



UNIVERSIDAD NACIONAL DE CHIMBORAZO

FACULTAD DE INGENIERÍA

CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

Características físico–mecánicas e hidráulicas del pavimento rígido valoradas con equipos eléctricos en la Av. Edelberto Bonilla Oleas en Riobamba

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

Autores:

Arevalo Morales Evelyn Anabel

Maila Conforme Elías David

Tutor:

Ing. Hernán Vladimir Pazmiño Chiluiza, MSc.

Riobamba, Ecuador. 2025

DECLARATORIA DE AUTORÍA

Nosotros, **Evelyn Anabel Arevalo Morales**, con cédula de ciudadanía **060475592-6**, y **Elias David Maila Conforme**, con cédula de ciudadanía **172312645-2**, autoras del trabajo de investigación titulado: "**Características físico-mecánicas e hidráulicas del pavimento rígido valoradas con equipos eléctricos en la Av. Edelberto Bonilla Oleas en 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 autora de la obra referida será de mí entera responsabilidad; librando a la Universidad Nacional de Chimborazo de posibles obligaciones.

En Riobamba, 30 de enero del 2025.



Evelyn Anabel Arevalo Morales
ESTUDIANTE
C.I: 060475592-6

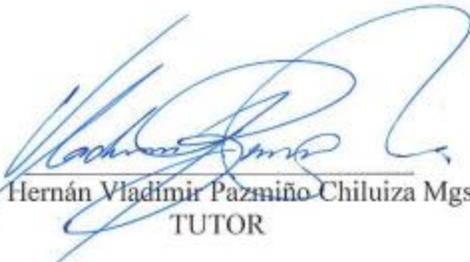


Elias David Maila Conforme
ESTUDIANTE
C.I: 172312645-2

DICTAMEN FAVORABLE DEL PROFESOR TUTOR

Quien suscribe, **Ing. Hernán Vladimir Pazmiño Chiluiza Mgs**, catedrático adscrito a la Facultad Ingeniería, por medio del presente documento certifico haber asesorado y revisado el desarrollo del trabajo de investigación titulado: " **Características físico-mecánicas e hidráulicas del pavimento rígido valoradas con equipos eléctricos en la Av. Edelberto Bonilla Oleas en Riobamba**", bajo la autoría **Evelyn Anabel Arévalo Morales** y **Elías David Maila Conforme**; 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 24 días del mes de Enero de 2025



Ing. Hernán Vladimir Pazmiño Chiluiza 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 rígido valoradas con equipos eléctricos en la Av. Edelberto Bonilla Oleas en Riobamba", presentado por Evelyn Anabel Arévalo Morales con CC: 0604755926 y Elías David Maila Conforme con CC: 1723126452, bajo la tutoría de Ing. Hernán Vladimir Pazmiño Chiluiza Mgs.; 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 30 de enero del 2025.

Ing. Carlos Sebastián Saldaña García, Mgs
PRESIDENTE DEL TRIBUNAL DE GRADO



Ing. César Augusto Mora Cabrera, Mgs
MIEMBRO DEL TRIBUNAL DE GRADO



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





DIRECCIÓN ACADÉMICA
VICERRECTORADO ACADÉMICO



UNACH-RGF-01-04-02.20

CERTIFICACIÓN

Que, **Evelyn Anabel Arévalo Morales** con CC: 0604755926 y **Elías David Mailla Conforme** con CC: 1723126452, estudiantes de la Carrera de **INGENIERÍA CIVIL**, Facultad de **INGENIERÍA**; ha trabajado bajo mi tutoría el trabajo de investigación titulado "**CARACTERÍSTICAS FÍSICO-MECÁNICAS E HIDRÁULICAS DEL PAVIMENTO RÍGIDO VALORADAS CON EQUIPOS ELÉCTRICOS EN LA AV. EDELBERTO BONILLA OLEAS EN RIOBAMBA**", que corresponde al dominio científico **DESARROLLO TERRITORIAL - PRODUCTIVO Y HÁBITAT SUSTENTABLE PARA MEJORAR LA CALIDAD DE VIDA** y alineado a la línea de investigación **INGENIERÍA, CONSTRUCCIÓN, INDUSTRIA Y PRODUCCIÓN**, cumple con el 6%, reportado en el sistema Anti plagio COMPILATIO, porcentaje aceptado de acuerdo a la reglamentación institucional, por consiguiente autorizo continuar con el proceso.

Riobamba, 24 de enero de 2025



Ing. Hernán Vladimir Pazmiño-Chilujza Mgs.
TUTOR

DEDICATORIA

A Dios, a mis padres Edmundo Arevalo Flores y Mayra Morales Rodríguez, a mis hermanos Erick Arevalo Morales y Keyli Arevalo Morales, a mis queridos sobrinos Erick Arevalo Ocaña y Cristofer Arevalo Ocaña y demás familiares, cuyo cariño, aliento y apoyo constante me impulsaron a seguir adelante en los momentos difíciles. Su presencia fue un refugio y fuente de alegría en este proceso. A Park Jimin, cuya música y palabras fueron una constante fuente de inspiración y motivación en mi camino. Esta tesis esta dedicada a todos ustedes, con infinito amor y agradecimiento.

Evelyn A. Arevalo M.

Primeramente, agradezco a Dios, cuya guía y fortaleza han sido fundamentales en cada paso de mi camino, brindándome sabiduría y perseverancia para alcanzar mis metas.

A mis padres, David Maila y Francelina Conforme, por su amor incondicional, apoyo y sacrificio. Su esfuerzo y dedicación han sido el pilar que me ha impulsado a seguir adelante, incluso en los momentos más desafiantes.

A mis hermanos, Nohemi Maila y Matías Maila, por ser mi compañía constante, mi inspiración y mi refugio en este proceso universitario. Su aliento y confianza en mí han sido un motor esencial en mi crecimiento.

A mis amigos y familiares cercanos, quienes han compartido conmigo este recorrido, brindándome su apoyo en cada etapa. Gracias por estar a mi lado, por celebrar mis logros y por sostenerme en las dificultades, creando juntos recuerdos invaluable.

A todos ustedes, mi más profundo agradecimiento.

Elias D. Maila C.

AGRADECIMIENTO

Culminar esta etapa académica representa un logro invaluable en mi vida, y no hubiera sido posible sin el apoyo y guía de personas fundamentales. Por ello, deseo expresar mi más sincero agradecimiento a quienes hicieron posible este sueño. En primer lugar, agradezco a Dios por su luz y fortaleza en cada paso de este camino. Su presencia fue mi mayor inspiración y motivación para superar los desafíos y alcanzar esta meta. A mis padres, cuyo amor incondicional, sacrificio y ejemplo de perseverancia fueron el cimiento de mi formación. Gracias por inculcarme valores y enseñarme a soñar en grande. A mis hermanos, sobrinos y demás familiares, cuyo cariño, aliento y apoyo constante me impulsaron a seguir adelante en los momentos difíciles. A la Universidad Nacional de Chimborazo, por abrirme sus puertas y brindarme una formación de calidad. A mis tutores, Ing. Vladimir Pazmiño Mgs. y Ing. Alfonso Arellano PhD, por su dedicación, paciencia y sabiduría. Su guía experta fue fundamental para el desarrollo de esta tesis. Agradezco su tiempo, consejos y apoyo incondicional. Finalmente, quiero agradecer a todas aquellas personas que, de una u otra forma, contribuyeron a la realización de este proyecto. Sus palabras de aliento, gestos de apoyo y compañía fueron un impulso invaluable. Este logro es el resultado del esfuerzo conjunto de muchas personas, a quienes estaré eternamente agradecido.

Evelyn A. Arevalo M.

Cada reto superado representa un paso más hacia el crecimiento personal y profesional. A lo largo de este camino, la perseverancia y el apoyo incondicional han sido clave para alcanzar cada meta propuesta.

A Dios, por brindarme fortaleza y sabiduría en los momentos de incertidumbre, iluminando siempre el camino correcto. A mi familia, cuyo respaldo y cariño han sido el motor que me ha impulsado a seguir adelante. A mis amigos y seres cercanos, por su compañía, aliento y por compartir cada etapa de este proceso, tanto en los momentos de esfuerzo como en los de celebración.

A la Universidad Nacional de Chimborazo y a la Escuela de Ingeniería Civil, por contribuir a mi formación con conocimiento y valores fundamentales.

A mis tutores, Ing. Vladimir Pazmiño Mgs. e Ing. Alfonso Arellano PhD, por su guía, paciencia y dedicación, cuya orientación ha sido clave en la culminación de este trabajo.

¡Gracias a todos!

Elias D. Maila C.

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

TABLA DE ACRONIMOS

RESUMEN

ABSTRACT

CAPÍTULO I.....	18
1. INTRODUCCIÓN	18
1.1 Zona de estudio	19
1.2 Planteamiento del problema	19
1.3 Justificación.....	20
1.4 Objetivos	21
1.4.1 Objetivo General	21
1.4.2 Objetivos Específicos.....	21
CAPÍTULO II.	22
2. MARCO TEÓRICO.....	22

2.1.	Pavimento rígido.....	22
2.1.1.	Generalidades.....	22
2.1.2.	Definición.....	22
2.1.3.	Capas que conforman un pavimento rígido	22
2.2.	Características Físicas del Pavimento rígido.....	22
2.2.1.	Tamizaje.....	22
2.2.2.	Clasificación de subbases de agregados.....	23
2.2.3.	Límites de Atterberg	24
2.2.4.	Clasificación de suelos.....	24
2.2.5.	Densidad y absorción.....	25
2.2.6.	Densidad de capas del pavimento	26
2.2.7.	Proctor.....	26
2.2.8.	Cono de Arena.....	28
2.2.9.	Espesor del Pavimento	28
2.2.10.	Ensayo de Abrasión (Máquina de los Ángeles).....	29
2.2.11.	Grado de compactación.....	29
2.3.	Características Mecánicas del Pavimento rígido.....	30
2.3.1.	Macrotextura	30
2.4.	Equipos Eléctricos	31
2.4.1.	GEOGAUGE	31
2.4.2.	Densímetro eléctrico EDG.....	33
2.5.	Características Hidráulicas del Pavimento Rígido	34
2.5.1.	Drenaje Superficial y Subsuperficial	34
2.5.2.	Infiltración del Suelo.....	35
2.5.3.	Coefficiente de escurrimiento.....	36

2.5.4.	Velocidad de infiltración.....	36
2.5.5.	Humedad Óptima	36
CAPÍTULO III.....		38
3.	METODOLOGÍA.....	38
3.1.	Definición de la muestra.....	39
3.1.1.	Población.....	39
3.1.2.	Muestra.....	39
3.2.	Criterios de evaluación	39
3.3.	Técnicas de recolección de datos.....	40
3.4.	Ensayos en laboratorio.....	41
3.4.1.	Granulometría de agregados	41
3.4.2.	Límites de Atterberg	41
3.4.3.	Densidad y absorción de agregados finos	41
3.4.4.	Densidad y absorción de agregados gruesos.....	41
3.4.5.	Ensayo de Abrasión.....	41
3.4.6.	Ensayo Proctor Estándar	42
3.4.7.	Ensayo Proctor Modificado.....	42
3.5.	Ensayos in situ.....	42
3.5.1.	Mancha de Arena	42
3.5.2.	CBR in situ con el equipo electro-mecánico.....	42
3.5.3.	Cono de Arena.....	42
3.5.4.	Densidad y Grado de Compactación.....	43
3.5.5.	Infiltrómetro	43
CAPÍTULO IV.....		46
4.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	46

4.1.	RESULTADOS CARACTERÍSTICAS FÍSICAS	46
4.1.1.	Ensayo de Granulometría.....	46
4.1.2.	Ensayo de Límite Líquido y Plástico	51
4.1.3.	Ensayo de Densidad y Absorción	52
4.1.4.	Ensayo Proctor	54
4.1.5.	Ensayo Espesor del Pavimento Rígido	55
4.1.6.	Ensayo de Abrasión (Máquina de los Ángeles).....	56
4.1.7.	Ensayo de grado de compactación	56
4.2.	RESULTADOS CARACTERÍSTICAS MECÁNICAS	58
4.2.1.	Ensayo Geo Gauge.....	58
4.2.2.	Macrotextura	60
4.3.	RESULTADOS CARACTERÍSTICAS HIDRÁULICAS.....	61
4.3.1.	Curvas de Infiltración.....	64
4.4.	Relación entre las propiedades físico-mecánicas con las hidráulicas.....	66
4.4.1.	Relación infiltración vs grado de compactación	67
4.4.2.	Relación infiltración vs Módulo de rigidez.....	68
CAPÍTULO V.		69
5.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	69
5.1.	Conclusiones.....	69
5.2.	Recomendaciones	71
BIBLIOGRAFÍA		72
ANEXOS		77

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.	Análisis Granulométrico de la Subbase Clase 2	46
-----------------	---	----

Tabla 2. Análisis Granulométrico de la Subrasante	48
Tabla 3. Determinación de Límites de Consistencia (Líquido y Plástico).....	51
Tabla 4. Densidad y Absorción de Agregados para Subbase	52
Tabla 5. Densidad y Absorción de Agregados para Subrasante	53
Tabla 6. Humedad optima y densidad seca en Subrasante y Sub base	54
Tabla 7. Espesores del Pavimento Rígido.....	55
Tabla 8. Abrasión con Máquina de los Ángeles	56
Tabla 9. Grado de Compactación (EDG).....	56
Tabla 10. Grado de Compactación (Cono de Arena).....	57
Tabla 11. Rigidez, Elasticidad y Cálculo del CBR de la Subrasante.....	58
Tabla 12. Propiedades Mecánicas y Cálculo del CBR de la Subbase.....	59
Tabla 13. Círculo de arena	60
Tabla 14. Infiltración con el instrumento de doble anillo	61
Tabla 15. Análisis de Fragmento de Infiltración y Coeficiente de Escorrentía.	61
Tabla 16: Relación infiltración y grado de compactación (Subbase)	67
Tabla 17: Relación infiltración y Módulo de rigidez (Subbase).....	68

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Zona de Estudio: Avenida Edelberto Bonilla Oleas, Riobamba.....	19
Figura 2: Tabla de límites para la clasificación de subbases.....	23
Figura 3: Esquema metodológico	38
Figura 4: Esquema de infiltrómetro de doble anillo.....	44
Figura 5: Burlete de caucho.....	44
Figura 6: Sellado de silicona	45
Figura 7: Vista lateral del infiltrómetro.....	45
Figura 8: Curva Granulométrica de la Subrasante.....	50
Figura 9: Curva Granulométrica de la Sub Base	50
Figura 10: Comparación de Coeficientes de Escorrentía para Diferentes Superficies.....	63
Figura 11: Curva comparativa de infiltración.....	64
Figura 12: Relación del Grado de Compactación, CBR y Porcentaje de Infiltración (Subbase).....	66
Figura 13: Relación de infiltración y grado de compactación de la subbase	67
Figura 14: Relación infiltración y módulo de rigidez (Subbase).....	68

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1. Recolección de muestras en la Av. Edelberto Bonilla Oleas	77
Anexo 2. Análisis granulométrico por tamizaje subbase.....	77
Anexo 3. Límite plástico para la subbase (No posee)	77
Anexo 4. Ensayo densidad de gruesos de la subbase	77
Anexo 5. Ensayo densidad de finos de la subbase.....	77
Anexo 6. Ensayo límite líquido con copa de Casagrande	77
Anexo 7. Ensayo de Proctor Modificado Subbase tipo 2	78
Anexo 8. Ensayo Proctor Estándar Subrasante.....	78
Anexo 9. Ensayo de abrasión en Máquina de los Ángeles	78
Anexo 10. Ensayo cono de arena, densidad in situ.....	78
Anexo 11. Ensayo con densímetro eléctrico (EDG).....	78
Anexo 12. Ensayo con el Geo Gauge	78
Anexo 13. Ensayo de Macrotextura.....	79
Anexo 14. Ensayo del infiltrómetro de doble anillo.....	79
Anexo 15. Comparación de densidades obtenidas del ensayo de cono de arena y el densímetro eléctrico.....	80
Anexo 16. Tabulación del ensayo del infiltrómetro de doble anillo.....	81
Anexo 17. Tabulación de Proctor Estándar de las subrasantes	82
Anexo 18. Tabulación de Proctor Modificado de las subbases	83

TABLA DE ACRONIMOS

TPDA= Trafico promedio diario anual.

MTOP= Ministerio de Transporte y Obras Públicas del Ecuador.

C: Coeficiente de escurrimiento.

NTE INEN: Norma Técnica Ecuatoriana – Instituto Ecuatoriano de Normalización

ASTM: American Society for Testing and Materials, traducido al español como la Sociedad Americana para Pruebas y Materiales.

SUCS: Sistema Unificado de Clasificación de Suelos.

AASHTO: American Association of State Highway and Transportation Officials, traducido al español como la Asociación Americana de Oficiales de Carreteras Estatales y Transportes.

K= Velocidad de infiltración.

LL= Limite Liquido.

LP= Límite plástico.

EDG= Electrical Density Gauge, traducido al español como densímetro eléctrico.

Cu= Coeficiente de uniformidad.

Cc= Coeficiente de curvatura.

GEOGAUGE= Traducido al español como geo medidor.

FIT= Factor de precisión global de la curva

SSS= Saturado Superficialmente Seco

MTD= Promedio de la profundidad de la macrotextura del pavimento

RESUMEN

El envejecimiento de los sistemas viales, causado por la falta de mantenimiento preventivo adecuado, se refleja en el deterioro de pavimentos, afectando su funcionalidad y la seguridad vial. El pavimento rígido, aunque resistente a condiciones extremas, también se degrada con el tiempo debido a factores como la calidad de los materiales, el diseño estructural y los cambios climáticos. Esta investigación se centra en el análisis del pavimento rígido de la Avenida Edelberto Bonilla Oleas, con el objetivo de determinar las características físico-mecánicas e hidráulicas del pavimento para establecer relaciones entre estas propiedades. A través de una combinación de pruebas de laboratorio y mediciones in situ, se evaluaron estas características del pavimento. Los resultados revelaron que, si bien los materiales empleados cumplen con las especificaciones técnicas, existen deficiencias en la compactación de las capas inferiores del pavimento ya que no alcanzan el 95% requerido, lo que afecta la capacidad portante. Además, los valores de CBR muestran una calidad variable del material, mientras que el ensayo del infiltrómetro en pavimento en buen estado indicó coeficientes de escorrentía superiores al 99%, confirmando su baja permeabilidad, demostraron que el pavimento es prácticamente impermeable, lo que puede generar problemas de acumulación de agua y acelerar su deterioro. Los hallazgos de esta investigación son relevantes para la planificación de acciones de mantenimiento y rehabilitación de la infraestructura vial, comprender mejor las propiedades del pavimento y las causas de su deterioro, es posible diseñar soluciones más eficientes y duraderas.

Palabras clave: pavimento rígido, pruebas de laboratorio, mediciones in situ, características físicas, mecánicas e hidráulicas, compactación, infiltrómetro

Abstract

The aging of road systems, caused by the lack of proper preventive maintenance, is reflected in the deterioration of pavements, affecting their functionality and road safety. Although resistant to extreme conditions, rigid pavements also degrade over time due to material quality, structural design, and climatic changes. This research focuses on analyzing the rigid pavement of Avenida Edelberto Bonilla Oleas, aiming to determine the physical-mechanical and hydraulic characteristics of the pavement to establish relationships between these properties. Laboratory tests and on-site measurements were used to evaluate these pavement characteristics. The results revealed that, while the materials used meet the technical specifications, there are deficiencies in the compaction of the lower pavement layers, as they do not reach the required 95%, which affects the load-bearing capacity. Furthermore, the CBR values indicated variable material quality, while the nitrometer test on well-maintained pavement showed runoff coefficients more significant than 99%, confirming its low permeability. This demonstrated that the pavement is nearly impermeable, which can cause water accumulation problems and accelerate its deterioration. The findings of this research are relevant for planning maintenance and rehabilitation actions for road infrastructure. By gaining a better understanding of the pavement's properties and the causes of its deterioration, it is possible to design more efficient and durable solutions.

Keywords: Rigid pavement, laboratory tests, on-site measurements, physical characteristics, mechanical characteristics, hydraulic characteristics, compaction, infiltrometer



Reviewed by:
Mgs. Vanessa Palacios
ENGLISH PROFESSOR
C.C. 0603247487

CAPÍTULO I.

1. INTRODUCCIÓN

La infraestructura vial en las ciudades constituye un eje fundamental para la movilidad urbana, facilitando el desarrollo económico y social al conectar diferentes sectores de la población. Estas vías son esenciales no solo para el transporte de personas y mercancías, sino también para fortalecer la integración entre áreas residenciales, comerciales e industriales. En este contexto, los pavimentos, como elementos estructurales de estas infraestructuras, desempeñan un papel central en garantizar un tránsito seguro y eficiente. Aunque los pavimentos rígidos, construidos principalmente con hormigón hidráulico, ofrecen una alta capacidad de soporte y una durabilidad superior, su diseño y mantenimiento adecuado son determinantes para cumplir con las exigencias de las ciudades modernas.

En muchas ciudades de América Latina, el envejecimiento de los sistemas viales es una problemática recurrente, generada por la falta de intervenciones oportunas y un mantenimiento preventivo insuficiente. Este desgaste se refleja principalmente en el deterioro de los pavimentos, incluyendo fisuras, grietas y desgaste superficial, que afectan negativamente la funcionalidad de las vías y la seguridad de los usuarios. El pavimento rígido, aunque es más resistente al tráfico pesado y a las condiciones climáticas extremas, no es inmune al paso del tiempo. Factores como la calidad de los materiales, el diseño estructural y la exposición a cambios climáticos contribuyen a su degradación, lo que subraya la importancia de implementar estrategias para medir el cambio de estas propiedades iniciales con el tiempo, para este tipo de infraestructuras.

En Riobamba, la Avenida Edelberto Bonilla Oleas constituye un nodo estratégico en la red vial de la ciudad, conectando áreas clave para el desarrollo urbano. Sin embargo, esta vía presenta signos evidentes de deterioro, como fisuras en el pavimento que evolucionan en grietas más profundas y desgaste en la capa superficial. Estos problemas, comunes en pavimentos rígidos, se incrementan por el tráfico constante y la influencia de factores climáticos, como la lluvia y las variaciones de temperatura. La estructura rígida del pavimento, diseñada para soportar grandes cargas y distribuir tensiones, comienza a mostrar limitaciones debido al daño acumulado, afectando su capacidad funcional y la seguridad de quienes transitan por ella.

El análisis del pavimento rígido en la Avenida Edelberto Bonilla Oleas busca establecer una comprensión integral de su estado actual, combinando pruebas de laboratorio y mediciones en el lugar. Los objetivos de esta investigación incluyen determinar las características físicas, mecánicas e hidráulicas del pavimento rígido, esto permitirá comprender como se encuentran relacionadas estas propiedades entre sí, proporcionando bases técnicas para la planificación de acciones correctivas y preventivas. Estas conclusiones son fundamentales para garantizar una infraestructura vial que soporte adecuadamente las demandas del tráfico urbano y las condiciones climáticas específicas de Riobamba.

