



**UNIVERSIDAD NACIONAL DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERIA CIVIL**

Caracterización física - hidráulica del pavimento flexible en el tramo Colta -
Guamote del corredor vial E-35 Riobamba - Cuenca

Trabajo de Titulación para optar al título de Ingeniera Civil

Autor:

Castillo García Israel Patricio
Hidalgo Cisneros Joan Sebastián

Tutor:

Mgs. Pazmiño Chiluiza Hernán Vladimir

Riobamba, Ecuador. 2024

DECLARATORIA DE AUTORÍA

Nosotros, **Israel Patricio Castillo García**, con cédula de ciudadanía **0604813196**, y **Joan Sebastián Hidalgo Cisneros**, con cédula de ciudadanía **1805404777**, autores del trabajo de investigación titulado: **CARACTERIZACIÓN FÍSICA - HIDRÁULICA DEL PAVIMENTO FLEXIBLE EN EL TRAMO COLTA - GUAMOTE DEL CORREDOR VIAL E-35 RIOBAMBA – CUENCA**, certifico que la producción, ideas, opiniones, criterios, contenidos y conclusiones expuestas son de mí exclusiva responsabilidad.

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

En Riobamba, 22 de abril de 2024.

Israel Patricio Castillo García

C.I: 0604813196

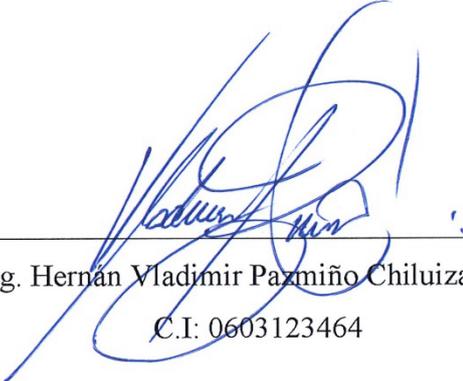
Joan Sebastián Hidalgo Cisneros

C.I: 1805404777

DICTAMEN FAVORABLE DEL PROFESOR TUTOR

Quien suscribe, Ing. Hernán Vladimir Pazmiño Chiluzza, Mgs, catedrático adscrito a la Facultad de Ingeniería, por medio del presente documento certifico haber asesorado y revisado el desarrollo del trabajo de investigación titulado: **CARACTERIZACIÓN FÍSICA - HIDRÁULICA DEL PAVIMENTO FLEXIBLE EN EL TRAMO COLTA - GUAMOTE DEL CORREDOR VIAL E-35 RIOBAMBA – CUENCA**, bajo la autoría de Israel Patricio Castillo García; 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 22 días del mes de abril de 2024



Ing. Hernán Vladimir Pazmiño Chiluzza, Mgs

C.I: 0603123464

CERTIFICADO DE LOS MIEMBROS DEL TRIBUNAL

Quienes suscribimos, catedráticos designados Miembros del Tribunal de Grado para la evaluación del trabajo de investigación “**CARACTERIZACIÓN FÍSICA - HIDRÁULICA DEL PAVIMENTO FLEXIBLE EN EL TRAMO COLTA - GUAMOTE DEL CORREDOR VIAL E-35 RIOBAMBA – CUENCA**”, presentado por **Israel Patricio Castillo García**, con cédula de identidad número **0604813196** y **Joan Sebastián Hidalgo Cisneros**, con cédula de identidad número **1805404777**, bajo la tutoría de Mgs. Hernán Vladimir Pazmiño Chiluzza; 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 15 de mayo de 2024.

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



Ing. Ángel Paredes, Mgs.
MIEMBRO DEL TRIBUNAL DE GRADO



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





Dirección
Académica
VICERRECTORADO ACADÉMICO

en movimiento



SISTEMA DE GESTIÓN DE LA CALIDAD

UNACH-RGF-01-04-08.15

VERSIÓN 01: 06-09-2021

CERTIFICACIÓN

Que, **C ASTILLO G ARCIA ISRAEL PATRICIO** con CC: **0604813196**, e **HIDALGO CISNEROS JOAN SEBÁSTIAN** con CC: **1805404777**, estudiantes de la Carrera **INGENIERÍA CIVIL**, Facultad de **INGENIERÍA**; han trabajado bajo mi tutoría el trabajo de investigación titulado **"CARACTERIZACIÓN FÍSICA - HIDRÁULICA DEL PAVIMENTO FLEXIBLE EN EL TRAMO COLTA - GUAMOTE DEL CORREDOR VIAL E-35 RIOBAMBA – CUENCA"**, cumple con el 5 %, de acuerdo al reporte del sistema Anti plagio **TURNITIN**, porcentaje aceptado de acuerdo a la reglamentación institucional, por consiguiente autorizo continuar con el proceso.

Riobamba, 2 de mayo de 2024



Para la certificación por:
**HEENRY VLADIMIR
PAZMIÑO CHILVIZA**

Mgs. Vladimir Pazmiño
TUTOR

DEDICATORIA

Dedico esta investigación a mi hermano y amigo José Emilio. A mi madre Karina quien con su fortaleza, amor, apoyo incondicional y valores inculcados me ha impulsado a alcanzar mis sueños. Gracias por ser mis pilares fundamentales y por creer siempre en mí.

Joan S. Hidalgo Cisneros

Dedico esta tesis a Dios, por ser mi guía y fuente de fortaleza. A mis padres, por su amor incondicional y apoyo constante. A mi pareja, por creer en mí y brindarme su comprensión. A mi suegra Mami Lou, por su amabilidad y generosidad.

De manera especial, a mi abuelita Marujita, quien me acompaña desde el cielo. Su amor y sabiduría siempre serán mi inspiración.

Israel P. Castillo García

AGRADECIMIENTO

A mi madre, Karina, y a mi hermano, José Emilio, porque sin ellos este logro no habría sido posible. También quiero agradecer a mi familia y amigos por ser un apoyo constante a lo largo de este viaje académico. A todos los docentes que contribuyeron a mi formación. De manera especial, quiero reconocer la tutela y guía brindadas por los ingenieros Vladimir Pazmiño y Alfonso Arellano. Igualmente, agradezco a mi compañero Patricio Castillo por su apoyo en la elaboración de esta tesis.

Joan S. Hidalgo Cisneros

Agradezco a todos quienes contribuyeron a la realización de esta tesis. A mis padres, Marcos Castillo y María Elizabeth García, por su apoyo moral y financiero, y a mi hermano, Josué Castillo, por su paciencia durante mis momentos de ausencia. A mis amigos, gracias por su amistad y aliento, y a mi compañero de investigación, Joan Hidalgo, por las valiosas discusiones y el apoyo mutuo.

Mi agradecimiento más profundo es para mi pareja, Daniela Hermosa, por ser un pilar esencial en mi vida. Su amor, paciencia y apoyo han sido cruciales para superar los obstáculos y alcanzar esta meta.

Agradezco a la Universidad Nacional de Chimborazo por la oportunidad de estudiar aquí, y a los ingenieros Vladimir Pazmiño y Alfonso Arellano por su guía y consejos durante este proceso.

Israel P. Castillo García

ÍNDICE GENERAL

DECLARATORIA DE AUTORÍA

DICTAMEN FAVORABLE DEL TUTOR

CERTIFICADO DE LOS MIEMBROS DEL TRIBUNAL

CERTIFICACIÓN ANTIPLAGIO

DEDICATORIA

AGRADECIMIENTO

ÍNDICE GENERAL; ÍNDICE DE TABLAS; ÍNDICE DE FIGURAS; ÍNDICE DE ANEXOS

LISTA DE ABREVIATURAS

RESUMEN Y PALABRAS CLAVE

ABSTRACT

1.	CAPITULO I. INTRODUCCIÓN.....	16
1.1	INTRODUCCIÓN.....	16
1.2	PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	17
1.3	JUSTIFICACIÓN DEL PROBLEMA	18
1.4	OBJETIVOS.....	19
1.4.1	General.....	19
1.4.2	Específicos.....	19
2.	CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO.....	20
2.1	ANTECEDENTES CORREDOR VIAL E35 RIOBAMBA-CUENCA.....	20
2.2	PAVIMENTO.....	20
2.2.1	Pavimento Flexible en el Ecuador.....	20
2.2.2	Permeabilidad en pavimentos flexibles	20
2.2.3	Asfaltos permeables en América	21
2.3	INVESTIGACIONES RELACIONADAS	21
2.4	CONCEPTOS GENERALES FÍSICOS.....	22
2.4.1	Capas granulares.....	22
2.4.2	Análisis granulométrico.....	23
2.4.3	Límites de consistencia.....	23

2.4.4	Macrotextura.....	23
2.4.5	Desgaste a la abrasión.....	24
2.4.6	Densidad de capas granulares.....	24
2.4.7	Resistencia.....	24
2.5	CONCEPTOS GENERALES HIDRÁULICOS	24
2.5.1	Efecto de saturación en capas granulares	24
2.5.2	Diferencia entre porcentaje de absorción, humedad y vacíos.	25
2.5.3	Coefficiente de escurrimiento	25
2.5.4	Velocidad de infiltración	25
2.5.5	Tiempo de Saturación.....	25
2.5.6	Superficie saturada seca.....	26
2.5.7	Escorrentía reducida	26
3.	CAPÍTULO III. METODOLOGÍA.....	27
3.1	TIPO DE INVESTIGACIÓN.....	27
3.2	DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN.....	27
3.3	DIAGRAMA METODOLÓGICO	27
3.4	TÉCNICAS INSTRUMENTOS Y PROCEDIMIENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS.....	28
3.4.1	Granulometría de agregados NTE INEN 696.....	28
3.4.2	Desgaste del árido grueso de partículas menores a 37,5 mm NTE INEN 860	28
3.4.3	Densidad y absorción de agregado fino y grueso NTE INEN 856 y 857.....	28
3.4.4	Extracción de núcleos ASTM D5361	28
3.4.5	Macrotextura del pavimento ASTM E965	29
3.4.6	Estabilidad y flujo Método Marshall ASTM D6927	29
3.4.7	Volumetría y ensayos de desempeño en núcleos NORMA MEXICANA	30
3.4.8	Tasa de infiltración en pavimento flexible ASTM D3385	31
3.5	DEFINICIÓN DE LA MUESTRA.....	33
3.5.1	Población	33
3.5.2	Muestra	33
3.5.3	Tipo de muestreo	34
3.5.4	Tamaño de la Muestra	34
3.5.5	Criterios de Selección.....	34

4.	CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	36
4.1	GÉNESIS DE SUELOS CORREDOR VIAL E35.....	36
4.1.1	Mapa geológico E35	36
4.1.2	Mapa edafológico E35.....	37
4.1.3	Información subrasantes E35.....	38
4.2	CARACTERÍSTICAS FÍSICAS	39
4.2.1	Granulometrías en Subrasantes	39
4.2.2	Granulometrías en Capas Granulares	41
4.2.3	Abrasión.....	43
4.2.4	Densidades y absorción	43
4.2.5	Macrotextura.....	44
4.2.6	Espesores de capas.....	44
4.2.7	Datos núcleos E35	45
4.2.8	Densidades de núcleos.....	45
4.2.9	Humedad y absorción de núcleos	45
4.2.10	Resultados de volumetría de núcleos.....	46
4.3	CARACTERÍSTICAS MECÁNICAS	46
4.3.1	Tensión indirecta	46
4.3.2	Estabilidad y flujo Marshall	47
4.4	PROPIEDADES HIDRÁULICAS	48
4.4.1	Prueba de infiltración del pavimento flexible.....	48
4.5	DISCUSIÓN.....	50
5.	CAPÍTULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	52
5.1	CONCLUSIONES.....	52
5.2	RECOMENDACIONES	53
	BIBLIOGRAFÍA	54
	ANEXOS.....	57

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Coordenadas de extracción de núcleos.....	33
Tabla 2. Características geológicas y edafológicas de cada punto de extracción de núcleos.	38
Tabla 3. Resultados de granulometrías en Subrasantes.....	39
Tabla 4. Resultados de granulometrías en Subbases y Bases.....	41
Tabla 5. Resultados de la degradación en Base.....	43
Tabla 6. Resultados de densidad y absorción de las Subrasantes.....	43
Tabla 7. Resultados de densidad y absorción del agregado fino en Base.....	43
Tabla 8. Resultados de densidad y absorción del agregado grueso en Base.....	44
Tabla 9. Resultado del ensayo del círculo de arena.....	44
Tabla 10. Resultados de espesores de capas.....	44
Tabla 11. Resultados de caracterización de núcleos.....	45
Tabla 12. Resultados densidad bruta (bulk) y teórica máxima (rice).....	45
Tabla 13. Porcentaje de humedad y absorción de núcleos.....	45
Tabla 14. Volumetría y vacíos de núcleos.....	46
Tabla 15. Resultados ensayo de tensión indirecta.....	46
Tabla 16. Núcleos ensayados.....	46
Tabla 17. Resultados ensayo Marshall.....	47
Tabla 18. Resumen datos y observaciones ensayo de infiltración.....	48

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Diagrama metodológico.....	27
Figura 2. Medidas infiltrómetro de doble anillo.....	31
Figura 3. Perfiles burlletes alambrados 341. Esquema adaptado de GLOBAL RUBBER CORPORATION S.A.C.....	32
Figura 4. Colocación del caucho en el contorno inferior del infiltrómetro.....	32
Figura 5. Vista lateral infiltrómetro.....	33
Figura 6. Puntos de extracción planificados.....	35
Figura 7. Formación geológica E35 en tramo de estudio.....	36
Figura 8. Origen edafológico E35 en tramo de estudio.....	37
Figura 9. Curvas granulométricas, Subrasantes.....	40
Figura 10. Curvas granulométricas, Subbase.....	42

Figura 11. Curvas granulométricas, Base.....	42
Figura 12. Núcleo 1, rotura a lo largo del diámetro.	46
Figura 13. Núcleo 5, rotura a lo largo del diámetro.	46
Figura 14. Gráfica de estabilidad vs flujo de núcleos.	47
Figura 15. Curvas de infiltración pavimento flexible.....	49
Figura 16. Comparación curvas de infiltración 1,2 y 5.	49
Figura 17. Comparación curvas de infiltración 3,4 y 6	49
Figura 19. Porcentaje de escurrimiento por punto.....	50

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1. Resumen de resultados	58
Anexo 2. Ejemplo de cálculo, granulometría subrasante punto 1.	59
Anexo 3. Ejemplo de cálculo, límites de consistencia punto 6.	60
Anexo 4. Ejemplo de cálculo, densidad agregado fino base muestra 1.	60
Anexo 5. Ejemplo de cálculo, densidad agregado grueso base muestra 1.	61
Anexo 6. Ejemplo de cálculo, ensayo de infiltración punto 1.....	61
Anexo 7. Medición para posterior extracción de capas granulares.....	62
Anexo 8. Extracción de núcleos.	62
Anexo 9. Límite plástico.	62
Anexo 10. Hoyuelos en parte externa de núcleo.	62
Anexo 11. Ensayo límite líquido.....	62
Anexo 12. Ensayo de abrasión	62
Anexo 13. Ensayo densidad de agregado fino.	63
Anexo 14. Núcleo después de ensayo Marshall.	63
Anexo 15. Riachuelo junto a la vía. Punto 2.	63
Anexo 16. Ensayo de macrotextura.....	63
Anexo 17. Subrasante humedecida. Punto 4.	63
Anexo 18. Ensayo infiltrómetro.	63

LISTA DE ABREVIATURAS

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

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

C: Coeficiente de escurrimiento.

EMAAP-Q: Empresa Metropolitana de Alcantarillado y Agua Potable Quito.

GMM: Gravedad específica teórica máxima.

IP: Índice de plasticidad.

LL: Límite líquido.

LP: Límite plástico.

MTOP: Ministerio de Transporte y Obras Públicas.

MOP: Ministerio de Obras Públicas.

NEVI: Normativa Ecuatoriana Vial.

