

**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

FACULTAD DE INGENIERÍA CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

TEMA:

**Diseño y evaluación de una base estabilizada con emulsión
asfáltica y cal (BSM) mediante metodología SABITA
aplicada a la rehabilitación de una vía existente.**

AUTORES:

Rennella Riera, Franchesca Anelisse

Ormeño Pacheco, Daniel Saul

Trabajo de titulación previo a la obtención del título de

INGENIERO CIVIL

TUTOR:

Ing. Grau Sacoto, Carlos Andrés M.Sc.

Guayaquil, Ecuador

31 de agosto del 2026



UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL

FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL

CARRERA DE INGENIERIA CIVIL

CERTIFICACIÓN

Certificamos que el presente trabajo de titulación, fue realizado en su totalidad por **Rennella Riera, Franchesca Anelisse y Ormeño Pacheco, Daniel Saul** como requerimiento para la obtención del título de **Ingeniero Civil**.

TUTOR (A)

f. _____

Grau Sacoto, Carlos Andrés

DIRECTOR DE LA CARRERA

f. _____

Alcivar Bastidas, Stefany Esther

Guayaquil, a los 31 del mes de agosto del año 2026



UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL

FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL
CARRERA DE INGENIERIA CIVIL

DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD

Nosotros, **Rennella Riera, Franchesca Anelisse y Ormeño Pacheco, Daniel Saul**

DECLARAMOS QUE:

El Trabajo de Titulación, **Diseño y evaluación de una base estabilizada con emulsión asfáltica y cal (BSM) mediante metodología SABITA aplicada a la rehabilitación de una vía existente**, previo a la obtención del título de **Ingeniero Civil**, ha sido desarrollado respetando derechos intelectuales de terceros conforme las citas que constan en el documento, cuyas fuentes se incorporan en las referencias o bibliografías. Consecuentemente este trabajo es de mi total autoría.

En virtud de esta declaración, me responsabilizo del contenido, veracidad y alcance del Trabajo de Titulación referido.

Guayaquil, a los 31 del mes de agosto del año 2026

LOS AUTORES:

f. _____

Rennella Riera, Franchesca Anelisse

f. _____

Ormeño Pacheco, Daniel Saul



UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL

FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL

CARRERA DE INGENIERIA CIVIL

AUTORIZACIÓN

Nosotros, Rennella **Riera, Franchesca Anelisse** y **Ormeño Pacheco, Daniel Saul**

Autorizo a la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil a la **publicación** en la biblioteca de la institución del Trabajo de Titulación, **Diseño y evaluación de una base estabilizada con emulsión asfáltica y cal (BSM) mediante metodología SABITA aplicada a la rehabilitación de una vía existente**, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi exclusiva responsabilidad y total autoría.

Guayaquil, a los 31 del mes de agosto del año 2026

LOS AUTORES:

f. _____

Rennella Riera, Franchesca Anelisse

f. _____

Ormeño Pacheco, Daniel Saul

Agradecimientos

A Dios por permitirme llegar hasta aquí, por darme la fuerza de continuar cuando ya no sabía cómo seguir.

A mis papás, Cosme Rennella y Yamila Riera, porque este logro es suyo y mío, pero es más suyo, porque sin ustedes yo no hubiese llegado hasta aquí.

A Paolo Giler, por su apoyo y amor incondicional, por cada noche que se desveló ayudándome a entender, estudiar y aprender, gracias por motivarme cada día, gracias por creer en mí más de lo que yo lo hacía y recordarme siempre que soy capaz.

A Milena Carbo y Ronny Carranza, mis mejores amigos, quienes han sido mi mayor apoyo durante esta etapa, les agradezco por cada día de risas, peleas y también de tristezas, por hacer de esta carrera más llevadera.

A Kepler Verduga, por creer en mí y darme las oportunidades que me brindó para alcanzar esta meta.

A Sandra Sacoto y Francisco Grau, por haber creído en mí y en mi potencial desde el primer día, sin su apoyo, este logro no sería posible.

A Carlos Grau, por su guía y acompañamiento como mi tutor en el desarrollo de este trabajo.

Franchesca Anelisse Rennella Riera

Agradecimientos

A mis padres y familia, por su apoyo incondicional, su amor y sus sacrificios a lo largo de toda mi etapa universitaria; este logro es tanto de ellos como mío.

De manera especial, a mi director de tesis, por su valiosa guía, paciencia y conocimiento compartido para la realización de este trabajo.

Y a mis amigos y compañeros, por el apoyo mutuo y los momentos compartidos durante estos años de carrera.

Daniel Saul Ormeño Pacheco

Dedicatoria

En memoria de Sol, porque me enseñaste que sin
importar lo difícil que la vida se ponga, debo seguir.

- *Franchesca Anelisse Rennella Riera*

Dedicatoria

A mis padres y hermanos, con infinito amor y gratitud.

- *Daniel Saul Ormeño Pacheco*



**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL
CARRERA DE INGENIERIA CIVIL**

TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN

f. _____

Federico von Buchwald de Janon

DECANO O DIRECTOR DE CARRERA

f. _____

Nancy Fatima Varela Terreros

COORDINADOR DEL ÁREA O DOCENTE DE LA CARRERA

f. _____

Rolando Vila Romani

OPONENTE

Índice de contenido

Agradecimientos	VI
Dedicatoria	IX
Índice de Tablas.....	XV
Índice de ilustraciones	XVI
Glosario	XVIII
Resumen Ejecutivo	XIX
Abstract.....	XX
CAPÍTULO I.....	2
1. INTRODUCCIÓN.....	2
1.1. ANTECEDENTES	2
1.2. OBJETIVOS.....	3
1.2.1. OBJETIVO GENERAL	3
1.2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	4
1.3. HIPOTESIS	4
1.4. JUSTIFICACION.....	4
CAPÍTULO II	5
2. MARCO TEÓRICO	5
2.1. Tipos de pavimento	5
2.1.1. Pavimento flexible.....	5

2.1.2.	Pavimento rígido	6
2.1.3.	Pavimento compuesto.....	6
2.1.4.	Tipos de intervención	8
2.1.5.	Rehabilitación vs construcción nueva	11
2.2.	Estabilización de suelos.....	11
2.2.1.	Estabilización mecánica	11
2.2.2.	Estabilización química.....	12
2.3.	Estabilización con emulsión asfáltica.....	13
2.3.1.	Tipos de emulsión	13
2.3.2.	Mecanismo de cohesión	13
2.3.3.	Comportamiento en suelos	14
2.4.	Estabilización con Cal.....	14
2.4.1.	Mecanismo de reacción química	14
2.4.2.	Reducción de plasticidad.....	14
2.4.3.	Mejora de propiedades mecánicas.....	14
2.5.	Materiales estabilizados con betún (BSM).....	14
2.5.1.	Definición	14
2.5.2.	Comportamiento mecánico.....	15
2.5.3.	Diferencia con mezcla asfáltica.....	15
2.5.4.	Materiales parcialmente ligados	15
2.6.	Metodología SABITA	15

2.6.1.	Principios de diseño.....	16
2.6.2.	Criterios de selección de mezcla	17
2.6.3.	Parámetros de evaluación	18
2.7.	Ensayos de laboratorio	19
2.7.1.	Proctor Modificado.....	19
2.7.2.	CBR	20
2.7.3.	Resistencia a la Tracción Indirecta (ITS)	20
2.7.4.	Triaxial isotrópico	20
2.8.	Control de calidad en obra.....	21
2.8.1.	Importancia.....	21
2.8.2.	Verificación de diseño	21
2.8.3.	Ensayos de control de calidad	21
CAPÍTULO III		22
3.	METODOLOGÍA.....	22
3.1.	Ubicación del proyecto.....	22
3.2.	Exploración geotécnica	23
3.3.	Caracterización del suelo.....	23
3.3.1.	Clasificación	24
3.3.2.	Proctor	25
3.3.3.	CBR	25
3.4.	Diseño de mezcla estabilizada.....	26

3.4.1.	Dosificación.....	27
3.4.2.	Metodología SABITA	28
3.4.3.	Selección de mezcla óptima	32
3.5.	Evaluación mecánica.....	34
3.5.1.	Ensayo ITS	35
3.5.2.	Ensayo Triaxial Isotrópico	35
3.6.	Control de calidad	37
3.7.	Metodología del análisis económico	38
CAPÍTULO IV		39
4.	RESULTADOS Y ANALISIS	39
4.1.	Caracterización del Pavimento Existente	39
4.2.	Caracterización del material de Base Clase 1A.....	45
4.3.	Resultados del diseño de mezcla	45
4.4.	Resultados de ensayos mecánicos	47
4.5.	Resultados de control de calidad en obra	48
4.6.	Análisis comparativo	50
4.6.1.	Bases de Diseño del Tramo de Control	50
•	Área de intervención: 7,200 m2	50
•	Caso B (SABITA BSM): Reciclado y estabilización <i>in situ</i> con 3% de emulsión asfáltica y 2.0% de cal, Capa de rodadura.....	50
4.6.2.	Caso A: Método tradicional (Fresado y recapeo con HMA).....	51

4.6.3.	Caso B: Estabilización BSM con Emulsión y Cal.....	51
4.6.4.	Comparativa estructural y de Costo-Efectividad (AASHTO 93).....	52
4.6.5.	Análisis de Costo-Efectividad y Análisis de Costo del Ciclo de Vida (LCCA).....	53
CAPÍTULO V		54
5.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	54
5.1.	CONCLUSIONES.....	54
5.2.	RECOMENDACIONES	56
6.	Bibliografía.....	59
DECLARACIÓN Y AUTORIZACIÓN.....		61
Rennella Riera, Franchesca Anelisse. Ormeño Pacheco, Daniel Saúl		61

Índice de Tablas

Tabla 1. Clasificación del material de Base Clase 1A.....	41
Tabla 2. Parámetros de aceptación de diseño.....	48
Tabla 3. Resultados obtenidos de la exploración geotécnica	61
Tabla 4. Resultados obtenidos de caracterización material Base Clase 1A	62
Tabla 5. Resultados diseños BSM.....	63
Tabla 6. Parámetros obtenidos del ensayo triaxial de la mezcla BSM de diseño.	64
Tabla 7. Parámetros resistentes obtenidos mediante ensayo triaxial de la mezcla estabilizada	65
Tabla 8. Resultados promedio por tramo.	66

Índice de ilustraciones

Ilustración 1. Vía por rehabilitar. Fuente: Autor.	19
Ilustración 2. Sección típica de pavimento flexible. Fuente: Andrade Triviño y Franco Puga (2019).	22
Ilustración 3. Sección transversal típica de un pavimento rígido. Fuente: Andrade Triviño y Franco Puga (2019).	23
Ilustración 4. Sección transversal típica #1 de un pavimento compuesto. Fuente: Andrade Triviño y Franco Puga (2019).	24
Ilustración 5. Sección transversal típica #2 de un pavimento compuesto. Fuente: Andrade Triviño y Franco Puga (2019).	24
Ilustración 6. Sección transversal típica #3 de un pavimento compuesto. Fuente: Andrade Triviño y Francisco Puga (2019).	24
Ilustración 7. Extendido manual de mezcla asfáltica en caliente para la conformación de la carpeta de rodadura. Fuente: Asfalto Farvias. Carpeta asfáltica en caliente.	25
Ilustración 8. Reparación localizada de un pavimento asfáltico mediante bacheo con mezcla asfáltica en caliente. Fuente: Asfaltos Tudefran, Estrategias para el mantenimiento y la reparación de pavimentos asfálticos.	26
Ilustración 9. Fresado de un pavimento flexible como parte del proceso de rehabilitación vial. Fuente: EVERPADS. The Ultimate Guide to Asphalt Millings: What They Are and How to Use Them for Your Asphalt Milling Needs.	27
Ilustración 10. Ejecución de la estabilización in situ de una base mediante la técnica de Materiales Estabilizados con Betún (BSM). Fuente: Autor.	28
Ilustración 11. Estabilización mecánica de un suelo mediante conformación y compactación con rodillo vibratorio. Fuente: Construneic. Estabilización de suelos.	29

Ilustración 12. Aplicación de un estabilizante químico líquido durante el proceso de estabilización de suelos. Fuente: Compraco. Estabilización del suelo: métodos químicos y mecánicos.	30
Ilustración 13. Ubicación de las calicatas ejecutadas a lo largo de la vía La Victoria – T de Baba. Fuente: Google Maps.	40
Ilustración 14. Exploración geotécnica mediante la ejecución de calicatas en la vía La Victoria – T de Baba. Fuente: Autor.	42
Ilustración 15. Curva granulométrica.	44
Ilustración 16. Equipo utilizado para la ejecución del ensayo CBR en laboratorio. Fuente: Autor.	45
Ilustración 17. Probetas elaboradas con las diferentes dosificaciones de cal y emulsión asfáltica para el diseño de la mezcla BSM. Fuente: Autor.	47
Ilustración 18. Proceso de mezclado y homogeneización manual del material granular posterior a la incorporación de cal y emulsión asfáltica. Fuente: Autor.	53
Ilustración 19. Probeta de mezcla BSM compactada en molde cilíndrico, previo al proceso de desmoldeo y curado. Fuente: Autor.	54
Ilustración 20. Probeta cilíndrica de mezcla BSM durante la ejecución del ensayo de resistencia a la tracción indirecta (ITS). Fuente: Autor.	55
Ilustración 21. Probetas cilíndricas de mezcla BSM compactadas en laboratorio, debidamente identificadas y preparadas para la ejecución de ensayos triaxiales. Fuente: Autor.	56
Ilustración 22. Equipo de ensayo triaxial empleado para la caracterización mecánica de mezclas BSM. Fuente: Autor.	57
Ilustración 23. Relación entre presión de confinamiento y esfuerzo principal desviador del material BSM. Fuente: Autor	67

Glosario

BSM: Materiales Estabilizados con Betún; mezclas de suelo con asfalto que mejoran la firmeza de la vía.