1.1 Zona de estudio

Figura 1: Zona de Estudio: Avenida Edelberto Bonilla Oleas, Riobamba



Fuente: Elaboración propia

La Av. Edelberto Bonilla Oleas, situada en Riobamba y Av Pedro Vicente Maldonado, conforman una vía de gran importancia en la ciudad gracias a su papel de ruta principal para la vinculación de diversas áreas residenciales y comerciales. De acuerdo con la imagen mostrada, esta avenida está circundada por una densidad urbana, con construcciones de naturaleza residencial y algunos espacios abiertos que indican posibles usos de tipo recreativo o institucional. Este ambiente produce una dinámica específica que afecta las condiciones del asfalto, además de los patrones de tráfico y drenaje. La avenida, de diseño lineal, une varios sectores estratégicos, favoreciendo el desplazamiento de vehículos y peatones. Sus cruces con calles secundarias señalan su función esencial en la red de vías de Riobamba, actuando como una vía principal que acoge un gran volumen de tráfico, ya sea de carácter ligero o pesado.

1.2 Planteamiento del problema

La gestión del agua superficial en pavimentos rígidos es esencial para la seguridad vial y la durabilidad de la infraestructura. Aunque los pavimentos rígidos suelen ser impermeables, la

acumulación de agua durante lluvias genera problemas como charcos, deterioro de la superficie y riesgos de aquaplaning, afectando la seguridad vial (Autroads, 2009).

En Riobamba, la Avenida Edelberto Bonilla Oleas, con un TPDA de 32,569 vehículos mixtos por día (Orozco & Riera, 2022), es clave para la conectividad y la movilidad urbana. Sin embargo, enfrenta desafíos por lluvias de 1200 mm/año (Weather Atlas, 2024), lo que acelera el desgaste del pavimento y aumenta costos de mantenimiento, que pueden subir un 30% por problemas de agua.

Abordar este problema requiere evaluar las propiedades físico-mecánicas del pavimento, modernizar normativas y diseñar estrategias basadas en investigaciones recientes. Una gestión adecuada del agua superficial en vías como esta avenida es crucial para garantizar la seguridad, reducir costos de mantenimiento y extender la vida útil de la infraestructura.

El crecimiento urbano acelerado está cambiando las condiciones de infiltración y escurrimiento de los territorios y además provoca modificaciones del ciclo hidráulico. Esto afecta a los acuíferos, y además al incremento de aluviones. El acelerado crecimiento urbano está transformando radicalmente nuestros paisajes, con consecuencias directas sobre el ciclo del agua. La creciente impermeabilización del suelo, producto de la urbanización, reduce drásticamente la capacidad de infiltración de las precipitaciones, lo que a su vez incrementa la escorrentía superficial y disminuye la recarga de acuíferos. Estos cambios alteran los patrones de drenaje naturales, incrementando el riesgo de inundaciones y erosiones, y comprometen la calidad de las aguas superficiales debido a la contaminación urbana. Además, la mayor frecuencia e intensidad de eventos climáticos extremos, exacerbados por el cambio climático, agravan estos problemas (López Moreno, 2023).

1.3 Justificación

En Ecuador, la actualización de normativas para pavimentos rígidos, como las especificaciones de la Norma Ecuatoriana Vial, podría beneficiarse de investigaciones locales. Esto permitiría diseñar soluciones ajustadas a las condiciones específicas de cada región, optimizando el uso de recursos públicos y mejorando la capacidad de la infraestructura para enfrentar retos climáticos y de uso intensivo. Este tipo de estudios no solo atiende necesidades locales, sino que puede ser un modelo para otras ciudades con condiciones similares, promoviendo un enfoque integral y sostenible en la gestión de pavimentos.

El análisis de las propiedades físicas, mecánicas e hidráulicas de los pavimentos rígidos en la ciudad de Riobamba permitirá contrastar los resultados obtenidos con las normativas vigentes y además optimizar el diseño de los componentes viales según las condiciones locales. Evaluar estas características, tanto en campo como en laboratorio mediante equipos manuales y eléctricos, es esencial para entender cómo la textura y porosidad del pavimento influyen en el flujo del agua hacia los sistemas de drenaje, evitando problemas como acumulaciones superficiales. Este estudio,

aplicado a casos como la Avenida Edelberto Bonilla Oleas, busca garantizar soluciones ajustadas a las necesidades específicas de la zona.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo General

- Determinar las características físicas, mecánicas e hidráulicas del pavimento rígido en la Av. Edelberto Bonilla Oleas ubicada en la ciudad de Riobamba, utilizando equipos eléctricos y análisis en laboratorio, para determinar su estado actual.

1.4.2 Objetivos Específicos

- Caracterizar las propiedades físicas de las capas del pavimento rígido mediante muestreo y análisis de laboratorio.
- Evaluar las propiedades mecánicas e hidráulicas del pavimento rígido in situ mediante equipos eléctricos.
- Establecer la relación entre las propiedades físico-mecánicas y el comportamiento hidráulico del pavimento rígido en la Av. Edelberto Bonilla Oleas.

CAPÍTULO II.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Pavimento rígido

2.1.1. Generalidades

Los pavimentos de hormigón convencional son aquellos construidos con hormigón simple o reforzado, diseñados con juntas específicas para controlar el comportamiento del material frente a tensiones y esfuerzos. Este término abarca tres categorías principales: pavimentos de hormigón simple con juntas, pavimentos reforzados con juntas y pavimentos reforzados de forma continua, excluyendo otros tipos de pavimentos. Son comúnmente utilizados como capas superpuestas, siendo las capas con juntas simples las más frecuentes. Su diseño y el detalle de las juntas son aspectos críticos para garantizar su funcionalidad y durabilidad (Norbert Delatte, 2008).

2.1.2. Definición

El pavimento rígido es una estructura vial compuesta por losas de concreto hidráulico que distribuyen las cargas vehiculares a la subbase o subrasante con mínima deformación, gracias a su alta resistencia a la compresión y flexión. Es ideal para carreteras de alto tráfico y superficies industriales debido a su durabilidad y capacidad de soportar cargas pesadas. Su diseño considera juntas de expansión y contracción para evitar fisuras, mientras que factores como la calidad de los materiales y un adecuado diseño estructural son determinantes para su desempeño y vida útil.

2.1.3. Capas que conforman un pavimento rígido

Los pavimentos rígidos están diseñados con una estructura en capas, donde la losa de concreto de cemento portland actúa como el elemento principal de soporte. Esta losa descansa sobre una capa base compuesta por grava, que distribuye las cargas hacia una subrasante conformada por suelo compactado. La interacción de estas capas permite una adecuada transferencia de esfuerzos, aunque la resistencia estructural del sistema depende fundamentalmente de la capacidad de la losa de concreto para soportar las tensiones generadas por el tránsito y las condiciones ambientales (Giordani & Leone Diego, 2019).

2.2. Características Físicas del Pavimento rígido

2.2.1. Tamizaje

El ensayo de tamizaje es una técnica utilizada para determinar la distribución del tamaño de partículas en materiales granulares como arena y grava. Consiste en pasar una muestra del material a través de una serie de tamices de diferentes tamaños de malla. Estos tamices se agitan mecánicamente para separar las partículas según su tamaño. Luego, se pesa el material retenido en cada tamiz y se calcula el porcentaje de material en cada fracción. Este ensayo proporciona datos importantes sobre la granulometría del material, lo que permite evaluar su calidad y su adecuación para diferentes aplicaciones en la construcción y la ingeniería.

La granulometría adquirida a través de la prueba de tamizaje facilita la categorización de los terrenos según la proporción de partículas de diversas dimensiones, tales como grava, arena,

limo o arcilla. De acuerdo con Giler Vicente & Ortiz Eduardo (2023) "una granulometría apropiada es fundamental para asegurar la estabilidad de las bases y subbases en las infraestructuras de vía".

Los métodos de tamizaje se rigen por reglamentos internacionales como (ASTM D6913-17, n.d.), que detalla los procedimientos a implementar para asegurar resultados reproducibles. Estas regulaciones especifican elementos como la cantidad y tamaño de tamices, el período de agitación y la determinación de fracciones retenidas, asegurando la uniformidad en las prácticas a escala mundial.

2.2.2. Clasificación de subbases de agregados

La normativa (MOP-001-F, 2002) establece que los agregados gruesos utilizados en subbases no deben superar un desgaste del 50% según el ensayo de abrasión en la Máquina de Los Ángeles (Normas INEN 860 y 861, AASHTO T-96). Además, la porción que pasa el tamiz N° 40 debe cumplir con un límite líquido menor de 25% y un índice de plasticidad inferior a 6%, siguiendo las Normas INEN 691 y 692 (AASHTO T-89 y T-90). Estas especificaciones aseguran materiales resistentes, con baja plasticidad, adecuados para soportar las cargas del tráfico y evitar problemas de estabilidad en el pavimento.

2.2.2.1. Clase 1

Una subbase Clase 1 es una capa de material granular, generalmente conformada por agregados gruesos (grava o roca triturada) y finos (arena o material finamente triturado), que se coloca debajo de la base de un pavimento.

2.2.2.2. Clase 2

Una subbase Clase 2 es una capa de material granular compuesta principalmente por fragmentos de roca o grava triturados, a los que se añade arena natural o material fino para lograr una distribución específica de tamaños de partículas (granulometría).

2.2.2.3. Clase 3

Una subbase Clase 2 es una capa de material granular compuesta principalmente por fragmentos de roca o grava, obtenidos mediante trituración o cribado, mezclados con arena natural o material fino para alcanzar una granulometría específica.

Figura 2: Tabla de límites para la clasificación de subbases

TAMIZ	Porcentaje en peso que pasa a través de los tamices de malla cuadrada		
	CLASE 1	CLASE 2	CLASE 3
3" (76.2 mm.)	--	--	100
2" (50.4 mm.)	--	100	--
1 1/2 (38.1 mm.)	100	70 - 100	--
N° 4 (4.75 mm.)	30 - 70	30 - 70	30 - 70
N° 40 (0.425 mm.)	10 - 35	15 - 40	--
N° 200 (0.075 mm.)	0 - 15	0 - 20	0 - 20

Fuente: (MOP-001-F, 2002)

2.2.3. Límites de Atterberg

El ensayo de límites de Atterberg, conforme a la norma ASTM D4318 (2005), se utiliza para evaluar las propiedades de plasticidad de suelos finos. Para ello tenemos el límite plástico y límite líquido:

2.2.3.1.1. Límite Plástico

Se determina preparando una muestra representativa de suelo y formando un hilo que se va estrechando hasta que se rompe a una longitud de 3 mm. Este punto señala la transición entre la condición plástico y la condición semisólida, señalando la cantidad mínima de agua requerida para que el terreno mantenga sus características mate. De acuerdo con Zhang et al. (2023) es esencial contar con una medición exacta del límite plástico para vincular las características mecánicas del terreno con su resistencia al corte y capacidad de soporte.

2.2.3.1.2. Límite Líquido

Se mide utilizando un recipiente de Casagrande. Se añade agua a la muestra hasta alcanzar una consistencia líquida y se realiza un corte en el suelo. Se cuenta el número de golpes necesarios para que el corte se cierre en un recorrido de 13 mm, lo que determina el límite líquido. Investigaciones actuales, como la realizada por subrayan que la mezcla de técnicas convencionales y sofisticadas, como la espectroscopía en infrarrojo próximo, puede incrementar la exactitud en la definición de límites líquidos y plásticos (ARAMA & GENÇDAL, 2022).

La correlación entre los límites de Atterberg y las características mecánicas del terreno facilita la determinación de su aptitud para usos estructurales. Una correlación profunda entre estos límites y propiedades como la densidad máxima seca y el contenido ideal de humedad, lo que simplifica la predicción de la conducta del suelo en el pavimento. Por lo tanto, este ensayo es un recurso inestimable para asegurar la longevidad y estabilidad de las estructuras de carreteras.

2.2.4. Clasificación de suelos

El SUCS clasifica los suelos en dos grupos principales: granulares (gravas y arenas) y finos (limos y arcillas). Los suelos granulares se identifican por tener menos del 50% de partículas que pasan por el tamiz No. 200, mientras que los suelos finos superan este porcentaje. Dentro de cada grupo, se utilizan símbolos como GW, GP, SW o SP para suelos granulares, y ML, CL, MH o CH para suelos finos, que indican sus propiedades de gradación, plasticidad y compacidad, basándose en límites de Atterberg y análisis granulométricos (ASTM D2487, 2010).

La clasificación AASHTO, en cambio, se enfoca en su uso como materiales para carreteras, dividiendo los suelos en siete grupos (A-1 a A-7) según su granulometría y plasticidad. Los suelos granulares corresponden a los grupos A-1 a A-3, adecuados para capas de soporte, mientras que los suelos finos (A-4 a A-7) son menos recomendados debido a su sensibilidad a la humedad. Además, esta clasificación incluye un índice de grupo que mide la calidad del suelo en términos de soporte estructural (AASHTO M-145, 1997).

2.2.5. Densidad y absorción

2.2.5.1. Densidad y Absorción en Agregado Fino

. El propósito del ensayo de densidad y absorción en agregado fino, de acuerdo con la norma NTE INEN 856 (2010), es evaluar las propiedades físicas del material con el fin de asegurar su idoneidad en aplicaciones de construcción, especialmente en la elaboración de mezclas de concreto. El proceso comienza con la inmersión de una muestra de agregado que ha sido previamente secada en agua por un período de 24 horas, garantizando una saturación total. Posteriormente, se procede a secar la superficie de las partículas con el fin de eliminar el exceso de agua, logrando así que el material se encuentre en un estado saturado y superficialmente seco (SSS), lo cual resulta fundamental para la obtención de mediciones precisas. En esta etapa, se procede a medir el peso de la muestra, el cual se considera como un punto intermedio entre la condición de saturada y la completamente seca.

Posteriormente, la muestra es expuesta a un proceso de secado en un horno a una temperatura de 110 °C hasta que alcance un peso constante, garantizando la eliminación completa de la humedad interna. Para calcular la densidad aparente y la absorción del material, se compara el peso seco con el peso en estado SSS. La absorción de agua por parte del agregado es un factor fundamental en la dosificación del concreto, ya que incide directamente en la proporción agua/cemento, la resistencia y la durabilidad del producto final. Estos valores son de vital importancia en dicho proceso.

2.2.5.2. Densidad y Absorción en Agregado Grueso

El procedimiento para realizar el ensayo de densidad y absorción en el agregado grueso, según lo establecido en la norma NTE INEN 857 (2010), es similar al utilizado para el agregado fino, pero ajustado a las propiedades específicas de este tipo de material. El procedimiento se inicia sumergiendo la muestra en agua por un lapso de 24 horas, para que las partículas logren alcanzar un estado de saturación total. A continuación, se procede a secar la muestra de manera superficial con el fin de eliminar el exceso de humedad adherida, alcanzando el estado de saturación superficialmente seco (SSS), momento en el cual se registra su peso. La realización de este procedimiento es fundamental para asegurar que las mediciones sean representativas de la capacidad efectiva de absorción del material.

Posteriormente, la muestra es sometida a un proceso de secado en un horno a una temperatura de 110 °C hasta que alcance un peso constante, garantizando de esta manera la completa eliminación de la humedad interna. El peso seco obtenido se emplea, en conjunto con el peso saturado, para determinar la densidad aparente y la absorción del agregado grueso. La densidad aparente se calcula teniendo en cuenta el volumen de las partículas cuando están saturadas, mientras que la absorción se determina mediante la variación de peso entre el estado saturado y el estado seco. En el diseño de mezclas de concreto, es fundamental considerar ciertos parámetros que permiten ajustar con precisión la cantidad de agua requerida. Esto optimiza la relación agua/cemento y asegura que la mezcla cumpla con los estándares de resistencia y durabilidad necesarios.

2.2.6. Densidad de capas del pavimento

La densidad del pavimento se logra mediante el proceso de colocación y vibrado del hormigón en la losa de pavimento rígido. Durante esta operación, se utilizan vibradores para eliminar las burbujas de aire atrapadas y asegurar que el hormigón se asiente de manera uniforme. Esto contribuye a garantizar la integridad estructural del pavimento, mejorando la adherencia entre los materiales y aumentando su capacidad de carga. Este indicador se analiza mediante técnicas de compactación que persiguen lograr una densidad ideal, la cual potencia de manera notable las características mecánicas y funcionales del pavimento. De acuerdo con estudios recientes, un incremento en la densidad de las capas de pavimento se relaciona directamente con un aumento en su resistencia estructural y una reducción en la deformabilidad del material, lo que resulta crucial para asegurar la durabilidad de las estructuras viales (Cango y Zárate, 2020).

La compactación se consigue utilizando energía mecánica, la cual disminuye las áreas vacías entre las partículas del material asfáltico o granular. No solo incrementa la resistencia al corte, sino que también reduce los impactos adversos de las variaciones de humedad, que pueden deteriorar considerablemente las capas del pavimento. No obstante, la densidad ideal fluctúa en función de las propiedades del material empleado y las condiciones del entorno del lugar de edificación. Por ejemplo, investigaciones han evidenciado que los materiales con una granulometría correctamente distribuida exhiben una densidad máxima superior y un comportamiento más constante ante cargas dinámicas (Contreras-Santos et al., 2019).

2.2.7. Proctor

El ensayo Proctor es de gran importancia en el campo de la geotecnia, ya que permite determinar la relación existente entre la densidad seca de un suelo y su contenido de humedad. Estos parámetros son esenciales en la evaluación y aseguramiento del comportamiento óptimo del suelo en diversas aplicaciones de ingeniería. El presente ensayo aborda el tema de la compactación controlada de muestras de suelo en condiciones estandarizadas, mediante la aplicación de diversos niveles de energía de compactación con el fin de replicar las situaciones reales que el terreno experimentará durante el proceso de construcción. Los resultados posibilitan la determinación del contenido de humedad óptimo, es decir, el nivel de humedad en el cual el suelo logra su máxima densidad en estado seco, mejorando así su resistencia y estabilidad.

Existen dos variantes principales en el método, el Proctor Estándar y el Proctor Modificado, los cuales están diseñados para satisfacer necesidades específicas en el ámbito de la construcción. El Proctor Estándar es adecuado para suelos que serán sometidos a cargas moderadas, como los empleados en proyectos de urbanización residencial o caminos secundarios, debido a su menor consumo de energía de compactación. Por otra parte, el Proctor Modificado utiliza una energía de compactación considerablemente mayor, la cual es apropiada para proyectos que requieren un mayor nivel de resistencia y estabilidad, como carreteras principales, pistas de aeropuertos y presas. Tantas variantes ofrecen información crucial para orientar el diseño y la supervisión de la

compactación en el sitio de construcción, garantizando que el suelo cumpla con los requisitos técnicos y las necesidades estructurales del proyecto.

2.2.7.1. Proctor Estándar

El ensayo Proctor Estándar, definido en la norma ASTM D698 (2012), es un procedimiento de laboratorio que busca determinar la máxima densidad seca que puede alcanzar un suelo para una determinada humedad, conocida como "humedad óptima". Para ello, se somete una muestra de suelo a una energía de compactación específica, utilizando un martillo que golpea repetidamente la muestra dentro de un molde de volumen conocido. Cada capa es comprimida con 25 golpes utilizando un mazo metálico de 2,5 kg de peso, el cual se deja caer desde una altura de 30,5 cm. Este nivel de energía de compactación reproduce las condiciones habituales de una obra, lo que posibilita la evaluación de la respuesta del suelo ante esfuerzos moderados. Al variar la cantidad de agua en la muestra y repetir el proceso, se obtienen diferentes densidades secas. Graficando estos resultados, se obtiene la curva de compactación Proctor, donde el punto más alto representa la máxima densidad seca y la humedad óptima.

La importancia del ensayo Proctor radica en que los resultados obtenidos sirven como referencia para el diseño y control de calidad de obras civiles. La densidad máxima seca indica la máxima capacidad de soporte del suelo, mientras que la humedad óptima es el contenido de agua necesario para alcanzar dicha densidad. Esta información es fundamental para determinar los espesores de las capas de suelo en pavimentos, terraplenes y otras estructuras, garantizando así su estabilidad y durabilidad. Además, el ensayo Proctor permite evaluar la eficiencia de los equipos de compactación utilizados en obra.

2.2.7.2. Proctor Modificado

Regido por la norma ASTM D1557 (2012), el Ensayo Proctor Modificado se utiliza en situaciones donde se necesita lograr densidades superiores en el terreno, siendo especialmente adecuado para obras que deben resistir cargas significativas, como carreteras principales, pistas de aterrizaje de aeropuertos, presas y estructuras de ingeniería de gran envergadura. El método en cuestión emplea una energía de compactación considerablemente superior a la del Proctor Estándar, lo cual posibilita la evaluación del comportamiento del suelo en condiciones más rigurosas. Para asegurar la precisión de los resultados, la muestra de suelo se compacta en un molde cilíndrico dividido en cinco capas, las cuales son compactadas de manera uniforme.

En este proceso, se aplica un total de 25 golpes con un mazo metálico que tiene un peso de 4,5 kg y se deja caer desde una altura de 45,7 cm sobre cada capa. La energía de compactación se incrementa significativamente al combinar peso y altura, lo que permite simular las exigentes condiciones a las que se someterá el suelo en el campo. El propósito principal es establecer el nivel de humedad más adecuado que posibilite lograr la máxima densidad seca del suelo, garantizando que posea la resistencia estructural necesaria para soportar las cargas previstas sin sufrir deformaciones importantes o comprometer su estabilidad.

El Proctor Modificado es un elemento fundamental en la planificación y supervisión de la calidad de proyectos de gran importancia, dado que los datos obtenidos posibilitan la adecuación de los métodos de compactación en terreno con el fin de satisfacer los requisitos técnicos establecidos. Este ensayo asegura la correcta compactación del suelo, reduciendo el riesgo de posibles fallas estructurales y garantizando la durabilidad y estabilidad de las edificaciones en las que se aplica.

2.2.8. Cono de Arena

Según el estándar ASTM D1556 (2000), el método de cono de arena se emplea principalmente para calcular la densidad de terrenos compactados, siendo un procedimiento crucial en proyectos de edificación para regular la calidad de la compactación. Este procedimiento implica excavar un hueco en el terreno, cubrirlo con arena de densidad determinada, y determinar la densidad seca del suelo basándose en la cantidad de arena que se ha desplazado. Su uso es especialmente apropiado para terrenos cohesivos y no saturados, debido a que, en terrenos con alta humedad o que pueden desmoronarse con facilidad, el orificio podría deformarse, poniendo en riesgo la exactitud de los resultados (Diana et al., 2022).

El principal objetivo de este ensayo es establecer si el suelo ha sido compactado a la densidad requerida en campo, lo cual es fundamental para garantizar la estabilidad y durabilidad de las obras civiles.

2.2.9. Espesor del Pavimento

El espesor adecuado del pavimento es esencial para resistir las tensiones inducidas por las cargas del tráfico. La medición y evaluación del espesor del pavimento contribuyen a la determinación de su capacidad estructural. Este espesor se establece considerando varias variables, tales como el tipo de material utilizado, las cargas proyectadas, las condiciones meteorológicas y el volumen previsto de tráfico (Porras et al., 2017).

En pavimentos adaptables, se determina el espesor teniendo en cuenta la resistencia módica de las capas y la interacción entre los materiales. Estos pavimentos se componen de capas de base, subbase y superficie, que colaboran para resistir deformaciones y ofrecer una conducción confortable. El diseño ideal del espesor posibilita que la capa más alta absorba las tensiones producidas por las cargas del vehículo, minimizando su influencia en las capas más bajas. Investigaciones recientes han indicado que un espesor insuficiente puede provocar daños precoces, tales como fisuras y deformaciones permanentes, especialmente en zonas con altas temperaturas o tráfico intenso (Llano et al., 2020).

