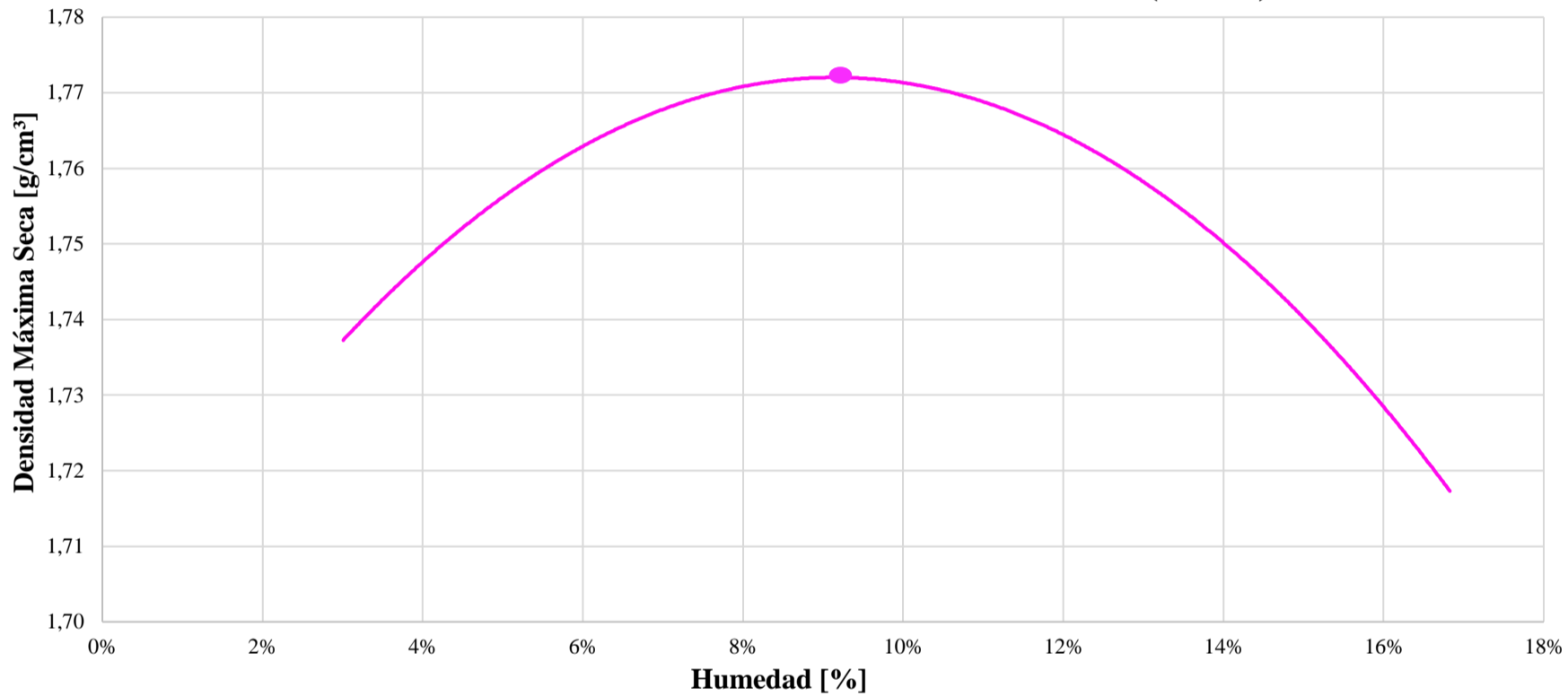


Figura 19. Proctor Base.

DIAGRAMA DE ENSAYO PROCTOR (SUBRASANTES)

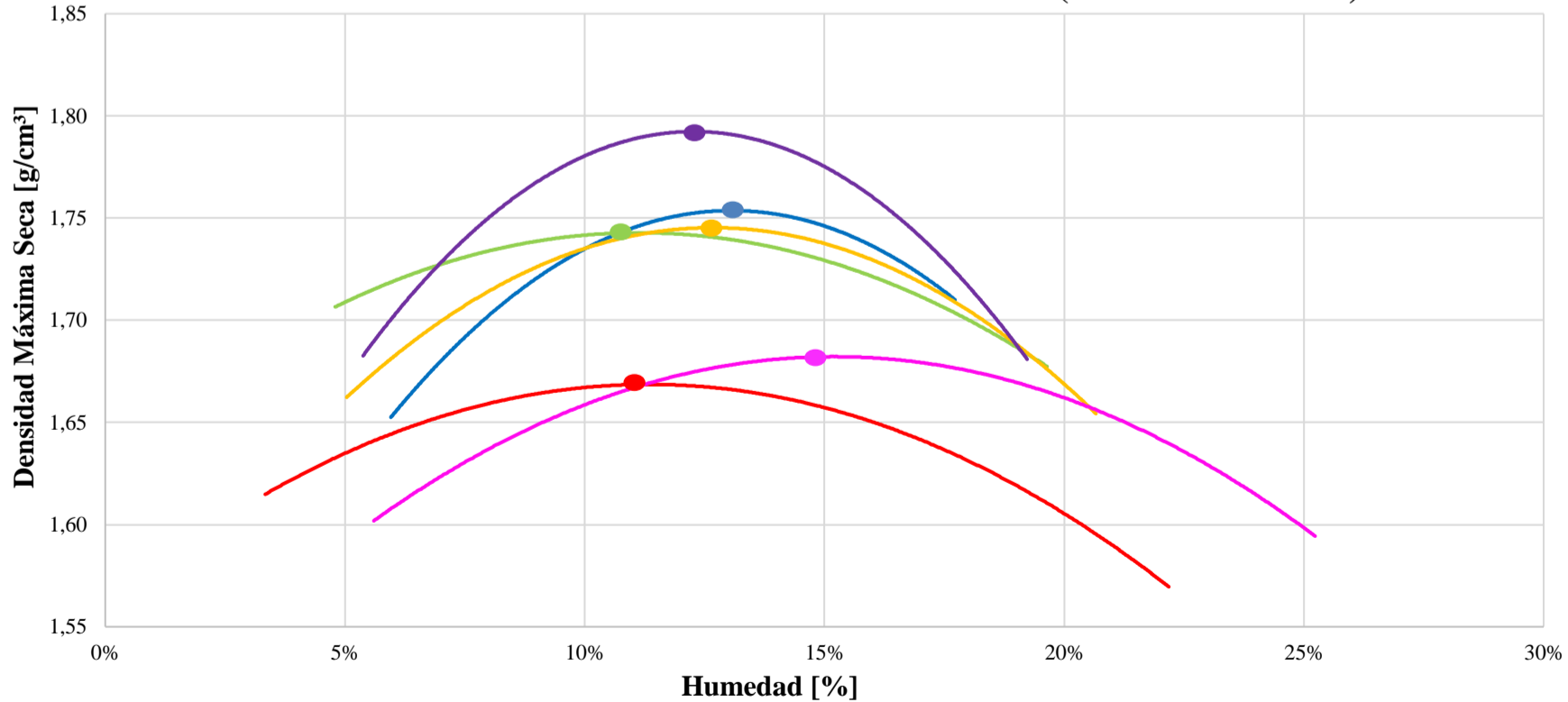


Figura 20. Proctor Subrasantes.

Leyenda de las curvas: — Z1 — Z2 — Z3 — Z4 — Z5 — Z6

4.1.6 Densidades

La tabla 19 evidencia los resultados obtenidos para las densidades encontradas mediante los métodos de compactación Proctor, cono de arena y EDG para las distintas capas de árido de las zonas, además de la comparación del grado de compactación in situ vs laboratorio. Se detalla en el anexo 5.

Tabla 19. Densidades de las capas.

Densidades de las capas							
Capa	Ensayo	Z1	Z2	Z3	Z4	Z5	Z6
Cama de Arena	Proctor [g/cm ³]	1.8	1.5	1.81	-	1.64	1.83
	Proctor [g/cm ³]	-	-	-	-	-	1.77
Base	Cono de Arena [g/cm ³]	-	-	-	-	-	1.32
	C. Arena vs Lab [%]	-	-	-	-	-	81.1
	EDG [g/cm ³]	-	-	-	-	-	1.56
	EDG vs Lab [%]	-	-	-	-	-	87.3
	Proctor [g/cm ³]	1.67	1.75	1.74	1.75	1.79	1.68
Subrasante	Cono de Arena [g/cm ³]	1.47	1.35	1.23	1.21	1.27	1.23
	C. Arena vs Lab [%]	87.23	75.84	69.14	67.9	69.58	71.45
	EDG [g/cm ³]	1.29	1.3	1.05	1.07	1.28	1.10
	EDG vs Lab [%]	77.5	74.5	60.5	61.4	71.5	62.6
	Proctor [g/cm ³]	1.67	1.75	1.74	1.75	1.79	1.68

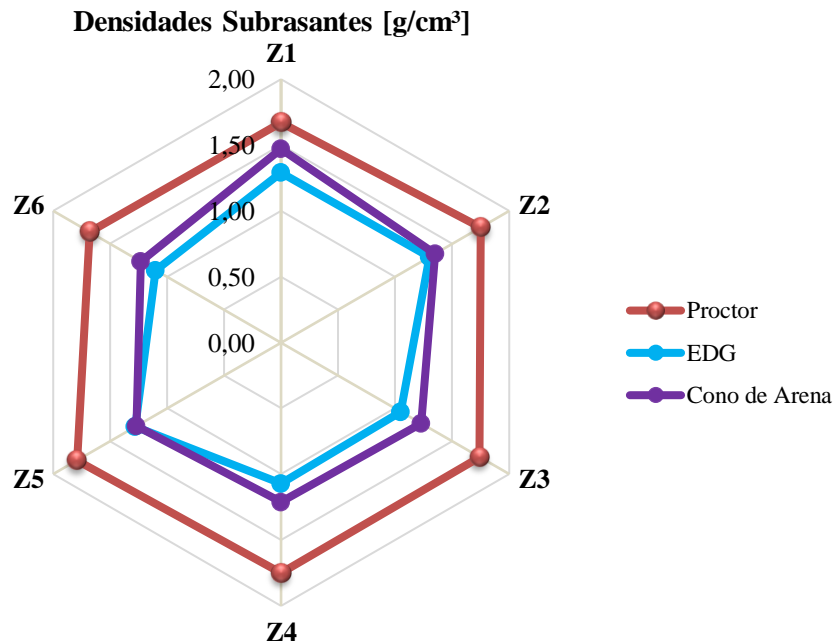


Figura 21. Densidades Subrasantes.

La figura 21 presenta una comparativa entre las densidades obtenidas por el ensayo Proctor y las obtenidas por los métodos in situ, donde los valores pertenecientes al densímetro eléctrico y cono de arena coinciden aproximadamente en sus valores, mientras que el Proctor difiere por las condiciones de campo.

4.1.7 Humedades

La tabla 20 presenta los resultados obtenidos de las humedades encontradas mediante los tres métodos abordados para la densidad, Se detalla en el anexo 5.

Tabla 20. Humedades de las capas.

Humedades de las capas							
Capa Estructural	Ensayo	Z1	Z2	Z3	Z4	Z5	Z6
Cama de Arena	Proctor [%]	11.57	12.17	10.82	-	14.13	10.2
	Proctor [%]	-	-	-	-	-	9.38
Base	Cono de Arena [%]	-	-	-	-	-	3.72
	EDG [%]	-	-	-	-	-	10.8
Subrasante	Proctor [%]	11.94	13.10	11.17	12.89	12.30	14.4
	Cono de Arena [%]	12.55	12.24	11.36	15.42	9.1	10.78
	EDG [%]	12.5	12.6	11.4	10.9	11.7	15.3

Los resultados del EDG y cono de arena arrojan valores altos de humedad a comparación con los valores obtenidos en el Proctor de las subrasantes debido a las diferentes condiciones in situ que se presentan al momento del ensayo.

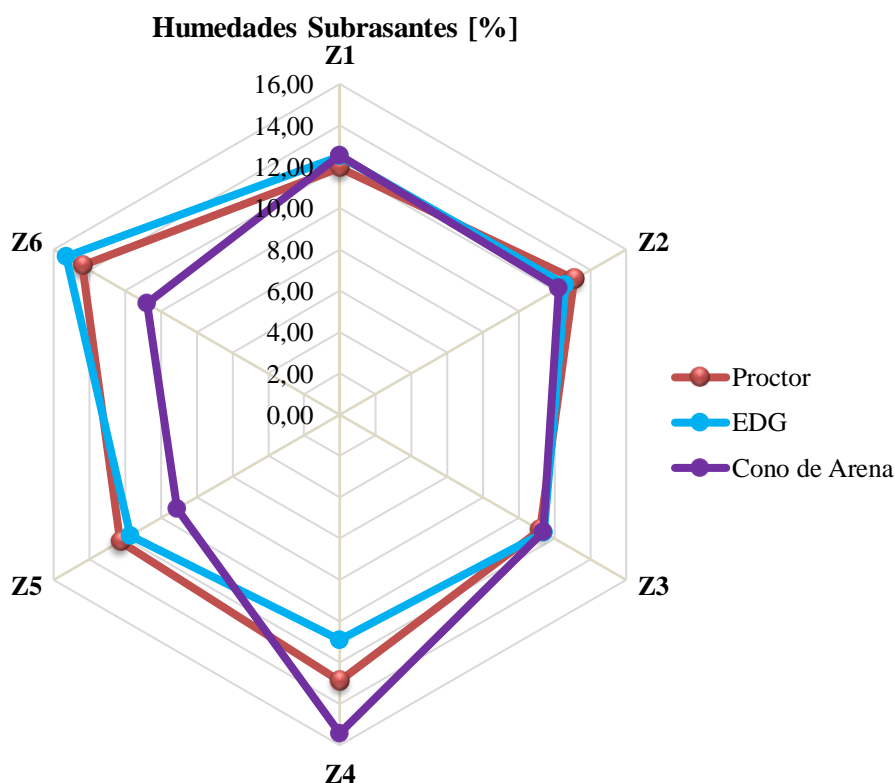


Figura 22. Humedades Subrasantes.