SABITA: Metodología técnica de referencia internacional utilizada para el diseño y construcción de carreteras modernas.

Ensayo Proctor: Prueba de laboratorio estándar que sirve para encontrar la densidad máxima que puede alcanzar un suelo al compactarse.

CBR: Relación de Soporte de California; una medida que indica la capacidad de carga o soporte que tiene un terreno.

Reacción Puzolánica: Proceso químico natural que ocurre al mezclar cal con ciertos suelos, provocando que estos se endurezcan como una piedra con el tiempo.

Resumen

El presente evalúa la aplicación de una base estabilizada con emulsión asfáltica y cal (BSM) en la rehabilitación de la vía La Victoria – T de Baba, ubicada en la provincia del Guayas. Para el estudio se caracterizó el material existente, se analizaron diferentes dosificaciones de cal y emulsión y se evaluó su comportamiento mediante ensayos de resistencia a la tracción indirecta, ensayos triaxiales y controles realizados durante la ejecución. La alternativa estudiada permite aprovechar parte del material existente en la vía, disminuyendo la necesidad de retirar y transportar grandes cantidades de material. A partir de los resultados obtenidos se comparó el comportamiento mecánico de la mezcla seleccionada con los controles ejecutados en obra y con una alternativa convencional de rehabilitación. De esta manera, el estudio permite establecer las ventajas y las limitaciones de aplicar este tipo de estabilización bajo las condiciones particulares del proyecto.

Palabras clave: BSM; emulsión asfáltica; cal; metodología SABITA; rehabilitación vial; resistencia a la tracción indirecta.

Abstract

This research evaluates the design and mechanical behavior of a base stabilized with asphalt emulsion and lime (BSM) using the SABITA methodology, applied to the rehabilitation of the La Victoria–T de Baba road in Guayas Province. A geotechnical exploration program involving 25 test pits distributed over approximately 20 km was conducted to characterize the existing materials. Subsequently, the Class 1A base material selected for the design was characterized, yielding a GP-GC classification, a maximum dry density of 2167 kg/m³, an optimum moisture content of 10%, and a CBR of 83%. Different lime and asphalt emulsion dosages were evaluated through indirect tensile strength (ITS) tests under dry and wet conditions to determine the Tensile Strength Ratio (TSR). The selected dosage consisted of 2% lime and 3% emulsion, resulting in values of 218.8 kPa for dry ITS, 206.4 kPa for wet ITS, and 94.3% for TSR. Additionally, isotropic triaxial tests and on-site quality control checks were performed to assess performance. The results demonstrate the technical viability of BSM as an alternative for road rehabilitation under the conditions studied.

Keywords: BSM; asphalt emulsion; lime; SABITA methodology; road rehabilitation; indirect tensile strength.

CAPÍTULO I

1. INTRODUCCIÓN

1.1. ANTECEDENTES

El deterioro progresivo de la infraestructura vial representa uno de los principales problemas en la red de carreteras en el Ecuador, esto debido al incremento de cargas vehiculares, condiciones climáticas y el envejecimiento de los materiales que conforman la estructura del pavimento, lo cual se puede apreciar en la ilustración 1. Dichas condiciones generan una pérdida de capacidad estructural, deformaciones permanentes y funcionalidad de las vías, de esta manera resulta necesaria la implementación de técnicas de rehabilitación eficientes y sostenibles.



Ilustración 1. Vía por rehabilitar. Fuente: Autor.

En los últimos años la rehabilitación vial utilizando técnicas de estabilización in situ ha comenzado a adquirir mayor relevancia, debido a que nos brinda la posibilidad de

reutilizar los materiales existentes de la vía, reduciendo así los costos de construcción, transporte de materiales y explotación de estos, minimizando a su vez el impacto ambiental. Entre las alternativas utilizadas se encuentra la estabilización con emulsión asfáltica y cal, la incorporación de estos dos materiales permite mejorar las propiedades mecánicas y cohesivas del suelo.

Pese a que existen metodologías a nivel internacional como las desarrolladas por Asphalt Academy, que han establecido los procedimientos para el diseño y evaluación de materiales estabilizados con Betún (BSM) utilizando ensayos como la resistencia a la tracción indirecta (ITS) y ensayos triaxiales para la verificación del desempeño estructural, en Ecuador aun no tenemos una normativa específica que nos permita evaluar este tipo de materiales, por lo cual la aplicación y el uso de estas metodologías depende de las especificaciones de cada proyecto de forma individual.

Por lo cual es necesario evaluar el comportamiento mecánico de estos materiales estabilizados con emulsión asfáltica y cal aplicado a proyectos reales de rehabilitación vial para analizar el desempeño y contribuir con información que sirva de referencia para sus futuras aplicaciones.

1.2. OBJETIVOS

1.2.1. OBJETIVO GENERAL

Diseñar y evaluar el comportamiento mecánico de una base estabilizada con emulsión asfáltica y cal mediante la metodología SABITA, y verificar su desempeño mediante resultados de laboratorio y control de calidad obtenidos durante su aplicación en la rehabilitación de una vía existente.

1.2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Caracterizar la estructura del pavimento existente mediante ensayos de laboratorio para determinar las propiedades de los materiales y su comportamiento inicial.
- Determinar la humedad óptima de compactación y la dosificación adecuada de cal y emulsión asfáltica, utilizando el ensayo Proctor Modificado (ASTM D1557) y la metodología SABITA junto con los procedimientos del Laboratory Handbook – Wirtgen, seleccionando la dosificación óptima en función de parámetros de resistencia.
- Evaluar y verificar el comportamiento del BSM diseñado, mediante ensayos de resistencia a la tracción indirecta (ITS), ensayos triaxiales isotrópicos (Tx-ISO) y resultados de control de calidad obtenidos en obra.

1.3. HIPOTESIS

La estabilización del material existente mediante la incorporación de cal y emulsión asfáltica, diseñada bajo metodología SABITA mejora sus propiedades mecánicas permitiendo su utilización como base estructural en la rehabilitación de una vía existente.

1.4. JUSTIFICACION

La rehabilitación de vías con materiales de baja capacidad estructural representa un desafío técnico y económico en proyectos viales. El uso de estabilización con emulsión asfáltica y cal permite mejorar las propiedades mecánicas del material existente, reduciendo la necesidad de reemplazo total de la base aprovechando así los materiales locales, reduciendo el impacto ambiental por transporte de materiales.

CAPÍTULO II

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Tipos de pavimento

Los pavimentos son estructuras conformadas por diferentes capas de materiales que se construyen sobre la subrasante con el propósito de soportar las cargas producidas por el tránsito y transmitir las de manera adecuada hacia el terreno de fundación. El pavimento debe proporcionar una superficie estable y segura para la circulación de los vehículos durante su vida útil. De acuerdo con la forma en que las cargas son distribuidas hacia la subrasante y con los materiales empleados en su construcción, los pavimentos se clasifican principalmente en flexibles, rígidos y compuestos (Huang, 2004).

2.1.1. Pavimento flexible

Este tipo de estructura está compuesto por una capa de rodadura de mezcla asfáltica apoyada sobre capas de materiales granulares (base y subbase) (ver ilustración 2). La flexibilidad del conjunto permite que la estructura se deforme ligeramente bajo las cargas del tráfico y las transmita hacia las capas inferiores y el suelo de fundación (Papagiannakis & Masad, 2008).

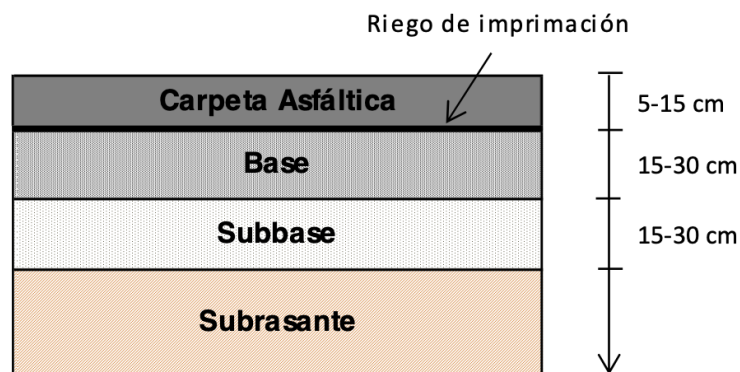


Ilustración 2. Sección típica de pavimento flexible. Fuente: Andrade Triviño y Franco Puga (2019).

2.1.2. Pavimento rígido

Consiste fundamentalmente en una losa de hormigón de cemento Portland (ver Ilustración 3) que, gracias a su elevada rigidez, distribuye las cargas sobre un área extensa de la subrasante. Su diseño estructural se basa principalmente en la capacidad de carga y resistencia a la flexión del propio concreto (Huang, 2004).

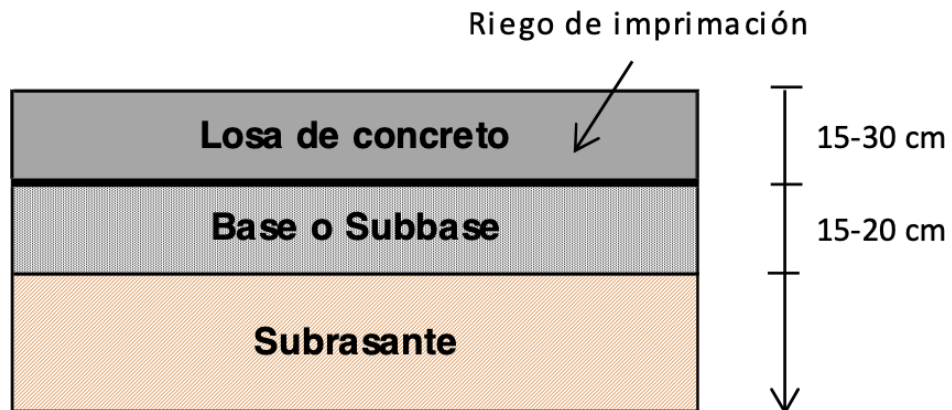


Ilustración 3. Sección transversal típica de un pavimento rígido. Fuente: Andrade Triviño y Franco Puga (2019).

2.1.3. Pavimento compuesto

Se definen como aquellas estructuras formadas por una combinación de capas de hormigón y mezclas asfálticas (ver Ilustraciones 4, 5 y 6), frecuentemente resultantes de procesos de rehabilitación donde se coloca una sobre carpeta asfáltica sobre un pavimento rígido existente o viceversa (Huang, 2004).

1. Capa asfáltica (CA) sobre base estabilizada de cemento (BEC)

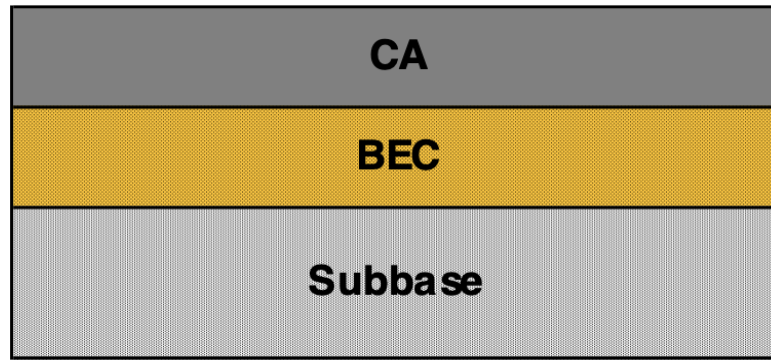


Ilustración 4. Sección transversal típica #1 de un pavimento compuesto. Fuente: Andrade Triviño y Franco Puga (2019).

2. Losa de concreto de cemento Portland (whitetopping, WT) sobre capa asfáltica.

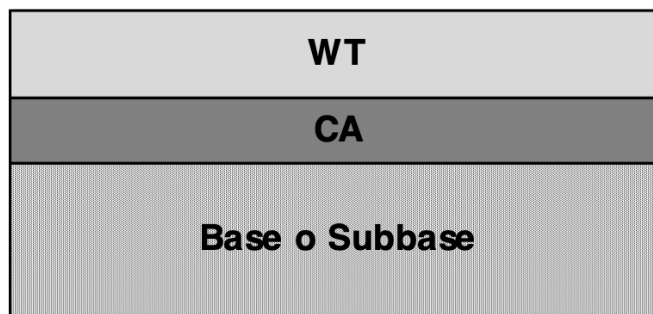


Ilustración 5. Sección transversal típica #2 de un pavimento compuesto. Fuente: Andrade Triviño y Franco Puga (2019).

