



UNIVERSIDAD NACIONAL DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

Características físicas – mecánicas e hidráulicas del pavimento articulado en la cabecera cantonal de Alausí provincia de Chimborazo.

Trabajo de Titulación para optar al título de Ingeniero Civil

Autor:

Cevallos Vallejo, César Leonardo
Morocho Morocho, Royer Javier

Tutor:

Ing. Pazmiño Chiluiza, Hernán Vladimir. Mgs

Riobamba, Ecuador. 2026

DECLARATORIA DE AUTORÍA

Nosotros, **César Leonardo Cevallos Vallejo**, con cédula de ciudadanía **0604672576** y **Royer Javier Morocho Morocho**, con cédula de ciudadanía **150116664**, autores del trabajo de investigación titulado: “**Características físicas – mecánicas e hidráulicas del pavimento articulado en la cabecera cantonal de Alausí provincia de Chimborazo**”, 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, 27 de Enero de 2026.

César Leonardo Cevallos Vallejo

C.I:0604672576

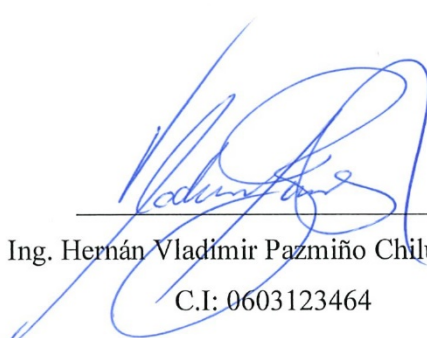
Royer Javier Morocho Morocho

C.I:1501166647

DICTAMEN FAVORABLE DEL PROFESOR TUTOR

Quien suscribe, Hernán Vladimir Pazmiño Chiluiza catedrático adscrito a la Facultad de Ingeniería por medio del presente documento certifico haber asesorado y revisado el desarrollo del trabajo de investigación titulado: Características físicas – mecánicas e hidráulicas del pavimento articulado en la cabecera cantonal de Alausí provincia de Chimborazo, bajo la autoría de César Leonardo Cevallos Vallejo con CC: 0604672576 y Royer Javier Morocho Morocho con CC: 1501166647; 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 enero de 2026



Ing. Hernán Vladimir Pazmiño Chiluiza, 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 **“Características físicas-mecánicas e hidráulicas del pavimento articulado en la cabecera cantonal de Alausí provincia de Chimborazo”**, presentado por Cevallos Vallejo Cesar Leonardo, con cedula de identidad número 0604672576, y Morocho Morocho Royer Javier, con cedula de identidad 1501166647, bajo la tutoría de Ing. Hernán Vladimir Pazmino Chiliza 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 sus autores; no teniendo más nada que observar.

De conformidad a la normativa aplicable firmamos, en Riobamba 18 de febrero de 2026.

Ing. Alfonso Arellano Mgs.

PRESIDENTE DEL TRIBUNAL DE GRADO



Ing. Julio Fiallos Mgs.

MIEMBRO DEL TRIBUNAL DE GRADO



Ing. Nelson Patiño Mgs.

MIEMBRO DEL TRIBUNAL DE GRADO

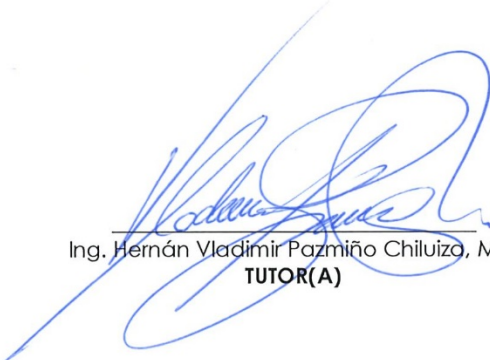




CERTIFICACIÓN

Que, Cevallos Vallejo César Leonardo con CC: 0604672576 y Morocho Morocho Royer Javier con CC: 1501166647, estudiantes de la Carrera de Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería; ha trabajado bajo mi tutoría el trabajo de investigación titulado **"Características físicas – mecánicas e hidráulicas del pavimento articulado en la cabecera cantonal de Alausí provincia de Chimborazo"**, cumple con el N 9%, de acuerdo al reporte del sistema Anti plagio **COMPILATIO**, porcentaje aceptado de acuerdo a la reglamentación institucional, por consiguiente autorizo continuar con el proceso.

Riobamba, 5 de febrero de 2026



Ing. Hernán Vladimir Pazmiño Chiluiza, Mgs
TUTOR(A)

DEDICATORIA

Este presente trabajo está dedicado, a mis padres Moises Morocho y Ana Morocho, quienes con amor, paciencia y sacrificio han sido el pilar esencial de mi formación personal y profesional. Su esfuerzo constante, sus consejos y su ejemplo de perseverancia me enseñaron que los sueños se alcanzan con disciplina, responsabilidad y trabajo honesto. Gracias por creer en mí incluso cuando yo dudaba.

A mi esposa Joselyn Bayas, por su amor, comprensión y apoyo incondicional. Su paciencia en los momentos más difíciles y su constante motivación fueron clave para no rendirme y seguir adelante.

Finalmente, a mi familia, por su confianza y palabras de aliento. Este logro también es de ustedes, quienes hicieron posible que hoy alcance una de mis metas más importantes.

Royer J. Morocho M.

DEDICATORIA

La culminación de esta etapa académica no representa únicamente un logro personal, sino el resultado de una formación construida sobre el amor, el ejemplo y el apoyo constante de quienes han sido mi mayor fortaleza.

Dedico este trabajo a mis abuelitos Ana María Langarí Tenezaca y Cesar Leonidas Vallejo Vallejo, quienes con su ejemplo de humildad, perseverancia y sabiduría sembraron en mí los valores que hoy sostienen mis metas. Su cariño y orientación han sido una guía permanente en cada paso de este camino.

A mi madre, Marcia Elizabeth Vallejo Llangarí, por su entrega incansable, por el sacrificio asumido en silencio y por su confianza inquebrantable en mis capacidades. Su fortaleza y determinación han sido el impulso que me permitió superar cada desafío.

Todo lo que soy y lo que hoy logro lleva su huella.

César L. Cevallos V.

AGRADECIMIENTO

Agradezco, en primer lugar, a Dios, por concederme la vida, la sabiduría y la fortaleza necesarias en este trayecto. Su guía fue fundamental en cada desafío superado.

A mis padres y a mi hermano, por su amor incondicional y apoyo constante. Gracias por estar presentes en cada momento, por sus consejos, sacrificio y palabras de aliento que me impulsaron a seguir adelante incluso en los momentos más difíciles.

A mi esposa Joselyn, por su paciencia, comprensión y motivación permanente. Su apoyo emocional y confianza en mis capacidades fueron esenciales para mantenerme firme en este proceso.

A mis abuelos, por su amor, sus consejos y el ejemplo de esfuerzo que siempre me inspiró a seguir adelante. Su apoyo y enseñanzas han sido una guía fundamental en mi vida.

A mi tutor Ing. Vladimir Pazmiño, por su orientación, conocimientos y acompañamiento durante el desarrollo de esta investigación. Su experiencia y dedicación fueron clave para la culminación exitosa de este trabajo.

Al Ing. Alfonso Arellano y al equipo de laboratorio por la enseñanza, guía y colaboración para cumplir con esta investigación.

Finalmente, agradezco a mis amigos, quienes con su apoyo y palabras de aliento hicieron más llevadero este camino. A todos ustedes, gracias por ser parte fundamental de este logro. Gracias UNACH

Royer J. Morocho

AGRADECIMIENTO

En Primer Lugar, elevo mi gratitud a Dios, por el don de la vida y por concederme fortaleza y la sabiduría necesaria para superar cada desafío y culminar esta etapa transcendental. Su guía ha sido luz constante en mi camino y sostén firme en los momentos de incertidumbre.

A mi madre, por su amor incondicional, su entrega silenciosa y la confianza plena que siempre deposito en mí; y a mi hermano por su compañía leal y motivación constante, siendo impulso sereno y fuerza alentadora para avanzar con determinación.

A mis abuelitos, por sus consejos llenos de sabiduría y su afecto generoso, y por sembrar en mí, valores de responsabilidad y perseverancia que han forjado en mi carácter y mi formación académica.

A mis tíos, Anita y Diego, por abrirme las puertas de su hogar y acogerme como un hijo más, brindándome apoyo, comprensión y estabilidad en una etapa decisiva de mi vida.

Al Ing. Vladimir Pazmiño y al Ing. Alfonso Arellano, por su orientación académica, su acompañamiento profesional y los valiosos aportes técnicos que enriquecieron y fortalecieron esta investigación.

A cada uno de ustedes, mi gratitud más profunda, pues este logro no es únicamente el resultado de un esfuerzo personal, sino la suma del apoyo, la confianza y el amor que me acompañaron en cada paso de este camino.

César L. Cevallos V.

INDICE 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	
RESUMEN	
ABSTRACT	

CAPÍTULO I. INTRODUCCION.....	18
1.1 Zona de Estudio.....	18
1.2 Antecedentes de investigación.....	19
1.3 Planteamiento del problema	20
1.4 Justificación.....	21
1.5 Objetivos.....	22
1.5.1 Objetivo General.....	22
1.5.2 Objetivos Específicos.....	22
CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO.	23
2.1 Pavimento Articulado	23
2.2 Funciones de las capas de los pavimentos.....	23
2.3 Tipos de Base	24
2.4 Propiedades físicas del pavimento articulado	25
2.4.1 Granulometría.....	25
2.4.2 Límites de consistencia	25
2.4.3 Humedad	26
2.4.4 Humedad IN SITU.....	26
2.4.5 Humedad Óptima.....	26
2.4.6 Grado de compactación.....	26
2.4.7 Absorción	26
2.5 Propiedades mecánicas del pavimento articulado	27
2.5.1 Módulo de rigidez.....	27

2.5.2	Módulo de elasticidad longitudinal (Young).....	27
2.5.3	Resistencia del adoquín.....	27
2.5.4	Desgaste por abrasión del adoquín.....	27
2.6	Propiedades hidráulicas del pavimento articulado.....	28
2.6.1	Infiltración en el pavimento articulado.....	28
2.6.2	Tasa de infiltración.....	28
2.6.3	Permeabilidad.....	28
2.6.4	Coefficiente de escorrentía.....	29
CAPÍTULO III. METODOLOGIA.....		30
3.1	Diagrama de metodología.....	30
3.2	Tipo de Investigación.....	30
3.3	Diseño de Investigación.....	31
3.4	Técnicas de recolección de Datos.....	31
3.4.1	Ensayos de laboratorio.....	31
3.4.2	Ensayos in situ.....	35
3.5	Definición de la muestra.....	38
3.5.1	Población.....	38
3.5.2	Muestra.....	38
3.5.3	Criterios de selección.....	39
3.5.4	Tipo de muestra.....	39
3.5.5	Ubicación de la muestra.....	40
CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....		41
4.1	Propiedades físicas del pavimento articulado.....	41
4.1.1	Granulometría.....	41
4.1.2	Límites de Atterberg.....	46
4.1.3	Compactación Proctor.....	48
4.1.4	Densidades.....	51
4.1.5	Humedades.....	54
4.1.6	Densidad y absorción.....	57
4.1.7	Grado de compactación.....	59
4.2	Propiedades mecánicas del pavimento articulado.....	62
4.2.1	Módulo de Rigidez y Young.....	62
4.2.2	Desgaste de agregados.....	64
4.2.3	Absorción en adoquines.....	65

4.2.4	Resistencia en adoquines.....	66
4.3	Propiedades hidráulicas del pavimento articulado	68
4.3.1	Permeabilidad	68
4.3.2	Infiltración	69
4.3.3	Comportamiento de las curvas de infiltración	71
4.3.4	Análisis del coeficiente de escurrimiento	72
4.4	Relaciones entre las propiedades físico-mecánicas y propiedades hidráulicas del pavimento articulado	74
4.4.1	Relación ensayo Proctor en Subrasantes vs escurrimiento.....	74
4.4.2	Relación cono de arena en la Base granular vs escurrimiento.....	75
4.4.3	Absorción en adoquines vs escurrimiento.....	76
4.4.4	Relación granulometría en Bases granulares vs escurrimiento.....	77
4.4.5	Relación granulometría en Subrasantes vs escurrimiento	78
4.4.6	Relación desgaste en Bases granulares vs escurrimiento	79
4.4.7	Relación módulo de Young en Bases granulares vs escurrimiento.....	80
CAPÍTULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES		82
5.1	Conclusiones	82
5.2	Recomendaciones	83
BIBLIOGRAFÍA.....		85
ANEXOS		89

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Valores para el coeficiente de escorrentía en función de la superficie.....	21
Tabla 2. Ubicación de los puntos de estudio	40
Tabla 3. Resumen del ensayo de granulometría en Cama de arena	41
Tabla 4. Resumen del ensayo de granulometría en Bases granulares	42
Tabla 5. Resumen del ensayo de granulometría en Subrasantes.....	43
Tabla 6. Resumen del ensayo de límites de Atterberg en bases granulares.....	46
Tabla 7. Resumen del ensayo de límites de Atterberg en Subrasantes.....	46
Tabla 8. Resumen del ensayo Proctor en Cama de arena	48
Tabla 9. Resumen del ensayo Proctor en Bases granulares.....	49
Tabla 10. Resumen del ensayo de Proctor en Subrasantes	50
Tabla 11. Resumen de densidades en Cama de arena	52
Tabla 12. Resumen de densidades en Bases granulares	52
Tabla 13. Resumen de densidades en Subrasantes.....	53
Tabla 14. Resumen de humedades en Cama de arena.....	55
Tabla 15. Resumen de humedades en Bases granulares.....	56
Tabla 16. Resumen de humedades en Subrasantes	56
Tabla 17. Resumen del ensayo de Densidad y absorción.....	57
Tabla 18. Resumen del grado de compactación en las diferentes capas.....	59
Tabla 19. Resumen del ensayo con el equipo Geogauge en bases.....	62
Tabla 20. Resumen del ensayo realizado con el equipo Geogauge en Subrasantes	62
Tabla 21. Resumen del ensayo de abrasión en Bases granulares.....	64
Tabla 22. Resumen del ensayo de absorción en adoquines	65
Tabla 23. Resumen del ensayo de resistencia a la compresión en adoquines.....	66
Tabla 24. Resumen del ensayo de infiltración.....	68
Tabla 25. Características del pavimento articulado	69

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ubicación geográfica de la zona y puntos de estudio.....	18
Figura 2. Metodología de la investigación	30
Figura 3. Mallado vial para muestreo	38
Figura 4. Curvas granulométricas de cama de arena	44
Figura 5. Curvas granulométricas de Bases granulométricas	44
Figura 6. Curvas granulométricas de Subrasantes	45
Figura 7. Límites líquidos bases - subrasantes	47
Figura 8. Curvas de compactación en cama de arena	48
Figura 9. Curvas de compactación en Bases granulares	49
Figura 10. Curvas de compactación en Subrasantes	50
Figura 11. Compactación Proctor en diferentes capas	51
Figura 12. Densidades en Cama de arena	52
Figura 13. Densidades en Bases granulares	53
Figura 14. Densidades en Subrasantes.....	54
Figura 15. Humedades en Cama de arena.....	55
Figura 16. Humedades en Bases granulares	56
Figura 17. Humedades en Subrasantes	57
Figura 18. Absorción en agregados	58
Figura 19. Grado de compactación en cama de arena.....	59
Figura 20. Grado de compactación en Bases granulares.....	60
Figura 21. Grado de compactación en Subrasantes	60
Figura 22. Grado de compactación en las diferentes capas.....	61
Figura 23. Módulo de Young en Bases granulares y Subrasantes	63
Figura 24. Desgaste en Bases granulares	64
Figura 25. Absorción en adoquines	66
Figura 26. Resistencia a la compresión en adoquines.....	67
Figura 27. Curvas de infiltración.....	70
Figura 28. coeficiente de escurrimiento	72
Figura 29. Comparación de coeficientes de escurrimiento.....	73
Figura 30. Correlación Proctor en Subrasantes vs escurrimiento	74
Figura 31. Correlación compactación en Base granular vs escurrimiento	75
Figura 32. Correlación absorción en adoquines vs escurrimiento	76
Figura 33. Correlación granulometría en Bases granulares vs escurrimiento.....	77
Figura 34. Correlación granulometría en Subrasantes vs escurrimiento	78
Figura 35. Correlación abrasión en Bases granulares vs escurrimiento	79
Figura 36. Correlación módulo de Young en Bases granulares vs escurrimiento	80

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1. Ensayos realizados	91
Anexo 2. Ensayo de granulometría	92
Anexo 3. Ensayo de Límites de Atterberg	93
Anexo 4. Ensayo de compactación Proctor.....	94
Anexo 5. Ensayo de gravedad específica y absorción en agregados	95
Anexo 6. Ensayo de Abrasión (máquina de los Ángeles)	96
Anexo 7. Ensayo de Absorción y resistencia a la compresión en adoquines	97
Anexo 8. Ensayo in situ Cono de arena	98
Anexo 9. Resumen de ensayos realizados	101

RESUMEN

La presente investigación tuvo como objetivo determinar las características físicas, mecánicas e hidráulicas del pavimento articulado existente en la cabecera cantonal de Alausí, provincia de Chimborazo, y analizar su influencia en el comportamiento estructural e hidráulico bajo condiciones reales de tránsito y clima. El estudio se justifica por la presencia de escurrimiento superficial, sobresaturación de capas estructurales y deterioro prematuro de las vías, factores que afectan la seguridad vial y la durabilidad de la infraestructura urbana. La investigación se desarrolló bajo un enfoque cuantitativo con diseño descriptivo, basado en la observación, medición y análisis de las propiedades del pavimento sin manipulación de variables. La población de estudio estuvo conformada por aproximadamente 14 kilómetros de pavimento articulado, de los cuales se seleccionaron ocho puntos representativos mediante muestreo probabilístico estratificado, distribuidos en vías principales y secundarias. En cada punto se extrajeron muestras de adoquines, cama de arena, base granular y subrasante. Se aplicaron ensayos físicos, mecánicos e hidráulicos conforme a normativas nacionales e internacionales. Los resultados evidenciaron deficiencias en la compactación de capas granulares y subrasante, valores de módulo de Young inferiores a los recomendados y variaciones significativas en la infiltración y el coeficiente de escurrimiento, asociadas a la granulometría, el grado de compactación.

Palabras claves: pavimento articulado, compactación, características, físicas, mecánicas, hidráulicas, escurrimiento.

ABSTRACT

The present research aimed to determine the physical, mechanical, and hydraulic characteristics of the existing interlocking pavement in the cantonal capital of “Alausí” Chimborazo Province, and to analyse their influence on structural and hydraulic performance under real traffic and climatic conditions. This study is justified by the presence of surface runoff, oversaturation of structural layers, and premature roadway deterioration, which affect road safety and the durability of urban infrastructure. The research employed a quantitative approach with a descriptive design, based on observation, measurement, and analysis of pavement properties without manipulation of variables. The study population comprised approximately 14 km of interlocking pavement, from which eight representative points were selected using stratified probabilistic sampling and distributed along primary and secondary roads. At each point, samples of paving blocks, bedding sand, granular base, and subgrade were extracted. Physical, mechanical, and hydraulic tests were conducted in accordance with national and international standards. The results revealed deficiencies in the compaction of granular layers and the subgrade, Young’s modulus values below those recommended in the literature, and significant variations in infiltration and runoff coefficients associated with gradation characteristics and degree of compaction.

Keywords: interlocking pavement, compaction, physical characteristics, mechanical properties, hydraulic properties, runoff.



Mario Nicolas Salazar
Ramos



Revised by
Mario N. Salazar
0604069781

CAPÍTULO I. INTRODUCCION.

1.1 Zona de Estudio

El cantón Alausí se localiza en la provincia de Chimborazo, dentro del territorio de la Republica del Ecuador. Se sitúa aproximadamente a 97 kilómetros de Riobamba, ciudad que constituye la capital provincial [1]. Su extensión territorial es de aproximadamente 165.833 hectáreas, y su cabecera cantonal es la ciudad de Alausí. El territorio se caracteriza por una topografía marcadamente montañosa, con fuertes variaciones en el relieve que incluyen profundas quebradas, valles de tipo subtropical y amplias depresiones como se muestra en la figura 1.

La altitud del cantón oscila entre los 560 m s. n. m. y los 4.640 m s. n. m., presentando temperaturas que varían entre 3 °C y 24 °C. En cuanto al régimen hídrico, la precipitación anual alcanza valores de 1.000 a 2.000 mm en las zonas de páramo, mientras que en el sector subtropical fluctúa entre 500 y 2.000 mm [2].

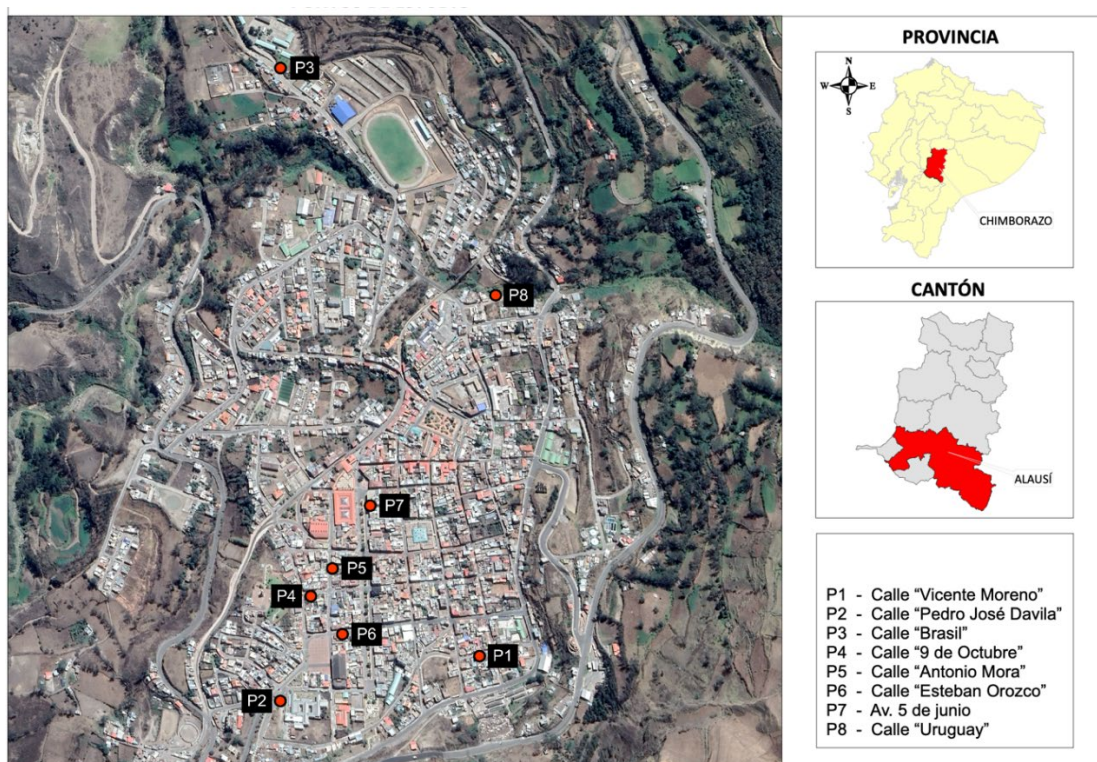


Figura 1. Ubicación geográfica de la zona y puntos de estudio

Fuente: Elaboración propia

1.2 Antecedentes de investigación.

La infraestructura vial representa un componente esencial para el funcionamiento de cualquier economía nacional, a la vez que proporciona diversos beneficios sociales y económicos. La correcta conservación y construcción de las carreteras tienen un impacto directo en la velocidad con la que dichas carreteras pierden su valor, así como en el impacto que los usuarios producen en la red vial y en la sociedad en su conjunto [3].

Estas infraestructuras viales pueden edificarse empleando diversos tipos de pavimentos. [4] establece una clasificación que comprende cuatro categorías: pavimentos flexibles, semirrígidos, rígidos y articulados. De acuerdo con la Norma de Diseño Geométrico de Carreteras MOP-001-F2002, un pavimento está constituido por un conjunto de varias capas entre las cuales se incluye carpeta de rodadura, base y subbase que se colocan sobre una subrasante. Su función principal es resistir las cargas generadas por el tráfico y distribuir tensiones de manera eficiente en la estructura hacia el suelo.

La implementación de este tipo de pavimentos responde a varias consideraciones técnicas y económicas. En el estudio comparativo realizado por Mera [5] se analizan diversos aspectos con relación a características del pavimento como pueden ser, la estimación del tráfico, la comodidad y serviciabilidad del usuario. Aunque estos aspectos resultan ser fundamentales en el proceso de diseño, es necesario resaltar el impacto que proponen las condiciones climáticas en el pavimento, como lo menciona Montejo [4] “Los factores que en nuestro medio más afectan a un pavimento son las lluvias y los cambios climáticos”.

Durante la época invernal es frecuente que los pavimentos presenten sobresaturación, lo que provoca afectaciones en la circulación vehicular. Esta situación se intensifica cuando la vía soporta altos volúmenes de tráfico, generando inconvenientes adicionales [6]. Considerando estos criterios resulta ser crucial la evaluación de las propiedades físicas, mecánicas e hidráulicas del pavimento. En este contexto, las propiedades físicas se entienden como las características intrínsecas la composición y estructura del material, donde son de importancia la densidad de materiales, espesor de estratos e incluso la resistencia de estos [7].

Mientras que, las propiedades mecánicas determinan la capacidad de los materiales para soportar cargas y deformaciones generadas por las diferentes condiciones climáticas

y de tránsito vehicular. Entre las principales propiedades mecánicas se incluyen la resistencia a la compresión, el desgaste, la capacidad de soporte y la fricción entre las partículas del suelo [8].

Finalmente, las propiedades hidráulicas de los pavimentos se relacionan con su capacidad para controlar el flujo de agua superficial y facilitar el drenaje subterráneo. Dentro de este conjunto de características se consideran diversos aspectos que vinculan la estructura del pavimento con el suelo, como la permeabilidad, la textura de la superficie, el grado de saturación, la capacidad de infiltración y la pendiente de la vía [9].

La ocupación de los suelos urbanos es caracterizada por el aumento de áreas impermeables ocasionando el aumento del escurrimiento superficial, la degradación de la calidad de las aguas urbanas y disminución de la recarga de las aguas subterráneas [10]. Debido a esto se cree que puede presentar afectaciones a los pavimentos, en específico a los pavimentos ubicados en el sector cantonal de Alausí.

Por estas razones se optó como objetivo principal del presente trabajo de investigación, determinar las características físicas, mecánicas e hidráulicas del pavimento articulado mediante ensayo en campo con equipos electrónicos y valoración de laboratorio en la cabecera cantonal de Alausí.