La figura 22 presenta una comparativa entre las humedades óptimas obtenidas por el ensayo Proctor, EDG y Cono de arena, se muestra que las humedades de las camas de arena de las zonas, 1, 3 y 6 presentan valores similares.

4.2 PROPIEDADES MECÁNICAS DEL PAVIMENTO ARTICULADO

4.2.1 Resistencia a la compresión de adoquines (fk)

Por medio del ensayo de compresión se calcula la resistencia a la compresión característica f_k y la resistencia a la compresión promedio de las muestras f_m , dando como resultado los siguientes valores para los dos lotes de adoquín correspondientes a las zonas de estudio, Se detalla en el anexo 2.

Tabla 21. Resistencia a la compresión Lote 1 (Buen estado).

Muestra	Área [mm ²]	Carga Max [N]	Factor espesor/bisel [-]	Resistencia a la compresión
				[MPa]
1	48762.5	2025295	1.11	46.10
2	48762.5	2137116	1.12	48.92
3	47150.0	2012079	1.11	47.42
4	48762.5	2016794	1.12	46.17
5	48762.5	2022008	1.11	46.03
6	47150.0	2026222	1.11	47.62
7	45360.0	1975294	1.11	48.36
8	48762.5	2036509	1.12	46.67
9	48175.0	2729876	1.11	62.97
10	47150.0	2052008	1.11	48.39
f_m [MPa]				48.87
f_k [MPa]				40.56

Tabla 22. Resistencia a la compresión Lote 2 (Mal estado).

Muestra	Área [mm ²]	Carga Max [N]	Factor espesor/bisel [-]	Resistencia a la compresión
				[MPa]
1	45350.0	2449037	1.10	59.44
2	42550.0	1947640	1.12	51.38
3	42925.0	1375627	1.13	36.17
4	50300.0	2259574	1.11	49.86
5	48662.5	2152388	1.12	49.37
6	49100.0	1386871	1.10	31.00
7	48300.0	1211398	1.12	28.07
8	44125.0	2239448	1.10	55.86
9	47050.0	2368327	1.11	55.72
10	43485.0	2450448	1.10	61.85
f_m [MPa]				47.87
f_k [MPa]				28.266

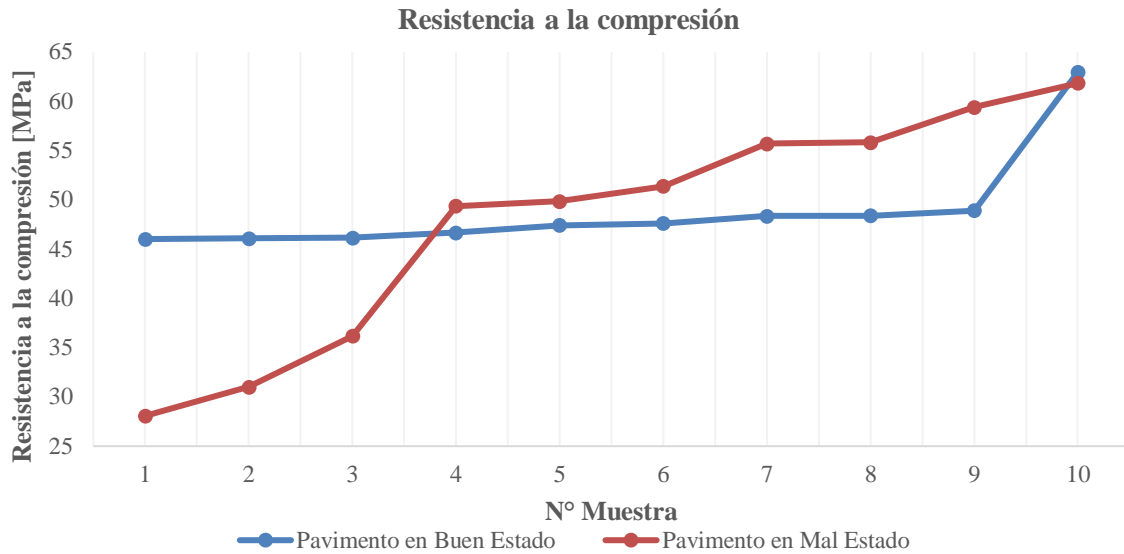


Figura 23. Comparación de f_c .

En la figura 23 se pueden observar las resistencias a la compresión de cada una de las probetas en un orden de menor a mayor para facilitar su comprensión. Se destaca que el lote 1, cumple con una resistencia característica de 40.56 MPa, superando el mínimo normativo de 40 MPa. Por el contrario, el lote 2, presenta una resistencia característica de 28.266 MPa, inferior al mínimo establecido, debido a que los adoquines de la zona 4 y 5 pertenecen a muestras en mal estado, lo que contrarresta los resultados de la resistencia del lote 1 que sí cumple con los valores normativos.

4.2.2 Resistencia a la abrasión de capa granular

La resistencia a la abrasión se determinó debido a la procedencia triturada de la base. Esta se consideró como una base clase A. Como se muestra en la tabla 23, el porcentaje de abrasión es del 25.60%, cumpliendo con el mínimo para esta clase de base, al ser menor del 28%. Se detalla en el anexo 6.

Tabla 23. Resistencia a la abrasión de la base.

Tamaño del Tamiz		Masa requerida (g)
Pasa	Retiene	
37.5 mm	25 mm	1250 ± 25
25 mm	19 mm	1250 ± 25
19 mm	12.5 mm	1250 ± 10
12.5 mm	9.5 mm	1250 ± 10
Masa inicial del ensayo [g]		5003
Masa retenida en Tamiz N°12 [g]		3722
N° de Esferas		12
Porcentaje de abrasión [%]		25.60

4.2.3 Módulo de Young y módulo de rigidez

La siguiente tabla muestra los resultados obtenidos con ayuda del equipo Humbolt GeoGauge, en donde, a partir del módulo de Young se calculó el módulo de rigidez. Se puede observar que la zona con mayores valores es la zona 2, ya que, el pavimento de este lugar se encontraba en buenas condiciones, en contraste a las zonas 1 y 6 que son las que cuentan con módulos de Young inferiores a 40 MPa, ya que, en la zona 6 cuenta con una base en su estructura, mientras que la zona 1 presenta una mayor densidad, características que pudieron haber disminuido el valor del módulo de Young.

Tabla 24. Módulo de Young y módulo de rigidez.

Características	Subrasantes						Base
	Z1	Z2	Z3	Z4	Z5	Z6	Z 6
Módulo de rigidez [MN/m]	6.499	8.099	6.455	6.931	6.296	6.215	6.380
Módulo de Young [MPa]	39.530	65.285	52.895	55.910	52.030	35.010	52.455
Módulo de Young [PSI]	5733.340	9468.786	7671.769	8109.058	7546.312	5077.770	7607.953

4.2.4 Estimación de CBR.

Con ayuda del valor del módulo de Young, se puede emplear 2 ecuaciones para poder estimar el CBR de una capa de pavimento in situ. Sin embargo, para La zona 1 y 6 no se puede calcular un valor de CBR en la ecuación 1 ya que sus valores del módulo de Young son bajos, por lo que la fórmula arroja un resultado negativo.

Tabla 25. CBR estimado de las capas.

Características	Subrasantes						Base
	Z1	Z2	Z3	Z4	Z5	Z6	Z6
CBR Ec (1) [%]	-	13.913	3.546	6.273	2.682	-	3.140
CBR Ec (2) [%]	6.636	13.067	9.794	10.568	9.581	5.580	9.683

4.3 PROPIEDADES HIDRÁULICAS DEL PAVIMENTO ARTICULADO

La metodología utilizada para determinar las propiedades hidráulicas del pavimento se basa en las lineaciones de la normativa ASTM D-3385-03, comprendiendo el Infiltrómetro de doble anillo modificado por la Universidad Nacional de Chimborazo para recolectar datos de infiltración. Por lo cual, es necesario comprender las condiciones, circunstancias y características en las que se realizaron estas pruebas. El ensayo de infiltración se detalla más profundidad en los anexos 7 y 8.

4.3.1 Permeabilidad

Mediante el ensayo de infiltración se pudo calcular la permeabilidad y el coeficiente de escorrentía. Los resultados se detallan a continuación en la tabla 26.

Tabla 26. Permeabilidad en pavimento articulado.

Velocidades de Infiltración vs Tiempo						
Tiempo acumulado [h]	Velocidades de Infiltración K [cm/h]					
	Zonas					
	Z1	Z2	Z3	Z4	Z5	Z6
0	0	0	0	0	0	0
0.5	3.4	3	2	2.6	3.4	2.6
1	2.2	2.6	2.2	2.4	3	2.4
1.5	2.4	2	1.8	2.2	2.8	2.2
2	1.2	1.8	2	2.4	2.6	2.4
2.5	1.8	2	1.8	2	2.2	2
3	2	1.4	1.4	1.6	1.6	1.6
3.5	1.6	1	1	1.4	1.8	1.4
4	2.2	1.2	1	0.6	1.2	0.6
4.5	1	0.8	0.8	1	1.2	1
5	0.8	1	1	0.8	1	0.8
5.5	0.6	0.6	1.2	0.6	0.8	0.6
6	0.6	0.8	0.8	1	0.6	1
6.5	0.4	0.4	1.2	0.4	0.6	0.4
7	0.4	0.4	0.6	0.4	0.4	0.4
7.5	0.4	0.4	0.6	0.4	0.4	0.4
8	-	-	0.4	0.4	-	0.4
8.5	-	-	0.4	-	-	-
9	-	-	-	-	-	-
C [%]	75.41	80.60	76.99	79.80	76.40	75.40
Clima	Lluvioso	Soleado	Lluvioso	Lluvioso	Soleado	Soleado
Estado	Bueno	Bueno	Malo	Malo	Malo	Bueno

4.3.2 Infiltración

En la tabla 27 se presentan los resultados de los ensayos de infiltración realizados en las distintas zonas de estudio.

Tabla 27. Observaciones y propiedades.

Resumen de características del pavimento articulado						
Característica	Z1	Z2	Z3	Z4	Z5	Z6
Infiltración [%]	24.59	19.4	23.01	20.2	23.6	24.6
Escorrentía [%]	75.41	80.6	76.99	79.8	76.4	75.4
Humedad [%]	12.5	12.6	11.4	10.9	11.7	15.3
Absorción [%]	2.04	1.97	2.88	2.88	2.46	2.67
Densidad [g/cm ³]	1.29	1.3	1.05	1.07	1.28	1.1
Compactación [%]	77.5	74.5	60.5	61.4	71.5	62.6
Observaciones	A	A	B	C	D	E

A: La zona no presenta agrietamientos, no se presentó precipitaciones previo al día del ensayo, el Infiltrómetro fue colocado a 1 m del lado derecho de la calzada.

B: La zona presenta agrietamientos leves, no se presentó precipitaciones previo al día del ensayo, el Infiltrómetro fue colocado a 1 m del lado derecho de la calzada.

C: La zona presenta agrietamientos leves, se presentó precipitaciones durante la noche y madrugada, la zona cuenta únicamente con subrasante.

D: La zona presenta agrietamientos moderados, se presentó precipitaciones durante la madrugada, el Infiltrómetro fue colocado a 1 m del lado izquierdo de la calzada.

E: La zona de ensayo presenta agrietamientos leves, no se presentó precipitaciones previo al día del ensayo, es la única zona que cuenta con base de pavimento.

Tras las pruebas de infiltración se puede destacar que la zona 2 sobresale por tener el mayor porcentaje de escorrentía, con un valor de 80.6%, considerando que el día del ensayo se contó con condiciones climatológicas favorables. De la misma manera, las zonas que presentan un mayor porcentaje de compactación, como lo son las zonas 1, 2 y 5, tienen como consecuencia un menor porcentaje de infiltración.

Se debe destacar que únicamente la zona 6 cuenta con una base, presentando el menor porcentaje de escorrentía, con un valor de 75.40%. Esto a consecuencia de la presencia de leves agrietamientos y la gradación de la base con partículas gruesas que facilitarían la filtración del agua a la subrasante del pavimento. En contraste, la zona 4, que cuenta únicamente con subrasante, presenta un porcentaje de escorrentía mayor, con un valor de 79.80%. Esto último podría deberse a las condiciones previas al ensayo, ya que se presentaron precipitaciones que pudieron saturar parte del pavimento y a la peculiar gradación de la subrasante, que difiere de las demás zonas de estudio.