NTE INEN: Norma Técnica Ecuatoriana - Instituto Ecuatoriano de Normalización.

SH: Seca al horno.

SUCS: Sistema Unificado de Clasificación de Suelos.

SSS: Saturada superficialmente seca.

TSR: Resistencia a la tensión indirecta.

WSDOT: The Washington State Department of Transportation traducido al español como el Departamento de Transporte del Estado de Washington.

RESUMEN

Durante las precipitaciones el agua interactúa con el sistema de drenaje vial, la infiltración y escurrimiento del líquido juegan un factor importante en la condición de rozamiento calzada-neumático e influye en la seguridad que proporciona el pavimento. Así mismo, una mayor impermeabilidad en la estructura vial altera el ciclo normal hidrológico conllevando a una menor recarga de los acuíferos. Las características hidráulicas están relacionadas con las propiedades físico-mecánicas del pavimento, tales como la distribución granular de las capas, absorción, densidad, macrotextura, resistencia, entre otras. Con estos antecedentes surge la necesidad de medir estas propiedades físicas e hidráulicas del pavimento flexible presente en el corredor vial E35 Riobamba-Cuenca tramo Colta-Guamote, ya que la información proporcionada por la normativa INEN 5 no ha registrado cambios desde el año 1992. El análisis presentado en esta investigación evidencia que el coeficiente de escurrimiento obtenido en el lugar de estudio es mayor con respecto a lo anotado por la normativa. En lo que concierne a las características físicas-mecánicas se observa que las capas granulares cumplen con los parámetros establecidos por el Ministerio de Transporte y Obras Públicas (MTOB).

Palabras clave: Pavimento flexible, velocidad de infiltración, escurrimiento, características físicas-mecánicas, hidráulicas.

ABSTRACT

During rainfall, water interacts with the road drainage system, and the infiltration and runoff of the liquid play an important role in the condition of the road-tire friction and influence the safety provided by the pavement. Similarly, increased impermeability in the road structure alters the normal hydrological cycle, leading to less recharge of aquifers. The hydraulic characteristics are related to the physical-mechanical properties of the pavement, such as the granular distribution of the layers, absorption, density, macrotexture, resistance, among others. With this background, the need arises to measure these physical and hydraulic properties of the flexible pavement present in the E35 Riobamba- Cuenca highway section Colta- Guamote, since the information provided by the INEN 5 has not registered changes since 1992. The analysis presented in this research shows that the runoff coefficient obtained in the study area is higher than that noted by the regulations. As far as the physical-mechanical characteristics are concerned, it is observed that the granular layers comply with the parameters established by MTOP.

Keywords: Flexible pavement, infiltration rate, runoff, physical-mechanical characteristics, hydraulic.



Reviewed by:

M.E.d Diana Chavez G.

ENGLISH PROFESSOR

C.C. 065003795-5

1. CAPITULO I. INTRODUCCIÓN

1.1 INTRODUCCIÓN

El desarrollo económico y social a nivel mundial está estrechamente vinculado al buen estado y funcionamiento de las vías de comunicación. Entre las estructuras más comúnmente construidas por el hombre se encuentran los pavimentos flexibles (Álvarez, 2017). En Ecuador existen pavimentos rígidos, articulados y flexibles como indica la Norma Ecuatoriana Vial (NEVI, 2013).

Gran parte de las precipitaciones son receptoras por los pavimentos, por ello se debe considerar un adecuado drenaje superficial y subsuperficial. El primero se encarga de llevar el agua superficial hacia las cunetas o desagües, mientras que el subterráneo toma las precauciones necesarias para que la estructura subyacente sea eficiente a la presencia del agua (García, 2016). Esta es una consideración clave al momento de diseñar pavimentos.

Los pavimentos flexibles permeables ofrecen una solución innovadora para la gestión de aguas pluviales al combinar la resistencia y durabilidad típicas de los pavimentos tradicionales con una eficaz capacidad de infiltración y drenaje del agua de lluvia. En contraste con los pavimentos impermeables convencionales, que generan escorrentía superficial y pueden contribuir a la contaminación del agua (Chen et al., 2020).

La cualidad que tienen estos pavimentos es que replican los procesos naturales de drenaje, reduciendo la escorrentía. Esta capacidad de infiltración está estrechamente relacionada con el diseño y los materiales empleados. Factores como la distribución del tamaño de los poros, el espacio vacío en la estructura del pavimento y la permeabilidad de las capas granulares desempeñan un papel fundamental. Al optimizar estas propiedades hidráulicas, los pavimentos permeables no solo disminuyen la cantidad de aguas pluviales que llegan a los sistemas de drenaje, sino que también fomentan la recarga de los acuíferos y mantienen los ciclos hidrológicos naturales en los entornos urbanos (Sambito et al., 2021).

A su vez, los pavimentos en zonas andinas se enfrentan a un conjunto de desafíos únicos debido a las condiciones climáticas extremas, que incluyen bajas temperaturas nocturnas, altas temperaturas diurnas, cambios repentinos de temperatura, gradientes térmicos, exposición a la radiación solar, ráfagas de viento, entre otras. Estas condiciones afectan las características físicas e hidráulicas del pavimento, provocando microfisuras, fracturamientos, desprendimientos, degradación del asfalto, erosión, aumento del

contenido de humedad, disminución de la resistencia al esfuerzo cortante, deformaciones y colapsos (Del Águila, 1999).

El objetivo de esta investigación es identificar las características hidráulicas de la estructura y comprender en detalle las propiedades físicas presentes en el pavimento flexible mediante métodos destructivos, como la extracción de núcleos. Todos los estudios se llevarán a cabo en el corredor vial E35 Riobamba-Cuenca, que tiene una longitud aproximada de 425 kilómetros.

1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El crecimiento demográfico está transformando paisajes naturales en extensas áreas pavimentadas, interrumpiendo el ciclo hidrológico natural al reemplazar la cobertura vegetal. Esta expansión de superficies impermeables limita la infiltración del agua y la recarga de los acuíferos, lo que aumenta el escurrimiento superficial y el riesgo de inundaciones y erosión del suelo. Además, la pérdida de vegetación afecta la evapotranspiración, esencial para el cumplimiento normal del ciclo hidrológico. La disminución en la recarga de acuíferos amenaza la disponibilidad de agua dulce, vital para el suministro de agua potable, la agricultura y los ecosistemas frágiles.

La permeabilidad de los caminos pavimentados varía según el material, diseño y estado de conservación, lo que afecta al factor de escurrimiento y su capacidad para drenar eficientemente el agua de lluvia. Un factor de escurrimiento deficiente debido al deterioro o a una mala selección de materiales puede ocasionar acumulación de agua en la superficie, formando charcos y lodazales que dificultan el tránsito. En situaciones graves, la falta de permeabilidad puede sobrecargar el sistema de drenaje, provocando inundaciones y poniendo en riesgo la seguridad. Es esencial seleccionar materiales y diseños adecuados, realizar mantenimientos preventivos y asegurar una inspección periódica para mantener la permeabilidad y evitar problemas futuros.

Las normativas nacionales que definen los parámetros de escurrimiento en pavimentos muestran ciertas limitaciones en términos de precisión y alcance. Mayormente formuladas en la década de 1970, estas normativas establecen rangos poco específicos para distintos tipos de pavimentos, lo que dificulta la implementación eficaz de criterios para el diseño y manejo de aguas pluviales.

El método de infiltración, basado en la técnica del doble anillo, proporciona una herramienta valiosa para evaluar la permeabilidad de los pavimentos. Esta técnica permite determinar con precisión el coeficiente de escurrimiento, una característica hidráulica fundamental del pavimento que refleja su capacidad para drenar el agua de lluvia de manera eficiente. Esta característica hidráulica no existe de forma aislada. Su valor está estrechamente relacionado con las propiedades físico-mecánicas de la capa de rodadura y las capas granulares subyacentes de la infraestructura vial.

Existe una brecha de conocimiento en la comprensión de la afección causada por las características físicas-mecánicas obtenidas mediante ensayos en campo y laboratorio con el comportamiento hidráulico en el pavimento flexible existente en el corredor E35 Balbanera-Palmira. Esta falta de comprensión limita la capacidad de predecir el rendimiento del pavimento bajo condiciones de carga y clima, lo que puede conducir a fallas prematuras, costos de mantenimiento elevados y riesgos para la seguridad vial.

Con base en estas consideraciones, se plantea la siguiente pregunta de investigación ¿Cómo influyen las condiciones físicas-mecánicas obtenidas mediante ensayos en campo y laboratorio con el comportamiento hidráulico en el pavimento flexible existente en el corredor E35?

1.3 JUSTIFICACIÓN DEL PROBLEMA

La creciente urbanización tiene un profundo impacto en el ciclo hidrológico natural, alterando el delicado equilibrio entre infiltración, escorrentía y evapotranspiración. A medida que los paisajes naturales son reemplazados por superficies pavimentadas, la capacidad del suelo para absorber el agua de lluvia disminuye, lo que genera varias consecuencias perjudiciales

El incremento en la escorrentía y erosión resultante de las superficies impermeables impide la infiltración del agua de lluvia en el suelo, generando un flujo superficial que arrastra sedimentos y contaminantes, lo que puede ocasionar la erosión del suelo y de las riberas de los ríos, degradar la calidad del agua y afectar los ecosistemas. Esta disminución en la infiltración también se traduce en una recarga reducida de los acuíferos subterráneos, fundamentales para el suministro de agua dulce en actividades cotidianas como la agricultura y el consumo humano, lo que puede acarrear consecuencias graves para la salud y el medio ambiente. Asimismo, la alteración en la evapotranspiración, debido a la sustitución de áreas verdes por pavimentos, afecta los patrones climáticos locales y

contribuye al fenómeno de las islas de calor urbanas. Esta combinación de factores incrementa el riesgo de inundaciones en áreas urbanas, saturando los sistemas de drenaje y generando importantes daños materiales, de infraestructura y ecológicos, representando una amenaza significativa para la seguridad humana.

Para abordar estos desafíos y mitigar los impactos negativos de la urbanización en el ciclo hidrológico, es esencial desarrollar soluciones de pavimento sostenibles que promuevan la infiltración y el drenaje. Este estudio ofrecerá una valiosa contribución al entendimiento de las propiedades físico-mecánicas de los pavimentos flexibles y su comportamiento hidráulico en el corredor E35 Riobamba-Cuenca. Al comprender cómo estas propiedades influyen en la capacidad del pavimento para infiltrar y drenar el agua lluvia, se podrá desarrollar estrategias viales de diseño y gestión más efectivas.

1.4 OBJETIVOS

1.4.1 General

Determinar las principales características físicas e hidráulicas de un tramo de prueba de pavimento en el corredor E35 utilizando métodos destructivos y métodos de saturación.

1.4.2 Específicos

- Analizar las características físicas-mecánicas de las capas granulares del pavimento flexible.
- Examinar las propiedades hidráulicas del pavimento.

2. CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO

2.1 ANTECEDENTES CORREDOR VIAL E35 RIOBAMBA-CUENCA

La construcción de la carretera E35 Riobamba-Alausí se realizó en varias etapas a lo largo de varias décadas. En la década de 1950 se iniciaron las obras de construcción del tramo Riobamba-Balbanera. En la década de 1960 se completó este tramo y se iniciaron las obras del tramo Balbanera-Alausí, las cuales concluyeron en la década de 1970. Durante las décadas de 1980 y 1990 se llevaron a cabo mejoras y ampliaciones en la carretera, y en la década de 2000 se realizaron trabajos de mantenimiento y rehabilitación en la misma.

En 2019 se publicó el proceso de licitación para el mantenimiento de la carretera E35: Riobamba-Balbanera-Alausí-Guasuntos-Chunchi-Río Angas (límite provincial Chimborazo / Cañar). Este proyecto es apoyado por la Corporación Andina de Fomento (CAP) y fue adjudicado en febrero de 2020 a la Compañía Verdú S.A por la cantidad de USD 29 391 787,46 dólares americanos con un plazo establecido de 5 años (MTOP, 2020).

2.2 PAVIMENTO

2.2.1 Pavimento Flexible en el Ecuador

Los pavimentos flexibles se componen principalmente de una capa de hormigón asfáltico, la cual se sitúa sobre una estructura seleccionada de materiales colocados sobre la subrasante del terreno. (Rondón & Reyes, 2007).

En Ecuador se carece de normas de última generación para el diseño de estas estructuras. El Ministerio de Obras Públicas proporciona las Especificaciones Generales Para la Construcción de Caminos y Puentes (MOP, 2002). Estas especificaciones detallan los requisitos técnicos que deben cumplir tanto los materiales destinados al diseño de las mezclas, así como los rubros y modalidades de pago.

2.2.2 Permeabilidad en pavimentos flexibles

La permeabilidad en pavimentos flexibles se refiere a la capacidad de la estructura del pavimento para permitir el paso del agua a través de sus poros. Aunque la capa asfáltica tiene una permeabilidad baja, no es completamente impermeable. Esto, sumado a la presencia de grietas y desniveles, permite que el agua superficial se infiltre y genere un flujo interno (Pino, 2020). La importancia de esta característica radica en el control de escorrentía, recarga de acuíferos y disminución del efecto isla de calor (Abellán, 2016).

2.2.3 Asfaltos permeables en América

Existen en el continente investigaciones y ejemplos de estos pavimentos trabajando en conjunto con sistemas de drenaje. La Calle 26 en Bogotá, Colombia fue repavimentada con asfalto permeable en 2010. El proyecto ha sido un éxito en la reducción de la escorrentía y la recarga del acuífero (Mora, 2019). En Miami, Florida la autopista I-95 fue repavimentada en 2013, reduciendo el ruido del tráfico y mejorando la calidad del aire. El estacionamiento del Aeropuerto Internacional de Denver, Colorado fue construido con asfalto permeable en 2015, este proyecto ha logrado reducir significativamente la escorrentía y recargar los acuíferos vecinos (Harvey et al., 2015).

2.3 INVESTIGACIONES RELACIONADAS

A nivel nacional existen estudios como el "Análisis comparativo de la estabilidad y la deformación del pavimento asfáltico con fibras celulósicas y pavimento asfáltico tradicional", realizado por Jiménez (2016). Esta investigación abordó diferentes aspectos del hormigón asfáltico, incluyendo el análisis de los agregados utilizados en la fabricación de briquetas con distintos porcentajes de asfalto. Las mezclas asfálticas compactadas resultantes fueron sometidas a ensayos utilizando la máquina de Marshall para obtener datos sobre su estabilidad y flujo. Además, se determinaron los pesos saturados superficialmente secos (SSS), secos y saturados de las briquetas para calcular las densidades bulk y rice.

Se ha realizado una investigación titulada "Determinación del rango de porcentaje de vacíos en la base tratada con asfalto en caliente como parámetro de control de la mezcla", llevado a cabo por Villamizar y Torres (2013), que aborda los porcentajes de vacíos en los núcleos de pavimento. Este análisis se centró en la vía Bucaramanga-Cúcuta, Colombia, la cual fue tratada con asfalto en caliente sin considerar el porcentaje de vacíos. El estudio, que se extendió por aproximadamente un año, se realizó para evaluar la porosidad resultante de la capa de rodadura. Tras analizar los núcleos, se determinó que el porcentaje de vacíos oscilaba entre el 5% y el 7%.

Otro estudio interesante es el "Diseño de mezcla asfáltica en caliente modificada mediante la adición de cal hidratada por vía seca" de Bermeo (2021). Esta investigación incluyó ensayos de tensión indirecta en briquetas de pavimento flexible, comparando aquellas con modificaciones de cal hidratada y las convencionales sin modificaciones. Se

encontró que las probetas convencionales arrojaron un promedio de resistencia de 653,12 kPa.