3. Capa asfáltica sobre pavimento rígido

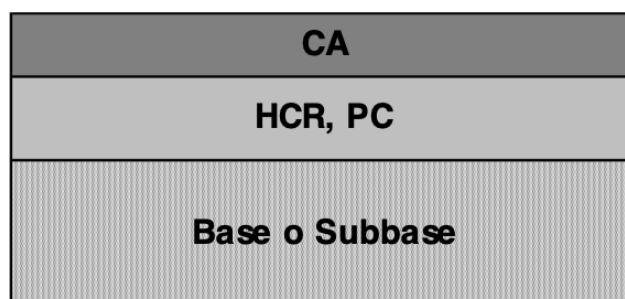


Ilustración 6. Sección transversal típica #3 de un pavimento compuesto. Fuente: Andrade Triviño y Francisco Puga (2019).

2.1.4. Tipos de intervención

Las intervenciones de rehabilitación en pavimentos flexibles varían según el estado de deterioro de la vía. Según Irfan et al. (2009), los tratamientos más comunes se definen de la siguiente manera:

Sobrecarpetas funcionales de mezcla asfáltica en caliente (HMA): Son capas delgadas de asfalto aplicadas principalmente para restaurar las características superficiales del pavimento (ver Ilustración 7), tales como la fricción, la seguridad y la comodidad al rodaje (rugosidad/IRI), sin aportar una capacidad estructural significativa al conjunto del paquete (Irfan et al., 2009).



Ilustración 7. Extendido manual de mezcla asfáltica en caliente para la conformación de la carpeta de rodadura. Fuente: Asfalto Farvias. Carpeta asfáltica en caliente.

Sobrecarpetas estructurales de mezcla asfáltica en caliente (HMA): Intervenciones diseñadas para incrementar la capacidad de carga del pavimento. Estas capas poseen un espesor mayor y están formuladas para reducir las deflexiones y aumentar la resistencia a la fatiga del pavimento frente a las cargas del tráfico (Irfan et al., 2009).

Reasfaltado (estándar 3R - Restauración, Resurfaciado y Rehabilitación): Consiste en un conjunto de técnicas enfocadas en restaurar la serviciabilidad del pavimento existente (ver Ilustración 8). Implica la reparación de daños superficiales y la colocación de nuevas capas asfálticas para devolver al pavimento las condiciones de diseño originales o mejoradas (Irfan et al., 2009).



Ilustración 8. Reparación localizada de un pavimento asfáltico mediante bacheo con mezcla asfáltica en caliente. Fuente: Asfaltos Tudefran, Estrategias para el mantenimiento y la reparación de pavimentos asfálticos.

Fresado profundo y colocación de concreto asfáltico: Proceso en el cual se remueve mecánicamente una capa significativa del pavimento deteriorado o envejecido como se muestra en la ilustración 9, para restablecer el perfil geométrico de la vía, seguido de la colocación de una nueva capa de mezcla asfáltica. Es altamente efectivo para eliminar fallas como el ahuellamiento y grietas que han penetrado profundamente (Irfan et al., 2009).



Ilustración 9. Fresado de un pavimento flexible como parte del proceso de rehabilitación vial. Fuente: EVERPADS. The Ultimate Guide to Asphalt Millings: What They Are and How to Use Them for Your Asphalt Milling Needs.

Materiales estabilizados con betún (BSM): Esta técnica consiste en la estabilización de materiales granulares (nuevos o recuperados) mediante la adición de emulsión asfáltica o betún espumado a temperatura ambiente, como se muestra en la ilustración 10. Los BSM actúan como capas de base o subbase con una cohesión mejorada que distribuye eficazmente las cargas, siendo una alternativa sostenible y de alto rendimiento que no requiere los procesos térmicos de las mezclas en caliente (SABITA, 2020).



Ilustración 10. Ejecución de la estabilización in situ de una base mediante la técnica de Materiales Estabilizados con Betún (BSM). Fuente: Autor.

2.1.5. Rehabilitación vs construcción nueva

La decisión entre optar por la rehabilitación o la construcción nueva depende de un análisis de costo-efectividad que considera los costos integrales para la agencia y el usuario. La rehabilitación busca restaurar la condición operativa y extender la vida útil del pavimento, siendo a menudo la opción más rentable a largo plazo en comparación con una reconstrucción total desde la subrasante (Irfan et al., 2009).

2.2. Estabilización de suelos

2.2.1. Estabilización mecánica

Consiste en la mezcla de suelos con distintas granulometrías y su posterior compactación como se muestra en la ilustración 11 para alcanzar una mayor densidad seca, reduciendo los vacíos y aumentando la fricción interna sin alterar la química del material (Das, 2015).



Ilustración 11. Estabilización mecánica de un suelo mediante conformación y compactación con rodillo vibratorio. Fuente: Construneic. Estabilización de suelos.

2.2.2. Estabilización química

Involucra la adición de agentes estabilizantes (ver Ilustración 12) que reaccionan químicamente con los minerales del suelo, alterando su plasticidad y formando enlaces interparticulares que incrementan permanentemente su resistencia (Little, 1995).



Ilustración 12. Aplicación de un estabilizante químico líquido durante el proceso de estabilización de suelos. Fuente: Compraco. Estabilización del suelo: métodos químicos y mecánicos.

2.3. Estabilización con emulsión asfáltica

2.3.1. Tipos de emulsión

Las emulsiones se clasifican principalmente por la carga eléctrica de sus partículas (catiónicas o aniónicas) y por su tiempo de velocidad de rotura (rápida, media o lenta), seleccionándose en función de la mineralogía del agregado y las condiciones climáticas (Asphalt Institute, 2008).

2.3.2. Mecanismo de cohesión

Este fenómeno se basa en la "rotura" de la emulsión, proceso mediante el cual el agua se separa del asfalto por evaporación o absorción, permitiendo que los glóbulos de betún se unan y se adhieran a las partículas del agregado tras la compactación (Asphalt Institute, 2008).

2.3.3. Comportamiento en suelos

La incorporación de la emulsión asfáltica incrementa de forma directa la cohesión del suelo, disminuye significativamente su permeabilidad y le otorga propiedades viscoelásticas que mejoran su respuesta ante las cargas del tráfico y reducen su susceptibilidad al agua (Asphalt Institute, 2008).

2.4. Estabilización con Cal

2.4.1. Mecanismo de reacción química

Al mezclar cal con suelos arcillosos en presencia de agua, se produce un intercambio iónico inmediato (floculación) seguido de una reacción puzolánica a largo plazo, donde la cal reacciona con la sílice y la alúmina disueltas del suelo para formar silicatos y aluminatos de calcio hidratados (Little, 1995).

2.4.2. Reducción de plasticidad

La floculación y aglomeración modifican la textura del suelo arcilloso, lo que disminuye drásticamente su Índice de Plasticidad (IP), mitiga el potencial de expansión y contracción, y mejora la trabajabilidad en obra (Little, 1995).

2.4.3. Mejora de propiedades mecánicas

Mejora de propiedades mecánicas: A través del proceso de curado y el desarrollo de los compuestos cementantes de la reacción puzolánica, el suelo estabilizado experimenta un aumento sostenido en su Valor de Soporte California (CBR) y en su resistencia a la compresión (Little, 1995).

2.5. Materiales estabilizados con betún (BSM)

2.5.1. Definición

Los BSM (*Bitumen Stabilised Materials*) son mezclas procesadas a temperatura ambiente compuestas por materiales granulares que pueden incluir asfalto reciclado

(RAP) tratados con bajas dosificaciones de betún espumado o emulsión asfáltica (SABITA, 2020).

2.5.2. Comportamiento mecánico

A diferencia del asfalto convencional, los BSM mantienen un comportamiento mecánico predominantemente friccional (regido por la fricción intergranular) pero con un incremento sustancial en su cohesión aparente aportado por la fase bituminosa (SABITA, 2020).

2.5.3. Diferencia con mezcla asfáltica

En una mezcla asfáltica en caliente, el ligante recubre por completo todos los agregados creando una matriz viscoelástica continua; en cambio, en los BSM el betún se dispersa selectivamente entre las fracciones más finas, actuando como "puntos de soldadura" entre los agregados gruesos (SABITA, 2020).

2.5.4. Materiales parcialmente ligados

Debido a su microestructura discontinua, los BSM se clasifican como materiales parcialmente ligados; esta condición evita la propagación de grietas por fatiga asociadas a capas rígidas, manteniendo una alta flexibilidad operativa (SABITA, 2020).

2.6. Metodología SABITA

La metodología SABITA actualmente es una referencia técnica para el diseño, caracterización y evaluación de materiales estabilizados con betún (BSM). La metodología presenta la guía técnica TG2, donde se establecen procedimientos que permiten determinar si un material es adecuado para ser estabilizado, definir las dosificaciones de los componentes y evaluar posteriormente el comportamiento mecánico de la mezcla obtenida. La metodología puede aplicarse tanto a materiales

granulares como a materiales recuperados de pavimentos existentes, considerando que las propiedades del material de partida tienen una influencia directa sobre el desempeño final de la estabilización (SABITA, 2020).

El diseño de un BSM requiere caracterizar previamente el material, analizar su granulometría y plasticidad, establecer las condiciones adecuadas de humedad y compactación y posteriormente preparar diferentes combinaciones de mezcla. Estas combinaciones son evaluadas mediante ensayos mecánicos que permiten seleccionar una dosificación que presente un equilibrio adecuado entre resistencia y comportamiento frente a la humedad (SABITA, 2020).

2.6.1. Principios de diseño

El manual técnico TG2 de la South African Bitumen Association establece lineamientos estructurales para clasificar y diseñar los BSM según las solicitudes de tráfico del proyecto y las propiedades mecánicas intrínsecas de los materiales (SABITA, 2020).

El diseño de materiales BSM parte del principio de que la incorporación de pequeñas cantidades de ligante bituminoso modifica el comportamiento del material granular sin transformarlo en una mezcla asfáltica convencional. El betún a utilizar se distribuye de manera discontinua dentro de la matriz generando puntos de unión que incrementan la cohesión del material mientras se conserva una parte importante de la resistencia asociada a la fricción interna entre las partículas (SABITA, 2020).

Por esta razón, el comportamiento de un BSM depende del ligante incorporado y de las características propias del material que se pretende estabilizar. La granulometría, cantidad y naturaleza de los finos, plasticidad, humedad y densidad alcanzada durante la compactación intervienen en la mezcla. La metodología TG2 considera estos

factores de manera conjunta, debido a que una dosificación que funciona adecuadamente para un determinado material no necesariamente producirá el mismo resultado al ser utilizada en otro con características diferentes (SABITA, 2020).

Cuando se utiliza emulsión asfáltica, el contenido de humedad adquiere especial importancia durante el proceso de diseño. El agua presente en el material y la contenida en la propia emulsión participan en el proceso de mezclado y permiten una adecuada distribución del ligante. La cantidad de agua disponible durante la preparación de la mezcla influye directamente en la compactación y en la distribución de la emulsión. Por esta razón durante el diseño no basta solamente con controlar la humedad al momento de compactar, sino que además debe considerarse el agua que aporta la propia emulsión. Cuando el material contiene finos, también puede incorporarse como filler activo. Su uso depende de las características iniciales del material, principalmente de su plasticidad y de la respuesta obtenida durante las pruebas de laboratorio (SABITA, 2020).

2.6.2. Criterios de selección de mezcla

Criterios de selección de mezcla: La dosificación óptima y la idoneidad de la mezcla se determinan evaluando la distribución granulométrica del material base, el Índice de Plasticidad de la fracción fina y el contenido óptimo de humedad de compactación (SABITA, 2020).

Antes de definir una dosificación se revisan las propiedades del material que será tratado, entre ellas su granulometría, plasticidad, contenidos de finos y condiciones de compactación. Con estos datos se establecen las combinaciones iniciales de ligante y filler que posteriormente se ensayan en laboratorio (SABITA, 2020). Para este proceso se preparan mezclas con distintos porcentajes de emulsión y cuando corresponde

diferentes cantidades de filler activo. Los resultados permiten observar cómo responde cada combinación tanto en resistencia como frente al acondicionamiento húmedo. Por ello, aumentar el porcentaje de ligante no significa necesariamente obtener un mejor comportamiento, y la dosificación debe definirse a partir de la comparación de los resultados de cada mezcla. La humedad y la compactación también forman parte de este proceso de selección. Las probetas utilizadas para comparar las distintas dosificaciones deben prepararse bajo condiciones controladas, procurando que las diferencias obtenidas en los ensayos correspondan principalmente a la composición de cada mezcla y no a variaciones en su preparación. De esta manera, la comparación entre alternativas permite identificar la combinación que presenta el comportamiento más conveniente para el material estudiado.

Por lo tanto, la dosificación óptima debe entenderse como el resultado de una evaluación conjunta y no como la selección basada en un único parámetro. Las propiedades iniciales del material, la cantidad de emulsión, la presencia de filler activo, la resistencia obtenida y la sensibilidad frente al agua deben analizarse de forma integral antes de definir la mezcla que será utilizada en obra (SABITA, 2020).

