



UNIVERSIDAD ESTATAL PENÍNSULA DE SANTA ELENA
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA
CARRERA INGENIERÍA

TEMA:

“ANÁLISIS COMPARATIVO COSTO-BENEFICIO ENTRE
MATERIALES GRANULARES DE TRES CANTERAS EN LA
PROVINCIA DE SANTA ELENA ESTABILIZADOS CON ASFALTO
DILUIDO Y CON EMULSIÓN ASFÁLTICA”

TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

AUTORES:

QUIROGA QUIZHPE KIMBERLY JORDANA
PEÑAFIEL SAONA STEVEN DAVID

TUTOR:

ING. DANIEL CAMPOVERDE CAMPOVERDE, MSc.

LA LIBERTAD, ECUADOR

2025-2

**UNIVERSIDAD ESTATAL PENÍNSULA DE SANTA ELENA
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA**

CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

TEMA:

**“ANÁLISIS COMPARATIVO COSTO-BENEFICIO
ENTRE MATERIALES GRANULARES DE TRES
CANTERAS EN LA PROVINCIA DE SANTA ELENA
ESTABILIZADOS CON ASFALTO DILUIDO Y CON
EMULSIÓN ASFÁLTICA”**

TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

AUTORES:

**QUIROGA QUIZHPE KIMBERLY JORDANA
PEÑAFIEL SAONA STEVEN DAVID**

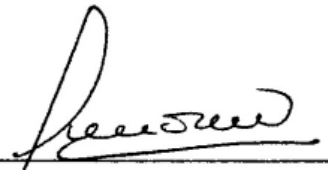
TUTOR:

ING. DANIEL CAMPOVERDE CAMPOVERDE, MSc.

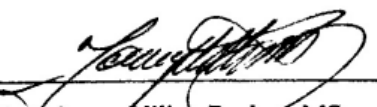
LA LIBERTAD – ECUADOR

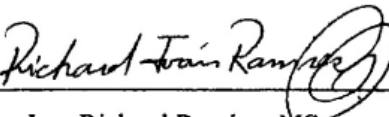
2025-2

TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN

f. 
Ing. Lucrecia Moreno Alcívar PhD.
DIRECTOR DE CARRERA

f. 
Ing. Daniel Campoverde Campoverde, MSc
DOCENTE TUTOR

f. 
Ing. Jonny Villao Borber, MSc.
DOCENTE ESPECIALISTA

f. 
Ing. Richard Ramírez MSc.
DOCENTE UIC

DEDICATORIA

A Dios, por ser mi luz y sostén en cada paso de este camino. A mi madre, Nancy Quiroga, cuya fortaleza y amor forjaron mi perseverancia este logro compartido. A mi hija, Enghell Sabando Quiroga, por ser mi impulso y alegría incluso en los días más difíciles. A ustedes, pilares de mi vida, dedico con orgullo este triunfo que también es suyo.

KIMBERLY QUIROGA QUIZHPE

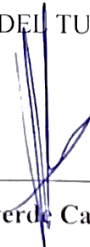
A mi Padre Celestial, cuya presencia me dio fuerza y claridad cuando más lo necesité. A mis padres, Iván Peñafiel y Ketty Saona, por el amor que ha guiado cada paso de mi vida. Gracias por enseñarme a trabajar con humildad y a perseverar aun en tiempos difíciles. Este logro es un reflejo de su dedicación y del camino que juntos construimos.

STEVEN PEÑAFIEL SAONA

CERTIFICADO DE ANTIPLAGIO

En calidad de tutor del trabajo de investigación para titulación del tema "*Análisis comparativo costo-beneficio entre materiales granulares de tres canteras en la provincia de Santa Elena estabilizados con asfalto diluido y con emulsión asfáltica*" elaborado por los estudiantes Quiroga Quizhpe Kimberly Jordana y Peñafiel Saona Steven David, egresados de la carrera de Ingeniería Civil, de la Facultad de Ciencias de la Ingeniería, me permito declarar que una vez analizado en el sistema anti plagio COMPILATIO, luego de haber cumplido con los requerimientos exigidos de valoración, la presente tesis, se encuentra con un 9% de la valoración permitida.

FIRMA DEL TUTOR



Ing. Daniel Campoverde Campoverde, MSc.