El Distrito Metropolitano de Quito sigue las Normas de Diseño de Sistemas de Alcantarillado establecidas por la Empresa Metropolitana de Alcantarillado y Agua Potable (EMAAP-Q, 2009). Estas normas representan una actualización y complementación de la regulación previa presentada por la INEN 5 (1992), con el propósito de asegurar una gestión eficaz de los servicios esenciales en la capital.

El coeficiente de esorrentía proporcionado por la EMAAP-Q (2009) está determinado por varios factores, incluyendo el entorno (rural o urbano), el período de retorno y las características de la superficie. Por ejemplo, para pavimentos flexibles, este coeficiente varía entre 0,85 y 0,9 en un período de retorno de 2, 5 y 10 años, los cuales están asociados con diferentes niveles de riesgo de inundación: bajo, moderado y alto, respectivamente. Esta variable es fundamental para calcular la intensidad de la lluvia y, por consiguiente, para determinar el caudal pluvial utilizado en el diseño del sistema de drenaje.

2.4 CONCEPTOS GENERALES FÍSICOS

2.4.1 Capas granulares

Estas son fundamentales en la construcción de carreteras y otras estructuras pavimentadas. El pavimento flexible está formado por una base y subbase que contienen agregados compactados de diversos tamaños (Aldana, 2020).

La capa base despliega varias funciones clave, como la distribución de cargas del tráfico, la estabilización, el drenaje efectivo y la protección de la subbase. Su ubicación, materiales y colocación se definen en planos o especificaciones, garantizando calidad y rendimiento a largo plazo. Las de Clase 1 se componen completamente de agregados triturados, cumpliendo con los requisitos granulométricos de los Tipos A y B. Las de Clase 2 consisten en fragmentos de roca o grava triturados, con al menos el 50% del agregado grueso triturado. Las de Clase 3 también emplean fragmentos triturados, con al menos el 25% del agregado grueso triturado. Las bases de Clase 4 están constituidas por agregados obtenidos mediante trituración o cribado de piedras fragmentadas naturalmente o gravas.

La capa de subbase desempeña un papel fundamental al mejorar la capacidad portante de la subrasante, facilitar el drenaje, protegerla y proporcionar una plataforma estable para la base. A diferencia de esta última, la subbase se distingue por su menor espesor, tamaño

de agregados, grado de compactación y costo. Ambas capas colaboran para crear una plataforma sólida. Las de Clase 1 consisten en agregados triturados y graduados uniformemente dentro de los límites de granulometría. Las de Clase 2 están compuestas por agregados triturados o cribados de yacimientos naturales, también graduados uniformemente. Las de Clase 3 emplean agregados naturales o procesados que cumplan con los requisitos. En contratos que especifican subbases Clase 1 o 2, al menos el 30% de los agregados deben ser triturados (MOP, 2002).

2.4.2 Análisis granulométrico

La granulometría, también conocida como análisis granulométrico, es un proceso crucial en la ingeniería civil y de materiales que implica determinar la distribución de tamaños de partículas en un material granular. Este análisis se lleva a cabo mediante técnicas como el tamizado o el uso de instrumentos como el láser granulómetro, permitiendo verificar si un material cumple con las especificaciones necesarias para una aplicación particular (Álvarez & Mercado, 2016).

2.4.3 Límites de consistencia

Los límites de consistencia son indicadores del comportamiento del suelo frente a cambios en su contenido de humedad. Incluyendo el Límite Líquido (LL) y el Límite Plástico (LP), junto con el Índice Plástico (IP), se determinan mediante ensayos de laboratorio estandarizados. La clasificación del suelo según estos límites, especialmente el IP, es esencial para comprender su tipo y plasticidad, como se hace en el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS). Además, los límites de consistencia informan sobre la trabajabilidad del suelo: un suelo con un IP alto es más plástico y fácil de moldear, mientras que un IP bajo indica menor plasticidad y mayor dificultad para trabajar. Asimismo, ayudan a prever el comportamiento del suelo en diversas condiciones de humedad, siendo un indicador útil para evaluar su susceptibilidad a la expansión y contracción (Geotecnia fácil, 2024).

2.4.4 Macrotextura

Un parámetro de seguridad fundamental de los pavimentos es la macrotextura. Representa las irregularidades superficiales con dimensiones horizontales que varían entre 0,5 y 50 mm, y verticales entre 0,2 y 10 mm. Esta característica está influenciada por el tamaño del árido, el diseño de la mezcla y la compactación durante la construcción, así

como por los tratamientos superficiales aplicados, si los hubiera (Ipiates, 2019). Se vincula también a la resistencia al deslizamiento, dada por el coeficiente de fricción.

Según el Departamento de Transporte del Estado de Washington (WSDOT), para pavimentos flexibles con alto tráfico se recomienda una profundidad promedio de 0,65 mm (Cabrera & Stammitti, 2005).

2.4.5 Desgaste a la abrasión

El deterioro por abrasión implica la pérdida gradual de material mineral en la superficie y sus capas subyacentes, causada por la fricción generada tanto por el tráfico vehicular como por factores ambientales. Este proceso puede ocasionar una disminución progresiva en la calidad y resistencia del hormigón asfáltico con el tiempo. Se evalúa mediante pruebas de laboratorio que determinan la cantidad de desgaste, expresada como un porcentaje. Un pavimento construido con materiales resistentes a la abrasión suele ser más duradero y conservar su calidad a lo largo del tiempo (Falcon & Santos, 2016).

2.4.6 Densidad de capas granulares

La densidad y la capacidad granular están estrechamente vinculadas con la compactación de los materiales que conforman la estructura que yace debajo de la capa de rodadura del hormigón asfáltico. Al lograr una densidad adecuada, se reduce la deformación, lo que a su vez contribuye a mantener un nivel de servicio óptimo (Chapoñan & Quispe, 2017).

2.4.7 Resistencia

Los pavimentos flexibles, a diferencia de los rígidos, transmite los esfuerzos hasta mayores profundidades y a medida que esta aumenta la carga es distribuida sobre una mayor área, provocando deformaciones, desmoronamientos o agrietamientos. Por esto los materiales de mejor calidad deben estar en la capa de rodadura y esta puede ir disminuyendo en cada capa (Torres & Pérez, 2017).

2.5 CONCEPTOS GENERALES HIDRÁULICOS

2.5.1 Efecto de saturación en capas granulares

Se debe garantizar que la capa de rodadura tenga un buen drenaje para evitar que la resistencia de las capas granulares se vea afectada por el efecto de saturación (Castaño et

al., 2009). Por ello las propiedades hidráulicas son de suma importancia para la seguridad del usuario de la vía.

2.5.2 Diferencia entre porcentaje de absorción, humedad y vacíos.

El porcentaje de absorción se refiere a la cantidad de agua que un material puede absorber y es un valor constante, mientras que la humedad se refiere a la cantidad de agua que un material ya tiene y esta puede variar con el tiempo y con las condiciones ambientales. Por su parte, los vacíos se refieren a la porosidad presente en un material.

2.5.3 Coeficiente de escurrimiento

El coeficiente de escurrimiento (C) es un parámetro crucial en el diseño de pavimentos flexibles, ya que indica la proporción de agua de lluvia que se desplaza por la superficie del pavimento. Este valor es esencial para determinar el grosor adecuado de la capa de rodadura y evaluar la necesidad de implementar un sistema de drenaje. Es crucial seleccionar un sistema de drenaje apropiado para prevenir posibles problemas de inundación y erosión. La variabilidad de este coeficiente se debe a factores como la textura de la superficie, la pendiente, la permeabilidad del pavimento, las condiciones climáticas y el tipo de material utilizado en los pavimentos flexibles (Zegarra-Tarqui et al., 2015).

2.5.4 Velocidad de infiltración

La tasa de infiltración indica la velocidad a la que el agua penetra en el pavimento hasta alcanzar la saturación, generalmente expresada en milímetros por hora (mm/h). Se evalúa mediante pruebas similares a las utilizadas para medir el escurrimiento del agua.

Es esencial comprender la infiltración, ya que el agua puede dañar la superficie de rodadura cuando las capas no pueden drenar adecuadamente y prevenir la capilaridad. Además, puede afectar la subrasante que sostienen la estructura vial. Por lo tanto, cuantificar la cantidad de agua que penetra en el pavimento es fundamental para estimar con mayor precisión los daños potenciales y contribuir al diseño del sistema de drenaje subterráneo óptimos (Contreras, 2020).

2.5.5 Tiempo de Saturación

Con el paso del tiempo, el agua ejerce un impacto general en todos los tipos de pavimentos, aunque algunos muestran un rendimiento superior cuando están expuestos a períodos prolongados de humedad. El tiempo necesario para que el pavimento alcance su

saturación, obtenido a través de los ensayos de infiltración, se define como el tiempo que el pavimento requiere para alcanzar dicho estado, usualmente medido en horas.

2.5.6 Superficie saturada seca

La existencia de una barrera impermeable en el pavimento obstaculiza el drenaje eficiente del agua en las capas inferiores o la subrasante cuando estas se saturan. Esto puede dar lugar a la acumulación de presión hidrostática y tener un impacto adverso en la capacidad de soporte del pavimento, reduciendo su resistencia y generando deformaciones.

Es crucial diseñar un sistema de drenaje efectivo durante la construcción del pavimento para prevenir problemas relacionados con la saturación del suelo y su posterior sequedad. Para mitigar los efectos de la acumulación de agua y mantener la estabilidad del pavimento a lo largo del tiempo, se recomienda utilizar materiales con propiedades de drenaje adecuadas y la inclusión de capas de drenaje en el diseño (Huang, 2005).

2.5.7 Escorrentía reducida

La escorrentía reducida en pavimentos flexibles se refiere a la capacidad de estas estructuras para minimizar y controlar la cantidad de agua de lluvia que fluye sobre su superficie, evitando así la erosión del pavimento y la contaminación del agua. Esta característica se logra mediante la implementación de estrategias de diseño y construcción que promueven la infiltración y el drenaje del agua pluvial (Environmental Protection Agency, 2021).

3. CAPÍTULO III. METODOLOGÍA

3.1 TIPO DE INVESTIGACIÓN

El enfoque de la investigación será cuantitativo, ya que se llevarán a cabo diversos ensayos en laboratorio de las muestras tomadas en campo, de las cuales se obtendrán datos numéricos. Estos datos serán analizados para determinar las características físicas-mecánicas e hidráulicas del pavimento flexible y así obtener el coeficiente de escorrentía actualizado real.

3.2 DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN

El enfoque descriptivo del diseño implica la recopilación de datos que detallan los eventos, seguido por la organización, tabulación, representación y descripción de dichos datos utilizando gráficos para una mejor comprensión (Abreu, 2012). Este método permite la presentación detallada de las características físicas-mecánicas e hidráulicas del pavimento flexible en el tramo Colta-Guamote del corredor vial E 35. Estos datos recopilados son valiosos para investigaciones futuras.

3.3 DIAGRAMA METODOLÓGICO

El presente diagrama muestra la secuencia de pasos para cumplir con los objetivos planteados.

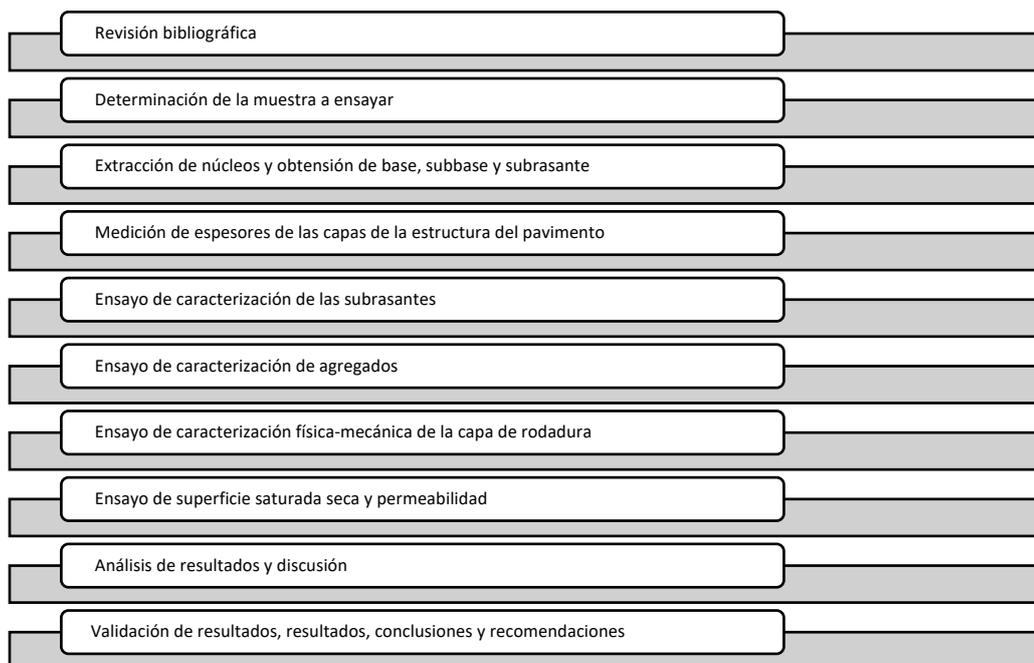


Figura 1. Diagrama metodológico.

3.4 TÉCNICAS INSTRUMENTOS Y PROCEDIMIENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS

3.4.1 Granulometría de agregados NTE INEN 696

Este procedimiento de prueba se aplica principalmente para determinar la gradación de materiales destinados a ser utilizados como áridos en la elaboración de hormigón u otros fines. Los resultados obtenidos se emplean para comprobar si la distribución de tamaño de las partículas cumple con los requisitos establecidos en las especificaciones correspondientes, así como para supervisar la producción de diferentes productos que contienen áridos. Además, la información recabada puede ser útil para desarrollar relaciones que estimen la porosidad y disposición de las partículas (INEN 696, 2011).

3.4.2 Desgaste del árido grueso de partículas menores a 37,5 mm NTE INEN 860

Este estándar detalla el método de ensayo empleado para determinar el valor de degradación del árido grueso con tamaño inferior a 37,5 mm (que abarca gravas, piedras naturales y materiales triturados), utilizando la pérdida de masa provocada por el desgaste e impacto, mediante la máquina de Los Ángeles (INEN 860, 2011).

3.4.3 Densidad y absorción de agregado fino y grueso NTE INEN 856 y 857

Estos métodos de ensayo se utilizan para calcular la densidad promedio de una muestra de árido fino o grueso (sin considerar el volumen de vacíos entre partículas), así como la densidad relativa (gravedad específica) y la absorción del árido. Según el procedimiento empleado, la densidad puede expresarse como seca al horno (SH), saturada superficialmente seca (SSS) o como densidad aparente (INEN 856, 2010). Del mismo modo, la densidad relativa (gravedad específica), una medida adimensional, puede expresarse como SH, SSS o como densidad relativa aparente (gravedad específica aparente). Las densidades SH y las densidades relativas SH se determinan después de secar el árido, mientras que las densidades SSS, las densidades relativas SSS y la absorción se determinan después de saturar el árido en agua durante un período definido (INEN 857, 2010).

3.4.4 Extracción de núcleos ASTM D5361

Esta práctica detalla un método para extraer muestras de mezcla bituminosa compactada de un pavimento para su análisis en laboratorio. Se recomienda el uso de taladros de núcleo o sierras eléctricas para minimizar el daño al pavimento. Se especifica que las brocas de

taladro deben estar hechas de acero endurecido o materiales similares con virutas de diamante incrustadas, mientras que las hojas de sierra deben ser de metal endurecido con virutas de diamante o de un material abrasivo.

Se enfatiza la importancia de una fuente de enfriamiento, como agua o hielo seco, para evitar daños por calor durante la extracción de la muestra generado por la fricción. No es necesario utilizar un dispositivo para separar muestras de núcleos de capas subyacentes, pero si se emplea, debe ser un semicírculo de metal con un radio interior igual al radio exterior del núcleo y debe tener una manija rígidamente fijada (ASTM D5361, 2006).