2.6.3. Parámetros de evaluación

Parámetros de evaluación: El diseño bajo la metodología TG2 exige alcanzar y validar umbrales mínimos de resistencia mecánica evaluados mediante ensayos de tracción bajo condiciones secas y saturadas para garantizar su durabilidad ante el daño por humedad. Uno de los ensayos empleados por SABITA para comparar mezclas BSM es la resistencia a la tracción indirecta (ITS), determinada tanto en probetas secas como en probetas sometidas a acondicionamiento húmedo (SABITA, 2020). El ITS Dry corresponde al resultado obtenido en condición seca y permite comparar la resistencia desarrollada por las distintas dosificaciones después de su preparación y curado. El

ITS Wet se obtiene luego del acondicionamiento en agua y muestra cuánto se reduce la resistencia bajo esta condición. Con ambos resultados se calcula el TSR mediante la relación:

$$\text{TSR} = (\text{ITS Wet} / \text{ITS Dry}) \times 100'$$

El TSR indica qué porcentaje de la resistencia seca conserva la mezcla después del acondicionamiento húmedo. Por ejemplo, dos mezclas pueden presentar valores similares de ITS Dry y comportarse de manera diferente después de permanecer en agua. Por esta razón, en la selección de la mezcla se analizaron conjuntamente ITS Dry, ITS Wet y TSR, en lugar de utilizar únicamente la resistencia obtenida en condición seca (SABITA, 2020).

Por tal motivo, estos parámetros no deben interpretarse de manera aislada. Una mezcla puede desarrollar una resistencia elevada en condición seca y, al mismo tiempo, experimentar una reducción importante después del acondicionamiento húmedo. De igual manera, un TSR elevado no necesariamente representa por sí solo una mezcla adecuada si los valores absolutos de resistencia son bajos. En consecuencia, la selección de la dosificación debe considerar conjuntamente los valores de ITS Dry, ITS Wet y TSR, además de las características iniciales del material y las condiciones previstas para su utilización.

2.7. Ensayos de laboratorio

2.7.1. Proctor Modificado

Este ensayo mecánico de laboratorio determina la relación exacta entre el contenido de agua y la densidad seca de un suelo o material granular bajo una energía de compactación estándar especificada, localizando la Densidad Máxima Seca (DMS) y la Humedad Óptima (Das, 2015). El ensayo consiste en aplicar mediante un martillo

golpes al suelo en diferentes capas a diferentes contenidos de humedad, de esta manera se grafica una curva en función de la densidad asociado a cada porcentaje de humedad.

2.7.2. CBR

El ensayo de Razón de Soporte de California evalúa la resistencia al esfuerzo cortante y la capacidad portante relativa de una muestra compactada en laboratorio, proporcionando un índice fundamental para el dimensionamiento de las capas del pavimento (Das, 2015).

En el caso de materiales destinados a capas de base y subbase, el CBR permite tener una referencia de su capacidad de soporte antes de realizar algún proceso de estabilización. El resultado se expresa como un porcentaje que relaciona la resistencia a la penetración del material ensayado con la de un material patrón (Das, 2015).

2.7.3. Resistencia a la Tracción Indirecta (ITS)

Es una prueba mecánica normalizada aplicada a los materiales estabilizados que mide la resistencia máxima a la tensión diametral de especímenes cilíndricos, permitiendo cuantificar la cohesión interna conferida por el ligante (SABITA, 2020).

En este estudio el ITS se utilizó para comparar la respuesta de las mezclas estabilizadas antes y después del contacto con agua. Para ello se ensayaron probetas en condición seca (ITS Dry) y probetas acondicionadas en húmedo (ITS Wet). La diferencia entre ambos resultados permitió identificar qué dosificaciones conservaban mejor su resistencia después del acondicionamiento y, por lo tanto, presentaban menor sensibilidad frente a la humedad (SABITA, 2020).

2.7.4. Triaxial isotrópico

Este ensayo avanzado permite determinar los parámetros fundamentales de resistencia al corte de los materiales (cohesión y ángulo de fricción interna) sometiendo la probeta

a diferentes presiones de confinamiento controladas para simular el comportamiento real bajo la estructura del pavimento (Das, 2015).

A diferencia de ensayos más sencillos, el ensayo triaxial permite analizar la respuesta del material bajo diferentes niveles de confinamiento, condición que representa de mejor manera el estado de esfuerzos al que se encuentra sometida una capa dentro de la estructura del pavimento.

2.8. Control de calidad en obra

2.8.1. Importancia

La implementación rigurosa de un plan de control de calidad es crucial porque minimiza la variabilidad constructiva, asegura que la estructura del pavimento alcance la vida útil proyectada y previene fallas prematuras que derivarían en altos costos de mantenimiento y rehabilitación (Huang, 2004).

2.8.2. Verificación de diseño

Este procedimiento consiste en corroborar en el campo que los parámetros mecánicos y volumétricos asumidos durante el diseño en laboratorio —tales como la densidad objetivo, el contenido óptimo de humedad y la correcta dosificación de ligantes— se repliquen de manera exacta durante la colocación y compactación de los materiales (South African Bitumen Association (SABITA, 2020).

2.8.3. Ensayos de control de calidad

Involucra la ejecución continua de pruebas normalizadas *in situ* e inspecciones de laboratorio, tales como la medición de densidades mediante densímetro nuclear, el ensayo de cono de arena, la extracción de núcleos asfálticos y la verificación de espesores, los cuales permiten certificar la aceptación o exigir la corrección del tramo construido basándose en las tolerancias de la norma (FHWA, 2006).

CAPÍTULO III

3. METODOLOGÍA

3.1. Ubicación del proyecto

El presente proyecto de rehabilitación vial se desarrollará geográficamente en la región litoral del Ecuador, específicamente dentro de la jurisdicción de la Provincia del Guayas. El tramo de estudio corresponde a la vía conocida como La Victoria - T de Baba (ver Ilustración 13), la cual se localiza a una distancia aproximada de una hora desde la ciudad de Guayaquil. Este corredor vial, de vital importancia para la conectividad local, comprende una longitud total aproximada de 20 kilómetros, a lo largo de los cuales se implementarán las técnicas de estabilización propuestas en esta investigación.

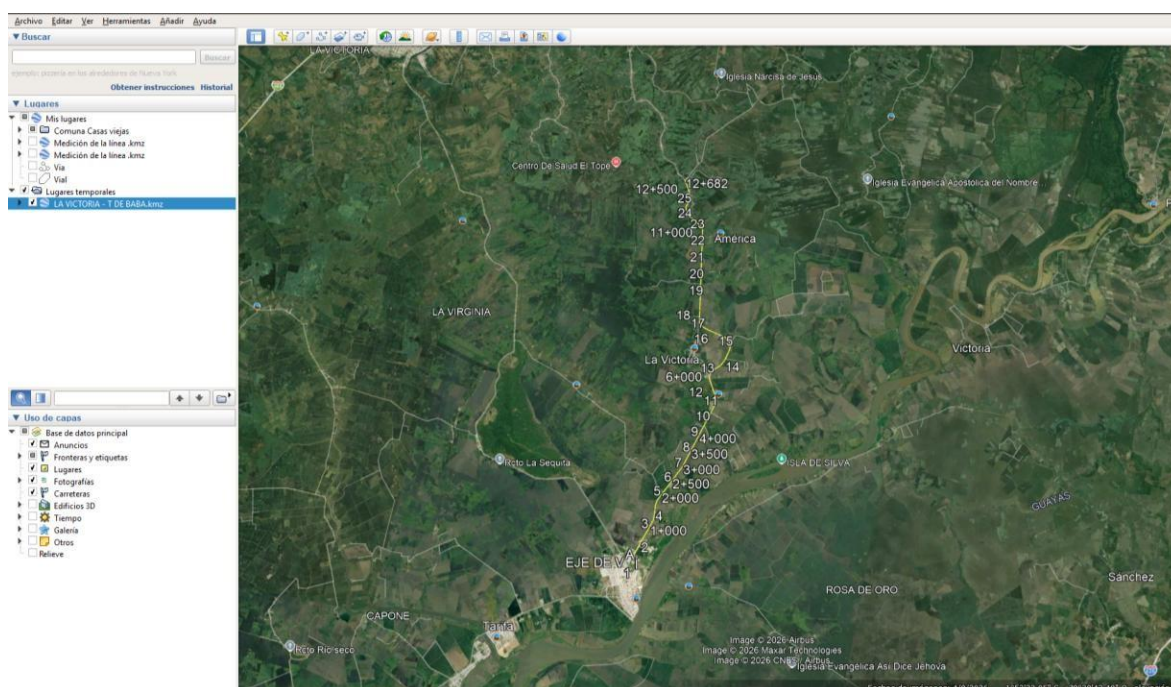


Ilustración 13. Ubicación de las calicatas ejecutadas a lo largo de la vía La Victoria – T de Baba.

Fuente: Google Maps.

3.2. Exploración geotécnica

La exploración geotécnica se realizó mediante 25 calicatas distribuidas a lo largo de los aproximadamente 20 km del tramo La Victoria–T de Baba. En cada punto se inspeccionó la estructura existente y se obtuvieron muestras de los materiales encontrados. Las muestras recuperadas fueron trasladadas al laboratorio para realizar los ensayos de caracterización correspondientes. Con esta información se pudo reconocer la variación de los materiales presentes a lo largo del proyecto y seleccionar el material utilizado posteriormente en el diseño de la estabilización.



Ilustración 14. Exploración geotécnica mediante la ejecución de calicatas en la vía La Victoria – T de Baba. Fuente: Autor.

3.3. Caracterización del suelo

La caracterización técnica de los materiales extraídos permitió determinar sus propiedades físicas y mecánicas intrínsecas (granulometría, plasticidad y capacidad de soporte), con el fin de evaluar su aptitud para la reutilización en la rehabilitación vial.

Esta etapa constituye el fundamento para el diseño de las mezclas BSM, estableciendo una línea base de referencia que permite cuantificar la mejora obtenida tras la incorporación de emulsión asfáltica, en el caso de nuestro diseño se implementó emulsión de curado lento y cal en las diferentes dosificaciones evaluadas.

3.3.1. Clasificación

Se ejecutaron ensayos de clasificación del material base, rigiéndose de manera estricta por las normativas vigentes ASTM D1140 / ASTM C136. Mediante estos procedimientos, se logró determinar la distribución granulométrica exacta de las partículas que componen el suelo como podemos ver en la tabla 1 y en la ilustración 15 a continuación, así como establecer sus índices de plasticidad.

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO					LÍMITES DE MATERIAL		
ASTM - D1140 / ASTM C-136					MOP 2002		
TAMIZ		RETENIDO PARCIAL (g)	RETENIDO PARCIAL (%)	RETENIDO ACUMULADO (%)	PASANTE ACUMULADO (%)	MÍNIMO (%)	MÁXIMO (%)
ASTM	mm						
4"	100.0	0.0	0.0	0.0	100.0	-	-
3"	75.0	0.0	0.0	0.0	100.0	-	-
2"	50.8	0.0	0.0	0.0	100.0	100	100
1 ½"	38.1	0.0	0.0	0.0	100.0	70	100
1"	25.4	626.3	15.5	15.5	84.5	55	85
¾"	19.05	228.9	5.7	21.2	78.8	50	80
⅜"	9.53	697.7	17.3	38.5	61.5	35	60
No. 4	4.75	864.2	21.4	59.9	40.1	25	50
No. 10	2.00	653.9	16.2	76.2	23.8	20	40
No.40	0.43	377.3	9.4	85.5	14.5	10	25
No.200	0.08	208.2	5.2	90.7	9.3	2	12
TOTAL, MUESTRA		4032.7 gr.					

Tabla 1. Clasificación del material de Base Clase 1A.

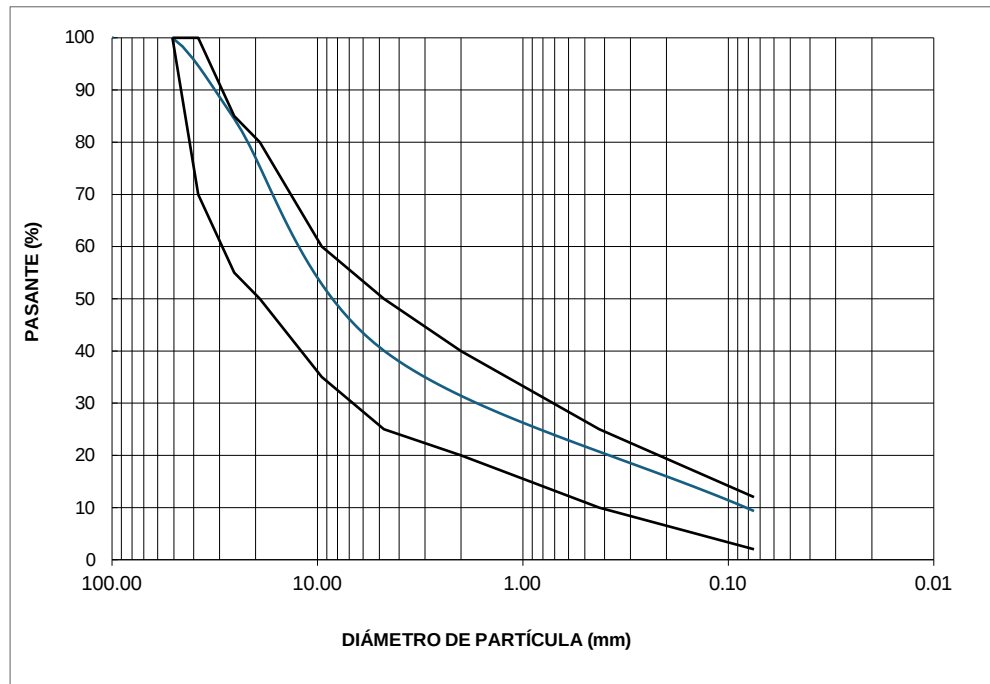


Ilustración 15. Curva granulométrica.