Además, la elección del espesor también se basa en las características del terreno que lo sustenta. Los terrenos de baja resistencia necesitan espesores más grandes o incluso estabilización a través de métodos como la inclusión de polímeros o estabilizadores químicos. Estas acciones

potencian la capacidad del terreno y disminuyen los gastos relacionados con el incremento de la densidad del pavimento (Llano et al., 2020). La determinación del grosor del pavimento es una labor complicada que demanda un estudio minucioso de elementos como el tipo de material, las cargas proyectadas y las propiedades del terreno. Una estructura de espesor adecuadamente planificada no solo garantiza la longevidad de la estructura, sino que también disminuye los gastos de mantenimiento a largo plazo, aportando a una infraestructura de carreteras más sustentable y eficaz.

Espesores de pavimento rígido según su uso:

- Calles Residenciales: 10 a 15 cm
- Colectoras: 16 o 17 cm
- Carreteras: 16 cm
- Autopista: 20 cm
- Aeropista: 20 cm

2.2.10. Ensayo de Abrasión (Máquina de los Ángeles)

El ensayo de abrasión e impacto, según normativas como NTE INEN 860 (2011), analiza la capacidad del agregado grueso para resistir el desgaste mecánico y los impactos, factores esenciales en su comportamiento en mezclas de concreto expuestas a condiciones de uso rigurosas. El procedimiento se realiza empleando la Máquina de Los Ángeles, un dispositivo diseñado con el propósito específico de reproducir las condiciones de abrasión e impacto a las que se ven expuestos los agregados en la realidad. La muestra está conformada por un peso específico de agregado grueso y un grupo de esferas de acero. Se coloca dentro del tambor de la máquina, el cual gira a una velocidad establecida por un número fijo de revoluciones.

El cálculo del índice de abrasión se realiza mediante la comparación entre el peso inicial de la muestra y el peso de la fracción retenida después del ensayo, siendo este resultado expresado en forma de porcentaje. El índice mencionado es crucial al concluir el ciclo de rotación, el material obtenido es posteriormente sometido a un proceso de tamizado empleando un tamiz de 1.7 mm (N° 12). Este procedimiento posibilita la separación de las partículas desgastadas y fragmentadas del material retenido. para evaluar la adecuación del agregado en aplicaciones estructurales, dado que un menor índice de desgaste indica una mayor resistencia del material ante las condiciones de carga dinámica y fricción.

2.2.11. Grado de compactación

La correcta compactación y disposición de los suelos de relleno son aspectos cruciales en la industria de la construcción, pues influyen directamente en la estabilidad y durabilidad de las estructuras. La calidad de la compactación se evalúa típicamente como un porcentaje de la densidad óptima del material empleado. Tanto los suelos de fundación como los de relleno deben

alcanzar al menos el 95% de la densidad especificada en el ensayo Proctor estándar o la máxima densidad del suelo. Se refiere al porcentaje que se obtiene de la relación entre la densidad seca alcanzada en el campo y la densidad máxima alcanzada en laboratorio, usualmente mediante el ensayo Proctor estándar o modificado. Es fundamental su adecuada determinación para asegurar que las capas del terreno satisfagan los requisitos de estabilidad y apoyo estructural requeridos para resistir cargas tanto dinámicas como estáticas (Nalon et al., 2018).

El nivel de compactación, expresado en términos porcentuales, es un indicador directo de la eficacia del proceso de compactación en la construcción. Al alcanzar cerca del 100%, se indica que el material del terreno ha adquirido una densidad ideal que potencia sus características mecánicas, tales como la resistencia al corte y la reducción de su permeabilidad. En términos prácticos, un nivel de compactación que no sea el requerido puede provocar inconvenientes como asentamientos diferenciales, fisuras en el pavimento y una disminución en la durabilidad de la estructura. Por esta razón, los códigos y reglamentos de edificación definen valores mínimos permitidos, que varían en función del tipo de terreno y el uso estructural que se planea realizar.

El procedimiento para determinar el nivel de compactación en terreno abarca instrumentos como el cono de arena, el densímetro nuclear y, en última instancia, tecnologías no dañinas como el Densímetro Eléctrico (EDG) y sistemas de compactación inteligente. Estos avances han posibilitado mediciones más veloces y exactas, posibilitando a los ingenieros modificar los parámetros del proceso en tiempo real para acatar los estándares establecidos (Llano et al., 2020). Además, existe una correlación relevante entre el nivel de compactación y las condiciones del material. Por ejemplo, la humedad ideal es un elemento crucial en la compactación; un terreno excesivamente seco o húmedo puede obstaculizar el logro del nivel de compactación necesario. Las investigaciones han evidenciado que un cambio en el contenido de agua en comparación con el óptimo puede disminuir la densidad seca lograda en el campo, afectando de manera negativa la estabilidad del terreno (Montejo et al., 2020).

2.3. Características Mecánicas del Pavimento rígido

2.3.1. Macrotextura

El ensayo de macrotextura mediante el método del círculo de arena, regulado por la norma ASTM E 965-96 (2006), permite medir la textura superficial de pavimentos rígidos o flexibles, considerando características esenciales para el desempeño vial, como la interacción neumático-pavimento. Este ensayo se realiza vertiendo un volumen estándar de arena calibrada (generalmente 25 ml) sobre la superficie limpia y seca. La arena se distribuye uniformemente en un círculo mediante un disco plano hasta llenar los huecos superficiales sin compactarla. Posteriormente, se mide el diámetro promedio del círculo en direcciones perpendiculares, y con este dato se calcula el espesor promedio de la textura (MTD, por sus siglas en inglés).

El resultado obtenido refleja la profundidad de la macrotextura, un factor clave para garantizar la resistencia al deslizamiento y la adecuada evacuación de agua en condiciones de

lluvia. Este método es de rápida aplicación y ampliamente utilizado tanto en pavimentos recién construidos como en aquellos en servicio, para evaluar su estado superficial y detectar signos de desgaste o deterioro. Su aplicación contribuye a mejorar la seguridad vial y el diseño de las infraestructuras, consolidándose como una herramienta esencial en proyectos de investigación y mantenimiento vial.

2.4.Equipos Eléctricos

2.4.1. GEOGAUGE

El GeoGauge es una herramienta utilizada en el control de calidad de materiales, diseñada para medir propiedades relacionadas con la resistencia y la rigidez de los suelos y materiales granulares. Funciona generando cargas mediante vibración y registrando las deflexiones resultantes. A partir de estos datos, se pueden calcular diversas propiedades, como cc. El instrumento se compone de un anillo de pie que vibra bajo su propio peso, lo que induce deflexiones en el suelo. Estas deflexiones son proporcionales al radio exterior del anillo del pie del GeoGauge, el módulo de elasticidad del suelo, el módulo de cizalladura y el coeficiente de Poisson del suelo. Con base en estas mediciones, se puede determinar la rigidez del material.

El GeoGauge proporciona múltiples beneficios en comparación con técnicas convencionales. En contraposición a pruebas destructivas como el cono de arena, el GeoGauge ofrece mediciones veloces y no destructivas. Esto posibilita llevar a cabo controles de calidad en tiempo real durante la compactación, mejorando los procesos de construcción y disminuyendo los gastos operacionales. De acuerdo con estudios, la rigidez evaluada por el GeoGauge posee una correlación notable con la compactación y estabilidad del material, demostrada por su habilidad para detectar diferencias de asentamiento en combinaciones de suelo-roca (Zhang et al., 2023).

El GeoGauge opera mediante la interrelación entre los parámetros dinámicos del terreno y la geometría del anillo de carga. Se examinan las deflexiones provocadas por las vibraciones para establecer propiedades como el módulo de Young, el módulo de oscilación y el coeficiente de Poisson. Investigaciones actuales subrayan que el vínculo entre el contenido de agua y la rigidez es crucial para entender los resultados logrados con este aparato. Por ejemplo, se notó que un nivel ideal de agua en combinaciones de suelo-roca incrementa el valor de rigidez registrado por el GeoGauge, evidenciando una correlación exponencial entre ambos parámetros.

2.4.1.1.Módulo de Rigidez

El módulo de rigidez es una propiedad mecánica fundamental que describe la capacidad de un material para resistir deformaciones ante la aplicación de una carga. En el contexto de suelos y pavimentos, este parámetro se utiliza para evaluar el comportamiento estructural de las capas sometidas a esfuerzos dinámicos o estáticos. Una técnica ampliamente utilizada para determinar este módulo es el ensayo con el GeoGauge, un equipo portátil diseñado para medir la rigidez superficial de suelos y materiales compactados in situ.

El GeoGauge emplea vibraciones controladas para generar una respuesta en el suelo, calculando el módulo de rigidez a partir de la frecuencia y amplitud de las ondas generadas. Este método permite obtener mediciones rápidas y precisas sin alterar significativamente las condiciones del terreno, lo que lo convierte en una herramienta eficiente para estudios geotécnicos y de pavimentos. Según investigaciones previas, los valores de rigidez obtenidos con este equipo son particularmente útiles para correlacionar el comportamiento mecánico del suelo con parámetros como el Módulo de Young y el CBR (Casco José & Salcán Vinicio, 2024)

2.4.1.2.Módulo de Elasticidad

El módulo de elasticidad de las capas del pavimento rígido es fundamental para comprender su comportamiento frente a las deformaciones. La evaluación de este parámetro proporciona información sobre la rigidez del pavimento y su capacidad para distribuir las cargas de manera eficiente. Está relacionado con su módulo de ruptura y se determina mediante la norma ASTM C469 (2002). En su defecto correlacionarlo con otras características del material como puede ser su resistencia a la compresión (f'_c). Este indicador es frecuentemente empleado en la ingeniería civil y geotécnica para valorar la rigidez y capacidad de soporte de materiales como tierras, concretos y rocas. En términos matemáticos, se refiere a la inclinación de la curva de esfuerzo-deformación en su rango lineal, lo que muestra la habilidad del material para resistir deformaciones bajo carga sin experimentar daños duraderos (Gómez de la Peña et al., 2017).

El módulo de elasticidad desempeña un papel crucial en el diseño y estudio estructural de componentes como vigas, columnas y estratos de pavimentos. Por ejemplo, en pavimentos rígidos, este parámetro facilita la predicción del rendimiento del hormigón bajo cargas reiteradas, mejorando su rendimiento a largo plazo. En pavimentos flexibles, el módulo de elasticidad del terreno subyacente y de las capas granulares influye en la repartición de cargas y la longevidad de la edificación. Además, se utiliza para describir materiales en pruebas de laboratorio y modelado numérico, donde su exactitud es crucial para asegurar diseños seguros y asequibles (Llano et al., 2020).

Para materiales como el concreto, el módulo de elasticidad está sujeto a factores como la resistencia a la compresión, la relación entre agua y cemento y las propiedades de las mezclas. Los concretos de gran resistencia y los agregados más rígidos suelen tener módulos de elasticidad más altos, lo que los convierte en óptimos para estructuras que se encuentran expuestas a cargas elevadas. Sin embargo, un elevado módulo de elasticidad puede aumentar la fragilidad del material, restringiendo su habilidad para resistir deformaciones sin, por ende, el módulo de elasticidad representa un índice crucial de las características mecánicas de los materiales y su reacción ante cargas (Gómez de la Peña et al., 2017).

2.4.1.3.Fórmulas de estimación de CBR.

Para estimar el CBR de las capas ensayadas en pavimento rígido, se utilizaron ecuaciones que relacionan los parámetros de rigidez y elasticidad del suelo con el comportamiento mecánico del material bajo carga.

Ecuación 1: En la investigación de Casco José & Salcán Vinicio (2024) se utiliza la fórmula para correlacionar la rigidez del material granular y el CBR, expresado en porcentaje (%). Esta fórmula facilita la evaluación del pavimento flexible, con la rigidez obtenida en megapascales (MN/m), permitiendo obtener el valor del CBR.

$$\% CBR = 0.0039(8.672K_G)^2 - 5.75 \quad \text{Ec.1}$$

Ecuación 2: También emplearon una fórmula para caracterizar suelos compuestos por arena, limos y arcillas, lo que permite determinar el módulo resiliente en función del CBR.

$$MR(MPa) = 10 \times CBR^{0.73} \quad \text{Ec.2}$$

Ecuación 3: La estimación del CBR en pavimentos rígidos se fundamenta en relaciones empíricas que vinculan el módulo de rigidez del suelo con el valor del CBR, facilitando la evaluación de la capacidad de soporte de las capas del pavimento sin recurrir a ensayos destructivos. En un estudio comparativo, Urquiza (2019) propuso la siguiente fórmula, utilizada para correlacionar resultados entre ensayos de laboratorio del módulo de Young y el CBR:

$$MR(psi) = 7138.8 \times e^{0.0203 \times \%CBR} \quad \text{Ec.3}$$

Ecuación 4: Según Portilla (2022), desarrollo una ecuación que permite relacionar el Límite Líquido (LL) y Humedad Óptima (W_{opt}) para calcular los valores de CBR.

$$\% CBR = \frac{7673.6}{LL^{0.481} * W_{opt}^{1.376}} \quad \text{Ec.4}$$

2.4.2. Densímetro eléctrico EDG

El densímetro eléctrico es una herramienta novedosa y eficaz en el ámbito de la geotecnia, especialmente para la medición in situ de la densidad y la humedad de suelos compactados. El diseño de este instrumento posibilita la realización de pruebas rápidas y precisas sin requerir la extracción de muestras voluminosas, lo cual disminuye de manera considerable el impacto en el lugar de investigación y mejora la eficiencia en los tiempos de ejecución. El funcionamiento de este equipo consiste en la captura de una firma eléctrica del suelo en un punto específico, la cual se logra a través de dos configuraciones de conexión. Se promedian los datos obtenidos de ambas disposiciones con el fin de garantizar una mayor confiabilidad en los resultados obtenidos.

La firma eléctrica obtenida a través del densímetro no solo facilita la caracterización precisa del suelo, sino que también posibilita la evaluación de los datos recolectados con normativas internacionales como el Proctor modificado (ASTM D1556, 2000). Este método asegura que los valores de densidad y humedad satisfacen los estándares de compactación necesarios para cada proyecto. El empleo de este dispositivo resulta de gran utilidad en los procesos de control de calidad, ya que permite verificar el cumplimiento de las especificaciones técnicas de manera rápida y precisa. Esto es fundamental para garantizar la integridad del suelo y evitar retrasos en los procesos constructivos.

El procedimiento para utilizar el densímetro eléctrico se inicia con la configuración de la consola EDG, la cual desempeña un papel central en el sistema de adquisición y procesamiento de datos en este experimento. La creación o selección de un modelo de suelo específico es un paso fundamental con el fin de asegurar mediciones precisas, y este equipo facilita dicha tarea. El modelo de suelo se fundamenta en parámetros previamente establecidos que vinculan las propiedades dieléctricas y eléctricas con las características físicas del material. El presente procedimiento garantiza que las firmas eléctricas adquiridas se correlacionen de manera precisa con variables fundamentales como densidad, humedad y compactación, las cuales son elementos esenciales en el análisis geotécnico. Antes de realizar las mediciones, es necesario conectar los sensores de medición y temperatura a la consola EDG para garantizar la correcta calibración del equipo. Esta acción tiene como objetivo minimizar posibles errores y mejorar la confiabilidad de los resultados obtenidos.

Posteriormente, se procede a colocar los electrodos de acero en el terreno siguiendo un patrón geométrico particular, con el propósito de evaluar la resistividad eléctrica del suelo. Los dardos, que están conectados a la consola a través de cables con pinzas, posibilitan que los pulsos eléctricos producidos por el equipo atraviesen el suelo y detecten variaciones en el voltaje. Se llevan a cabo mediciones en dos configuraciones diferentes con el fin de garantizar una caracterización exhaustiva del terreno. Se promedian los datos obtenidos para crear una firma eléctrica representativa que describa las propiedades dieléctricas del suelo. La firma se convierte en el fundamento del análisis técnico subsiguiente, ofreciendo una visión detallada del comportamiento del suelo en condiciones específicas.

En el proceso se lleva a cabo la toma de medidas en ubicaciones estratégicas previamente seleccionadas, en las cuales se identifican elementos fundamentales como la densidad húmeda, densidad seca, humedad natural y grado de compactación. La evaluación de la calidad del terreno y su capacidad para soportar cargas estructurales requiere el análisis de estos datos fundamentales. Además, se complementan con ensayos convencionales, como el ensayo del cono de arena, el cual ofrece una referencia directa y fiable de la densidad en el lugar de interés. Los valores de la densidad máxima seca y la humedad óptima del ensayo Proctor modificados se emplean para ajustar y validar los modelos establecidos en la consola EDG. Además, se utilizan estos valores en el proceso de configuración de los modelos. La combinación de este enfoque asegura la precisión y la utilidad de los resultados, proporcionando una herramienta sólida para la supervisión de la calidad en proyectos de ingeniería geotécnica.

2.5. Características Hidráulicas del Pavimento Rígido

2.5.1. Drenaje Superficial y Subsuperficial

La capacidad de drenaje del pavimento es esencial para prevenir acumulaciones de agua que podrían comprometer su integridad. La evaluación del drenaje superficial y subsuperficial aborda aspectos como la evacuación eficiente de aguas pluviales y la prevención de problemas

asociados con el agua, como el socavamiento del subsuelo. Se puede evaluar mediante el coeficiente de drenaje (Cd) el cual depende de la calidad del drenaje y exposición a la saturación. Las propiedades hidráulicas del asfalto rígido, particularmente en lo que respecta al drenaje superficial y subsuperficial, resultan cruciales para asegurar la operatividad y la longevidad de las carreteras y otras infraestructuras de vía pública. Estas propiedades facilitan la gestión eficaz del agua pluvial y las filtraciones, reduciendo así los daños estructurales y los problemas de seguridad en las vías. En el drenaje superficial, es crucial la correcta inclinación de la superficie del pavimento y la creación de canales de drenaje para expulsar rápidamente el agua acumulada durante episodios de lluvia intensa, evitando acumulaciones que puedan provocar hidropelano o deterioro acelerado del material (Pires et al., 2021).

Un pavimento rígido con un sistema de drenaje incorrecto puede experimentar dificultades como bombeo, fisuras y disminución de la capacidad de soporte en las capas inferiores. El bombeo sucede cuando el agua que se encuentra bajo las losas del pavimento se expulsa a través de las uniones debido a la constante circulación de vehículos pesados, arrastrando partículas pequeñas del suelo base. Esto disminuye las capas de apoyo y agrava la degradación de la estructura. Para prevenir este fenómeno, es necesario un diseño meticuloso de las uniones y sistemas de drenaje eficaces que expulsen el agua antes de que provoque daños considerables (Alves, 2019).

2.5.2. Infiltración del Suelo

La capacidad del pavimento para permitir la infiltración del agua en el suelo subyacente es crucial. Evaluar la infiltración del suelo ayuda a prevenir problemas de estabilidad y a mantener un sistema hidráulico eficiente. La rotura de agregados en suelos de débil estructura (por dispersión con el agua, por rotura al impacto o por erosión) y el hinchamiento de las arcillas produce un progresivo sellado de la superficie del suelo y una bajada brusca de la velocidad de infiltración. Este fenómeno conlleva el desplazamiento del agua desde la superficie hasta el interior del suelo, que se ve afectado por elementos como la textura del terreno, la compactación, la estructura del suelo y la flora. La infiltración juega un rol crucial en la recarga de los acuíferos, la regulación de la erosión y la repartición de nutrientes en la biosfera, y su entendimiento es esencial para la gestión sostenible del agua y la agricultura (Carnero, 2018).

La conformación del terreno es uno de los elementos más determinantes en la infiltración. Los terrenos arenosos, debido a sus partículas más grandes y espacios porosos extensos, exhiben tasas de infiltración superiores en comparación con los terrenos arcillosos, que poseen una menor porosidad y una retención de agua superior. No obstante, esta elevada capacidad de infiltración de los terrenos arenosos puede provocar una percolación acelerada, lo que en ciertas situaciones conlleva a la pérdida de nutrientes. En contraposición, los terrenos arcillosos, a pesar de tener una tasa de infiltración más baja, resultan más eficaces en la retención de agua, lo cual resulta beneficioso para la agricultura en zonas áridas (Bohórquez-Castellanos et al., 2018)

Otro elemento, es la estructura del terreno, que engloba atributos como la unión de partículas y la creación de poros vinculados. Una estructura adecuadamente desarrollada promueve

la infiltración, mientras que terrenos compactados debido al movimiento de maquinaria o al pisoteo animal muestran una reducción considerable en las tasas de infiltración. De acuerdo con investigaciones llevadas a cabo en terrenos agrícolas, la aplicación de técnicas como la agricultura de menor intensidad y la utilización de cultivos de cobertura puede potenciar la estructura del suelo y, por ende, incrementar su capacidad de infiltración (Reza Curiel et al., 2022).

2.5.3. Coeficiente de escurrimiento

El coeficiente de escurrimiento (c) es una proporción numérica que indica la cantidad de agua de lluvia que, tras caer sobre una superficie, no se infiltra en el suelo y, en cambio, fluye superficialmente generando escurrimiento. Este coeficiente nos dice qué parte de la lluvia total se convierte en escurrimiento y termina en ríos, lagos o sistemas de drenaje, en lugar de ser absorbida por el suelo (Ibañez Sara et al., 2010).

$$c = 1 - \left(\frac{\text{Volumen inicial agua}}{\text{Area total interna} * \text{Altura Infiltrada}} \right) \quad \text{Ec. 5}$$

El coeficiente de escurrimiento para pavimentos rígidos, como el concreto, se sitúa entre 0.80 y 0.95, reflejando su baja permeabilidad y la consecuente generación de un alto volumen de escurrimiento superficial. Este valor depende de factores como la pendiente y las condiciones de la superficie, siendo mayor en áreas urbanas donde predominan pavimentos impermeables (Varas Eduardo, 1998).

2.5.4. Velocidad de infiltración

La velocidad de infiltración es un parámetro hidráulico esencial que mide la tasa a la cual el agua se introduce en el suelo o a través de superficies, como los pavimentos rígidos, hasta alcanzar la saturación. Expresada en milímetros por hora (mm/h), esta propiedad es crucial para evaluar el comportamiento de los pavimentos frente al agua superficial y determinar su capacidad de drenaje (ASTM D3385-03, 2003).

En pavimentos rígidos, la infiltración del agua puede tener efectos significativos en las capas subyacentes. Si el agua logra atravesar las juntas o fisuras, puede generar pérdida de soporte, reducir la capacidad estructural del sistema y acelerar el deterioro de la superficie de rodadura. Por ello, medir la velocidad de infiltración permite identificar posibles vulnerabilidades y diseñar estrategias de subdrenaje para minimizar los riesgos asociados al agua, asegurando un desempeño más eficiente y una mayor durabilidad de la estructura (Hillel Daniel, 1998).