COMPARACIÓN CURVAS DE INFILTRACIÓN

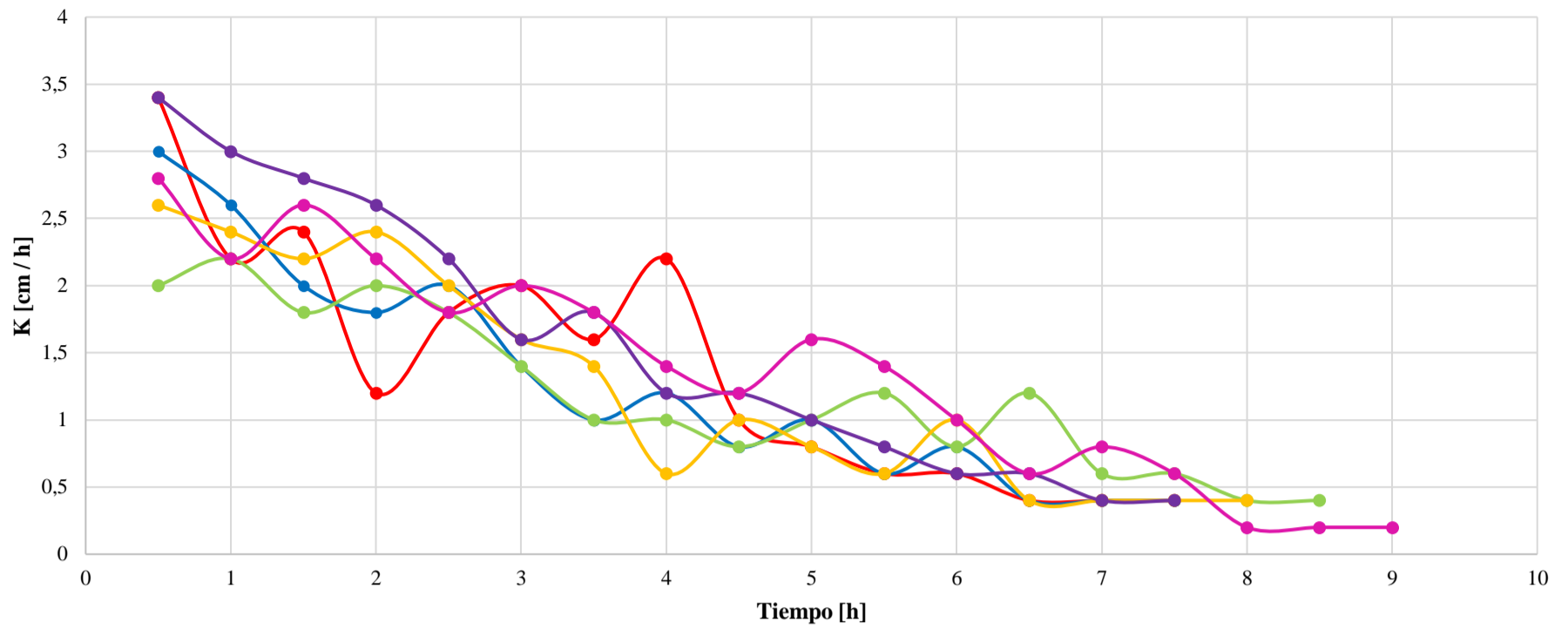


Figura 24. Comparación entre todas las curvas de infiltración.

CURVA DE INFILTRACIÓN PAVIMENTO EN BUEN ESTADO

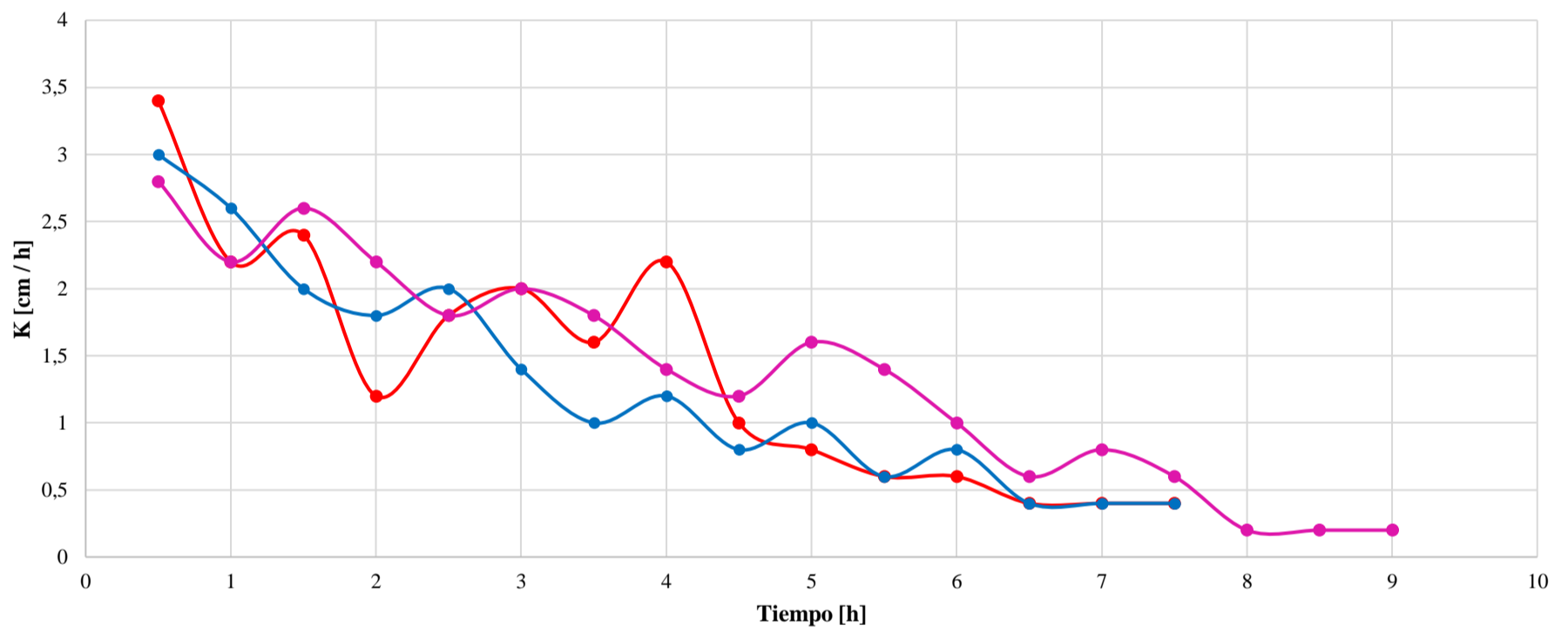


Figura 25. Comparación entre curvas de infiltración de pavimento en buen estado.

CURVA DE INFILTRACIÓN PAVIMENTO EN MAL ESTADO

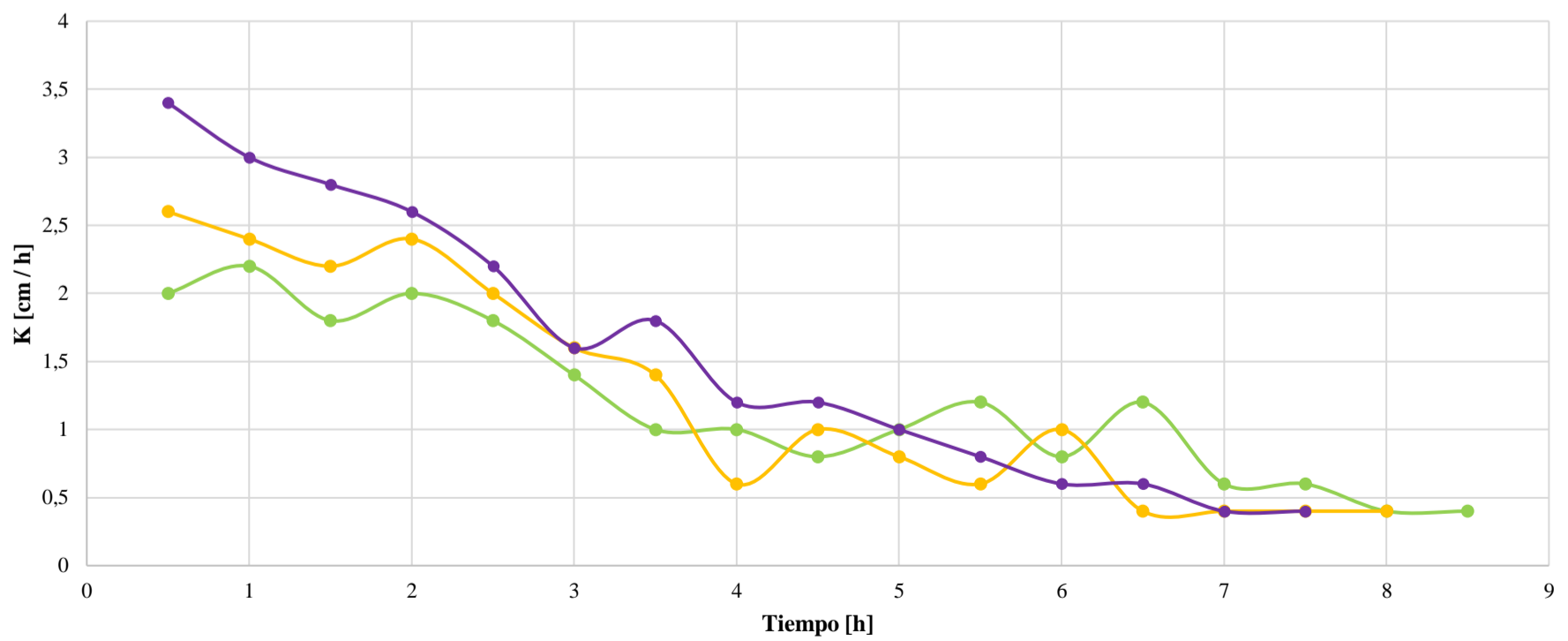


Figura 26. Comparación entre curvas de infiltración de pavimento en mal estado.

Leyenda de las curvas: Z1 Z2 Z3 Z4 Z5 Z6

4.3.3 Comportamiento de las curvas de infiltración

En la figura 24 se puede evidenciar las curvas de infiltración de todas las zonas de estudio, destacando que no existen picos muy grandes de infiltración, con una velocidad de infiltración máxima de 3.4 cm/h.

En la figura 25 se presenta las tres curvas correspondientes a un pavimento en buen estado, pertenecientes a las zonas de análisis 1, 2 y 6 respectivamente. La zona 1 destaca con dos concavidades pronunciadas resultado de la climatología e infiltración irregular del pavimento articulado.

Por otra parte, en la figura 26 se presenta las tres curvas correspondientes a un pavimento en mal estado, formando parte las zonas de análisis 3, 4 y 5 respectivamente. La zona 5 se distingue por su infiltración uniforme, resultado de la climatología y condiciones favorables previas al ensayo, en contraste con las otras curvas que presentan concavidades más pronunciadas, producto de la filtración de agua, lo cual podría deberse a la saturación de ciertas zonas del pavimento producto de la presencia de precipitaciones.

4.3.4 Coeficientes de Escorrentía

Se pudo obtener el cálculo del coeficiente de escorrentía mediante la prueba de infiltración. Los resultados se presentan en la figura 27. Los coeficientes correspondientes al pavimento en buen estado se encuentran en color azul, mientras que los del pavimento en mal estado están en rojo.

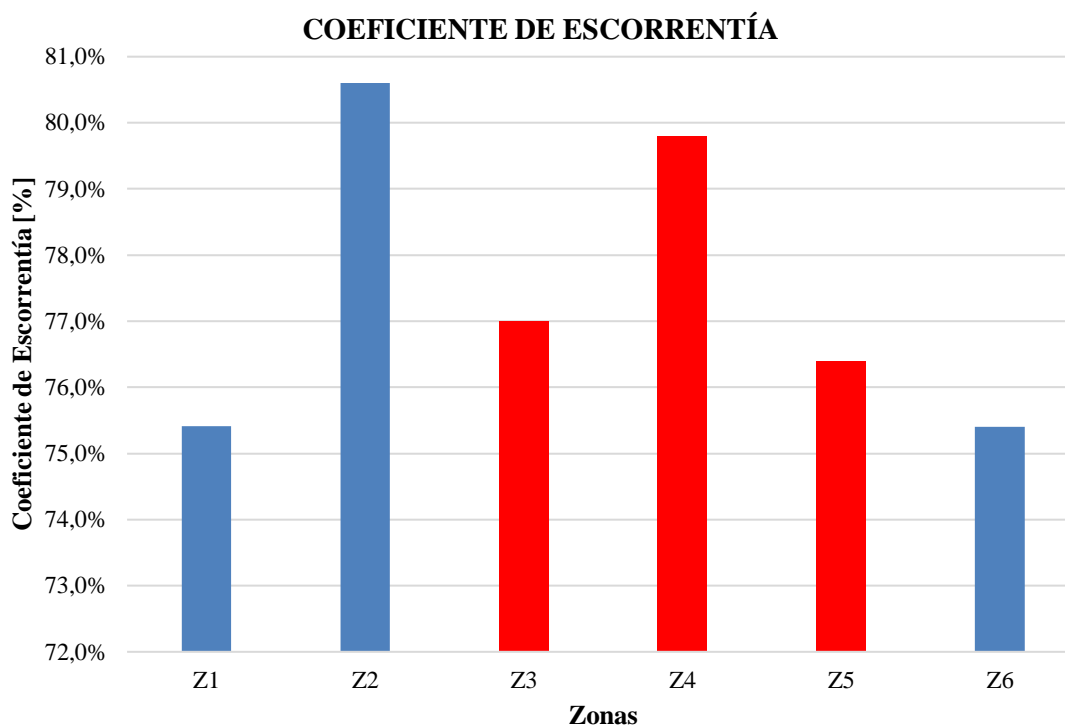


Figura 27. Comparación coeficientes de escorrentía.

Es importante destacar que únicamente en las zonas 1 y 2 se pudo realizar la prueba sobre un adoquinado en óptimas condiciones, sin agrietamientos y con juntas completamente selladas, en contraste con las demás zonas, donde estos factores facilitaron la infiltración de agua a las capas inferiores del pavimento.

El valor promedio obtenido para el coeficiente de escorrentía es del 77.4%, el cual se encuentra dentro de los rangos establecidos en la norma CPE INEN 005 9-1, considerado para empedrados de juntas pequeñas. Cabe destacar que dicha normativa no se encuentra vigente; sin embargo, se empleó como referencia para comparar los coeficientes de escorrentía obtenidos del ensayo, donde únicamente el valor de la zona 2, del 80.6%, excede el rango máximo del 80%.