3.3.2. Proctor

Con el propósito de definir los parámetros de densificación del suelo, se llevaron a cabo ensayos de compactación tipo Proctor Modificado, siguiendo los lineamientos técnicos establecidos en la norma ASTM D1557. La aplicación de este estándar permitió calcular con precisión tanto la humedad óptima de compactación como la densidad seca máxima del material de estudio.

3.3.3. CBR

Para evaluar la resistencia al esfuerzo cortante del suelo, se ejecutó el ensayo CBR para esto se utilizó la máquina de penetración CBR (ver Ilustración 16). Este procedimiento fue determinante para cuantificar la capacidad de soporte del material existente, corroborando así su viabilidad técnica para ser sometido al proceso de estabilización y su posterior reutilización como base estructural.



Ilustración 16. Equipo utilizado para la ejecución del ensayo CBR en laboratorio. Fuente: Autor.

3.4. Diseño de mezcla estabilizada

El diseño ingenieril de la mezcla se fundamentó enteramente en las propiedades físicas y mecánicas obtenidas del material clasificado como Base Clase 1A. Tras la caracterización previa, se determinaron las propiedades de este material, concluyendo que presentaba condiciones satisfactorias para la rehabilitación de la infraestructura vial mediante la implementación de la técnica BSM.

En la fase de laboratorio, se prepararon múltiples combinaciones variando de manera sistemática los porcentajes de adición de cal, RAP (Reclaimed Asphalt Pavemente) y

emulsión asfáltica con el fin de identificar la dosificación que presentara el mejor comportamiento mecánico.

3.4.1. Dosificación

La dosificación de la mezcla estabilizada se planteó mediante la evaluación de diferentes contenidos de cal, RAP y emulsión asfáltica, con el propósito de identificar la combinación que presentara un comportamiento mecánico adecuado para las condiciones del material de base analizado. Para esto, se mantuvo como material de partida la Base Clase 1A previamente caracterizada y el material de RAP, variando únicamente los porcentajes de los agentes estabilizantes incorporados a la mezcla.

Como parte del proceso de evaluación se consideraron inicialmente mezclas de referencia elaboradas únicamente con emulsión asfáltica, sin incorporación de cal, utilizando contenidos de emulsión de 2 %, 3 % y 4 %. Estas mezclas permitieron disponer de un punto de comparación para posteriormente analizar el efecto que producía la incorporación de cal sobre la resistencia y la conservación de las propiedades mecánicas del material ante la presencia de humedad.

Posteriormente, se elaboraron nueve combinaciones adicionales mediante la incorporación de tres porcentajes de cal, correspondientes a 1 %, 2 % y 3 %, combinados con contenidos de emulsión asfáltica de 2 %, 3 % y 4 %. De esta manera, fue posible evaluar de forma progresiva la influencia de ambos componentes y determinar si el incremento de alguno de ellos se traducía necesariamente en una mejora del comportamiento del BSM.

Para cada dosificación se elaboraron probetas bajo condiciones similares de preparación, mezclado, compactación y curado, procurando mantener constantes estas variables para que las diferencias obtenidas en los ensayos pudieran asociarse

principalmente a la modificación de los porcentajes de cal y emulsión asfáltica. Las probetas correspondientes a las diferentes alternativas evaluadas se muestran en la Ilustración 17.



Ilustración 17. Probetas elaboradas con las diferentes dosificaciones de cal y emulsión asfáltica para el diseño de la mezcla BSM. Fuente: Autor.

3.4.2. Metodología SABITA

Todo el proceso de diseño y desarrollo de las mezclas se rigió bajo los estrictos lineamientos normativos establecidos por la metodología SABITA. Adicionalmente, la ejecución de las pruebas se apoyó en los procedimientos descritos en el *Laboratory Handbook Wirtgen*, tomando en consideración todos los criterios exigidos para los materiales estabilizados con betún (BSM).

Esta metodología establece una secuencia de actividades que comprende la caracterización del material, la selección de las dosificaciones de estabilizante, la elaboración y compactación de probetas, el curado y la evaluación mecánica de las mezclas, con el propósito de seleccionar la dosificación que presente el mejor desempeño estructural.

Como material base se empleó la Base Clase 1A, previamente caracterizada mediante ensayos de clasificación, Proctor y CBR. En base a los resultados obtenidos de dicho material se establecieron las condiciones iniciales para el diseño de la mezcla.

El procedimiento de diseño establece la preparación controlada de especímenes de laboratorio que permitan comparar el comportamiento de las diferentes dosificaciones bajo las mismas condiciones de fabricación para esto se elaboraron 6 probetas por cada mezcla de diseño, de manera que pudiésemos evaluar 3 a condición seca y 3 a condición húmeda.

Para la elaboración de estas probetas usamos moldes cilíndricos desmontables con un diámetro interior de $152 \pm 0,5$ mm y una altura mínima de 120mm. La probeta finalmente debía tener una altura aproximada de 95 mm.

La compactación debía realizarse mediante un martillo vibratorio, el cual transmite energía al material colocado dentro del molde. El sistema de compactación debe mantener el martillo en posición vertical y emplear una masa suspendida total de aproximadamente $33 \pm 0,5$ kg, considerando el elemento de compactación. Mediante este procedimiento se busca reproducir de manera más aproximada el mecanismo de densificación que experimenta el material durante la compactación en obra.

Para una probeta ITS de 95 mm de altura, el material se compacta normalmente en dos capas, cada una con un espesor compactado aproximado de 47,5 mm. La cantidad de mezcla correspondiente a la primera capa se introduce en el molde y se distribuye uniformemente antes de aplicar el martillo vibratorio. La compactación continúa hasta alcanzar la altura establecida para dicha capa.

Una vez terminada la primera capa, su superficie se rugosa o escarifica antes de colocar el material correspondiente a la segunda capa. Este procedimiento permite

generar una superficie irregular esto con el fin de lograr un mejor agarre entre capas. Posteriormente se incorpora la segunda porción de material y se repite el proceso de compactación hasta alcanzar la altura total aproximada de 95 mm.

El tiempo de compactación no corresponde a un periodo fijo que deba aplicarse necesariamente a cada capa, debido a que el criterio principal consiste en alcanzar el espesor requerido. Sin embargo, SABITA establece un tiempo máximo de compactación de 120 segundos por capa.

En condiciones normales, por lo tanto, los especímenes utilizados para el ensayo ITS presentan las siguientes características: diámetro de $152 \pm 0,5$ mm, altura final de 95 mm, compactación en dos capas de aproximadamente 47,5 mm cada una, mediante martillo vibratorio y con un tiempo máximo de vibración de 120 segundos por capa.

Si durante la compactación se observa separación entre capas, puede aumentarse el número de capas con el fin de obtener una probeta uniforme. Terminada la compactación, los especímenes permanecen en los moldes durante aproximadamente cuatro horas antes de ser desmoldados. Después se identifican y se colocan en el horno para iniciar el curado.

Las probetas destinadas al ensayo ITS se curan en un horno con circulación forzada de aire a 40 ± 1 °C durante un mínimo de 72 horas. Cumplido este tiempo se registra su masa y se mantienen cuatro horas adicionales en el horno. Cuando la pérdida de masa supera 10 g, el secado se prolonga hasta obtener una variación suficientemente pequeña. Posteriormente se dejan enfriar hasta una temperatura cercana a 25 °C.

Para determinar ITS Dry se ensayan las probetas conservadas en condición seca. Las correspondientes a ITS Wet se mantienen sumergidas en agua durante 24 horas a una

temperatura aproximada de 25 °C. Al finalizar el acondicionamiento se retiran del agua, se elimina el exceso superficial y se realiza el ensayo.

Durante este periodo, las probetas deben permanecer completamente sumergidas.

Al finalizar las 24 horas de acondicionamiento, las probetas húmedas son retiradas del agua, se elimina el exceso superficial y se procede inmediatamente a la ejecución del ensayo de resistencia a la tracción indirecta.

Para la interpretación de los resultados obtenidos mediante el ensayo de resistencia a la tracción indirecta, se consideraron los límites recomendados por la metodología SABITA TG2 para la clasificación de los materiales estabilizados con betún.

Los resultados de ITS se compararon con los valores de referencia indicados en TG2. Para BSM1 se requiere un ITS Dry mayor a 225 kPa y un ITS Wet mayor a 125 kPa; para BSM2, los valores de referencia son mayores a 175 kPa y 100 kPa, respectivamente. Estos límites se utilizaron como criterio para revisar el nivel de resistencia alcanzado por las mezclas estudiadas.

Clasificación	ITS Dry (kPa)	ITS Wet (kPa)
BSM1	>225	>125
BSM2	>175	>100

Tabla 2. Parámetros de aceptación de diseño.

Dentro de estos parámetros, el ITS Wet adquiere especial importancia, debido a que permite evaluar la capacidad del material estabilizado para conservar su resistencia después de haber permanecido sometido a la acción del agua. Por esta razón, SABITA establece que la selección del tipo de filler activo debe orientarse principalmente al cumplimiento y optimización del ITS Wet, aunque los resultados obtenidos en

condición seca y los demás parámetros de comportamiento deben analizarse conjuntamente.

Como parámetro complementario se determinó la relación de resistencia a la tracción retenida, TSR (Tensile Strength Ratio), calculada mediante la relación entre el ITS Wet y el ITS Dry

El TSR representa el porcentaje de resistencia que conserva la mezcla después del acondicionamiento húmedo. Un valor cercano al 100 % indica una menor pérdida de resistencia por efecto del agua, mientras que un valor reducido evidencia una mayor sensibilidad de la mezcla frente a la humedad. Sin embargo, la edición TG2 de SABITA de 2020 no establece un valor mínimo de TSR como criterio independiente para clasificar una mezcla como BSM1 o BSM2.

La evaluación conjunta de los resultados obtenidos en condición seca y húmeda permite determinar la sensibilidad de cada dosificación frente a la humedad y constituye uno de los criterios empleados para comparar las diferentes mezclas elaboradas. Posteriormente, estos resultados son utilizados conjuntamente con los demás parámetros mecánicos para seleccionar la dosificación que presente el comportamiento más adecuado.

3.4.3. Selección de mezcla óptima

Se prepararon doce dosificaciones, obtenidas mediante la combinación de cuatro porcentajes de cal (0%, 1%, 2%, 3%) con tres porcentajes de emulsión asfáltica (2%, 3% y 4%). La preparación de cada mezcla inicio con la incorporación de cal al material granular seco, asegurando una distribución homogénea, posteriormente se incorporó la emulsión asfáltica con la ayuda de un aspersor para garantizar su homogénea

distribución sobre todas las partículas del agregado, este proceso de mezclado lo podremos observar en la ilustración 18.



Ilustración 18. Proceso de mezclado y homogeneización manual del material granular posterior a la incorporación de cal y emulsión asfáltica. Fuente: Autor.

Una vez obtenida la mezcla, el material se colocó en moldes cilindros y compactado utilizando el procedimiento recomendado por la metodología SABITA, aplicando la misma energía y condiciones de compactación para todas las dosificaciones, con el fin de garantizar la uniformidad de las probetas y permitir una comparación objetiva entre los diferentes diseños evaluados. Finalizada la compactación, las briquetas fueron desmoldadas (ver Ilustración 19) y sometidas al periodo de curado correspondiente antes de la ejecución de los ensayos mecánicos.



Ilustración 19. Probeta de mezcla BSM compactada en molde cilíndrico, previo al proceso de desmoldeo y curado. Fuente: Autor.

La determinación definitiva de la mezcla óptima se efectuó a través de un análisis del desempeño mecánico exhibido durante los ensayos de laboratorio. El criterio principal de evaluación fue la Resistencia a la Tracción Indirecta (ITS), cuyos valores fueron analizados y complementados con los resultados arrojados por los ensayos triaxiales isotrópicos.

3.5. Evaluación mecánica

Con el propósito de verificar de manera integral el comportamiento del material estabilizado, se programó y ejecutó la siguiente serie de ensayos:

3.5.1. Ensayo ITS

Se procedió a determinar la resistencia a la tracción indirecta (ver Ilustración 20) para cada una de las diferentes dosificaciones elaboradas. Este ensayo resultó esencial para evaluar cuantitativamente la cohesión interna adquirida por el material y el comportamiento general de la matriz BSM.



Ilustración 20. Probeta cilíndrica de mezcla BSM durante la ejecución del ensayo de resistencia a la tracción indirecta (ITS). Fuente: Autor.

3.5.2. Ensayo Triaxial Isotrópico

Para simular el estado de tensiones en la estructura, se efectuaron ensayos triaxiales isotrópicos (Tx-ISO). Las probetas destinadas exclusivamente a estos ensayos fueron elaboradas y ensayadas en las instalaciones de la Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL). Estas pruebas permitieron evaluar el comportamiento mecánico del material estabilizado bajo la influencia de diferentes condiciones de confinamiento

correspondientes a 0, 50, 100 y 200 kPa, tanto en condición sin remojar como remojada, las probetas elaboradas las podemos observar en la Ilustración 21, mismas que se ensayaron en la máquina que logramos observar en la ilustración 22.



Ilustración 21. Probetas cilíndricas de mezcla BSM compactadas en laboratorio, debidamente identificadas y preparadas para la ejecución de ensayos triaxiales. Fuente: Autor.



Ilustración 22. Equipo de ensayo triaxial empleado para la caracterización mecánica de mezclas BSM.

Fuente: Autor.