1.3 Planteamiento del problema

La cabecera cantonal de Alausí (Alausí Matriz) presenta un territorio montañoso irregular el cual tiene fuertes pendientes, debido a estas razones se puede observar geomorfológicamente quebradas profundas y grandes depresiones [2]. Estas condiciones del terreno motivan la realización de la presente investigación, orientada a analizar el rendimiento de los pavimentos articulados existentes dentro del cantón, de esta manera comprender como sus características físicas, mecánicas e hidráulicas influyen en su funcionamiento y en el manejo de aguas pluviales que fluyen sobre las calzadas. Este análisis resulta fundamental, puesto que la calidad del pavimento puede incidir directamente en la seguridad y la comodidad de los usuarios.

Este planteamiento busca abordar la problemática del escurrimiento superficial y el estancamiento de agua en las vías, fenómenos que pueden generar baches y afectar la

calidad del tránsito. Además, se considera la falta de actualización de las normativas existentes, lo que complica la evaluación precisa del comportamiento hidráulico de los pavimentos en diferentes contextos climáticos y geográficos. Por lo tanto, es fundamental realizar un estudio exhaustivo que permita establecer una relación clara entre las características del pavimento y su desempeño hidráulico, contribuyendo así a la mejora de la infraestructura vial y la calidad de vida de los habitantes. Por estos motivos presentados se plantea la pregunta ¿De qué manera se relacionan las propiedades físicas y mecánicas del pavimento articulado con sus características hidráulicas, y cómo se puede actualizar el coeficiente de escurrimiento en función de las condiciones reales observadas en el campo y en laboratorio?

1.4 Justificación

La gestión adecuada de las vías urbanas es esencial, debido a que constituye a uno de los bienes patrimoniales más importantes que tiene un cantón o ciudad. En el caso particular del pavimento articulado, tiene un desempeño el cual está directamente relacionado con sus propiedades físicas, mecánicas e hidráulicas, las cuales determinan la capacidad de resistir cargas, evitar deformaciones y permitir el adecuado escurrimiento pluvial superficial eficiente. Sin embargo, se ha notado que, en varias áreas, especialmente en áreas topográficas con una gran cantidad de irregularidades como es el cantón Alausí, las condiciones reales del entorno pueden diferir con los valores teóricos empleados para el diseño.

Dentro de las características hidráulicas del pavimento, el porcentaje de infiltración cuenta con una importancia relevante, ya que mantiene una relación directa con los coeficientes de escurrimiento, los cuales son esenciales para el diseño de drenajes eficientes en carreteras y vías de tráfico. Estos coeficientes son descritos en las “Normas para el estudio y diseño de sistemas de agua potable y disposición de aguas residuales para poblaciones mayores a 1000 habitantes” [11] propuestas por la Subsecretaria de Saneamiento Ambiental y Obras Sanitarias y el Instituto Ecuatoriano de Obras Sanitarias (IEOS), publicadas en 1992, en la Tabla 1 se presentan los valores para el coeficiente de escorrentía en función del tipo de superficie-

Tabla 1. Valores para el coeficiente de escorrentía en función de la superficie.

Tipo de superficie	C
--------------------	---

Cubierta metálica	0.95
Cubierta con teja ordinaria o impermeabilizada	0.9
Pavimentos asfálticos en buenas condiciones	0.85 a 0.9
Pavimentos de hormigón	0.8 a 0.85
Empedrados (juntas pequeñas)	0.75 a 0.8
Empedrados (juntas ordinarias)	0.4 a 0.5
Pavimentos de macadam	0.25 a 0.6
Superficies no pavimentadas	0.1 a 0.3
Parques y jardines	0.05 a 0.25

Fuente: CPE INEN 5, 1992

A partir del análisis realizado, se identifica la necesidad de evaluar las características físicas, mecánicas e hidráulicas del pavimento articulado, con el fin de entender como interactúan entre si bajo condiciones reales y exposición climática, obteniendo nuevos coeficientes de escurrimiento mediante ensayos de campo con equipos electrónicos y valores de laboratorio, generando valores representativos del comportamiento hidráulico del pavimento. lo que nos proporcionará una información valiosa para la mejora del diseño hidráulico de las carreteras.

1.5 Objetivos

1.5.1 Objetivo General

- Determinar las características físicas, mecánicas e hidráulicas del pavimento articulado en la parte urbana del cantón Alausí mediante ensayos en campo con equipos electrónicos y valoraciones de laboratorio.

1.5.2 Objetivos Específicos

- Medir en laboratorio características físicas del pavimento articulado correspondiente a la parte urbana del cantón Alausí.
- Evaluar IN SITU las características mecánicas e hidráulicas del pavimento usando equipos electrónicos.
- Establecer la relación de las características físico-mecánicas en pavimentos articulados de la zona urbana del cantón Alausí con el comportamiento hidráulico.

CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO.

2.1 Pavimento Articulado

Los pavimentos articulados se encuentran compuestos por una capa de rodadura la cual está elaborada con bloques de concretos prefabricados (adoquines), que presentan un espesor uniforme y características estandarizadas entre sí. Esta se encuentra sobre una delgada capa de arena, cuya función es permitir el adecuado asiento y distribución de cargas entre los elementos. A su vez, se apoya sobre una base granular, o también, se puede encontrar directamente sobre la subrasante, estos cambios dependen de la calidad, magnitud y frecuencia de las cargas que circulan por el pavimento [4].

2.2 Funciones de las capas de los pavimentos

- **Subrasante**

La subrasante se define como el soporte natural, adecuadamente preparado y compactado, sobre el cual se construye el pavimento. La función principal de estos consiste en proporcionar un apoyo uniforme y estable, evitando variaciones abruptas en su capacidad de soporte. Es indispensable que la subrasante garantice una base estable más que una alta capacidad de soporte [12].

- **La base**

Es la capa ubicada encima de la subrasante, presenta el mayor espesor y constituye el elemento con mayor capacidad estructural del pavimento. Puede conformarse por dos o más capas de los materiales que fueron seleccionados [12].

- **Capa de arena**

La capa de arena se refiere a una capa de poco espesor, de arena gruesa y limpia la cual se coloca directamente sobre la base, la cual tiene la función de asiento para los adoquines y filtro para el agua, la cual eventualmente penetrara las juntas entre capas [4].

- **Adoquines**

Los adoquines son elementos prefabricados los cuales, una vez colocados y compactados forman la capa de rodadura del pavimento, estos deben tener la

resistencia suficiente para soportar las cargas que generan el tránsito y el desgaste por cuestiones climáticas o de tiempo [4].

- **Sello de arena**

El sello de arena se refiere a la arena fina que se utiliza para rellenar las juntas entre los adoquines. Su función principal es proporcionar un anclaje vertical y transferir las cargas debido al tráfico [4].

- **Bordes de confinamiento**

Los bordes de confinamiento son elementos cruciales ya que crean una estructura de contención para los diferentes materiales evitando el desplazamiento de los adoquines, la apertura excesiva de las juntas o la pérdida de las uniones entre ellos, efectos causados por las fuerzas generadas por el tráfico. Existen dos tipos de confinamientos: [12].

- **Confinamiento Interno:** Este confinamiento rodea las estructuras que se encuentran dentro del pavimento, como sumideros, cámaras de inspección, cunetas, entre otros [12].
- **Confinamiento Externo:** Este tipo de confinamiento se basa en rodear el pavimento con elementos como bordillos de acera, bordillo contra áreas verdes, bordillos a ras contra otros tipos de pavimentos [12].

2.3 Tipos de Base

Los pavimentos articulados, compuestos por adoquines de concreto sobre una cama de arena, requieren bases estructurales que proporcionen soporte uniforme y drenen el agua efectivamente [13]. Las bases se clasifican en función al tipo de suelo utilizado, siendo Gravas, arena, misma clasificación con la que se distinguirán las bases en los resultados de esta investigación.

- Granular no tratada: Material compactado de agregados gruesos (piedra triturada, grava), sin aditivos; drena bien pero menor rigidez, se la recomienda para vías de tráfico bajo

- Base negra: Granulares con asfalto o emulsión; flexible, distribuye cargas uniformemente, se la recomienda para el tráfico medio-alto siendo una alternativa a hidráulica para deformaciones menores.
- Arena gruesa: Arena limpia, gruesa (tamaño <2 mm hasta tamiz #40, 0.425 mm), libre de orgánicos y finos ($>92\%$ gruesos), niveladora y drenante, se la puede ocupar en vías para todos los tráficos [13].

2.4 Propiedades físicas del pavimento articulado

2.4.1 Granulometría

La granulometría es una propiedad física que describe la distribución de los tamaños de los granos que conforman un material, sin considerar su composición química. Dentro del contexto de pavimentos, esta característica es fundamental para evaluar la calidad de los materiales empleados.

Una granulometría adecuada influye directamente en la capacidad de los pavimentos porosos para facilitar el drenaje del agua y prevenir la acumulación superficial. Asimismo, la resistencia mecánica y la durabilidad de este tipo de pavimentos dependen en gran medida de la distribución de tamaños de partículas dentro de la mezcla. Cuando la granulometría es óptima, se mejora la capacidad del pavimento para soportar las cargas de tráfico y las variaciones ambientales, lo que incrementa su vida útil y disminuye el nivel de deterioro.

2.4.2 Límites de consistencia

Los límites de Atterberg o también denominados límites de consistencia se fundamentan en el principio de que los suelos finos, presentes en la naturaleza, se encuentran con diferentes estados, estos dependiendo del contenido de agua con el cual cuentan [14].

Según su contenido de agua puede estar en cualquiera de los siguientes estados

- **Estado líquido:** Con las propiedades y apariencia de una suspensión.

- **Estado semilíquido:** Con las propiedades de un fluido viscoso.
- **Estado plástico:** En el que el agregado se comporta plásticamente.
- **Estado semisólido:** En el que el agregado tiene la apariencia de un sólido, pero aun disminuye su volumen por estar sujeto a secado.
- **Estado sólido:** En que el volumen del suelo no varía con el secado [14].

2.4.3 Humedad

El peso del agua contenida en el suelo, la cual se expresa como porcentaje del peso de la misma muestra la cual fue secada al horno a 110°C, hasta que la muestra no presente variaciones en su peso [15].

2.4.4 Humedad IN SITU

Contenido total del agua dentro de las capas naturales del suelo en condiciones del suelo[15].

2.4.5 Humedad Óptima

La humedad óptima se refiere al nivel de contenido de agua en un material granular en el cual se logra la máxima densidad y resistencia. Dentro del contexto de pavimentos, se determina la humedad óptima para garantizar la calidad y durabilidad de éste. Cuando el contenido en el agua material se encuentra por debajo de lo óptimo, se puede observar una falta de compactación [15].

2.4.6 Grado de compactación

La compactación se determina habitualmente como un porcentaje de la densidad máxima del material, y tanto los suelos de fundación como los rellenos deben alcanzar al menos el 95 % de la densidad establecida en el ensayo Proctor [16].

2.4.7 Absorción

La absorción se entiende como el aumento del peso del agregado provocado por la entrada de agua en los poros de sus partículas durante un tiempo determinado, sin considerar el agua adherida a su superficie. Este aumento se expresa como un

porcentaje respecto al peso seco del material. Este comportamiento, también denominado higroscopicidad, es propio de los materiales granulares y depende directamente de su porosidad. La higroscopicidad hace referencia a la capacidad del material para captar o liberar humedad del ambiente, lo cual influye en su desempeño y durabilidad en diferentes aplicaciones [17].

2.5 Propiedades mecánicas del pavimento articulado

2.5.1 Módulo de rigidez

Se refiere al módulo de rigidez como la capacidad del material para resistir deformaciones dentro del rango elástico, permite determinar deformación o asentamientos de los suelos. Este comportamiento guarda relación con la fuerza del material para absorber y liberar energía de cargas externas [18].

2.5.2 Módulo de elasticidad longitudinal (Young)

El módulo de Young también es conocido módulo de elasticidad longitudinal, es una medida de la rigidez del material, este modelo es fundamental en la ingeniería, debido a que permite predecir como se comportará un material bajo el peso de diferentes cargas. Un valor alto indica que el material es rígido y resistente a la deformación, mientras que, más bajo el valor sugiere que el material es flexible y se deformaría fácilmente[19].

2.5.3 Resistencia del adoquín

La resistencia del adoquín se refiere a la capacidad máxima que puede soportar antes de romperse bajo una carga creciente continua, la resistencia en adoquines debe ser de al menos 300 kg/cm² para áreas con tráfico medio a ligero y de 400 kg/cm² para vías con tráfico pesado [20].

2.5.4 Desgaste por abrasión del adoquín

El desgaste por abrasión del adoquín de concreto se mide a partir del método de Böhme, el cual determina la pérdida de volumen de la muestra la cual es sometida a un ciclo abrasivo, según el método esta pérdida no debe exceder 20,000 mm³ por cada 5,000 mm² [21].

2.6 Propiedades hidráulicas del pavimento articulado

2.6.1 Infiltración en el pavimento articulado

En el contexto de los pavimentos articulados, la infiltración se refiere a la capacidad de la superficie para permitir el ingreso del agua y su retención temporal dentro del sistema. Este comportamiento depende de factores como la porosidad, la textura y el estado de conservación del pavimento. Por ello, resulta fundamental disponer de un sistema de drenaje adecuado que reduzca los problemas asociados a la acumulación de agua. Adicionalmente, pueden implementarse soluciones complementarias, como el empleo de mezclas porosas, que contribuyen a optimizar la gestión hídrica en este tipo de estructuras [22].

2.6.2 Tasa de infiltración

La tasa de infiltración se define como la cantidad de agua que ingresa al suelo después de un evento de precipitación. Este parámetro es fundamental en el diseño y la construcción de carreteras, ya que valores elevados de infiltración pueden generar comportamientos no deseados en la estructura y comprometer la durabilidad del pavimento. Su medición se expresa comúnmente en milímetros por hora (mm/h).

Para determinarla, se emplean diversos métodos que incluyen ensayos de campo y modelos empíricos. En el caso específico de los pavimentos articulados, la tasa de infiltración se evalúa mediante pruebas in situ, generalmente utilizando un infiltrómetro de doble anillo [22].

2.6.3 Permeabilidad

La permeabilidad se define como la capacidad que posee un pavimento para permitir el paso del agua a través de su estructura. Generalmente, este comportamiento se obtiene mediante el uso de materiales porosos que facilitan el flujo del agua hacia el interior del sistema, reduciendo así la escorrentía superficial. En el caso de los pavimentos articulados esta característica resulta especialmente beneficiosa en zonas urbanizadas, ya que permite la filtración y almacenamiento del agua de lluvia. Esto contribuye a disminuir la carga hidráulica sobre los sistemas de alcantarillado y favorece la recarga de los acuíferos [23].

2.6.4 Coeficiente de escorrentía

El coeficiente de escorrentía (C) se define como la relación entre el volumen de escorrentía superficial generado y el volumen total de precipitación que incide sobre una superficie determinada. Este parámetro constituye un elemento esencial en los procesos de planificación, diseño de sistemas de drenaje y gestión de aguas pluviales. Un valor elevado del coeficiente indica que una proporción mayor del agua de lluvia escurre sobre la superficie, mientras que un coeficiente bajo refleja una mayor infiltración o retención, reduciendo así el volumen de agua que circula superficialmente [24], en la Tabla 1 Se puede apreciar los valores para el coeficiente de escorrentía en función de la superficie.

CAPÍTULO III. METODOLOGIA.

3.1 Diagrama de metodología

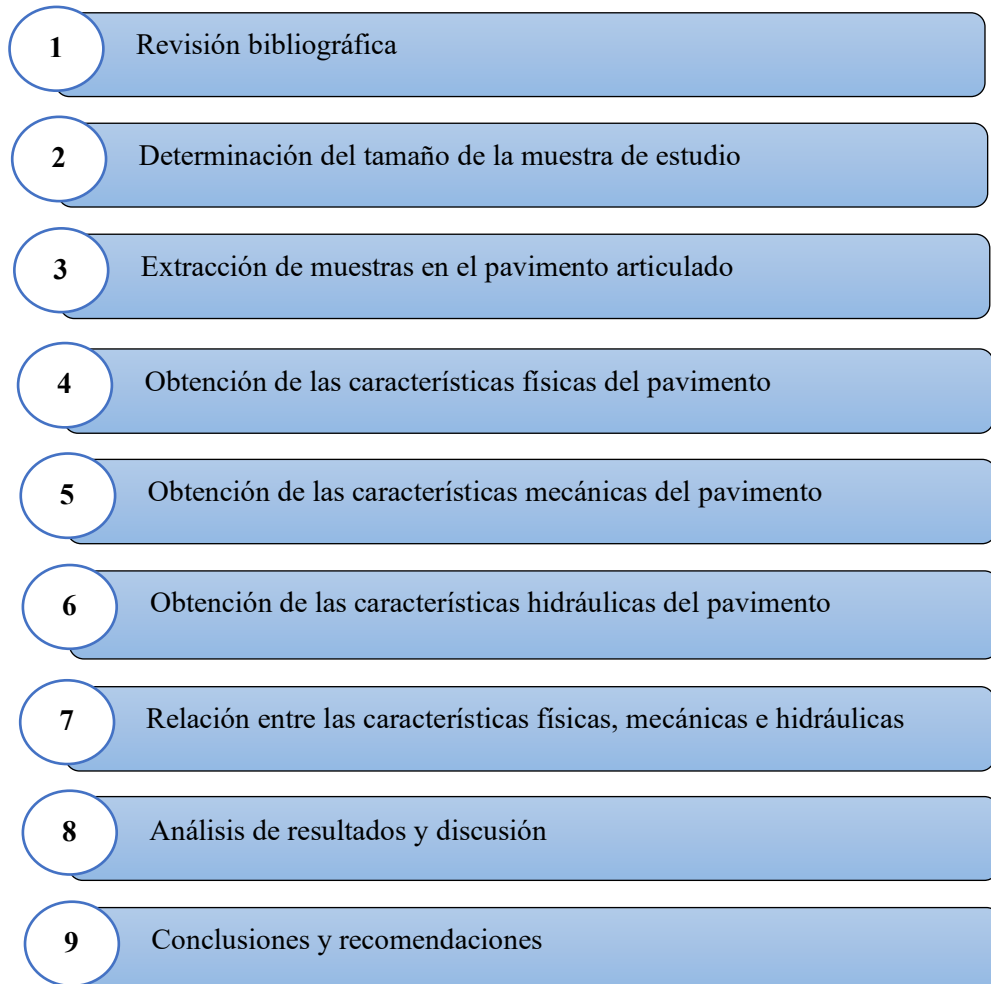


Figura 2. Metodología de la investigación

Fuente: Elaboración propia

3.2 Tipo de Investigación

En el presente proyecto de investigación se adoptó un enfoque cuantitativo, dado que se basa en el análisis de datos numéricos obtenidos en ensayos de laboratorio y pruebas in situ que se aplicaron en la estructura de pavimento articulado. Estos ensayos proporcionan resultados obtenidos bajo condiciones específicas, por lo que es esencial analizar los datos de manera objetiva.

3.3 Diseño de Investigación

El diseño de investigación es de tipo descriptivo, ya que se enfoca en observar, medir, analizar las características físicas, mecánicas e hidráulicas del pavimento articulado sin manipular las variables. Esto permite recolectar, organizar y analizar los datos a fin de comprender el comportamiento de las muestras obtenidas.

3.4 Técnicas de recolección de Datos

3.4.1 Ensayos de laboratorio

3.4.1.1 Granulometría de materiales granulares

Los análisis granulométricos de materiales de grano pueden ser aplicados en suelos gruesos, arena, grava, y determinan la distribución granulométrica mediante tamizado en seco o en húmedo, separando las fracciones retenidas en tamices normalizados según el ASTM C136 y AASHTO T-27 [25].

A manera general, estos ensayos se realizan de la siguiente forma:

- Como preparativo se toma de una muestra representativa (de 500 a 5000 g, según el tamaño máximo), secado en horno (110 °C), pesaje de la cantidad total (Pt).
- Para realizar el tamizado en seco, se debe apilar y pesar los tamices de la abertura más grande a la más pequeña incluyendo la bandeja colectora, seguido de eso con ayuda del tamiz mecánico se procede a agitar mecánicamente durante 10 a 15 minutos, se debe pesar el material retenido en cada tamiz (R_i).
- Se calcula el porcentaje de material retenido = $(R_i / Pt) \times 100$; el porcentaje de material pasado = $100 - \% \text{ retenido acumulado}$. Luego se representa gráficamente el porcentaje pasado en función del tamaño logarítmico [25].

Para el tamizado en húmedo el proceso radica en: lavar, secar y tamizar la muestra en el tamiz n.º 200.

3.4.1.2 Límites de Atterberg

Los límites de Atterberg representan una serie de propiedades físicas, las cuales son importantes para considerar en geotecnia, ya que definen los estados de consistencia de suelos finos (como limos y arcillas) según su contenido de humedad:

sólido, semisólido, plástico y líquido. Dichas características permiten clasificar suelos, evaluar su plasticidad, cohesión y comportamiento bajo cargas, siendo esenciales para el diseño de fundaciones y obras civiles.

A manera general se menciona que, dentro de los límites de Atterberg se incluyen el límite líquido (LL), punto de transición del estado plástico al líquido mediante ensayo de Casagrande; el límite plástico (LP), donde el suelo pasa de plástico a semisólido por rodillo de hilo; y el índice de plasticidad ($IP = LL - LP$), indicador de plasticidad [26].

3.4.1.2.1 Límite Líquido

Definimos al límite líquido (LL) como el contenido de agua en el cual un suelo, generalmente fino, pasa del estado plástico al estado líquido. A la hora de la práctica, este límite es definido como el punto donde un surco en la pasta de suelo se cierra tras 25 golpes en el aparato de Casagrande, midiendo la capacidad de retención de agua influida por la mineralogía arcillosa y estructura del suelo [27]. Además, el autor citado anteriormente, menciona que el límite Líquido aumenta con fracciones arcillosas (ejemplo, caolinita 44%, limo 75%) pero disminuye con arenas gruesas; en mezclas caolinita-limo, puede elevarse por retención extra de agua en la estructura microscópica, alterada por adiciones de limo o soluciones porosas, esto según investigaciones.

Para determinar este límite se utiliza el método estándar, mismo que usa el aparato de Casagrande, donde se prepara una pasta de suelo que pasa tamiz de 425 μm , se forma un surco y se cuenta los golpes hasta cierre de 12 mm, interpolando linealmente la humedad a 25 golpes de una curva flujo-número de golpes; alternativas como el cono de caída definen LL por penetración de 20 mm tras 5 segundos. Estudios comparativos muestran discrepancias entre métodos, con Casagrande subestimando LL en suelos plásticos menores al 50% frente al cono de caída, que es más reproducible para suelos orgánicos.

3.4.1.2.2 Limite Plástico

El límite plástico (LP), hace referencia al contenido de humedad mínimo al que un suelo fino exhibe comportamiento plástico, definido como el punto donde un

hilo de suelo de 3 mm de diámetro se agrieta y desmorona al rodarlo repetidamente, controlado principalmente por el contenido de arcillas y su mineralogía [28]. Por investigaciones se ha determinado que este límite se incrementa con adiciones de ceniza de cáscara de arroz (hasta 64.75%) o arcillas expansivas, correlacionando positivamente con fracción arcillosa y materia orgánica, pero disminuye en suelos limosos o arenosos no plásticos. Estudios experimentales muestran que el LP es sensible a la estructura del suelo, con valores típicos de 20-30% en arcillas naturales, afectando el índice de plasticidad ($IP = LL - LP$) [28].

Al igual que el límite anterior para determinarlo se prepara una muestra de suelo pasante por tamiz de 0.4 mm, se amasa con agua hasta formar hilos que se enrollan y ruedan hasta alcanzar 3 mm de diámetro, repitiendo hasta que el hilo se desmorone bajo presión moderada, calculando la humedad promedio de al menos dos porciones de 6 g secadas en horno.

3.4.1.3 Compactación mediante Proctor

Se define a la compactación de Proctor como un ensayo de laboratorio que determina la máxima densidad seca máxima y el contenido óptimo de agua de un suelo mediante aplicación de energía elevada, simulando condiciones de campo con rodillos pesados para evaluar propiedades mecánicas en proyectos geotécnicos [29].

3.4.1.4 Densidad y absorción del agregado fino

La densidad y la absorción del agregado fino permiten evaluar la masa por unidad de volumen (densidades secas saturada superficialmente - SSD, aparente y absoluta) y el porcentaje de agua absorbida por los poros de partículas <4.75 mm, esenciales para dosificaciones precisas en concreto y control de compactación en mezclas con suelos [30].

La absorción varía de 0.01-2% según su porosidad, textura y mineralogía, afectando agua libre en mezclas y relacionándose con límites Atterberg en suelos arcillosos; las densidades típicas que oscilan entre 2.5 - 2.7 g/cm³, disminuyen cuando la absorción es elevada. Varios estudios destacan una variabilidad por tiempo saturación (15-24 h óptimo) y humedad superficial residual, recomendando SSD para diseños de concreto vinculados a compactación Proctor.

3.4.1.5 Densidad y absorción del agregado grueso

La densidad y absorción del agregado grueso permiten determinar la masa por unidad de volumen de partículas mayores a 4.75 mm (densidades aparentes, SSD y absoluta) y el porcentaje de agua absorbida por sus poros, información crucial para dosificaciones de concreto, control volumétrico en compactación Proctor y estabilidad en mezclas con suelos [31].

La absorción típica de los materiales, que suele oscilar entre el 0.5% y el 3%, se incrementa debido a factores como la porosidad, la fractura angular o una litología porosa. Este aumento afecta directamente la cantidad de agua efectiva en la mezcla de concreto y altera la densidad registrada en el ensayo Proctor modificado. Generalmente, las densidades que se encuentran entre el 2.5 y 2.8 gramos sobre centímetro cúbico Tienden a disminuir cuando la absorción es elevada. Esta variabilidad depende de una saturación completa, cuyo tiempo óptimo se sitúa entre 15 y 24 horas, así como de la fricción superficial. Por lo tanto, se recomienda trabajar en estado saturado superficialmente seco, conocido como condición SSD, para lograr diseños precisos que estén correctamente vinculados a las propiedades de los suelos y los materiales finos.

3.4.1.6 Degradación de los agregados gruesos mediante el uso de la máquina de los Ángeles.

La degradación de agregados gruesos haciendo uso de la máquina de Los Ángeles mide la resistencia a la abrasión, impacto y trituración de partículas de 19-37.5 mm, calculando el porcentaje de pérdida de masa tras 500-1000 revoluciones en un tambor rotatorio con esferas de acero, esencial para evaluar durabilidad en pavimentos y concreto hidráulico [32].