3.4.5 Macrotextura del pavimento ASTM E965

Este método de prueba describe la manera de calcular la profundidad media de la macrotextura en una superficie pavimentada mediante la aplicación controlada de una cantidad específica de arena sobre la misma, seguida de la medición del área total cubierta. El objetivo principal es obtener un valor promedio exclusivamente de la rugosidad presente en el pavimento (ASTM E965, 2019).

3.4.6 Estabilidad y flujo Método Marshall ASTM D6927

La estabilidad Marshall es la carga máxima de resistencia alcanzada durante una secuencia de carga a una velocidad de deformación constante en mezclas asfálticas. Además de esta definición tradicional, también puede definirse como la carga en la cual la tasa de aumento de carga comienza a disminuir, generando una curva horizontal. La magnitud de la estabilidad varía según factores como el tipo de agregado y el asfalto utilizado.

El flujo Marshall es una medida de la deformación total en una mezcla asfáltica durante el ensayo de estabilidad, abarcando su parte elástica y plástica. Se extiende desde el punto de intersección de la tangente proyectada con el eje x hasta donde la curva comienza a nivelarse, generalmente indicando la estabilidad máxima. En casos de falta de claridad en la condición de falla, se puede tomar como referencia el punto que presenta seis puntos de flujo o 0.01 pulgadas (1.5 mm) a la derecha de la línea tangente. Los valores superiores e inferiores del flujo Marshall establecen límites aceptables, indicando plasticidad excesiva o fragilidad respectivamente (ASTM D6927, 2015).

3.4.7 Volumetría y ensayos de desempeño en núcleos NORMA MEXICANA

3.4.7.1 Método de prueba para determinar la gravedad específica bruta y densidad de la mezcla asfáltica compactada

El propósito de este procedimiento es calcular la gravedad específica bruta o bulk y la densidad de la mezcla asfáltica compactada, utilizada para determinar sus propiedades volumétricas y el peso específico. Para ello, se emplea equipo especializado que incluye una balanza con una resolución de 0.1 g, capaz de pesar el espécimen suspendido en agua, un baño de agua para mantener una temperatura constante de 25 ± 1 °C, un termómetro con una resolución mínima de 0.5 °C y una canastilla de tamaño adecuado para contener o sostener los especímenes.

3.4.7.2 Método de prueba para determinar la gravedad específica teórica máxima y densidad de la mezcla asfáltica

La gravedad específica teórica máxima (GMM) o rice de mezclas asfálticas sin compactar es una propiedad fundamental que varía según la composición de la mezcla en términos de granulometría y contenido de asfalto. Se utiliza en diversos cálculos, como la determinación de los vacíos de aire en la mezcla compactada, la cantidad de asfalto absorbido por el agregado y la fijación de valores objetivo de compactación en el campo. Para llevar a cabo esta medición, se requiere equipamiento especializado que incluye un picnómetro de vacío de metal o plástico, una bomba de vacío, un manómetro de presión absoluta, una válvula de alivio, un dispositivo de agitación, una balanza precisa, un baño de agua para mantener la temperatura constante, un termómetro y un horno para controlar la temperatura.

3.4.7.3 Método de prueba para determinar la resistencia de la mezcla asfáltica compactada al daño inducido por humedad por medio de la Relación en la Resistencia a la Tensión Indirecta (TSR)

La determinación de la resistencia al daño inducido por humedad en mezclas asfálticas compactadas implica la comparación de la resistencia a la tensión indirecta (TSR) entre especímenes acondicionados y no acondicionados. Este método permite evaluar cómo la exposición a la humedad afecta la resistencia de la mezcla asfáltica. Se requieren equipos específicos, como una prensa de ensayo con un anillo dinamométrico, una celda de carga para aplicar carga de compresión controlada, mordazas tipo Lottman para sujetar los

especímenes, una balanza precisa, un baño de agua con dos temperaturas controladas ($60 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$ y $25 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$), un termómetro y un instrumento de medición lineal (Ayala et al., 2018).

3.4.8 Tasa de infiltración en pavimento flexible ASTM D3385

Este método implica insertar dos cilindros abiertos uno dentro del otro en el suelo, llenándolos parcialmente con agua y manteniendo constante el nivel del líquido. El volumen de líquido agregado al anillo interior para mantener el nivel constante se utiliza como medida de la cantidad de líquido que se infiltra en el suelo (ASTM D3385, 2003).

Esta norma se tomó como referencia para aplicar un proceso similar en un pavimento flexible, pero se deben considerar algunas adaptaciones para su colocación en la superficie. Los dos cilindros concéntricos tienen un diámetro de 250 mm y 450 mm para el cilindro interior y exterior respectivamente, con una altura compartida de 600 mm (figura 2). Están fabricados con acero galvanizado de 1.5 mm de espesor y tiene un peso total de 22.5 kg.

Se coloca un caucho o burllete (figura 3) con alma metálica en el contorno inferior de ambos cilindros para sellarlos, como se muestra en la figura 4.

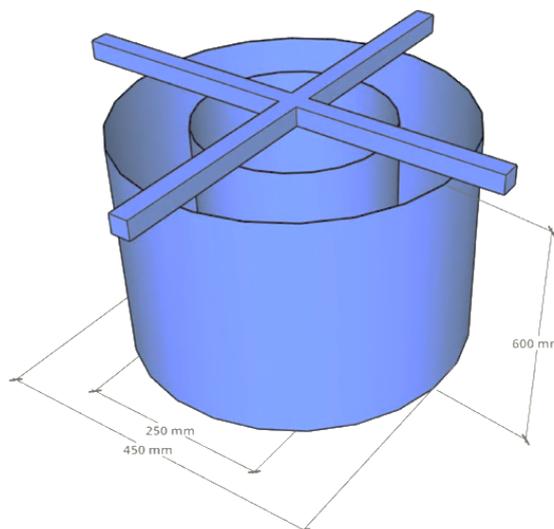


Figura 2. Medidas infiltrómetro de doble anillo.

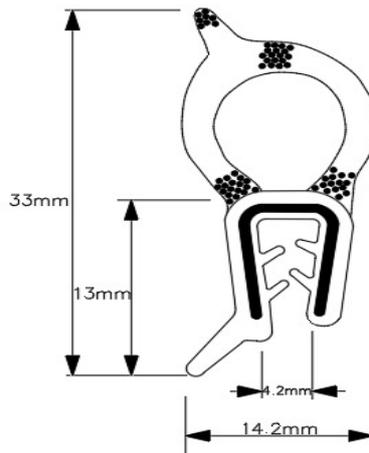


Figura 3. *Perfiles burlletes alambrados 341. Esquema adaptado de GLOBAL RUBBER CORPORATION S.A.C.*



Figura 4. *Colocación del caucho en el contorno inferior del infiltrómetro.*

Una vez equipado con el caucho, el infiltrómetro se coloca sobre el pavimento asegurándose que la superficie este completamente seca y limpia. Luego, se reparten un total de 60 kg de peso, con 15 kg en cada esquina del marco portante, como se muestra en la figura 5.

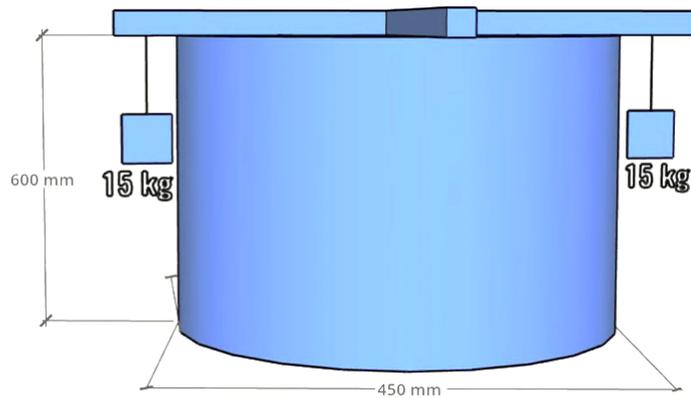


Figura 5. Vista lateral infiltrómetro.

Con el fin de prevenir cualquier filtración durante el ensayo, se emplea un adhesivo sellador de uso múltiple en las uniones del caucho, tanto en la parte exterior como en la interior del contorno inferior del equipo. La aplicación de la silicona se realiza mediante una pistola metálica y se deja secar durante al menos 20 minutos antes de verter el agua. Los datos se registran en intervalos de 30 minutos, midiendo desde el borde superior del anillo interno hasta la película de agua.

3.5 DEFINICIÓN DE LA MUESTRA

3.5.1 Población

Corredor vial E35 tramo Colta-Guamote comprendido por 44,1 km ubicado en la provincia de Chimborazo.

3.5.2 Muestra

En el tramo designado se extrajeron 6 muestras cilíndricas de hormigón asfáltico de 3.75 in (95 mm) de diámetro aproximadamente de acuerdo con la normativa ASTM D5361 (2006), teniendo en cuenta la seguridad, importancia y facilidad de la toma de cilindros en sitio. En la tabla 1 se muestra las coordenadas de cada punto de extracción.

Tabla 1. Coordenadas de extracción de núcleos.

PUNTO	ESTE	NORTE
1	749101.00	9808145.00
2	752248.74	9795027.52
3	754014.00	9789510.00
4	754689.00	9784682.00
5	752532.00	9776913.00
6	750955.00	9772749.00

3.5.3 Tipo de muestreo

En esta investigación, se optó por un muestreo no probabilístico aleatorio por conveniencia. Este enfoque implica seleccionar elementos para el estudio basándose en su disponibilidad o accesibilidad al investigador, siendo comúnmente utilizado en estudios exploratorios o piloto para obtener una visión general rápida o generar hipótesis. Aunque este método ofrece ventajas en términos de economía, rapidez y flexibilidad, presenta limitaciones importantes, como la falta de generalización de resultados, un alto riesgo de sesgo de selección y una menor confiabilidad en comparación con los métodos de muestreo probabilístico (Mugira, 2024).

3.5.4 Tamaño de la Muestra

Para abordar el corredor vial E35 en el tramo Colta-Guamote, que abarca aproximadamente 44 km de extensión, se consideró prudente recolectar al menos 6 muestras. Esta cantidad se justifica por la variabilidad de las condiciones a lo largo del recorrido, que incluyen zonas áridas y no áridas. Este enfoque permitirá un análisis exhaustivo de las características presentes en diferentes puntos del tramo, como se detalla en la metodología de investigación.

3.5.5 Criterios de Selección

3.5.5.1 Ubicación geográfica

Dada la diversidad que caracteriza al tramo de estudio, se determinó que era relevante enfocarse en el análisis de las áreas predominantemente húmedas y secas de la carretera. Esta estrategia permitirá una observación detallada de las distintas características físicas-mecánicas e hidráulicas presentes en estas zonas, ofreciendo así una comprensión más completa de las condiciones del pavimento flexible a lo largo del corredor vial.

3.5.5.2 Ubicación estratégica

Durante el proceso de extracción de muestras, se consideraron diversos aspectos para garantizar su representatividad. Se evaluó la pendiente de la vía, evitando áreas con curvas pronunciadas. Se planificó la toma de muestras en ambas direcciones del tramo y se seleccionaron áreas libres de fisuras o grietas en la capa de rodadura. Además, se priorizaron lugares con bermas amplias para facilitar el acceso y la

seguridad durante el muestreo. Este enfoque meticuloso garantiza la obtención de muestras representativas que reflejen fielmente las condiciones reales del pavimento flexible en el tramo analizado.