3.6. Control de calidad

Una vez seleccionado el diseño más favorable en laboratorio, se procedió a implementar un control de calidad sistemático durante la ejecución de la obra. Dicho control se llevó a cabo mediante la extracción de muestras representativas por cada tramo intervenido y la ejecución regular de ensayos ITS. El propósito de esta supervisión continua fue verificar que el material colocado en campo cumpliera rigurosamente con los parámetros mecánicos y físicos definidos durante la etapa inicial de diseño.

3.7. Metodología del análisis económico

Como componente final del estudio, se efectuó un análisis comparativo pormenorizado entre la alternativa tecnológica de estabilización mediante BSM y un método tradicional de rehabilitación, el cual se basa en el reemplazo completo de la base existente. Para tal fin, se identificaron y compararon detalladamente los costos asociados a los materiales, el transporte, la maquinaria requerida y los procesos de ejecución. El objetivo de este contraste fue evaluar integralmente la viabilidad técnica y económica de la solución propuesta frente a las prácticas convencionales.

CAPÍTULO IV

4. RESULTADOS Y ANALISIS

4.1. Caracterización del Pavimento Existente

Los resultados de caracterización evidenciaron una estructura variable a lo largo del tramo evaluado (Tabla 3). Predominan los materiales granulares con presencia de finos, clasificados principalmente como GC, GP-GC, GC-GM y GM-GC. En varios puntos se identificaron estratos cohesivos de baja, media y alta plasticidad mismos que corresponden a materiales CL, CH y ML, estos estaban ubicados generalmente en los niveles inferiores de las calicatas.

Calicata	Muestra	Profundidad	Material predominante	SUCS	H. óptima (%)	Densidad seca máx. (kg/m ³)	CBR (%)
C1	M1	0.10 - 0.30	Grava arcillosa con arena	GC	-	-	-
	M2	0.30 - 0.50	Grava arcillosa con arena	GC	-	-	-
	M3	0.50 - 1.10	Grava arcillosa con arena	GC	-	-	-
	M4	1.10 - 1.50	Arcilla alta plasticidad	CH	18.1	1671	2
C2	M1	0.07 - 0.57	Grava limosa arcillosa con arena	GM-GC-GM	-	-	-
	M2	0.57 - 1.37	Grava limosa arcillosa con arena	GP-GC	-	-	-
	M3	1.37 - 1.60	Arcilla media plasticidad	CL	11.5	1796	2

C3	M1	0.07 - 0.37	Grava limosa arcillosa con arena	GM-GC-GM	-	-	-
	M2	0.37 - 1.27	Grava arcillosa con arena	GP-GC	-	-	-
	M3	1.27 - 1.60	Arcilla alta plasticidad	CH	16.1	1664	2
C4	M1	0.10 - 0.50	Grava limosa arcillosa con arena	GC-GM	-	-	-
	M2	0.50 - 1.10	Grava arcillosa con arena	GC	-	-	-
	M3	1.10 - 1.50	Arcilla alta plasticidad	CH	15.1	1719	2
C5	M1	0.10 - 0.50	Grava limosa arcillosa con arena	GP-GC	-	-	-
	M2	0.50 - 2.00	Grava arcillosa con arena	GP-GC	12.9	2124	15
C6	M1	0.07 - 0.47	Grava limosa con arena	GM	-	-	-
	M2	0.47 - 0.87	Grava limosa con arena	GP-GM	-	-	-
	M3	0.87 - 1.50	Arcilla alta plasticidad	CH	21.5	1550	2
C7	M1	0.07 - 0.27	Grava limosa arcillosa con arena	GP-GC	-	-	-
	M2	0.27 - 0.87	Grava limosa con arena	GP-GM	-	-	-
	M3	0.87 - 1.50	Arcilla alta plasticidad	CH	29,0	1491	2

C8	M1	0.07 - 0.47	Grava arcillosa con arena	GC	-	-	-
	M2	0.47 - 1.07	Grava arcillosa con arena	GC	-	-	-
	M3	1.07 - 1.50	Arcilla alta plasticidad	CH	15.6	1706	3
C9	M1	0.07 - 0.47	Grava con arena	GW	-	-	-
	M2	0.47 - 0.87	Grava con arena	GW	-	-	-
	M3	0.87 - 1.50	Arcilla media plasticidad con grava	CL	19	1644	2
C10	M1	0.07 - 0.37	Grava arcillosa con arena	GP-GC	-	-	-
	M2	0.37 - 0.97	Grava limosa arcillosa	GC-GM	-	-	-
	M3	0.97 - 1.50	Arcilla media plasticidad	CL	14.5	1805	1
C11	M1	0.08 - 0.38	Grava limosa arcillosa con arena	GP-GC	-	-	-
	M2	0.38 - 0.98	Grava limosa arcillosa con arena	GC-GM	-	-	-
	M3	0.98 - 1.50	Arcilla alta plasticidad	CH	16	1704	1
C12	M1	0.10 - 0.50	Grava limosa arcillosa con arena	GC-GM	-	-	-
	M2	0.50 - 1.20	Grava limosa arcillosa con arena	GM-GC-GM	-	-	-

	M3	1.20 - 1.70	Grava con limo	GP-GM	-	-	-
	M4	1.70 - 2.00	Arcilla alta plasticidad con arena	CH	16	1763	2
C13	M1	0.07 - 0.47	Grava limosa arcillosa con arena	GC-GM	-	-	-
	M2	0.47 - 0.67	Grava limosa arcillosa con arena	GW-GC	-	-	-
	M3	0.67 - 1.07	Grava limosa arcillosa	GM-GC-GM	-	-	-
	M4	1.07 - 1.50	Arcilla media plasticidad	CL	10	1872	2
C14	M1	0.07 - 0.47	Grava limosa arcillosa con arena	GP-GC	-	-	-
	M2	0.47 - 1.50	Grava limosa arcillosa con arena	GP-GC	-	-	-
C15	M1	0.07 - 0.42	Grava limosa arcillosa con arena	GP-GC	-	-	-
	M2	0.42 - 0.92	Grava limosa con arena	GP-GM	-	-	-
	M3	0.92 - 1.50	Grava mal graduada	GP	10.8	1968	9
C16	M1	0.07 - 0.57	Grava limosa con arena	GM	-	-	-
	M2	0.57 - 1.67	Grava limosa con arena	GW-GM	-	-	-

C17	M1	0.07 - 0.47	Grava limosa con arena	GW-GM	-	-	-
	M2	0.47 - 0.87	Grava arcillosa con arena	GC	-	-	-
	M3	0.87 - 1.50	Arcilla baja plasticidad	CL	13.7	1786	1
C18	M1	0.07 - 0.37	Grava limosa arcillosa con arena	GC-GM	-	-	-
	M2	0.37 - 0.97	Grava arcillosa con arena	GC	-	-	-
	M3	0.97 - 1.50	Arcilla media plasticidad con grava	CL	16.5	1640	2
C19	M1	0.07 - 0.47	Grava limosa arcillosa con arena	GC-GM	-	-	-
	M2	0.47 - 0.87	Grava arcillosa con arena	GC	-	-	-
	M3	0.87 - 1.50	Arcilla alta plasticidad	CH	22.9	1606	2
C20	M1	0.07 - 0.47	Grava limosa arcillosa con arena	GM-GC-GM	-	-	-
	M2	0.47 - 0.87	Grava arcillosa con arena	GP-GC	-	-	-
	M3	0.87 - 1.50	Arcilla alta plasticidad	CH	18	1690	1
C21	M1	0.07 - 0.47	Grava limosa arcillosa con arena	GC-GM	-	-	-
	M2	0.47 - 0.87	Grava arcillosa con arena	GC	-	-	-

	M3	0.87 - 1.50	Limo de baja plasticidad	ML	20.2	1557	3
C22	M1	0.07 - 0.57	Grava limosa arcillosa con arena	GC-GM	-	-	-
	M2	0.57 - 0.97	Grava limosa arcillosa con arena	GM-GC-GM	-	-	-
	M3	0.97 - 1.50	Arcilla arenosa media plasticidad	CL	18.6	1497	3
C23	M1	0.07 - 0.47	Grava arcillosa con arena	GP-GC	-	-	-
	M2	0.47 - 1.17	Grava arcillosa con arena	GC	-	-	-
	M3	1.17 - 1.50	Arcilla media plasticidad	CL	25	1472	5
C24	M1	0.07 - 0.67	Grava limosa arcillosa con arena	GC-GM	-	-	-
	M2	0.67 - 1.07	Grava arcillosa con arena	GC	-	-	-
	M3	1.07 - 1.50	Arena bien graduada con arcilla y grava	SW-SC	17	1746	15
C25	M1	0.07 - 0.47	Grava arcillosa con arena	GP-GC	-	-	-
	M2	0.47 - 1.50	Limo arenoso de baja plasticidad	ML	16	1714	12

Tabla 3. Resultados obtenidos de la exploración geotécnica.

En términos generales, la caracterización evidencia una importante variabilidad de los materiales presentes en la estructura del pavimento. Sin embargo, la capa de base estuvo constituida predominantemente por materiales granulares, mientras que los estratos inferiores correspondieron principalmente a suelos cohesivos de menor capacidad de soporte.

4.2. Caracterización del material de Base Clase 1A

Se realizaron los ensayos de laboratorio para determinar las propiedades físicas y mecánicas del material de Base Clase 1A, las cuales sirvieron como parámetros de entrada para el diseño de la mezcla estabilizada mediante metodología SABITA, en la Tabla 4 podremos observar dichos parámetros.

Ensayo	Resultado
Clasificación SUCS	GP-GC
Clasificación AASHTO	A-1-a
Densidad Seca Máxima	2167
Humedad Óptima	10.0%
CBR%	83%

Tabla 4. Resultados obtenidos de caracterización material Base Clase 1A

Los resultados del ensayo CBR evidenciaron que el material de Base Clase 1A presentaba una capacidad de soporte adecuada para ser considerado dentro del proceso de estabilización mediante emulsión asfáltica y cal.

4.3. Resultados del diseño de mezcla

Con el fin de determinar la dosificación óptima del material estabilizado, se evaluaron doce combinaciones de contenido de cal y emulsión asfáltica. Para cada mezcla se determinó la resistencia a la tracción indirecta en condición seca (ITSDRY) la resistencia a la tracción indirecta en condición húmeda (ITSWET), la relación de resistencia conservada (TSR) y la densidad aparente los resultados obtenidos se

presentan en la tabla 5.

RESUMEN DISEÑOS DE BSM					
Porcentajes de material		ITS _{DRY} [kPa]	ITS _{WET} [kPa]	TSR %	Y _{APARENTE}
0 % CAL	2 % EMULSIÓN	129,8	56,0	43,1	2,232
0 % CAL	3 % EMULSIÓN	136,6	77,9	57,0	2,245
0 % CAL	4 % EMULSIÓN	105,1	52,3	49,8	2,220
1 % CAL	2 % EMULSIÓN	196,4	184,3	93,8	1,942
1 % CAL	3 % EMULSIÓN	212,1	196,7	92,8	1,950
1 % CAL	4 % EMULSIÓN	205,8	194,8	94,7	1,942
2 % CAL	2 % EMULSIÓN	204,8	196,3	95,8	1,948
2 % CAL	3 % EMULSIÓN	218,8	206,4	94,3	1,973
2 % CAL	4 % EMULSIÓN	211,0	202,2	95,8	2,084
3 % CAL	2 % EMULSIÓN	271,3	208,7	76,9	2,130
3 % CAL	3 % EMULSIÓN	272,5	223,5	82,0	2,115
3 % CAL	4 % EMULSIÓN	240,7	190,0	78,9	2,110

Tabla 5. Resultados diseños BSM.

Los resultados muestran que el incremento del contenido de cal produjo un aumento de la resistencia a la tracción indirecta en condición seca. Sin embargo, cuando el contenido de cal se incrementó hasta 3%, el valor de TSR disminuyó considerablemente, indicando una mayor susceptibilidad del material a la acción del agua.

Considerando conjuntamente la resistencia en condición seca, la resistencia en condición húmeda, el porcentaje de resistencia conservada y la densidad aparente, se seleccionó la mezcla compuesta por 2% de cal y 3% de emulsión asfáltica, por presentar el comportamiento más equilibrado para las condiciones del proyecto, cumpliendo con los criterios establecidos por la metodología SABITA.

4.4. Resultados de ensayos mecánicos

Con el fin de complementar la evaluación mecánica del material estabilizado seleccionado, se realizaron ensayos triaxiales isotrópicos sobre la mezcla optima obtenida mediante metodología SABITA, con el propósito de evaluar el comportamiento mecánico del BSM bajo diferentes presiones de confinamiento, estos resultados obtenidos podemos observarlos en la Tabla 6 e Ilustración 23.

Presión de confinamiento σ_3 (kPa)	Esfuerzo de rotura σ_1 (kPa) Sin remojar	Esfuerzo de rotura σ_1 (kPa) Remojado
0	2249.68	1942.02
50	3435.09	2597.27
100	3465.08	2944.01
200	4327.70	3569.07

Tabla 6. Parámetros obtenidos del ensayo triaxial de la mezcla BSM de diseño.