Para realizar la degradación se prepara muestras de 5-10 kg según gradación estándar (ejemplo, tabla INV E-219: 2500 g retenido >19 mm con 11 kg carga para 500 rev.), se carga con 6-12 esferas acero (día. 46.8 mm, 390-445 g), seguido de esto, se gira a 30-33 rpm por número especificado, tamiza producto retenido No. 12 (2.36 mm).

Se calcula el porcentaje de pérdida mediante la fórmula.

$\% \text{ pérdida} = [(masa \text{ inicial} - masa \text{ retenida}) / masa \text{ inicial}] \times 100$ según ASTM C131/C535 o INV E-219.

Según esto se tiene una clasificación:

- <40% excelente para concreto estructural
- >50% inadecuado para alto impacto.

La degradación aumenta con litología blanda (caliza > granito), forma angular y alta porosidad/absorción (>2%), correlacionando con densidad y límites Atterberg en mezclas suelo-agregado; normas exigen <35-45% para pavimentos según tráfico.

3.4.2 Ensayos in situ

3.4.2.1 Elasticidad y rigidez in situ- Método “Geo Gauge”

El método “Geo Gauge” evalúa la elasticidad y rigidez in situ de suelos y capas granulares mediante vibración dinámica no destructiva, para esto se realiza un proceso de medición del módulo de rigidez (k, en MN/m) y módulo de Young (E, en MPa) para control de compactación y diseño de pavimentos, correlacionando con la densidad seca y el ensayo Proctor [33].

En específico, el método “Geo Gauge” H-4140 aplica fuerza vibratoria sinusoidal a 25 frecuencias (100-500 Hz) sobre una placa de 20 cm² en una superficie nivelada, registrando aceleración vertical para calcular rigidez de capa y módulo elástico vía ondas de compresión, promediando 3-5 lecturas por punto en un rango menor a 1 min según normas AASHTO o locales [34].

3.4.2.2 Densidad in situ-Método del cono de arena

El método del cono de arena determina la densidad in situ (húmeda y seca) de suelos compactados excavando un hoyo cilíndrico, pesando el material extraído y llenando el volumen con arena calibrada de densidad conocida, para evaluar el grado de compactación frente al ensayo Proctor en pavimentos y terraplenes [35].

Para llevar a cabo esta práctica se debe considerar los siguientes pasos:

- Se elige una zona representativa del terreno ya compactado, limpiando y depurando la superficie elegida para el ensayo, seguido de eso colocar la placa base firmemente apoyada.
- A través del orificio de la placa se excava un hoyo cilíndrico, donde la profundidad debe abarcar toda la capa compactada, se debe considerar que el suelo extraído se recoge completamente para pesar posteriormente.
- Se pesa todo el material extraído, conociendo este dato como masa húmeda (M_h).
- Se toma una muestra representativa para determinar la humedad (w) en horno.
- Se coloca el frasco con arena sobre la placa, seguido de eso se abre la válvula y la arena fluye llenando tanto el cono como el hoyo excavado, seguido de eso se cierra la válvula cuando deja de fluir arena.
- Una vez cerrado el flujo, se pesa el frasco antes y después del vaciado, siendo así la siguiente expresión.

$$M_{arena} = M_{inicial} - M_{final}$$

- A partir de esto, se procede a calcular los siguientes parámetros:
- Cálculo de volumen del hoyo $V_{hoyo} = \frac{M_{arena}}{\gamma_{arena}}$
- Cálculo de la densidad húmeda del suelo $\gamma_h = \frac{M_h}{V_{hoyo}}$
- Cálculo de la densidad seca $\gamma_d = \frac{\gamma_h}{1+w}$
Donde: w = humedad del suelo (%)
- Finalmente se calcula el grado de compactación, y se compara con la densidad seca máxima del Proctor mediante la siguiente expresión:

$$\% \text{Compactación} = \frac{\gamma_d}{\gamma_{d,max}} \times 100$$

3.4.2.3 Infiltración y escurrimiento – Método del infiltrómetro de doble anillo

El método del infiltrómetro de doble anillo mide la tasa de infiltración básica vertical del agua en suelos in situ, el cual permite evaluar la permeabilidad superficial, escurrimiento, diseño de drenaje en pavimentos y terraplenes compactados [34]. Para llevar a cabo esta práctica se siguen los siguientes pasos:

- Se elige un punto representativo del terreno, en la cual se limpia la superficie de material suelto, vegetación y elementos orgánicos.
- Se coloca concéntricamente el anillo interior y el anillo exterior, seguido de eso se hinca ambos anillos verticalmente en el suelo (5 a 15 cm), evitando inclinaciones.
- Se procede a compacta suavemente alrededor de los anillos para evitar fugas laterales.
- Luego de la compactación se llena simultáneamente ambos anillos con agua hasta una altura determinada, donde el anillo exterior sirve como barrera para reducir el flujo lateral.
- Se activa el cronómetro inmediatamente después del llenado para medir el descenso del nivel de agua en el anillo interior en intervalos de tiempo regulares. Es importante mantener constante el nivel de agua durante el ensayo, reponiendo el volumen infiltrado y además registrando cuidadosamente los volúmenes añadidos y los tiempos. Se repite las mediciones hasta que la velocidad de infiltración se vuelva aproximadamente constante.
- Una vez se alcance el régimen estable se finaliza el ensayo, retirando los anillos con cuidado, para finalizar el ensayo calculado la infiltración con la relación entre volumen infiltrado, área del anillo interior y tiempo con la siguiente expresión,

$$f = \frac{V}{A \cdot t}$$

3.5 Definición de la muestra

3.5.1 Población

La población de estudio corresponde a un mallado de múltiples vías principales y secundarias tal como se muestra en la figura 3, que en conjunto abarcan una extensión aproximada de 14 km de pavimento articulado. Esta área se encuentra localizada en la cabecera cantonal de Alausí, en la provincia de Chimborazo.

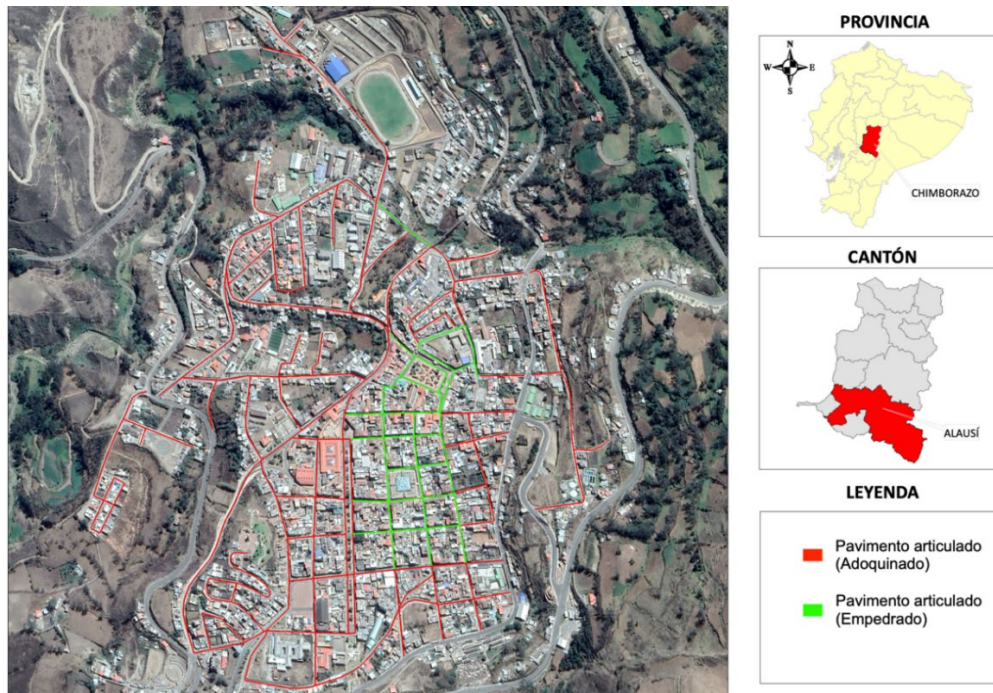


Figura 3. Mallado vial para muestreo

Fuente: Elaboración propia

3.5.2 Muestra

Durante el proceso de muestreo se identificaron 8 puntos, se seleccionó esta cantidad ya que se consideró un tráfico que varía entre liviano a medio generando comportamientos estructurales similares en los distintos tramos. Adicionalmente se tomó en cuenta la facilidad para la extracción de las muestras, la seguridad durante la ejecución de los ensayos in situ y evitar molestias en la circulación vehicular. Al querer tener un mayor número de puntos, dicha condición no sería factible en términos para esta investigación. En cada una de estas muestras fueron extraídas tanto de la superficie como de las capas internas del pavimento articulado, abarcando la capa de rodadura (adoquín), la cama de arena, la base granular y la subrasante. No

obstante, es importante recalcar que en algunos de estos puntos la capa de arena no estaba presente.

3.5.3 Criterios de selección

Los criterios de selección de las muestras se establecieron a partir de una inspección visual exhaustiva de los tramos viales ubicados en la cabecera cantonal de Alausí. En esta evaluación se consideró aspectos como el estado de pavimento articulado, las condiciones del entorno, la accesibilidad y la seguridad según el flujo vehicular. Con estos parámetros se identificaron los 8 puntos representativos, considerando 4 puntos en calles principales y 4 puntos en calles secundarias distribuidos estratégicamente en toda el área de estudio, asegurando que las muestras reflejen de manera fiable las características de la zona.

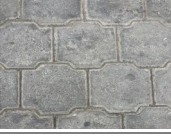
3.5.4 Tipo de muestra

Para el estudio utilizó se utilizó un muestreo probabilístico estratificado, el cual consiste en dividir la población en estratos homogéneos entre vías principales y secundarias, de toda esta población se seleccionó en forma de sorteo (aleatoriamente) 4 muestras de cada uno. Este método es adecuado cuando se prevé que las características de interés varíen entre los diferentes estratos, garantizando así una representación más precisa de la población.

3.5.5 Ubicación de la muestra

En la tabla 2 se muestra en el mapa la ubicación de los puntos estudiados como también la evidencia fotográfica del pavimento y cada una de sus coordenadas.

Tabla 2. Ubicación de los puntos de estudio

Puntos de estudio	Nº	Evidencia fotográfica	Coordenadas WGS 84 UTM ZONA 17- Sur	
			Norte	Este
	1		9756103.85	739638.65
	2		9756019.66	739215.38
	3		9757325.44	739240.14
	4		9756237.1	739280.3
	5		9756275.74	739327.64
	6		9756151.6	739336.12
	7		9756416.97	739404.19
	8		9756836.9	739674.02

Fuente: Elaboración Propia

CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Propiedades físicas del pavimento articulado

4.1.1 Granulometría

En las tablas 3, 4 y 5 se indica un resumen del ensayo de granulometría en la cama de arena, bases y subrasantes, con su respectiva clasificación SUCS correspondiente a cada muestra.

Tabla 3. Resumen del ensayo de granulometría en Cama de arena

Tamiz ASTM	Abertura del tamiz (mm)	Pasante M2 (%)	Pasante M3 (%)	Pasante M6 (%)	Material
1" 1/2"	38.100	100.00	100.00	100.00	Grava gruesa
1"	25.000	93.47	94.21	94.95	
3/4"	19.000	87.44	89.17	91.16	
1/2"	12.500	77.64	82.12	86.87	Grava fina
3/8"	9.500	71.61	76.57	81.82	
No. 4	4.750	60.05	64.48	69.19	Arena gruesa
No. 10	2.000	46.98	49.87	53.03	
No. 40	0.425	14.32	16.12	17.93	Arena fina
No. 100	0.150	2.51	3.02	3.54	
No. 200	0.075	1.01	1.26	1.52	Finos
Coefficiente de uniformidad (CU)		12.872	11.481	10.050	
Coefficiente de curvatura (CC)		1.131	1.209	1.287	
Simbología SUCS		SW	SW	SW	

Para las Bases granulares tanto en la Figura 5 como en la tabla 4, se observa que cinco muestras (M2 a M6) obtuvieron la clasificación SW, certificando una gradación continua, por ende, el cumplimiento de los requisitos de soporte para bases granulares del MOP. No obstante, las tres muestras restantes (M1, M7 y M8) se clasifican como Arena Pobremente Graduada (SP). Aunque su Coeficiente de Uniformidad (Cu) alto, el Coeficiente de Curvatura (Cc) es menor a 1 indica una gradación discontinua. Esta deficiencia impide el empaquetamiento óptimo, comprometiendo la resistencia estructural y evidenciando que, si bien la Base Granular cumple ciertos requisitos de calidad como una baja plasticidad, el material SP no satisface el criterio de gradación necesario para asegurar la capacidad portante exigida por la normativa MOP. Por consiguiente, las muestras de bases granulares (M2 a M8) se clasifican como Base Granular Clase 1, tipo B, siendo los límites tanto inferior como superior con los que mejor se ajustan las curvas granulométricas, mientras que la Base M1 pertenece a una clase 4 según la normativa

Tabla 4. Resumen del ensayo de granulometría en Bases granulares

Tamiz ASTM	Abertura del tamiz (mm)	Pasante M1 (%)	Pasante M2 (%)	Pasante M3 (%)	Pasante M4 (%)	Pasante M5 (%)	Pasante M6 (%)	Pasante M7 (%)	Pasante M8 (%)	Material
1" 1/2"	38.100	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	Grava gruesa
1"	25.000	97.64	90.69	93.94	96.24	94.91	93.74	95.20	93.15	
3/4"	19.000	97.64	83.65	89.14	91.48	89.14	88.73	91.67	86.80	
1/2"	12.500	93.57	75.35	82.83	85.21	83.04	82.07	84.91	79.70	Grava fina
3/8"	9.500	89.86	69.06	77.78	79.45	78.21	77.32	80.62	74.62	
No. 4	4.750	79.82	51.21	60.86	64.91	63.20	62.79	63.20	57.62	Arena gruesa
No. 10	2.000	60.74	33.85	42.68	44.61	43.52	43.56	46.95	43.41	
No. 40	0.425	29.67	13.73	20.97	22.06	18.34	17.78	24.99	22.10	Arena fina
No. 100	0.150	7.63	4.68	6.32	7.02	6.89	5.26	7.83	8.14	
No. 200	0.075	3.31	2.16	2.28	1.75	1.81	2.00	1.77	2.56	Finos
Coefficiente de uniformidad (CU)		9.636	21.122	18.387	17.760	17.150	14.940	20.353	23.222	
Coefficiente de curvatura (CC)		0.500	1.281	1.262	1.262	1.572	1.390	0.821	0.787	
Base tipo		Clase 4	Clase 1, tipo B	Clase 1, tipo B	Clase 1, tipo B	Clase 1, tipo B	Clase 1, tipo B	Clase 1, tipo B	Clase 1, tipo B	
Simbología SUCS		SP	SW	SW	SW	SW	SW	SP	SP	

Tabla 5. Resumen del ensayo de granulometría en Subrasantes

Tamiz ASTM	Abertura del tamiz (mm)	Pasante M1 (%)	Pasante M2 (%)	Pasante M3 (%)	Pasante M4 (%)	Pasante M5 (%)	Pasante M6 (%)	Pasante M7 (%)	Pasante M8 (%)	Material
1" 1/2"	38.100	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	Grava gruesa
1"	25.000	98.24	95.20	97.24	95.99	99.49	96.46	99.75	97.45	
3/4"	19.000	97.74	92.42	95.24	91.73	98.48	93.67	97.99	95.66	
1/2"	12.500	96.49	88.38	89.97	87.97	97.72	88.61	95.98	91.07	Grava fina
3/8"	9.500	92.97	84.85	86.47	82.21	94.43	85.07	94.22	87.76	
No. 4	4.750	78.66	76.01	78.20	72.68	86.08	73.17	85.43	78.58	Arena gruesa
No. 10	2.000	61.09	60.86	59.65	56.89	64.05	59.50	64.32	63.28	
No. 40	0.425	31.88	40.91	33.33	31.08	33.67	32.92	36.18	41.35	Arena fina
No. 100	0.150	10.79	15.91	15.04	11.78	13.67	13.43	15.08	16.61	
No. 200	0.075	4.77	4.04	5.26	5.01	3.80	4.57	4.02	4.37	Finos
Coeficiente de uniformidad (CU)		13.680	15.599	17.039	19.152	13.973	16.480	14.284	14.840	
Coeficiente de curvatura (CC)		0.600	0.463	0.607	0.489	0.627	0.581	0.585	0.492	
Simbología SUCS		SP	SP	SP-SM	SP-SM	SP	SP	SP	SP	

A continuación, se presentan las respectivas curvas granulométricas obtenidas a partir de tres muestras de cama arena, y ocho muestras de bases y subrasantes.

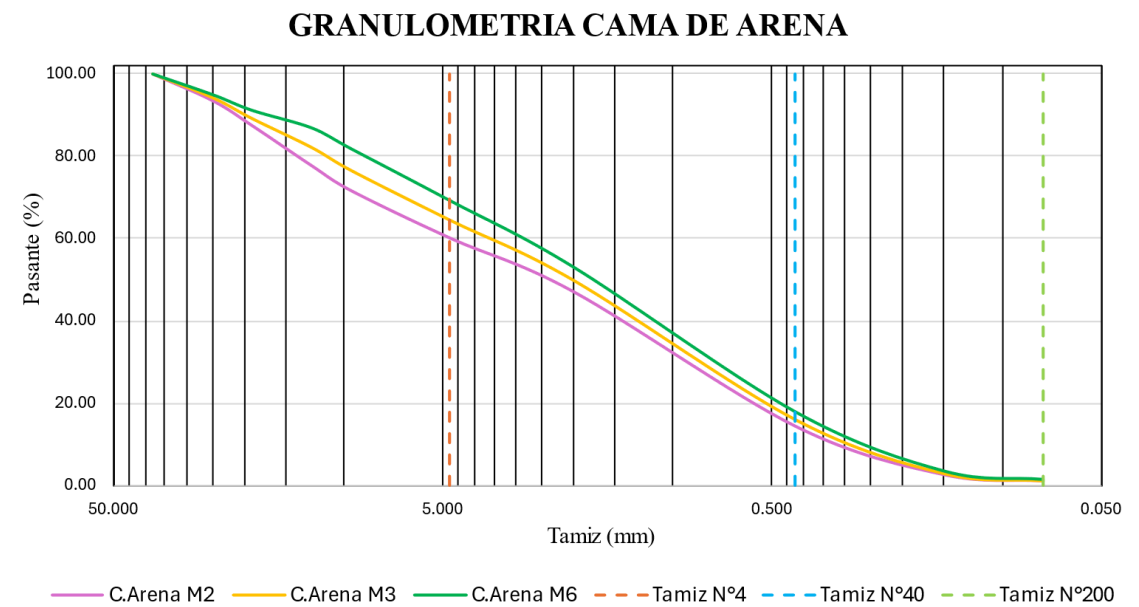


Figura 4. Curvas granulométricas de cama de arena

Fuente: Elaboración propia

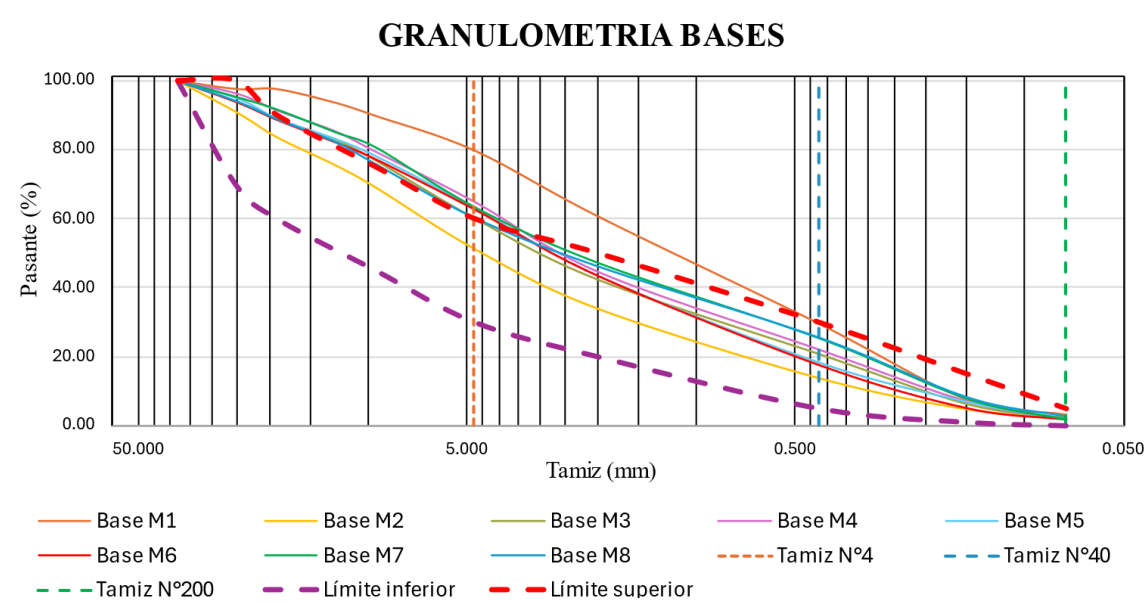


Figura 5. Curvas granulométricas de Bases granulométricas

Fuente: Elaboración propia

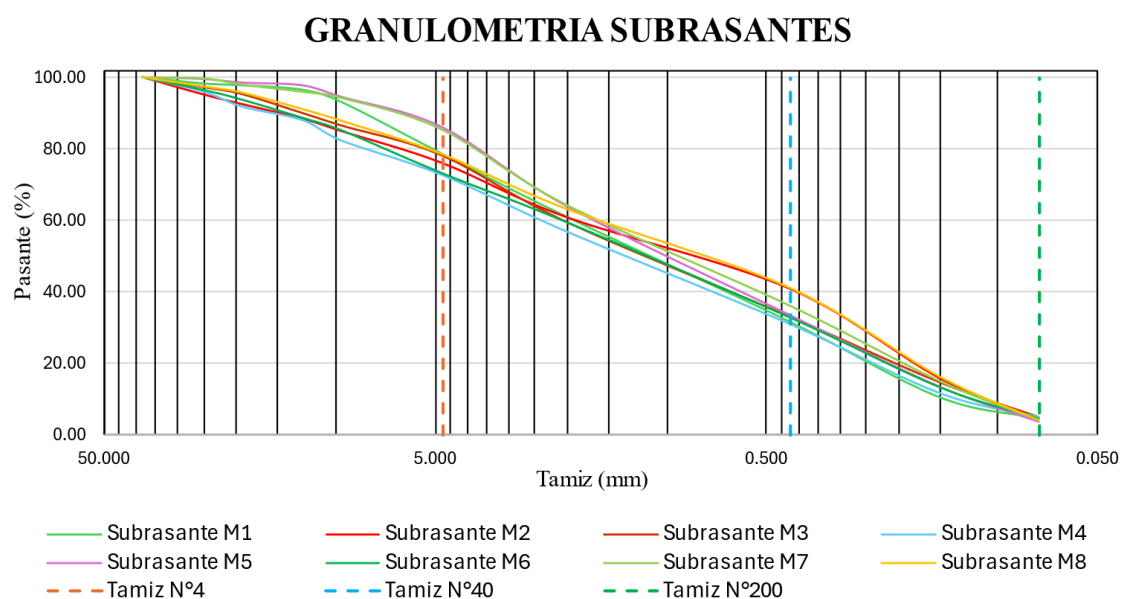


Figura 6. Curvas granulométricas de Subrasantes

Fuente: Elaboración propia

El análisis granulométrico de la Cama de arena en la Figura 4 confirma que el material predominante se concentra entre el tamiz N° 4 (4.75 mm) y el tamiz N° 200 (0.075 mm).

Esta característica, sumada a una baja presencia de finos según el Sistema Internacional Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS), valida la idoneidad del material para ser utilizado como asiento en pavimentos articulados, alineándose intrínsecamente con las especificaciones exigidas por la normativa MOP-001-F/2002, clasificándola como una Arena Bien Graduada (SW).

En la tabla 5 y figura 6, se muestra los datos granulométricos de Subrasante (M1, M3, M4) presentan una diferencia estructural crítica, independientemente de la calidad de sus finos. La totalidad de estos materiales se clasifica como Arena Pobrementemente Graduada (SP-SM) debido a que el Coeficiente de Curvatura (C_c) es menor a 1. En consecuencia, la única solución viable para habilitar el uso de los materiales SP en la estructura del pavimento y asegurar el cumplimiento de las especificaciones de resistencia del MOP es aplicar un procedimiento de corrección de granulometría. Este proceso permite modificar la curva actual, restaurando la continuidad de tamaños ($1 \leq C_c \leq 3$) para mejorar la organización de partículas y la capacidad portante requerida.

4.1.2 Límites de Atterberg

En las tablas 6 y 7 se muestra el resumen del ensayo de límites de Atterberg realizado en las capas de bases y subrasantes, en la que se expone el límite líquido, plástico y su índice de plasticidad correspondiente a cada una de las muestras.

Tabla 6. Resumen del ensayo de límites de Atterberg en bases granulares

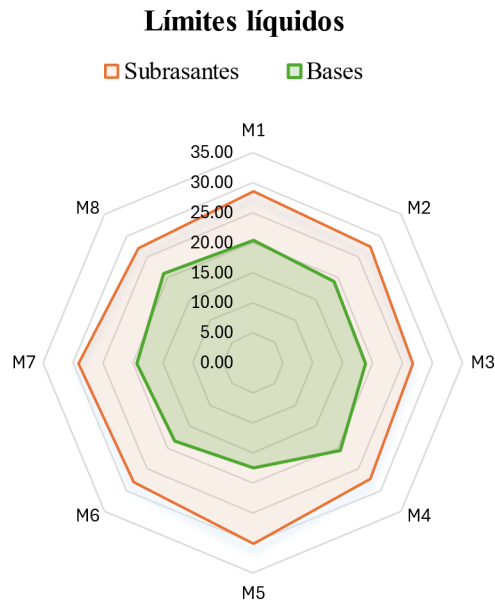
BASE DEL PAVIMENTO ARTICULADO								
Muestra	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8
Límite Líquido (%)	20.39	19.10	18.78	20.77	17.51	18.47	19.33	21.14

Nota: todas las muestras no presentan límite plástico, índice de plasticidad y la presencia de plasticidad es nula.

Tabla 7. Resumen del ensayo de límites de Atterberg en Subrasantes

SUBRASANTE DEL PAVIMENTO ARTICULADO								
Muestra	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8
Límite Líquido (%)	28.59	27.54	26.82	27.54	30.24	28.08	29.19	27.01
Límite plástico (%)	24.76	25.52	24.04	23.36	26.10	25.80	25.70	23.22
Índice de plasticidad (%)	3.83	2.02	2.76	4.19	4.14	2.28	3.49	3.79

Nota: todas las muestras presentan plasticidad.