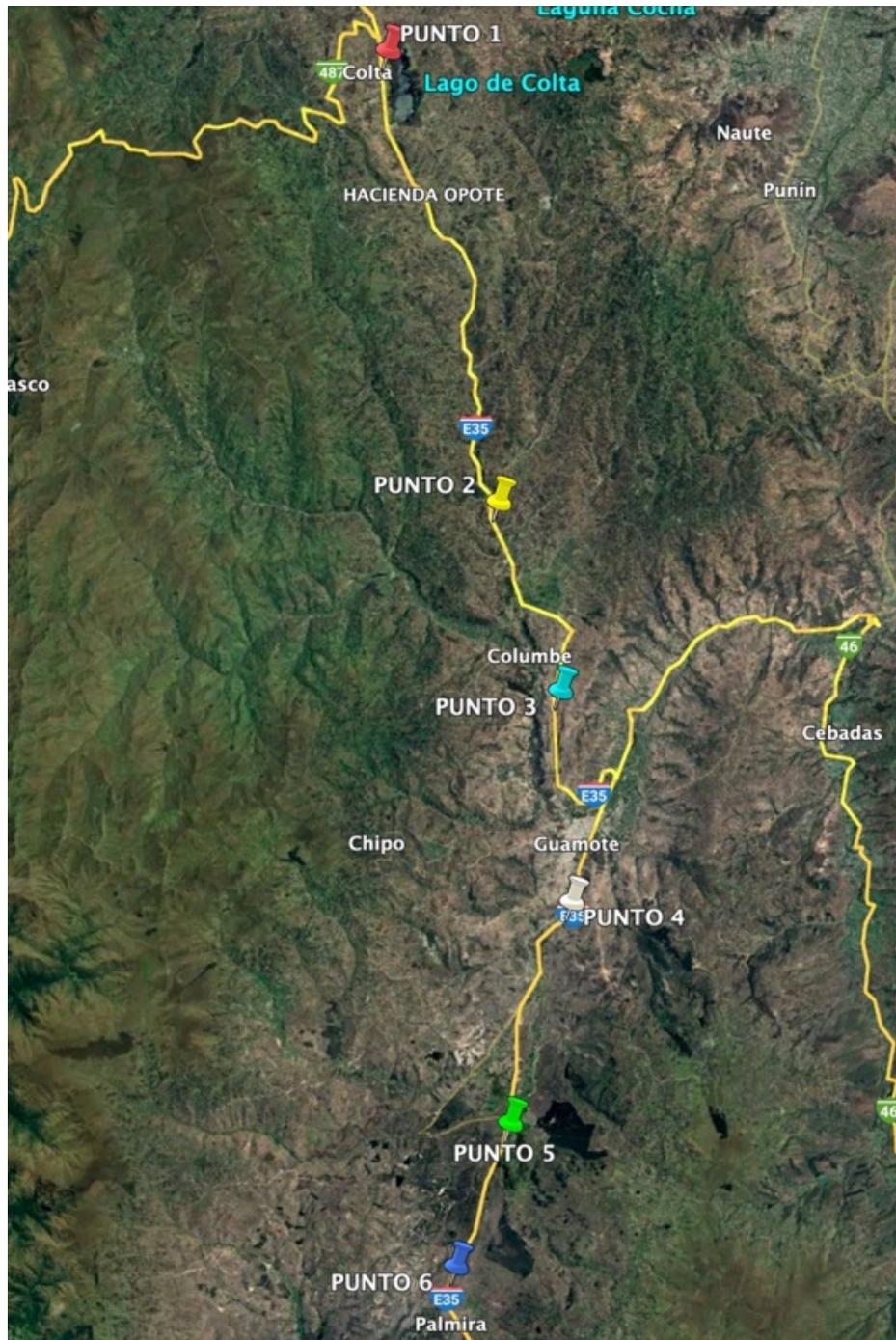


Figura 6. *Puntos de extracción planificados.*

4. CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 GÉNESIS DE SUELOS CORREDOR VIAL E35

4.1.1 Mapa geológico E35

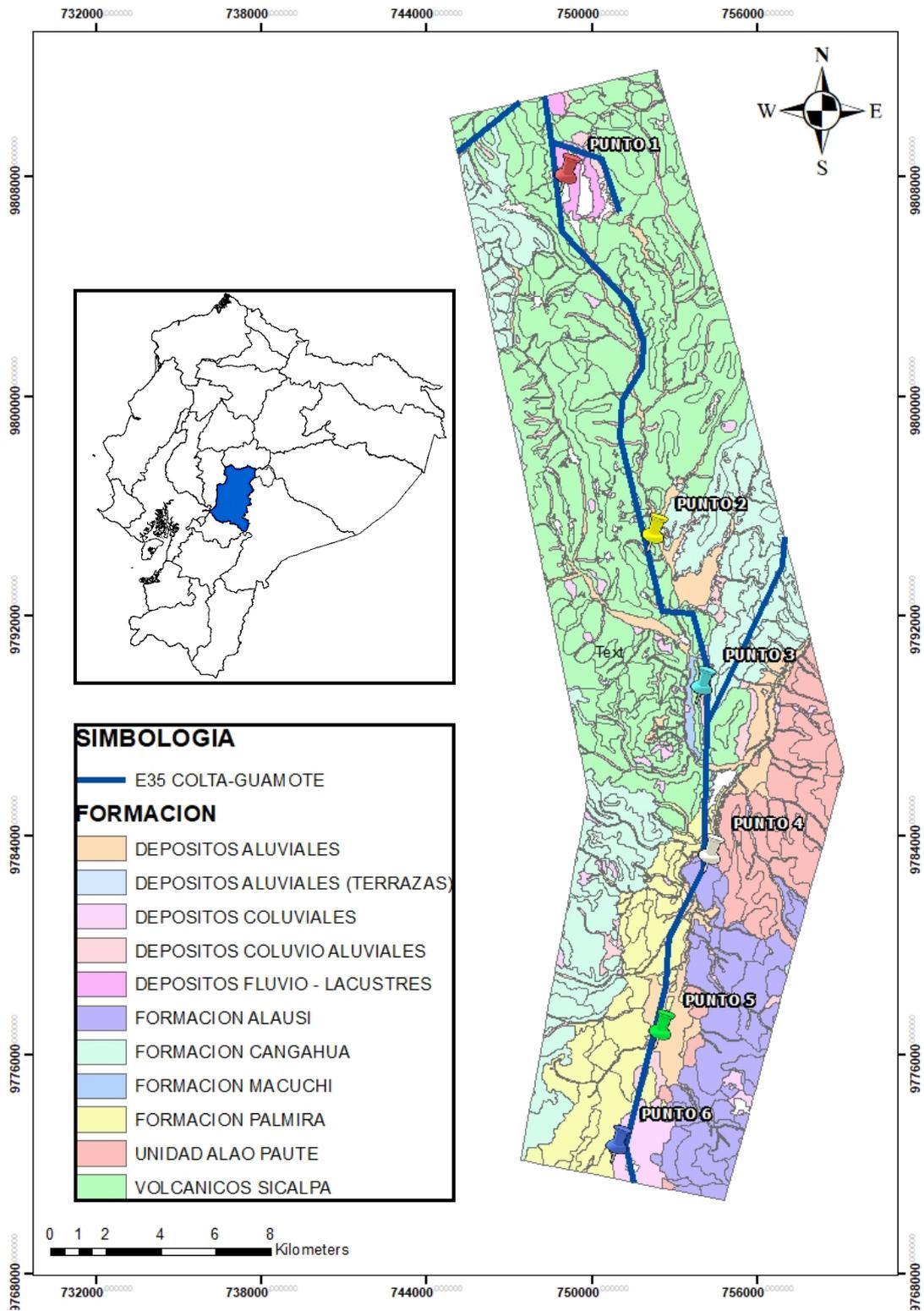


Figura 7. Formación geológica E35 en tramo de estudio.

4.1.2 Mapa edafológico E35

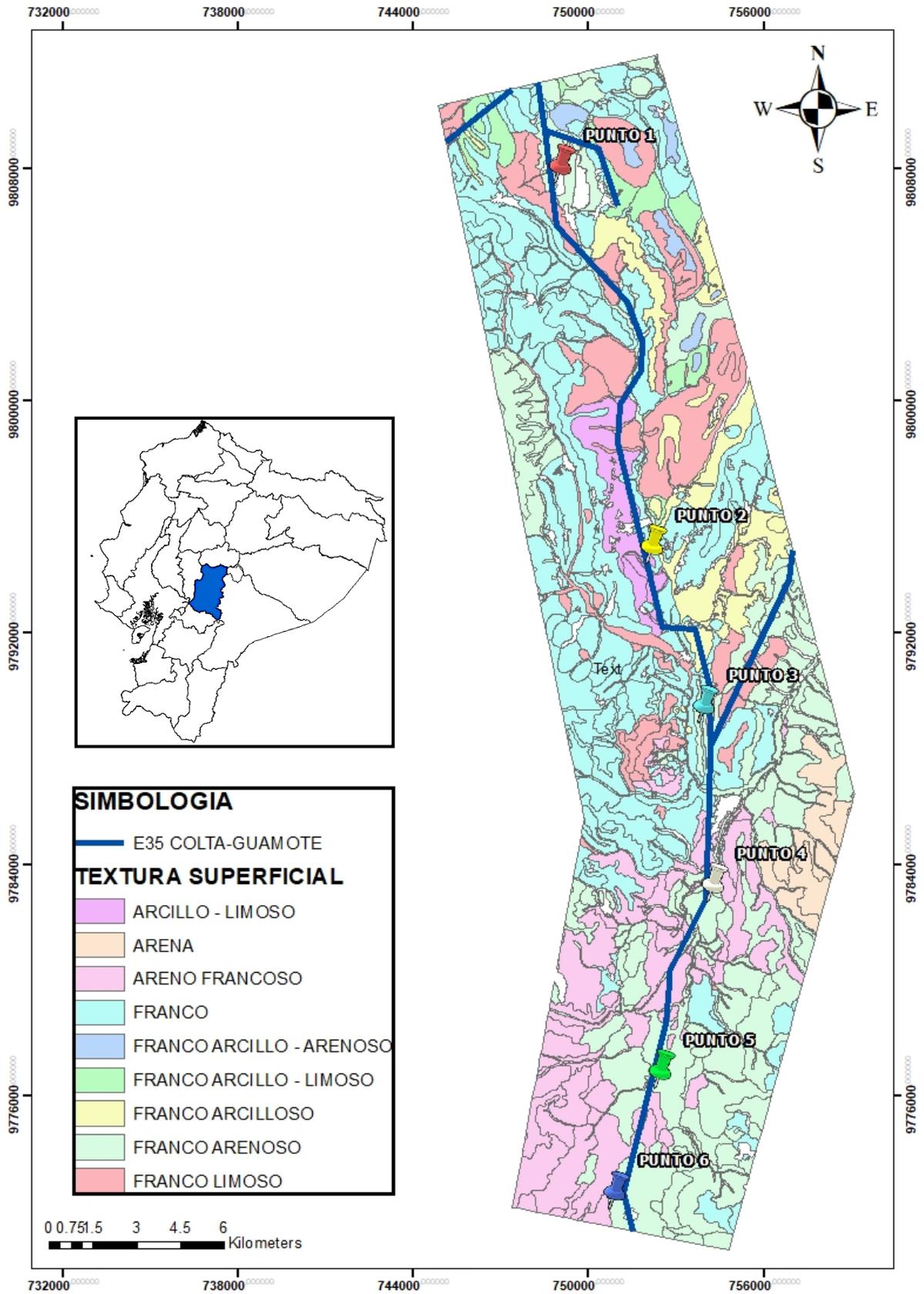


Figura 8. Origen edafológico E35 en tramo de estudio.

4.1.3 Información subrasantes E35

Tabla 2. Características geológicas y edafológicas de cada punto de extracción de núcleos.

Punto	Formación	Composición	Textura superficial	Textura interior	Edad	Profundidad aproximada
P1	Volcánicos Sicalpa	Lavas andesíticas y dacíticas, con intercalaciones de brechas volcánicas y tobas	Franco arenoso	Franco arenoso	Cretácico Superior	300 metros
P2	Volcánicos Sicalpa	Lavas andesíticas y dacíticas, con intercalaciones de brechas volcánicas y tobas	Franco	Franco arenoso	Cretácico Superior	300 metros
P3	Depósitos Coluvio-Aluviales	Variedad de sedimentos, incluyendo gravas, arenas, limos y arcillas	Franco arenoso	Franco arenoso	Cuaternario	100 metros
P4	Formación Alausí	Calizas, areniscas y lutitas.	Franco arenoso	Franco arenoso	Cretácico Superior	200 metros
P5	Depósitos Aluviales	Variedad de sedimentos, incluyendo gravas, arenas, limos y arcillas	Franco arenoso	Franco arenoso	Cuaternario	100 metros
P6	Depósitos Coluviales	Variedad de sedimentos, incluyendo gravas, arenas, limos y arcillas	Franco arenoso	Areno francoso	Cuaternario	100 metros

Fuente: (Ministerio de Agricultura y Ganadería, 2015)

4.2 CARACTERÍSTICAS FÍSICAS

4.2.1 Granulometrías en Subrasantes

Tabla 3. Resultados de granulometrías en Subrasantes.

Ensayo	Procedencia del Material	Grava gruesa (%)	Grava fina (%)	Arena gruesa (%)	Arena fina (%)	Pasante tamiz 200 (%)	Clasificación SUCS	Clasificación AASHTO
P1	Punto 1	1,47	11,71	37,92	34,96	13,94	SM = Arena limosa	A-2-4 = Grava y arena limosa o arcillosa
P2	Punto 2	6,32	17,88	48,96	20,91	5,93	SW-SM = Arena bien graduada con limo y grava	A-2-4 = Grava y arena limosa o arcillosa
P3	Punto 3	0,00	2,74	28,08	43,53	25,66	SM = Arena limosa	A-2-4 = Grava y arena limosa o arcillosa
P4	Punto 4	6,02	16,03	35,85	35,42	6,67	SW-SM = Arena bien graduada con limo y grava	A-2-4 = Grava y arena limosa o arcillosa
P5	Punto 5	0,00	0,40	6,13	73,12	20,17	SM = Arena limosa	A-2-4 = Grava y arena limosa o arcillosa
P6	Punto 6	0,00	0,50	2,07	92,32	5,11	SP-SM = Arena mal graduada con limo	A-3 = Arena fina

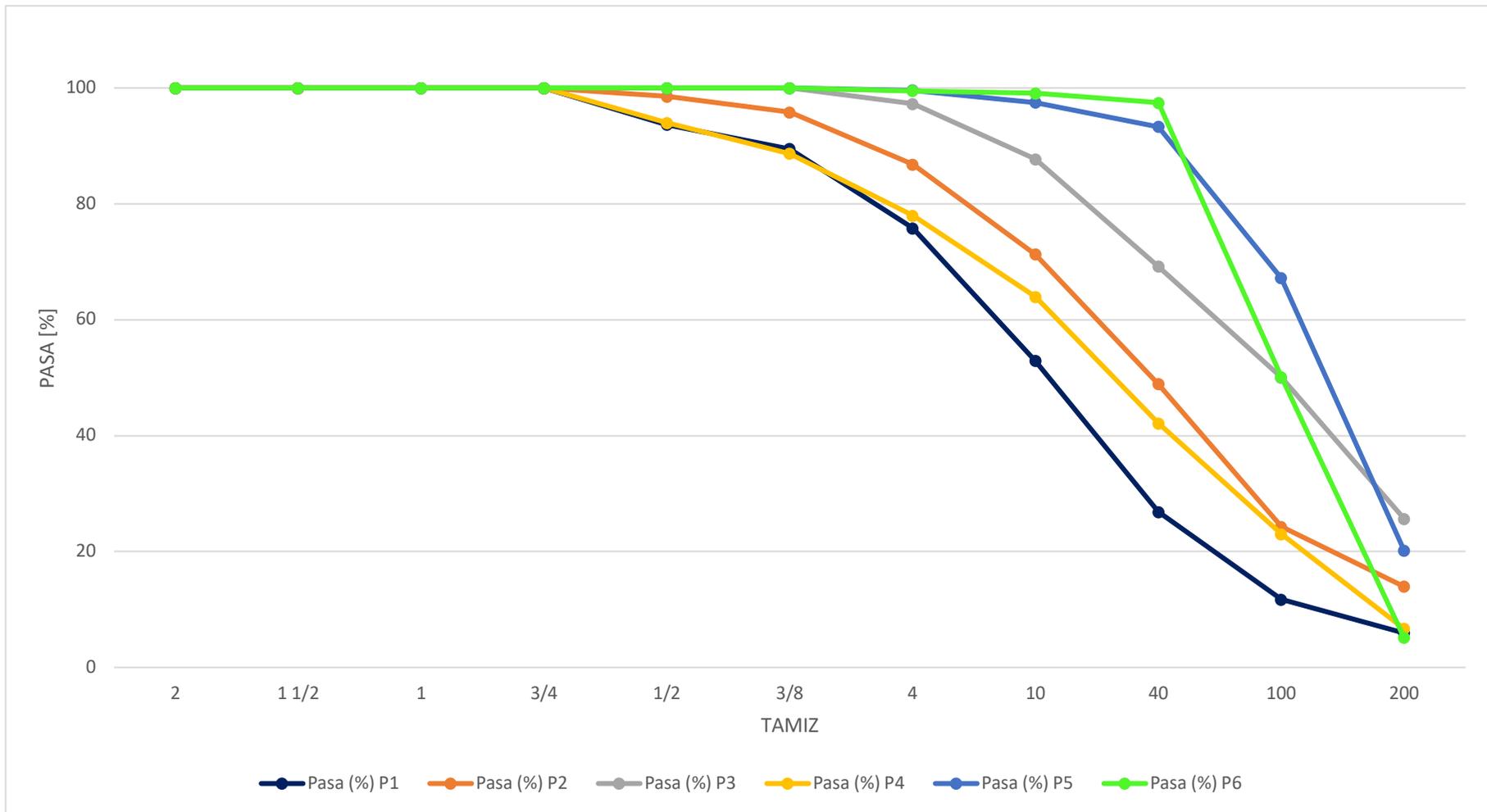


Figura 9. *Curvas granulométricas, Subrasantes.*

4.2.2 Granulometrías en Capas Granulares

Tabla 4. *Resultados de granulometrías en Subbases y Bases.*

Capa	Grava gruesa (%)	Grava fina (%)	Arena gruesa (%)	Arena fina (%)	Pasante tamiz 200 (%)	Clasificación SUCS	Clasificación AASHTO	CLASE
Subbase	52,89	14,34	24,69	7,28	0,81	GW = Grava bien graduada con arena	A-1-a = Fragmento de roca, grava y arena	SUBBASE CLASE 3
Base	20,16	25,55	39,33	13,67	1,29	SW = Arena bien graduada con grava	A-1-a = Fragmento de roca, grava y arena	BASE CLASE 1 TIPO B

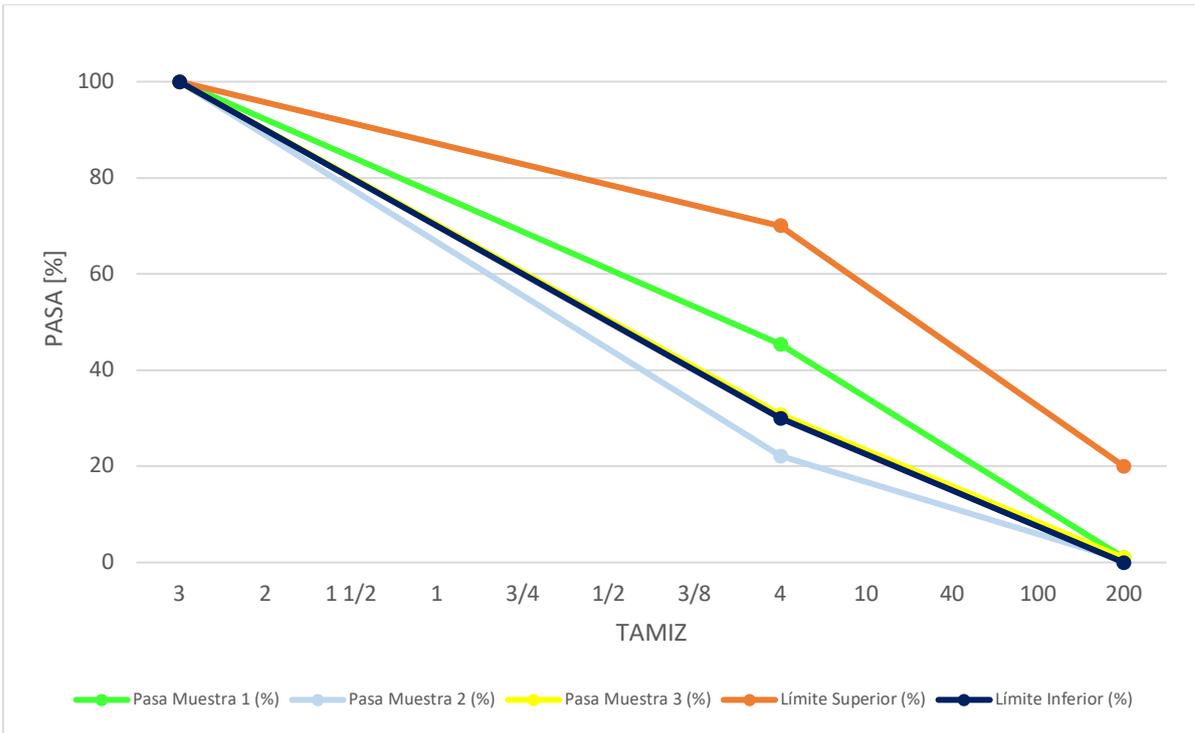


Figura 10. Curvas granulométricas, Subbase.