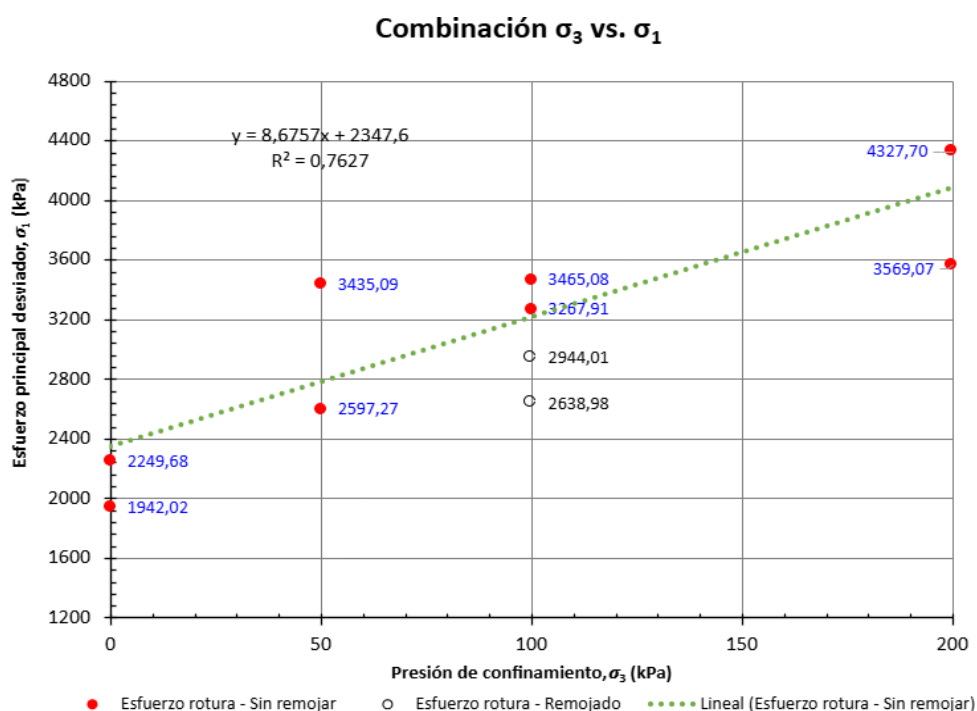


Ilustración 23. Relación entre presión de confinamiento y esfuerzo principal desviador del material

BSM. Fuente: Autor

Los resultados de la Tabla 6 muestran que el esfuerzo de rotura aumentó al incrementar la presión de confinamiento. En las muestras sin remojar se obtuvo 2249,68 kPa para 0 kPa de confinamiento y 4327,70 kPa para 200 kPa. En las muestras remojadas los resultados fueron menores para las cuatro presiones aplicadas; sin embargo, se mantuvo el incremento de resistencia al aumentar el confinamiento.

Parámetro Resistente	Valor Obtenido
Cohesión (c)	399 kPa
Ángulo de fricción (Φ)	52°
Cohesión retenida	75 kPa

Tabla 7. Parámetros resistentes obtenidos mediante ensayo triaxial de la mezcla estabilizada.

Del análisis triaxial se obtuvo una cohesión de 399 kPa y un ángulo de fricción interna de 52°. Además, la cohesión retenida fue de 75 kPa. Estos resultados muestran que, después del acondicionamiento húmedo, el material perdió parte de la cohesión obtenida con la estabilización, aunque mantuvo una componente cohesiva medible.

4.5. Resultados de control de calidad en obra

Durante la ejecución de la estabilización se realizaron controles de calidad a lo largo del tramo intervenido mediante la toma de muestras representativas del material BSM producido en obra. Los resultados obtenidos permitieron evaluar la humedad y densidad seca del material, así como su resistencia a la tracción indirecta en condición seca (ITS Dry) y húmeda (ITS Wet). Adicionalmente, se determinó la relación de resistencia conservada (TSR) para evaluar el comportamiento del material frente a la humedad.

Como se logra observar en la tabla 7, los resultados presentaron variaciones a lo largo de todo el tramo intervenido. Los valores promedio de ITS Dry se encontraron entre 38,0 y 330,4 kPa, mientras que los valores promedio de ITS Wet variaron entre 28,3

y 248,4 KPa. Esta amplitud evidencia diferencias en la resistencia conservada después del acondicionamiento húmedo presento un comportamiento relativamente uniforme.

Tramo	Abscisa	Fecha	Humedad (%)	Densidad seca prom. (g/cm³)	ITS Dry prom. (kPa)	ITS Wet prom. (kPa)	TSR (%)
A	0+580	29/05/2026	7.5	2.056	111.2	85.2	76.6
B	1+240	01/06/2026	6.2	2.085	201.9	154.6	76.5
C	2+030	03/06/2026	5.4	2.074	99.7	75.6	75.8
D	3+500	04/06/2026	7.9	2.051	86.2	68.1	79.0
E	4+100	08/06/2026	5.9	1.896	68.2	51.9	76.1
F	5+250	11/06/2026	5.7	1.989	153.4	118.4	77.2
G	6+480	15/06/2026	7.4	2.051	81.5	61.3	75.2
H	7+040	17/06/2026	6.5	1.750	38.0	28.3	74.5
I	8+730	18/06/2026	6.7	1.788	72.1	54.8	75.9
J	9+060	19/06/2026	8.2	2.177	330.4	248.4	75.2
K	10+640	22/06/2026	9.4	2.133	223.1	176.5	79.1
L	11+370	23/06/2026	8.6	2.138	171.4	130.2	75.9
M	12+680	25/06/2026	8.3	2.152	295.9	225.1	76.1
N	13+510	29/06/2026	6.4	2.135	252.7	196.8	77.9
Ñ	14+360	01/07/2026	5.3	2.161	309.4	237.0	76.6
O	15+840	02/07/2026	5.9	2.156	311.7	246.1	79.0
P	16+720	06/07/2026	7.7	2.133	246.5	193.9	78.7
Q	17+250	07/07/2026	7.3	2.177	327.8	243.2	74.2
R	18+370	08/07/2026	7.0	2.151	186.6	141.0	75.5
S	19+810	10/07/2026	7.3	2.153	184.9	142.5	77.0

Tabla 8. Resultados promedio por tramo.

Al comparar los resultados de la Tabla 8 con la mezcla seleccionada durante la etapa de diseño, correspondiente a 2% de cal y 3% de emulsión asfáltica, se observa una diferencia entre el comportamiento obtenido bajo condiciones controladas de laboratorio y el registrado durante la ejecución, La mezcla de diseño alcanzo valores

de 218,8 kPa de ITS Dry, 206,4 kPa de ITS Wet y 94,3% de TSR. Por otro lado, en obra los controles alcanzaron o superaron la resistencia seca obtenida durante el diseño, mientras que otros presentaron valores considerablemente más bajos. En cambio, los valores de TSR registrados fueron inferiores a 94,3% obtenido en el diseño.

Esta variabilidad se da más que nada a la influencia que pueden ejercer las condiciones del sitio previo a la ejecución del BSM, entre los factores que pueden influir se encuentra principalmente la humedad del material al momento de la estabilización, la homogeneidad de la mezcla, la dosificación efectiva de los estabilizantes, el grado de compactación y las condiciones del curado. Sin embargo, la incidencia específica de cada uno de estos factores no puede establecerse únicamente a partir de los resultados ITS, por lo que cada cualquier relación causal deberá sustentarse con los registros correspondientes del proceso constructivo.

4.6. Análisis comparativo

4.6.1. Bases de Diseño del Tramo de Control

- **Geometría:** Longitud de **1.0 km** (1,000 m), calzada bidireccional de **7.20 m** de ancho (2 carriles de 3.60 m).
- **Área de intervención:** **7,200 m²**
- **Caso A (Tradicional):** Fresado en frío de $e=7.5$ cm + Desalojo de RAP a botadero ($d = 12$ km) + Riego de liga + Capa de rodadura de Mezcla Asfáltica en Caliente (HMA) de $e = 7.5$ cm con Asfalto AC-20.
- **Caso B (SABITA BSM):** Reciclado y estabilización *in situ* con 3% de emulsión asfáltica y 2.0% de cal, Capa de rodadura.

Presupuesto técnico estimado

4.6.2. Caso A: Método tradicional (Fresado y recapeo con HMA)

Rubro MTOP	Unidad	Cantidad	P. Unitario (USD)	Total (USD)
Frezado en frio de pavimento asfaltico	m2	7200	2.85	20520
Carga y desalojo de material fresado	m3	540	6.50	3510
Limpieza y barrido mecánico de superficie	m2	7200	0.35	2520
Riego de adherencia	m2	7200	0.85	6120
Hormigón Asfaltico en caliente	m3	540	118	63720
Transporte de mezcla asfáltica caliente	m3-Km	13500	0.28	3780
Subtotal Costo Directo				100170

4.6.3. Caso B: Estabilización BSM con Emulsión y Cal.

Rubro	Unidad	Cantidad	P. Unitario	Total (USD)
Escarificado y pulverizado in situ	m2	7200	3.90	28080
Suministro e incorporación de cal hidratada	Ton	34.56	165	5702.4
Suministro de emulsión asfáltica	Gal	17200	2.1	36120
Conformación, nivelación y compactación pesada de base BSM	M2	7200	1.2	8640

Capa de rodadura; Migroaglomerado en frio tipo III	m2	7200	5.2	37440
Subtotal Costo Directo				115982.40

4.6.4. Comparativa estructural y de Costo-Efectividad (AASHTO 93)

Parámetro de Desempeño	Caso A: Recapeo Tradicional	Caso B: Estabilización BSM (SABITA)
Coeficiente de Capa (ai) AASHTO	a1 =0.40/pulg	a2 (BSM)=0.22/pulg [E≈2,500–3,500 MPa]
Aporte al Número Estructural (ΔSN)	ΔSN≈1.18	ΔSN≈1.73 (+46% de capacidad estructural)
Problema de Reflexión de Fisuras	Alto	Bajo
Consumo de Asfalto Nuevo / km	≈65 Ton de Cemento Asfáltico AC-20	≈26 Ton de Asfalto Residual (en emulsión)
Acarreo de Áridos / Volquetes	>120 viajes (desalojo + agregado nuevo)	<15 viajes (únicamente cal y microaglomerado)

Costo por Unidad de Capacidad Estructural (USD/ ΔSN):

Caso Tradicional: $\$13.91/1.18 = 11.78$ USD/Punto de SN

Caso BSM: $\$16.11/1.73 = 9.31$ USD/Punto de SN

El BSM es un 21% más económico por unidad de capacidad de portante ganada.

Ciclo de vida: El recapeo tradicional sobre una base fatigada falla prematuramente por fatiga y reflexión de grietas a los pocos años. La base BSM reconstituye la capacidad portante profunda, ofreciendo tiempo de servicio de diseño superior.

4.6.5. Análisis de Costo-Efectividad y Análisis de Costo del Ciclo de Vida (LCCA)

Para evaluar de manera integral la viabilidad financiera y técnica de las alternativas de rehabilitación vial, se aplicó un marco formal de Análisis de Costo del Ciclo de Vida (LCCA, por sus siglas en inglés) comparando la solución con estabilización BSM frente a la metodología tradicional de reconstrucción/recapeo (Caso A).

El análisis económico se desarrolló para un horizonte de 20 años, considerando el costo inicial de cada alternativa y los costos de mantenimiento previstos durante dicho periodo. Para la comparación se adoptó una tasa de descuento real del 4 %. El costo directo inicial estimado fue de 13,91 USD/m² para la alternativa tradicional y de 16,11 USD/m² para la alternativa BSM, por lo que esta última presenta un mayor costo de ejecución inicial.

La comparación no se limitó al costo por metro cuadrado. También se relacionó la inversión con el aporte estructural estimado mediante el Número Estructural de AASHTO 93. Bajo este criterio se obtuvo un costo de 9,31 USD por unidad de Δ SN para BSM y de 11,78 USD por unidad de Δ SN para la alternativa tradicional, diferencia equivalente a aproximadamente 21 %. Por lo tanto, para las hipótesis adoptadas en este análisis, el BSM presentó un menor costo por unidad de capacidad estructural restituida.

CAPÍTULO V

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. CONCLUSIONES

- La caracterización geotécnica realizada a lo largo de la vía La Victoria–T de Baba permitió identificar una estructura de pavimento variable, constituida principalmente por materiales granulares con presencia de finos en las capas superiores y materiales cohesivos de menor capacidad de soporte en los estratos inferiores. Esta variabilidad confirmó la importancia de caracterizar previamente el pavimento existente antes de establecer una alternativa de rehabilitación. Para el diseño de la estabilización se caracterizó específicamente el material de Base Clase 1A, clasificado como GP-GC según SUCS y A-1-a según AASHTO, obteniéndose una densidad seca máxima de 2167 kg/m³, humedad óptima de 10,0 % y un CBR de 83 %, demostrando una adecuada capacidad de soporte como material de partida para el diseño BSM.
- La evaluación de las nueve combinaciones de cal y emulsión asfáltica permitió determinar que el incremento de estos componentes no produce necesariamente una mejora proporcional en todos los parámetros de desempeño. Particularmente, las mezclas con 3 % de cal alcanzaron resistencias secas superiores, pero presentaron una disminución importante del TSR, evidenciando una mayor susceptibilidad frente al acondicionamiento húmedo. Por esta razón, la selección de la dosificación no se realizó únicamente considerando el mayor ITS Dry, sino buscando un equilibrio entre resistencia seca, resistencia húmeda, resistencia conservada y densidad aparente. Bajo este criterio se seleccionó la mezcla constituida por 2 % de cal

y 3 % de emulsión asfáltica, que alcanzó 218,8 kPa de ITS Dry, 206,4 kPa de ITS Wet y 94,3 % de TSR.