Fuente: Elaboración propia

Figura 7. Límites líquidos bases - subrasantes

El análisis de los ensayos de Límites de Atterberg establecen la conformidad geotécnica de los materiales del pavimento con los estándares de calidad, específicamente frente a la normativa MOP-001-F/2002.

La base Granular del Pavimento Articulado exhibe una condición de No Plasticidad ($IP = 0\%$), según la tabla 6, lo cual excede los requisitos del Manual de Carreteras para las capas base. Esta nula plasticidad es crítica para garantizar la máxima estabilidad volumétrica de la capa de soporte y su resistencia a la acción del agua, crucial para mitigar la formación de roderas y el asentamiento diferencial bajo el tráfico, típicos problemas en pavimentos articulados.

En cuanto a la Subrasante, la tabla 7 confirma la existencia de plasticidad, con valores bajos de índice de Plasticidad (IP) menor a 5% . A pesar de contener finos, esta baja plasticidad es totalmente aceptable y cumple con los rangos permisibles por la normativa MOP para capas de fundación. La contención de la plasticidad minimiza el riesgo de cambios volumétricos perjudiciales en la cimentación del pavimento. La Figura 7 complementa esto, mostrando que los límites líquidos (LL) de la base ($LL < 22\%$) son inferiores a los de la subrasante, lo que valida la selección jerárquica de los materiales de mejor calidad y menor afinidad al agua para la capa estructural crítica.

En conclusión, los resultados confirman la plena conformidad técnica de ambos materiales con los criterios de plasticidad de la MOP, garantizando un desempeño estructural robusto y duradero para el pavimento articulado.

4.1.3 Compactación Proctor

En las tablas 8, 9 y 10 se muestra los resultados obtenidos del ensayo de compactación Proctor de la cama de arena, bases granulares y subrasantes, se presenta la humedad optima en porcentaje junto a la densidad máxima que alcanza en T/m3.

Tabla 8. Resumen del ensayo Proctor en Cama de arena

CAMA DE ARENA DEL PAVIMENTO ARTICULADO			
Muestra	M2	M3	M6
Humedad óptima (%)	9.63	9.87	10.51
Densidad óptima seca (T/m3)	1.99	1.97	2.05

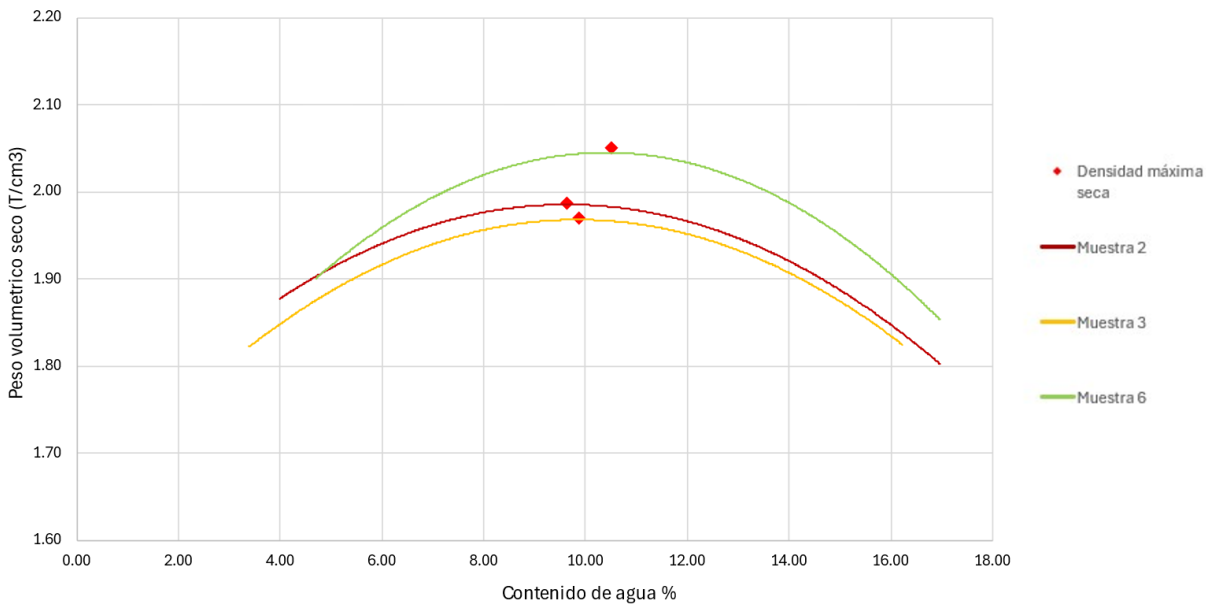


Figura 8. Curvas de compactación en cama de arena

Fuente: Elaboración propia

En la tabla 8 y Figura 8 se presentan los resultados del ensayo de compactación Proctor en la cama de arena, donde se observa que valores de humedad son bajos, oscilando entre 9.63% a 10.51%, pero con una densidad máxima seca alta oscilando entre 1.97 T/m3 y 2.05 T/m3, esto dado a la baja presencia de finos y la alta presencia de gravas y arenas en su granulometría haciéndolo óptima para funcionar como cama de arena en la colocación de

adoquines, la baja variabilidad de estos resultados indica que el material se compactara de manera similar en los diferentes puntos de la obra, facilitando el control de calidad y reduciendo las zonas blandas o sobre compactadas.

Tabla 9. Resumen del ensayo Proctor en Bases granulares

BASE DEL PAVIMENTO ARTICULADO								
Muestra	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8
Humedad optima (%)	16.09	13.82	15.35	15.88	15.16	14.29	14.49	16.76
Densidad Optima seca (T/m3)	1.65	1.83	1.76	1.62	1.63	1.78	1.84	1.92

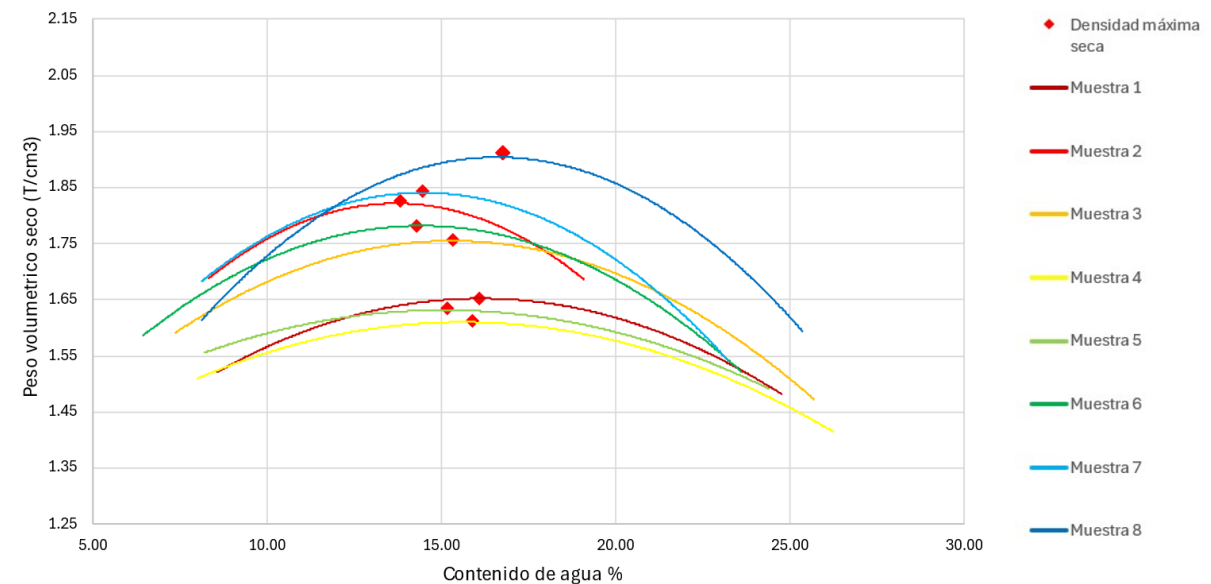


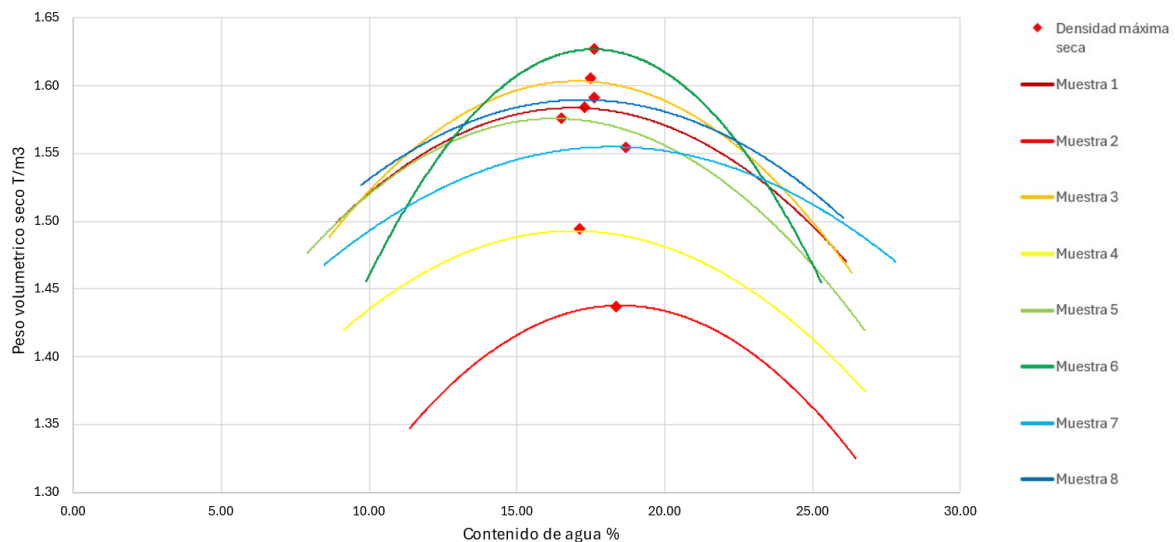
Figura 9. Curvas de compactación en Bases granulares

Fuente: Elaboración propia

Los resultados obtenidos para bases granulares están expuestos en la tabla 9 y la Figura 9 en donde se nota una variabilidad moderada en los resultados con humedades de 13.82% y 16.76% con densidades entre 1.62 T/m3 a 1.92 T/m3 esto refleja diferencias granulométricas pero se mantienen dentro de parámetros adecuados para bases granulares, tanto la cantidad de gruesos y de finos son parámetros los cuales están relacionados a la capacidad de retención de agua, por otro lado las densidades altas muestran una buena graduación del material y la presencia de partículas gruesas, excelente para obtener una buena compactación y capacidad portante.

Tabla 10. Resumen del ensayo de Proctor en Subrasantes

SUBRASANTE DEL PAVIMENTO ARTICULADO								
Muestra	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8
Humedad Optima (%)	17.27	18.33	17.47	17.13	16.50	17.60	18.67	17.59
Densidad Optima seca (T/m3)	1.59	1.43	1.62	1.50	1.58	1.63	1.56	1.60

**Figura 10.** Curvas de compactación en Subrasantes**Fuente:** Elaboración propia

En cuanto a las subrasantes los resultados se presentan en la tabla 10 y Figura 10 obteniendo humedades de 16.50 % y 18.67 % y densidades máximas secas 1.43 T/m³ y 1.63 T/m³, lo cual muestra una baja variabilidad en humedades y moderada en densidades secas, lo que indica que el suelo en su composición es relativamente uniforme en donde predomina la cantidad de finos, comportamiento típico de los suelos franco o franco arenosos, según un estudio realizado por el GADM de Alausí [1] realizado en todo su territorio, donde se expone que existe un 36.02 % de suelo tipo franco seguido de un 27.76 % de suelo franco arenoso siendo estos los predominantes en el cantón. Las curvas de compactación muestran dicho comportamiento y uniformidad por las humedades que van de 16.50 % a 18.67 %, las subrasantes muestran una buena consistencia, aunque la M2 tiene una densificación más baja esto puede deberse a una cantidad mayor de arcillas que limos en la fracción de finos.

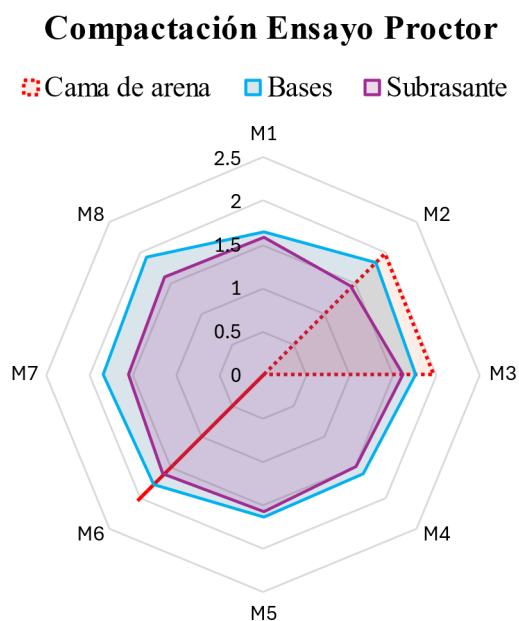


Figura 11. Compactación Proctor en diferentes capas

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 11 se observa las variaciones de compactación Proctor en las diferentes capas del pavimento articulado, estos resultados muestran que la densidad máxima seca varía entre los materiales; en las bases granulares alcanzan una densidad moderada, en las subrasantes se encuentran valores más bajos debido a la fracción de finos que posee y su plasticidad, por otro lado la cama de arena alcanza valores más altos debido a su granulometría de gruesos y baja cantidad de finos, en conjunto se observa la naturaleza de cada uno de los materiales estudiados y su respuesta hacia el proceso de compactación en lo cual su granulometría tiene influencia.

4.1.4 Densidades

El análisis de las densidades secas de campo obtenidas mediante el ensayo de Cono de Arena en comparación con la densidad Máxima Seca del ensayo Proctor, como se detalla en las Tablas 11, 12 y 13, revela un incumplimiento generalizado de los estándares de compactación del MOP en todos los estratos examinados.

Tabla 11. Resumen de densidades en Cama de arena

CAMA DE ARENA DEL PAVIMENTO ARTICULADO			
Densidades (gr/cm3)			
Muestra	M2	M3	M6
Cono de Arena	1.54	1.62	1.67
Ensayo Proctor	1.99	1.97	2.05

Densidades Cama de arena

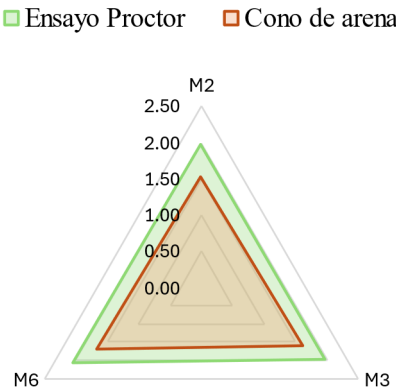


Figura 12. Densidades en Cama de arena

Fuente: Elaboración propia

La deficiencia de densidad en campo comparada con la densidad máxima seca de laboratorio en donde la más crítica corresponde a la Cama de Arena como se muestra en la tabla 11 y figura 12, donde se reportan valores significativamente inferiores entre 77.39% y 82.23%.

Tabla 12. Resumen de densidades en Bases granulares

BASE DEL PAVIMENTO ARTICULADO								
Densidades (gr/cm3)								
Muestra	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8
Cono de Arena	1.47	1.74	1.63	1.52	1.55	1.66	1.72	1.80
Ensayo Proctor	1.65	1.83	1.76	1.62	1.63	1.78	1.84	1.92

Densidades Bases

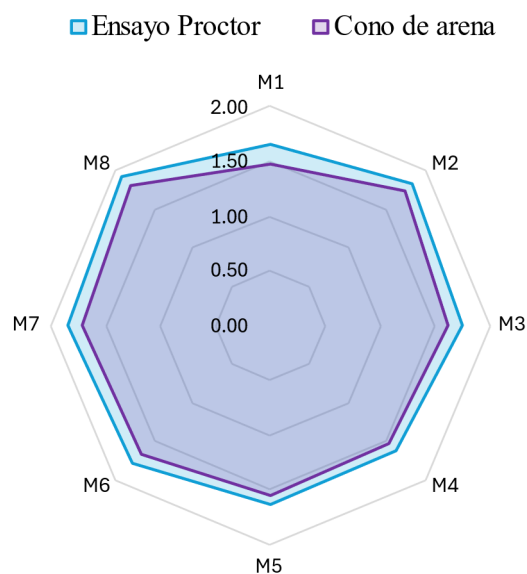


Figura 13. Densidades en Bases granulares

Fuente: Elaboración propia

En el material de Base granular se muestra en la Tabla 12 y figura 13, la mayoría de las muestras al comparar con los valores del Proctor están por debajo del valor mínimo del 95% de compactación, indicando que la densidad de campo fue menor que la densidad máxima que se encontró en laboratorio.

Tabla 13. Resumen de densidades en Subrasantes

SUBRASANTE DEL PAVIMENTO ARTICULADO								
Densidades (gr/cm3)								
Muestra	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8
Cono de arena	1.42	1.27	1.40	1.31	1.41	1.46	1.37	1.44
Ensayo Proctor	1.59	1.43	1.62	1.50	1.58	1.63	1.56	1.60

Densidades Subrasantes

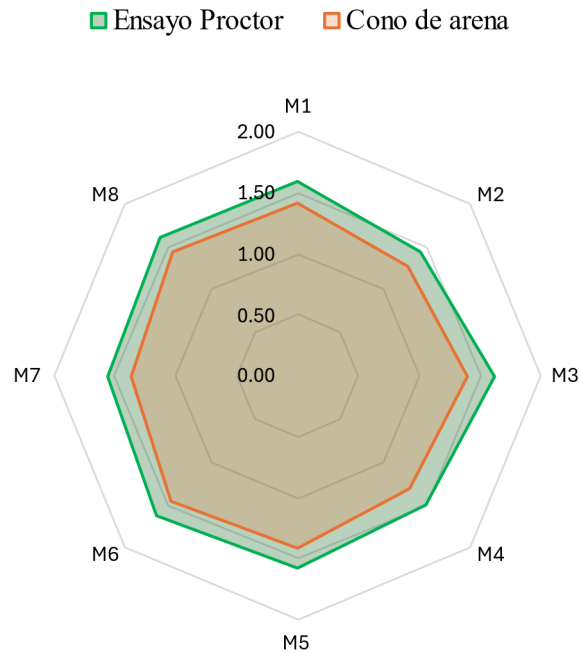


Figura 14. Densidades en Subrasantes

Fuente: Elaboración propia

Para la capa de Subrasante se muestran los datos obtenidos en la Tabla 13, donde el requisito de compactación es comúnmente del 90% al 95%, todas las muestras (M1 a M8) se situaron por debajo de este umbral, como se aprecia gráficamente en la Figura 14.

Técnicamente, la compactación insuficiente en estas tres capas estructurales resulta en una baja rigidez global del paquete estructural y una alta susceptibilidad a la deformación bajo carga de tráfico. En un pavimento adoquinado, una subrasante y base mal compactados, junto con una cama de arena suelta, resultan inevitablemente en asentamientos diferenciales ahuellamiento y pérdida del confinamiento lateral de los adoquines, lo cual compromete la funcionalidad y durabilidad del pavimento articulado a corto plazo, contraviniendo los requisitos de estabilidad del MOP [36].

4.1.5 Humedades

En las tablas 14, 15 y 16 se presenta la humedad óptima para alcanzar una densidad máxima para cada una de las muestras ensayadas y de igual forma la humedad in situ obtenida con el ensayo de cono de arena.

Tabla 14. Resumen de humedades en Cama de arena

CAMA DE ARENA DEL PAVIMENTO ARTICULADO			
Humedad (%)			
Muestra	M2	M3	M6
Cono de Arena	5.85	5.20	5.50
Ensayo Proctor	9.63	9.87	10.51

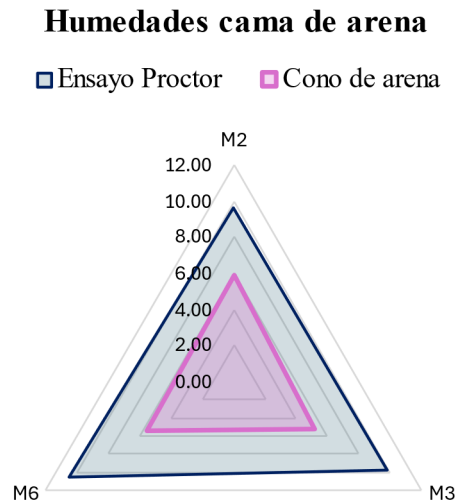


Figura 15. Humedades en Cama de arena

Fuente: Elaboración propia

Al observar los datos tanto de la tabla 14 como de la Figura 15 presenta humedades bajas al realizar el ensayo del cono de arena de 5.20 % a 5.85 %, en contraste a lo que el ensayo de compactación Proctor exige que estos valores estén entre 9.63 % y 10.51 %, esto caracterizado por la naturaleza de la arena al tener baja retención de humedad y a una alta permeabilidad debido a la baja presencia de finos, cabe mencionar que estos valores también reflejan el paso del tiempo en la estructura vial, los datos indican también que se necesita de una mayor cantidad de agua para lograr una densidad máxima seca en campo.

Tabla 15. Resumen de humedades en Bases granulares

BASE DEL PAVIMENTO ARTICULADO								
	Humedad (%)							
Muestra	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8
Cono de arena	12.95	10.45	11.78	12.48	12.33	11.08	12.01	11.70
Ensayo Proctor	16.09	13.82	15.35	15.88	15.16	14.29	14.49	16.76

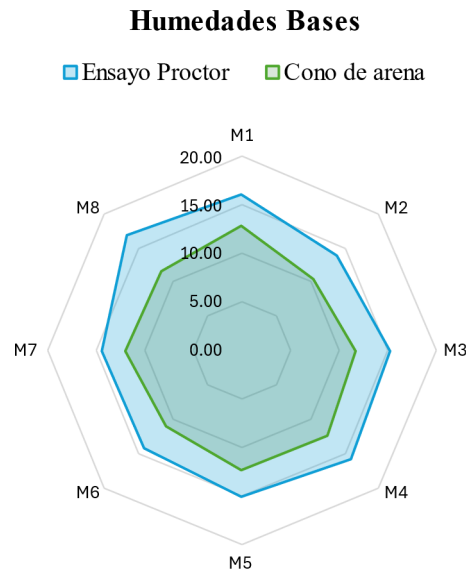


Figura 16. Humedades en Bases granulares

Fuente: Elaboración propia

Para los resultados de las bases granulares se observa mediante la tabla 15 y Figura 16 el comportamiento de las mismas, en comparación con la cama de arena están poseen una mayor cantidad de humedad que esta entre 10.45 % y 12.95 % óptimos para bases granulares con presencia de finos, pues la presencia de los mismos permite que la retención de agua en esta capa sea mayor, de igual forma se muestra la variabilidad moderada entre la humedad in situ frente a la humedad óptima encontrada en laboratorio bajo condiciones controladas.

Tabla 16. Resumen de humedades en Subrasantes

SUBRASANTE DEL PAVIMENTO ARTICULADO								
	Humedad (%)							
Muestra	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8
Cono de arena	15.50	14.85	15.25	16.15	15.38	15.41	15.11	15.31
Ensayo Proctor	17.27	18.33	17.47	17.13	16.50	17.60	18.67	17.59

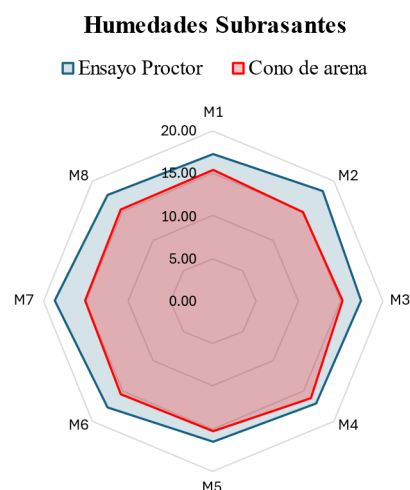


Figura 17. Humedades en Subrasantes

Fuente: Elaboración propia

En la tabla 16 y Figura 17 se observan las humedades encontradas en campo de las subrasantes, que oscilan entre 14.85 % y 16.15 %, las cuales superan a la base granular y cama de arena, esto se debe a dos factores: primero, debido a una gran cantidad de finos aumenta la retención de agua, segundo, al estar a mayor profundidad la pérdida de humedad es menor. Debido a esto la mayoría de las muestras presentan una baja variabilidad al compararlas con la humedad optima de compactación.

4.1.6 Densidad y absorción

Tabla 17. Resumen del ensayo de Densidad y absorción

DENSIDAD Y ABSORCION						
	Cama de arena		Base		Subrasante	
	Fino	Grueso	Fino	Grueso	Fino	Grueso
Densidad relativa (Gravedad específica)						
Densidad relativa (Gs) [SH]	2.52	2.81	2.14	2.28	2.06	2.16
Densidad relativa (Gs) [SSS]	2.64	2.88	2.28	2.34	2.28	2.27
Densidad relativa aparente (Gs aparente)	2.88	2.34	2.51	2.03	2.62	2.11
Densidad						
Densidad [SH] (kg/m3)	2509.25	3275.53	2130.61	2635.78	2056.17	2420.81
Densidad [SSS] (kg/m3)	2635.85	2871.78	2278.90	2337.79	2269.99	2268.69
Densidad aparente [SSS] (kg/m3)	2874.67	2331.79	2505.98	2028.87	2616.54	2101.74
Absorción						
Porcentaje de absorción (%)	5.04	2.39	6.94	2.80	10.43	5.32

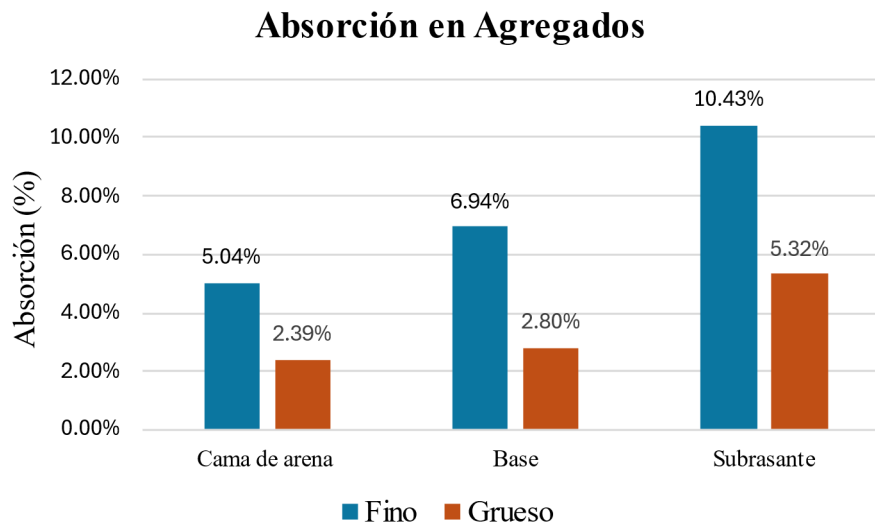


Figura 18. Absorción en agregados

Fuente: Elaboración propia

En base a la Tabla 17 y la Figura 18, el análisis de los agregados destinados a las capas granulares de un pavimento articulado (Adoquinado) revela una absorción de agua que excede significativamente los parámetros de calidad, superando los parámetros requeridos para una adecuada resistencia y durabilidad. El agregado fino de Subrasante muestra una absorción del 10.43%, mientras que el agregado fino de Base alcanza el 6.94%. En contraste, la normativa MOP [36], aunque está enfocada en mezclas asfálticas, establece un umbral de absorción efectiva de 2.5% cuyo exceso indica una alta porosidad y fragilidad estructural, siendo este un parámetro de alerta aplicable a la calidad general de los agregados. La absorción obtenida está muy por encima de este umbral.