2.5.5. Humedad Óptima

La humedad óptima se refiere al contenido de humedad ideal en un material, suelo o sustancia para que este alcance sus mejores propiedades o desempeño. En el contexto de pavimentos rígidos, como losas de concreto, se refiere al contenido de agua ideal en la mezcla de

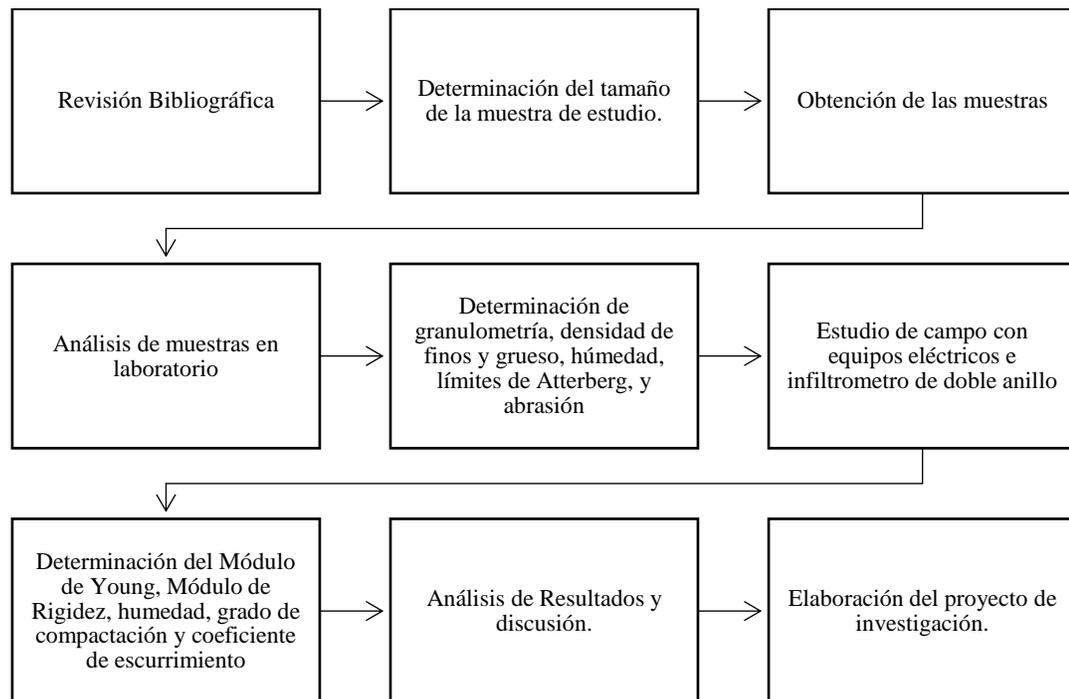
concreto que permite alcanzar la máxima densidad y resistencia a la compresión. Por ello es importante tomar en consideración los diferentes factores que influyen en la humedad óptima de pavimentos rígidos, como el tipo de cementos, la granulometría de los agregados, aditivos y condiciones ambientales, para asegurar una mayor densidad, resistencia y trabajabilidad, lo que se traduce en un pavimento con una vida útil más larga y menores costos de mantenimiento (Eulalio Juárez Badillo, 1972). Generalmente, se establece la humedad ideal a través de pruebas de compactación en laboratorio, como el ensayo Proctor estándar o modificado. En estas pruebas, se compactan muestras de terreno en moldes particulares bajo distintos niveles de humedad, registrando la densidad seca correspondiente a cada uno de ellos. El lugar donde se logra la máxima densidad seca es lo que se denomina humedad óptima. De acuerdo con Chavarría et al (2024) "la curva de compactación conseguida facilita la identificación de la mezcla perfecta entre agua y trabajo mecánico para incrementar la densidad del terreno".

CAPÍTULO III.

3. METODOLOGÍA

El método de investigación adoptado tiene un enfoque cuantitativo. Se llevarán a cabo ensayos de laboratorio e in situ, con el propósito de obtener valores numéricos. Estos datos serán analizados para identificar las características físicas, mecánicas e hidráulicas del pavimento rígido, permitiendo así determinar cuál es la relación existente entre estas propiedades.

Figura 3: Esquema metodológico



Fuente: Elaboración propia

La presente investigación es del tipo cuantitativo y descriptivo. Este tipo de diseño se centra en describir las características físico-mecánicas e hidráulicas del pavimento rígido. Los resultados numéricos obtenidos de los ensayos realizados in situ y en laboratorio serán tabulados y representados mediante, tablas y figuras para facilitar una mejor interpretación y análisis de los mismos. Este enfoque descriptivo permite una comprensión detallada de las características en las diferentes capas del pavimento. Según Zhang et al (2023) las investigaciones en pavimentos rígidos necesitan un método sistemático que fusiona pruebas de laboratorio con métodos de campo no dañinos para conseguir una valoración más exacta de su comportamiento físico-mecánico e hidráulico. De acuerdo con Dong et al (2022) el estudio estadístico de datos en la ingeniería pavimentada es esencial para anticipar comportamientos y crear soluciones fundamentadas en

patrones detectados. En esta línea, la metodología descriptiva brindó instrumentos esenciales para determinar la relación entre las propiedades del pavimento rígido.

3.1. Definición de la muestra

3.1.1. Población

Pavimento rígido de las Avenidas Edelberto Bonilla Oleas, Lizarzaburu, Leónidas Proaño y Pedro Vicente Maldonado de la ciudad de Riobamba (13 km). Esta vía representa un punto estratégico, ya que permite la conexión de las parroquias Maldonado y Velasco, y además es una carretera multicarril AV2 según la MOP-001-F (2002).

3.1.2. Muestra

La muestra está compuesta por una capa de rodadura, subbase y subrasante, mismas que serán procedentes de cinco perforaciones efectuadas de manera estratégica a lo largo de la Av. Edelberto Bonilla Oleas. Estas perforaciones facilitan la recopilación de muestras para posteriores pruebas de laboratorio y ensayos en campo.

3.1.2.1. Tipo de muestreo

El método de muestreo empleado fue el estratificado sistemático, para llevar a cabo un estudio integral a lo largo de la vía, garantizando así una representación justa de las diferentes capas del pavimento a lo largo del segmento analizado. Este procedimiento fusiona la regularidad en las perforaciones con la estratificación de materiales, lo que conduce a una valoración más exhaustiva de las propiedades físicas, mecánicas e hidráulicas. De acuerdo con la implementación de técnicas sistemáticas incrementa la exactitud en la recolección de información acerca de estas propiedades del pavimento rígido (Mayor Gallego, 2007).

3.2. Criterios de evaluación

- **Uniformidad de la vía**

Mediante una inspección in situ, se determinó que el tramo de la vía en estudio presenta algunas irregularidades en la capa de rodadura, entre las cuales se identificaron grietas con severidad baja, media y alta en diferentes puntos. No obstante, también se observó que en su mayoría el pavimento se encuentra en buen estado. Con base en estas observaciones, se seleccionaron estratégicamente cinco puntos de muestreo. No obstante, a pesar de las anomalías detectadas, se determinó que una amplia porción del pavimento está en un estado funcional apropiado. Este equilibrio entre zonas deterioradas y bien preservadas facilitó la elección estratégica de cinco puntos de muestreo que reflejan la diversidad del segmento analizado.

Este énfasis en la homogeneidad es crucial, dado que las anomalías identificadas impactan en la seguridad de las vías y el confort de los usuarios.

- **Accesibilidad**

Esta evaluación asegura que los equipos especializados y el personal de investigación puedan acceder sin dificultades a los distintos tramos de la avenida, permitiendo realizar ensayos in situ de manera eficiente. La facilidad de acceso es esencial para obtener datos precisos sobre el estado estructural y el comportamiento del pavimento frente a las cargas mecánicas y el flujo hidráulico, contribuyendo a un análisis riguroso en el contexto de esta investigación.

Para la Avenida Edelberto Bonilla Oleas, la sencillez de acceso permitió cubrir una extensión significativa del segmento, asegurando que las mediciones reflejaran las condiciones generales del camino.

- **Ubicación estratégica**

La altitud también se considera un factor influyente en el estudio, ya que durante la temporada de altas precipitaciones las zonas bajas del tramo vial tienden a inundarse, lo que afecta significativamente las condiciones del pavimento. En contraste, las zonas altas presentan un escurrimiento más rápido, reduciendo el tiempo de exposición al agua y, por ende, minimizando el deterioro del pavimento. Debido a estas diferencias, la altitud ha sido tomada en cuenta como un criterio relevante para el análisis y selección de los puntos de estudio.

En las áreas bajas, donde la acumulación de agua es habitual, se registró un nivel de deterioro más elevado debido a la larga exposición al agua. En cambio, en las áreas elevadas del segmento, el rápido flujo de agua disminuye el tiempo de contacto con la superficie del pavimento, reduciendo así el impacto en las capas inferiores. Esta variación topográfica subraya la relevancia de crear sistemas de drenaje ajustados a las circunstancias locales, una propuesta apoyada por Klosok-Bazan et al. (n.d.), quienes sugirieron modificaciones en el diseño de las capas granulares basándose en la variación topográfica.

3.3. Técnicas de recolección de datos

Para la recolección de datos y los cálculos necesarios para determinar las características físicas, mecánicas e hidráulicas, se aplicaron las normas vigentes de la NTE INEN y ASTM. Esto garantiza una referencia estandarizada y confiable para obtener resultados precisos y reproducibles en el análisis de dichas propiedades.

Estas regulaciones establecieron los lineamientos para la combinación de pruebas de laboratorio y tecnologías no destructivas potencia de manera notable la valoración del estado estructural de los pavimentos. La metodología empleada posibilita un análisis exhaustivo de las características físicas, mecánicas e hidráulicas del pavimento, garantizando que la información obtenida sea representativa de las condiciones verdaderas del tramo vial de estudio.

3.4. Ensayos en laboratorio

3.4.1. Granulometría de agregados

El ensayo de granulometría basado en la norma NTE INEN 696 (2011), tiene como objetivo evaluar la distribución de tamaños de las partículas en un material granular, utilizando una serie de tamices estandarizados. Los resultados obtenidos permiten verificar si el material cumple con los requisitos establecidos en proyectos de construcción y determinar su clasificación según la curva granulométrica generada.

3.4.2. Límites de Atterberg

El ensayo de límites de Atterberg se realiza para determinar el contenido de agua en los suelos finos en los puntos de transición entre los estados líquido y plástico. El límite líquido se determina mediante la Copa de Casagrande, en la cual se aplica una cantidad específica de golpes para establecer la fluidez del suelo bajo condiciones normalizadas. Este procedimiento sigue los lineamientos establecidos en la norma NTE INEN 691 (1982), que regula tanto el equipo utilizado como los parámetros de ejecución para garantizar la precisión y fiabilidad de los resultados obtenidos.

3.4.3. Densidad y absorción de agregados finos

Este ensayo se utiliza para determinar la densidad media de una muestra de agregado fino, excluyendo el volumen de los vacíos entre las partículas. Además, se evalúa la capacidad de absorción del material, lo que ayuda a entender cómo se comportará el agregado al entrar en contacto con el agua, particularmente en mezclas de concreto. El procedimiento se realiza conforme a la norma NTE INEN 856 (2010), que establece los requisitos para la ejecución y los resultados esperados de este ensayo.

3.4.4. Densidad y absorción de agregados gruesos

El objetivo de este procedimiento es medir la densidad media de una muestra de agregado grueso, excluyendo los vacíos interparticulares, así como su densidad relativa (gravedad específica) y la cantidad de agua que puede ser absorbida por el material. Este ensayo es fundamental para garantizar la calidad y la idoneidad del agregado grueso en la fabricación de concreto. El procedimiento se ajusta a lo estipulado en la norma NTE INEN 857 (2010), que establece las condiciones técnicas para la realización del ensayo.

3.4.5. Ensayo de Abrasión

Este procedimiento se emplea para determinar la resistencia al desgaste de los agregados gruesos mediante la simulación de la fricción que estos experimentan bajo condiciones de tráfico y exposición ambiental. Utilizando una máquina de abrasión Los Ángeles, el ensayo consiste en someter a los agregados a un proceso de rotación junto con esferas de acero, lo que simula el desgaste producido por el tráfico. El resultado se expresa como el porcentaje de masa perdida del agregado tras un número específico de revoluciones. La NTE INEN 860 (2011), establece los parámetros y condiciones necesarios para asegurar que los resultados sean consistentes y

comparables, proporcionando así un indicador de la durabilidad y la calidad del material para su uso en pavimentación.

3.4.6. Ensayo Proctor Estándar

Este ensayo tiene como objetivo determinar la densidad máxima de un suelo y su contenido óptimo de agua para obtener la mejor compactación. En el proceso, una muestra de suelo es compactada en un molde con un peso específico de caída estándar y una cantidad de capas predeterminadas. Posteriormente, se mide la densidad obtenida en relación con el contenido de agua, lo que permite determinar la humedad óptima y la densidad máxima del suelo. La norma ASTM D698 (2012), establece los procedimientos y especificaciones necesarios para garantizar la precisión y la replicabilidad del ensayo, incluyendo las condiciones de ejecución y los equipos requeridos.

3.4.7. Ensayo Proctor Modificado

El ensayo del Proctor Modificado se utiliza para determinar la densidad máxima de un suelo y su contenido óptimo de agua, bajo condiciones de compactación más exigentes que las del Proctor Estándar. En este ensayo, la muestra de suelo se compacta en un molde mediante una mayor cantidad de golpes y un mayor peso de caída, lo que aumenta la energía aplicada en comparación con el Proctor Estándar. Esto permite obtener una mayor densidad máxima en suelos más gruesos o con mayor contenido de partículas gruesas. La norma ASTM D1557 (2012), especifica los procedimientos para llevar a cabo este ensayo, incluyendo el equipo, las condiciones y el número de capas de compactación.

3.5. Ensayos in situ

3.5.1. Mancha de Arena

Este procedimiento mide la profundidad de la macrotextura de la superficie del pavimento para evaluar la adherencia y la seguridad vial. Se utiliza un dispositivo para medir las variaciones en altura de la superficie del pavimento, proporcionando un valor que refleja su capacidad de drenaje y la adherencia de los neumáticos. La norma ASTM E 965-96 (2006), detalla el método para determinar la profundidad promedio de las irregularidades superficiales

3.5.2. CBR in situ con el equipo electro-mecánico

Este ensayo se lleva a cabo con el GeoGauge, un instrumento portátil que proporciona un medio simple, rápido y preciso para medir en el lugar dos propiedades como el módulo de Young y de rigidez, tomando como referencia el manual del equipo (AASHTO M-145, 1997). El GeoGauge se puede utilizar para determinar el CBR, mediante fórmulas que se basan en los módulos.

3.5.3. Cono de Arena

Este procedimiento se utiliza para determinar la densidad in situ de suelos, específicamente para medir la densidad seca del suelo en el lugar de prueba. Consiste en verter arena de densidad

conocida en un agujero previamente realizado en el suelo, con lo cual se calcula el volumen de la excavación y, por lo tanto, la densidad del suelo en el lugar. La norma ASTM D1556 (2000), especifica los detalles para realizar el ensayo de manera precisa, incluyendo las condiciones del equipo y las prácticas de ejecución.

3.5.4. Densidad y Grado de Compactación

El método eléctrico para encontrar la densidad y grado de compactación in situ se apoya del Medidor de Densidad (EDG), este es un equipo que permite medir la humedad, la densidad y grado de compactación de los suelos en carreteras y cimientos. Este cuenta con una interfaz amigable que permite al usuario tener una guía en donde se visualizan curvas y un FIT, mismo que debe ser mayor de 0.7 y lo más seco a 1, para garantizar que los datos ingresados y los obtenidos tengan una estrecha relación.

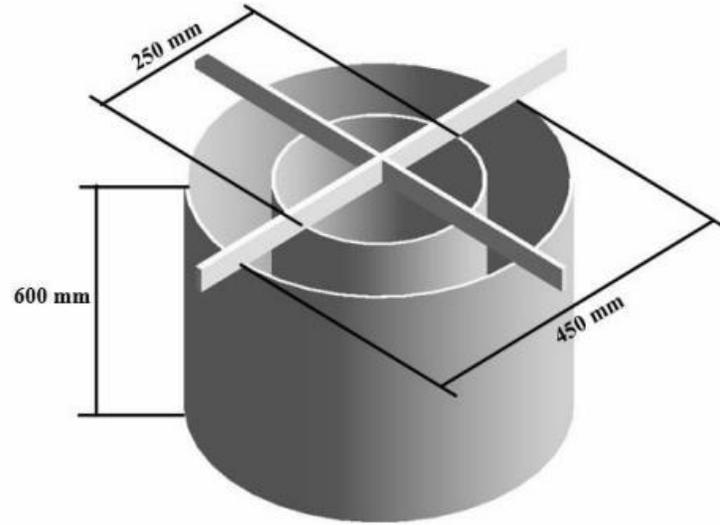
La obtención de la firma eléctrica se lleva a cabo en el punto de estudio, en donde se hará el análisis de dos zonas del mismo punto, utilizando frecuencias de radio altas que viajan entre los dardos insertados en el suelo. Se generan al menos tres registros eléctricos durante el ensayo, los cuales se incorporan a un 'modelo de suelo'. A continuación, se insertó los datos previamente obtenidos del cono de arena y del Proctor y se establece un 'sitio de trabajo' virtual. En este espacio, se comparan las propiedades del suelo obtenidas a partir de las lecturas con el modelo preestablecido. Los datos se ingresan al equipo para generar una curva y verificar su ajuste. Si el ajuste es satisfactorio, se repite el procedimiento en los siguientes puntos del lugar. Y finalmente se obtiene los datos de la densidad, humedad y grado de compactación de las subbases y subrasantes de los diferentes puntos de análisis.

3.5.5. Infiltrómetro

En el presente estudio se adoptó el método descrito en la norma ASTM D3385-03 (2003), con el objetivo de poder determinar la tasa de infiltración. Si bien este método ha demostrado ser eficaz en suelos en campo, se ha identificado la necesidad de realizar ciertas modificaciones para que sea aplicable para pavimento rígido.

El ensayo de infiltración de doble anillo se realiza insertando dos cilindros metálicos concéntricos en la superficie del material a evaluar. El cilindro interior tiene un diámetro de 250 mm y el exterior de 450 mm, ambos con una altura de 600 mm, fabricados en acero galvanizado de 1.5 mm de espesor. El peso total de los cilindros es de 22.5 kg. Se llenan parcialmente con agua, comenzando por el cilindro exterior, y se mantiene el nivel constante durante el ensayo. La cantidad de agua necesaria para reponer el nivel en el cilindro interior se registra como la infiltración del material.

Figura 4: Esquema de infiltrómetro de doble anillo



Fuente: (Cepeda & Rosero, 2024)

Para garantizar un sellado adecuado y evitar fugas laterales, en el contorno inferior de los cilindros se coloca un burlate de caucho con alma metálica, fijado con silicona de uso múltiple al material de la superficie. Además, se distribuyen 60 kg de peso en cuatro puntos del marco del infiltrómetro (15 kg por lado) para asegurar la estabilidad y el contacto adecuado con la superficie.

Figura 5: Burlate de caucho



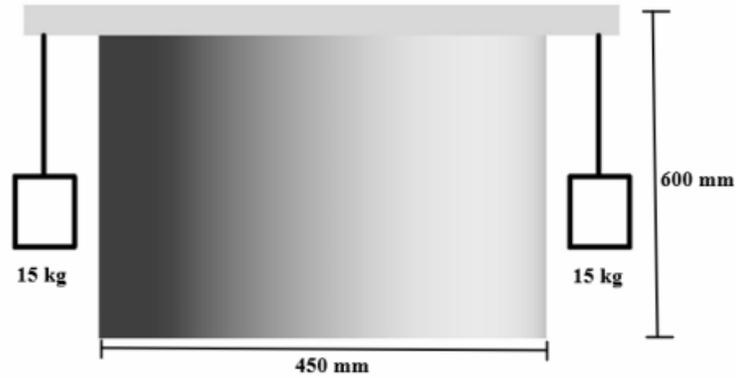
Fuente: Elaboración propia

Figura 6: Sellado de silicona



Fuente: Elaboración propia

Figura 7: Vista lateral del infiltrómetro



Fuente: (Cepeda & Rosero, 2024)

El coeficiente de infiltración se calcula como el porcentaje del volumen de agua infiltrado en relación con el volumen inicial. Por otro lado, el coeficiente de escurrimiento se obtiene restando dicho porcentaje a 100%. Estos parámetros permiten evaluar la capacidad de infiltración del suelo o pavimento flexible.

CAPÍTULO IV.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1.RESULTADOS CARACTERÍSTICAS FÍSICAS

4.1.1. Ensayo de Granulometría

Granulometría, Subbase

Tabla 1. Análisis Granulométrico de la Subbase Clase 2

Abertura del Tamiz	P1	P2	P3	P4	P5	PROMEDIO		Límite superior (%)	Límite inferior (%)	Arenas (%)	Gravas (%)	DESCRIPCIÓN DE LA MUESTRA	
Tamiz (ASTM)	(mm)	Pasante %											
2"	50	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00		100	100		SUBBASE CLASE 2	
1 1/2"	38,1	89,70	100,00	100,00	100,00	81,49	94,24	Grava	100	70		Procedencia del Material:	
1"	25	81,39	77,54	94,36	94,10	75,62	84,60	Gruesa				Av. Edelberto Bonilla Oleas	
3/4"	19	74,27	73,46	92,10	84,56	73,90	79,66					ubicada en la ciudad de	
1/2"	12,5	65,46	65,80	85,82	71,21	67,94	71,25					Riobamba	
3/8"	9,5	59,83	60,21	81,91	66,32	66,33	66,92	Grava Fina			55,33	42,63	Profundidad de extracción: 30 cm
No. 4	4,75	51,42	48,25	70,83	57,07	59,26	57,37		70	30			Peso de la Muestra: 1000 g
No. 8	2,36	44,21	38,11	59,24	48,80	49,94	48,06						
No. 10	2	42,48	35,87	55,54	46,70	47,30	45,58	Arena Gruesa					
No. 40	0,425	16,60	16,42	21,90	20,89	21,06	19,37		40	15			
No. 100	0,15	3,92	4,34	6,04	5,41	6,42	5,22	Arena					
No. 200	0,075	1,62	1,60	2,15	2,18	2,63	2,04	Fina	20	0			
Coeficiente Uniformidad Cu		34,03	33,77	11,51	27,00	24,16	26,09						
Coeficiente Curvatura Cc		0,57	0,89	1,18	0,66	0,81	0,82						
Clasificación SUCS		SP	GP	SW	SP	SP	SP						
Clasificación AASTHO		A-1b	A-1a	A-1b	A-1b	A-1b	A-1b						

En la Tabla 1 se exponen los resultados del análisis granulométrico realizado en la subbase, mostrando una predominancia de partículas de arena con un porcentaje del 55.33 %, el cual es mayor que el de la grava. El presente análisis ofrece un fundamento para la clasificación y evaluación de la adecuación del material de acuerdo con normas técnicas. Se calcularon los coeficientes de uniformidad (Cu) y curvatura (Cc) del material con el fin de determinar sus características granulométricas, los cuales son parámetros fundamentales de acuerdo con el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS). Los valores obtenidos de Cu y Cc, siendo $Cu = 26.09$ y $Cc = 0.82$, señalan que el material se clasifica como una arena pobremente gradada (SP), de acuerdo con los parámetros definidos en la norma ASTM D2487 (2010). La clasificación mencionada evidencia que las partículas de arena exhiben una distribución de tamaños restringida, la cual puede tener un impacto en la compactación y permeabilidad del material.

En adición, la subbase ha sido categorizada como Tipo 2, de acuerdo con la normativa MOP-001-F (2002) establecida por el Ministerio de Obras Públicas de Ecuador. Esta clasificación indica que el material es apto para su empleo en estructuras de pavimento diseñadas para resistir cargas de moderada intensidad. La clasificación Tipo 2 se fundamenta en criterios de resistencia y tamaño de partículas que aseguran la estabilidad y resistencia del pavimento en condiciones operativas normales. Esto garantiza que el material cumpla con los requisitos técnicos indispensables para preservar la funcionalidad del pavimento, reduciendo al mínimo los riesgos de deformaciones o fallas estructurales a lo largo de su período de uso. Las características mencionadas convierten a la subbase en una opción apropiada para ser utilizada en proyectos de infraestructura vial, logrando un equilibrio entre la economía y el rendimiento técnico.