C.C.: 091317654

KIMBERLY Y STEVEN TESIS

9%
Textos sospechosos



2% Similitudes

< 1 % similitudes entre comillas
< 1 % entre las fuentes mencionadas

3% Idiomas no reconocidos

4% Textos potencialmente generados por la IA

Nombre del documento: KIMBERLY Y STEVEN TESIS.docx
 ID del documento: c78561a95da41c9251bd41199cac0a5adf325fc9
 Tamaño del documento original: 2,28 MB

Depositante: DANIEL ROSENDO CAMPOVERDE
 CAMPOVERDE
 Fecha de depósito: 6/11/2025
 Tipo de carga: interface
 fecha de fin de análisis: 6/11/2025

Número de palabras: 20.469
 Número de caracteres: 131.531

Ubicación de las similitudes en el documento:



Fuentes de similitudes

Fuentes principales detectadas

N°	Descripciones	Similitudes	Ubicaciones	Datos adicionales
1	www.geomecchile.cl https://www.geomecchile.cl/pluginAppObj/pluginAppObj_43_04/nch1508.pdf 23 fuentes similares	< 1%		Palabras idénticas: < 1% (70 palabras)
2	Documento de otro usuario #43550e Viene de otro grupo 2 fuentes similares	< 1%		Palabras idénticas: < 1% (60 palabras)
3	polodelconocimiento.com Combinación granulométrica de material granular c... https://polodelconocimiento.com/ojs/index.php/es/article/view/5752/0 1 fuente similar	< 1%		Palabras idénticas: < 1% (62 palabras)
4	semsig.org https://semsig.org/wp-content/uploads/2020/06/A_200_Estabilizados-de-suelo.pdf 21 fuentes similares	< 1%		Palabras idénticas: < 1% (47 palabras)
5	repositorio.puce.edu.ec Comparación técnica entre los ensayos de laboratorio ... https://repositorio.puce.edu.ec/handle/123456789/26353 1 fuente similar	< 1%		Palabras idénticas: < 1% (46 palabras)

Fuentes con similitudes fortuitas

N°	Descripciones	Similitudes	Ubicaciones	Datos adicionales
1	1library.co Conclusiones y recomendaciones - Estudio exploratorio del efecto d... https://1library.co/article/conclusiones-recomendaciones-estudio-exploratorio-efectos-satura...	< 1%		Palabras idénticas: < 1% (32 palabras)
2	Documento de otro usuario #94e59e Viene de otro grupo	< 1%		Palabras idénticas: < 1% (25 palabras)
3	hdl.handle.net Estabilización y recuperación de taludes en carreteras, caso ?IRS... https://hdl.handle.net/20.500.14138/2403	< 1%		Palabras idénticas: < 1% (29 palabras)
4	Documento de otro usuario #6ba459 Viene de otro grupo	< 1%		Palabras idénticas: < 1% (25 palabras)
5	www.dspace.uce.edu.ec Hormigón compactado con rodillo utilizando agregad... http://www.dspace.uce.edu.ec/handle/25000/16816	< 1%		Palabras idénticas: < 1% (19 palabras)

Fuentes mencionadas (sin similitudes detectadas) Estas fuentes han sido citadas en el documento sin encontrar similitudes.

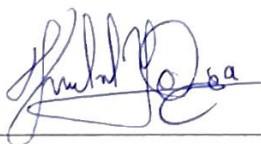
- <https://store.astm.org/c0535-16.html>
- <https://store.astm.org/d1557-12r21.html>
- https://store.astm.org/d2028_d2028m-15r21e01.html
- <https://store.astm.org/d2216-19.html>
- https://store.astm.org/d2397_d2397m-20.html

DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD

Nosotros, Quiroga Quizhpe Kimberly Jordana – Peñafiel Saona Steven David

DECLARAMOS QUE: El Trabajo de Titulación, *“Análisis comparativo costo-beneficio entre materiales granulares de tres canteras en la provincia de Santa Elena estabilizados con asfalto diluido y con emulsión asfáltica”* 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 nuestra total autoría. En virtud de esta declaración, nos responsabilizamos del contenido, veracidad y alcance del Trabajo de Titulación referido.

AUTORES



Quiroga Quizhpe Kimberly Jordana



Peñafiel Saona Steven David

CERTIFICACIÓN DEL TUTOR

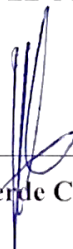
Ing. Daniel Campoverde Campoverde, MSc.

TUTOR DE PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

Universidad Estatal Península de Santa Elena

En mi calidad de Tutor del presente trabajo "*Análisis comparativo costo-beneficio entre materiales granulares de tres canteras en la provincia de Santa Elena estabilizados con asfalto diluido y con emulsión asfáltica*" previo a la obtención del Título de Ingeniero Civil elaborado por los Sres. Quiroga Quizhpe Kimberly Jordana y Peñafiel Saona Steven David, egresados de la carrera de Ingeniería Civil, Facultad Ciencias de la Ingeniería de la Universidad Estatal Península de Santa Elena, me permito declarar que luego de haber orientado, estudiado y revisado, la apruebo en todas sus partes.

FIRMA DEL TUTOR



Ing. Daniel Campoverde Campoverde, MSc.