Esta alta porosidad, confirmada también por las Densidades Relativas (SSS) más bajas en los agregados de Base y Subrasante (cercanas a 2.27), afectará directamente la estabilidad y la resistencia a la saturación de las capas granulares bajo el adoquín. La presencia de vacíos internos excesivos compromete la capacidad de soporte de la Subrasante y Base, volviéndose vulnerables a la degradación por ciclos de humedad, lo que puede provocar asentamientos diferenciales, bombeo de finos y, consecuentemente, la falla prematura del pavimento de adoquines. Para cumplir con los estándares técnicos y asegurar la integridad estructural del pavimento articulado conforme a los requerimientos del MOP [36], es indispensable mejorar la calidad de los agregados mediante su estabilización o reemplazo, o modificar

drásticamente el diseño de las capas para mitigar los efectos negativos de esta elevada absorción.

4.1.7 Grado de compactación

En la tabla 18 se indica el grado de compactación de cada una de las capas en contradas en los diferentes puntos de estudio, este dato lo encontramos mediante el ensayo realizado en laboratorio comparado con que es realizado in situ.

Tabla 18. Resumen del grado de compactación en las diferentes capas

Muestra	GRADO DE COMPACTACION (%)							
	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8
Cama de arena	-	77.21	82.05	-	-	81.61	-	-
Base granular	92.59	95.05	92.50	93.58	95.12	93.15	93.59	93.97
Subrasante	89.50	88.69	86.41	87.24	89.39	89.52	87.51	90.09

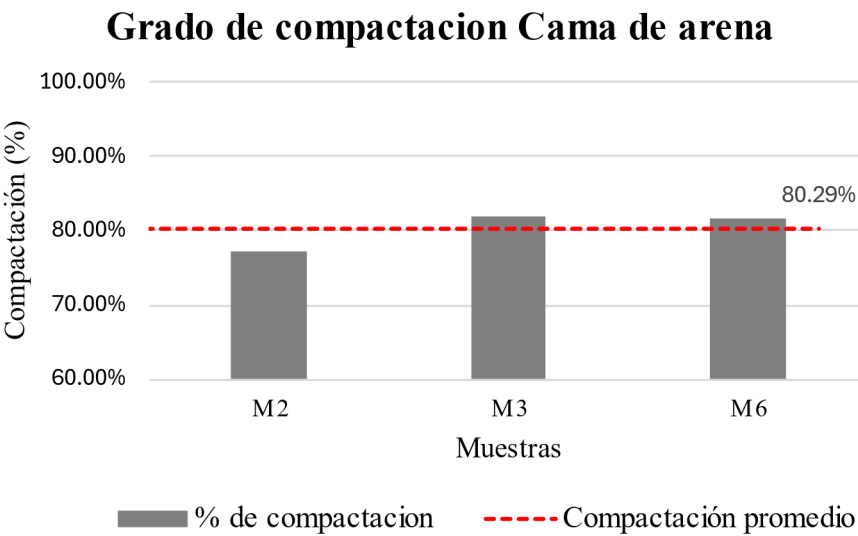


Figura 19. Grado de compactación en cama de arena

Fuente: Elaboración propia

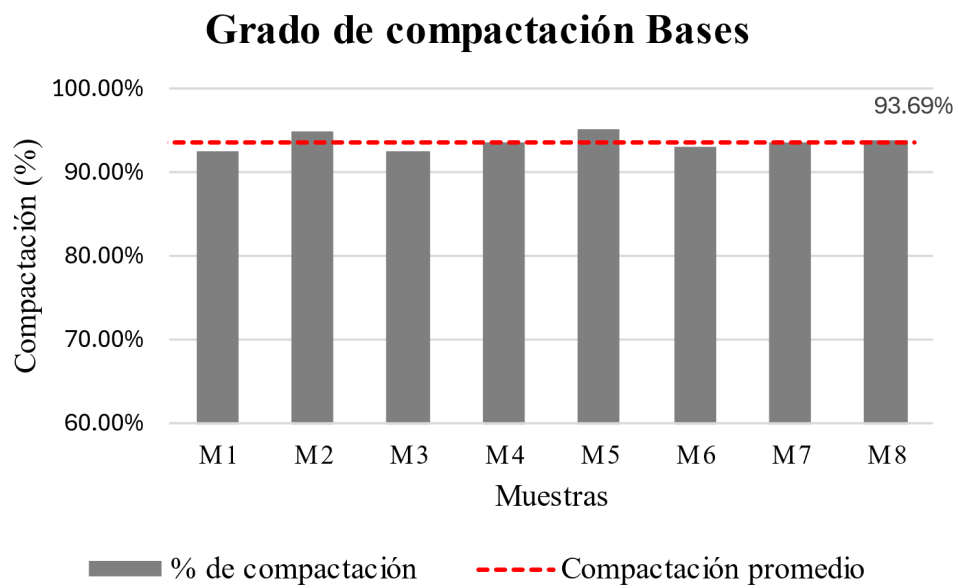


Figura 20. Grado de compactación en Bases granulares

Fuente: Elaboración propia

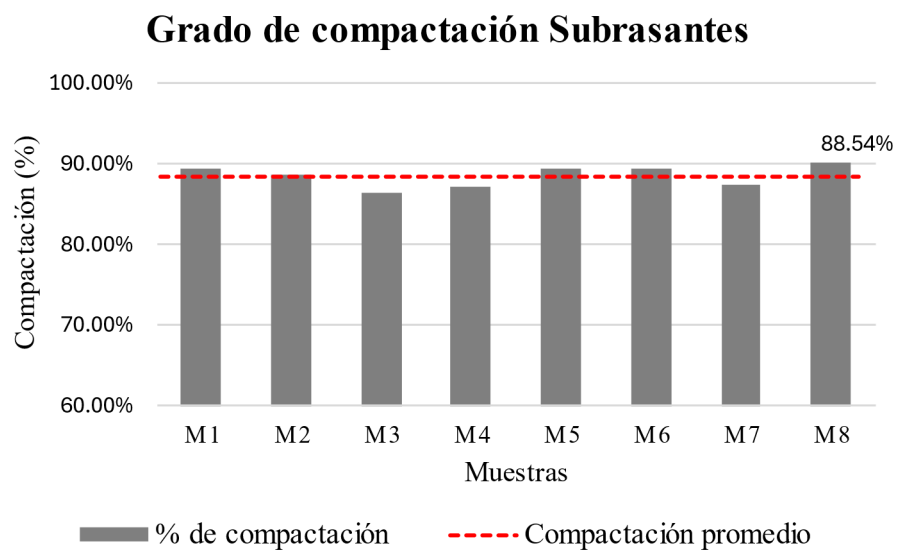


Figura 21. Grado de compactación en Subrasantes

Fuente: Elaboración propia

Grado de compactación

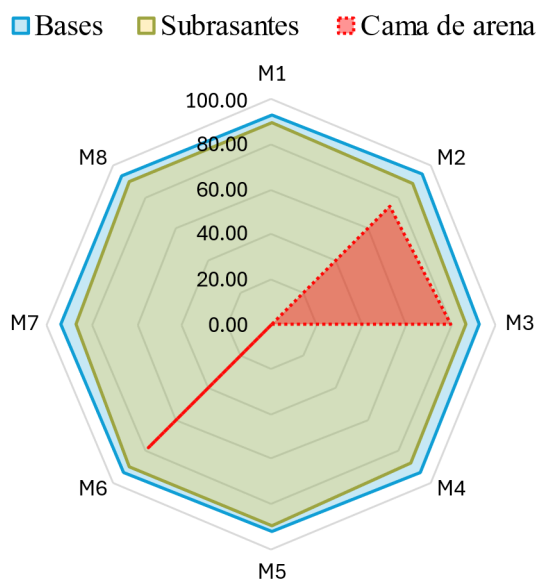


Figura 22. Grado de compactación en las diferentes capas

Fuente: Elaboración propia

En las figuras 19, 20 y 21 se observa el grado de compactación presente en cada una de las capas, dato que es obtenido con la relación de la densidad máxima encontrada mediante el ensayo de compactación Proctor y la densidad hallada en campo mediante el ensayo de cono de arena, dichos datos representamos en un diagrama de barras para las diferentes capas y además en la figura 22 se muestra una comparación general de estas, evidenciándose así que para las muestras en donde tenemos cama de arena existe un promedio de compactación del 80.29 %, en las bases granulares tenemos un 93.69 % de compactación y para subrasantes obtenemos un 88.54 %, según lo que dice la normativa MOP [36] el grado de compactación mínimo para las capas granulares ser del 95%, de lo cual 2 de las 8 muestras (M2 y M5) cumplen este requisito de calidad.

En lo que respecta a las subrasantes ninguna de las 8 muestras estudiadas cumple con el criterio de calidad que establece la MOP [36].

Los resultados obtenidos para la cabecera cantonal de Alausí, donde, los materiales de la estructura muestran una granulometría adecuada, baja plasticidad y una clasificación SUCS adecuada para la cama de arena y base granular cumpliendo así con los lineamientos de la normativa ecuatoriana, también se identificaron arenas pobremente graduadas (SP y SP-SM) en ciertas bases y subrasantes lo cual limita el acomodo entre partículas. Esta condición es

reportada por Tierra y Yupangui [37], quienes indican que los materiales cumplen parcialmente con la normativa en laboratorio, además, la mala graduación de los materiales afecta al comportamiento global del pavimento. Los estudios concuerdan en que únicamente el cumplimiento físico en laboratorio no garantiza un adecuado comportamiento en servicio.

4.2 Propiedades mecánicas del pavimento articulado

4.2.1 Módulo de Rigidez y Young

A continuación, se presentan los datos obtenidos en los 8 puntos de estudio con el equipo electrónico Geogauge tanto en bases y subrasantes, permitiendo evaluar las características mecánicas mediante el módulo de rigidez y el módulo de Young.

Tabla 19. Resumen del ensayo con el equipo Geogauge en bases

BASE DEL PAVIMENTO ARTICULADO									
Muestra	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	Prom.
Módulo de rigidez [MN/m]	6.76	12.96	6.97	6.77	8.44	7.28	10.57	11.00	8.84
Módulo de Young [MPa]	50.11	96.09	51.70	50.18	62.56	54.02	78.39	81.58	65.58

Tabla 20. Resumen del ensayo realizado con el equipo Geogauge en Subrasantes

SUBRASANTE DEL PAVIMENTO ARTICULADO									
Muestra	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	Prom.
Módulo de rigidez [MN/m]	6.30	6.22	5.39	4.98	5.07	6.19	5.87	6.44	5.81
Módulo de Young [MPa]	46.68	46.11	40.00	36.90	37.58	45.92	43.49	47.79	43.06

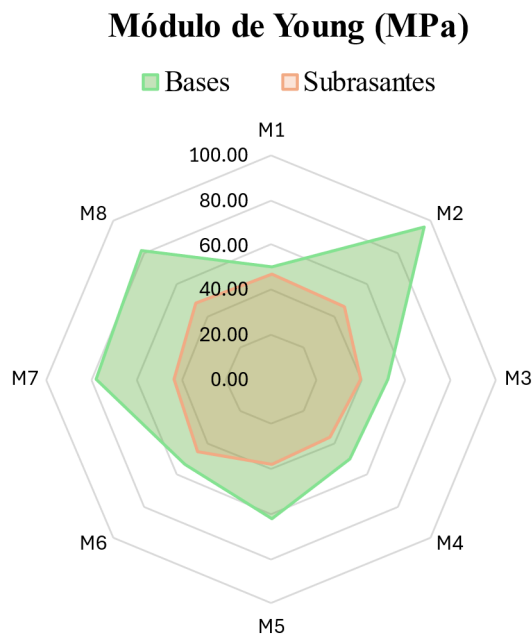


Figura 23. Módulo de Young en Bases granulares y Subrasantes

Fuente: Elaboración propia

En las tablas 19 y 20 se observa que el módulo de rigidez en las bases es mayor al de las subrasantes, llegando a ser hasta en un 50% en algunos casos. Esto indica que la base tiene un comportamiento más firme ante las deformaciones, lo que la hace ideal para soportar y distribuir las cargas vehiculares. Una tendencia similar se observa en el módulo de Young, donde los valores más altos de la base reflejan una mayor resistencia elástica en comparación con la subrasante tal como se muestra en la figura 23.

Al analizar los datos, se observa que la base presenta cierta variabilidad, con valores en las muestras M2, M5, M7 y M8 que superan el promedio; en contraste, la subrasante muestra un comportamiento más homogéneo. Sin embargo, los valores del módulo de Young en las bases granulares oscilan entre 50.11 MPa y 96.09 MPa. Estas cifras son inferiores a los 100 MPa sugeridos por Brown [38] y están lejos del rango de 160 a 320 MPa propuesto por Obrzud [39] para materiales con alta compactación. Por lo tanto, los resultados indican que el material estudiado no alcanza los estándares mínimos para ser considerado una base granular de excelente calidad.

4.2.2 Desgaste de agregados

En las tablas 21 se encuentra un resumen del ensayo de desgaste en la máquina de los ángeles realizado para bases granulares.

Tabla 21. Resumen del ensayo de abrasión en Bases granulares

BASE DEL PAVIMENTO ARTICULADO									
Muestra	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	Prom.
Porcentaje de abrasión (%)	31.46	32.48	31.71	31.46	30.43	31.71	31.97	32.10	31,66

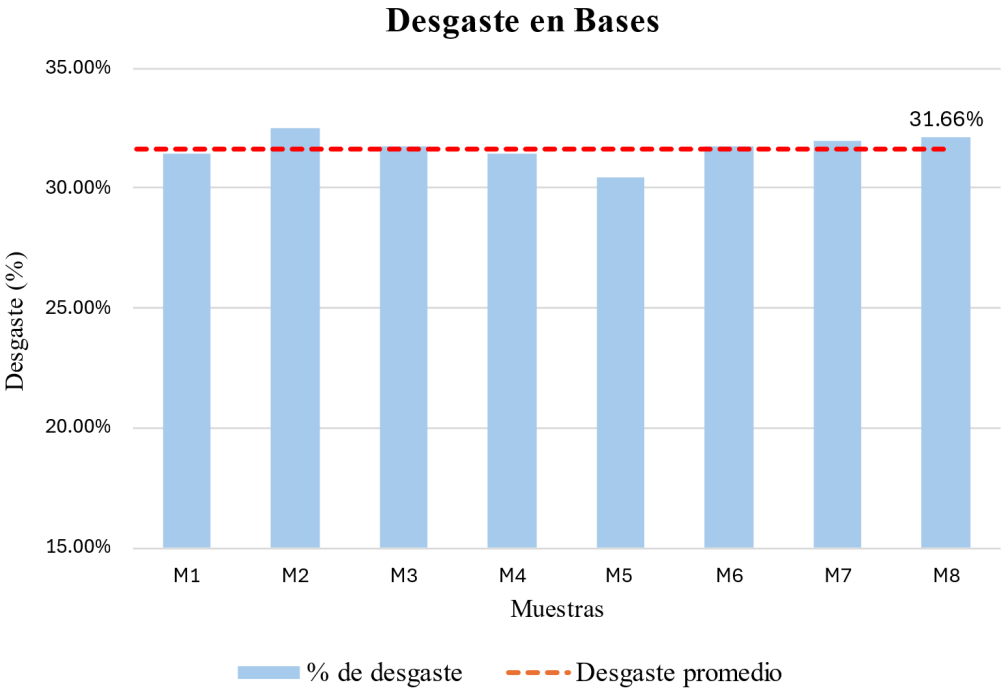


Figura 24. Desgaste en Bases granulares

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 24 se observa el porcentaje de desgaste de la capa granular base la cual tiene un promedio de 31.66 % con un máximo de 32.48 % y un mínimo de 30.43 %, según la normativa MOP-001-F 2002 una base granular clase 1 tipo B el porcentaje de desgaste debe ser menor al 40 %, que para esta condición las muestras ensayadas cumplen lo propuesto incluso la que obtuvo un porcentaje de desgaste alto ninguna queda excluida, este es un indicador de que el material es resistente y duradero bajo condiciones de tránsito y manejo

del material durante la construcción, demostrando que es un material competente para una estructura vial.

4.2.3 Absorción en adoquines

En la tabla 22 se muestra el ensayo de absorción de adoquines realizado en un lote de 10 adoquines con lo cual nos da una absorción promedio de 3.15 % con un mínimo 1.34 % y un máximo de 6.11 %.

Tabla 22. Resumen del ensayo de absorción en adoquines

Id.	Muestra	Longitud (cm)	Ancho (cm)	Masa saturada de agua (kg)	Masa seca (kg)	Absorción (%)
1	M1	24.00	20.50	6.600	6.220	6.11
2	M2	23.50	23.50	9.755	9.575	1.88
3	M2	23.50	23.50	9.495	9.345	1.61
4	M3	23.50	23.50	9.830	9.700	1.34
5	M4	23.50	23.50	9.535	9.365	1.82
6	M5	23.50	23.50	9.740	9.325	4.45
7	M6	23.00	23.00	9.015	8.725	3.32
8	M7	24.00	22.00	9.165	8.830	3.79
9	M8	24.00	22.00	8.720	8.430	3.44
10	M8	24.00	22.00	9.130	8.800	3.75

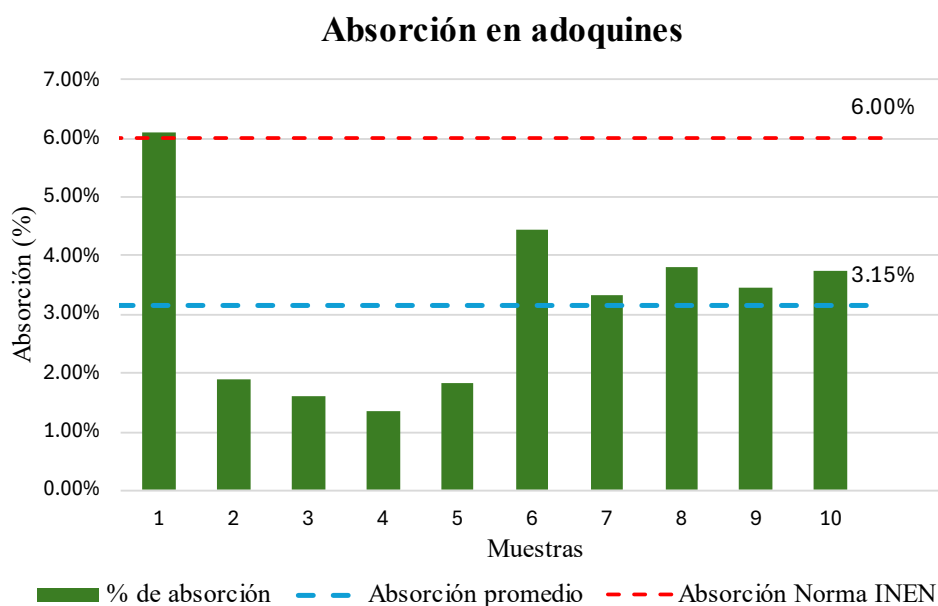


Figura 25. Absorción en adoquines

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 25 se observa cada uno de los valores de absorción de los adoquines ensayados, los resultados muestran un promedio de 3.15%, con un mínimo de 1.34% y máximo de 6.11%. Según la normativa INEN [41] los adoquines de hormigón deben cumplir con un índice de absorción menor o igual a 6%. De las muestras analizadas, nueve cumplen esta condición, únicamente la muestra M1 no cumple con la norma, al superar el límite por un 0.11 %, esto se podría ser atribuido a la presencia de micro fisuras, desgastes correspondientes a la antigüedad de este.

4.2.4 Resistencia en adoquines

En la tabla 23 se resume los datos obtenidos tras el ensayo de resistencia a la compresión realizado en un lote de 10 adoquines, se realiza en este lote ya que tanto para este ensayo y el de absorción así lo especifica la INEN 1484 [42].

Tabla 23. Resumen del ensayo de resistencia a la compresión en adoquines

Id.	Muestra	Área total (mm ²)	Espesor (cm)	Carga máxima (N)	Resistencia a la compresión (MPa)
1	M1	49200.00	7.2	1910224	38.8
2	M2	55225.00	8.9	2297323	41.6

3	M2	55225.00	8.0	2243936	40.6
4	M3	55225.00	8.2	2600342	47.1
5	M4	55225.00	8.5	2238591	40.5
6	M5	55225.00	8.3	2122487	38.4
7	M6	52900.00	8.6	2221679	42.0
8	M7	52800.00	8.5	2056653	39.0
9	M8	52800.00	8.1	2224462	42.1
10	M8	52800.00	8.5	2219609	42.0

Resistencia a la compresión en adoquines

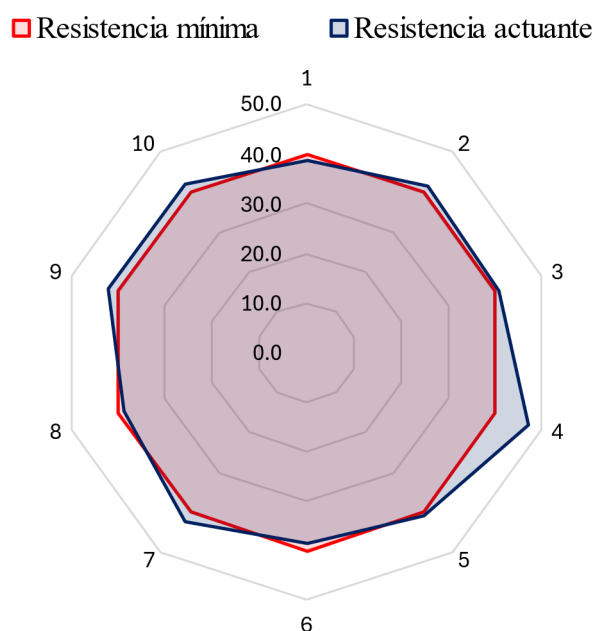


Figura 26. Resistencia a la compresión en adoquines

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 26 se observa la resistencia a la compresión que se obtuvo en cada uno de los adoquines, la resistencia característica de este lote es de 41.22 MPa, según la normativa INEN [13] los adoquines deben poseer una resistencia característica mínima de 40 MPa, dichos parámetros se tomó en cuenta de este normativa no vigente ya que en la normativa más actual INEN [42] el ensayo a compresión en adoquines ya no existe como un requisito, más bien esta prioriza otros requisitos previos a su elaboración como el cemento y los agregados a usarse.

En esta investigación se evidencia que los valores in situ de la densidad seca y de compactación son determinantes en la rigidez y capacidad portante del pavimento, en lo que respecta al módulo de Young la mayoría no cumple con valores recomendados por varios

autores de diferentes investigaciones, también, Tierra y Yupangui [37] reportan valores similares a los encontrados para esta investigación, dichos valores no satisfacen los rangos establecidos por otros investigadores y de igual forma poseen un grado bajo de compactación en campo, atribuyendo estas deficiencias a procesos constructivos inadecuados y exposición a condiciones climáticas adversas, en donde el pavimento posee una mayor vulnerabilidad a deformaciones y deterioro prematuro. Por otra parte, Jara y Peralta [40] no profundiza en los valores del módulo de Young, describe la importancia de evaluar las propiedades mecánicas para verificar si el pavimento responde adecuadamente ante solicitaciones reales de tránsito y clima. En conjunto estos tres trabajos refuerzan la idea de que el desempeño mecánico depende más de las condiciones reales que de las propiedades ideales encontradas en laboratorio.

4.3 Propiedades hidráulicas del pavimento articulado

Para el análisis de las propiedades hidráulicas se realizó el ensayo mediante el uso del infiltrómetro de doble anillo, dicho ensayo descrito en la normativa ASTM-3385, la metodología fue modificada por parte de la Universidad Nacional de Chimborazo con el propósito de obtener informaciones pertinentes para esta investigación, a continuación, se describen los parámetros en los cuales fue realizado el ensayo.

4.3.1 Permeabilidad

En la tabla 24 se detallan los resultados obtenidos del ensayo de infiltración realizado en cada uno de los 8 puntos de estudio bajo condiciones similares ya que no hubo variaciones climáticas significativas durante el día y la semana en la cual se realizó el ensayo.

Tabla 24. Resumen del ensayo de infiltración

VELOCIDAD DE INFILTRACIÓN VS TIEMPO								
Tiempo (Horas)	Velocidad de infiltración K (cm/h)							
	M 1	M 2	M 3	M 4	M 5	M 6	M 7	M 8
0	2.4	2.4	2.4	2.6	2	2.8	2.8	2.4
0.5	2.2	2.6	2	2	1.6	2.6	2.6	2
1	2	2.2	1.8	1.8	1.6	2.6	2.2	2
1.5	2.4	1.8	2	1.8	1	1.8	1.8	1.6
2	2	1.4	1.8	1.2	1.2	1.8	2	2
2.5	1.8	1.6	1.6	1.6	1	2	1.6	1.6
3	2.2	1.2	1.6	1.2	0.6	1.8	1.6	1.2
3.5	1.8	0.8	1.2	1.4	0.8	1.6	1	1.2

4	1.6	1	1	1.2	0.8	1	1.4	1
4.5	1.4	1.2	0.8	1.2	0.6	1.2	1	1
5	1.6	0.8	1	0.8	0.4	0.8	1.2	0.8
5.5	1.2	1	1	1	0.8	0.6	1.2	0.4
6	1	0.8	0.8	1	0.6	0.6	0.8	0.6
6.5	0.6	0.8	0.6	0.6	0.4	0.4	0.4	0.4
7	0.6	0.6	0.4	0.6	0.4	0.4	0.4	0.2
7.5	0.6	0.6	0.4	0.6	0.4	0.4	0.4	0.2
8		0.6	0.4	0.6		0.4		0.2
8.5				0.6				0.2
C (%)	75.10	79.02	79.61	78.63	86.08	77.56	78.00	81.37
Clima	Nublado	Nublado	Soleado	Soleado	Soleado	Nublado	Nublado	Soleado
Estado	Malo	Bueno	Regular	Regular	Regular	Bueno	Bueno	Regular

4.3.2 Infiltración

En la tabla 25 se relacionan los datos obtenidos del ensayo de permeabilidad como la escorrentía e infiltración con las características encontradas en el suelo, en donde se observa que tanto M1, M3 y M6 presentan una infiltración mayor a las demás muestras teniendo relación inversamente proporcional con la compactación en la base granular, por consecuencia las muestras restantes M2, M4, M5, M7 y M8 al tener un mayor grado de compactación su infiltración es menor.