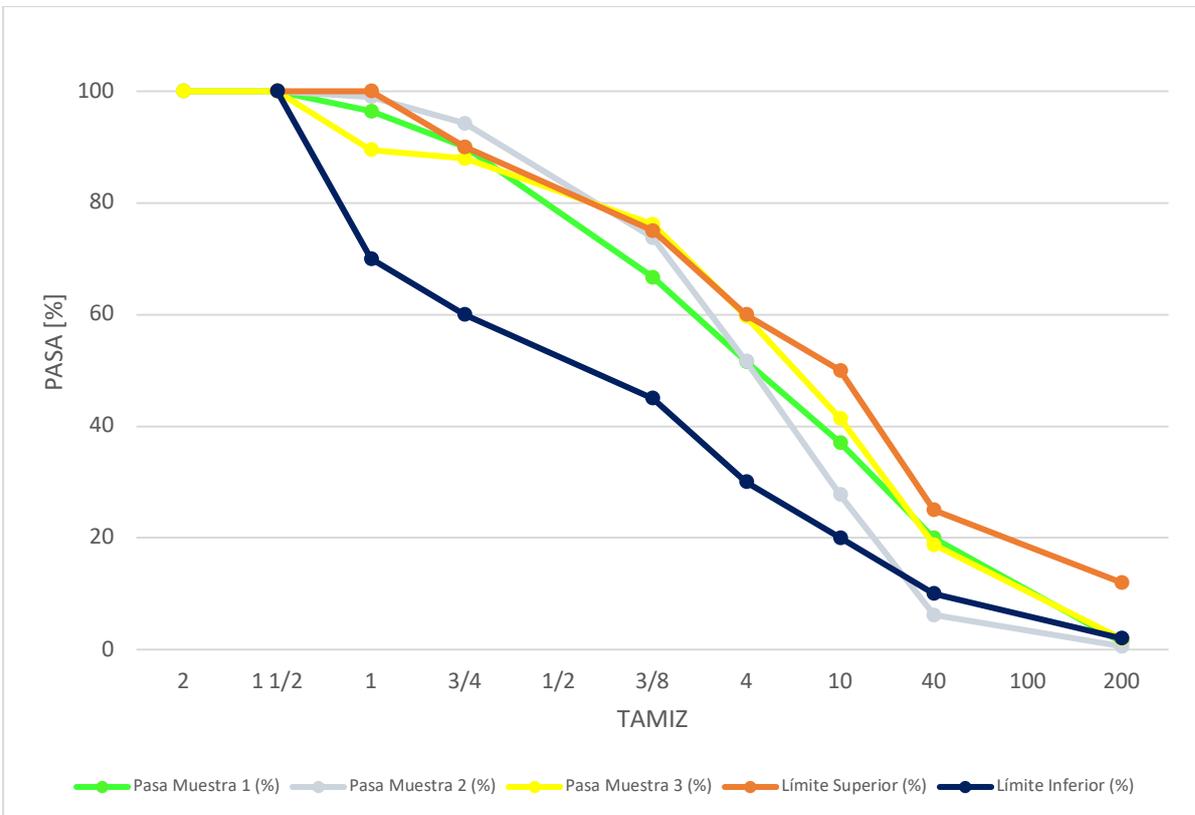


Figura 11. Curvas granulométricas, Base.

4.2.3 Abrasión

Tabla 5. Resultados de la degradación en Base.

Nº	Degradación (%)
1	27,05
2	22,69
3	25,11
PROMEDIO	24,95

La tabla 8 indica el promedio de porcentaje de desgaste a la abrasión del agregado. El grado de la muestra fue “B”, se empleó 11 esferas y 500 revoluciones para la máquina de Los Ángeles.

4.2.4 Densidades y absorción

Tabla 6. Resultados de densidad y absorción de las Subrasantes.

Ensayo	Densidad aparente (kg/m ³)	Porcentaje de absorción del material (%)
Punto 1	2414,126	7,67
Punto 4	2361,345	7,87
Punto 6	2731,041	0,75

Tabla 7. Resultados de densidad y absorción del agregado fino en Base.

Ensayo	Densidad aparente (kg/m ³)	Porcentaje de absorción del material (%)
Muestra 1	2387,018	4,78
Muestra 2	2204,466	4,41
Muestra 3	2370,392	6,81
PROMEDIO	2320,625	5,33

Tabla 8. *Resultados de densidad y absorción del agregado grueso en Base.*

Ensayo	Densidad aparente (kg/m³)	Porcentaje de absorción del material (%)
Muestra 1	2443,057	14,60
Muestra 2	2435,303	14,76
Muestra 3	2474,879	11,50
PROMEDIO	2451,079	13,62

4.2.5 Macrotextura

Tabla 9. *Resultado del ensayo del círculo de arena.*

Punto	Altura (mm)
Punto 1	0,52
Punto 2	0,48
Punto 3	0,50
Punto 4	0,48
Punto 5	0,48
Punto 6	0,54
PROMEDIO	0,50

En la tabla 9 se puede observar que ciertos puntos ya no cumplen con el requisito de seguridad. Se uso un volumen de arena de 25 000 mm³.

4.2.6 Espesores de capas

Tabla 10. *Resultados de espesores de capas.*

Capa	Espesor (mm)
Capa de rodadura	82,91
Base	140,00
Subbase	180,00

4.2.7 Datos núcleos E35

Tabla 11. Resultados de caracterización de núcleos.

Briqueta	Espesor promedio (mm)	Diámetro promedio (mm)
Núcleo 1	77,27	94,67
Núcleo 2	78,70	94,83
Núcleo 3	66,90	95,43
Núcleo 4	78,23	94,87
Núcleo 5	68,43	95,67
Núcleo 6	70,23	95,30

4.2.8 Densidades de núcleos

Tabla 12. Resultados densidad bruta (bulk) y teórica máxima (rice).

Briqueta	Densidad bruta (g/cm ³)	Densidad teórica máxima (g/cm ³)
Núcleo 1	2,345	2,525
Núcleo 2	2,241	2,317
Núcleo 3	2,262	2,375
Núcleo 4	2,382	2,540
Núcleo 5	2,103	2,180
Núcleo 6	2,115	2,274
PROMEDIO	2,241	2,369

4.2.9 Humedad y absorción de núcleos

Tabla 13. Porcentaje de humedad y absorción de núcleos.

Briqueta	Humedad (%)	Absorción (%)
Núcleo 1	0,20	1,9
Núcleo 2	0,33	1,3
Núcleo 3	0,35	1,7
Núcleo 4	0,19	1,0
Núcleo 5	0,50	1,9
Núcleo 6	0,42	1,6
PROMEDIO	0,33	1,6

La Tabla 13 indica que, dado que la absorción es inferior al 2%, los especímenes se clasifican como no absorbentes.

4.2.10 Resultados de volumetría de núcleos

Tabla 14. *Volumetría y vacíos de núcleos.*

Briqueta	Volumen del espécimen (cm ³)	Vacíos (%)	Volumen de aire (cm ³)
Núcleo 1	491,80	7,15	35,19
Núcleo 2	549,30	3,29	18,06
Núcleo 3	447,50	4,73	21,18
Núcleo 4	508,10	6,25	31,77
Núcleo 5	474,50	3,55	16,84
Núcleo 6	521,80	7,01	36,57
PROMEDIO	498,83	5,33	26,60

4.3 CARACTERISTICAS MECÁNICAS

4.3.1 Tensión indirecta

Tabla 15. *Resultados ensayo de tensión indirecta.*

Briqueta	Resistencia Máxima (kPa)
Núcleo 1	716,7
Núcleo 5	643,9
PROMEDIO	680,3

Tabla 16. *Núcleos ensayados.*



Figura 12. Núcleo 1, rotura a lo largo del diámetro.



Figura 13. Núcleo 5, rotura a lo largo del diámetro.

4.3.2 Estabilidad y flujo Marshall

Tabla 17. Resultados ensayo Marshall.

Briqueta	Estabilidad (lb)	Flujo (in/100)
Núcleo 2	3169,00	46,30
Núcleo 3	2108,00	48,00
Núcleo 4	3895,00	44,60
Núcleo 6	3212,00	45,80
PROMEDIO	3096,00	46,18

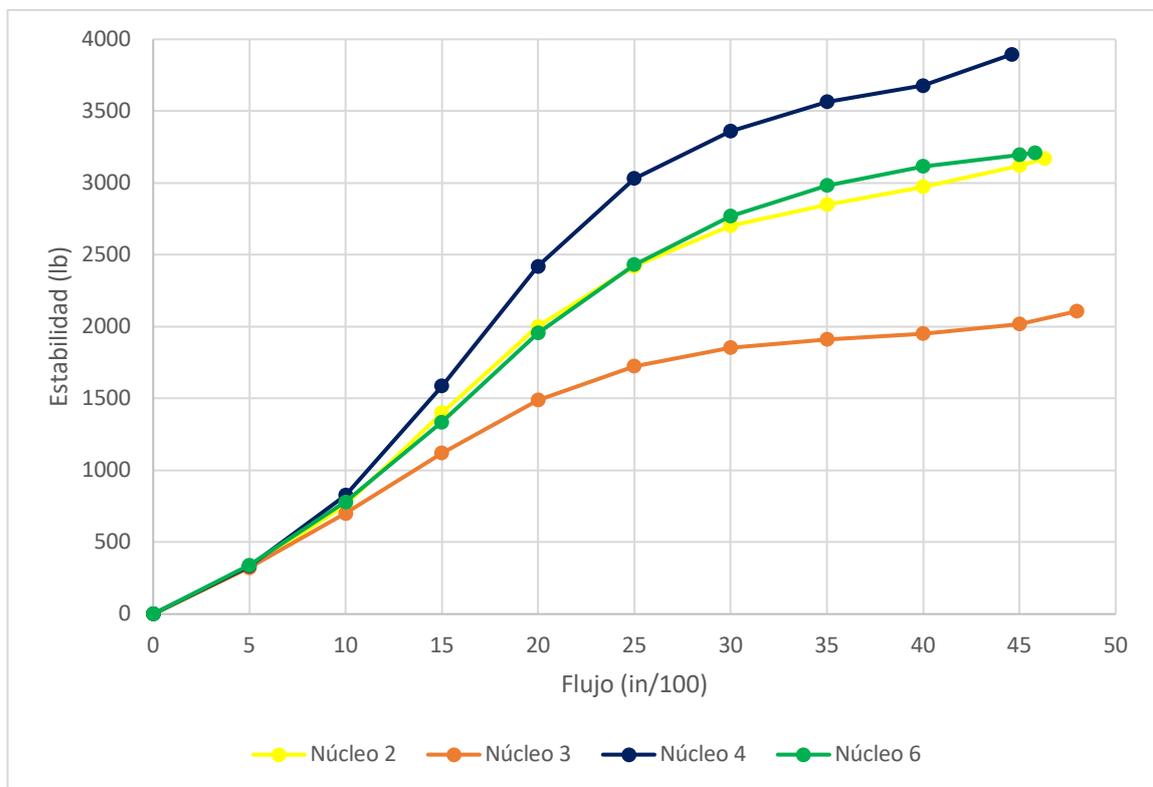


Figura 14. Gráfica de estabilidad vs flujo de núcleos.

4.4 PROPIEDADES HIDRÁULICAS

4.4.1 Prueba de infiltración del pavimento flexible

Tabla 18. *Resumen datos y observaciones ensayo de infiltración.*

Muestra	Clima	¿Agrietamientos en la zona?	Ubicación del infiltrómetro	Observaciones
Punto 1	Nublado	No	Espaldón	No llovió 24 horas previo al ensayo
Punto 2	Parcialmente soleado	No	Espaldón	No llovió 24 horas previo al ensayo. Aproximadamente a 15 metros junto a la vía pasa un riachuelo (véase anexo 15)
Punto 3	Nublado	No	Espaldón	No llovió 24 horas previo al ensayo
Punto 4	Soleado	No	Espaldón	No llovió 24 horas previo al ensayo
Punto 5	Nublado	No	Espaldón	La mayor parte del ensayo se realizó con presencia de lluvia
Punto 6	Nublado	No	Espaldón	Llovió la noche y madrugada previa al ensayo y hubo leves lloviznas durante casi todo el ensayo

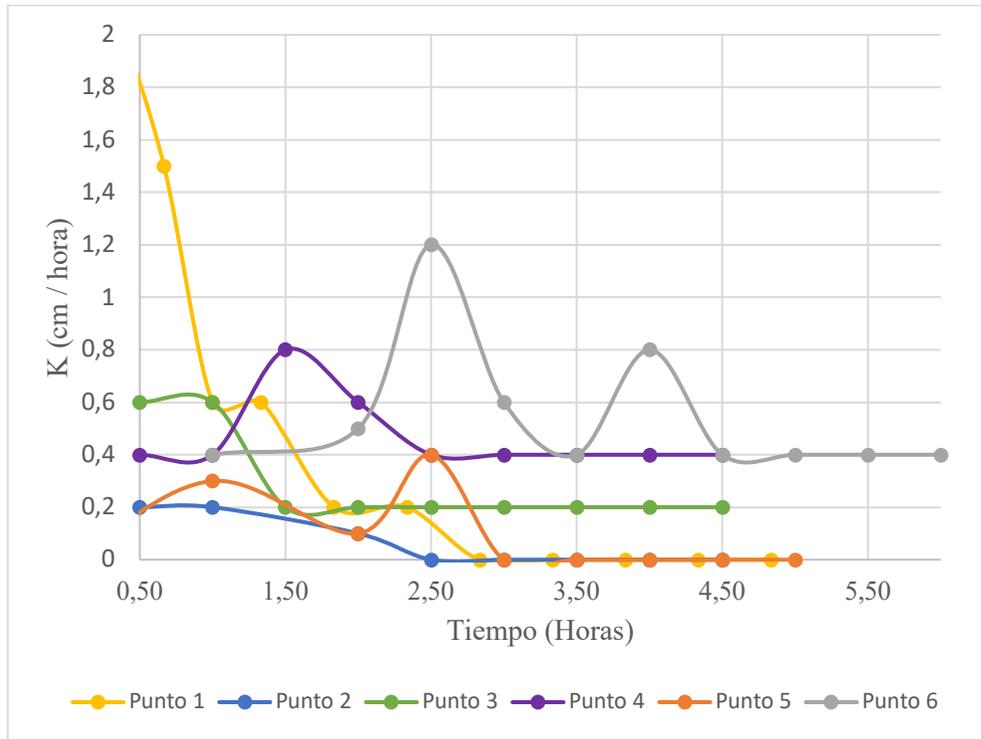


Figura 15. Curvas de infiltración pavimento flexible.