C.C.: 0913176541

Lcda. Betty Ruth Gómez Suárez, Mgtr.
Celular: 0962183538
Correo: bettyruthgomez@educacion.gob.ec

CERTIFICACIÓN GRAMATICAL Y ORTOGRÁFICA

Yo, **BETTY RUTH GÓMEZ SUÁREZ**, en mi calidad de **LICENCIADA EN CIENCIAS DE LA EDUCACIÓN Y MAGÍSTER EN DISEÑO Y EVALUACIÓN DE MODELOS EDUCATIVOS**, por medio de la presente tengo a bien indicar que he leído y corregido el Trabajo de Integración Curricular previo a la obtención del Título de Ingeniero en Civil, denominado **“ANÁLISIS COMPARATIVO COSTO-BENEFICIO ENTRE MATERIALES GRANULARES DE TRES CANTERAS EN LA PROVINCIA DE SANTA ELENA ESTABILIZADOS CON ASFALTO DILUIDO Y CON EMULSIÓN ASFÁLTICA”**, de los estudiantes: **QUIROGA QUIZHPE KIMBERLY JORDANA** y **PEÑAFIEL SAONA STEVEN DAVID**.

Certifico que está redactado con el correcto manejo del lenguaje, claridad en las expresiones, coherencia en los conceptos e interpretaciones, adecuado empleo en la sinonimia. Además de haber sido escrito de acuerdo a las normas de ortografía y sintaxis vigentes.

En cuanto puedo decir en honor a la verdad y autorizo a los interesados hacer uso del presente como estime conveniente.

Santa Elena, 30 de Octubre del 2025



Lcda. Betty Ruth Gómez Suárez, Mgtr.
CI. 0915036529

LICENCIADO EN CIENCIAS DE LA EDUCACIÓN
MAGÍSTER EN DISEÑO Y EVALUACIÓN DE MODELOS EDUCATIVOS
N° DE REGISTRO DE SENECYT 1050-2014-86052892

AGRADECIMIENTOS

Es preciso empezar agradeciendo a Dios, por ser mi luz y sostén en cada paso de este camino, gracias por cuidarme y por rodearme de personas que hicieron posible este logro.

A mi amada madre, Nancy Quiroga, le dedico este trabajo con todo mi corazón. Gracias por inculcarme valores que han moldeado mi vida; humanidad, empatía, respeto y amor. Por tu sacrificio y trabajo incansable para brindarme educación, por nunca dejar de creer en mí y por enseñarme con el ejemplo la perseverancia y la honestidad. Eres la raíz de mi tenacidad; llevo tu apellido con orgullo y este logro es, sobre todo, tuyo.

A mi hija y mi mayor impulso Enghell Sabando Quiroga, gracias pequeña por acompañarme a las aulas desde mis inicios y por compartir a tu mamá con la universidad. Tu comprensión ante mis ausencias y tu alegría incluso en momentos difíciles, fueron combustible para no rendirme. Este triunfo también te pertenece.

A mi abuelita, Carmen Quizhpe, quien con su cariño y protección formaron uno de los primeros refugios de mi vida. A mis hermanas, Astrid Quiroga y Chanel Quiroga; gracias por la compañía, la complicidad y por amarme incondicionalmente; su apoyo fue sostén en la distancia. Y a mis hermanos, especialmente a Erick Ortega, gracias por despertar en mí la curiosidad por la ciencia y por enseñarme a maravillarme ante lo que aún no tiene explicación.

A mis padrinos Esteban Santos y Diana Ortiz, por su cariño, por confiar en mi potencial, por su apoyo y por ser ejemplo e inspiración tanto en lo personal como en lo profesional. A mi querida Fernanda Antúnez, por su cariño y cuidado en épocas de vulnerabilidad desde mi infancia y sembrar en mí metas ambiciosas. A Boris Medina y María Gracia Medina, sin ustedes los experimentos que contienen esta tesis no habrían sido posibles, gracias por abrirme las puertas de su hogar, por su cariño y por hacerme sentir parte de su familia.

Mi gratitud también se extiende a la Universidad Estatal Península de Santa Elena UPSE, por ser el espacio que me permitió formarme profesionalmente. A mi tutor, Ing. Daniel Campoverde, por su guía experta en cada etapa del proyecto; al Ing. Richard Ramírez, por sus valiosas aportaciones en esta tesis; y al cuerpo docente, por su vocación y enseñanzas.

A la empresa EMULDEC, especialmente a su gerente, Ing. Patricio Echan y al Ing. Geovanny Carrera; gracias por depositar su confianza en nuestro trabajo, por facilitarnos laboratorios, suministrar material de emulsión asfáltica y por el asesoramiento técnico que enriqueció la investigación.