Tabla 25. Características del pavimento articulado

CARACTERISTICAS DEL PAVIMENTO ARTICULADO									
Muestra		M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8
Característica	Infiltración (%)	24.90	20.98	23.39	21.37	13.92	22.44	22.00	18.63
	Escorrentía (%)	75.10	79.02	76.61	78.63	86.08	77.56	78.00	81.37
	Compactación (%)	92.59	95.04	92.50	93.58	95.12	93.15	93.59	93.97
	Observaciones	A	C	B	B	B	C	C	B

Observaciones

A: El adoquín presenta una textura rugosa y se observa micro fisuras, las condiciones meteorológicas del clima nublado, con un pavimento seco a la hora del ensayo.

B: El adoquín muestra un desgaste superficial normal ocasionado por el uso de este, donde se registra suciedad con acumulación de material fino en las juntas y en cuanto al clima fue soleado y ausencia de lluvia.

C: El adoquín presenta un buen estado sin evidencia de agrietamientos, fisuras ni desprendimientos de material, indicando una buena integridad del elemento y con un clima nublado y sin presencia de lluvia.

CURVAS DE INFILTRACIÓN

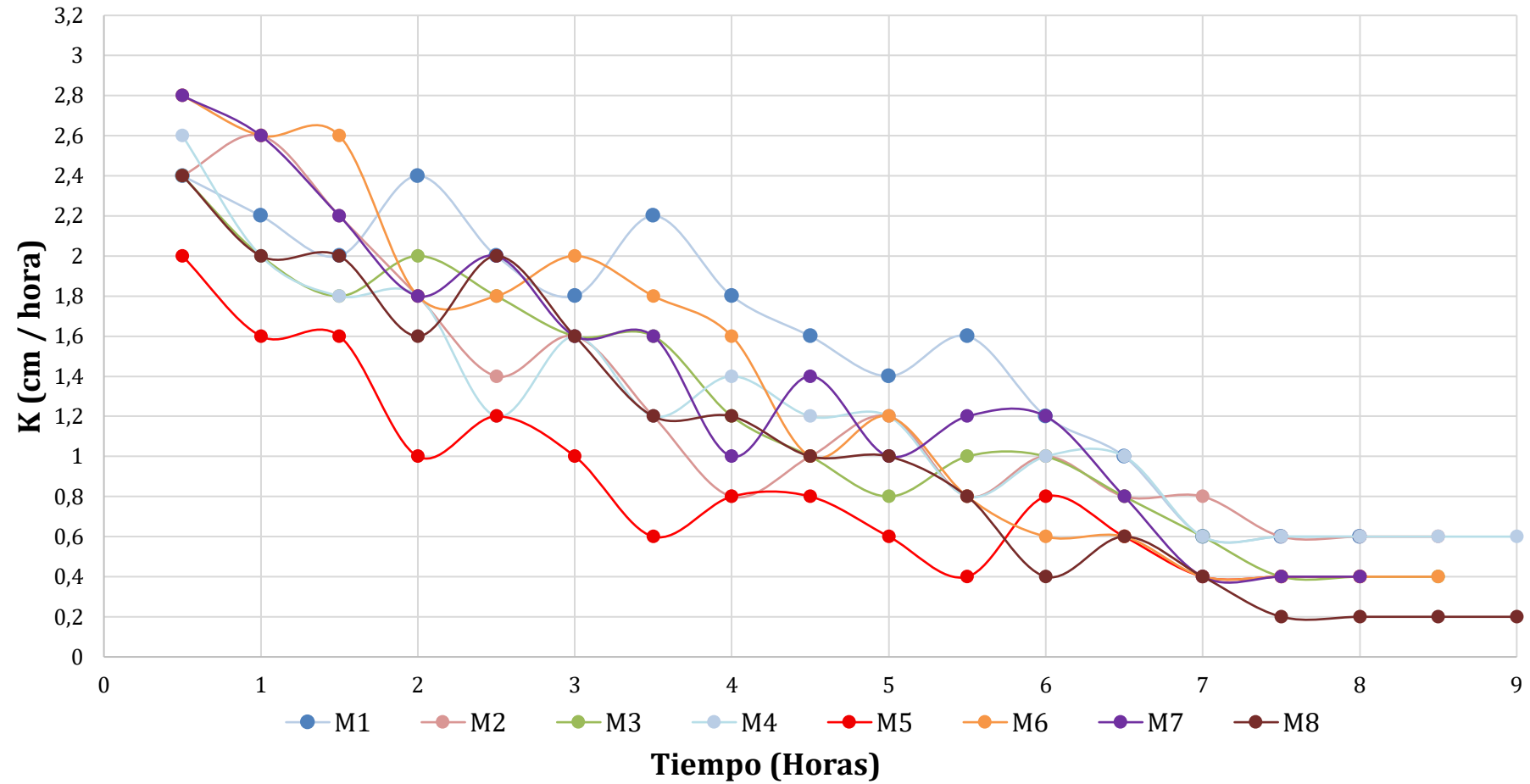


Figura 27. Curvas de infiltración

Fuente: Elaboración propia

4.3.3 Comportamiento de las curvas de infiltración

En la figura 27 se aprecia las curvas de infiltración para cada uno de los puntos de estudios de una forma experimental, en donde se observa la relación entre la tasa de infiltración en (cm/h) y el tiempo en (min/h), el comportamiento de dichas curvas es producto de diferentes factores o características presentes en el pavimento como las juntas, la capas encontradas en los diferentes puntos estudiados, características del material y factores propios del ambiente a la hora de realizar el ensayo. Para estos 8 puntos las condiciones del adoquín son variadas, para M1 se tiene un adoquín en mal estado debido a la antigüedad de la vía, para las muestras restantes el material varía entre un adoquín regular y bueno. En todos los casos las curvas presentan un comportamiento decreciente a medida que transcurre el tiempo, esto posiblemente debido a la saturación gradual del suelo en donde los granos y poros se empiezan a reacomodar ante una hidratación progresiva de las partículas, en consecuencia, el flujo de agua a través del perfil del suelo disminuye llegando a un comportamiento hidráulicamente estable a partir de 6.5 a 7 horas de realizar el ensayo.

A pesar de que todas las muestras siguen la misma tendencia, existen una variabilidad significativa evidenciando heterogeneidad entre puntos, en las muestras M4, M6 y M7 presentan una tasa de infiltración inicial alta debido a una predominancia de fracción de gruesos y baja influencia de finos, provocando una infiltración más rápida en las primeras horas del ensayo ya que existirá una mayor cantidad de vacíos que el agua debe llenar y a medida que pasan las horas el flujo de agua se empieza a estabilizar, indicando que las condiciones al inicio del ensayo favorecen a una infiltración mayor, la tasa de infiltración se empieza a estabilizar a medida que el suelo se empieza a saturar y las moléculas empiezan a acomodarse de mejor manera entre sí.

Las muestras M1, M2, M3 y M8 presentan curvas con una tasa de infiltración intermedia con disminución gradual y uniforme a través del tiempo, mostrando cierta homogeneidad en campo de dichos puntos, reflejado en curvas con pendientes suaves y sin cambios abruptos, donde estas muestras presentan una compactación similar en la subrasante haciendo que, transcurrido cierto tiempo del ensayo, y al penetrar las capas anteriores el flujo vertical tiende a una misma estabilización.

Por otro lado, la muestra M5 en comparación a todo el conjunto estudiado, presenta una tasa de infiltración más baja al iniciar el ensayo, su variación a través del tiempo es menor en comparación a las demás muestras, evidenciando una restricción dada por condiciones

iniciales en donde la base granular que es la primera capa que el flujo de agua debe penetrar la cual cuenta con un grado de compactación del 95.12% siendo la capa más compactada del conjunto de muestras, donde por dicha naturaleza la cantidad de poros presentes son muy pocos, haciendo que la infiltración de agua sea menor y llegando a una estabilización de flujo más rápida.

Al realizar un análisis de cada uno de los conjuntos de muestras en cada conjunto se observan variaciones en el comportamiento hidráulico en las etapas iniciales, dichas diferencias se puede asociar a variaciones granulométricas, presencia de finos y grado de compactación la interacción entre estos diferentes factores tienen influencia directa en la capacidad del suelo para permitir el paso del flujo de agua a través del perfil de un pavimento, sin embargo medida que el ensayo avanza las curvas convergen a valores similares indicando un comportamiento hidráulico común entre las muestras estudiadas, independientemente de las condiciones iniciales presentadas.

4.3.4 Análisis del coeficiente de escurrimiento

En la figura 28 se muestran los coeficientes de escurrimiento correspondiente a los diferentes puntos de estudio en donde se obtiene un valor mínimo de 75.10 % y un máximo de 86.08 % resultando en una respuesta hidráulica diferente del pavimento articulado dentro del conjunto de muestras estudiadas para cada una, la relación entre los resultados sugiere una influencia interna entre los demás ensayos realizados, aunque el comportamiento hidráulico se pudo ver mayormente afectado por ciertas condiciones en el material, no sería correcto atribuirle dicha influencia a un único factor.

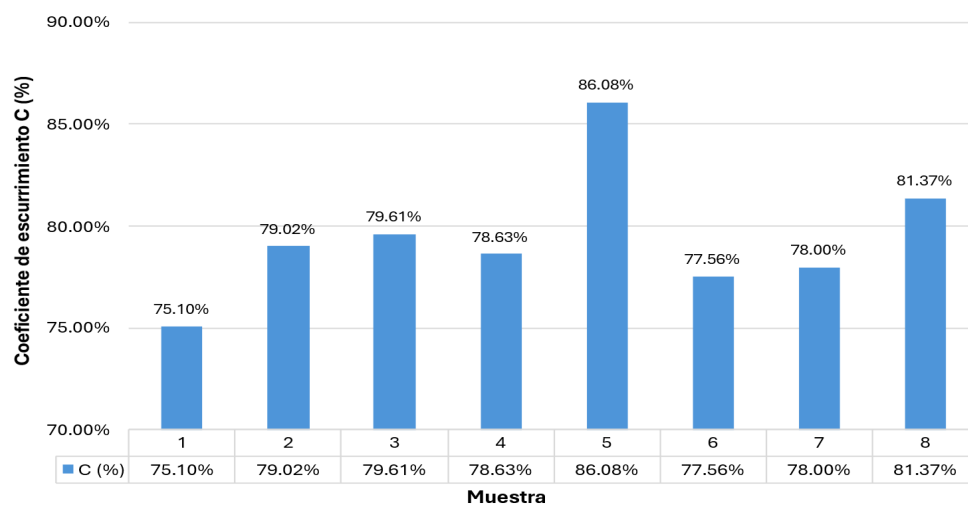


Figura 28. coeficiente de escurrimiento

Fuente: Elaboración propia

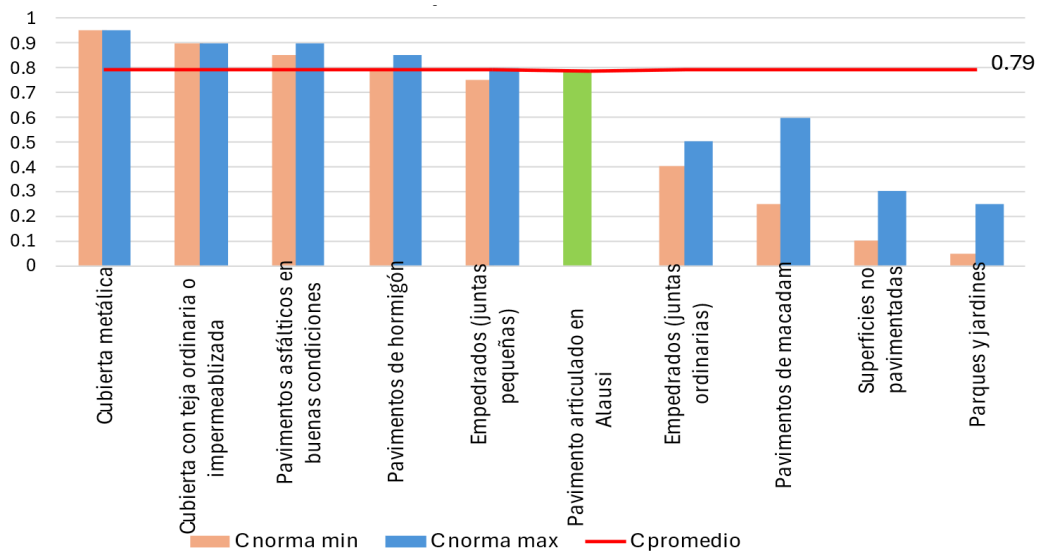


Figura 29. Comparación de coeficientes de escurrimiento

Fuente: Elaboración propia

En la figura 29 se muestra el comportamiento del pavimento articulado de Alausí el cual no se comporta como una superficie totalmente impermeable, pero tampoco llega a niveles de infiltración, tal como una superficie totalmente permeable según como lo clasifica la normativa CPE INEN [11], el valor promedio del pavimento estudiado es de 0.79 lo clasifica como un Empedrado de juntas pequeñas.

Dentro de todos estos resultados la variabilidad es evidente en los diferentes puntos estudiados tal como se muestra en la figura 28, el coeficiente C de la muestra uno posee uno de los valores más bajos en comparación al resto de puntos en donde el grado de compactación de la base granular son uno de los más bajos encontrados, dicha característica junto a la mala graduación del material hacen que la cantidad de vacíos presentes en la estructura vial sea numerosa permitiendo así una mayor infiltración de agua, como también se debe tomar en cuenta la antigüedad de la vía, lo cual hace que el adoquín se vuelva más poroso debido al desgaste y así afectando a dicha característica. Por otra parte, el coeficiente C del punto cinco es uno de los mayores, dando a entender que la infiltración en este punto es de los más bajos en comparación al resto, y de igual manera como el punto uno el cual está afectado por el grado de compactación, la granulometría y graduación de este, evidenciando así que la interacción entre estas variables es mayor a comparación a las demás afectando de forma directa al coeficiente de escurrimiento.

En cuanto al comportamiento hidráulico en general, en la presente investigación se determinaron coeficientes de escurrientías que oscilan entre 0.75 y 0.86, valores que se acercan a los estándares establecidos, aunque reflejan una infiltración limitada y muy influenciada por la compactación de los materiales y el estado de las juntas de los adoquines. Los autores concluyen que el pavimento articulado en la cabecera cantonal de Alausí tiene una tendencia a funcionar más como una superficie con características semi impermeables que como un sistema de infiltración total. Este comportamiento coincide con las observaciones de Tierra y Yupangui [37] quienes señalan que los lugares con menor grado de compactación muestran mayores tasas de infiltración, particularmente durante el invierno, lo que eleva el riesgo de sobresaturación. A su vez, Jara y Peralta [40] destacan que la evaluación hidráulica del pavimento articulado es clave para optimizar mejorar el diseño del sistema de drenaje urbano, señalando que el comportamiento hidráulico depende directamente con la estructura interna del pavimento y las condiciones utilizadas en su construcción. En conjunto, los estudios desafían la idea de que el pavimento articulado sea intrínsecamente permeable.

4.4 Relaciones entre las propiedades físico-mecánicas y propiedades hidráulicas del pavimento articulado

4.4.1 Relación ensayo Proctor en Subrasantes vs escurrimiento

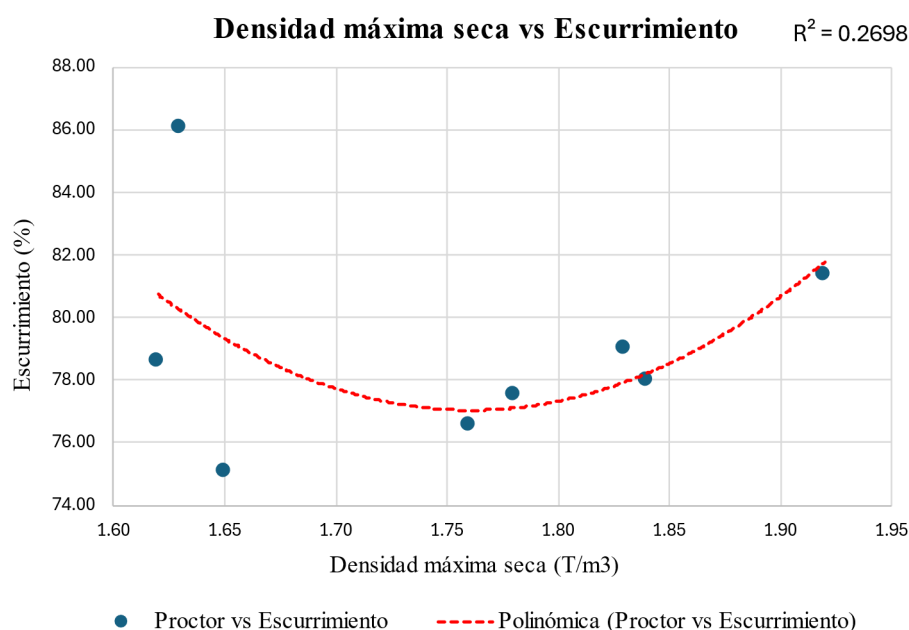


Figura 30. Correlación Proctor en Subrasantes vs escurrimiento

Fuente: Elaboración propia

En la figura 30 se observa la relación entre la densidad máxima del ensayo de compactación Proctor y el coeficiente de escurrimiento en donde la correlación posee un coeficiente de determinación de $R^2 = 0.2998$, en donde indica que no existe una tendencia no lineal y se observa valores de escurrimiento relativamente altos en densidades tanto en bajas como en altas, mientras que para densidades intermedias se observa coeficientes de escurrimiento ligeramente más bajos, formando así una curva convexa, indicando que el coeficiente de escurrimiento no varía de una forma monótona con el incremento de la densidad máxima seca obtenida en laboratorio.

La tendencia de la curva polinómica se puede interpretar como una compleja interacción entre las densidades máximas secas de la subrasantes alcanzadas en laboratorio frente al comportamiento hidráulico presentado, en donde las densidades menores con un alto escurrimiento se asocia a una menor capacidad del sistema y materiales para infiltrar agua de manera continua, mientras que rangos de densidades más altas se podría relacionar con un reducción de la cantidad de vacíos presentes lo que limita el flujo vertical de agua, por consecuencia la correlación observada indica que la densidad máxima seca obtenida del Proctor no es un parámetro suficiente por sí solo para explicar de forma precisa el comportamiento del escurrimiento superficial sobre el pavimento articulado.

4.4.2 Relación Grado de compactación en la Base granular vs escurrimiento

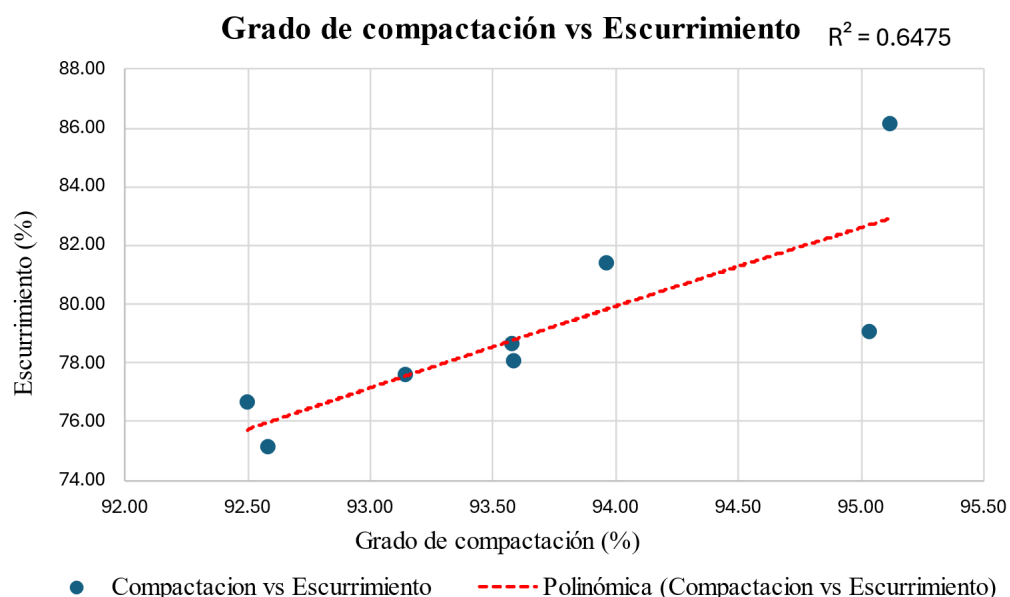


Figura 31. Correlación compactación en Base granular vs escurrimiento

Fuente: Elaboración propia

En la figura 31 se observa la relación entre el grado de compactación determinado mediante el ensayo de cono de arena en la base granular y el coeficiente de escurrimiento, que muestra una correlación de $R^2 = 0.6475$. La tendencia observada es creciente, indicando que a mayor grado de compactación de la base granular, mayor es el coeficiente de escurrimiento superficial. Esto se explica porque una compactación más elevada reduce la cantidad y conectividad de los vacíos, limitando la infiltración del agua y favoreciendo su desplazamiento superficial. A pesar de que existe cierta dispersión de los datos la tendencia es clara, lo que sugiere que el grado de compactación en campo es un factor relevante en el comportamiento hidráulico del pavimento, no obstante, el valor de R^2 es menor a la unidad indicando que el grado de compactación no es el único factor que controla el escurrimiento. Las dispersiones que se observa en algunos puntos sugieren la influencia de otras variables, como las condiciones superficiales del pavimento, la continuidad de las juntas y la variedad propia de los materiales.

4.4.3 Absorción en adoquines vs escurrimiento

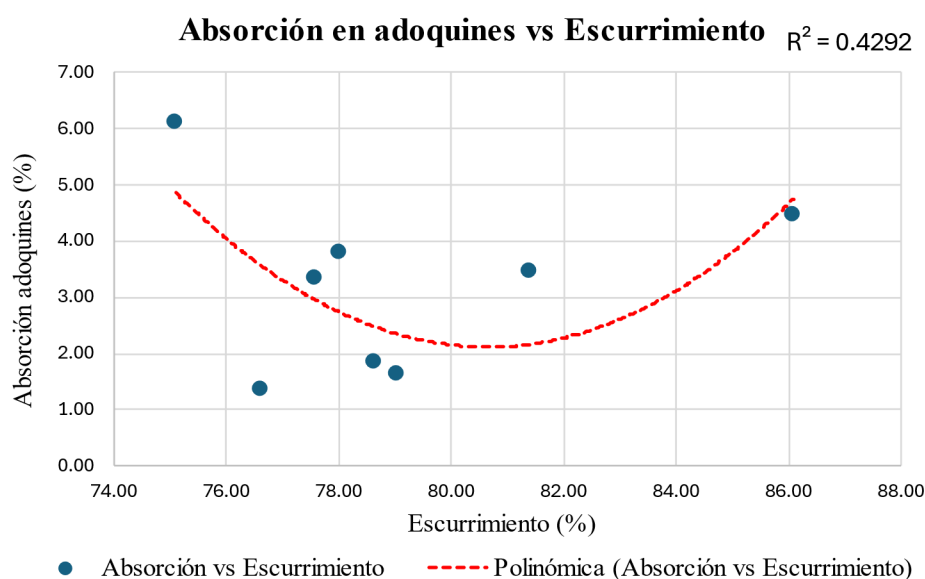


Figura 32. Correlación absorción en adoquines vs escurrimiento

Fuente: Elaboración propia

En la figura 32 se analiza la relación entre la absorción del adoquín y su escurrimiento superficial, donde la gráfica describe una tendencia polinómica en forma de “U”, sugiriendo que el desempeño óptimo (menor absorción) se concentra en un rango medio de escurrimiento, aproximadamente entre el 79% y 81%, mientras que por el contrario, en los

extremos de la gráfica, la capacidad de absorción tiende a incrementarse, lo que podría estar vinculado a una saturación del material en escurrimientos bajos o a una porosidad excesiva en escurrimientos altos. Por otro lado, de acuerdo con la dispersión de los datos y al coeficiente de determinación $R^2 = 0.4292$, demuestran que el pavimento articulado funciona como un sistema complejo, donde la porosidad interna (abrasión) y el drenaje externo (escurrimiento) interactúan, pero son modulados por variables externas de instalación y compactación que impiden una correlación perfecta. Por eso, la absorción ayuda, pero no controla por sí sola el escurrimiento del pavimento articulado.

4.4.4 Relación granulometría en Bases granulares vs escurrimiento

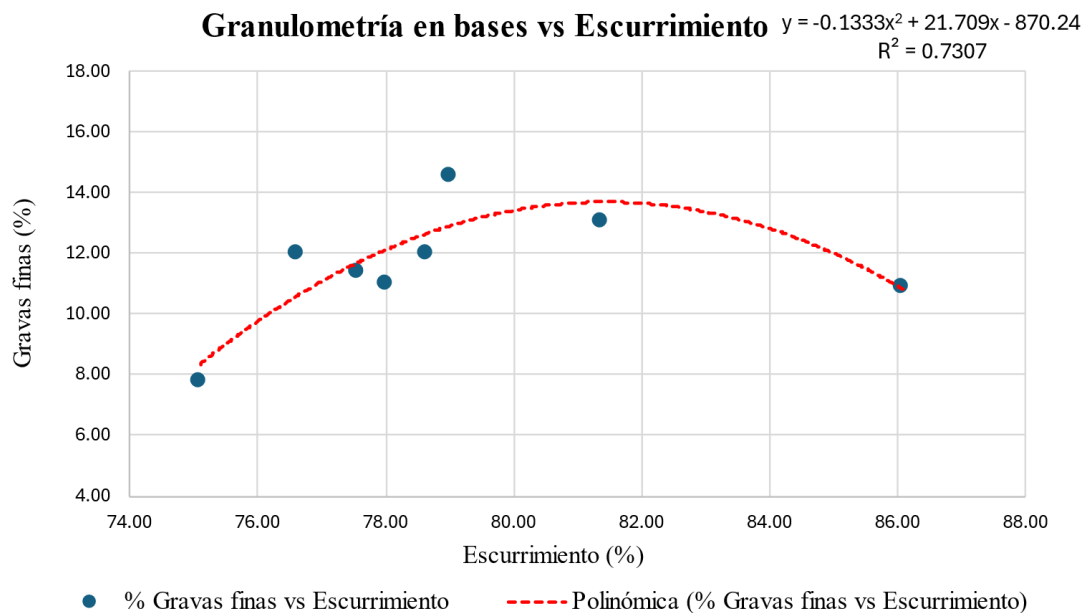


Figura 33. Correlación granulometría en Bases granulares vs escurrimiento

Fuente: Elaboración propia

En la figura 33, se observa una correlación alta entre la cantidad de gravas finas y el escurrimiento superficial. La gráfica muestra que cuando la base tiene un valor intermedio de gravas finas cercano a 14%, el escurrimiento es mayor; en cambio, si hay menos o más gravas finas que ese valor, el escurrimiento tiende a bajar. Según se detalla en la figura 33 existe un $R^2 = 0.7307$, eso quiere decir, que la cantidad de gravas finas influye de manera importante en cómo se mueve el agua, ya que las gravas finas llenan de forma óptima los vacíos entre las piedras más grandes, sellando la superficie y dificultando que el agua se filtre. Por lo tanto, en la práctica, no es bueno que el agua escurra demasiado, porque puede

hacer que la base pierda estabilidad y el pavimento se vuelva más vulnerable; por eso es importante controlar la cantidad de finos en la base.