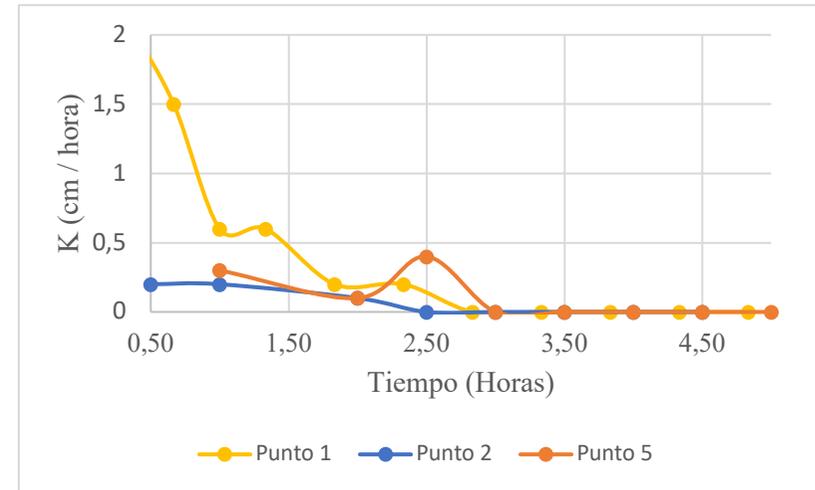


Figura 16. Comparación curvas de infiltración 1,2 y 5.

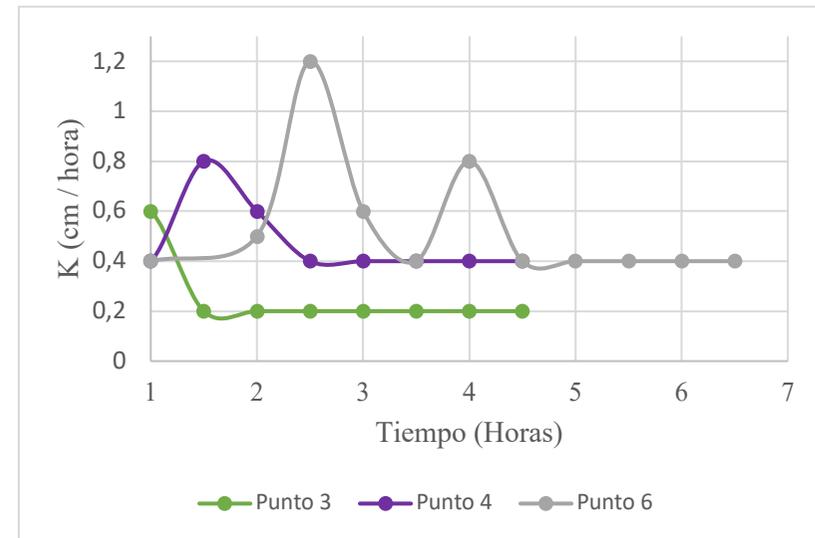


Figura 17. Comparación curvas de infiltración 3,4 y 6

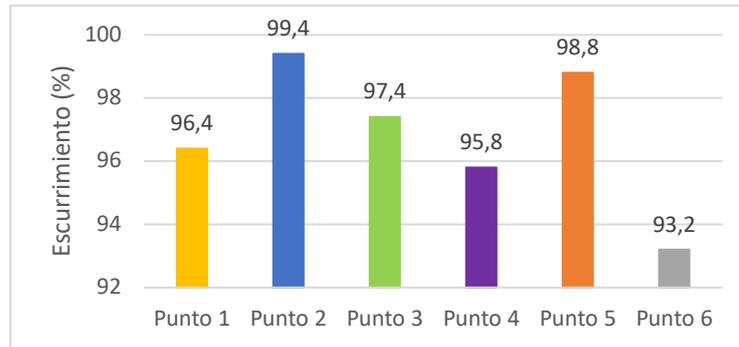


Figura 18. *Porcentaje de escurrimiento por punto.*

En la Figura 16, se observa que los puntos 1, 2 y 5 alcanzaron la saturación, lo que indica la impermeabilidad de la estructura del asfalto. Es probable que en el punto 1, tanto las capas granulares como la subrasante se hayan saturado debido a la presencia de la Laguna de Colta.

El porcentaje de escurrimiento de las tres curvas analizadas que se presentan en la figura 19, demuestra que el pavimento tiene un comportamiento hidráulico heterogéneo. Este fenómeno se atribuye a la presencia de vacíos y hoyuelos en la superficie de ciertos núcleos extraídos (véase anexo 10), lo cual evidencia una variabilidad en el proceso constructivo a lo largo de los distintos tramos.

Los puntos 3, 4 y 6 presentan picos con aumentos en la velocidad de infiltración, como se observa en la figura 17. Esto se debe a la densidad de la capa base (2321 kg/m^3) y a la absorción de su agregado grueso, que fue del 14%. La subbase presenta un porcentaje de grava del 67%, lo que aumenta su porosidad y facilita el flujo del agua.

Estos datos destacan ciertas características del pavimento en estos puntos. Existe una infiltración constante y no llegan a la saturación, lo que indica un comportamiento permeable en la estructura vial. Este fenómeno se evidencia en el punto 4 (véanse anexo 17), donde la subrasante cercana se humedeció tiempo después de iniciado el ensayo.

4.5 DISCUSIÓN

Comparando los resultados del ensayo de estabilidad y flujo Marshall de núcleos, se registró una media de 3096 lb y 46 in/100, respectivamente. Al contrastar estos valores con los obtenidos por Jiménez (2016), con valores de 5988 lb en estabilidad y 10 in/100 en flujo de briquetas realizadas en laboratorio, se evidencia una pérdida de características mecánicas con el transcurso del tiempo.

Para núcleos, el promedio de densidades bulk de la investigación es de 2,241 g/cm³ y rice de 2,369 g/cm³. En su estudio, Jiménez (2016) obtuvo un valor intermedio de 2,228 g/cm³ en bulk y 2,316 g/cm³ en rice. Se observa que ambas densidades son similares.

Aunque los núcleos extraídos no mostraban signos de agrietamiento en una inspección superficial, resulta sorprendente observar los valores de flujo. En su publicación, Del Águila (1999) destaca cómo los factores hidrometeorológicos pueden tener un impacto significativo en la resistencia del pavimento, especialmente en áreas de gran altitud y con marcados gradientes de temperatura. Características presentes en la zona donde se ubica el corredor vial.

El análisis de la macrotextura en seis puntos de la vía revela que el pavimento está al límite de los estándares de seguridad de la MOP (2002), que exige una macrotextura mínima de 0,5 mm. Este resultado plantea preocupaciones sobre la seguridad vial, especialmente tomando en cuenta factores climáticos como la lluvia y presencia de corrientes de viento, que como menciona Del Águila (1999), podrían provocar la erosión del material sobre la superficie del pavimento.

Las muestras extraídas en el corredor vial muestran una resistencia a la tensión indirecta promedio de 680 kPa, superando los 653 kPa obtenidos por Bermeo (2021) en sus briquetas de laboratorio. La mayor resistencia obtenida en los núcleos extraídos en campo, pese al tiempo de uso del corredor vial, se debe a que la capa de rodadura tiene una mejor compactación que las briquetas que se realizan en laboratorio.

Los resultados obtenidos en esta investigación muestran un porcentaje de vacíos promedio de 5.43%, lo cual está en línea con la tendencia óptima encontrada por Villamizar y Torres (2013). Este rango de valores (entre el 5 y el 7%) coincide con las recomendaciones de la MOP (2002), que establece un rango aceptable del 3 al 8% para el porcentaje de vacíos en la capa de rodadura.

Los resultados de los ensayos in-situ revelan que el coeficiente de escorrentía en todos los puntos de análisis supera el 93%, excediendo el intervalo del 85 al 90% establecido por normativas como la INEN 5 (1992) y la EMAAP-Q (2009) para pavimentos flexibles. Esto resalta la importancia de diseñar una estructura vial permeable, reduciendo así los impactos ambientales, alteraciones en el ciclo hidrológico y contribuyendo a la recarga de acuíferos

5. CAPÍTULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 CONCLUSIONES

- Las subrasantes estudiadas en esta investigación están asociadas a diversas formaciones geológicas, como Alausí, Volcánicos Sicalpa, y Depósitos Coluvio - Aluviales, Aluviales y Coluviales, datando mayormente del período Cretácico superior y Cuaternario, con profundidades que oscilan entre 100 y 300 metros. El análisis edafológico reveló que la textura superficial predominante es franco arenoso, lo cual concuerda con las clasificaciones obtenidas tras los ensayos de las subrasantes, las cuales están mayormente compuestas por arenas con presencia de limo y grava.
- Del análisis de las características físicas de la estructura del pavimento flexible se obtuvo que; la base de acuerdo con la normativa SUCS es una arena bien graduada con grava (SW), mientras que por AASHTO se obtuvo un fragmento de roca grava y arena (A-1-a) y es una Clase 1 Tipo B. La subbase de acuerdo con la normativa SUCS es una grava bien graduada con arena (GW), mientras que por AASHTO se obtuvo un fragmento de roca grava y arena (A-1-a) y es una Clase 3. Así mismo, se determinó densidades y absorción del agregado grueso y fino de la base. El porcentaje de abrasión fue de 24,95%, que cumple con el parámetro de no ser mayor al 40% en bases impuesto por la MOP (2002). El porcentaje de vacíos fue de 5,33% e influye en la tasa de infiltración. Los espesores promedio fueron de 82,91 mm en la capa de rodadura, 140 mm para la base y de 180 mm para la subbase. Por último, de la determinación de la macrotextura se obtuvo un valor de 0,50 mm.
- Para la evaluación mecánica se utilizó el método de extracción de núcleos. Se obtuvo una resistencia a la tensión indirecta de 680,3 kPa, una estabilidad de 3096 lb y un flujo de 46,18 in/100.
- Se examinó las características hidráulicas del corredor vial E35, cotejando los resultados de laboratorio con los obtenidos in-situ. Se adaptó la metodología de infiltración para pavimento flexible, obteniendo datos de infiltración y escurrimiento en 6 puntos previamente identificados, con una duración promedio de 5 horas por ensayo. Se registró una infiltración del 3,2% y un porcentaje de escurrimiento del 97%, demostrando que el pavimento presenta una escorrentía superior que el rango establecido por la normativa INEN 5 (1992).

5.2 RECOMENDACIONES

Considerar como un parámetro de indicación de deterioro del pavimento al coeficiente de escorrentía obtenido a través del infiltrómetro de doble anillo aplicado en pavimentos flexibles, pues la permeabilidad está relacionada a la condición física de las capas componentes del asfalto. Es esencial garantizar la adecuada evacuación del agua de la superficie para prevenir problemas de seguridad. Así mismo, promover las estructuras permeables, especialmente dado que el corredor vial analizado presenta una tasa de escorrentía superior a la recomendada por las normativas vigentes.

Con respecto a la macrotextura, se sugiere aplicar un tratamiento superficial utilizando materiales de alta textura y rejuvenecer el asfalto mediante técnicas de reapeo. Una opción viable sería la aplicación de un micro pavimento slurry, que proporciona una superficie rugosa con pequeñas irregularidades y rellena los vacíos y grietas menores en el pavimento. Esto resulta en una superficie más uniforme y con mayor macrotextura. Para pavimentos ubicados en zonas andinas expuestas a vientos de cordillera, se recomienda adoptar el valor mínimo de 0,65 mm que propone el Departamento de Transporte del Estado de Washington (WSDOT), o bien, llevar a cabo un estudio para determinar la altura óptima de macrotextura que pueda soportar las acciones de estos vientos.

Se recomienda considerar factores como gradientes térmicos elevados, exposición prolongada a la radiación solar, efecto de ráfagas de viento frecuentes, así como el escurrimiento e infiltración de agua superficial, al momento de diseñar pavimentos flexibles en áreas de altitud. Estos aspectos climáticos no solo pueden influir en la durabilidad y resistencia del pavimento, sino que también pueden afectar su estabilidad y capacidad para soportar las cargas de tráfico de manera efectiva a lo largo del tiempo. La altitud de la zona de construcción, en particular, puede intensificar estos efectos climáticos, exigiendo un diseño y una construcción más robustos para garantizar la integridad y funcionalidad del pavimento en condiciones ambientales desafiantes.

BIBLIOGRAFÍA

- Abellán, A. (2016). *Pavimentos permeables – SuD Sostenible*.
<http://sudsostenible.com/tipologia-de-las-tecnicas/medidas-estructurales/pavimentos-permeables/>
- Aldana, R. (2020). *Capas granulares en firmes de carretera - Blog de Aulacarreteras*.
<https://www.aulacarreteras.com/capas-granulares-en-firmes/>
- Álvarez, C., & Mercado, M. (2016). *Un modelo de ductilidad aplicado al caso de suelos finos con preconsolidación inducida*.
- Álvarez, L. (2017). *Índice de escurrimiento pluvial en niveles de agrietamiento en pavimento flexible en la Avenida Jacinto Ibarra Huancayo – Huancayo – Junín 2017*.
- ASTM D3385. (2003). *Standard Test Method for Infiltration Rate of Soils in Field Using Double-Ring Infiltrometer 1*. American Society for testing and materials.
- ASTM D5361. (2006). *Práctica estándar para Muestreo de mezclas bituminosas compactadas para pruebas de laboratorio*. American Society for testing and materials.
- ASTM D6927. (2015). *Designación: ASTM D6927-2015 Página 1*. American Society for testing and materials. <https://doi.org/10.1520/D6927-15>
- ASTM E965. (2019). *Designation: E965 – 15 Standard Test Method for Measuring Pavement Macrotexture Depth Using a Volumetric Technique*. American Society for testing and materials. <https://doi.org/10.1520/E0965-15R19>
- Ayala, Y., Toro, D., Delgado, H., Dulce, A., Guzmán Ortiz, V., Zayd, A., & Rivera, S. (2018). *Manual de ensayos para laboratorio para el cálculo de volumetría y ensayos de desempeño*.
- Bermeo, D. (2021). *Diseño de mezcla asfáltica en caliente modificada mediante la adición de cal hidratada por vía seca*. Universidad Central del Ecuador.
- Cabrera, V., & Stammitti, C. (2005). *Diseño y construcción de un sistema para mejorar la adherencia de los neumáticos*.
- Chapoñan, J., & Quispe, J. (2017). *Análisis del comportamiento en las propiedades del concreto hidráulico para el diseño de pavimentos rígidos adicionando fibras de polipropileno en el A.A.H.H Villamaria-Nuevo Chimbote*.
- Chen, L. M., Chen, J. W., Lecher, T., Chen, T. H., & Davidson, P. (2020). Assessment of clogging of permeable pavements by measuring change in permeability. *Science of the Total Environment*, 749. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141352>

- Contreras, D. (2020). *Cuantificación de la infiltración superficial en pavimentos flexibles mediante pruebas in-situ*.
- Del Águila, P. (1999). *Diseño y construcción de pavimentos en zonas de altura*.
- EMAAP-Q. (2009). *Normas de diseño para sistemas de alcantarillado para la EMAAP-Q*.
- Environmental Protection Agency. (2021). *Stormwater Best Management Practice Permeable Pavements Minimum Measure: Post Construction Stormwater Management in New Development and Redevelopment Subcategory: Infiltration*.
<https://www.epa.gov/npdes>
- Falcon, F., & Santos, J. (2016). *Diseño de un pavimento rígido permeable, con agregados de la cantera Chullqui, para el drenaje urbano en estacionamientos en la ciudad de Huánuco*.
- García, I. (2016). *Evaluación del pavimento flexible de la vía Calpi - San Juan de Chimborazo, cantón Riobamba, provincia de Chimborazo*.
- Geotecnia fácil. (2024). *Límites de Atterberg. Definición, descripción de los ensayos e interpretación*. <https://geotecniafacil.com/limites-de-atterberg/>
- GLOBAL RUBBER CORPORATION S.A.C. (2016). *Perfiles burletes alambrados*.
https://globalrubbercorporation.com/fichas_tecnicas/perfiles-burletes.pdf
- Harvey, J. T., Katie, P. E., & Chou, F. (2015). *Airfield and highway pavements 2015 innovative and cost-effective pavements for a sustainable future proceedings of the 2015 International Airfield and Highway Pavements Conference*.
<https://doi.org/10.1061/9780784479216>
- Huang, Y. (2005). *Pavement Analysis and Desing*.
- INEN 5. (1992). *Normas para estudio y diseño de sistemas de agua potable y disposición de aguas residuales para poblaciones mayores a 1000 habitantes*.
- INEN 696. (2011). *Áridos. Análisis granulométrico en los áridos, fino y grueso*. In *Áridos. Análisis granulométrico en los áridos, fino y grueso*. Instituto Ecuatoriano de Normalización.
- INEN 856. (2010). *Áridos. Determinación de la densidad, densidad relativa (gravedad específica) y absorción del árido fino*. Instituto Ecuatoriano de Normalización.
- INEN 857. (2010). *Áridos. Determinación de la densidad, densidad relativa (gravedad específica) y absorción del árido grueso*. Instituto Ecuatoriano de Normalización.
- INEN 860. (2011). *Áridos. Determinación del valor de la degradación del árido grueso de partículas menores a 37,5 mm mediante el uso de la máquina de los Ángeles*. Instituto Ecuatoriano de Normalización.