A mi compañero de tesis, por el esfuerzo compartido y la colaboración constante; y a mis amistades Gabriel Pilco, Maribis Bonilla, Maylin Zambrano y Erick Torres; gracias por creer en mí y por llenar este proceso de momentos que contrarrestaron el estrés. Me siento profundamente afortunada de contar con cada uno de ustedes.

A todas las personas; familiares, docentes, colegas e instituciones que de alguna manera aportaron con su tiempo, cariño o consejos; gracias. Llevo conmigo cada gesto, cada palabra de aliento y cada acto de generosidad; que este título honre el esfuerzo de quienes me acompañaron y sea el inicio de nuevas metas por alcanzar.

KIMBERLY QUIROGA QUIZHPE

En primer lugar, doy gracias a mi Padre Celestial, cuya presencia iluminó cada etapa de este camino. En los momentos de incertidumbre, cuando las fuerzas parecían agotarse, Su guía me brindó serenidad y confianza para continuar.

A mis padres, Iván Peñafiel y Ketty Saona, quienes han sido mis pilares desde el inicio. Su amor ha sido la base de todo lo que soy, y gracias a su ejemplo comprendí el valor del esfuerzo honesto y la humildad. Ellos creyeron en mí aun cuando las circunstancias no eran favorables y me impulsaron a seguir adelante. Este logro también les pertenece, pues cada paso dado es reflejo de la formación que con tanto cariño me brindaron.

A la empresa EMULDEC, agradezco profundamente por abrirnos sus puertas y compartir con nosotros sus conocimientos y herramientas. Gracias a su disposición, pude acercarme de manera directa a la realidad profesional, adquiriendo experiencia que fortaleció de forma significativa esta investigación.

Mi gratitud se extiende a la Universidad Estatal Península de Santa Elena, especialmente a la Facultad de Ciencias de la Ingeniería. En sus aulas descubrí el valor del aprendizaje constante, la perseverancia y la responsabilidad. Fue allí donde comprendí que la educación no solo se mide por lo aprendido, sino por la capacidad de transformar ese conocimiento en acciones que benefician a nuestra sociedad.

A mi tutor, Ing. Daniel Campoverde, expreso mi sincero reconocimiento por su paciencia y acompañamiento. Sus observaciones y guía fueron fundamentales para convertir ideas en resultados, brindándome siempre la confianza necesaria para perfeccionar nuestro trabajo.

A mi familia adoptiva: Flavio Quinto, María Sánchez, Jennifer Quinto y Sofía Quinto, gracias por abrirme las puertas de su vida como si siempre hubiera pertenecido a ella. Su cariño, compañía y la forma tan genuina en la que me hicieron sentir parte de ustedes fueron un abrazo constante en medio de este camino.

Con mucho agradecimiento, reconozco a mi compañera de tesis, Kimberly Quiroga, por su dedicación y compromiso. Cada reunión, discusión y momento de aprendizaje compartido marcaron esta etapa de mi vida. Su constancia y apoyo hicieron más llevadero el proceso.

A Jhosua Salazar, gracias por abrir las puertas de su hogar, por su tiempo y disposición. Su apoyo constante, incluso en los momentos más demandantes, fue un gesto invaluable que siempre recordaré.

A Byron Sánchez, agradezco por compartir sus conocimientos de manera desinteresada. Sus aportes fueron clave para fortalecer la base técnica de este trabajo, demostrando que la colaboración y la buena voluntad pueden impulsar grandes logros.

A cada persona que formó parte de este proceso, los llevo en mi memoria y en el corazón. Más allá de lo académico, este camino dejó huellas personales profundas que hoy celebran conmigo esta meta alcanzada. Sin ustedes, este sueño no sería una realidad.

STEVEN PEÑAFIEL SAONA

TABLA DE CONTENIDO

1. CAPITULO I: INTRODUCCIÓN	1
1.1 PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN	1
1.2 ANTECEDENTES	2
1.3 HIPÓTESIS	4
1.3.1 Hipótesis General	4
1.3.2 Hipótesis Específica	4
1.4 OBJETIVOS	5
1.4.1 Objetivo General	5
1.4.2 Objetivos Específicos	5
1.5 ALCANCE	6
1.6 VARIABLES	8
1.6.1 Variables Dependientes	8
1.6.2 Variables Independientes	8
1.6.3 Matriz de variables	9
2. CAPITULO II: MARCO TEÓRICO	11
2.1 ESTABILIZACIÓN DE SUELOS PARA CARRETERAS	11
2.1.1 Definición	11
2.1.2 Usos como capas estructurales de pavimentos	11
2.1.3 Diseño de mezclas asfálticas en frío (método Marshall modificado) ..	13