- En el ensayo triaxial, el esfuerzo de rotura de las probetas sin remojar pasó de 2249,68 kPa sin confinamiento a 4327,70 kPa con 200 kPa de confinamiento. Las probetas remojadas presentaron valores menores en las cuatro condiciones evaluadas. Del análisis se obtuvieron 399 kPa de cohesión, 52° de ángulo de fricción interna y 75 kPa de cohesión retenida, confirmándose una reducción de la componente cohesiva después del acondicionamiento en agua.
- Los controles realizados en obra mostraron una dispersión importante respecto a la mezcla preparada en laboratorio. El ITS Dry varió entre 38,0 y 330,4 kPa y el ITS Wet entre 28,3 y 248,4 kPa; además, los valores de TSR de los tramos controlados fueron inferiores al 94,3 % obtenido durante el diseño. Con los datos disponibles no puede atribuirse esta diferencia a una sola variable, debido a que durante la ejecución intervienen simultáneamente la humedad, dosificación, homogeneidad, compactación y curado.
- Desde el punto de vista económico, la alternativa BSM presentó un costo directo inicial de 16,11 USD/m², superior a los 13,91 USD/m² estimados para el fresado y recapeo tradicional. Por lo tanto, no sería correcto concluir que el BSM es simplemente “más barato” en términos de costo inicial. Sin embargo, al relacionar el costo con el aporte estructural mediante el Número Estructural de AASHTO 93, el BSM alcanzó un Δ SN aproximado de 1,73, frente a 1,18 de la solución tradicional, representando aproximadamente 46 % más aporte estructural. El costo obtenido fue de 9,31 USD por punto de SN para BSM, frente a 11,78 USD por punto de SN para la alternativa tradicional, haciendo

al BSM aproximadamente 21% más económico por unidad de capacidad estructural restituida.

- En términos generales, los resultados obtenidos permiten concluir que la estabilización con emulsión asfáltica y cal diseñada mediante metodología SABITA constituye una alternativa técnicamente viable para la rehabilitación estudiada. Para el material analizado, la combinación de 2 % de cal y 3 % de emulsión presentó los resultados utilizados para seleccionar la mezcla de diseño y mostró una respuesta resistente definida en los ensayos posteriores. Sin embargo, la variación observada en los controles de obra indica que los resultados de laboratorio no son suficientes por sí solos para caracterizar el comportamiento final del BSM. La ejecución y el control de las variables constructivas forman parte directa del desempeño alcanzado en campo.

5.2. RECOMENDACIONES

- Se recomienda establecer un control riguroso de la humedad del material antes de la incorporación de la emulsión y durante la compactación, procurando mantenerla dentro del rango definido durante el diseño. Esta variable debe verificarse por tramo debido a que los resultados de obra mostraron diferencias importantes en resistencia y densidad respecto a las condiciones controladas de laboratorio.
- Durante la ejecución del BSM se recomienda controlar de manera independiente la dosificación efectiva de cal y emulsión asfáltica, homogeneidad del mezclado, humedad, densidad alcanzada y condiciones de curado. Durante cada tramo conviene registrar por separado la humedad, la cantidad efectiva de cal y emulsión, la homogeneidad de la mezcla, la densidad

obtenida y las condiciones de curado. Con los datos disponibles en este estudio no fue posible identificar cuál de estas variables tuvo mayor incidencia en los tramos que presentaron resistencias menores. Disponer de estos registros permitiría realizar esa comparación en futuros controles.

- Se propone continuar realizando ITS Dry e ITS Wet durante la ejecución y analizarlos junto con los registros de humedad y densidad del mismo tramo.

De esta forma, una disminución de resistencia puede relacionarse con las condiciones registradas durante la producción y compactación del material, en lugar de evaluarse de manera aislada.

- Para futuras investigaciones se recomienda realizar ensayos triaxiales sobre mezclas con diferentes porcentajes de cal y emulsión y no únicamente sobre la dosificación seleccionada. De esta manera sería posible establecer la influencia individual de cada estabilizante sobre la cohesión, el ángulo de fricción interna y la resistencia retenida, complementando el criterio de selección actualmente basado principalmente en ITS.

- Se recomienda realizar un seguimiento del comportamiento de la vía en servicio, evaluando periódicamente la aparición de fisuras, deformaciones, ahuellamiento y otros indicadores de deterioro. Esto permitiría comprobar si el comportamiento favorable obtenido mediante los ensayos de laboratorio se mantiene bajo las cargas reales de tránsito y las condiciones ambientales del proyecto.

- Para la evaluación económica de futuros proyectos se recomienda evitar comparar alternativas únicamente mediante el costo inicial por metro cuadrado, debido a que pueden proporcionar capacidades estructurales

diferentes. En este estudio, aunque el costo inicial del BSM resultó superior, la comparación normalizada por Número Estructural mostró una ventaja aproximada del 21 % por unidad de capacidad estructural aportada.

- El reciclado in situ resulta especialmente aplicable cuando una parte importante del material existente puede conservarse dentro de la nueva estructura. En la comparación realizada para este proyecto, la alternativa tradicional consideró más de 120 viajes relacionados con retiro y suministro de materiales, mientras que para la alternativa BSM se estimaron menos de 15 viajes de materiales adicionales. Esta diferencia debe considerarse junto con los costos, disponibilidad de materiales y condiciones particulares de cada proyecto.

6. Bibliografía

- **Andrade Triviño, N. M., & Franco Puga, F. X. (2019).** *Los pavimentos compuestos como alternativa constructiva para vías de tráfico pesado* [Trabajo de titulación, Universidad Católica de Santiago de Guayaquil].
Repositorio Institucional
UCSG. <http://repositorio.ucsg.edu.ec/bitstream/3317/12616/1/T-UCSG-PRE-ING-IC-302.pdf>
- **Asfalto Farvias. (s. f.).** *Carpeta asfáltica en caliente*. Recuperado el 2 de julio de 2026, de [Asfalto Farvias](#)
- **Asfaltos Tudefran. (2024, 10 de julio).** *Estrategias para el mantenimiento y la reparación de pavimentos asfálticos*. [Asfaltos Tudefran](#)
- **Asphalt Institute. (2008).** *MS-19: A Basic Asphalt Emulsion Manual* (4.^a ed.). Asphalt Institute.
- **Asphalt Institute & Asphalt Emulsion Manufacturers Association (AEMA). (2026).** *MS-19: A Basic Asphalt Emulsion Manual* (4.^a ed.). Asphalt Institute.
- **Construneic. (s. f.).** *Estabilización de suelos*. Recuperado el 2 de julio de 2026, de [Construneic – Estabilización de suelos](#)
- **Das, B. M. (2015).** *Fundamentos de Ingeniería Geotécnica* (4.^a ed.). Cengage Learning Editores.
- **EVERPADS. (s. f.).** *The Ultimate Guide to Asphalt Millings: What They Are and How to Use Them for Your Asphalt Milling Needs*. [EVERPADS](#)
- **Federal Highway Administration (FHWA). (2006).** *Standard Specifications for Construction of Roads and Bridges on Federal Highway Projects* (FP-14). U.S. Department of Transportation.

- **Huang, Y. H. (2004).** *Pavement Analysis and Design* (2.^a ed.). Pearson Prentice Hall.
- **Irfan, M., Khurshid, M. B., Labi, S., & Flora, W. (2009).** *Evaluating the Cost Effectiveness of Flexible Rehabilitation Treatments Using Different Performance Criteria*. *Journal of Transportation Engineering*, 135(10), 753-763.
- **Little, D. N. (1995).** *Handbook for Stabilization of Pavement Subgrades and Base Courses with Lime*. Kendall/Hunt Publishing Company.
- **Montejo Fonseca, A., Montejo Piratova, A., & Montejo Piratova, A. (2019).** *Estabilización de suelos*. Ediciones de la U.
- **Papagiannakis, A. T., & Masad, E. A. (2008).** *Pavement Design and Materials*. John Wiley & Sons.
- **Rivera, J. (2019).** *Estudio de riegos asfálticos de liga entre capas asfálticas para rehabilitación de pavimentos flexibles fresados*. Documento técnico. ResearchGate.
- **South African Bitumen Association (SABITA). (2020).** *Technical Guideline 2 (TG2): Bitumen Stabilised Materials - A Guideline for the Design and Construction of Bitumen Emulsion and Foamed Bitumen Stabilised Materials* (3.^a ed.). SABITA.
- **Zambrano Meza, M. I., & Tejeda Piusseaut, E. (2019).** *Materiales granulares tratados con emulsión asfáltica para su empleo en bases o subbases de pavimentos flexibles*. *Revista de Arquitectura e Ingeniería*, 13(3



**Presidencia
de la República
del Ecuador**



**Plan Nacional
de Ciencia, Tecnología,
Innovación y Saberes**



SENESCYT
Secretaría Nacional de Educación Superior,
Ciencia, Tecnología e Innovación

DECLARACIÓN Y AUTORIZACIÓN

Nosotros, **Franchesca Anelisse Rennella Riera** C.C: # **0924650948** y **Daniel Saúl Ormeño Pacheco** con C.C: # **0927106294** autor/a del trabajo de titulación: **Diseño y evaluación de una base estabilizada con emulsión asfáltica y cal (BSM) mediante metodología SABITA aplicada a la rehabilitación de una vía existente**, previo a la obtención del título de **Ingeniero Civil** en la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil.

1.- Declaro tener pleno conocimiento de la obligación que tienen las instituciones de educación superior, de conformidad con el Artículo 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior, de entregar a la SENESCYT en formato digital una copia del referido trabajo de titulación para que sea integrado al Sistema Nacional de Información de la Educación Superior del Ecuador para su difusión pública respetando los derechos de autor.

2.- Autorizo a la SENESCYT a tener una copia del referido trabajo de titulación, con el propósito de generar un repositorio que democratice la información, respetando las políticas de propiedad intelectual vigentes.

Guayaquil, **31 de agosto de 2026**

f. _____

Rennella Riera, Franchesca Anelisse.

C.C: 0924650948

f. _____

Ormeño Pacheco, Daniel Saúl

C.C: 0927106294

REPOSITORIO NACIONAL EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA

FICHA DE REGISTRO DE TESIS/TRABAJO DE TITULACIÓN

TEMA Y SUBTEMA:	Diseño y evaluación de una base estabilizada con emulsión asfáltica y cal (BSM) mediante metodología SABITA aplicada a la rehabilitación de una vía existente		
AUTOR(ES)	Rennella Riera, Franchesca Anelisse; Ormeño Pacheco, Daniel Saúl		
REVISOR(ES)/ TUTOR (ES)	Ing. Grau Sacoto, Carlos Andrés M.Sc.		
INSTITUCIÓN:	Universidad Católica de Santiago de Guayaquil		
FACULTAD:	INGENIERÍA		
CARRERA:	Ingeniería Civil		
TÍTULO OBTENIDO:	Ingeniero Civil		
FECHA DE PUBLICACIÓN:	31 de agosto de 2026	No. DE PÁGINAS:	(# 60 de páginas)
ÁREAS TEMÁTICAS:	Ingeniería de pavimentos; Rehabilitación vial; Materiales y tecnología del asfalto		
PALABRAS CLAVES/ KEYWORDS:	BSM; emulsión asfáltica; cal; metodología SABITA; rehabilitación vial; resistencia a la tracción indirecta.		
RESUMEN/ABSTRACT (150-250 palabras):			
La presente investigación evalúa el diseño y comportamiento mecánico de una base estabilizada con emulsión asfáltica y cal (BSM), mediante la metodología SABITA, aplicada a la rehabilitación de la vía La Victoria-T de Baba, provincia del Guayas. Se realizó una campaña de exploración geotécnica mediante 25 calicatas distribuidas a lo largo de aproximadamente 20 km, permitiendo caracterizar los materiales existentes. Posteriormente, se caracterizó el material Base Clase 1A seleccionado para el diseño, obteniéndose una clasificación GP-GC, una densidad seca máxima de 2167 kg/m³, humedad óptima de 10 % y CBR de 83 %. Se evaluaron diferentes dosificaciones de cal y emulsión asfáltica mediante ensayos de resistencia a la tracción indirecta (ITS) en condiciones seca y húmeda, determinándose la relación de resistencia conservada (TSR). La dosificación seleccionada correspondió a 2 % de cal y 3 % de emulsión, con valores de 218,8 kPa de ITS Dry, 206,4 kPa de ITS Wet y 94,3 % de TSR. Adicionalmente, se realizaron ensayos triaxiales isotrópicos y controles de calidad en obra para evaluar su comportamiento. Los resultados evidencian la viabilidad técnica del BSM como alternativa para la rehabilitación vial bajo las condiciones estudiadas.			
ADJUNTO PDF:	SI ☐	NO ☒	
CONTACTO CON AUTOR/ES:	Teléfono: +5939	E-mail: (registrar los emails)	
CONTACTO CON LA INSTITUCIÓN	Nombre: (Apellidos, Nombres completos)		
	Teléfono: +593-4-(registrar teléfonos)		
(COORDINADOR PROCESO UTE):	E-mail: (registrar los emails)		
SECCIÓN PARA USO DE BIBLIOTECA			
Nº. DE REGISTRO (en base a datos):			
Nº. DE CLASIFICACIÓN:			
DIRECCIÓN URL (tesis en la web):			