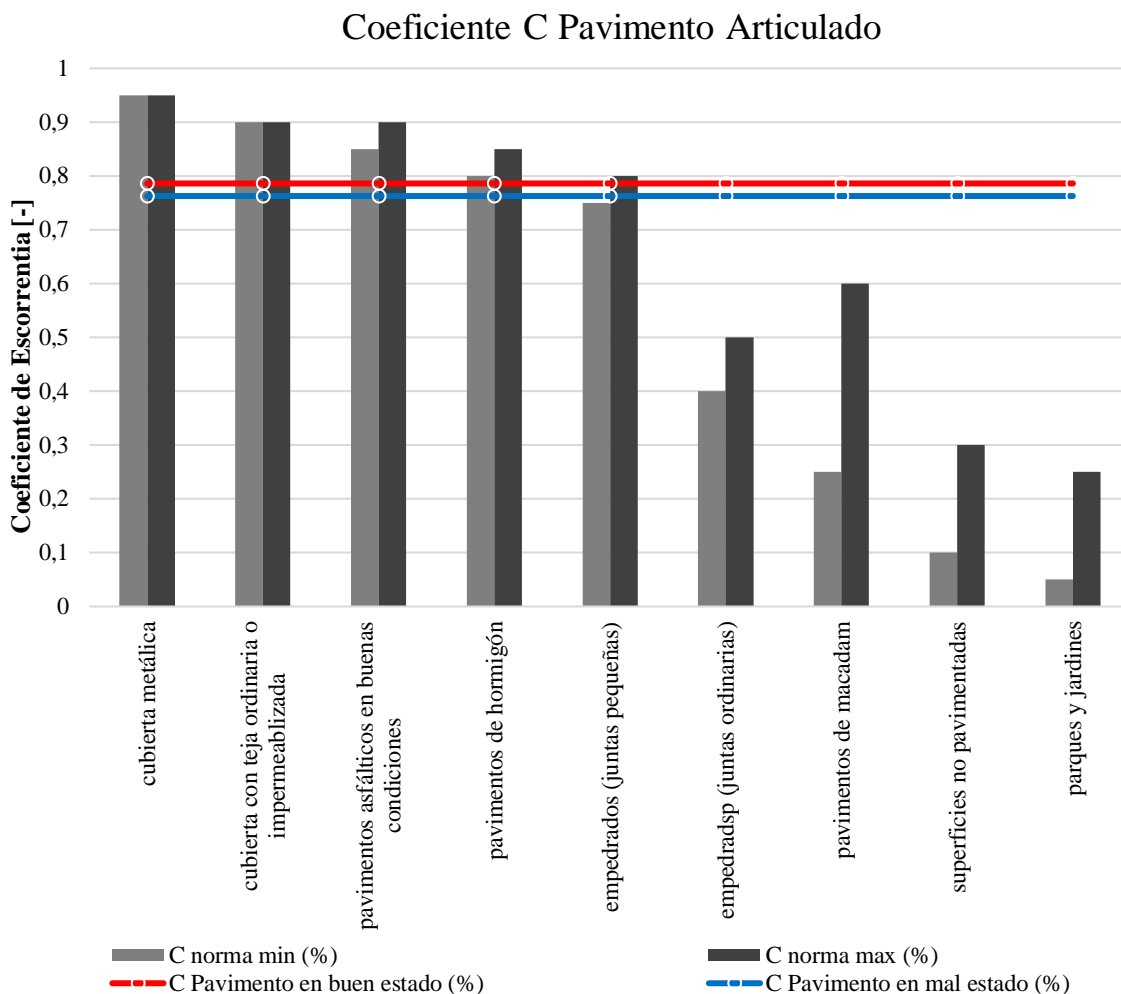


Figura 28. Comparación coeficientes de escorrentía con normativa.

Es importante denotar que el coeficiente de escorrentía se relaciona directamente con el estado de la capa de rodadura. En nuestro estudio, el adoquín con las juntas completamente selladas presenta valores cercanos al máximo expuesto en la normativa, en contraste con los adoquines con agrietamientos o sin un sellado apropiado entre juntas, que apenas logran sobrepasar el mínimo.

4.4 COMPARACIÓN ENTRE PROPIEDADES

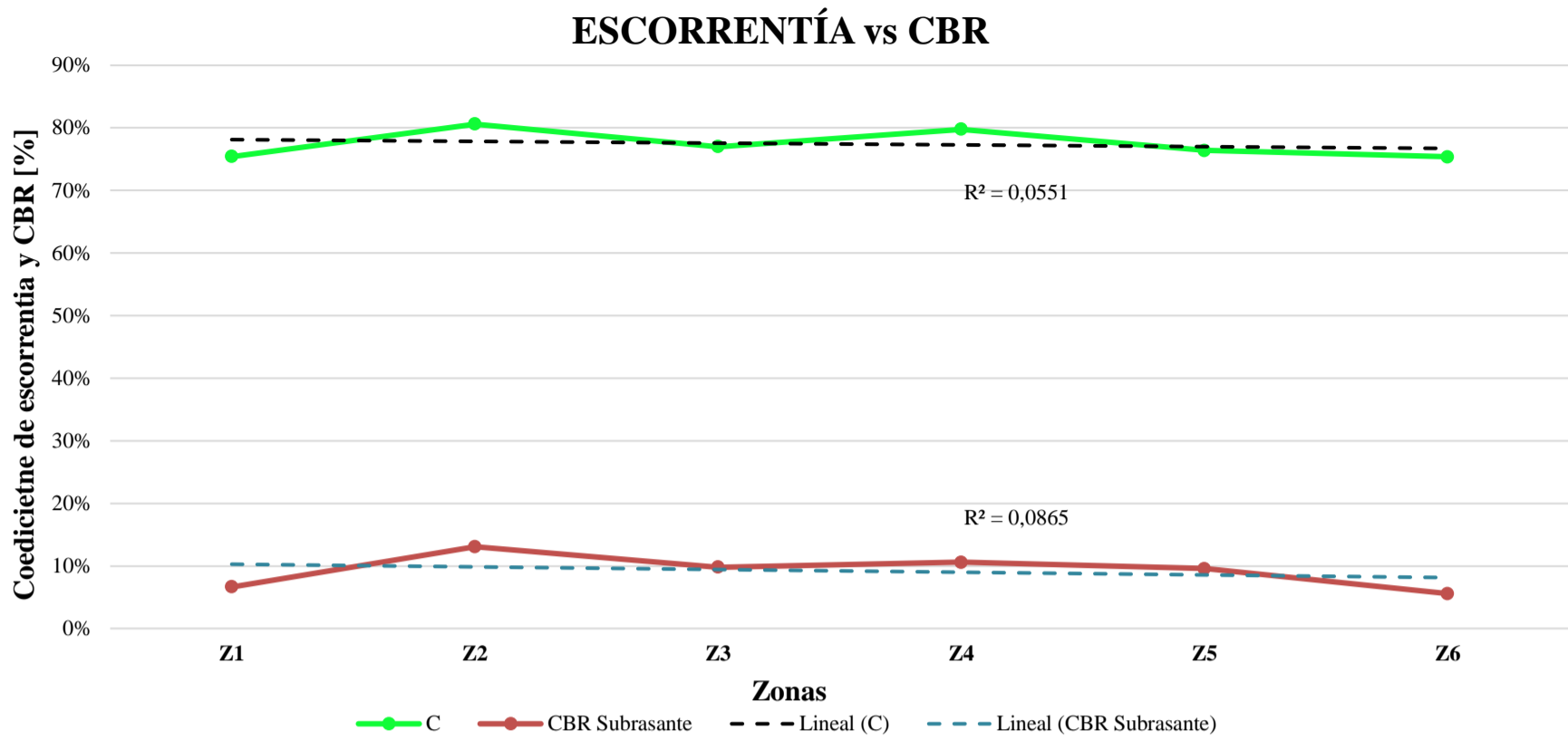


Figura 29. Comparación C Escorrentía vs Soporte de California.

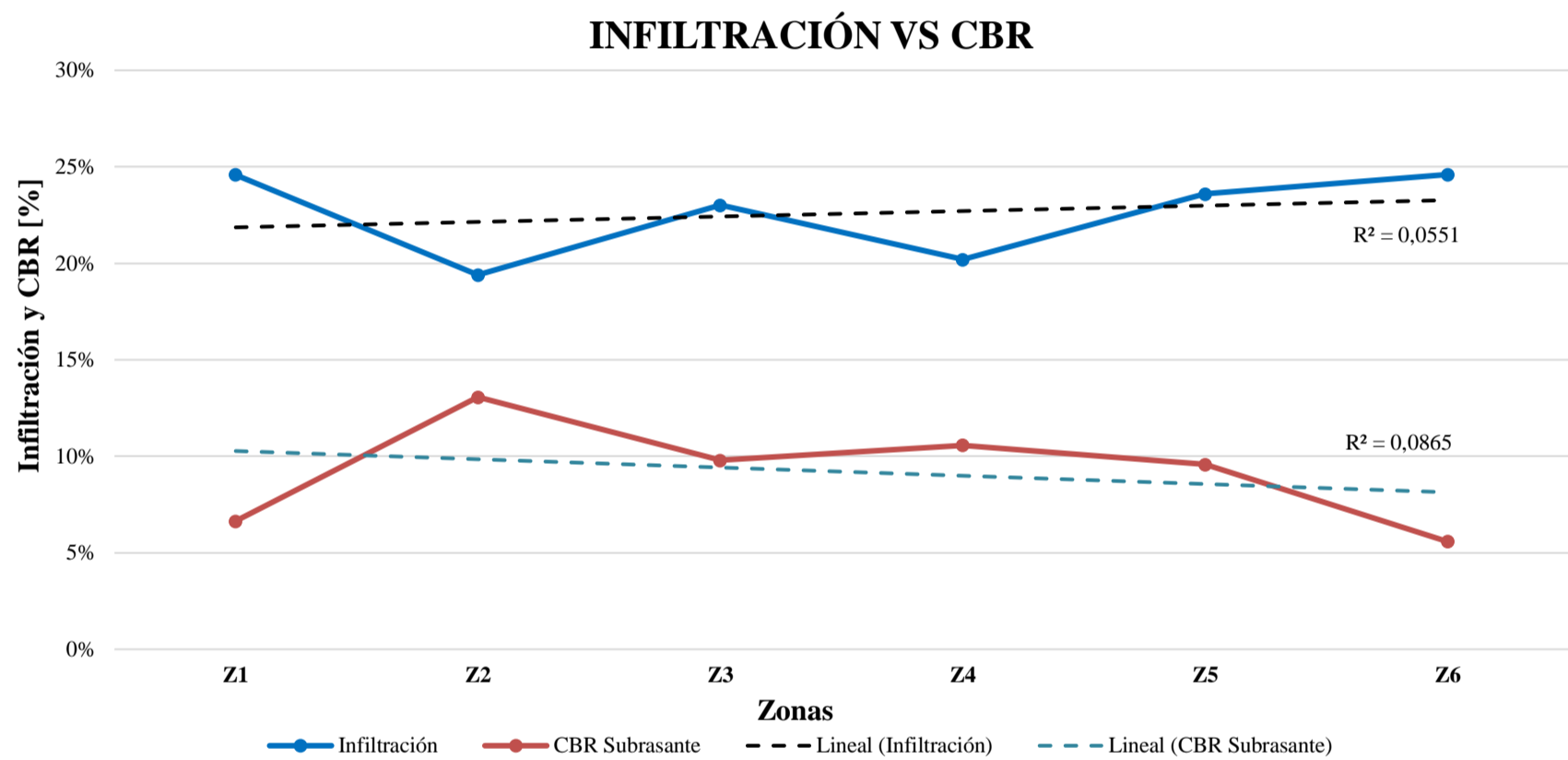


Figura 30. Comparación C Escorrentía vs Soporte de California.

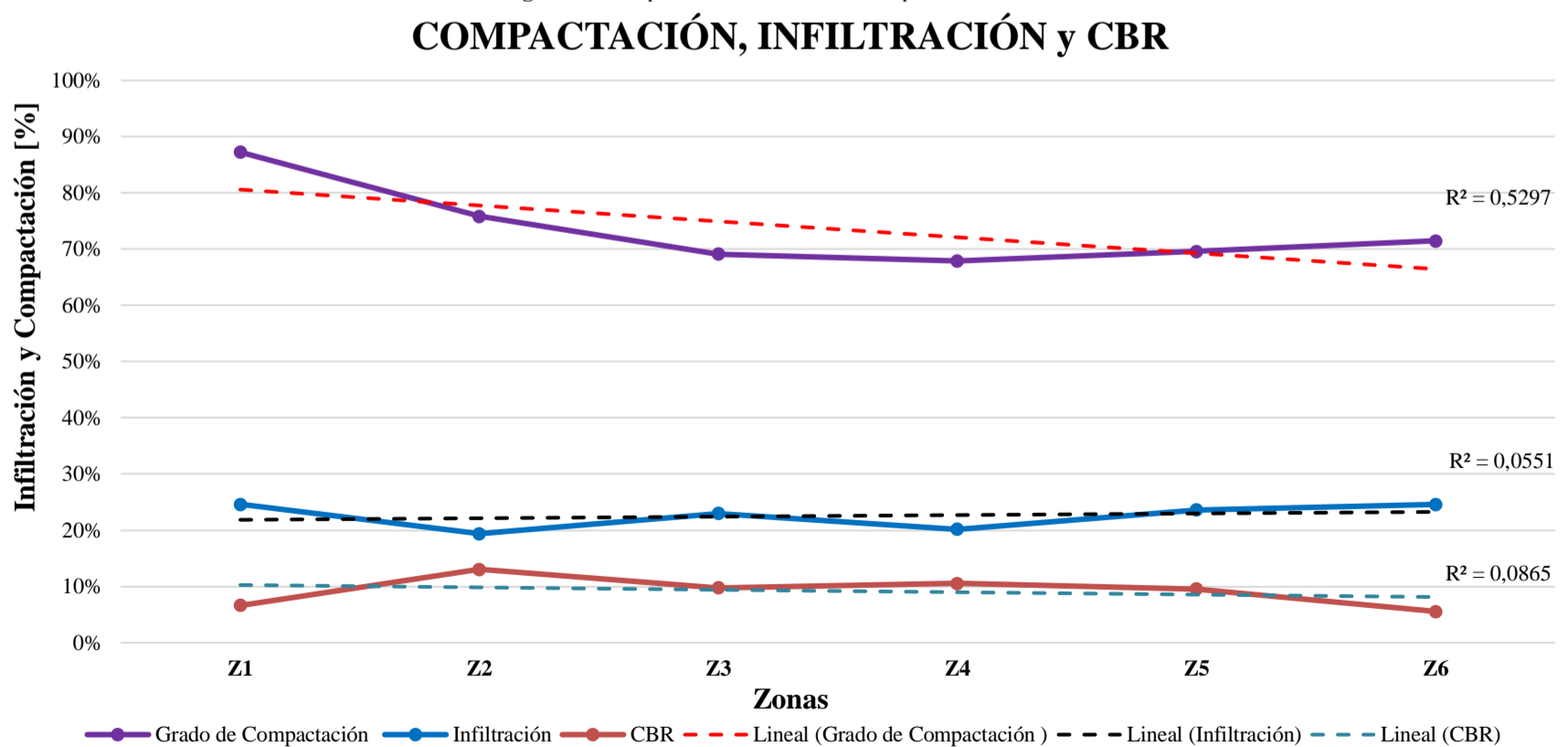


Figura 31. Comparación Compactación, Infiltración y Soporte de California.