2.2	MATERIALES GRANULARES DE SUBBASE	15
2.2.1	Definición y usos como capas estructurales de Pavimentos.	15
2.2.2	Propiedades geotécnicas relevantes de las subbases.	16
2.2.3	Requisitos técnicos del material subbase clase 3.	20
2.3	ESTABILIZANTES ASFALTICOS.....	21
2.3.1	Asfalto diluido de curado rápido RC-250.	21
2.3.2	Emulsión asfáltica de rotura lenta CSS - 1h.....	24
2.4	RELACIÓN COSTO – BENEFICIO.....	29
2.4.1	Estudio y comparación de costos de implementación para ambos métodos de estabilización de suelos.	29
2.4.2	Análisis de beneficios de ambos métodos de estabilización de suelos. 30	
3.	CAPITULO III: METODOLOGÍA	32
3.1	ENFOQUE METODOLÓGICO Y DISEÑO EXPERIMENTAL	32
3.2	POBLACIÓN Y MUESTRA	32
3.3	DISEÑO EXPERIMENTAL FACTORIAL	33
3.4	FASES DE LA METODOLOGÍA.....	33
3.5	METODOLOGÍA DE OE1, CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES .	35
3.5.1	Toma de muestras representativas de cada cantera.	35
3.5.2	Ensayos de mecánica de suelos para caracterización de los materiales granulares.	36

3.5.3	Verificación de cumplimiento con requisitos técnicos de subbase clase 3.	36
3.5.4	Ensayos de caracterización de estabilizadores asfálticos.....	37
3.5.5	Verificación de cumplimiento con requisitos técnicos de estabilizadores asfálticos.....	39
3.6	METODOLOGÍA DEL OE2, DISEÑO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS EN FRIO USANDO EL MÉTODO MARSHALL MODIFICADO.	41
3.6.1	Resumen de metodología del OE2.....	41
3.6.2	Preparación de las mezclas.....	41
3.6.3	Compactación.....	43
3.6.4	Curado y medidas físicas iniciales.	43
3.6.5	Mediciones y ensayos volumétricos.....	44
3.6.6	Ensayo de estabilidad Marshall.....	45
3.6.7	Selección del contenido óptimo de estabilizante.	46
3.6.8	Verificación de propiedades físico-mecánicas de la mezcla con contenido óptimo de estabilizante.....	47
3.6.9	Control de calidad y consideraciones operativas.	50
3.7	METODOLOGIA DE OE3. COMPARACION COSTO – BENEFICIO DE LAS MEZCLAS	51
3.7.1	Resumen de metodología de OE3.....	51
3.7.2	Análisis de costos de implementación de cada combinación suelo-asfalto.	51

3.7.3	Análisis costo beneficio de cada combinación suelo-asfalto.	53
4.	CAPITULO IV: ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	56
4.1	ANALISIS DE RESUSTADOS DEL O.E.1. CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES	56
4.1.1	Ensayos de mecánica de suelos para caracterización de materiales granulares.	56
4.1.2	Verificación de cumplimiento con requisitos técnicos de subbase clase 3. 57	
4.1.3	Ensayos de caracterización de estabilizadores asfálticos.	58
4.1.4	Verificación de cumplimiento con requisitos técnicos de los respectivos estabilizadores asfálticos.	59
4.2	ANALISIS DE RESULTADOS DEL O.E.2. DISEÑO DE MEZCLAS ASFALTICAS EN FRIO USANDO EL MÉTODO MARSHALL MODIFICADO 61	
4.2.1	Selección de contenido óptimo de estabilizante.	61
4.2.2	Verificación y comparación de propiedades físico – mecánicas de las mezclas con contenido óptimo de estabilizante.	74
4.3	ANALISIS DE RESULTADOS DE O.E.3. COMPARACION COSTO / BENEFICIO DE LAS MEZCLAS	78
4.3.1	Análisis de costos de implementación.	78
4.3.2	Análisis y comparación costo / beneficio.	80
5.	CAPITULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	87
5.1	CONCLUSIONES.....	87

5.2	RECOMENDACIONES	89
6.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	91
7.	ANEXOS.....	97
7.1	ANEXOS O.E.1. CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES	97
7.2	ANEXOS DE O.E.2. DISEÑO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS EN FRIO USANDO EL MÉTODO MARSHALL MODIFICADO.	100
7.3	ANEXOS DE ENSAYOS PARA CARACTERIZACIÓN DE SUELOS .	104