Granulometría, Subrasante

Tabla 2. Análisis Granulométrico de la Subrasante

Abertura del Tamiz		P1	P2	P3	P4	P5	PROMEDIO	Material Obtenido	Límite superior (%)	Límite inferior (%)	Arenas (%)	Gravas (%)	DESCRIPCIÓN DE LA MUESTRA	
Tamiz (ASTM)	(mm)	Pasante %	Pasante %	Pasante %	Pasante %	Pasante %	Pasante %							
2"	50	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00		100	100			SUBRASANTE	
1 1/2"	38.1	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	Grava Gruesa	100	70			Procedencia del Material:	
1"	25	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	GRAVA					Av. Edelberto Bonilla	
3/4"	19	100.00	98.02	100.00	100.00	98.30	99.26							Oleas ubicada en la ciudad de Riobamba
1/2"	12.5	100.00	95.63	96.39	99.51	97.03	97.71							Profundidad de la extracción: 50 cm
3/8"	9.5	98.99	93.13	93.44	98.94	95.94	96.09		Grava Fina			72.28	27.72	Peso de la Muestra: 1000 g
No. 4	4.75	98.42	88.59	86.90	96.40	91.57	92.37		70	30				
No. 8	2.36	97.50	82.54	80.13	94.62	87.09	88.38							
No. 10	2	97.22	80.76	78.18	94.03	85.69	87.18	Arena Gruesa						
No. 40	0.425	73.25	45.50	53.29	70.01	67.54	61.92	ARENA	40	15				
No. 100	0.15	19.62	6.23	20.35	18.80	28.93	18.78		Arena Fina	20	0			
No. 200	0.075	5.39	1.54	8.73	6.01	11.13	6.56							
Fondo		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00							
													Clasificación SUCS	
Coeficiente Uniformidad Cu		3.60	6.08	10.21	3.77	5.29	5.79						Arenas mal graduadas, arenas con grava, pocos finos o sin finos (SP)	
Coeficiente Uniformidad Cc		1.17	0.53	0.75	1.21	0.95	0.92							
Clasificación AASTHO		A-3	A -1b	A-3	A-3	A-3	A-3							

En los distintos puntos de estudio, se presentan en la Tabla 2 los resultados del análisis granulométrico realizado sobre la subrasante, ofreciendo información fundamental acerca de la composición del material. Según los datos, el material está mayoritariamente conformado por partículas de arena, representando un 72.28 % del total, en contraste con una proporción notablemente inferior de grava. La predominancia de partículas de tamaño intermedio en esta distribución granulométrica influye directamente en el comportamiento mecánico e hidráulico del suelo.

Los coeficientes de uniformidad (C_u) y curvatura (C_c) fueron calculados para la clasificación del material de acuerdo con el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS). Los valores obtenidos de C_u y C_c , siendo $C_u = 5.79$ y $C_c = 0.92$, señalan que el material se clasifica como arenas mal graduadas con grava y pocos finos (SP), de acuerdo con los parámetros definidos en la norma ASTM D2487 (2010). La clasificación mencionada indica que las partículas de arena no presentan una distribución homogénea de tamaños, lo cual puede provocar una disminución en la capacidad de compactación y estabilidad en contraste con suelos correctamente graduados. La presencia reducida de partículas finas también puede impactar la cohesión del suelo y tener efectos en su permeabilidad.

La obtención de la clasificación es esencial para comprender las limitaciones y beneficios del material como capa inferior. Debido a su baja graduación, el material puede presentar una resistencia limitada a la deformación cuando se somete a cargas elevadas. No obstante, su alta permeabilidad lo convierte en una opción apropiada para proyectos en los que el drenaje juega un papel crucial. La información proporcionada es fundamental para el diseño y la implementación de proyectos de infraestructura, lo cual posibilita la toma de decisiones fundamentadas en cuanto a la preparación y el fortalecimiento del terreno con el fin de cumplir con las exigencias estructurales y de resistencia al paso del tiempo del proyecto (ASTM D2487, 2010).

Figura 9: Curva Granulométrica de la Sub Base

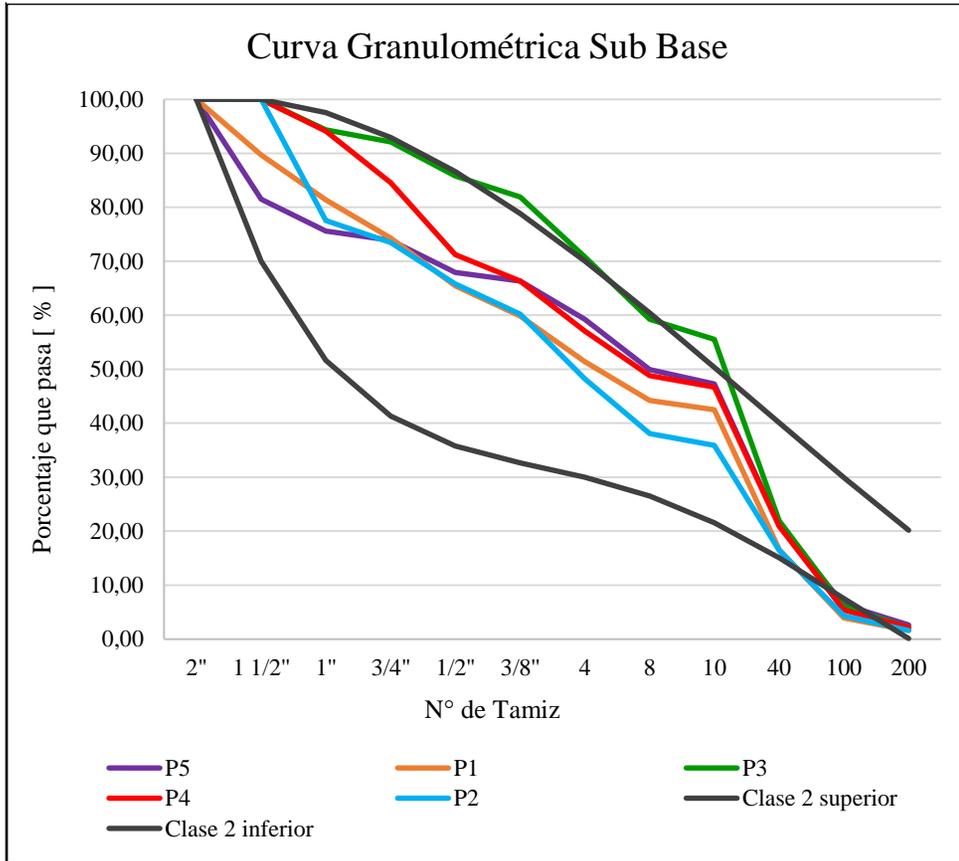
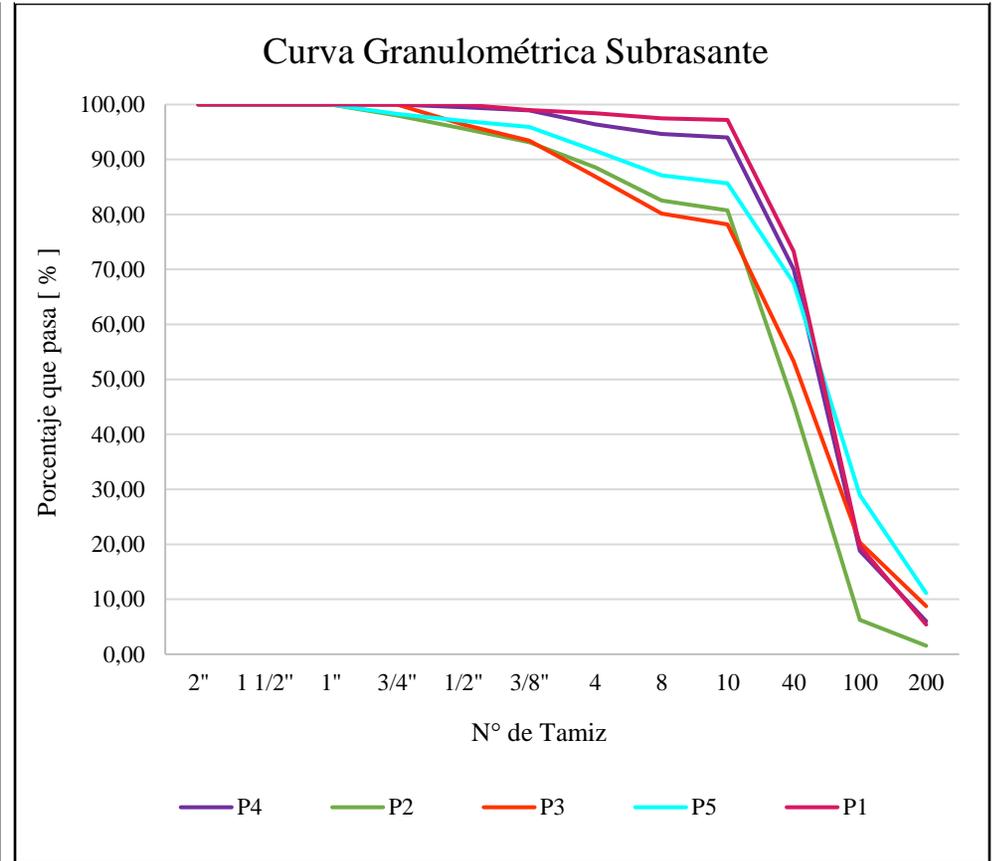


Figura 8: Curva Granulométrica de la Subrasante



Fuente: Elaboración propia

En las figuras 8 y 9 se exhiben las curvas granulométricas de la sub base y subrasante evaluada en los distintos puntos de estudio, lo cual posibilita el análisis de la distribución de tamaños de las partículas del suelo. Las curvas presentadas ofrecen un análisis detallado de la composición del material, evidenciando que, en los puntos mencionados, el suelo está mayoritariamente compuesto por partículas de arena y finos, con una presencia menor de elementos más gruesos, como la grava. La comprensión de las propiedades físicas y mecánicas del suelo es fundamental, siendo el comportamiento granulométrico un aspecto clave en este análisis. La proporción de partículas de arena y finos tiene un impacto significativo en la capacidad de compactación, permeabilidad y resistencia del suelo.

El examen de las curvas granulométricas posibilita la identificación de patrones en la distribución de partículas, poniendo de manifiesto similitudes entre los diferentes puntos analizados. La presencia predominante de partículas de arena en un suelo sugiere una cohesión natural reducida. Por otro lado, la presencia de partículas finas puede afectar el comportamiento del suelo en presencia de humedad, pudiendo incrementar su plasticidad o disminuir su permeabilidad.

4.1.2. Ensayo de Límite Líquido y Plástico

Tabla 3. Determinación de Límites de Consistencia (Líquido y Plástico)

Capa	Puntos	Límite Líquido % [LL]	Consistencia
Subrasante	P1	22.10	No Plástico
	P2	18.42	
	P3	17.55	
	P4	18.43	
	P5	23.82	
	Promedio	20.06	
Subbase	P1	13.21	No Plástico
	P2	11.64	
	P3	12.61	
	P4	16.73	
	P5	13.77	
	Promedio	13.59	
Limite Plástico [LP]		No existe	
Índice de plasticidad [IP]		No aplica	

Fuente: Elaboración propia

Los resultados de los límites de Atterberg para la subrasante y la subbase en los puntos de estudio se muestran en la tabla 3. Según los datos recopilados, se observa que ninguno de los puntos evaluados exhibe un límite plástico, lo cual denota la inexistencia de plasticidad en dichos

materiales. La relevancia de esta característica radica en su indicación de la baja propensión del suelo a experimentar deformaciones permanentes ante cargas o niveles de humedad. Los resultados obtenidos tanto en la subrasante como en la subbase son consistentes con las especificaciones técnicas definidas para dichos materiales.

Según lo establecido en la norma MOP-001-F (2002), sección 814, los materiales empleados en bases y subbases viales deben satisfacer un índice de plasticidad menor al 6 % y un límite líquido que no supere el 25 % en el caso de la subbase y 35% para la subrasante. Los resultados obtenidos indican que el límite líquido es del 20.06 % para la subrasante y del 13.59 % para la subbase, cifras que se encuentran dentro de los límites establecidos por la normativa vigente. La confirmación de que los materiales cumplen con los requisitos establecidos garantiza su idoneidad para ser utilizados en infraestructuras viales. Los valores señalan que tanto la subbase como la subrasante presentan propiedades favorables en cuanto a estabilidad y resistencia, atributos esenciales para resistir las cargas y condiciones ambientales a las que se enfrentarán en el proyecto.

4.1.3. Ensayo de Densidad y Absorción

Tabla 4. Densidad y Absorción de Agregados para Subbase

DENSIDAD Y ABSORCIÓN DEL AGREGADO (SUBBASE)				
Descripción	Variable	Grueso	Fino	Unidad
Densidades Relativas				
Gravedad específica seca al horno	SG_{SH}	2,337	2,570	-
Gravedad específica saturada superficialmente seca	SG_{SSS}	2,396	2,662	-
Gravedad específica aparente	SG_A	2,483	2,832	-
Densidad				
Densidad seca al horno	d_{SH}	2333,007	2564,901	(kg/m ³)
Densidad saturada superficialmente seca	d_{SSS}	2391,459	2656,980	(kg/m ³)
Densidad aparente	d_A	2478,100	2826,270	(kg/m ³)
Absorción				
Porcentaje de absorción del material	Abs	2,508	3,866	%

Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 4 se presentan de manera concisa los resultados obtenidos del análisis de densidad y absorción llevado a cabo en los agregados fino y grueso de la subbase. Estos datos ofrecen información fundamental para la evaluación de la calidad y el desempeño del material en

situaciones reales de aplicación. Se logró obtener una densidad saturada superficialmente seca (SSS) de 2391.459 kg/m³ y un índice de absorción del 2.508 % para el agregado grueso. Los valores mencionados representan las características físicas del material, señalando una densidad apropiada y una capacidad de absorción moderada que puede afectar el equilibrio de humedad del concreto o la mezcla en la que se emplee. En relación al agregado fino, los datos obtenidos revelan una densidad SSS de 2656.980 kg/m³ y un índice de absorción del 3.866%, indicando que este material es más compacto y presenta una mayor capacidad de absorción de agua en contraste con el agregado grueso.

Según la normativa MOP-001-F (2002) del Ministerio de Obras Públicas de Ecuador, los materiales empleados en las subbases deben satisfacer determinados parámetros de densidad y absorción con el fin de asegurar su eficacia y resistencia a largo plazo. La densidad del material debe encontrarse en el rango de 2200 a 2700 kg/m³, y el índice de absorción debe oscilar entre el 2 % y el 8 %. Los resultados obtenidos para ambos tipos de agregado confirman que los materiales evaluados son adecuados para su utilización en subbases, tanto en términos de resistencia como de respuesta ante la humedad. Estas especificaciones son cumplidas satisfactoriamente. Los valores mencionados garantizan que los agregados posean la estabilidad requerida para soportar cargas estructurales y resistir las condiciones ambientales, lo cual contribuye a la calidad global de la infraestructura.

Tabla 5. Densidad y Absorción de Agregados para Subrasante

DENSIDAD Y ABSORCIÓN DEL AGREGADO (SUBRASANTE)			
Descripción	Variable	Valor	Unidad
Densidades Relativas			
Gravedad específica seca al horno	SG_{SH}	2,254	-
Gravedad específica saturada superficialmente seca	SG_{SSS}	2,420	-
Gravedad específica aparente	SG_A	2,704	-
Densidad			
Densidad seca al horno	d_{SH}	2249,598	(kg/m ³)
Densidad saturada superficialmente seca	d_{SSS}	2415,123	(kg/m ³)
Densidad aparente	d_A	2698,835	(kg/m ³)
Absorción			
Porcentaje de absorción del material	Abs	7,268	%

Fuente: Elaboración propia

Los resultados del ensayo de densidad y absorción realizados sobre el agregado fino de la subrasante se presentan en la Tabla 5. En el análisis granulométrico inicial se determinó que el contenido de agregado grueso en la subrasante era inferior al 15%, lo cual fundamentó la elección de no llevar a cabo la prueba correspondiente para dicho material. Los datos obtenidos para el agregado fino revelan una densidad saturada superficialmente seca (SSS) de 2415.123 kg/m³ y un índice de absorción del 7.268 %. Los valores mencionados representan atributos significativos del material, especialmente en lo que respecta a su capacidad de reacción ante la humedad y su respuesta bajo diferentes niveles de carga.

De acuerdo con la normativa MOP-001-F (2002) del Ministerio de Obras Públicas de Ecuador, se establece que el índice de absorción de agua para los materiales de subrasante debe situarse dentro de un intervalo comprendido entre el 2 % y el 8 %, a su vez, la densidad debe oscilar entre 1800 y 2200 kg/m³. Aunque el valor de densidad del agregado fino excede levemente el límite superior establecido por la normativa, este resultado es favorable, puesto que sugiere un material con una densidad que garantiza una mayor resistencia y estabilidad ante las cargas aplicadas. Asimismo, el índice de absorción se sitúa en el intervalo aceptable, lo cual indica que el material posee una capacidad idónea para retener agua sin afectar su integridad estructural. Los resultados obtenidos respaldan la idoneidad del material para ser utilizado como subrasante en proyectos de infraestructura. Se destaca su capacidad para satisfacer los requisitos técnicos fundamentales y para mejorar la durabilidad y funcionalidad de la estructura.

4.1.4. Ensayo Proctor

Tabla 6. Humedad óptima y densidad seca en Subrasante y Sub base

Capa del Pavimento	Puntos de análisis	Humedad [%]	Densidad Seca [T/m ³]
Subrasante	1	12.500	1.584
	2	12.050	1.701
	3	12.000	1.730
	4	12.125	1.616
	5	11.773	1.680
	Desviación Estándar	0.264	0.061
	Promedio	12.090	1.662
Sub base	1	8.513	1.999
	2	6.750	2.141
	3	3.286	2.032
	4	6.389	2.000
	5	6.846	2.001
	Desviación Estándar	1.902	0.061
	Promedio	6.357	2.035

Los resultados de los ensayos Proctor, presentados en la tabla 6, revelan una notable diferencia en las características de compactación entre la subrasante y la subbase. La subrasante, con una humedad óptima promedio de 12.09% y una densidad máxima seca de 1.662 T/m³, presenta valores más elevados en comparación con la subbase, que alcanza su máxima densidad (2.035 T/m³) a una humedad óptima promedio de solo 6.35%. Esta variabilidad se atribuye principalmente a la diferencia en la composición granulométrica, siendo la subrasante más rica en finos (limos y arcillas) que la subbase.

En el análisis comparativo de los resultados del ensayo Proctor realizado en diferentes tipos de pavimento y zonas, se observa una clara variabilidad en las características de compactación entre la subrasante y la subbase, tanto en el estudio de pavimento rígido en la Av. Edelberto Bonilla Oleas como en el de pavimento flexible del corredor vial Riobamba-Flores. En el presente estudio la subrasante presenta una humedad óptima promedio de 12.09% y una densidad máxima seca de 1.662 T/m³, mientras que la subbase alcanza su máxima densidad de 2.035 T/m³ a una humedad óptima promedio de solo 6.35%. Esta diferencia en la humedad óptima y la densidad máxima seca se atribuye a la composición granulométrica de los materiales, donde la subrasante es más rica en finos (limos y arcillas) en comparación con la subbase, que está compuesta principalmente por partículas más grandes, como arena. Este fenómeno se alinea con lo que se menciona en el estudio según Aucapiña Ricardo & Jiménez Wilmer (2024), donde la subrasante también requiere un mayor contenido de agua para alcanzar su densidad máxima, con un promedio de humedad óptima de 16.19% y una densidad máxima de 1.707 T/m³.

4.1.5. Ensayo Espesor del Pavimento Rígido

Tabla 7. Espesores del Pavimento Rígido

Capas	P1 [cm]	P2 [cm]	P3 [cm]	P4 [cm]	P5 [cm]	Promedio [cm]
Losa de concreto	24	26	23	30	27	26
Sub base	18.5	19	13	21	18	17.9

Fuente: Elaboración propia

En la tabla 6 se puede apreciar que se ha obtenido un valor promedio de 26 cm para la losa del pavimento rígido, mismo que se encuentra dentro de los rangos típicos para carreteras y autopistas (16-20 cm). Sin embargo, el valor máximo de 30 cm sugiere que en algunos puntos se ha sobredimensionado el espesor. Así también el valor promedio para la sub base es de 17.9 cm es un valor relativamente bajo, especialmente considerando los espesores de la losa. Una subbase más gruesa podría mejorar la capacidad portante del pavimento y prolongar su vida útil.

4.1.6. Ensayo de Abrasión (Máquina de los Ángeles)

Tabla 8. Abrasión con Máquina de los Ángeles

Punto	Procedencia del Material	Número de vueltas	Tipo de Abrasión	Número de Esferas	Cantidad Inicial [g]	Cantidad Final [g]	Perdida [g]	Porcentaje de degradación [%]
1	Av. Edelberto Bonilla Oleas	500	A	12	5000	3400	1600	32.00%
2		500	B	11	5000	3500	1500	30.00%
3		500	D	6	5000	3548	1452	29.04%
4		500	D	6	5000	3513	1487	29.74%
5		500	B	11	5000	3463	1537	30.74%

Fuente: Elaboración propia

Los resultados del porcentaje de desgaste por abrasión para cada punto de estudio se muestran en la tabla 7, evidenciando las disparidades en la degradación de los materiales analizados. Se realizaron múltiples ensayos para este análisis, dado que cada punto exhibía atributos específicos que afectaban el tipo de abrasión observada. En los resultados obtenidos, se observó que el punto número 1 presentó la mayor tasa de degradación, alcanzando un valor del 32 %. Esta cifra se determinó luego de someter el material a 500 ciclos en la máquina de Los Ángeles, siguiendo los protocolos establecidos por las normativas INEN 860 y 861.

El porcentaje de desgaste por abrasión es un indicador fundamental para la evaluación de la resistencia mecánica de los agregados ante impactos y fricción, aspectos esenciales en aplicaciones como las bases y subbases de pavimentos. Un nivel de desgaste del 32 % indica que el material exhibe una resistencia moderada al desgaste, lo cual se considera un valor aceptable según las normativas vigentes. Por lo general, estas normas establecen un límite máximo del 40 % para este parámetro. El resultado obtenido sugiere que, a pesar de que el material del punto 1 experimenta una mayor degradación en comparación con los otros puntos analizados, sigue cumpliendo con los estándares técnicos necesarios para su utilización, lo que asegura un rendimiento adecuado en situaciones operativas habituales. La información mencionada resulta esencial para la toma de decisiones fundamentadas en la planificación y elección de materiales en iniciativas de construcción de carreteras.