En la figura 29 se puede apreciar la comparación entre el coeficiente de escurrentía con el CBR de las subrasantes, en donde se muestra una relación directamente proporcional y una tendencia lineal por parte de ambas variables, destacando la zona 1 y 6 como las de menor valor en cada ensayo realizado siendo este un factor que explicaría la alta infiltración en estas zonas a pesar de considerarse pavimentos en buenas condiciones.

En la figura 30 se puede contrastar la relación inversamente proporcional entre el porcentaje de infiltración con el CBR de las subrasantes, en donde se muestra que las zonas con menor valor en CBR son las zonas con una mayor infiltración, siendo la zona 2 y 4 un referente de esto al tener los valores máximos y mínimos respectivamente en comparación a las demás zonas de análisis.

Por otra parte, la zona 2 destaca por ser la zona con el mayor valor en CBR de 13.07%, de entre las seis zonas y a su vez contar con el menor porcentaje de infiltración con apenas 19.40%.

En la figura 31 se puede observar la relación entre la compactación in situ (EDG), el CBR y la infiltración. Destaca el punto de la zona 2, ya que, a pesar de tener un menor grado de compactación, su infiltración es la más baja. Esto está directamente relacionado con el resultado del ensayo de CBR, ya que esta zona cuenta con el mayor valor en comparación con las demás, resaltando la importancia de la relación entre el grado de compactación y el CBR, donde esta última característica se relaciona en mayor medida con la infiltración, considerando que la capacidad portante del suelo depende en su mayoría del grado de compactación in situ.

Por otra parte, las zonas con mayor infiltración son la 1 y 6, que a pesar de contar con grados de compactación superiores a las demás zonas presenta infiltraciones notables producto de que estas zonas cuentan con los valores más bajos en CBR.

4.5 DISCUSIÓN

En la tabla 28 se muestra una comparativa de resultados con otros autores.

Tabla 28. Comparativa de resultados.

Característica	Alvear & Piñas (2024)	Casco & Salcán (2024)	Martínez (2022)
Densidad MAX Proctor [g/cm ³]	1.73	1.84	1.99
Densidad in situ EDG [g/cm ³]	1.18	1.11	-
Humedad [%]	12.69	12.22	12.10
CBR Subrasante [%]	9.20	7.68	5.493
Coefficiente de escorrentía [%]	77.40	84.8	-

Propiedades Físicas

Partiendo de las subrasantes del pavimento, en la tabla se pueden observar los resultados obtenidos por Martínez (2022), quien analizó el diseño de la estructura de un pavimento flexible, así como los resultados de Casco & Salcán, que estudiaron el corredor vial Flores-Cebadas. Ambos estudios destacan los siguientes resultados:

Para Martínez (2022), La clasificación de suelos, apoyada por la granulometría, señala un alto contenido de partículas finas y la presencia de plasticidad, en contraste con las subrasantes de la zona oriental de Riobamba y el corredor vial Flores – Cebadas, que cuentan con partículas más gruesas, especialmente este último.

De acuerdo con Casco y Salcán (2024) los valores obtenidos para las densidades de las subrasantes de un pavimento flexible son de 1.04 a 1.22 g/cm³ que son similares a los resultados del densímetro eléctrico realizado en esta investigación con valores de 1.05 a 1.3 al tratarse del mismo material de la subrasante por su ubicación geográfica.

Los valores de densidad máxima seca del estudio de Martínez (2022) varían ampliamente, desde 1.36 hasta 1.99 g/cm³, seguidos por los valores del corredor vial, que se sitúan entre 1.505 y 1.84 g/cm³. En contraste, los resultados de nuestro estudio muestran valores comprendidos entre 1.67 y 1.79 g/cm³, indicando una menor variabilidad en las densidades máximas secas. Por otro lado, los resultados de Martínez (2022) en cuanto a humedades difieren significativamente de los obtenidos en los otros dos estudios, ya que muestran valores elevados. Sin embargo, todos coinciden en la humedad óptima un valor aproximadamente del 12%, para el punto con la máxima densidad seca.

Por otra parte, a pesar de que los estudios tomaran la región sierra del país como zona de estudio, existen diferencias entre resultados. Esta diferencia radica en los materiales presentados. Para Martínez (2022) destaca más al contar con tres tipos de subrasantes

compuestas por limos inorgánicos, arenas muy finas y arenas limosas, en diferencia con nuestro estudio, en el que únicamente se encontraron arenas mal gradadas, teniendo más semejanza por cercanía geográfica a la ciudad de Riobamba las presentadas por Casco & Salcán (2024). Esto explicaría la variabilidad entre los resultados.

Esto indica que la zona oriental cuenta con una mayor semejanza en el tipo de suelo al pertenecer a una misma zona de estudio, donde predomina el tipo de suelo SP.

Debido a la ausencia de una base en la mayoría de las zonas de estudio, se especula que hubo un mejoramiento en las subrasantes. Según la MOP-001-F 2002, que establece los requisitos para las capas, las calles con bajo TPDA pueden optar por omitir las capas como base y subbase, pero deben necesariamente realizar algún tipo de mejoramiento que aumente la capacidad portante del suelo.

Se ha demostrado que la granulometría cumple con los requisitos de gradación para el mejoramiento de las subrasantes presentes en la MOP-001-F 2002, ya que los tamaños de partículas son menores al tamiz de 4" y contiene una fracción menor al 20 % en el tamiz No 200.

Para la única zona con base, se tomó en cuenta su procedencia y el tipo de material para su clasificación, al tratarse de ripio triturado se clasificó como una base clase 1 de acuerdo con la MOP-001-F 2002. En el ensayo de granulometría se evidencia que la curva que cumple con los límites establecidos en la normativa, a pesar de ser considerada una grava pobremente graduada.

En el caso de las camas de arena, el ensayo granulométrico demuestra que no cumplen con los requisitos para la capa de asiento, ya que ninguna de las muestras cuenta con la gradación establecida en la normativa. Esto indica que las camas de arena de la zona oriental de Riobamba no cumplen requisitos de calidad.

Por otro lado, el ensayo de límites de Atterberg evidencia el cumplimiento del límite líquido para el mejoramiento de subrasantes, siendo inferior al 35%, al igual que la base, siendo menor al 25%, según lo estipulado en la normativa MOP-001-F 2002.

En cuanto al grado de compactación de las subrasantes y de la base, ninguna capa cumple con los requisitos normativos, ya que presentan valores entre 69.14% y 87.234%, siendo inferiores al mínimo requerido de 95% expuesto en la AASHTO-T-180.

Finalmente, los dos lotes de adoquín, conformados por un total de 20 muestras, no cumplen con el espesor mínimo de 8 cm presente en la norma NTE INEN 3040. Sin embargo, mostraron porcentajes de absorción promedio entre 4.14% y 3.88%, respectivamente. Estos

resultados evidencian el cumplimiento de los requisitos de calidad, que estipula que el índice de absorción debe ser menor al 6 %.

Propiedades Mecánicas

Se cuenta con resultados del módulo de Young proporcionados por el equipo GeoGauge teniendo un valor mínimo de 35.01 MPa y uno de máximo de 65.285 MPa que a comparación con los resultados expuestos según Casco y Salcán (2024) en pavimentos flexibles cuentan con valores máximos de 130.07 MPa y mínimos de 35.43 MPa, sucede que al contar con menos capas como los son base y subbase en el pavimento los valores de resiliencia serán menores a una estructura vial que presente todos sus componentes, sin importar que el tipo de suelo sea el mismo en cuanto a nivel de subrasante.

Según Martínez (2002), los resultados obtenidos para el CBR realizado en laboratorio para subrasantes de la vía Pacto- El Paraíso ubicado en la ciudad de Quito cuenta con valores que oscilan entre 2.95% a 9.6% contrarrestando los valores obtenidos in situ en esta investigación que van desde el 5.58% a 13.06% de la zona oriental de la ciudad de Riobamba lo que indica que las capas del pavimento articulado de las zonas analizadas pertenecen a suelos con un bajo valor de módulo resiliente, destacando la relación que existe planteada por Urquiza (2019), sin embargo, en ambos casos estos valores no cumplen con el porcentaje mínimo de CBR para mejoramiento de subrasantes de 20% presentado en la MOP-001-F 2002.

Para el ensayo de desgaste por abrasión de la base, se tuvo en cuenta la gradación de la muestra, tanto en tamaño como en número de esferas, de acuerdo con la norma ASTM D1241. La base se clasificó con una gradación tipo A. Los resultados del ensayo indicaron un porcentaje de desgaste del 25.6%, cumpliendo con el requisito de calidad establecido en la normativa, que es de 40%.

Se determinó la resistencia a la compresión característica de los dos lotes de adoquín, evidenciando que los lotes de zonas con pavimento en buenas condiciones cumplen con la resistencia de 40 MPa para caminos secundarios y calles principales, según lo estipulado en la norma INEN 1488, ya que este lote presenta una resistencia a la compresión característica de 40.56 MPa, esto se debe a que en la zona 1 existe una menor desviación de resultados con valores entre 46.03 y 62.97 MPa. En diferencia, el lote de zonas con pavimento en malas condiciones presenta una resistencia a la compresión característica de 28.26 MPa. Aunque la resistencia a la compresión promedio es similar a la del otro lote, la resistencia

característica se ve afectada por la notable desviación en los resultados, con valores entre 28.07 y 61.85 MPa.

Propiedades Hidráulicas

El coeficiente de escurrimiento obtenido del ensayo de infiltración para un pavimento articulado tuvo un valor promedio de 77.4% el cual se encuentra dentro de los rangos establecidos por la normativa CPE INEN (1992), este resultado contrarresta la hipótesis inicial de la investigación en donde se infería que el coeficiente utilizado para el diseño y construcción de sistemas de drenaje en la ciudad de Riobamba para el pavimento articulado podría estar caduco acorde a las necesidades actuales. Sin embargo, aunque el coeficiente de escurrimiento se encuentre dentro del rango admisible presentado en la norma CPE INEN, existe evidencia en las calles de que en presencia de precipitaciones no existe una correcta filtración y drenaje del agua debido a que la estructura vial se encuentra incompleta ya que como se pudo analizar en esta investigación las camas de arena no cumplen con los estándares normativos al presentar exceso de material fino y a pesar de cumplir los límites líquidos no cumplen con la gradación, esto sumado a que las juntas presentes entre cada bloque de adoquín en varias zonas de análisis no se encontraban debidamente selladas ya sea por procesos constructivos deficientes o por el paso del tiempo y el consumo de su vida útil hace que la infiltración de agua sea significativamente más rápida saturando el suelo y provocando el desbroce del agua a la superficie.

Además, al examinar la relación que existe entre la infiltración y el CBR en el pavimento articulado se encontró que estas dos variables son inversamente proporcionales ya que, a mayor infiltración, menor será el porcentaje de CBR de la vía, coincidiendo con la relación establecida por Casco y Salcán (2024) para un pavimento flexible.

CAPÍTULO V. CONCLUSIONES y RECOMENDACIONES

5.1 CONCLUSIONES

Tras determinar las características físicas del pavimento articulado correspondiente a la zona oriental de la ciudad de Riobamba, se presentaron peculiaridades en las vías ya que, algunas vías no contaban con una estructura de pavimento completa, debido a que la mayoría de las zonas estudiadas únicamente contaban con adoquín y cama de arena directamente colocadas sobre la subrasante, una sola zona de estudio presentó una estructura de pavimento completa teniendo adoquín, cama de arena y base, colocadas sobre la subrasante.

Las normativas planteadas por MOP, INEN, ASTM y AASHTO sirven como un referente de las características idóneas de un pavimento en buenas condiciones. En nuestro estudio se demuestra el cumplimiento de características como la gradación y límite líquido de las subrasantes, el índice de absorción de adoquines y, parcialmente, la resistencia a la compresión de todas las zonas de estudio.

Por otra parte, se destacan algunas características que no cumplían con lo estipulado en las normativas, como la gradación requerida para las camas de arena debido a un exceso de finos.

Los valores del módulo de Young de las subrasantes son mucho más altos en comparación a otros estudios. A pesar de esto, junto con la base presentan valores inferiores al 20% y 80% respectivamente, y el grado de compactación IN SITU no llegaba al 95% en del proctor modificado ninguna zona. Estos dos últimos factores podrían deberse a la metodología empleada para la compactación de las capas y las condiciones de humedad generadas por la infiltración, ya que se presenta humedades ligeramente mayores a la óptima. Al no contar las capas con esta característica difícilmente se podrían llegar a cumplir dichos requisitos.

De acuerdo con los resultados de granulometría y clasificación SUCS, las camas de arena y las subrasantes pertenecen a un tipo de suelo SP y la base a un tipo GP. Por otro lado, se encontraron valores mayores tanto en gravedad específica como en densidad máxima seca en las camas de arena en comparación a las demás capas. Esto se debe a que esta capa debe contar con densidades mayores para asegurar un mejor sellado de juntas entre adoquines, lo que dificultaría la filtración de agua hacia el pavimento y, por ende, que el agua se dirija hacia el sistema de drenaje vial.

Las zonas 1, 2 y 6 presentaban pavimento articulado en buen estado, en especial la zona 6 ya que cuenta con una estructura de pavimento conformada por adoquín, cama de arena y base que cumple parcialmente los requerimientos de calidad. Esto, junto a los resultados de la resistencia a la compresión característica, los valores correspondientes al CBR, la gradación de las subrasantes y las densidades máximas, remarcan características físicas y mecánicas superiores a las demás zonas.