- Ipiates, E. (2019). *Estudio de la capa de rodadura de pavimento flexible en los accesos principales de Jipijapa*.
- Jiménez, C. (2016). *Análisis comparativo de la estabilidad y la deformación del pavimento asfáltico con fibras celulósicas y pavimento asfáltico tradicional*. Universidad Técnica De Ambato.
- Ministerio de Agricultura y Ganadería. (2015). *Catálogo de Datos - Metadatos - Ministerio de Agricultura y Ganadería*.
<http://geoportal.agricultura.gob.ec/geonetwork/srv/spa/catalog.search#/metadata/0a26e971-5722-4a10-8a5e-d04298b0f017>
- MOP. (2002). *Especificaciones Generales para la Construcción de Caminos y Puentes*.
- Mora, L. (2019). *Renaturalización de la calle 26*.
- MTOP. (2020). *Ministerio de Transporte y Obras Públicas – Entidad rectora del Sistema Nacional del Transporte Multimodal*. <https://www.obraspublicas.gob.ec/>
- Mugira, A. (2024). *Tipos de muestreo: Cuáles son y en qué consisten*.
<https://www.questionpro.com/blog/es/tipos-de-muestreo-para-investigaciones-sociales/>
- NEVI. (2013). *Norma Ecuatoriana Vial NEVI-12-MTOP*.
- Pino, J. (2020). *Estudio de la permeabilidad de las mezclas utilizadas en la región del maule y presentación de una posible mejora de esta propiedad*.
- Rondón, H., & Reyes, F. (2007). *Metodologías de diseño de pavimentos flexibles: Tendencias, alcances y limitaciones*.
- Sambito, M., Severino, A., Freni, G., & Neduzha, L. (2021). A systematic review of the hydrological, environmental and durability performance of permeable pavement systems. In *Sustainability (Switzerland)* (Vol. 13, Issue 8). MDPI.
<https://doi.org/10.3390/su13084509>
- Torres, P., & Perez, D. (2017). *Diseño de pavimento flexible para mejorar la transitabilidad vehicular y peatonal en el AA.HH ampliación Tupac Amaru, distrito de Chiclayo, provincia Chiclayo, región Lambayeque 2017*.
- Villamizar, N., & Torres, I. (2013). *Determinación del rango de porcentaje de vacíos en la base tratada con asfalto en caliente como parámetro de control de la mezcla*.
- Zegarra-Tarqui, J., Santos-de Brito, J., & Fátima-Carvalho, M. (2015). *Runoff on Pavements of Soil-Cement Blocks-an Experimental Boarding*. 1, 35–47.

ANEXOS

CONDICIONES DEL PAVIMENTO				Buenas Condiciones	Buenas Condiciones	Buenas Condiciones	Buenas Condiciones	Buenas Condiciones	Buenas Condiciones	PROMEDIO
N°	Variables	Unidad	Capa	P1	P2	P3	P4	P5	P6	
1	Escurrimiento C	(%)		93,40	98,40	95,40	97,80	99,80	96,20	96,83
2	Infiltración ks	(%)		3,60	0,60	2,60	4,20	1,20	6,80	3,17
3	Densidad bulk	(g/cm ³)		2,34	2,24	2,26	2,38	2,10	2,11	2,24
4	Densidad rice	(g/cm ³)		2,53	2,32	2,38	2,54	2,18	2,27	2,37
5	Humedad (núcleos)	(%)		0,20	0,33	0,35	0,19	0,50	0,42	0,33
6	Absorción (núcleos)	(%)		1,91	1,27	1,70	1,04	1,92	1,57	1,57
7	Vacíos (núcleos)	(%)		7,15	3,29	4,73	6,25	3,55	7,01	5,33
8	Vacíos masas (núcleos)	(g)		82,75	40,59	53,87	75,88	35,52	77,58	61,03
9	Volumen de aire (núcleos)	(cm ³)		35,19	18,06	21,18	31,77	16,84	36,57	26,60
10	Estabilidad	(lb)			3169,00	2108,00	3895,00		3212,00	3096,00
11	Flujo	(in/100)			46,30	48,00	44,60		45,80	46,18
12	Tensión indirecta	(kPa)		716,70				643,90		680,30
13	Abrasión	(%)	Base	27,05		22,69		25,11		24,95
14	Macrotextura	(mm)		0,52	0,48	0,50	0,48	0,48	0,54	0,50
			Capa de rodadura	85,47 / 50,00	92,70	76,67 / 80,00	88,27	88,93 / 95,00	89,20	82,91
15	Espesores	(mm)	Base	150,00		130,00		130,00		136,67
			Subbase	170,00		180,00		180,00		176,67
			Base	23,31		18,05		19,11		20,16
16	Grava gruesa	(%)	Subbase	49,73		66,50		42,43		52,89
			Subrasante	1,47	6,32	0,00	6,02	0,00	0,00	2,30
			Base	25,11		30,31		21,24		25,55
17	Gravas finas	(%)	Subbase	19,48		11,35		12,19		14,34
			Subrasante	11,71	17,88	2,74	16,03	0,40	0,50	8,21
			Base	31,61		45,48		40,90		39,33
18	Arena gruesa	(%)	Subbase	21,19		19,26		33,62		24,69

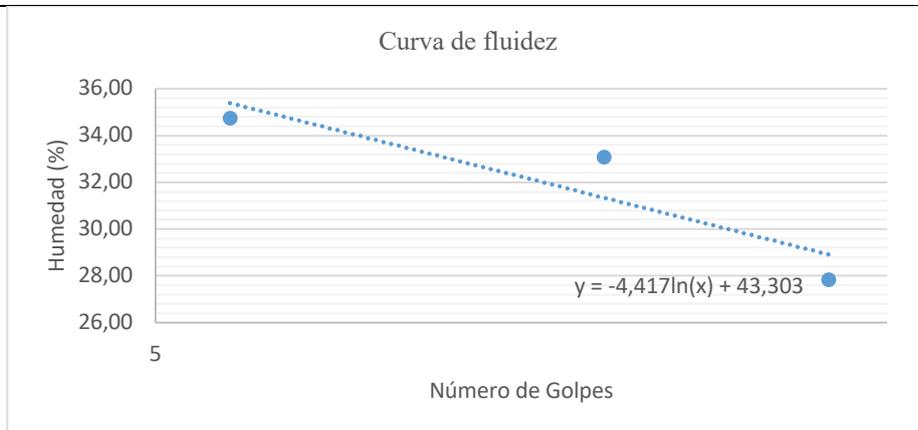
			Subrasante	37,92	48,96	28,08	35,85	6,31	2,07	26,53
			Base	18,65		5,56		16,80		13,67
19	Arena fina	(%)	Subbase	8,65		2,41		10,78		7,28
			Subrasante	34,96	20,91	43,53	35,42	73,12	92,32	50,04
			Base	1,32		0,60		1,95		1,29
20	Materia pasa tamiz 200	(%)	Subbase	0,95		0,48		0,99		0,81
			Subrasante	13,94	5,93	25,66	6,67	20,17	5,11	12,91
26	Densidad aparente	(kg/m ³)	Subrasante	2414,13			2361,35		2731,04	2502,17
27	Absorción	(%)	Subrasante	7,66			7,88		0,75	5,43
28	Densidad agregado fino	(kg/m ³)	Base	2387,02		2204,47		2370,39		2320,63
29	Absorción agregado fino	(%)	Base	4,78		4,41		6,82		5,33
30	Densidad agregado grueso	(kg/m ³)	Base	2443,06		2435,30		2474,88		2451,08
31	Absorción agregado grueso	(%)	Base	14,60		14,76		11,50		13,62

Anexo 1. Resumen de resultados

Abertura en (mm)	Tamiz ASTM	Peso Retenido (g)	Retenido (%)	Retenido Acumulado (%)	Pasa (%)	Material Obtenido	Arenas (%)	Gravas (%)	DESCRIPCIÓN DE LA MUESTRA
50,00	2	0,0	0,00	0	100,00				SUBRASANTE E35 RIOBAMBA-CUENCA
37,50	1 1/2	0,0	0,00	0,00	100,00	Grava			Procedencia del material: Punto 1
25,00	1	0,0	0,00	0,00	100,00	Gruesa			Profundidad de la muestra: 20 cm
19,00	3/4	0,0	0,00	0,00	100,00				Peso de la muestra: 2000 g
12,5	1/2	29,4	1,47	1,47	98,53	Grava			Tamaño máximo nominal: N° 4
9,5	3/8	54,6	2,73	4,20	95,80	Fina	72,88%	13,18%	Estado de Consistencia
4,75	4	179,5	8,98	13,18	86,82	Arena			LL 34,55
2	10	310,2	15,52	28,70	71,30	Gruesa			LP NP
0,425	40	447,7	22,40	51,10	48,90				IP NP
0,15	100	492,1	24,62	75,72	24,28	Arena Fina			Clasificación SUCS SM = Arena limosa
0,075	200	206,7	10,34	86,06	13,94				
Bandeja		278,60	13,94	100,00	0	LIMOS			
Total		1998,80	100						Clasificación AASHTO A-2-4 = Grava y arena limosa o arcillosa

Anexo 2. Ejemplo de cálculo, granulometría subrasante punto 1.

Nº Golpes	Tara	Peso Tara (g)	Peso Tara + Suelo húmedo (g)	Peso Tara + Suelo seco (g)	Peso del Agua (g)	Humedad (%)	Límite Líquido (%)	Límite Plástico (%)	Índice de plasticidad (%)
6	7	14,8	27,6	24,3	3,3	34,74			
26	2	14,1	28,8	25,6	3,2	27,83	29,09	NP	NP
15	4r	14,5	31,8	27,5	4,3	33,08			



Anexo 3. Ejemplo de cálculo, límites de consistencia punto 6.

DENSIDAD DE AGREGADO FINO			
Descripción	Variable	Valor	Unidad
Masa seca	A	478,6	g
Masa Picnómetro + agua	B	1206,8	g
Masa Picnómetro + agua+agregado	C	1485,4	g
Masa en estado SSS	S	500	g
Masa seca (ensayo de absorción)	Sabs	477,2	g
RESULTADOS			
Densidades Relativas			
Gravedad específica seca al horno	SG _{SH}	2,162	-
Gravedad específica saturada superficialmente seca	SG _{SSS}	2,258	-
Gravedad específica aparente	SG _A	2,393	-
Densidad			
Densidad seca al horno	d _{SH}	2156,294	(kg/m ³)
Densidad saturada superficialmente seca	d _{SSS}	2252,710	(kg/m ³)
Densidad aparente	d _A	2387,018	(kg/m ³)
Absorción			
Porcentaje de absorción del material	Abs	4,778	%

Anexo 4. Ejemplo de cálculo, densidad agregado fino base muestra 1.

DENSIDAD DE AGREGADO GRUESO			
Descripción	Variable	Valor	Unidad
Masa seca	A	3000	g
Masa en estado SSS	B	3438	g
Masa aparente en agua de la muestra saturada	C	1775,1	g
RESULTADOS			
Densidades Relativas			
Gravedad específica seca al horno	SG _{SH}	1,804	-
Gravedad específica saturada superficialmente seca	SG _{SSS}	2,067	-
Gravedad específica aparente	SG _A	2,449	-
Densidad			
Densidad seca al horno	d _{SH}	1799,567	(kg/m ³)
Densidad saturada superficialmente seca	d _{SSS}	2062,304	(kg/m ³)
Densidad aparente	d _A	2443,057	(kg/m ³)
Absorción			
Porcentaje de absorción del material	Abs	14,600	%

Anexo 5. Ejemplo de cálculo, densidad agregado grueso base muestra 1.

CÁLCULOS INFILTRÓMETRO						
Diámetro interior del infiltrómetro (cm):						25
Área total interna (cm ²):						490,87
Altura Total del infiltrómetro H (cm ³):						60,00
Altura del espejo de agua inicial (cm):						50,00
Volumen inicial de agua (cm ³):						24543,67
h	delta h	delta h acumulado	Tiempo	t acum	K	
cm	cm	cm	hora	hora	cm/hora	
10	0	0	0	0	0	
10,7	0,7	0,7	0,33	0,33	2,1	
11,2	0,5	1,2	0,33	0,67	1,5	
11,4	0,2	1,4	0,33	1,00	0,6	
11,6	0,2	1,6	0,33	1,33	0,6	
11,7	0,1	1,7	0,50	1,83	0,2	
11,8	0,1	1,8	0,50	2,33	0,2	
11,8	0	1,8	0,5	2,83	0	
11,8	0	1,8	0,5	3,33	0	
11,8	0	1,8	0,5	3,83	0	
11,8	0	1,8	0,5	4,33	0	
11,8	0	1,8	0,5	4,83	0	
Sumatoria delta h (cm):						1,8
Volumen de infiltración (cm³):						883,57
Fracción de infiltración (%):						3,6%
Coefficiente de escurrimiento C (%):						96,4%

Anexo 6. Ejemplo de cálculo, ensayo de infiltración punto 1.



Anexo 7. *Medición para posterior extracción de capas granulares.*



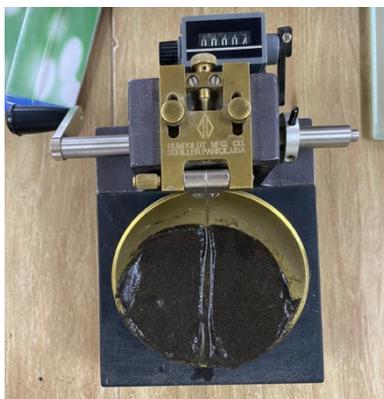
Anexo 8. *Extracción de núcleos.*



Anexo 9. *Límite plástico.*



Anexo 10. *Hoyuelos en parte externa de núcleo.*



Anexo 11. *Ensayo límite líquido.*



Anexo 12. *Ensayo de abrasión*



Anexo 13. *Ensayo densidad de agregado fino.*



Anexo 14. *Núcleo después de ensayo Marshall.*



Anexo 15. *Riachuelo junto a la vía. Punto 2.*



Anexo 16. *Ensayo de macrotextura.*



Anexo 17. *Subrasante humedecida. Punto 4.*



Anexo 18. *Ensayo infiltrómetro.*