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 Carta de plasticidad según la metodología de clasificación (AASHTO, 1993)	17
Figura 2.2 Sistema de clasificación de suelos AASHTO.....	20
Figura 3.1 Esquema factorial de combinación suelo – estabilizante asfáltico.....	33
Figura 3.2 Recolección y etiquetado de muestras granulares	35
Figura 3.3 Vista Satelital de la provincia de Santa Elena y las canteras de estudio .	35
Figura 3.4 Mezcla con asfalto diluido.....	42
Figura 3.5 Mezcla de emulsión asfáltica con material granular	43
Figura 3.6 Curado en horno a 60°C por 48 horas	44
Figura 3.7 Preparación de muestras con los puntos de dosificación para ensayo Rice	45
Figura 3.8. Baño maría para estabilización de temperatura previo a ensayo Marshall	45
Figura 3.9 Ensayo de estabilidad Marshall	46
Figura 3.10 Cabezal Lottman.....	49
Figura 3.11 Briqueta post ensayo de resistencia a la tracción indirecta (RTI) para evaluar el esfuerzo a la tensión de las mezclas asfálticas	50
Figura 4.1 Gráfica %Vacíos vs %Emulsión - Cantera Juan Montalvo.....	63
Figura 4.2 Gráfica Estabilidad vs %Emulsión - Cantera Juan Montalvo	63
Figura 4.3 Gráfica %Flujo vs %Emulsión - Cantera Juan Montalvo.....	63

Figura 4.4 Gráfica %Vacíos vs %Emulsión - Cantera Tugaduaja.....	65
Figura 4.5 Gráfica Estabilidad vs %Emulsión - Cantera Tugaduaja	65
Figura 4.6 Gráfica %Flujo vs %Emulsión - Cantera Tugaduaja.....	65
Figura 4.7 Gráfica %Vacíos vs %Emulsión - Cantera San Vicente	67
Figura 4.8 Gráfica Estabilidad vs %Emulsión - Cantera San Vicente.....	67
Figura 4.9 Gráfica %Flujo vs %Emulsión - Cantera San Vicente	67
Figura 4.10 Gráfica %Vacíos vs %RC 250 - Cantera Juan Montalvo.....	69
Figura 4.11 Gráfica Estabilidad vs %RC 250 - Cantera Juan Montalvo	69
Figura 4.12 Gráfica %Flujo vs %RC 250 - Cantera Juan Montalvo	69
Figura 4.13 Gráfica %Vacíos vs %RC 250 - Cantera Tugaduaja.....	71
Figura 4.14 Gráfica Estabilidad vs %RC 250 - Cantera Tugaduaja	71
Figura 4.15 Gráfica %Flujo vs %RC 250 - Cantera Tugaduaja	71
Figura 4.16 Gráfica %Vacíos vs %RC 250 - Cantera San Vicente	73
Figura 4.17 Gráfica Estabilidad vs %RC 250 - Cantera San Vicente.....	73
Figura 4.18 Gráfica %Flujo vs %RC 250 - Cantera San Vicente.....	73
Figura 4.19 Porcentajes de estabilizante óptimo requerida para cada mezcla.	74
Figura 4.20 Costos de fabricación para 1m ³ de mezcla	80
Figura 4.21 Comparación de la razón costo/estabilidad para cada mezcla.....	81
Figura 4.22 Densidades de las briquetas mezcladas con estabilizante óptimo	81

Figura 4.23 Resultados del ensayo Estabilidad Marshall después de 2h sumergidas	82
Figura 4.24 Comparación del flujo de mezclas con estabilizante óptimo	83
Figura 4.25 Conservación de la estabilidad para cada mezcla con estabilizante óptimo	84
Figura 4.26 Razón del esfuerzo a la Tensión (TSR) para cada mezcla con estabilizante óptimo	85
Figura 7.1 Curva granulométrica de la cantera Juan Montalvo con bandas para subbase clase 3 según la norma ASTM D422	105
Figura 7.2 Curva granulométrica de la cantera Tugaduaja con bandas para subbase clase 3 según la norma ASTM D422	105
Figura 7.3 Curva granulométrica de la cantera San Vicente con bandas para subbase clase 3 según la norma ASTM D422	105
Figura 7.4 Gráfico de Límites de Atterberg - Cantera Juan Montalvo	106
Figura 7.5 Gráfico de Límites de Atterberg - Cantera Tugaduaja	106
Figura 7.6 Gráfico de Límites de Atterberg - Cantera San Vicente.....	106
Figura 7.7 Curva Proctor - Cantera Juan Montalvo	107
Figura 7.8 Curva Proctor - Cantera Tugaduaja	107
Figura 7.9 Curva Proctor - Cantera San Vicente	108
Figura 7.10 Gráfico Esfuerzo / Penetración - Cantera Juan Montalvo	109
Figura 7.11 Gráfico Esfuerzo / Penetración - Cantera Tugaduaja	109
Figura 7.12 Gráfico Esfuerzo / Penetración - Cantera San Vicente.....	109