En contraste, las zonas 3, 4 y 5 presentaban pavimento articulado en mal estado, ya sea por agrietamientos superficiales o, como es el caso de la zona 4, que se destacó por no contar con cama de arena, sino únicamente adoquín colocado sobre la subrasante. En dichas zonas no se cumplió con la resistencia característica del adoquín, por otra parte, se cumplió con la gradación requerida para el mejoramiento de subrasantes.

Tras realizar los ensayos de infiltración se determinó que el coeficiente de escorrentía se encuentra dentro del rango establecido por la norma con un valor de 77.4% y está relacionado directamente con el CBR y la compactación del suelo, siendo inversamente proporcionales, demostrando que mientras más infiltración exista en las capas de árido estas sean propensas a no cumplir los requisitos normativos de compactación lo que conlleva a un deterioro temprano en la vida útil del pavimento articulado y por consiguiente al sistema de drenaje de la vía.

Uno de los factores que influyo en la infiltración es la condición de las juntas del pavimento articulado, el contar con juntas muy abiertas o con mal sellado de las mismas, facilita una mayor infiltración de agua y por ende una disminución en el coeficiente de escorrentía.

5.2 RECOMENDACIONES

Es recomendable monitorear con más rigurosidad la metodología de construcción de un pavimento articulado para un óptimo grado de compactación y la gradación de las camas de arena ya que al incumpliendo de estos dos requisitos normativos se presentaron a lo largo de toda la zona oriental de la ciudad de Riobamba, sin mencionar que se deberían utilizar todas las capas estructurales del pavimento en lugar de únicamente un mejoramiento de la subrasante.

Además, para el uso correcto del infiltrómetro se debe considerar las situaciones climáticas previamente a la realización del ensayo ya que, en caso de precipitaciones, los resultados se ven alterados por lo que hay necesidad de utilizar protección en el equipo.

Finalmente se recomienda el análisis de otras propiedades además de las físicas, mecánicas e hidráulicas para mejorar el diseño de los pavimentos articulados en la ciudad de Riobamba, ya que es frecuente observar un deterioro severo en los adoquines y juntas consecuencia de no aplicar las capas necesarias y únicamente un mejoramiento de subrasante.

BIBLIOGRAFÍA

- Angelone Silvia, & Garibay Teresa. (2006). *Permeabilidad en Suelos*.
<https://www.fceia.unr.edu.ar/geologiaygeotecnia/Permeabilidad%20en%20Suelos.pdf>
- ASTM. (2000). *ASTM_Designacion_D1241_Especificación Estándar para Materiales para Agregado de suelos, sub-base, base y capas de rodadura*.
<https://www.scribd.com/document/425772473/Astm-d-1241-Base-Sub-Base-Espanol>
- ASTM. (2001). *ASTM_Designacion_C131_Método de Ensayo Normalizado para la resistencia a la degradación de los áridos gruesos de tamaño pequeño por el método de abrasión e impacto en la maquina de Los Angeles*.
- ASTM. (2003). *ASTM_Designacion_D3385-03_Método de prueba estándar para tasa de infiltración de suelos en el campo utilizando un infiltrómetro de doble anillo*.
<https://www.scribd.com/document/458646012/Astm-D-3385-Infiltracion-Doble-Anillo-en-Espanol>
- ASTM. (2014a). *ASTM D1556-82: Standard Test Methods for determine the in-situ soil density using the sand cone method*.
https://www.academia.edu/7143593/ASTM_Designaci%C3%B3n_D1556_82_DENSIDAD_DE_CAMPO_POR_EL_METODO_DEL_CONO_DE_ARENA
- ASTM. (2014b). *ASTM D1557-07: Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Modified Effort*.
<https://ggcity.org/pdf/pw/engineering/a.s.t.m%20d1557.pdf>
- ASTM, & AASHTO. (2012). *DESGASTE DE LOS ANGELES NORMAS ASTM C-131 AASHTO T96*.
- Bojórquez, J. (2022, January 28). *Módulo de rigidez*. Módulo de Rigidez.
<http://consejoincide.com/2022/01/28/estructurando-22/>
- Bowles, J. (2013). *Manual de laboratorio de suelos en ingeniería civil*.
<https://www.slideshare.net/slideshow/manual-de-laboratorio-de-suelos-en-ingenieria-civil-joseph-e-bowles/25194156#4>
- Casco, J., & Salcán, V. (2024). *CARACTERÍSTICAS FÍSICAS, MECÁNICAS E HIDRÁULICAS EVALUADAS EN EL PAVIMENTO FLEXIBLE DEL CORREDOR VIAL FLORES - CEBADAS*. <http://dspace.unach.edu.ec/handle/51000/12872>

- Casiano, J. (2016, May 18). *Pavimentos Articulados*. Pavimentos Articulados.
<https://www.scribd.com/doc/313031828/12-Pavimentos-articulados>
- CEC, & INEN. (1992). *NORMAS PARA ESTUDIO Y DISEÑO DE SISTEMAS DE AGUA POTABLE Y DISPOSICIÓN DE AGUAS RESIDUALES PARA POBLACIONES MAYORES A 1000 HABITANTES*.
<https://dn790000.ca.archive.org/0/items/ec.cpe.5.9.1.1992/ec.cpe.5.9.1.1992.pdf>
- CivilGeeks. (2017, February 27). *Ventajas y aplicaciones de pavimentos articulados (Adoquines de concreto)*. Ventajas y Aplicaciones de Pavimentos Articulados (Adoquines de Concreto). <https://civilgeeks.com/2017/02/27/ventajas-aplicaciones-pavimentos-articulados-adoquines-concreto/>
- DGOP. (2013). *VOLUMEN N° 5 ESPECIFICACIONES TÉCNICAS GENERALES DE CONSTRUCCIÓN MANUAL DE CARRETERAS EDICIÓN 2013*.
https://www.cesmec.cl/medios/DIC/normas/MC_V5_2013.pdf
- Estela, J. (2017). *Densidad in situ (cono de arena)*.
<https://www.slideshare.net/slideshow/densidad-in-situ-cono-de-arena/79503704>
- García, A. H. (2014). *ELASTOPLASTICIDAD DE UN SUELO FRANCO ARENOSO DE SABANA SANDY LOAM SAVANNA SOIL ELASTOPLASTICITY*. 26, 153–167.
- Hassani, A., Mohammad, S., & Ghodduzi, P. (2010). Runoff infiltration through permeable block pavements. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Transport*, 163(4), 183–190. <https://doi.org/10.1680/tran.2010.163.4.183>
- Humboldt. (2010). *Humboldt GeoGauge*®. <https://www.humboldtmg.com/manuals/H-4140-man.pdf>
- Humboldt. (2010). *SOIL-FIELD Electrical Density Gauge*.
www.humboldtmg.com•1.800.544.7220•708.468.6300
- Ibañez, S., Gisbert, J., & Moreno, R. (2010). *Métodos para la determinación del coeficiente de escorrentía (c)*.
<https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/10781/Coeficiente%20de%20escorrent%20C3%ADa.pdf>
- INEC. (2022). *Resultados Principales Censo Chimborazo*.
https://www.censoecuador.gob.ec/wp-content/uploads/2023/10/Info_Chimborazo.pdf
- INEN. (1982a). *NTE INEN 0691: Límite Líquido*.
- INEN. (1982b). *NTE INEN 0692: Limite Plástico*.
<https://www.scribd.com/document/250311677/692>




- INEN. (1986a). *INEN 1485: Resistencia a la compresión de adoquines*.
<https://www.slideshare.net/slideshow/1485-44908923/44908923>
- INEN. (1986b). *NTE INEN 1488: Adoquines Requisitos*.
<https://www.slideshare.net/slideshow/1488adoquines/44908936>
- INEN. (2010a). *NTE INEN 0856: Absorción del árido fino*.
<https://www.scribd.com/document/268902509/NORMA-856-H>
- INEN. (2010b). *NTE INEN 0857: Absorción del árido grueso*.
<https://www.scribd.com/document/172633473/NORMA-857-H>
- INEN. (2011). *NTE INEN 0696: Granulometría Agregados*.
<https://www.slideshare.net/slideshow/granulometria-nte-inen-696/251239856>
- INEN. (2016). *NTE INEN 3040: Requisitos ensayos de Adoquin*.
https://vipresa.com.ec/wp-content/uploads/2019/02/nte_inen_3040.pdf
- INEN. (2010c, June). *NTE INEN 0694: Hormigones y áridos para elaborar hormigón*.
 NTE INEN 0694: Hormigones y áridos para elaborar
- Kraemer, C., Pardillo, J., Rocci, S., Romana, M., Sánchez, V., & del Val, M. (2004).
Ingeniería de Carreteras Vol II.
https://www.academia.edu/43380215/Ingenier%C3%ADa_de_Carreteras_Vol_II_Carlos_Kraemer_Jos%C3%A9_Mar%C3%ADa_Pardillo_Sandro_Rocci_Manuel_G_Romana_V%C3%ADctor_S%C3%A1nchez_Blanco_Miguel_%C3%81ngel_del_Val
- Loyola, C., Rivas, J., & Gacitúa, M. (2014). *Permeabilidad del suelo de la cuenca del río Chillán, entre Estero Peladillas y río Ñuble, Chile**.
http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S0121-215X2015000100006&script=sci_arttext
- Martínez, E. (2022). *DISEÑO DE LA ESTRUCTURA DEL PAVIMENTO FLEXIBLE DE LA VÍA PACTO-EL PARAÍSO, PERTENECIENTE A LA PARROQUIA RURAL*.
- MOP. (2002). *ESPECIFICACIONES GENERALES PARA LA CONSTRUCCION PARA LA CONSTRUCCION DE CAMINOS Y PUENTES DE CAMINOS Y PUENTES*.
- MTOP. (2013a). *NORMA ECUATORIANA VIAL NEVI-12 - MTOP Volumen N°6 Conservación Vial*. https://www.obraspublicas.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2013/12/01-12-2013_Manual_NEVI-12_VOLUMEN_6.pdf
- MTOP. (2013b). *NORMA ECUATORIANA VIAL NEVI-12 - MTOP VOLUMEN N° 3 ESPECIFICACIONES GENERALES PARA LA CONSTRUCCIÓN DE CAMINOS Y*

- PUENTES*. https://www.obraspublicas.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2013/12/01-12-2013_Manual_NEVI-12_VOLUMEN_3.pdf
- Palacios, E. (2016). *Determinación de la tasa de infiltración de los pavimentos de adoquines en el casco urbano de la ciudad de Piura*.
<https://pirhua.udep.edu.pe/backend/api/core/bitstreams/ef27ad66-5447-481a-b428-7c61f38ff89a/content>
- Realpe, G. (2019). *Desgaste superficial de adoquines: implementación y ajustes en la normativa ecuatoriana*.
<https://revistas.ucr.ac.cr/index.php/materiales/article/view/38574/41894>
- Rodríguez, A. R., Téllez, R., Paul, G., & Anguas, G. (1998). *Pavimentos Flexibles. Problemática, metodologías de diseño y tendencias*.
- Sanchez, F. (2023). ¿Qué es el CBR? *GeoTech*. <https://www.geotechtips.com/post/que-es-el-cbr>
- Spinel, S. C. (2003). *Diseño de pavimentos articulados para tráfico medio y alto*.
<https://repositorio.uniandes.edu.co/server/api/core/bitstreams/6f011213-8675-4efb-be13-9a294063ecb5/content>
- Urquiza, P. (2019). *COMPARACIÓN TÉCNICA ENTRE LOS ENSAYOS DE LABORATORIO DE MÓDULO DE YOUNG Y C.B.R PARA BASES Y SUBBASES, CASO DE ESTUDIO: CANTERA SAN JOAQUÍN (PROVINCIA DE COTOPAXI, SECTOR SANTA RITA)*.
<https://repositorio.puce.edu.ec/server/api/core/bitstreams/8321536b-6a14-4578-a373-53cb6854a562/content>

ANEXOS

 UNIVERSIDAD NACIONAL DE CHIMBORAZO FACULTAD DE INGENIERÍA CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL 			
ANEXO FOTOGRÁFICO		Nº	1
Integrantes:	Alvear Broncano Jonathan Joel Piñas Valdivieso Eduardo Francisco	Tutor:	Ing. Pazmiño Chiluitza Hernán Vladimir
		Fecha:	-
EDG		CONO DE ARENA	
			
GEOGAUGE	LÍMITE LÍQUIDO		
			
ABRASIÓN MAQUINA DE LOS ANGELES	COMPRESIÓN DE ADOQUINES		
			
INFILTRÓMETRO DE DOBLE ANILLO			
			

Anexo 1. Propiedades del pavimento articulado.