4.4.5 Relación granulometría en Subrasantes vs escurrimiento

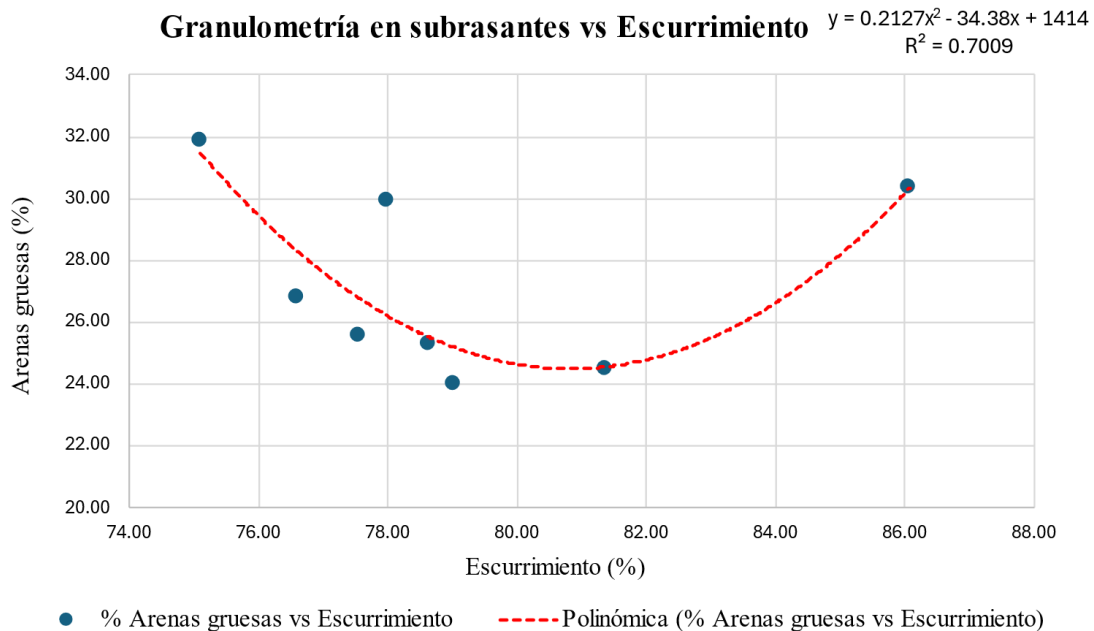


Figura 34. Correlación granulometría en Subrasantes vs escurrimiento

Fuente: Elaboración propia

En la figura 34 se establece la relación entre la composición granulométrica de la subrasante (arenas gruesas) y el escurrimiento superficial. Esta curva cóncava demostró que existe una composición ideal, cuando el escurrimiento se sitúa en torno al 81%, el porcentaje de arenas gruesas en la subrasante alcanza su nivel mínimo de aproximadamente de 24.5% que estabiliza el flujo del agua. Si nos alejamos de este valor, ya sea por exceso o por falta de material grueso, rompemos ese equilibrio, provocando que el escurrimiento sea excesivo. Por otro lado, el coeficiente de determinación $R^2 = 0.7009$, la cual nos confirma que, si queremos un pavimento duradero, la clave no es poner más arena, sino poner la cantidad justa para mantener esa estabilidad hídrica.

4.4.6 Relación desgaste en Bases granulares vs escurrimiento

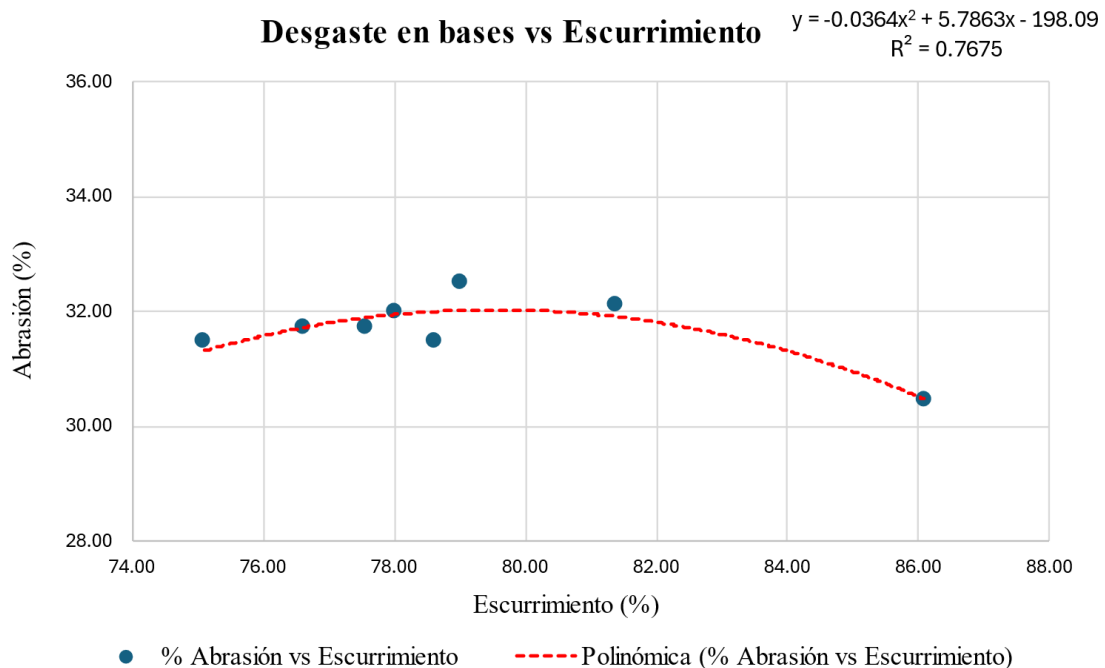


Figura 35. Correlación abrasión en Bases granulares vs escurrimiento

Fuente: Elaboración propia

La figura 35 se presenta la relación entre el porcentaje de abrasión de los agregados de la capa base y el porcentaje de escurrimiento en el pavimento, correspondiendo a un modelo polinómico de segundo grado, donde, el coeficiente de determinación $R^2=0.7675$. El comportamiento entre estas variables se diferencia en tres tramos, el primero entre 75% a 78% de escurrimiento aproximadamente, el desgaste aumenta ligeramente, la infiltración en este punto es mayor, posiblemente dado por la predominancia de finos débiles o mal distribuidos generando así una mayor vulnerabilidad al desgaste del material. En el segundo tramo de 78% a 82%, la infiltración disminuye y el porcentaje de abrasión llega al punto más alto de 32.40%, la humedad en esta zona hace que pierda estabilidad entre partículas, y así incrementan los finos debido al desgaste, estos no son suficientes para sellar los vacíos, pero tampoco permiten un drenaje libre. Por otro lado, en el último tramo de 82% a 86%, en dicho rango se encuentra la menor cantidad de infiltración de agua, donde el material tiene una mejor estabilidad esto dado por un mejor acomodo entre partículas y la presencia de finos con mayor plasticidad, al tener una menor lubricación por el ingreso de agua la fricción entre partículas aumenta y de esta forma disminuyendo el desgaste del material, traduciéndose en un mejor comportamiento mecánico e hidráulico en este punto.

4.4.7 Relación módulo de Young en Bases granulares vs escurrimiento

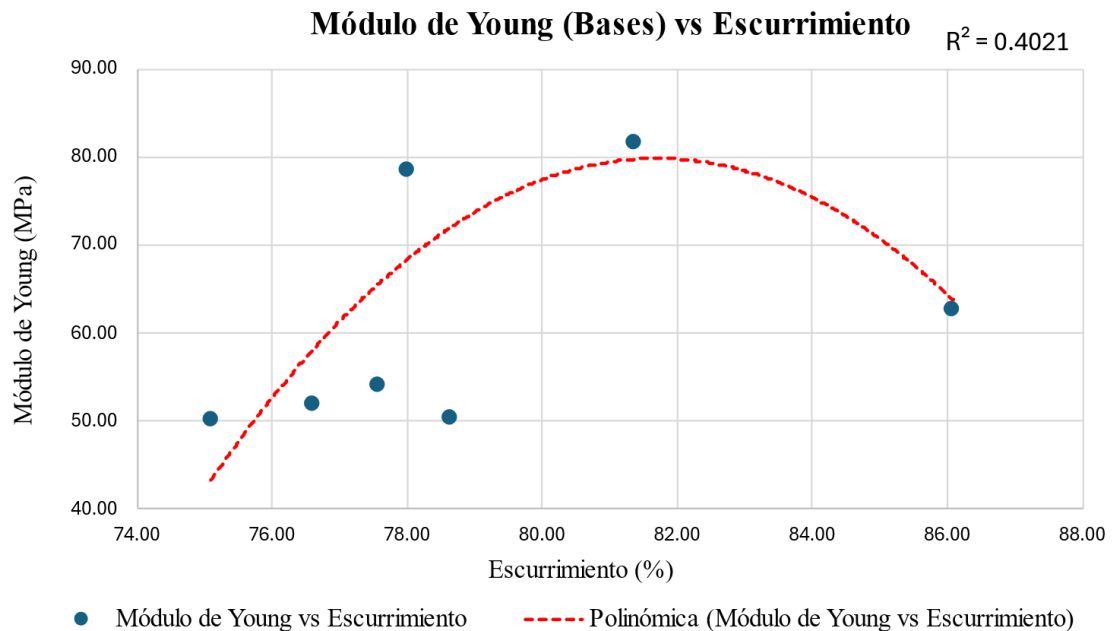


Figura 36. Correlación módulo de Young en Bases granulares vs escurrimiento

Fuente: Elaboración propia

En la figura 36 se expone la relación entre el módulo de Young dado por el equipo Geogauge y el escurrimiento mediante el ajuste de una curva polinómica de segundo grado con un coeficiente de determinación $R^2 = 0.4021$. La interacción de estas variables indica que al tener un menor escurrimiento superficial dentro de la estructura, la infiltración es alta, existe mayor presencia de agua en los contactos entre partículas y migración material, debilitando así la estructura de este, resultando en un módulo de Young bajo. Para valores de escurrimiento intermedios, en este estado existe la cantidad de agua suficiente para generar una mayor área de contacto entre partículas y así consiguiendo un mejor confinamiento del material, de esta forma teniendo un módulo de Young alto, esta condición genera un excelente comportamiento mecánico. Para un escurrimiento alto, la cantidad de agua dentro de la estructura es menor comparado al resto muestra que existe una superficie sellada o muy densa, al poseer una menor cantidad de agua en la estructura del pavimento este se comporta de forma más frágil, al no poseer la elasticidad de un material lubricado, por lo cual el módulo de Young decae.

Se expone, la existencia de correlaciones claras entre las propiedades físicas, mecánicas e hidráulicas del pavimento articulado. En este estudio se determinó que las diferentes

variables presentan una relación significativa con el comportamiento hidráulico del pavimento, en donde las que mayor influencia en los resultados hidráulicos son la granulometría del material y graduación de este junto al grado de compactación demostrando que materiales deficientes compactados o con una gradación inadecuada incrementan el contenido de vacíos y favorecen una infiltración no controlada. Estos resultados concuerdan con lo señalado por Tierra y Yupangui [37], quienes establecen que menores valores del módulo de Young y compactación se asocian directamente con mayores tasas de infiltración, evidenciando una relación inversa entre la capacidad portante y el comportamiento hidráulico. Asimismo, Jara y Peralta [40] destacan que el pavimento articulado debe analizarse como un sistema integral, en el que la interacción entre capas y propiedades condiciona tanto su durabilidad estructural como su eficiencia hidráulica, lo que refuerza la necesidad de evaluar este tipo de pavimentos de manera conjunta y no de forma aislada.

CAPÍTULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

- Se concluye que los diferentes porcentajes de compactación de las capas granulares evaluados cumplen parcialmente con los estándares de calidad física exigidos por la normativa MOP-001-F2002. Mientras que la cama de arena y el 62.5% de las bases granulares clasificaron como arenas bien graduadas (SW), el resto de las bases (M1, M7, M8) y la totalidad de las subrasantes (M1 a M8) presentaron una gradación pobre (SP y SP-SM) con coeficientes de curvatura inferiores a 1.0, lo que impide un empaquetamiento óptimo y compromete la resistencia estructural. Asimismo, se detectó una absorción crítica en los agregados finos de la subrasante (10.43%) y base (6.94%), valores que exceden ampliamente el umbral referencial del 2.5%, incrementando la susceptibilidad de la estructura a la saturación y el deterioro prematuro.
- Mecánicamente, el grado de compactación promedio en las bases fue del 93.76% y en subrasante del 88.54%, incumpliendo el mínimo del 95% estipulado por la norma MOP en el 75% de los puntos de estudio. Hidráulicamente, el uso del infiltrómetro de doble anillo permitió determinar que el pavimento no actúa como una superficie totalmente permeable; el coeficiente de escurrimiento promedio obtenido fue de 0.79, valor que lo sitúa, según la norma CPE INEN 5, al nivel de un empedrado de untas pequeñas, alejándose del comportamiento esperado para un sistema de infiltración urbana eficiente.
- Existe una correlación directa y “muy fuerte” ($R=0,8046$) entre el grado de compactación de la base granular y el coeficiente de escurrimiento. Los resultados demuestran que, a mayor densificación del material, disminuye la conectividad de poros y aumenta el escurrimiento superficial. Por el contrario, la mala graduación de las subrasantes (SP-SM) y los bajos niveles de compactación in situ favorecen una infiltración no controlada que, sumada a la alta absorción de los finos, genera grietas de sobresaturación y pérdida de capacidad portante bajo cargas de tráfico.
- El pavimento articulado de la cabecera cantonal de Alausí presenta un comportamiento integral híbrido, funcionando predominantemente como una superficie semi-impermeable debido a deficiencias en la gradación y compactación de sus capas de soporte. Aunque los adoquines cumplen individualmente con la

resistencia a la compresión (>40 MPa) y absorción ($<6\%$) de la norma INEN, la estructura global se ve comprometida por una base y subrasante con baja rigidez elástica (Modulo de Young promedio de 65.58 MPa, respectivamente), valores que no alcanzan los mínimos recomendados por la literatura técnica para infraestructuras viales de alta durabilidad. Estos hallazgos justifican la necesidad de actualizar el coeficiente de escurrimiento para el diseño de drenajes en la zona, considerando las condiciones reales de ejecución frente a los valores teóricos de diseño.

5.2 Recomendaciones

- Dado que se identificaron suelos pobremente graduados (SP y SP-SM) que no cumplen con el coeficiente de curvatura ideal, se recomienda realizar obligatoriamente correcciones granulométricas mediante la mezcla de materiales de distintos tamaños o el reemplazo total de la subrasante en los puntos críticos identificados. Esta acción permitirá alcanzar el empaquetamiento óptimo necesario para que el suelo no se deforme bajo el peso del tráfico.
- Para solucionar el incumplimiento generalizado de los niveles de compactación (promedios de 93.76% en bases y 88.54% en subrasantes), se deben exigir en obra el uso de maquinaria pesada que garantice el 95% de la densidad máxima seca según la norma MOP. Es vital supervisar que la humedad de los materiales al momento de compactar sea igual a “humedad óptima” determinada en laboratorio, evitando así que el suelo quede suelto o propenso a hundimientos.
- Debido a los altos niveles de absorción de agua encontrados (hasta 10.43%), se recomienda el uso de materiales con menor porosidad o la aplicación de estabilizadores químicos (como cal o cemento en bajas proporciones) que reduzcan la capacidad del suelo para retener humedad. Asimismo, el diseño de alcantarillado debe ajustarse al coeficiente de escurrimiento real de 0.79 hallado en este estudio, integrando sumideros más frecuentes para evitar que el agua sature las capas inferiores.
- Para futuras investigaciones es importante centrarse en validar y calibrar las ecuaciones empíricas vinculadas al CBR para los tipos de suelo de la Zona 3 de Ecuador. El estudio actual evidenció que las ecuaciones de estimación de CBR no se

ajustan a la realidad, arrojando valores que incumplan sistemáticamente la normativa MOP ($<80\%$). Por lo tanto, se justifica la necesidad de desarrollar nuevas ecuaciones locales o factores de corrección que vinculen de manera precisa los resultados de rigidez no destructiva (Modulo de Young) con la capacidad portante requerida (CBR), asegurando así que las decisiones de diseño y mantenimiento se basen en datos fiables y específicos de la región.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] G. A. D. M. del Cantón Alausí, “Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial del Cantón Alausí (Actualización 2020)”. [En línea]. Disponible en: <https://alausi.gob.ec/index.php/gad-municipal/la-administraci%C3%B3n/plan-de-desarrollo-y-ordenamiento/5552-plan-de-desarrollo-y-ordenamiento-territorial-del-cant%C3%B3n-alaus%C3%AD-actualizaci%C3%B3n-2020/file.html>
- [2] M. I. Orquera Jácome y M. V. Ortega Ortiz, “Plan de ordenamiento territorial del cantón Alausí 2011-2026”, [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.puce.edu.ec/handle/123456789/21998>
- [3] A. M. de la Carretera, “Importancia de la conservación de carreteras”, *Asociación Mundial de la Carretera*.
- [4] A. Montejo, “Ingeniería de pavimentos”, 2012.
- [5] B. C. Mera Arévalo, “Análisis comparativo de dos tipos de estructura de pavimento para las calles de la ciudadela San Vicente del Cantón de Jipijapa’.” [En línea]. Disponible en: <http://repositorio.unesum.edu.ec/handle/53000/7774>
- [6] A. D. Mora y C. A. Argüelles, “Diseño de pavimento rígido para la urbanización Caballero y Góngora, municipio de Honda - Tolima”, 2015.
- [7] S. Sánchez y S. Yépez, “Calidad del pavimento rígido sobre las propiedades físicas, químicas y mecánicas en la Av. 10 de julio, Huamachuco – La Libertad, 2017”. [En línea]. Disponible en: <https://hdl.handle.net/11537/13379>
- [8] Á. de Pablos *et al.*, “Estudio de las propiedades mecánicas de pavimentos cerámicos en crudo”, [En línea]. Disponible en: <https://digital.csic.es/handle/10261/14358>
- [9] A. Zepeda, “Curso internacional de mecánica de suelos arcillosos”, 1992. [En línea]. Disponible en: <https://libreria.uaq.mx/index.php/ediciones-uaq/ingenieria/545/curso-internacional-de-mecanica-de-suelos-arcillos>
- [10] F. Bravo López, G. Loja Valverde, W. Moran Martínez, y S. Pulido Esquerre, “Deterioro del pavimento y sus consecuencias para el tránsito vehicular en el Centro Poblado San Jacinto, Distrito de Nepeña, Ancash – 2019”. [En línea]. Disponible en: https://alicia.concytec.gob.pe/vufind/Record/UCVV_79c1630cc70546a77c279f2f939500a2
- [11] INEN, “CPE INEN 5 NORMAS PARA ESTUDIO Y DISEÑO DE SISTEMAS DE AGUA POTABLE Y DISPOSICIÓN DE AGUAS RESIDUALES PARA POBLACIONES MAYORES A 1000 HABITANTES”, 1992. [En línea]. Disponible en: https://inmobiliariadja.wordpress.com/wp-content/uploads/2016/09/normas_disec3blo_cpe_inen_5_parte_9-1_1992-mas-de-1000-hab.pdf

- [12] Á. Y. Cedeño Menéndez, “Cálculo de pavimento articulado para la calle Sucre Cedeño Cortez entre Francisco Suarez y Eloy Alfaro, parroquia Sucre, cantón 24 de Mayo’.” [En línea]. Disponible en: <http://repositorio.unesum.edu.ec/handle/53000/7798>
- [13] INEN, “INEN 1488 ADOQUINES REQUISITOS”, 1986. [En línea]. Disponible en: <https://es.slideshare.net/slideshow/1488adoquines/44908936>
- [14] M. Gomez, “Limites de consistencia de los agregados para mezclas de concreto”. [En línea]. Disponible en: <https://tesiunamdocumentos.dgb.unam.mx/ptd2009/septiembre/0649095/0649095.pdf>
- [15] F. Miranda, J. Aguiar, y L. Loría, “DAÑO POR HUMEDAD EN MEZCLAS ASFÁLTICAS”. [En línea]. Disponible en: <https://www.lanamme.ucr.ac.cr/repositorio/handle/50625112500/991>
- [16] A. Moscoso y R. Marcos, “Análisis de energía de compactación en conformación de bases para pavimento rígido urbano en el distrito de Challhuahuacho, Apurímac”. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.continental.edu.pe/handle/20.500.12394/11789>
- [17] J. A. Calixto, “Efectos del vidrio reciclado tratado con la máquina de Los Ángeles en la resistencia a compresión y absorción en adoquines de concreto para pavimentos de tránsito vehicular ligero, Lima 2020”. [En línea]. Disponible en: <https://hdl.handle.net/11537/25118>
- [18] L. Yanez y M. Gonzalo, “Análisis de la correlación entre estabilidad y módulo de rigidez para mezclas asfálticas en caliente, empleado agregados pétreos de la provincia de Imbabura, Cantón Ibarra”. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.puce.edu.ec/items/b73d9b51-5306-4b2d-a2a3-ac03ec527e41>
- [19] M. I. Montoya Freire, “Evaluación en campo del módulo de young equivalente y el grado de compactación para geomateriales”. [En línea]. Disponible en: <http://www.dspace.espol.edu.ec/handle/123456789/45041>
- [20] P. Vila, M. N. Pereyra, y Á. Gutiérrez, “Resistencia a la compresión de adoquines de hormigón. Resultados tendientes a validar el ensayo en medio adoquín”, vol. 7, n° 3, pp. 247–261, doi: 10.21041/ra.v7i3.186.
- [21] INEN, “INEN 3040: Adoquines de hormigón vibrocomprimido. Requisitos”, 2015.
- [22] F. L. C. Martínez, J. M. H. Betín, J. N. G. Sáenz, y F. R. Lizcano, “Análisis cualitativo del flujo de agua de infiltración para el control del drenaje de una estructura de pavimento flexible en la ciudad de Bogotá DC”, vol. 11, n° 22, pp. 20–25.
- [23] A. X. Guizado Barrios y E. R. P. Curi Grados, “Evaluación del concreto permeable como una alternativa para el control de las aguas pluviales en vías locales y pavimentos especiales de la costa noroeste del Perú”.
- [24] E. Chiarito, E. Zimmermann, y S. M. Zacarías, “Metodologías para la estimación del coeficiente de escorrentía en áreas urbanizadas mediante teledetección”, vol. 24, pp. 25–36.

- [25] 93 AASHTO, “AASHTO Guide for Design of Pavement Structures”, 2006.
- [26] W. Gutiérrez, “Análisis comparativo de las técnicas de laboratorio para determinar los límites de Atterberg en suelos de la ciudad de Oruro – Bolivia”, 2014. [En línea]. Disponible en: <https://ciencialatina.org/index.php/cienciala/article/download/7475/11307?inline=1>
- [27] E. E. Sierra Pérez, “Correlación entre el método geogauge y el método del cono de arena para determinar la densidad del suelo en campo”, 2012. [En línea]. Disponible en: <https://hdl.handle.net/11323/845>
- [28] R. C. Moreno, “Evaluación de la deformabilidad de terraplenes mediante métodos dinámicos: Aproximación teórica al estado de la cuestión”, 2011. [En línea]. Disponible en: <https://atc-piarc.com/media/articulos/files/1141.pdf>
- [29] L. Balanza, “GUIA DE LABORATORIO PARA DETERMINAR LA DENSIDAD Y ABSORCION DEL AGREGADO FINO”, 2019.
- [30] “MEDICION DE LA INFILTRACION EN EL SUELO MEDIANTE INFILTROMETROS DOBLE ANILLO”, 2015. [En línea]. Disponible en: <https://es.slideshare.net/slideshow/instructivo-r014-infiltrometro-doble-anillopdf/252479760>
- [31] E. C. y Ñañez, E. R. Lafitte, y S. M. Perez, “MÉTODOS DE ESTABILIZACIÓN DE SUELOS ARCILLOSOS PARA MEJORAR EL CBR CON FINES DE PAVIMENTACIÓN: UNA REVISIÓN LITERARIA.”
- [32] Universidad Nacional de Jaen, “Procedimiento para realizar el ensayo de densidad in situ”. [En línea]. Disponible en: <https://es.slideshare.net/slideshow/densidad-in-situ-cono-de-arena/79503704>
- [33] Universidad del Cauca, “Resistencia a la Degradación de Agregados Gruesos - Laboratorio 33”, 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.studocu.com/co/document/universidad-del-cauca/materiales-i/laboratorio-33/74782800>
- [34] G. Straž, “The effect of methodology on determining the liquid limits values of selected organic soils”, *Archives of Civil Engineering*, pp. 459–477, mar. 2022, doi: 10.24425/ace.2022.140180.
- [35] P. J. Vardanega y S. K. Haigh, “Some Recent Developments in the Determination of the Atterberg Limits”, pp. 48–55, jul. 2024, doi: 10.1061/9780784478509.007.
- [36] MOP, “ESPECIFICACIONES GENERALES PARA LA CONSTRUCCION PARA LA CONSTRUCCION DE CAMINOS Y PUENTES.”, 2002.
- [37] J. Tierra y M. Yupangui, “Características físicas - mecánicas e hidráulicas del pavimento articulado en la cabecera cantonal de Guano Provincia de Chimborazo”, UNACH, Riobamba, 2024. Accedido: 20 de enero de 2026. [En línea]. Disponible en: <http://dspace.unach.edu.ec/bitstream/51000/14335/1/Tierra%20T.%2c%20Jhon%20B.%20>

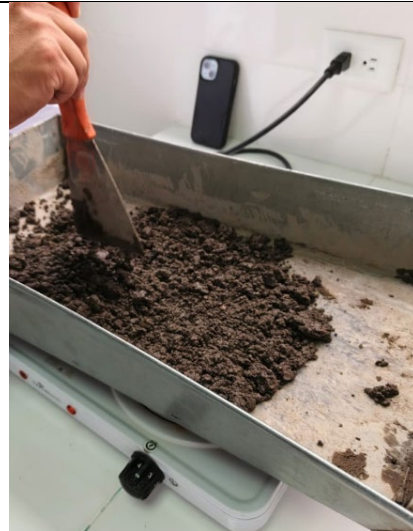
- Yupangui%20Ch.%2c%20Milton%20R.%282024%29%20%e2%80%9cCaracter%2c%20adst
icas%20f%2c%20adsicas%20-
%20mec%2c%20a1nicas%20e%20hidr%2c%20a1ulicas%20del%20pavimento%20articulado%2
0en%20la%20cabecera%20ca.pdf
- [38] S. F. Brown, “INTERNATIONAL SOCIETY FOR SOIL MECHANICS AND
GEOTECHNICAL ENGINEERING ”, 1994, [En línea]. Disponible en:
https://www.issmge.org/uploads/publications/1/32/1994_05_0073.pdf
- [39] R. Obrzud y A. Truty, “THE HARDENING SOIL MODEL - A PRACTICAL
GUIDEBOOK”, 2018, [En línea]. Disponible en:
https://www.zsoil.com/zsoil_manual_2018/Rep-HS-model.pdf
- [40] O. Jara y A. Peralta, “Características físicas, mecánicas e hidráulicas evaluadas en el
pavimento articulado en la cabecera cantonal de Sucúa, provincia de Morona Santiago”,
UNACH, Riobamba, 2025. [En línea]. Disponible en:
<http://dspace.unach.edu.ec/bitstream/51000/15676/1/Jara%20C.%2c%20Oscar%20A.%2c%20Peralta%20P.%2c%20Angela%20L.%20%282025%29%20Caracter%2c%20adsticas%20f%2c%20adsicas%2c%20mec%2c%20a1nicas%20e%20hidr%2c%20a1ulicas%20evaluadas%20en%20el%20pavimento%20articulado....pdf>
- [41] INEN, “NTE INEN 3040: Adoquines de hormigón. Requisitos y métodos de ensayo”, 2016.
[En línea]. Disponible en: https://vipresa.com.ec/wp-content/uploads/2019/02/nte_inen_3040.pdf
- [42] INEN, “INEN 1484 ADOQUINES MUESTREO”, 1987.