4.1.7. Ensayo de grado de compactación

Tabla 9. Grado de Compactación (EDG)

ENSAYO DE CAMPO CON EL EQUIPO (EDG)

Capa	Puntos de control	Densidad Húmeda [Kg/m ³]	Densidad Seca [Kg/m ³]	Humedad In Situ	Grado de Compactación Proctor [%]	Grado de Compactación [%]	Factor de Ajuste Teórico
SUBBASE	P1	1496.000	1319.000	13.40%	97.62%	66.30%	0.614

	P2	1404.000	1293.000	8.60%	93.51%	65.00%	
	P3	1322.000	1220.000	8.20%	97.69%	60.10%	
	P4	1652.000	1458.000	13.30%	98.18%	72.90%	
	P5	1306.000	1203.000	8.60%	98.37%	60.10%	
	Promedio	1436.000	1298.600	10.42%	97.07%	64.88%	
SUBRASANTE	P1	1244.000	1119.000	11.10%	96.83%	70.80%	0.744
	P2	1272.000	1135.000	12.00%	96.92%	71.70%	
	P3	1259.000	1119.000	12.50%	96.25%	69.30%	
	P4	1329.000	1238.000	7.40%	95.69%	73.70%	
	P5	1284.000	1173.000	9.40%	96.64%	69.80%	
	Promedio	1277.600	1156.800	10.48%	96.47%	71.06%	

Fuente: Elaboración propia

Tabla 10. Grado de Compactación (Cono de Arena)

ENSAYO DE CONO DE ARENA						
Capa	Puntos de control	Densidad Húmeda [Kg/m ³]	Densidad Seca [Kg/m ³]	Humedad In Situ	Grado de Compactación Proctor [%]	Grado de Compactación [%]
SUBBASE	P1	1273.498	1128.433	12.86%	97.62%	67.91%
	P2	1243.958	1146.193	8.53%	93.51%	68.98%
	P3	1226.741	1143.017	7.32%	97.69%	69.09%
	P4	1275.193	1167.258	9.25%	98.18%	73.54%
	P5	1218.963	1124.278	8.42%	98.37%	71.53%
	Promedio	1212.816	1102.816	9.97%	97.07%	70.21%
SUBRASANTE	P1	1221.801	1102.127	10.86%	96.83%	60.60%
	P2	1185.266	1075.704	10.19%	96.92%	58.89%
	P3	1262.033	1125.894	12.09%	96.25%	62.05%
	P4	1178.421	1099.755	7.15%	95.69%	61.30%
	P5	1216.556	1110.602	9.54%	96.64%	63.94%
	Promedio	1247.671	1141.836	9.28%	96.47%	61.36%

Fuente: Elaboración propia

Los resultados del ensayo de campo realizado con un densímetro eléctrico y con el cono de arena se muestran en la Tabla 9 y 10 respectivamente. Estos ensayos se utilizaron para analizar la compactación del material en la subbase y la subrasante. El presente estudio posibilitó la determinación en la que la subbase logró un nivel de compactación promedio del 64.88 % con el equipo EDG y de 69.11% con el cono de aren, teniendo una variación de 4.23% con un factor de ajuste teórico (FIT) de 0.614, en contraste, la subrasante mostró un porcentaje promedio del 71.06 % con el equipo EDG y un 65.58% con el cono de arena en la que la variación fue de 5.48% con un factor de ajuste teórico (FIT) de 0.744.

En el estudio de Alvear Jonathan & Piñas Eduardo (2024) que se realizó en distintas zonas de Riobamba se logró determinar valores promedios de compactación de la subrasante de 73,36% con el cono de arena y de 68% con el equipo EDG con una variación de 5.36%, Esta diferencia podría atribuirse a variaciones en las condiciones específicas de cada zona, como el tipo de material, las técnicas de compactación o factores ambientales que influyen en los resultados. Además, la variación entre los métodos en ambos estudios es similar, con 5.48% en este análisis y 5.36% en el estudio mencionado, lo que sugiere que la discrepancia entre los resultados obtenidos por el equipo EDG y el cono de arena es consistente, independientemente de las zonas específicas estudiadas.

4.2.RESULTADOS CARACTERÍSTICAS MECÁNICAS

4.2.1. Ensayo Geo Gauge

4.2.1.1.Geo Gauge, Subrasante

Tabla 11. Rigidez, Elasticidad y Cálculo del CBR de la Subrasante

SUBRASANTE DEL PAVIMENTO RÍGIDO									
DATO DE CAMPO DEL GEOGAUGE					CÁLCULOS				
Puntos de Control	Modulo			Limite Liquido [%]	Humedad Optima [%]	% CBR Ecuación 1	% CBR Ecuación 2	% CBR Ecuación 3	% CBR Ecuación 4
	Rigidez [MN/m]	Young [MPa]	Elasticidad [PSI]						
P1	4,30	31,900	4615,419	23,820	27,430	-	-	4,899	17,526
P2	8,34	61,817	8943,883	18,420	22,410	14,634	11,105	12,126	26,193
P3	6,19	45,897	6640,513	18,410	22,080	5,488	-	8,064	26,740
P4	6,68	49,493	7160,893	22,090	25,100	7,324	0,152	8,942	20,535
P5	8,23	61,050	8832,958	17,550	24,190	14,132	10,490	11,920	24,133
Promedio	6,748	50,031	7238,733	20,058	24,242	10,394	7,249	9,190	23,026

Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 9 se exponen los resultados de los ensayos llevados a cabo en cinco subrasantes, evaluadas en distintos puntos de estudio, en los cuales se calcularon los promedios del módulo de rigidez y el módulo de Young empleando el dispositivo GeoGauge. Se incorporaron los valores del límite líquido y la humedad óptima obtenidos a través de pruebas de Atterberg, lo que permitió realizar un análisis completo de las propiedades mecánicas y de consistencia del suelo. Los valores promedio del Índice de Soporte California (CBR) fueron determinados a través de la aplicación de cuatro ecuaciones diferentes, resultando en cifras de 10.39, 7.249, 9.19 y 23.026 respectivamente. Destaca que la última fórmula establece una correlación directa entre el límite líquido y la humedad óptima.

Según lo establecido en la norma MOP-001-F (2002), se establece que un índice CBR mayor al 10 % se considera apropiado para subrasantes, ya que asegura una capacidad de soporte

adecuada ante las cargas previstas. En el presente estudio, se observa que los puntos cuyos valores de CBR son inferiores al umbral establecido, tales como 7.249 y 9.19, señalan que las subrasantes en cuestión no satisfacen los criterios determinados, lo que sugiere la posible necesidad de aplicar procesos de estabilización con el fin de optimizar su comportamiento. Por otra parte, los puntos que poseen valores elevados, como 23.026, satisfacen completamente los estándares normativos, lo cual los categoriza como materiales adecuados para ser utilizados en la infraestructura planificada. Los resultados obtenidos son esenciales para la toma de decisiones en cuanto al diseño y la mejora de las capas inferiores de pavimento, garantizando que la estructura satisfaga los requisitos de resistencia y durabilidad establecidos en el proyecto.

4.2.1.2. Geo Gauge, Subbase

Tabla 12. Propiedades Mecánicas y Cálculo del CBR de la Subbase

SUBBASE DEL PAVIMENTO RIGIDO									
DATO DE CAMPO DEL GEOGAUGE						CÁLCULOS			
Puntos de Control	Modulo			Limite Liquido [%]	Humedad Optima [%]	% CBR Ecuación 1	% CBR Ecuación 2	% CBR Ecuación 3	% CBR Ecuación 4
	Rigidez [MN/m]	Young [MPa]	Elasticidad [PSI]						
P1	7,13	52,540	7601,697	12,600	18,580	9,174	3,095	9,704	40,692
P2	6,79	50,387	7290,144	13,200	18,110	7,785	1,033	9,164	41,220
P3	6,58	48,820	7063,473	11,640	18,410	6,961	-	8,776	42,812
P4	6,97	51,657	7473,893	16,730	19,920	8,485	2,260	9,482	32,261
P5	7,23	53,560	7749,275	13,770	19,090	9,567	4,042	9,963	37,565
Promedio	6,941	51,393	7435,697	13,588	18,822	8,395	2,608	9,418	38,910

Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 10 se exhiben los resultados de los ensayos llevados a cabo en una subbase, donde se evaluaron parámetros fundamentales como el módulo de rigidez y el módulo de Young, los cuales fueron determinados utilizando el equipo GeoGauge. Asimismo, se incluyen los valores del límite líquido y la humedad óptima obtenidos a través de los ensayos de Atterberg. Se calcularon los valores promedio del Índice de Soporte California (CBR) mediante cuatro ecuaciones diferentes. Los resultados obtenidos fueron 8.395, 2.068, 9.418 y 38.910 respectivamente. Destaca que la última ecuación establece una correlación directa entre el límite líquido y la humedad óptima. La ecuación mencionada fue utilizada como punto de referencia principal, ya que se presentaron obstáculos para acceder directamente a la capa de pavimento rígido durante la recolección de datos con el equipo.

De acuerdo con la normativa MOP-001-F (2002), se considera que una subbase es apropiada cuando su Índice de Soporte California (CBR) es igual o superior al 30 %, lo que garantiza su aptitud para resistir cargas estructurales y cumplir con los requisitos de resistencia

establecidos en proyectos de infraestructura vial. En el presente estudio, se observa que los puntos con valores de CBR bajos, por ejemplo 2.068, denotan un rendimiento inadecuado del material, lo cual sugiere la conveniencia de implementar procesos de estabilización o sustitución con el fin de elevar sus propiedades mecánicas. Por otra parte, el valor de 38.910 cumple con los criterios normativos, lo cual sitúa al material de ese punto como adecuado para ser utilizado en la subbase. Los resultados obtenidos resaltan la relevancia de la correcta selección y adaptación de los materiales con el fin de asegurar la estabilidad y resistencia a la abrasión del pavimento. Asimismo, enfatizan la conveniencia de emplear correlaciones empíricas en situaciones donde las restricciones del entorno impiden la realización de mediciones directas.

4.2.2. Macrotextura

Tabla 13. Círculo de arena

Puntos	Unidad	Diámetro C1	Altura	Diámetro C2	Altura	Diámetro C3	Altura	Diámetro C4	Altura	MTD
1		145.50	1.50	143.25	1.55	168.50	1.12	171.75	1.08	1.31
2		179.25	0.99	162.50	1.21	173.75	1.05	201.50	0.78	1.01
3	[mm]	150.25	1.41	137.25	1.69	145.75	1.50	138.50	1.66	1.56
4		158.50	1.27	173.00	1.06	169.50	1.11	154.00	1.34	1.20
5		165.50	1.16	148.75	1.44	160.25	1.24	150.50	1.41	1.31

Fuente: Elaboración propia

Los resultados del ensayo del círculo de arena en mm, llevado a cabo en varios puntos de estudio para analizar la macrotextura del pavimento rígido, se muestran en la Tabla 11. La importancia de este ensayo radica en la determinación de la profundidad media de la macrotextura (MTD), un parámetro esencial que impacta directamente en las características de fricción superficial de la superficie del pavimento y en su eficacia para drenar el agua en situaciones de lluvia. Los datos recolectados revelan que la altura promedio mínima es de 1.01 mm y la máxima es de 1.56 mm, lo cual indica una moderada variabilidad en la textura superficial en los puntos analizados.

Según lo establecido en el estándar ASTM E 965-96 (2006), se considera que los valores aceptables de profundidad de macrotextura deben estar comprendidos en el rango de 0.6 mm a 1.2 mm ($0.6 \text{ mm} \leq \text{MTD} \leq 1.2 \text{ mm}$). Esto se hace con el fin de asegurar un equilibrio apropiado entre la fricción del pavimento y la comodidad durante la conducción. A pesar de que la mayoría de los resultados se encuentran dentro de este intervalo, algunos valores que exceden el límite superior podrían sugerir una textura excesivamente áspera, lo cual podría resultar en un desgaste prematuro de los neumáticos. Por otra parte, los valores cercanos al límite inferior podrían indicar una textura del suelo menos eficiente en cuanto al drenaje de agua. La evaluación del desempeño del pavimento en cuanto a seguridad y durabilidad se basa en datos fundamentales que permiten

identificar posibles áreas de mantenimiento o ajustes en el diseño con el fin de mejorar las condiciones de uso.

4.3.RESULTADOS CARACTERÍSTICAS HIDRÁULICAS

Ensayo In Situ

Ensayo de Infiltración con el instrumento de doble anillo

Tabla 14. Infiltración con el instrumento de doble anillo

DATOS DE CAMPO			
Fecha:	Miércoles, 07 de Agosto de 2024		
Ciudad:	Riobamba-Chimborazo		
Lugar:	Avenida Edelberto Bonilla Oleas		
Clima:	Despejado	Estado de la vía:	Bueno
Coordenada del punto:		ESTE	763248,745
		NORTE	9814958,648
INTERVALO		TIEMPO (Hora)	h (cm)
-	7:30 a. m.	0 Horas	10
7:30 a. m.	9:30 a. m.	2 Horas	10,1
9:30 a. m.	11:30 a. m.	2 Horas	10,25
11:30 a. m.	1:30 p. m.	2 Horas	10,3
1:30 p. m.	3:30 p. m.	2 Horas	10,31
3:30 p. m.	5:30 p. m.	2 Horas	10,33
5:30 p. m.	7:30 p. m.	2 Horas	10,35
7:30 p. m.	9:30 p. m.	2 Hora	10,351
<p>Observaciones: La zona de ensayo no presenta agrietamientos, además el infiltrometro fue colocado en la mitad de la losa del pavimento. El clima se mantuvo despejado durante todo el ensayo.</p>			

Fuente: Elaboración propia

Tabla 15. Análisis de Fragmento de Infiltración y Coeficiente de Escorrentía.

Muestra	Fragmento de Infiltración (%)	Escorrentía c (%)
1	1,31%	98,7%
2	0,70%	99,3%
3	0,53%	99,5%
4	1,12%	98,9%
5	0,30%	99,7%
promedio	0,8%	99,2%
mínimo	0,3%	98,7%
máximo	1,3%	99,7%

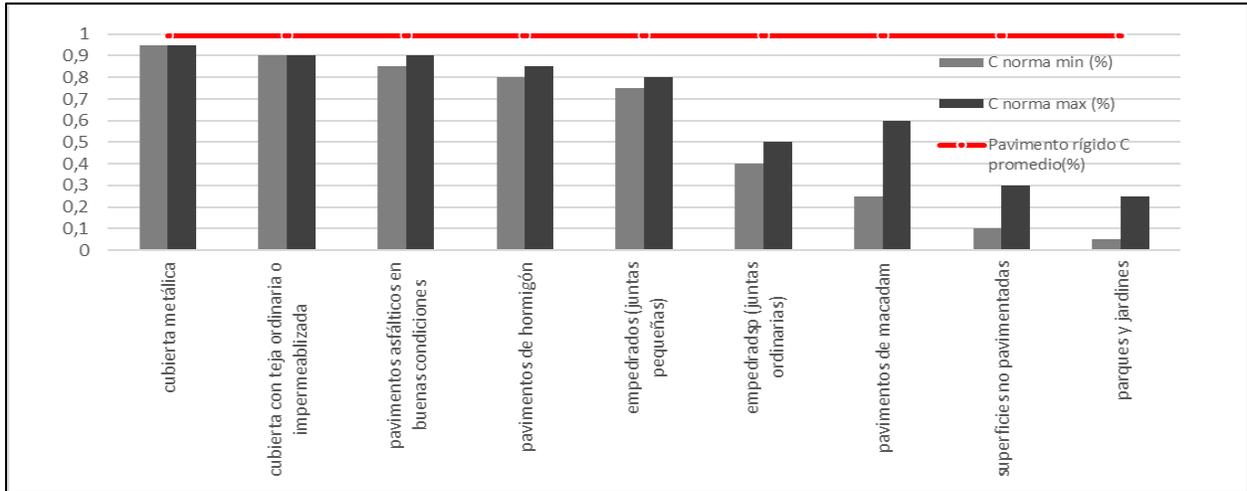
Fuente: Elaboración propia

En la tabla 12, los resultados del ensayo del infiltrómetro de doble anillo muestran que los coeficientes de escurrimiento varían entre el 98.7 % y el 99.7 %, con una media de 99.2 %. El amplio intervalo de valores mencionado evidencia la eficacia del pavimento rígido en la prevención de la infiltración de agua, la cual es una característica intrínseca de su estructura y diseño. Los experimentos fueron realizados en superficies de pavimento rígido en óptimas condiciones, donde no se detectaron baches, grietas u otras imperfecciones que pudieran afectar los resultados. Esta condición garantizó la fiabilidad y exactitud de las mediciones efectuadas. Al comparar estos valores con los de materiales más permeables, como los suelos granulares, se observa que los coeficientes de escurrimiento del pavimento rígido son notablemente superiores, lo que destaca su eficacia para reducir la infiltración y canalizar el agua hacia los sistemas de drenaje.

Los resultados obtenidos se ajustan a las expectativas de los pavimentos rígidos, ya que la norma CPE INEN 5 9-1 no incluye parámetros específicos para este tipo de pavimentos. La baja infiltración se destaca como una de las principales características de este material. En la tabla 13, se presenta una comparación entre el promedio de escurrimiento obtenido en el ensayo de doble anillo (99.2 %) y los valores indicados en la normativa correspondiente para diferentes materiales, los cuales han dejado de estar en vigor en la actualidad. A pesar de la ausencia de una normativa específica aplicable a pavimentos rígidos, los resultados resaltan la capacidad del material para conservar un alto coeficiente de escurrimiento debido a su estado óptimo. La evidencia presentada demuestra la eficacia en el control del agua superficial y su impacto positivo en la preservación de las capas inferiores, lo que asegura la longevidad y efectividad de la infraestructura.

En el presente estudio se obtuvieron porcentajes de infiltración que varían entre 0.30% y 1.31% en diferentes puntos del ensayo, con un promedio de 0.8%, lo que sugiere una tendencia hacia una baja capacidad de infiltración del pavimento rígido analizado. Estos resultados son significativos, ya que indican que el pavimento presenta características altamente impermeables, lo que se traduce en un coeficiente de escurrimiento superior al 90%. Este comportamiento puede atribuirse a varios factores, incluyendo la composición del material del pavimento, la macro textura y las condiciones climáticas durante los ensayos. Al comparar estos resultados con otros estudios, como el de Cepeda & Rosero (2024) que reportaron porcentajes de infiltración que varían entre 2.4% y 6.8% en pavimentos similares en condiciones de tráfico y clima, se observa que los valores de infiltración en la Av. Edelberto Bonilla Oleas son considerablemente más bajos.

Figura 10: Comparación de Coeficientes de Escorrentía para Diferentes Superficies



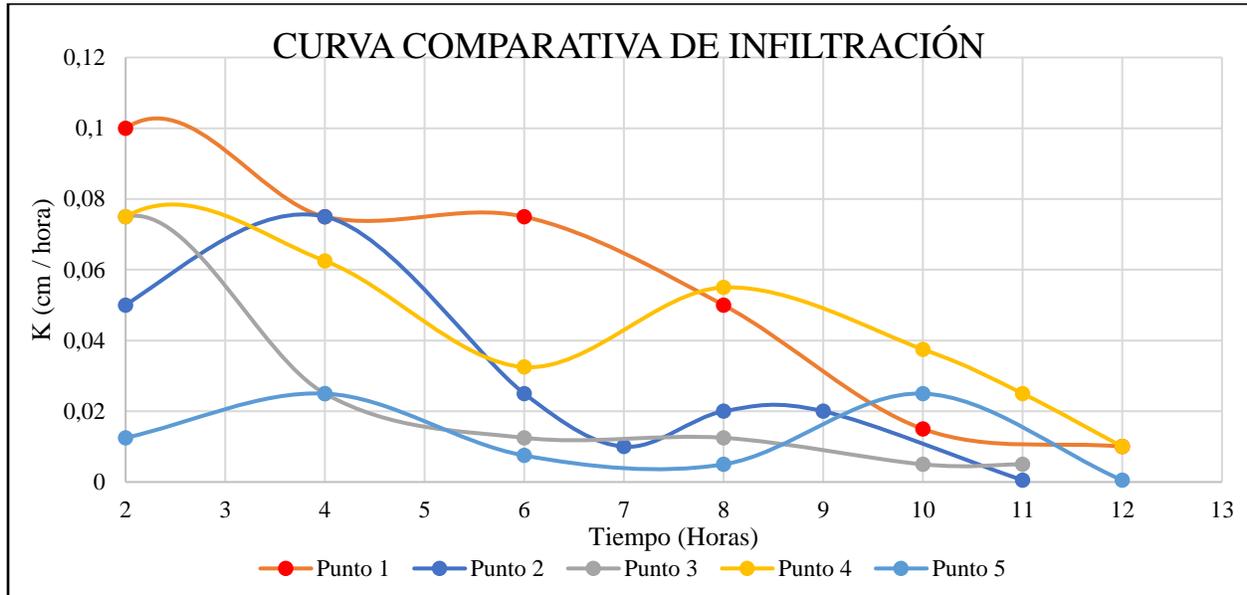
Fuente: Elaboración propia

En la figura 10 se muestra una comparación visual entre el promedio de escorrentía derivado del ensayo de doble anillo, que alcanzó un valor del 99.2 %, y los parámetros definidos en la norma ASTM D3385-03 (2003), la cual en la actualidad no se encuentra vigente. A pesar de que esta normativa no detalla información específica para pavimentos rígidos, es posible inferir el comportamiento del material ante la escorrentía superficial mediante la comparación. El coeficiente de escorrentía promedio obtenido es muy alto, lo cual indica la limitada capacidad de infiltración típica de los pavimentos rígidos, sobre todo cuando presentan una estructura en buen estado.

El elevado índice de escorrentía registrado se puede explicar por la excelente condición del pavimento examinado, el cual no presenta imperfecciones como grietas o irregularidades que pudieran favorecer la penetración del agua. El comportamiento observado resalta la efectividad del pavimento rígido en el control del escurrimiento superficial, asegurando una adecuada evacuación del agua y reduciendo la posibilidad de acumulaciones que puedan afectar su estructura o desempeño. A pesar de que la norma ASTM D3385-03 (2003) no se encuentra actualmente en vigor y no proporciona una referencia específica para este tipo de pavimentos, los resultados indican que el material satisface los estándares requeridos en cuanto a impermeabilidad y eficacia hidráulica, aspectos fundamentales para su rendimiento en proyectos de infraestructura.

4.3.1. Curvas de Infiltración

Figura 11: Curva comparativa de infiltración



Fuente: Elaboración propia

En la figura 11 se muestran las curvas de infiltración en relación con el tiempo, las cuales fueron obtenidas en varios puntos del tramo analizado. Las curvas mencionadas posibilitan el análisis del comportamiento del suelo o pavimento en términos de su capacidad de infiltración de agua a lo largo de un periodo de tiempo determinado. Las diferencias en las condiciones locales, como la textura y compactación del terreno, la presencia de materiales heterogéneos y las características climáticas durante los ensayos, se reflejan en las variaciones observadas en las curvas.

Las variaciones en la inclinación de las curvas reflejan la tasa inicial de infiltración y su posterior reducción conforme el suelo alcanza su capacidad de saturación. Las discrepancias observadas entre los puntos analizados pueden ser resultado de las disparidades en la composición del suelo o en la condición del pavimento, lo cual origina diferentes modelos de infiltración. Las curvas mencionadas resultan fundamentales en la identificación de zonas con distintos niveles de permeabilidad, lo cual constituye un aporte significativo para la planificación de sistemas de drenaje y tácticas de gestión de aguas superficiales en iniciativas de infraestructura. El análisis de estas variaciones posibilita la toma de decisiones fundamentadas acerca de las exigencias de mantenimiento o de las mejoras necesarias en las condiciones del terreno con el fin de maximizar su eficiencia hidráulica.

Comportamiento de la curva de infiltración

Al analizar la figura 11, se puede observar que a pesar de que todos los puntos de estudio tenían la misma condición de pavimento, catalogada como "muy buena", las curvas de infiltración muestran variaciones que se pueden atribuir a las condiciones climáticas y topográficas particulares de cada punto. Estas disparidades posibilitan la realización de un minucioso análisis de las influencias externas en la capacidad de infiltración del pavimento.