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CHIMBORAZO		FACULTAD DE INGENIERÍA		CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL		UNACH		
TIPO DE ENSAYO: ABSORCIÓN DE ADOQUINES								
Integrantes:	Alvear Broncano Jonathan Joel	Tutor:	Ing. Pazmiño Chiluiza Hernán Vladimir			N° Anexo		
	Piñas Valdivieso Eduardo	Fecha:	2/5/2024			5		
Lote	1	Ubicación:	Zona 1 , Zona 2 y Zona 3					
Tipo de adoquin:	Peatonal	Forma de adoquin	Hexagonal / Biselado					
DATOS OBTENIDOS DEL ENSAYO								
Muestra	Medidas de la muestra					Peso saturado [Kg]	Peso seco [Kg]	Absorción de agua [%]
	Arista larga [cm]	Arista corta [cm]	Ancho [cm]	Bisel [cm]	Espesor [cm]			
1	23.5	18	23.5	5	8.0	9.262	8.795	5.31%
2	23.5	18	23.5	5	8.3	9.301	8.886	4.67%
3	23	18	23	5	8.1	8.764	8.423	4.05%
4	23.5	18	23.5	5	8.3	9.331	9.049	3.12%
5	23.5	18	23.5	5	8.0	8.730	8.347	4.59%
6	23	18	23	5	7.9	8.664	8.426	2.82%
7	24	15.8	22	4	8.0	8.624	8.280	4.15%
8	23.5	18	23.5	5	8.3	8.943	8.614	3.82%
9	23.5	18	23	5	8.1	8.929	8.501	5.03%
10	23	18	23	5	8.1	8.696	8.371	3.88%
Evidencias ensayo de absorción de adoquines								
								
TIPO DE ENSAYO: COMPRESIÓN DE ADOQUINES								
Muestra	Clasificación INEN	Resistencia requerida [MPa]	Area Total [mm²]	Espesor [cm]	Factor espesor/bisel	Carga Max [N]	Resistencia a la compresión [MPa]	
1	Caminos secundarios y principales	40	48762.50	8.0	1.110	2025295	46.1026	
2		40	48762.50	8.3	1.116	2137116	47.1026	
3		40	47150.00	8.1	1.111	2012079	48.1026	
4		40	48762.50	8.3	1.116	2016794	49.1026	
5		40	48762.50	8.0	1.110	2022008	50.1026	
6		40	47150.00	7.9	1.108	2026222	51.1026	
7		40	45360.00	8.0	1.111	1975294	52.1026	
8		40	48762.50	8.3	1.118	2036509	53.1026	
9		40	48175.00	8.1	1.111	2729876	54.1026	
10		40	47150.00	8.1	1.112	2052008	55.1026	
Resistencia a la compresión promedio (fm) [MPa]		48.8657		Promedio Absorción de agua [%]		4.14		
Desviación Estandar (S) [MPa]		5.0644		Resistencia a la compresión característica (fk) [MPa]		40.5601		
Observación de Calidad		El lote de adoquines cumple satisfactoriamente la resistencia característica al ser mayor a 40 MPa y el porcentaje de absorción menor al 6% (Contrastado en NTE INEN 1488)						
Evidencias ensayo de compresión de adoquines								
								

Anexo 2. Resultados Absorción y Compresión adoquines.



UNIVERSIDAD NACIONAL DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL





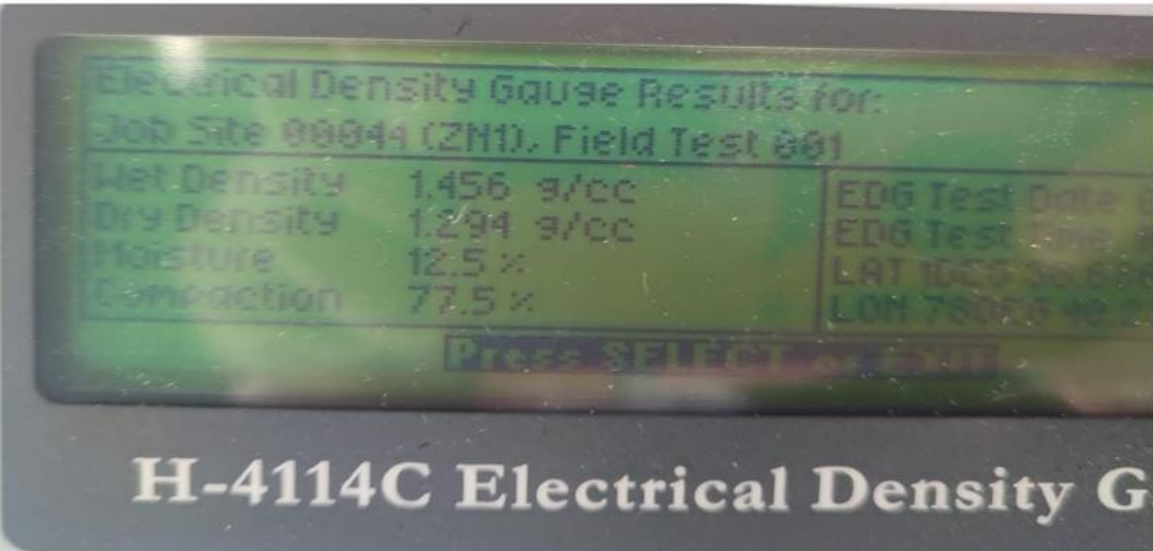
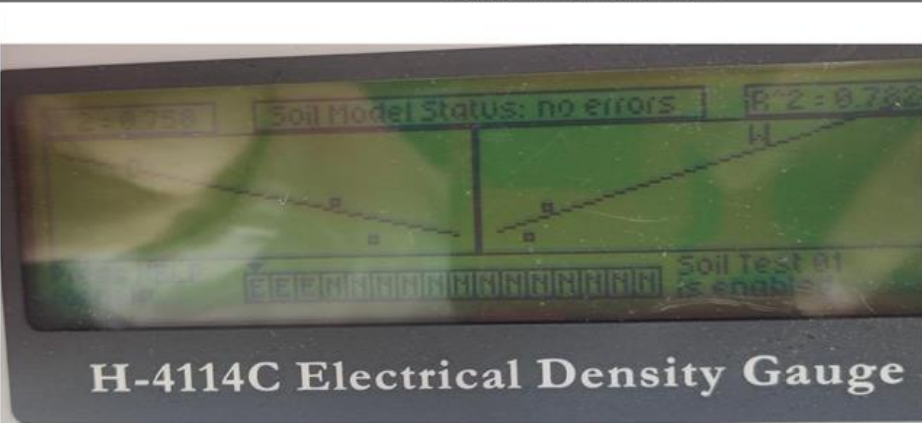
TIPO DE ENSAYO: Gravedad específica y Absorción

Integrantes:	Alvear Broncano Jonathan Joel	Tutor:	Ing. Pazmiño Chiluiza Hernán Vladimir	N° Anexo
	Piñas Valdivieso Eduardo Francisco	Fecha:	2/5/2024	
Ubicación:	Luciano Marín y Padre Orozco	Ubicación:	Luciano Marín y Padre Orozco	6
Material:	Subrasante de Pavimento articulado	Tipo de material:	Subrasante de Pavimento articulado	
DATOS PRELIMINARES DEL ENSAYO				
Masa seca al horno [g]			491	
Masa de picnómetro + agua [g]			1235	
Masa de picnómetro+ agua + muestra [g]			1550.9	
Masa en estado (SSS) [g]			500	
Masa en el horno [g]			490.3	
GRAVEDADES ESPECÍFICAS Y ABSORCIÓN				
Gravedad Específica Seca al Horno (SG SH) [-]			$SH = \frac{A}{B + S - C}$	2.667
Gravedad Específica en estado SSS (SG SSS) [-]			$SSS = \frac{S}{B + S - C}$	2.716
Gravedad Específica Aparente (SG A) [-]			$Sg = \frac{A}{B + A - C}$	2.804
Porcentaje de Absorción [%]			$\%Abs = \frac{S-A}{A} * 100$	1.98%

Anexo 3. Resultados Gravedad específica y Absorción.

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CHIMBORAZO FACULTAD DE INGENIERÍA CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL		UNACH																																																				
TIPO DE ENSAYO: GRANULOMETRÍA																																																						
Integrantes:	Alvear Broncano Jonathan Joel Piñas Valdivieso Eduardo Francisco	Tutor:	Ing. Pazmiño Chiliza Hernán Vladimir																																																			
Zona:	6	Fecha:	10/2/2024																																																			
Tipo de agregado:	Grueso	Ubicación:	Belice y Jamaica																																																			
		Tipo de material:	Base de Pavimento articulado																																																			
ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO																																																						
Tamiz ASTM ["]	Tamiz INEN [mm]	Peso retenido [g]	Porcentaje retenido [%]	Porcentaje retenido acumulado [%]	Porcentaje que pasa [%]	Límites Base Clase 2 [%]		Denominación																																														
2"	50	0	0.00	0.00	100.00	Superior	Inferior	Grava Gruesa																																														
1" 1/2"	37.5	178.3	17.93	17.93	82.07	100	70																																															
1"	25	167.1	16.81	34.74	65.26	85	55																																															
3/4"	19	75.5	7.59	42.33	57.67	75	47	Grava Fina																																														
1/2"	12.5	62.3	6.27	48.60	51.40																																																	
3/8"	9.5	9.9	1.00	49.59	50.41	65	35	Arena Gruesa																																														
No 4	4.75	197.2	19.83	69.43	30.57	55	25																																															
No 10	2	18	1.81	71.24	28.76	45	15	Arena Fina																																														
No 40	0.425	24	2.41	73.65	26.35	25	5																																															
No 100	0.15	126	12.67	86.32	13.68			Limos																																														
No 200	0.075	95	9.55	95.88	4.12	10	0																																															
Bandeja		41	4.12																																																			
RESULTADOS																																																						
Masa final seca	994.3	Porcentaje de error [%]	0.57%	Tipo:	Base Clase 2																																																	
Masa inicial seca	1000	Observación: Aceptada al no sobrepasar el 3%																																																				
CURVA GRANULOMÉTRICA																																																						
			<table border="1"> <thead> <tr> <th>Tamiz ASTM ["]</th> <th>Tamiz INEN [mm]</th> <th>Porcentaje que pasa [%]</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>2"</td><td>50</td><td>100.00</td></tr> <tr><td>1" 1/2"</td><td>37.5</td><td>82.07</td></tr> <tr><td>1"</td><td>25</td><td>65.26</td></tr> <tr><td>3/4"</td><td>19</td><td>57.67</td></tr> <tr><td>1/2"</td><td>12.5</td><td>51.40</td></tr> <tr><td>3/8"</td><td>9.5</td><td>50.41</td></tr> <tr><td>No 4</td><td>4.75</td><td>30.57</td></tr> <tr><td>No 10</td><td>2</td><td>28.76</td></tr> <tr><td>No 40</td><td>0.425</td><td>26.35</td></tr> <tr><td>No 100</td><td>0.15</td><td>13.68</td></tr> <tr><td>No 200</td><td>0.075</td><td>4.12</td></tr> <tr><td>D10</td><td></td><td>0.1304</td></tr> <tr><td>D30</td><td></td><td>3.8957</td></tr> <tr><td>D60</td><td></td><td>20.9223</td></tr> <tr><td>C. Curvatura (CC) [-]</td><td></td><td>5.56</td></tr> <tr><td>C. Uniformidad (CU)</td><td></td><td>160.43</td></tr> </tbody> </table>	Tamiz ASTM ["]	Tamiz INEN [mm]	Porcentaje que pasa [%]	2"	50	100.00	1" 1/2"	37.5	82.07	1"	25	65.26	3/4"	19	57.67	1/2"	12.5	51.40	3/8"	9.5	50.41	No 4	4.75	30.57	No 10	2	28.76	No 40	0.425	26.35	No 100	0.15	13.68	No 200	0.075	4.12	D10		0.1304	D30		3.8957	D60		20.9223	C. Curvatura (CC) [-]		5.56	C. Uniformidad (CU)		160.43
Tamiz ASTM ["]	Tamiz INEN [mm]	Porcentaje que pasa [%]																																																				
2"	50	100.00																																																				
1" 1/2"	37.5	82.07																																																				
1"	25	65.26																																																				
3/4"	19	57.67																																																				
1/2"	12.5	51.40																																																				
3/8"	9.5	50.41																																																				
No 4	4.75	30.57																																																				
No 10	2	28.76																																																				
No 40	0.425	26.35																																																				
No 100	0.15	13.68																																																				
No 200	0.075	4.12																																																				
D10		0.1304																																																				
D30		3.8957																																																				
D60		20.9223																																																				
C. Curvatura (CC) [-]		5.56																																																				
C. Uniformidad (CU)		160.43																																																				
TIPO DE ENSAYO: LÍMITES DE CONSISTENCIA																																																						
NOMBRE DE LA TARA	1v	2v	4s	14h	7r	N2																																																
PESO DE SUELO HÚMEDO + LATA [g]	24.7	25.9	28.6	22.3	26.2	27.5																																																
PESO DE SUELO SECO + LATA [g]	23	24	26	20.9	24	25																																																
PESO DE LATA [g]	14	14.9	14	14.6	14.8	14.4																																																
PESO DE SUELO SECO [g]	9	9.1	12	6.3	9.2	10.6																																																
PESO DE AGUA [g]	1.7	1.9	2.6	1.4	2.2	2.5																																																
CONTENIDO DE HUMEDAD [%]	18.89	20.88	21.67	22.22	23.91	23.58																																																
Nº DE GOLPES	13	13	8	8	5	5																																																
CURVA DE LÍMITE LÍQUIDO			<table border="1"> <thead> <tr> <th>Nº de Golpes</th> <th>W [%]</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>13</td><td>19.88%</td></tr> <tr><td>8</td><td>21.94%</td></tr> <tr><td>5</td><td>23.75%</td></tr> </tbody> </table>				Nº de Golpes	W [%]	13	19.88%	8	21.94%	5	23.75%																																								
Nº de Golpes	W [%]																																																					
13	19.88%																																																					
8	21.94%																																																					
5	23.75%																																																					
			<p>Expresión de la gráfica</p> $y = -0.04 \ln(x) + 0.3029$ <p>Límite Líquido</p> <p>17.41%</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Clasificación SUCS</th> <th>Clasificación AASTHO</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>GP</td> <td>A-1-a</td> </tr> </tbody> </table>				Clasificación SUCS	Clasificación AASTHO	GP	A-1-a																																												
Clasificación SUCS	Clasificación AASTHO																																																					
GP	A-1-a																																																					
Nota: Debido a las propiedades del material y su nula plasticidad, se realizó una extrapolación																																																						




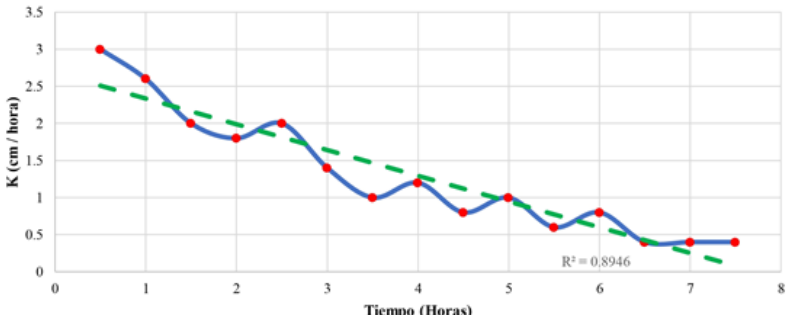
Anexo 4. Resultados Granulometría y Límites de consistencia.