LISTA DE TABLAS

Tabla 1.1 Matriz de variables	9
Tabla 2.1 Gráficos de diseño de mezcla estabilizada con emulsión asfáltica: densidad seca, resistencias ITS, flujo y TSR.....	14
Tabla 3.1 Coordenadas UTM de las canteras representativas de Santa Elena	36
Tabla 3.2 Banda granulométrica para clasificación de material de subbase.	37
Tabla 3.3 Requisitos según MOP 001 para materiales de subbase	37
Tabla 3.4 Requisitos según MOP 001 para Asfalto diluido de curado rápido	39
Tabla 3.5 Requisitos MOP 001 Emulsiones asfálticas catiónicas de rotura lenta.....	40
Tabla 3.6 Requisitos de estabilidad y flujo para Base Estabilizada (MOP - 001-F, 2002)	47
Tabla 3.7 Criterios Marshall establecidos por el (MOP - 001-F, 2002) para mezclas asfálticas.....	48
Tabla 4.1 Características física-mecánicas de cada Cantera de estudio.....	56
Tabla 4.2 Verificación de especificaciones para subbases según MOP-001	57
Tabla 4.3 Resultados de los estabilizantes ensayados en laboratorio	58
Tabla 4.4 Verificación de requerimiento para RC-250 según MOP 001	59
Tabla 4.5 Verificación de requerimiento para Emulsión asfáltica Css-1h según MOP 001	60
Tabla 4.6 Resultados de las briquetas con distintos porcentajes de emulsión - Cantera Juan Montalvo	62

Tabla 4.7 Resultados de las briquetas con distintos porcentajes de emulsión - Cantera Tugaduaja.....	64
Tabla 4.8 Resultados de las briquetas con distintos porcentajes de emulsión - Cantera San Vicente	66
Tabla 4.9 Resultados de las briquetas con distintos porcentajes de RC 250 - Cantera Juan Montalvo.....	68
Tabla 4.10 Resultados de las briquetas con distintos porcentajes de RC 250 - Cantera Tugaduaja.....	70
Tabla 4.11 Resultados de las briquetas con distintos porcentajes de RC 250 - Cantera San Vicente	72
Tabla 4.12 Resultados obtenidos de las mezclas preparadas con el %Emulsión óptimo	77
Tabla 4.13 Resultados obtenidos de las mezclas preparadas con el %RC-250 óptimo	77
Tabla 4.14 Cálculo de volúmenes de materiales para la mezcla por cada m ³ - Emulsión	78
Tabla 4.15 Cálculo de volúmenes de materiales para la mezcla por cada m ³ - RC 250	78
Tabla 4.16 Análisis de costos para 1 m ³ de mezcla con emulsión asfáltica CSS-1h 79	
Tabla 4.17 Análisis de costos para 1 m ³ de mezcla con asfalto diluido RC-250	79
Tabla 4.18 Resumen de costos para fabricación	79
Tabla 7.1 Contenido de humedad natural de la cantera Juan Montalvo según la norma ASTM D2216.....	104

Tabla 7.2 Contenido de humedad natural de la cantera Tugaduaja según la norma ASTM D2216.....	104
Tabla 7.3 Contenido de humedad natural de la cantera San Vicente según la norma ASTM D2216.....	104
Tabla 7.4 Resultados del Ensayo Límites de Atterberg para la cantera Juan Montalvo según la norma ASTM D4318	106
Tabla 7.5 Resultados del Ensayo Límites de Atterberg para la cantera Tugaduaja según la norma ASTM D4318.....	106
Tabla 7.6 Resultados del Ensayo Límites de Atterberg para la cantera San Vicente según la norma ASTM D4318	107
Tabla 7.7 Resultados del ensayo Proctor modificado de la Cantera Juan Montalvo	107
Tabla 7.8 Resultados del ensayo Proctor modificado de la Cantera Tugaduaja	108
Tabla 7.9 Resultados del ensayo Proctor modificado de la Cantera San Vicente...	108
Tabla 7.10 Resultados del ensayo CBR - Cantera Juan Montalvo.....	109
Tabla 7.11 Resultados del ensayo CBR - Cantera Tugaduaja.....	109
Tabla 7.12 Resultados del ensayo CBR - Cantera San Vicente	110
Tabla 7.13 Resultados del ensayo Abrasión de los Ángeles cantera Juan Montalvo	110
Tabla 7.14 Resultados del ensayo Abrasión de los Ángeles cantera Tugaduaja	110
Tabla 7.15 Resultados del ensayo Abrasión de los Ángeles cantera San Vicente ..	111

**“ANÁLISIS COMPARATIVO COSTO-BENEFICIO ENTRE
MATERIALES GRANULARES DE TRES CANTERAS EN LA
PROVINCIA DE SANTA ELENA ESTABILIZADOS CON
ASFALTO DILUIDO Y CON EMULSIÓN ASFÁLTICA”**

Autor: Quiroga Quizhpe Kimberly Jordana

Peñañiel Saona Steven David

Tutor: Ing. Daniel Campoverde Campoverde, MSc.