ANEXOS

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CHIMBORAZO FACULTAD DE INGENIERIA CARRERA DE INGENIERIA CIVIL	
ANEXO FOTOGRAFICO	Ubicación: Cantón Alausí
Autores: Cevallos Vallejo César Leonardo Morocho Morocho Royer Javier	Tutor: Ing. Hernán Vladimir Pazmiño Chiluisa
	
Extracción del material de cada muestra.	Ensayo GeoGauge
	
Ensayo granulométrico.	Ensayo límite líquido



Ensayo Límites de Atterberg – Límite plástico



Ensayo de absorción del material fino.



Ensayo del cono y arena



Ensayo de absorción del material grueso.



Ensayo Compresión Adoquines	Ensayo de Abrasión
	
Ensayo de infiltración – instalación de equipo	Ensayo Compresión Adoquines - Lecturas
	
Ensayo de infiltración	

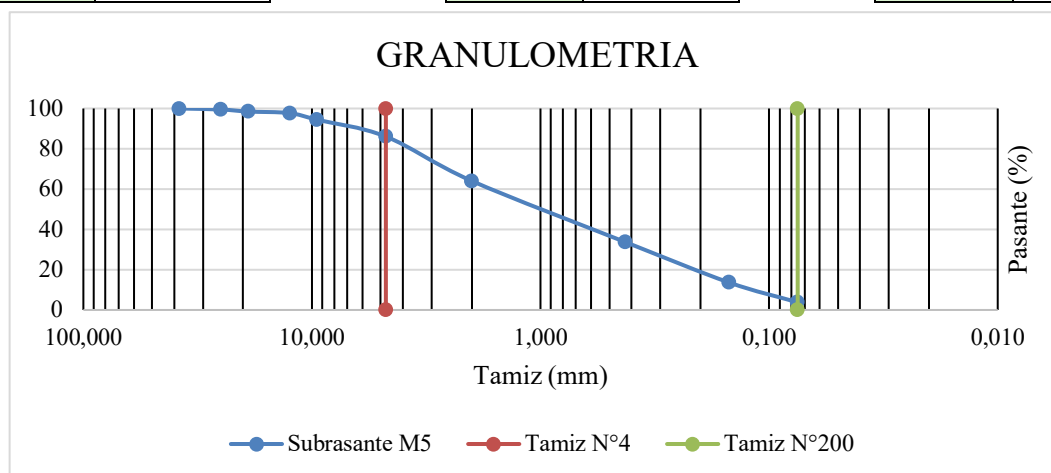
Anexo 1. Ensayos realizados



UNIVERSIDAD NACIONAL DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE INGENIERIA
INGENIERIA CIVIL



Investigación		Características físicas - mecánicas e hidráulicas del pavimento articulado de Alausí					
Integrantes:		Cevallos C. - Morocho R.	M5 Subrasante	Canton/ciudad:	Alausí		
Tutor		Ing. Vladimir Pazmiño		Provincia:	Chimborazo		
granulometría							
Masa inicial neto (Kg)		2.000			% Gravas	13.924	
Masa final neto (Kg)		1.975			% Finos	3.797	
Error		1.25			% Arenas	82.278	
Tamiz ASTM	Abertura del tamiz [mm]	Peso neto retenido [kg]	Peso retenido corregido [kg]	Retenido [%]	Retenido Acumulado [%]	Pasa [%]	
1" 1/2"	38.100	0.000	0.000	0.000	0.00	100.00	
1"	25.000	0.010	0.010	0.506	0.51	99.49	
3/4"	19.000	0.020	0.020	1.013	1.52	98.48	
1/2"	12.500	0.015	0.015	0.759	2.28	97.72	
3/8"	9.500	0.065	0.066	3.291	5.57	94.43	
No. 4	4.750	0.165	0.167	8.354	13.92	86.08	
No. 10	2.000	0.435	0.440	22.025	35.95	64.05	
No. 40	0.425	0.600	0.608	30.380	66.33	33.67	
No. 100	0.150	0.395	0.400	20.000	86.33	13.67	
No. 200	0.075	0.195	0.197	9.873	96.20	3.80	
Fondo		0.075	0.076	3.797	100.00	0.00	
		Total	2.000	100.000			
D1	0.150			D1	0.425	D1	2.000
D2	0.075			D2	0.150	D2	0.425
D10%	0.132			D30%	0.390	D60%	1.840
%1	13.67			%1	33.67	%1	64.05
%2	3.80			%2	13.67	%2	33.67
CU	13.973			CC	0.627	Base:	Clase 1, tipo B



Anexo 2. Ensayo de granulometría



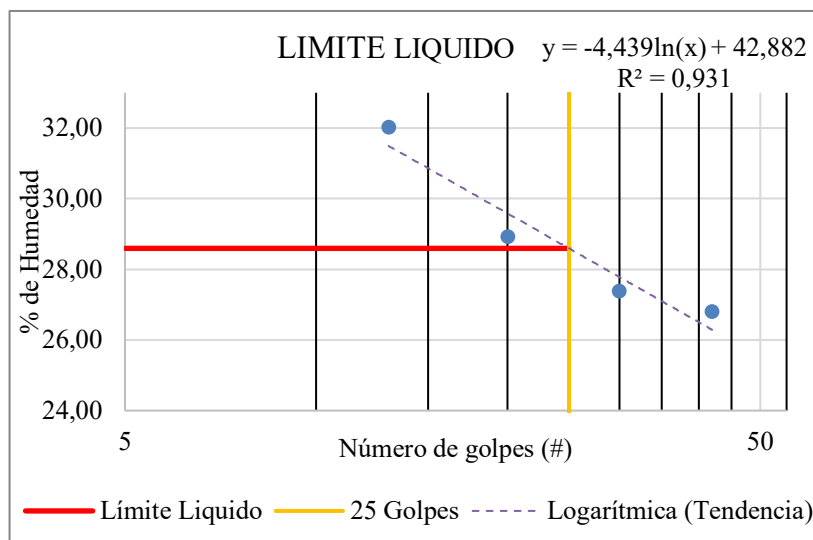
UNIVERSIDAD NACIONAL DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE INGENIERIA
INGENIERIA CIVIL



Investigación	Características físicas - mecánicas e hidráulicas del pavimento articulado de Alausí			
Integrantes:	Cevallos C. - Morocho R.	M1 Base-Subrasante	Canton/ciudad :	Alausí
Tutor	Ing. Vladimir Pazmiño		Provincia:	Chimborazo

Límites de Atterberg

Nº GOLPES	Peso del recipiente (gr)	Recipiente + suelo húmedo (gr)	Recipiente + suelo Seco (gr)	Peso del Agua (gr)	Peso de suelo seco (gr)	% de Humedad	% de Humedad Promedio
42	14.34	34.68	30.37	4.31	16.03	26.89	26.81
	14.02	34.12	29.88	4.24	15.86	26.73	
30	14.04	34.83	30.40	4.43	16.36	27.08	27.39
	15.04	36.25	31.65	4.60	16.61	27.69	
20	15.32	37.26	32.47	4.79	17.15	27.93	28.93
	14.16	38.12	32.60	5.52	18.44	29.93	
13	14.84	38.16	32.41	5.75	17.57	32.73	32.02
	14.46	36.14	30.97	5.17	16.51	31.31	



Limite Liquido (%)	
Ecuación	$Y = a * \ln(x) + b$
a	-4.439
b	42.882
x	25
LL (%)	28.59

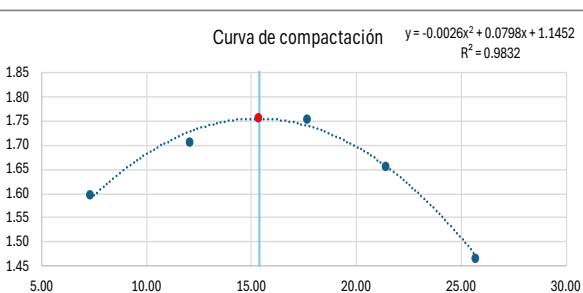
No	Recipient e	Recipiente +suelo hum.	suelo hum.	Recipiente + suelo sec.	suelo sec.	humedad %	Limite plástico
1	14.02	14.46	0.44	14.37	0.35	25.71	24.76
2	14.42	15.46	1.04	15.26	0.84	23.81	

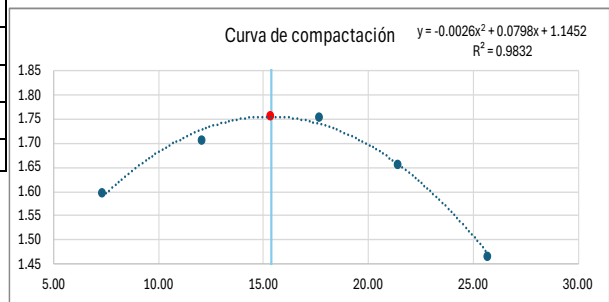
Anexo 3. Ensayo de Límites de Atterberg



UNIVERSIDAD NACIONAL DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE INGENIERIA
INGENIERIA CIVIL



Investigación		Características físicas - mecánicas e hidráulicas del pavimento articulado de Alausí				
Integrantes:		Cevallos C. - Morocho R.		M3 Base	Canton/ciudad:	Alausí
Tutor		Ing. Vladimir Pazmiño			Provincia:	Chimborazo
Ensayo Proctor						
Peso Placa+Cilindro+anillo		5.235	kg	Volumen cilindro	943.7	cm3
Peso Placa+Cilindro		4.200	kg			
Diámetro cilindro		10.160	cm			
Altura cilindro		11.640	cm			
Peso muestra seca		2.500	kg			
Punto	Equipo+suelo húmedo (kg)	Masa suelo húmedo (gr)	Densidad húmeda (gr/cm3)			
1	5.82	1620	1.717	14.36		
				15.12		
2	6.005	1805	1.913	16.34		
				16.06		
3	6.150	1950	2.066	14.34		
				14.12		
4	6.100	1900	2.013	15.17		
				16.82		
5	5.941	1741	1.845	17.32		
				16.78		
Datos humedad						
tara + suelo h. (gr)	Suelo húmedo (gr)	tara + suelo seco (gr)	suelo seco (gr)	%humedad	% humedad Promedio	Peso volumétrico seco (gr/cm3)
47.41	33.05	45.06	30.70	7.65	7.34	1.60
44.05	28.93	42.15	27.03	7.03		
52.14	35.80	48.31	31.97	11.98	12.08	1.71
57.76	41.70	53.23	37.17	12.19		
50.82	36.48	45.45	31.11	17.26	17.67	1.76
49.38	35.26	43.98	29.86	18.08		
48.23	33.06	42.41	27.24	21.37	21.40	1.66
47.42	30.60	42.02	25.20	21.43		
47.11	29.79	41.00	23.68	25.80	25.68	1.47
53.47	36.69	46.00	29.22	25.56		
Expresión de la curva						
a	-0.0026	b	0.0798	Curva de compactación $y = -0.0026x^2 + 0.0798x + 1.1452$ $R^2 = 0.9832$ 		
c	1.1452					
Humedad Optima		15.35	%			
Densidad optima seca		1.76	gr/cm3			



Anexo 4. Ensayo de compactación Proctor



UNIVERSIDAD NACIONAL DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE INGENIERIA
INGENIERIA CIVIL



Investigación		Características físicas - mecánicas e hidráulicas del pavimento articulado de Alausí			
Integrantes:		Cevallos C. - Morocho R.	M2 Base	Canton/ ciudad:	Alausí
Tutor		Ing. Vladimir Pazmiño		Provincia:	Chimborazo
Gravedad específica y absorción en agregados					
Material granular Fino			Material granular Grueso		
Masa molde (gr)	186		Masa molde (gr)	329	
Masa molde + suelo SH (gr)	651		Masa muestra seca + molde (gr)	2279	
Masa muestra SH (gr)	465		Masa suelo seco al horno (gr)	1950	
Masa picnómetro + agua (gr)	1230		Masa muestra parcialmente seca (gr)	2016.1	
Masa picnómetro + agua + muestra (gr)	1521		Masa aparente en agua de la muestra saturada (gr)	1185.00	
Masa en estado SSS (gr)	500				
Densidad relativa (Gravedad específica)			Densidad relativa (Gravedad específica)		
Densidad relativa (Gs) [SH]	2.22	-	Densidad relativa (Gs) [SH]	2.35	-
Densidad relativa (Gs) [SSS]	2.39	-	Densidad relativa (Gs) [SSS]	2.43	-
Densidad relativa aparente (Gs aparente)	2.67	-	Densidad relativa aparente (Gs aparente) [SSS]	2.08	-
Densidad			Densidad		
Densidad [SH]	2219.32	kg/m3	Densidad [SH]	2735.29	kg/m3
Densidad [SSS]	2386.36	kg/m3	Densidad [SSS]	2419.76	kg/m3
Densidad aparente [SSS]	2665.73	kg/m3	Densidad aparente	2077.97	kg/m3
Absorción			Absorción		
Porcentaje de absorción	7.53	%	Porcentaje de absorción	3.39	%

Anexo 5. Ensayo de gravedad específica y absorción en agregados



UNIVERSIDAD NACIONAL DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE INGENIERIA
INGENIERIA CIVL



Investigación		características físicas - mecánicas e hidráulicas del pavimento articulado de Alausí									
Integrantes:		Cevallos C. - Morocho R.		M3 Base			Canton/ciudad:		Alausí		
Tutor		Ing. Vladimir Pazmiño					Provincia:		Chimborazo		
abrasión (Maquina de los Ángeles)											
Muestra M2 Base								Norte		9727565	
								Este		814184	
Tamaño del tamiz		Masa requerida según gradación (g)				Masa iniciar necesaria (g)	Tipo de Material		Base de pavimento articulado		
Pasa	Retiene	A	B	C	D		Nº de esferas	11			
37.5 mm	25 mm	1250± 25									
25 mm	19 mm	1250± 25									
19 mm	12.5 mm	1250± 10	2500± 10			5000± 10	Masa Inicial del ensayo (g)	5021			
12.5 mm	9.5 mm	1250± 10	2500± 10								
9.5 mm	6.3 mm			2500± 10		Gradación	Masa retenida en el tamiz Nº 12 (g)	3390			
6.3 mm	4.75 mm			2500± 10		B					
4.75 mm	2.36 mm				5000± 10		Porcentaje de abrasión (%)	32.48%			
NOTA:	La base cuenta con gradación tipo C según la norma ASTM D1441										

Anexo 6. Ensayo de Abrasión (máquina de los Ángeles)



UNIVERSIDAD NACIONAL DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE INGENIERIA
INGENIERIA CIVIL



Investigación		características físicas - mecánicas e hidráulicas del pavimento articulado de Alausí							
Integrantes:		Cevallos C. - Morocho R.		General		Canton/ciudad:		Alausí	
Tutor		Ing. Vladimir Pazmiño				Provincia:		Chimborazo	
absorción y resistencia en adoquines									
Ensayo:		absorción en adoquines							
Id.	Muestra	Longitud [cm]	Ancho [cm]	Masa Sat.agua [kg]	Masa Seca [kg]	Absorción [%]			
1	M1	24.00	20.50	6.600	6.220	6.11			
2	M2	23.50	23.50	9.755	9.575	1.88			
3	M2	23.50	23.50	9.495	9.345	1.61			
4	M3	23.50	23.50	9.830	9.700	1.34			
5	M4	23.50	23.50	9.535	9.365	1.82			
6	M5	23.50	23.50	9.740	9.325	4.45			
7	M6	23.00	23.00	9.015	8.725	3.32			
8	M7	24.00	22.00	9.165	8.830	3.79			
9	M8	24.00	22.00	8.720	8.430	3.44			
10	M8	24.00	22.00	9.130	8.800	3.75			
Ensayo:		Resistencia en Adoquines							
Id.	Muestra	Área Total [mm2]	Esp. 1 [cm]	Esp. 2 [cm]	Esp. 3 [cm]	Esp. 4 [cm]	Esp. Prom [cm]	Carga max. [N]	Resistencia compresión [MPa]
1	M1	49200.00	7.3	7.1	7.2	7.2	7.2	1910224	38.8
2	M2	55225.00	8.9	8.9	8.8	8.8	8.9	2297323	41.6
3	M2	55225.00	7.9	8	8	8.1	8.0	2243936	40.6
4	M3	55225.00	8.2	8.2	8.2	8.3	8.2	2600342	47.1
5	M4	55225.00	8.5	8.5	8.5	8.5	8.5	2238591	40.5
6	M5	55225.00	8	8.2	8.5	8.5	8.3	2122487	38.4
7	M6	52900.00	8.6	8.7	8.6	8.6	8.6	2221679	42.0
8	M7	52800.00	8.5	8.5	8.5	8.5	8.5	2056653	39.0
9	M8	52800.00	8	8	8.2	8	8.1	2224462	42.1
10	M8	52800.00	8.5	8.4	8.5	8.4	8.5	2219609	42.0
Absorción promedio [%]					3.08				
Resistencia a la compresión promedio fm [MPa]					41.13				
Desviación estándar [MPa]					2.63				

Anexo 7. Ensayo de Absorción y resistencia a la compresión en adoquines



UNIVERSIDAD NACIONAL DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE INGENIERIA
INGENIERIA CIVIL



Investigación	características físicas - mecánicas e hidráulicas del pavimento articulado de Alausí			
Integrantes:	Cevallos C. - Morocho R.	M3 Base	Canton/ciudad :	Alausí
Tutor	Ing. Vladimir Pazmiño		Provincia:	Chimborazo
Cono de arena				
1) Determinación del peso del suelo extraído				
Peso de la masa de suelo + recipiente (g)	2872.20			
Peso de recipiente	525.00			
Peso de la masa de suelo (g) [Wm]	2347.20			
2) Determinación del volumen del hueco en el suelo				
Lectura inicial frasco + cono + arena (g)	5000.00			
Lectura final frasco + cono + arena (g)	1275.40			
Peso de arena en el cono (g)	1534.40			
Peso de la arena en el hueco (g) [W hueco]	2190.20			
Calibracion de la arena de ottawa (g/cm3) [Ysand]	1.56			
Volumen del hueco (de la masa) (cm3) [Vhueco - Vm]	1403.97			
3) Determinación de W%				
Muestra N°	1	2		
Peso de muestra Húmeda + recipiente (g)	59.0755	61.95444		
Peso de muestra seca + recipiente (g)	55.11	58.55		
Peso de recipiente (g)	24.62	32.14		
Peso de agua (Ww)	3.9655	3.40444		
Peso de muestra seca (Ws)	30.49	26.41		
W% [Humedad Natural]	13.01%	12.89%		
HUMEDAD NATURAL				
Promedio W%	12.95%			
DENSIDAD IN SITU				
Densidad húmeda del Suelo (Natural) (gr/cm3) [Ym]	1.67			
Peso volumétrico seco (g/cm3) [Yd]	1.48			
GRADO DE COMPACTACION				
Densidad Óptima en el Ensayo Proctor [gr/cm3]	Densidad de Suelo Seco [gr/cm3]	% de Compactación		
1.59	1.48	93.09%		

Anexo 8. Ensayo in situ Cono de arena

PAVIMENTO ARTICULADO													
VARIABLES			UNIDADES	CAPAS DE PAVIMENTO	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	PROMEDIO
ENSAYOS INSITU	1	Coficiente de escurrimiento C	[-]	[-]	0.751	0.7902	0.7661	0.7863	0.8608	0.7756	0.78	0.8137	0.79
	2	Módulo de Young	[Mpa]	Base	50.11	96.09	51.7	50.18	62.56	54.02	78.39	81.58	65.58
				Subrasante	46.68	46.11	40	36.9	37.58	45.92	43.49	47.79	43.06
	3	Módulo de Rigidez	[Mn/m]	Base	6.76	12.96	6.97	6.77	8.44	7.28	10.57	11	8.84
				Subrasante	6.3	6.22	5.39	4.98	5.07	6.19	5.87	6.44	5.81
	4	Densidad Seca Cono de Arena	[gr/cm3]	Cama de arena	-	1.54	1.62	-	-	1.67	-	-	1.61
				Base	1.48	1.74	1.63	1.52	1.5	1.66	1.72	1.8	1.63
				Subrasante	1.42	1.27	1.4	1.31	1.41	1.46	1.37	1.44	1.39
	5	Porcentaje de humedad Cono de Arena	[%]	Cama de arena	-	5.85	5.2	-	-	5.53	-	-	5.53
				Base	12.95	10.45	11.78	12.48	12.33	11.08	12.01	11.7	11.85
			Subrasante	15.5	14.85	15.25	16.15	15.38	15.41	15.11	15.31	15.37	
	6	Escurrimiento	[%]	[-]	75.1	79.02	76.61	78.63	86.08	77.56	78	81.37	79.05
	7	Infiltración	[%]	[-]	24.9	20.98	23.39	21.37	13.92	22.44	22	18.63	20.74
ENSAYO S EN LABORA	8	Densidad Óptima Proctor	[gr/ cm3]	Cama de arena	-	1.99	1.97	-	-	2.05	-	-	2.00
				Base	1.65	1.83	1.76	1.62	1.63	1.78	1.84	1.92	1.75
				Subrasante	1.59	1.43	1.62	1.5	1.58	1.63	1.56	1.6	1.56

9	Humedad Óptima Proctor	[%]	Cama de arena	-	9.63	9.87	-	-	10.51	-	-	10.00
			Base	16.09	13.82	15.35	15.88	15.16	14.29	14.49	16.76	15.23
			Subrasante	17.27	18.33	17.47	17.13	16.5	17.6	18.67	17.59	17.57
10	Grado de Compactación Cono de Arena	[%]	Cama de arena	-	77.21	82.05	-	-	81.61	-	-	80.29
			Base	92.59	95.05	92.5	93.58	95.12	93.15	93.59	93.97	93.69
			Subrasante	89.5	88.69	86.41	87.24	89.39	89.52	87.51	90.09	88.54
11	% Gravas Gruesas	[%]	Cama de arena	-	12.56	10.83	-	-	8.84	-	-	10.74
			Base	2.36	16.35	11.03	8.52	10.86	11.27	8.29	11.08	9.97
			Subrasante	2.26	7.58	4.76	8.27	1.52	6.33	2.01	4.34	4.63
12	% Gravas Finas	[%]	Cama de arena	-	15.83	12.59	-	-	9.34	-	-	12.59
			Base	7.78	14.59	12.03	12.03	10.94	11.42	11	13.1	11.61
			Subrasante	4.77	7.58	8.77	9.52	4.05	8.61	3.77	7.91	6.87
13	% Arenas Gruesas	[%]	Cama de arena	-	24.62	26.7	-	-	28.79	-	-	26.70
			Base	29.12	35.21	34.59	34.84	34.7	33.75	33.5	29.72	33.18
			Subrasante	31.88	23.99	26.82	25.31	30.38	25.57	29.9	24.48	27.29
14	% Arenas Finas	[%]	Cama de arena	-	44.47	46.85	-	-	49.49	-	-	46.94
			Base	53.11	29.18	36.09	37.59	36.63	38.31	39.43	38.03	38.55
			Subrasante	50.3	44.95	44.61	45.11	50.38	46.07	49.25	46.67	47.17
15	% de Material Fino	[%]	Cama de arena	-	2.51	3.02	-	-	3.54	-	-	3.02
			Base	7.63	4.68	6.26	7.02	6.87	5.26	7.79	8.06	6.70
			Subrasante	10.79	15.91	15.04	11.78	13.67	13.43	15.08	16.61	14.04

	16	Limite Liquido	[%]	Base	20.39	19.1	18.78	20.77	17.51	18.47	19.33	21.14	19.44
				Subrasante	28.59	27.54	26.82	27.54	30.24	28.08	29.19	27.01	28.13
	17	Limite Plástico	[%]	Base	-	-	-	-	-	-	-	-	-
				Subrasante	24.76	25.52	24.04	23.36	26.1	25.8	25.7	23.22	24.81
	18	Índice Plástico	[%]	Base	-	-	-	-	-	-	-	-	-
				Subrasante	3.83	2.02	2.76	4.19	4.14	2.28	3.49	3.79	3.31
	19	Clasificación SUCS	[%]	Cama de arena	-	SW	SW	-	-	SW	-	-	-
				Base	SP	SW	SW	SW	SW	SW	SP	SP	SW
				Subrasante	SP	SP	SP-SM	SP-SM	SP	SP	SP	SP	SP

Anexo 9. Resumen de ensayos realizados