		UNIVERSIDAD NACIONAL DE CHIMBORAZO FACULTAD DE INGENIERÍA CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL							
TIPO DE ENSAYO: DENSIDAD INSITU (CONO DE ARENA)									
Integrantes:	Alvear Broncano Jonathan Joel	Tutor:	Ing. Pazmiño Chiluzza Hernán Vladimir	Nº Anexo					
	Piñas Valdivieso Eduardo Francisco	Fecha:	2/5/2024	8					
Zona:	1	Ubicación:	Luciano Marin y Padre Orozco						
Tipo de agregado:	Fino	Tipo de material:	Subrasante de Pavimento articulado						
DATOS PRELIMINARES DEL ENSAYO									
Peso del cono con arena antes del ensayo (M1) [kg]		5	Peso de muestra de suelo extraído (M3) [kg]		2.78				
Peso del cono con arena después del ensayo (M2) [kg]		2.81	Densidad de arena de Otawwa [g/cm³]		1.3				
Peso del material sobrante después del ensayo (M5) [kg]		2.19	Peso de muestra seca de suelo extraído (M4) [kg]		2.47				
HUMEDAD NATURAL									
Nº de Muestra	Nombre Tara	Peso de Tara [g]	Peso Suelo H + Tara [g]	Peso Suelo S + Tara [g]	Peso Suelo Húmedo [g]	Peso Suelo Seco [g]	Porcentaje de Agua [%]	Humedad Natural [%]	Humedad Óptima Proctor [%]
1	M2	14.40	46.80	70.70	32.40	28.85	12.30%	12.55%	11.94%
2	11J	15.20	42.50	66.50	27.30	24.20	12.81%		
DENSIDADES Y GRADO DE COMPACTACIÓN									
Volumen de excavación [cm³]		1.68		Densidad húmeda in situ [g/cm³]		1.65		Densidad Máxima Proctor [%]	
Masa del suelo extraído [Kg]		2780		Densidad seca in situ [g/cm³]		1.47		1.675	
Peso de compactación [kN/cm²]		14.384							
TIPO DE ENSAYO: ENSAYO DENSIMENTO ELECTRICO (EDG)									
									
RESUMEN DE DATOS OBTENIDOS									
									
				Densidad húmeda in situ [g/cm³]					
				1.456					
				Densidad seca in situ [g/cm³]					
				1.294					
				Humedad [%]					
				12.5					
				Compatación [%]					
				77.5					
				R²					
		0.758		0.782					

Anexo 5. Resultados densidad, humedad y grado de compactación.

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CHIMBORAZO		FACULTAD DE INGENIERÍA		CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL						
TIPO DE ENSAYO: Compactación Proctor										
Integrantes:	Alvear Broncano Jonathan Joel	Tutor:	Ing. Pazmiño Chiluiza Hernán Vladimir	N° Anexo	9					
	Piñas Valdivieso Eduardo Francisco	Fecha:	20/2/2024							
Zona:	I	Ubicación:	Luciano Marín y Padre Orozco							
Tipo de agregado:	Fino	Tipo de material:	Subrasante de Pavimento articulado							
DATOS PRELIMINARES DEL CILINDRO										
Diámetro Interno del Cilindro [cm]	10.16		Volumen del Cilindro [cm³]	943.69						
Altura Interna del Cilindro [cm]	11.64		Peso del Cilindro [kg]	4.206						
DATOS DE ENSAYO										
Punto	Peso Suelo Compactado [kg]	Nombre	Peso de Tara [g]	Peso Suelo H + Tara [g]	Peso Suelo S + Tara [g]	Peso Suelo Húmedo [g]	Peso Suelo Seco [g]	Porcentaje de Agua [%]	Promedio de Agua [%]	Peso Específico Suelo C.S [g/cm³]
1	5.795	M2	14.40	72.70	70.70	58.30	56.30	3.552	3.336	1.629
		11J	15.20	68.10	66.50	52.90	51.30	3.119		
2	5.843	9J	14.40	59.60	57.20	45.20	42.80	5.607	6.038	1.636
		P3	14.40	53.90	51.50	39.50	37.10	6.469		
3	5.896	19J	14.40	54.90	51.60	40.50	37.20	8.871	8.967	1.643
		4AB	14.30	50.40	47.40	36.10	33.10	9.063		
4	5.961	20J	14.20	45.60	42.30	31.40	28.10	11.744	11.842	1.663
		M3	14.40	51.90	47.90	37.50	33.50	11.940		
5	6.032	7	14.6	55.1	49.9	40.5	35.30	14.731	15.058	1.682
		2R	14	63.5	56.9	49.5	42.90	15.385		
6	6.030	14J	15.2	64.2	56.5	49	41.30	18.644	18.387	1.633
		7J	14.6	56.3	49.9	41.7	35.30	18.130		
7	6.004	M10	14	80.3	68.3	66.3	54.30	22.099	22.183	1.559
		4J	14.50	105.10	88.60	90.60	74.10	22.267		
CALCULO DE HUMEDADES Y PESO ESPECÍFICO										
Punto	Peso Cilindro Proctor[kg]	Volumen del Cilindro Proctor [cm³]	Peso Cilindro + Suelo Compactado [kg]	Peso del Suelo Compactado [kg]	Peso Específico del Suelo Compactado Húmedo [g/cm³]					
1	4.206	943.362	5.795	1.589	1.684					
2	4.206	943.362	5.843	1.637	1.735					
3	4.206	943.362	5.896	1.690	1.791					
4	4.206	943.362	5.961	1.755	1.860					
5	4.206	943.362	6.032	1.826	1.935					
6	4.206	943.362	6.030	1.824	1.933					
7	4.206	943.362	6.004	1.798	1.905					
CURVA DE COMPACTACIÓN										
	Contenido de Agua [%]	Peso Específico Suelo Compactado Seco [g/cm³]								
	3.336	1.629								
	6.038	1.636								
	8.967	1.643								
	11.842	1.663								
	15.058	1.670								
	18.387	1.633								
	22.183	1.559								
	Expresión de la gráfica									
	$y = -8.4095x^2 + 1.9059x + 1.5606$									
Humedad Óptima [%]	11.938									
Densidad Óptima Seca [g/cm³]	1.675									
TIPO DE ENSAYO: Abrasión Máquina de los Ángeles										
Tamaño del Tamiz	Masa requerida según Gradación (g)	Masa inicial necesaria [g]	Tipo de Material	Base de pavimento articulado						
Pasa	A B C D	5.000±10	N° de esferas	12						
37.5 mm	25 mm				1250 ± 25	-	-			
25 mm	19 mm	1250 ± 25	-	-						
19 mm	12.5 mm	1250 ± 10	2500 ± 10	-						
12.5 mm	9.5 mm	1250 ± 10	2500 ± 10	-						
9.5 mm	6.3 mm	-	2500 ± 10	-						
6.3 mm	4.75 mm	-	2500 ± 10	-						
4.75 mm	2.36 mm	-	5000 ± 10	-						
Nota:	La base cuenta con gradación tipo A según la Norma ASTM D1441									

Anexo 6. Resultados ensayo Proctor y resistencia a la abrasión.

		UNIVERSIDAD NACIONAL DE CHIMBORAZO FACULTAD DE INGENIERÍA CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL			
TIPO DE ENSAYO: INFILTRACIÓN DEL PAVIMENTO IN SITU					
Integrantes:		Alvear Broncano Jonathan Joel Piñas Valdivieso Eduardo Francisco		Tutor: Ing. Pazmiño Chiluiza Hernán Vladimir	
Coordenada del punto:		ESTE: 759255 NORTE: 9817937		Fecha: 8/4/2024 Ubicación: Luciano Marin y Padre Orozco Zona: 1	
DATOS PRELIMINARES DEL ENSAYO					
Diámetro interior del Infiltrómetro [cm]:		25		Área total interna [cm²]: 490.87	
Altura Total del infiltrómetro H [cm]:		60		Volumen inicial de agua [cm³]: 29157.880	
Altura del espejo de agua inicial [cm]:		59.4			
DATOS OBTENIDOS DEL ENSAYO					
INTERVALO		TIEMPO [Hora]	h [cm]	EVIDENCIA	
-	12:24 PM	0 Horas	10		
12:24 PM	12:54 PM	1/2 Hora	11.5		
12:54 PM	1:24 PM	1/2 Hora	12.8		
1:24 PM	1:54 PM	1/2 Hora	13.8		
1:54 PM	2:24 PM	1/2 Hora	14.7		
2:24 PM	2:54 PM	1/2 Hora	15.7		
2:54 PM	3:24 PM	1/2 Hora	16.4		
3:24 PM	3:54 PM	1/2 Hora	16.9		
3:54 PM	4:24 PM	1/2 Hora	17.5		
4:24 PM	4:54 PM	1/2 Hora	17.9		
4:54 PM	5:24 PM	1/2 Hora	18.4		
5:24 PM	5:54 PM	1/2 Hora	18.7		
5:54 PM	6:24 PM	1/2 Hora	19.1		
6:24 PM	6:54 PM	1/2 Hora	19.3		
6:54 PM	7:24 PM	1/2 Hora	19.5		
7:24 PM	7:54 PM	1/2 Hora	19.7		
Observaciones		La zona de ensayo no presenta agrietamientos, no se presentó lluvia el día anterior y en la madrugada previa al día del ensayo, el infiltrómetro fue colocado a 1 m del lado derecho de la calzada.			
RESULTADOS DEL ENSAYO					
h [cm]	Delta h [cm]	Delta h acumulado [cm]	Tiempo [h]	Tiempo acumulado [h]	K [cm/h]
10	0	0	0	0	0
11.5	1.5	1.5	0.5	0.5	3
12.8	1.3	2.8	0.5	1	2.6
13.8	1	3.8	0.5	1.5	2
14.7	0.9	4.7	0.5	2	1.8
15.7	1	5.7	0.5	2.5	2
16.4	0.7	6.4	0.5	3	1.4
16.9	0.5	6.9	0.5	3.5	1
17.5	0.6	7.5	0.5	4	1.2
17.9	0.4	7.9	0.5	4.5	0.8
18.4	0.5	8.4	0.5	5	1
18.7	0.3	8.7	0.5	5.5	0.6
19.1	0.4	9.1	0.5	6	0.8
19.3	0.2	9.3	0.5	6.5	0.4
19.5	0.2	9.5	0.5	7	0.4
19.7	0.2	9.7	0.5	7.5	0.4
Sumatoria delta h [cm]:		9.7		Fracción de infiltración [%]: 19.40%	
Volumen de Infiltración [cm³]:		4761.47		Coefficiente de escurrimiento C [%]: 80.60%	
CURVA DE INFILTRACIÓN					
CURVA DE INFILTRACIÓN PUNTO 1					
					

Anexo 7. Resultados Infiltración del pavimento.

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CHIMBORAZO		FACULTAD DE INGENIERÍA		CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL		RESUMEN DE PROPIEDADES FÍSICAS, MECÁNICAS E HIDRÁULICAS DEL PAVIMENTO ARTICULADO		N°	11
Integrantes:		Alvear Broncano Jonathan Joel Piñas Valdivieso Eduardo Francisco		Tutor: Fecha:		Ing. Pazmiño Chiluiza Hernán Vladimír 8/4/2024			
RESUMEN DE RESULTADOS OBTENIDOS									
CONDICIONES DEL PAVIMENTO			Buenas Condiciones	Buenas Condiciones	Malas Condiciones	Malas Condiciones	Malas Condiciones	Buenas Condiciones	
VARIABLES	UNIDADES	CAPAS DEL PAVIMENTO	Z1	Z2	Z3	Z4	Z5	Z6	PROMEDIO
1	C	[-]	0.754	0.806	0.770	0.798	0.764	0.754	0.774
2	Módulo de Young Base	[MPa]						52.455	52.455
3	Módulo de Young Subrasante		39.530	65.285	52.895	55.910	52.030	35.010	50.110
7	CBR Base	[%]						9.683	9.683
7	CBR Subrasante		6.636	13.067	9.794	10.568	9.581	5.580	9.204
10	Densidad Natural EDG	[g/cm³]						1.560	1.560
10			1.290	1.300	1.050	1.070	1.280	1.100	1.182
13	Densidad Natural Cono de Arena	[g/cm³]						1.320	1.320
13			1.470	1.350	1.230	1.210	1.270	1.230	1.293
16	Densidad Óptima Proctor	[g/cm³]						1.790	1.720
16			1.670	1.750	1.740	1.750	1.790	1.650	1.720
16			1.670	1.750	1.740	1.750	1.790	1.650	1.725
19	Humedad Óptima	[%]						9.39%	9.39%
19			11.94%	13.10%	11.17%	12.89%	12.30%	14.72%	12.69%
22	Grado de Compactación	[%]						87.30%	87.30%
22			87.23%	75.84%	69.14%	67.90%	69.58%	71.45%	73.52%
26	% Gravas Gruesas	[%]						34.738%	34.74%
26			2.119%	1.003%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.52%
29	% Gravas Finas	[%]						14.855%	14.86%
29			3.633%	3.900%	4.609%	0.000%	4.309%	1.603%	3.01%
32	% Arenas Gruesas	[%]						21.643%	21.64%
32			8.981%	11.268%	5.311%	35.306%	12.826%	11.022%	14.12%
35	% Arenas Finas	[%]						21.643%	21.64%
35			56.004%	60.451%	52.405%	41.625%	49.499%	48.497%	51.41%
38	% de Material Fino	[%]						13.670%	13.67%
38			29.263%	23.378%	37.675%	23.069%	33.367%	38.88%	30.94%

Anexo 8. Características del pavimento articulado.