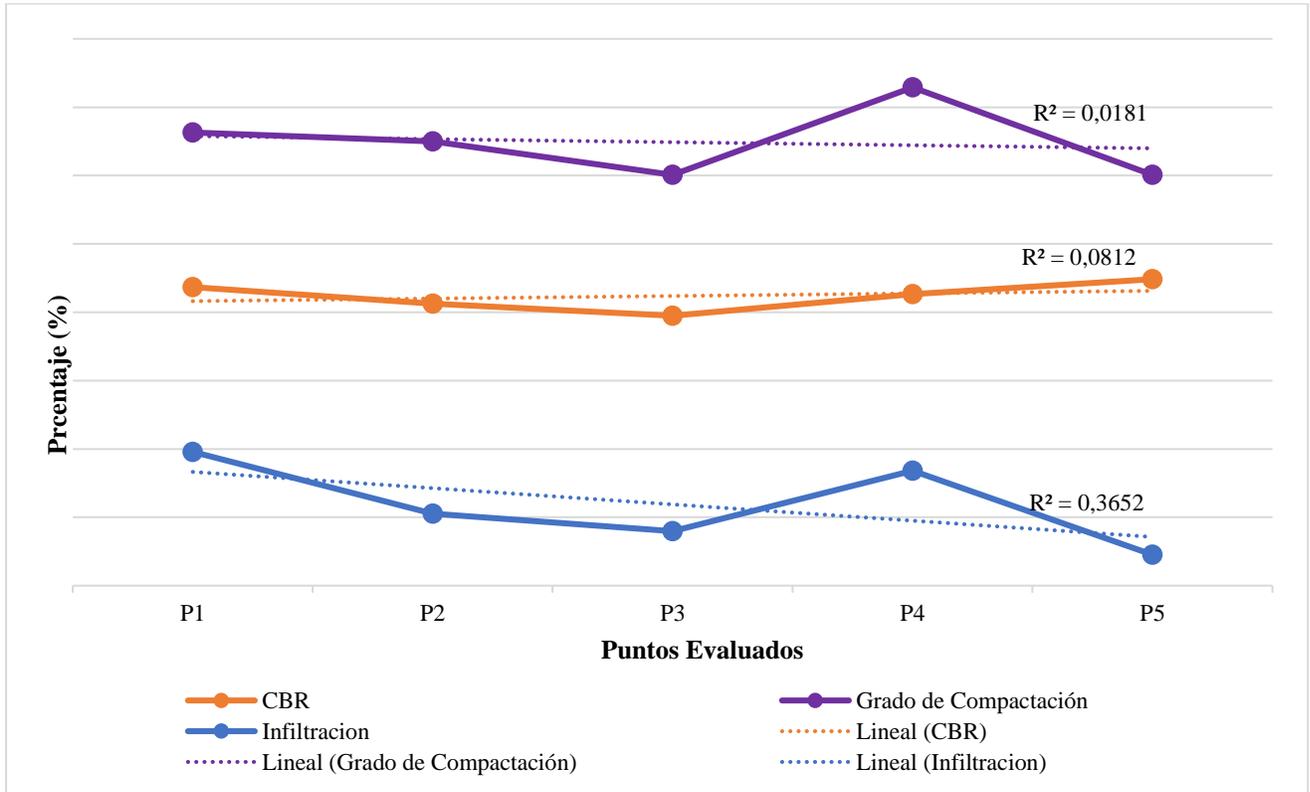
En relación a las curvas asociadas a los puntos 3 y 4, se observan similitudes en su configuración gráfica. Ambas muestran una velocidad de infiltración inicial similar, la cual disminuye y luego aumenta después de transcurrir algunas horas. Durante el período de medición del ensayo del punto 3, se observó un clima soleado sin precipitaciones previas, y el pavimento mostraba una ligera pendiente. En el punto 4, se observó un clima cambiante que incluyó períodos de sol, nubosidad y lloviznas. Es importante destacar que no se registraron lluvias el día anterior. En este punto, el pavimento presentaba una pendiente más pronunciada que en el punto 3. Esta característica posiblemente favoreció un aumento en la velocidad de infiltración, especialmente durante los periodos de mayor intensidad de la lluvia.

En las curvas correspondientes a los puntos 2 y 5, se pueden identificar similitudes, dado que ambas presentan un aumento inicial en la tasa de infiltración, seguido de un descenso y posteriormente un incremento después de transcurrir ciertas horas. Ambas ubicaciones se encontraban en terrenos llanos, sin pendientes visibles, y presentaban condiciones iniciales similares, sin precipitaciones la noche anterior. No obstante, en el quinto punto del ensayo, se describió un inicio con condiciones climáticas nubladas y lloviznas, las cuales podrían haber afectado la velocidad de infiltración a lo largo del periodo estudiado, resultando en tasas inferiores en relación al punto 2. Durante el último ensayo, las condiciones climáticas se mantuvieron despejadas, lo que propició velocidades de infiltración más consistentes y en general superiores a las registradas en el punto 5.

Por último, la curva del punto 1 exhibe particularidades distintivas en comparación con las otras curvas. El punto en cuestión presentó condiciones iniciales diferentes, las cuales estuvieron influenciadas por una precipitación leve ocurrida el día previo a la prueba. Durante el ensayo, no se registraron aumentos significativos en la velocidad de infiltración, lo cual indica que el suelo en esa ubicación ya estaba parcialmente saturado. Se destaca en este estudio la influencia de las condiciones previas de humedad en la capacidad de infiltración, observándose una estabilidad en los valores a lo largo del ensayo que difiere notablemente del comportamiento de los otros puntos analizados.

4.4. Relación entre las propiedades físico-mecánicas con las hidráulicas.

Figura 12: Relación del Grado de Compactación, CBR y Porcentaje de Infiltración (Subbase)



Fuente: Elaboración propia

En la Figura 12 se observa una relación directamente proporcional entre el grado de compactación y el CBR, ya que un mayor grado de compactación indica un índice de soporte del suelo más alto. Además, las gráficas del grado de compactación y porcentaje de infiltración presentan un comportamiento similar, lo que muestra una posible relación entre ambas variables. Sin embargo, en este estudio no es posible determinar si dicha relación es directamente o inversamente proporcional, debido a que el tiempo del ensayo con el infiltrómetro no fue suficiente para alcanzar las capas inferiores del pavimento. Como resultado, la medición se limitó a la capa de rodadura, lo cual se evidencia en la ausencia de un incremento en la velocidad de infiltración, lo que se habría evidenciado con un aumento drástico si el agua hubiera alcanzado la capa granular.

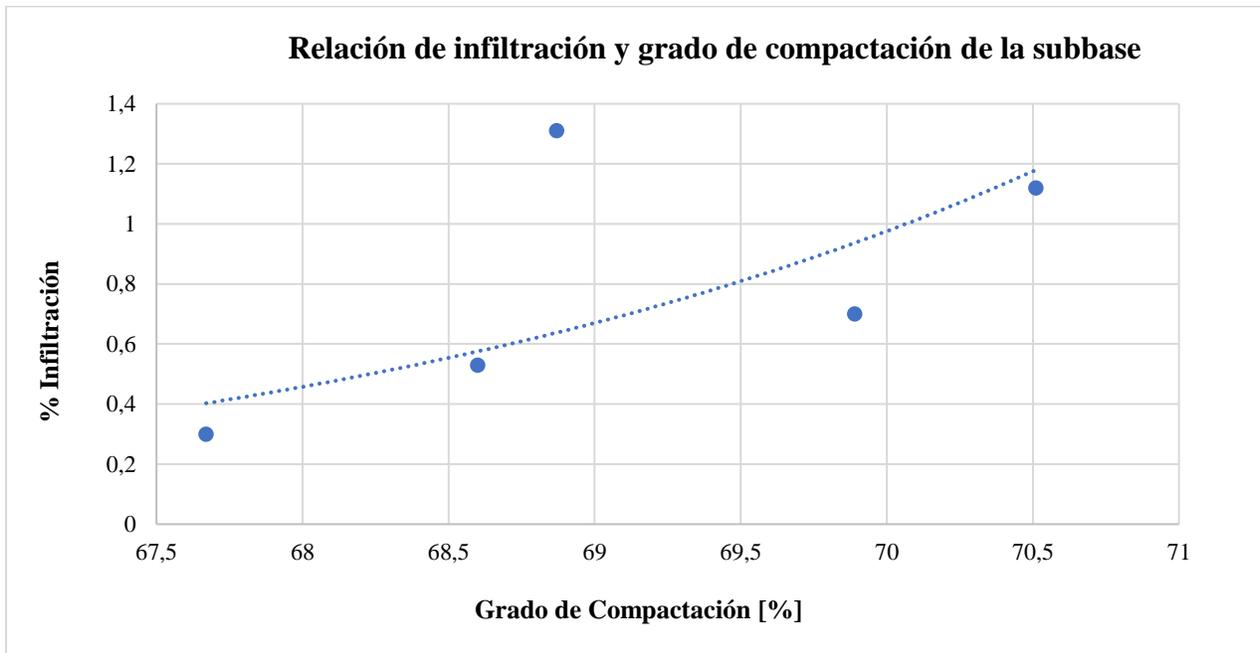
4.4.1. Relación infiltración vs grado de compactación

Tabla 16: Relación infiltración y grado de compactación (Subbase)

Punto	Grado de Compactación [%]	Porcentaje de Infiltración [%]	Coefficiente de correlación
P1	68.87	1.31	59.53%
P2	69.89	0.7	
P3	68.6	0.53	
P4	70.51	1.12	
P5	67.67	0.3	

Fuente: Elaboración propia

Figura 13: Relación de infiltración y grado de compactación de la subbase



Fuente: Elaboración propia

En la figura 13 se muestra una relación inversamente proporcional clara entre el grado de compactación del suelo y su capacidad de infiltración. A medida que aumenta la compactación, disminuyen los espacios porosos disponibles para el agua, reduciendo así su capacidad de penetrar en el suelo. El coeficiente de correlación de 59.53% confirma la existencia de una relación moderadamente fuerte entre ambas variables, lo que indica que la compactación es un factor determinante en la disminución de la infiltración.

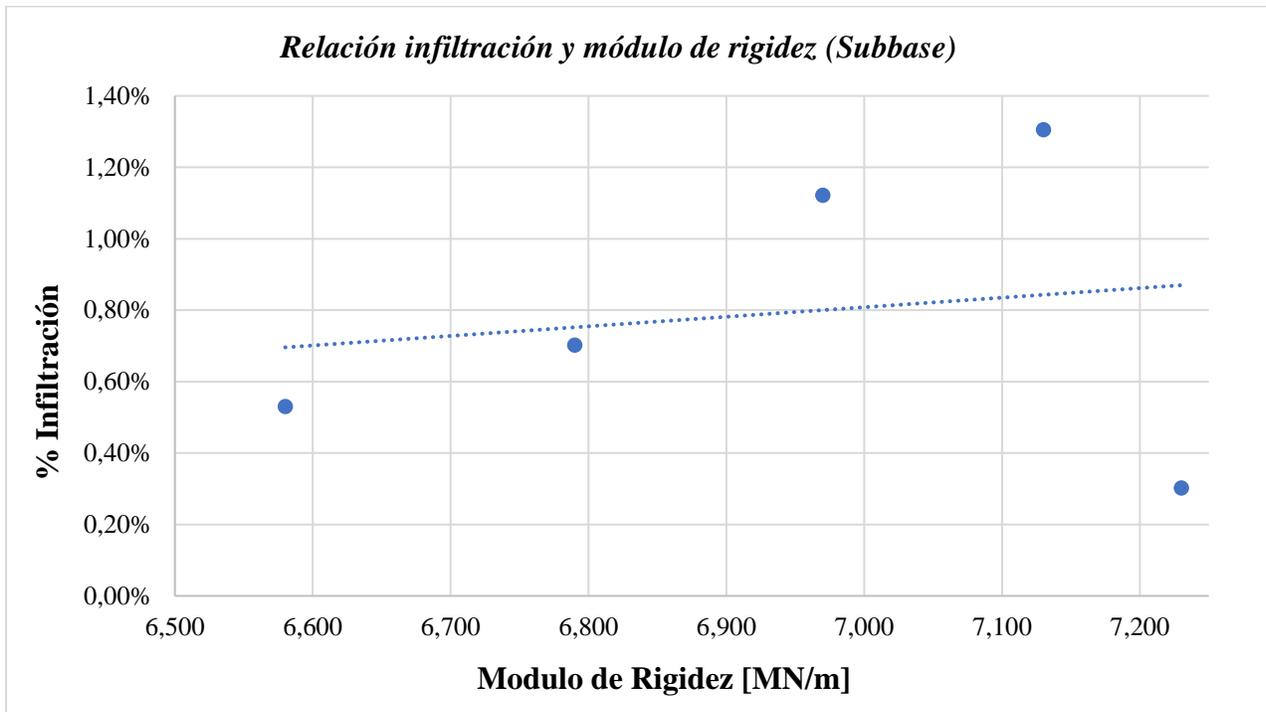
4.4.2. Relación infiltración vs Módulo de rigidez

Tabla 17: Relación infiltración y Módulo de rigidez (Subbase)

Punto	Módulo de Rigidez [MN/m]	Porcentaje de Infiltración [%]	Coefficiente de correlación
P1	7.130	1.31%	16.85%
P2	6.790	0.70%	
P3	6.580	0.53%	
P4	6.970	1.12%	
P5	7.230	0.30%	

Fuente: Elaboración propia

Figura 14: Relación infiltración y módulo de rigidez (Subbase)



Fuente: Elaboración propia

En la figura 14 se muestra una tendencia levemente inversa entre el módulo de rigidez y el porcentaje de infiltración del pavimento. A medida que aumenta la rigidez del pavimento, se observa una ligera disminución en su capacidad de permitir el paso del agua. Sin embargo, el coeficiente de correlación de 16.85% indica una relación débil entre ambas variables. Esto sugiere que, aunque existe una tendencia general, otros factores no considerados en este análisis podrían estar influyendo significativamente en el comportamiento hidráulico del pavimento. Por lo tanto, se puede concluir que la rigidez es un factor que influye en la infiltración, pero no es el único ni el más determinante. Esta relación débil implica que, si bien pavimentos más rígidos podrían presentar menor permeabilidad, no se puede establecer una relación causal directa ni generalizar este comportamiento para todos los casos.

CAPÍTULO V.

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

- Los ensayos de límites de Atterberg permitieron clasificar la subbase y la subrasante según el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS) y la norma MOP-001-F (2002). La subbase fue identificada como arena pobremente gradada (SP) y clasificada como Clase 2, cumpliendo con los parámetros requeridos para materiales capaces de soportar cargas moderadas. Por su parte, la subrasante también se clasificó como arena pobremente gradada con grava (SP). En ambos casos, los materiales no presentaron límite plástico, lo que indica una baja o nula cohesión en condiciones húmedas. Los valores de límite líquido obtenidos reflejan que estos materiales tienen una adecuada estabilidad frente a la acción del agua, cumpliendo con los valores normativos exigidos para aplicaciones estructurales en pavimentos.
- Los resultados de compactación in situ, obtenidos mediante los ensayos del equipo EDG y el método del cono de arena, revelan que tanto la subbase como la subrasante no cumplen con el grado de compactación mínimo del 95 % establecido por la normativa ecuatoriana y la norma MOP-001-F (2002). Este incumplimiento refleja una densidad insuficiente en los materiales, lo que compromete la estabilidad estructural y la durabilidad del pavimento rígido. Una compactación adecuada es fundamental para garantizar que el pavimento pueda resistir las cargas aplicadas sin fallas prematuras, evitando problemas como deformaciones, fisuras o pérdida de funcionalidad bajo las condiciones de uso previstas. La insuficiencia en los valores encontrados aumenta la susceptibilidad del pavimento a fallas estructurales y reduce significativamente su vida útil.
- Los resultados del ensayo con el equipo GeoGauge muestran que tanto la subbase como la subrasante presentan valores de CBR que cumplen parcialmente con los requisitos establecidos por la norma MOP-001-F (2002) para un pavimento rígido. En la subrasante, se obtuvo un valor de CBR superior al mínimo requerido del 10%, indicando que en ciertas áreas las condiciones de soporte son adecuadas. Para la subbase, los valores de CBR superaron el mínimo de 30%, cumpliendo con los estándares de resistencia necesarios. Sin embargo, en otros puntos, los valores más bajos podrían no cumplir completamente con los requisitos establecidos por la norma, lo que sugiere variabilidad en la calidad del material a lo largo de la sección estudiada.

- Los resultados del ensayo de doble anillo indican un alto coeficiente de escurrimiento en el pavimento rígido, con valores promedio de 99.2% y un rango de entre 98.7% y 99.7%, reflejando una infiltración mínima. Todos los ensayos se realizaron sobre un pavimento en excelente estado, sin baches ni grietas, lo cual asegura la consistencia en los resultados obtenidos. A pesar de que el método utilizado para calcular el coeficiente de escurrimiento no está estandarizado, los valores registrados son altamente confiables, destacando la baja permeabilidad del pavimento rígido en comparación con otros materiales más permeables.
- Se determina que el grado de compactación influye directamente en el CBR, lo que implica que un suelo más compacto ofrece mayor capacidad de soporte. Además, la tendencia similar entre los valores de compactación e infiltración sugiere una posible correlación entre ambos parámetros. No obstante, no fue posible establecer si esta relación es de carácter directo o inverso, debido a que el ensayo de infiltración no permitió alcanzar las capas más profundas del pavimento. Esto se debe a la baja permeabilidad del pavimento rígido, lo que limitó el paso del agua y provocó que la medición se mantuviera en la capa de rodadura, sin reflejar el comportamiento de los materiales subyacentes.

5.2.Recomendaciones

- Se recomienda realizar investigaciones enfocadas en analizar las características químicas de los suelos, como el pH, la presencia de sales y materia orgánica, ya que estos factores pueden afectar significativamente el desempeño mecánico y la durabilidad de las capas de subbase y subrasante. Estas propiedades pueden alterar la capacidad de soporte y la resistencia de los suelos ante las condiciones climáticas, lo que impacta directamente en la estabilidad del pavimento.
- Se recomienda estudiar el impacto de las cargas dinámicas generadas por el tránsito vehicular sobre la compactación de las capas del pavimento, especialmente en lo que respecta a cómo las fuerzas repetitivas pueden modificar la estructura y densidad del material. La variación en la compactación debido a estas cargas podría influir en el comportamiento de los materiales a largo plazo, afectando su capacidad de carga y su resistencia a las deformaciones.
- Se recomienda realizar un análisis detallado sobre cómo los diferentes grados de compactación de las capas de subbase y subrasante afectan la durabilidad de los pavimentos rígidos. Es fundamental observar cómo la variabilidad en la compactación puede influir en la resistencia general del pavimento, teniendo en cuenta factores como las cargas vehiculares y las condiciones climáticas, lo cual es esencial para optimizar el rendimiento de los pavimentos a lo largo de su vida útil.

BIBLIOGRAFÍA

- AASHTO M-145. (1997). *Classification of Soils and Soil-Aggregate Mixtures for Highway*.
- Alvear Jonathan, & Piñas Eduardo. (2024). *Características físico-mecánicas e hidráulicas del pavimento articulado en la zona oriental de la ciudad de Riobamba*.
- Alves, A. M. L. (2019). *Previsão e observação da capacidade de carga de estacas tipo hélice contínua em solo arenoso sedimentar*. <https://www.researchgate.net/publication/333666401>
- ARAMA, Z. A., & GENÇDAL, H. B. (2022, April). Simple Regression Models to Estimate the Standard and Modified Proctor Characteristics of Specific Compacted Fine-Grained Soils. *Proceedings of the 7th World Congress on Civil, Structural, and Environmental Engineering*. <https://doi.org/10.11159/icgre22.232>
- ASTM C469. (2002). *Método de Ensayo Estándar para determinar el Módulo de elasticidad Estático y Relación de Poisson del concreto a compresión*.
- ASTM D698. (2012). *Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort (12 400 ft-lbf/ft³ (600 kN-m/m³))*. ASTM International. <https://doi.org/10.1520/D0698-12>
- ASTM D1556. (2000). *Método de Ensayo Estándar para Determinar la Densidad y Peso Unitario del Suelo en el Sitio por el Método del Cono de Arena*.
- ASTM D1557. (2012). *Métodos de prueba estándar para las características de compactación de suelo en laboratorio utilizando esfuerzo modificado modificado (56.000 (56.000 pies-lbf pies-lbf / pie (2700 kN-m / m))*.
- ASTM D2487. (2010). *Práctica Estándar para la Clasificación de Suelos para Propósitos de Ingeniería (Sistema de Clasificación Unificada de Suelos) I*. <https://doi.org/10.1520/D2487--11>
- ASTM D3385-03. (2003). *Tasa de infiltración de suelos en el campo utilizando un infiltrometro de doble anillo*.
- ASTM D4318. (2005). *Los métodos estándar de ensayo para Límite Líquido, Límite de plástico, y el índice de plasticidad de los suelos*. www.civilgeeks.com
- ASTM D6913-17. (n.d.). *Test Methods for Particle-Size Distribution (Gradation) of Soils Using Sieve Analysis*. ASTM International. <https://doi.org/10.1520/D6913>
- ASTM E 965-96. (2006). *Método estándar de prueba para la medición de la profundidad de macrotextura del pavimento utilizando una técnica volumétrica*.
- Aucapiña Ricardo, & Jiménez Wilmer. (2024). *Características físicas mecánicas e hidráulicas evaluadas en el pavimento flexible del corredor vial Riobamba-Flores*. <http://dspace.unach.edu.ec/handle/51000/12905>

- Autroads. (2009). *Guide to Pavement Technology Part 8: Pavement Construction*. Austroads.
- Bohórquez-Castellanos, J. J., Porrás-Díaz, H., Sánchez-Rivera, O. G., & Mariño-Espinel, M. C. (2018). Planificación de recursos humanos a partir de la simulación del proceso constructivo en modelos BIM 5D. *Entramado*, 14(1), 252–267. <https://doi.org/10.18041/entramado.2018v14n1.27141>
- Cango Mena, L. P., & Zárate Torres, B. A. (2020). Evaluación del desgaste de pavimento flexible mediante el uso de fotogrametría de corto alcance. *Avances Investigación En Ingeniería*, 18(1). <https://doi.org/10.18041/1794-4953/avances.2.6629>
- Carnero Carnero, E. G. (2018). Análisis numérico de infiltración de agua en un suelo residual no saturado utilizando la curva de retención de agua. *Revista de Investigaciones Altoandinas - Journal of High Andean Research*, 20(4), 439–450. <https://doi.org/10.18271/ria.2018.421>
- Casco José, & Salcán Vinicio. (2024). *Características físicas, mecánicas e hidráulicas evaluadas en el pavimento flexible del corredor vial Flores - Cebadas*. <http://dspace.unach.edu.ec/handle/51000/12872>
- Cepeda, M. E., & Rosero, R. S. (2024). *Evaluación de las características hidráulicas y físicas del pavimento rígido en la Avenida 9 de Octubre ubicada en la ciudad de Riobamba*. <http://dspace.unach.edu.ec/handle/51000/12448>
- Chávarri, L., & Falen, J. (2024). *Propuesta de concreto eco-sostenible con la adición de caucho reciclado para la construcción de pavimentos urbanos en la ciudad de Lima*. <https://repositorioacademico.upc.edu.pe/handle/10757/651661>
- CPE INEN 5 9-1. (1992). *NORMAS PARA ESTUDIO Y DISEÑO DE SISTEMAS DE AGUA POTABLE Y DISPOSICIÓN DE AGUAS RESIDUALES PARA POBLACIONES MAYORES A 1000 HABITANTES*. www.pdfactory.com
- Diana, W., Hartono, E., Muntohar, A. S., & Wulandary, K. (2022). Evaluation of Soil Compaction in Building Construction Projects. *MEDIA KOMUNIKASI TEKNIK SIPIL*, 28(1), 1–8. <https://doi.org/10.14710/mkts.v28i1.32720>
- Dong, Q., Chen, X., Dong, S., & Ni, F. (2022). Data Analysis in Pavement Engineering: An Overview. In *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems* (Vol. 23, Issue 11, pp. 22020–22039). Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. <https://doi.org/10.1109/TITS.2021.3115792>
- Eulalio Juárez Badillo. (1972). *Mecánica de suelos*. Limusa.
- Giler Vicente, & Ortiz Eduardo. (2023). *Combinación granulométrica de material granular con agregados finos de arena de playa proveniente de la costa en la Provincia de Manabí para el mejoramiento de subbases Granulometric combination of granular material with fine aggregates of beach sand from the coast in the Province of Manabí for the improvement of*

subbases Combinação granulométrica de material granular com agregados finos de areia de praia do litoral da Província de Manabí para o melhoramento de sub-bases. 83(6), 1399–1422. <https://doi.org/10.23857/pc.v8i6>

Giordani, C., & Leone Diego. (2019). *Pavimentos*.

Gómez de la Peña, E., Cobo Escamilla, A., Lozano Díez, R., & López Zaldívar, O. (2017). Estudio comparativo entre valores característicos experimentales y normativos de madera aserrada de pino silvestre = Comparative study between experimental and normative values of sawnwood of wild pine. *Anales de Edificación*, 3(2), 39. <https://doi.org/10.20868/ade.2017.3570>

Hillel Daniel. (1998). *Environmental Soil Phy.*

Ibañez Sara, Moreno Héctor, & Gisbert Juan. (2010). *Métodos para la determinación del coeficiente de escorrentía (c).*

Klosok-Bazan, I., Boguniewicz-Zablocka, J., Suda, A., Łukasiewicz, E., & Anders, D. (n.d.). *Assessment of leakage management in small water supplies using performance indicators.* <https://doi.org/10.1007/s11356-021-13575-5/Published>

Llano, E., Ríos, D., & Restrepo, G. (2020). Evaluación de tecnologías para la estabilización de suelos viales empleando intemperismo acelerado. Una estrategia de análisis de impactos sobre la biodiversidad. *TecnoLógicas*, 23(49), 185–199. <https://doi.org/10.22430/22565337.1624>

López Moreno, M. D. (2023). *La ampliación del límite urbano y el impacto en el abastecimiento del transporte público urbano intracantonal en la ciudad de Riobamba, provincia de Chimborazo.*

Luis Contreras-Santos, J., Martínez-Atencia, J., Cadena-Torres, J., & Katherine Falla-Guzmán, C. (2019). *Evaluación del carbono acumulado en suelo en sistemas silvopastoriles del Caribe Colombiano.* https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwiglpqYpv2JAxU-TDABHVbWMVwQFnoECBwQAQ&url=http%3A%2F%2Fwww.scielo.sa.cr%2Fscielo.php%3Fscript%3Dsci_arttext%26pid%3DS0377-94242020000100029&usg=AOvVaw1OjK2NcIkab35UWJpTzaG3&opi=89978449

Mayor Gallego, J. A. (2007). *Muestreo Estratificado.*

Montejo Rodolfo, R., Raymundo Juárez, J. E., & Chávez Ancajima, J. S. (2020). MATERIALES ALTERNATIVOS PARA ESTABILIZAR SUELOS: EL USO DE CENIZA DE CÁSCARA DE ARROZ EN VÍAS DE BAJO TRÁNSITO DE PIURA. *TZHOECOEN*, 12(1), 131–140. <https://doi.org/10.26495/tzh.v12i1.1251>

- MOP-001-F. (2002). *ESPECIFICACIONES GENERALES PARA LA CONSTRUCCION DE CAMINOS Y PUENTES*.
- Nalon, G. H., Barbosa, P. S. de A., & Nascimento, W. D. (2018). Educational digital resource for data analysis of Civil Engineering laboratory tests. *Modelling in Science Education and Learning*, 11(1), 43. <https://doi.org/10.4995/msel.2018.9140>
- NEVI. (2013). *MINISTERIO DE TRANSPORTE Y OBRAS PÚBLICAS DEL ECUADOR SUBSECRETARÍA DE INFRAESTRUCTURA DEL TRANSPORTE VOLUMEN No 2- LIBRO A NORMA PARA ESTUDIOS Y DISEÑOS VIALES*.
https://www.obraspublicas.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2013/12/01-12-2013_Manual_NEVI-12_VOLUMEN_2A.pdf
- Norbert Delatte. (2008). *Concrete pavement design, construction and performance* (Taylor & Francis, Ed.). Taylor and Francis.
- NTE INEN 691. (1982). *DETERMINACIÓN DEL LÍMITE LÍQUIDO METODO DE CASA GRANDE*.
- NTE INEN 696. (2011). *INSTITUTO ECUATORIANO DE NORMALIZACIÓN INSTITUTO ECUATORIANO DE NORMALIZACIÓN STANDARD TEST METHOD FOR SIEVE ANALYSIS OF FINE STANDARD TEST METHOD FOR SIEVE ANALYSIS OF FINE AND COARSE AGGREGATES. AND COARSE AGGREGATES. First Edition First Edition*.
- NTE INEN 856. (2010). *Determinación de la densidad, densidad relativa (Gravedad específica) y absorción del árido fino*.
- NTE INEN 857. (2010). *INSTITUTO ECUATORIANO DE NORMALIZACIÓN*.
- NTE INEN 860. (2011). *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 Máquina Los Angeles*.
- Orozco, D., & Riera, J. (2022). *VARIACIÓN DEL MODELO DE CARGAS POR EJE MTOP PARA CAMIONES PESADOS EXAMINANDO MUESTRAS DEL TRÁNSITO EN LA CIRCUNVALACIÓN DE RIOBAMBA*. <http://dspace.unach.edu.ec/handle/51000/8843>
- Pires, L. F., Cássaro, F. A. M., & Correchel, V. (2021). Use of nuclear techniques in soil science: A literature review of the Brazilian contribution. In *Revista Brasileira de Ciencia do Solo* (Vol. 45). Revista Brasileira de Ciencia do Solo.
<https://doi.org/10.36783/18069657rbc20210089>
- Porrás Rodríguez, P., Tovar Rivera, A. F., & Reyes Ortiz, O. J. (2017). Diseño, construcción e instrumentación del equipo de ahuellamiento para pavimentos flexibles. *Prospectiva*, 15(2), 126–134. <https://doi.org/10.15665/rp.v15i2.665>

Reza Curiel, B. Y., Gutiérrez Cedillo, J. G., Espinosa Rodriguez, L. M., & Juan Pérez, J. I. (2022). CAMBIOS EN EL PROCESO DE EROSIÓN. EL PARQUE OTOMÍ –MEXICA, ESTADO DE MÉXICO (2014 Y 2018). *Papeles de Geografía*, 67, 27–44. <https://doi.org/10.6018/geografia.473741>

Varas Eduardo. (1998). *ICH 3202-HIDROLOGÍA*.

Weather Atlas. (2024, November). *Clima y previsión metereológica mensual Riobamba, Ecuador* . Weather Atlas. <https://www.weather-atlas.com/es/ecuador/riobamba-clima>

Zhang, X., Yang, G., Wang, X., & Cao, H. (2023). Compaction Quality Inspection and Uniformity Analysis of Soil-Rock Mixed Subgrade. *Sustainability (Switzerland)*, 15(7). <https://doi.org/10.3390/su15075809>

ANEXOS



Anexo 1. Recolección de muestras en la Av. Edelberto Bonilla Oleas



Anexo 4. Ensayo densidad de gruesos de la subbase



Anexo 2. Análisis granulométrico por tamizaje subbase



Anexo 5. Ensayo densidad de finos de la subbase



Anexo 3. Límite plástico para la subbase (No posee)



Anexo 6. Ensayo límite líquido con copa de Casagrande



Anexo 7. Ensayo de Proctor Modificado Subbase tipo 2



Anexo 10. Ensayo cono de arena, densidad in situ



Anexo 8. Ensayo Proctor Estándar Subrasante



Anexo 11. Ensayo con densímetro eléctrico (EDG)



Anexo 9. Ensayo de abrasión en Máquina de los Ángeles



Anexo 12. Ensayo con el Geo Gauge



Anexo 13. Ensayo de Macrotextura



Anexo 14. Ensayo del infiltrómetro de doble anillo

SUB RASANTE

Muestra 1	unidades	Cono de Arena	Densimetro	Variacion
Densidad Húmeda	g/cm ³	1,22	1,194	0,0197
Densidad Seca	g/cm ³	1,10	1,041	0,0432
Humedad	%	10,86	14,6	2,6456
Compactación	%	60,60	52,3	5,8723

Muestra 2	unidades	Cono de Arena	Densimetro	Variacion
Densidad Húmeda	g/cm ³	1,19	1,029	0,1105
Densidad Seca	g/cm ³	1,08	0,903	0,1221
Humedad	%	10,19	13,9	2,6268
Compactación	%	58,59	57	1,1266

Muestra 3	unidades	Cono de Arena	Densimetro	Variacion
Densidad Húmeda	g/cm ³	1,26	1,069	0,1365
Densidad Seca	g/cm ³	1,13	0,996	0,0918
Humedad	%	12,09	7,1	3,5296
Compactación	%	62,05	61,8	0,1773

Muestra 4	unidades	Cono de Arena	Densimetro	Variacion
Densidad Húmeda	g/cm ³	1,18	1,32	0,1001
Densidad Seca	g/cm ³	1,10	1,238	0,0978
Humedad	%	7,15	7,4	0,1746
Compactación	%	61,30	73,7	8,7689

Muestra 5	unidades	Cono de Arena	Densimetro	Variacion
Densidad Húmeda	g/cm ³	1,22	1,284	0,0477
Densidad Seca	g/cm ³	1,11	1,173	0,0441
Humedad	%	9,54	9,4	0,0992
Compactación	%	63,94	69,8	4,1452

SUB BASE

Muestra 1	unidades	Cono de Arena	Densimetro	Variacion
Densidad Húmeda	g/cm ³	1,27	1,236	0,0265
Densidad Seca	g/cm ³	1,13	1,084	0,0314
Humedad	%	12,86	14	0,8094
Compactación	%	67,91	54,4	9,5556

Muestra 2	unidades	Cono de Arena	Densimetro	Variacion
Densidad Húmeda	g/cm ³	1,24	1,384	0,0990
Densidad Seca	g/cm ³	1,15	1,296	0,1059
Humedad	%	8,53	6,8	1,2230
Compactación	%	68,98	65,1	2,7453

Muestra 3	unidades	Cono de Arena	Densimetro	Variacion
Densidad Húmeda	g/cm ³	1,23	1,322	0,0674
Densidad Seca	g/cm ³	1,14	1,222	0,0558
Humedad	%	7,32	8,2	0,6188
Compactación	%	69,09	60,1	6,3555

Muestra 4	unidades	Cono de Arena	Densimetro	Variacion
Densidad Húmeda	g/cm ³	1,28	1,652	0,2664
Densidad Seca	g/cm ³	1,17	1,458	0,2056
Humedad	%	9,25	13,3	2,8660
Compactación	%	73,54	54,6	13,3954

Muestra 5	unidades	Cono de Arena	Densimetro	Variacion
Densidad Húmeda	g/cm ³	1,22	1,306	0,0615
Densidad Seca	g/cm ³	1,12	1,203	0,0557
Humedad	%	8,42	8,6	0,1260
Compactación	%	71,53	60,1	8,0788

Anexo 15. Comparación de densidades obtenidas del ensayo de cono de arena y el densímetro eléctrico

DATOS DE CAMPO			
Fecha:	Miércoles, 07 de Agosto de 2024		
Ciudad:	Riobamba-Chimborazo		
Lugar:	Avenida Edelberto Bonilla Oleas		
Clima:	Despejado	Estado de la vía:	Bueno
Coordenada del punto:	ESTE	763248,745	
	NORTE	9814958,648	
INTERVALO	TIEMPO (Hora)	h (cm)	
-	7:30 a. m.	0 Horas 10	
7:30 a. m.	9:30 a. m.	2 Horas 10,1	
9:30 a. m.	11:30 a. m.	2 Horas 10,25	
11:30 a. m.	1:30 p. m.	2 Horas 10,3	
1:30 p. m.	3:30 p. m.	2 Horas 10,31	
3:30 p. m.	5:30 p. m.	2 Horas 10,33	
5:30 p. m.	7:30 p. m.	2 Horas 10,35	
7:30 p. m.	9:30 p. m.	2 Hora 10,351	
Observaciones: La zona de ensayo no presenta agrietamientos, además el infiltrómetro fue colocado en la mitad de la losa del pavimento. El clima se mantuvo despejado durante todo el ensayo.			

Tipo de pavimento: Pavimento rígido

Foto 1: Entorno e infiltrómetro antes de verter el agua

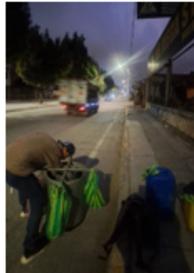
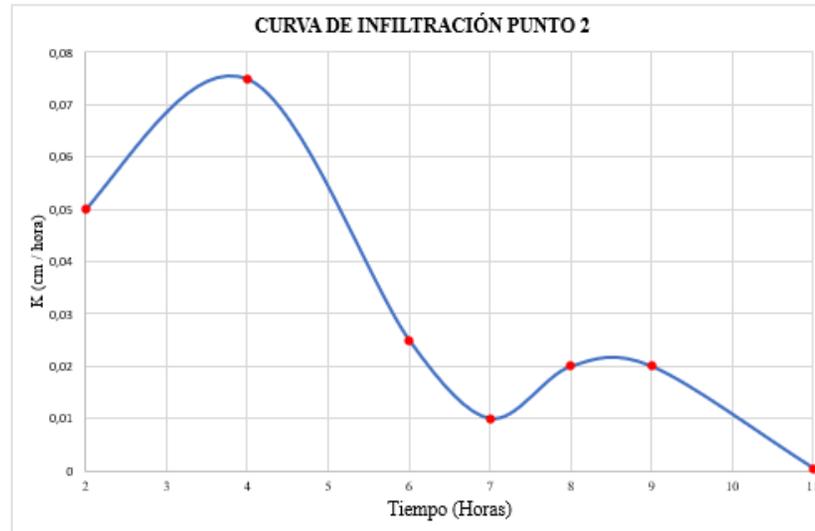


Foto 2: que se mire la base del infiltrómetro asentada sobre la capa de rodadura

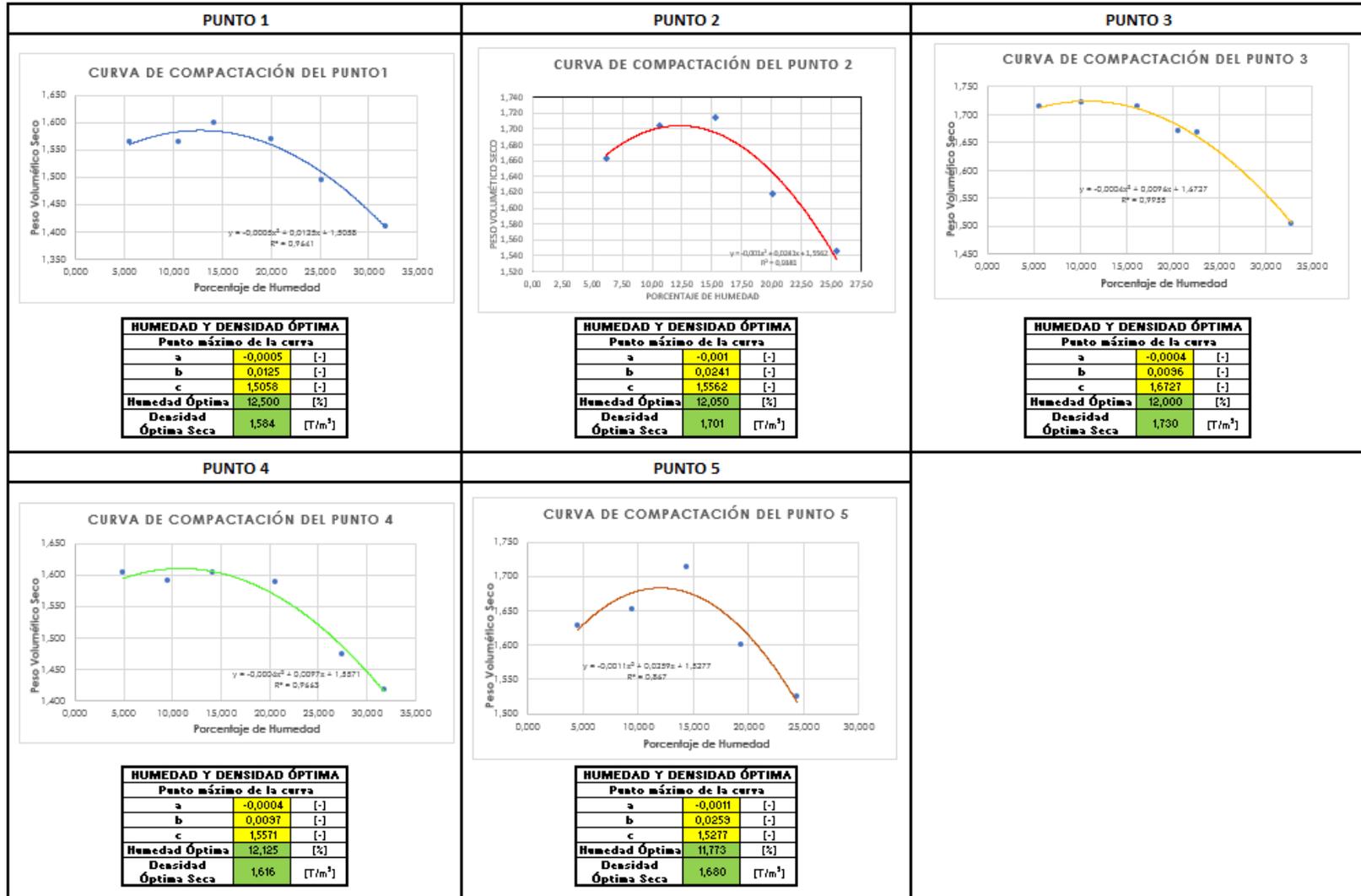


CALCULOS						
Diámetro interior del Infiltrómetro (cm):						25
Área total interna (cm ²):						490,87
Altura Total del infiltrómetro H (cm):						60,00
Altura del espejo de agua inicial (cm):						50,00
Volumen inicial de agua (cm):						24543,67
h	delta h	ta h acumul:	Tiempo	t acum	K	
cm	cm	cm	hora	hora	cm/hora	
10	0	0	0	0	0	
10,1	0,1	0,1	2	2	0,05	
10,25	0,15	0,25	2	4	0,075	
10,3	0,05	0,3	2	6	0,025	
10,31	0,01	0,31	1	7	0,01	
10,33	0,02	0,33	1	8	0,02	
10,35	0,02	0,35	1	9	0,02	
10,351	0,001	0,351	2	11	0,0005	
Sumatoria delta h (cm):						0,351
Volumen de Infiltración (cm³):						172,30
Fracción de infiltración (%):						0,7%
Coefficiente de escurrimiento C (%):						99,3%



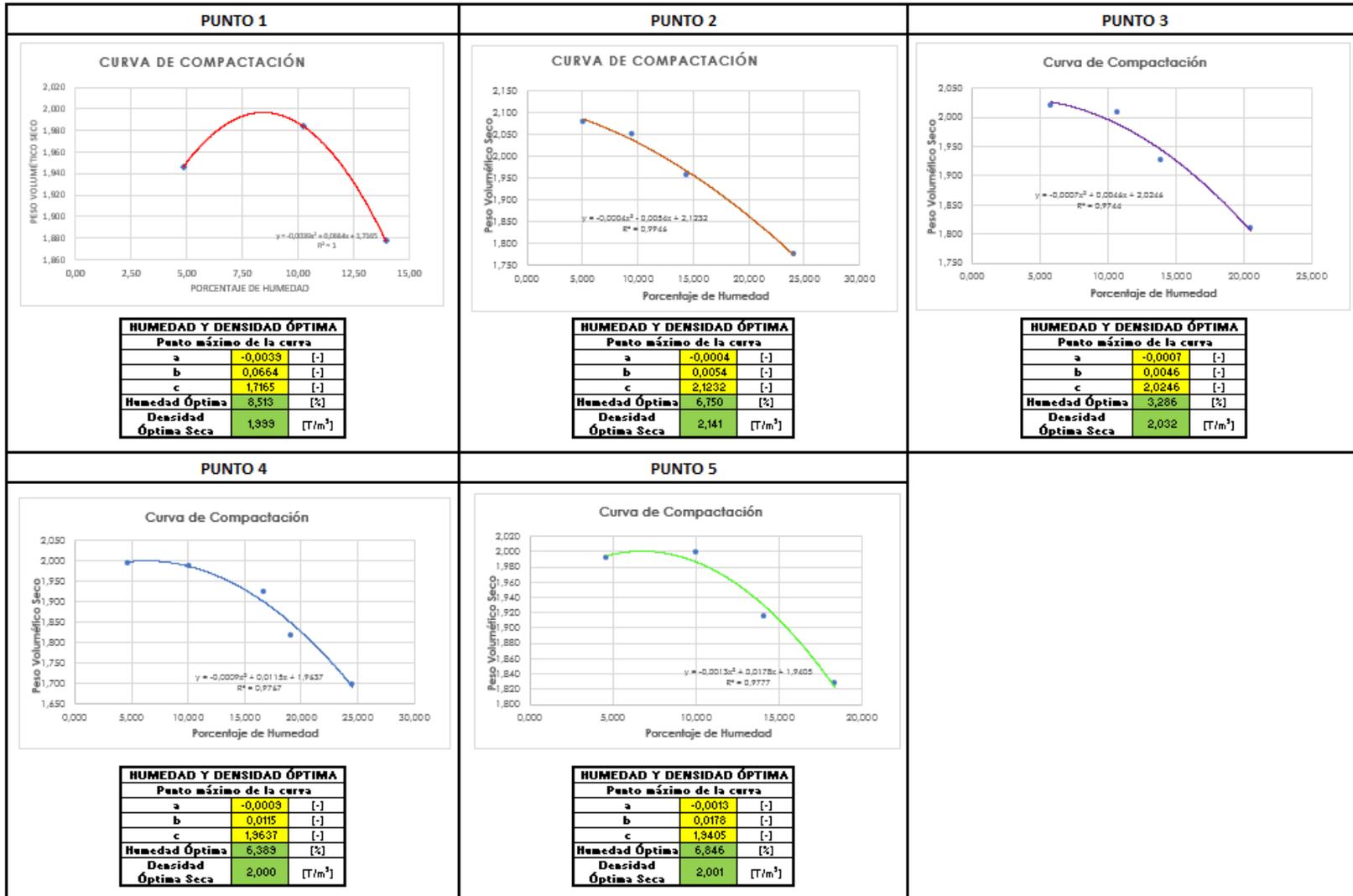
Anexo 16. Tabulación del ensayo del infiltrómetro de doble anillo

ENSAYO DE PROCTOR ESTANDAR EN SUBRASANTE DE PAVIMENTO RIGIDO



Anexo 17. Tabulación de Proctor Estándar de las subrasantes

ENSAYO DE PROCTOR MODIFICADO EN SUB-BASE DE PAVIMENTO RIGIDO



Anexo 18. Tabulación de Proctor Modificado de las subbases