RESUMEN

El presente estudio realizó un análisis comparativo costo-beneficio entre materiales granulares provenientes de tres canteras de la provincia de Santa Elena —Juan Montalvo, Tugaduaaja y San Vicente— estabilizados con dos tipos de agentes asfálticos: asfalto diluido RC-250 y emulsión asfáltica CSS-1h. El objetivo fue determinar la alternativa más eficiente en términos técnicos y económicos para su aplicación en estructuras de pavimentos.

Se efectuaron los estudios correspondientes a todos los materiales de las mezclas, aplicando las normas técnicas específicas de cada ensayo. A partir de estos análisis se determinó el contenido óptimo de asfalto para cada combinación de material granular y estabilizante, con el fin de evaluar su comportamiento y desempeño estructural.

Los resultados demostraron que la mejor combinación fue la obtenida con el material de la cantera Tugaduaaja estabilizado con emulsión asfáltica CSS-1h. Aunque el asfalto diluido RC-250 presenta un menor costo inicial, la emulsión asfáltica resultó más beneficiosa técnica y económicamente, al proporcionar un mejor rendimiento y una mayor eficiencia en la relación costo-beneficio para proyectos viales en la provincia de Santa Elena.

PALABRAS CLAVE: Estabilización asfáltica, Materiales granulares, Costo-beneficio, Santa Elena, Pavimentos.

"COMPARATIVE COST-BENEFIT ANALYSIS OF GRANULAR MATERIALS FROM THREE QUARRIES IN THE PROVINCE OF SANTA ELENA STABILIZED WITH CUTBACK ASPHALT AND ASPHALT EMULSION"

Autor: Quiroga Quizhpe Kimberly Jordana

Peñafiel Saona Steven David

Tutor: Ing. Daniel Campoverde Campoverde, MCs.

ABSTRACT

This project presents a comparative cost–benefit analysis of granular materials from three quarries in the province of Santa Elena —Juan Montalvo, Tugaduaja, and San Vicente— stabilized with two types of asphalt binders: cutback asphalt RC-250 and cationic asphalt emulsion CSS-1h. The main objective was to identify the most efficient alternative, both technically and economically, for use in pavement structures.

Comprehensive evaluations were carried out on all materials used in the mixtures, following the technical standards applicable to each test. Based on these analyses, the optimum asphalt content was determined for every combination of granular material and stabilizing agent, allowing the assessment of their structural performance and overall behavior.

The findings revealed that the best performance was achieved with the Tugaduaja quarry material stabilized with asphalt emulsion CSS-1h. Although cutback asphalt RC-250 has a lower initial cost, the use of asphalt emulsion proved to be more advantageous from both a technical and economic perspective, providing better overall performance and a more favorable cost–benefit balance for road construction projects in the province of Santa Elena.

KEYWORDS: Asphalt stabilization, Granular materials, Cost-benefit, Santa Elena, Pavements.

CAPITULO I: INTRODUCCIÓN

1.1 PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

La infraestructura vial en la provincia de Santa Elena enfrenta restricciones técnicas significativas debido a la limitada disponibilidad de materiales granulares que cumplan con las especificaciones exigidas por la Norma (MOP - 001-F, 2002) para capas de base granular. Estudios locales han evidenciado que los materiales extraídos de las canteras de la región apenas alcanzan los requisitos mínimos para subbase clase 3, lo que compromete la capacidad estructural de los pavimentos flexibles convencionales y limita su desempeño frente a cargas repetidas y condiciones climáticas adversas (MOP - 001-F, 2002) (Quiroz, 2017).

La estructura típica de un pavimento flexible está compuesta, entre otros materiales, por una base granular. La ausencia de este material en Santa Elena obliga a considerar dos alternativas: la importación de materiales desde otras provincias o la estabilización de los recursos locales. La primera opción implica costos elevados de transporte, que pueden representar hasta un 30% del presupuesto total de construcción, además de generar impactos logísticos y ambientales significativos (Arias & Idrobo, 2022).

La segunda alternativa —(la estabilización química de materiales granulares locales) ofrece una solución técnica viable, aunque con un costo inicial superior al de construir sin tratamiento. No obstante, diversos estudios han demostrado que esta técnica mejora sustancialmente las propiedades mecánicas del material, como la rigidez, la resistencia a la humedad y la estabilidad frente a cargas dinámicas, lo que se traduce en una extensión considerable de la vida útil del pavimento (Lanamme-UCR, 2020) (Torres Garcia, 2020) (Kienle Chauca, 2024).

Además, los pavimentos semirrígidos —aquellos que incorporan capas estabilizadas— presentan un comportamiento estructural más eficiente frente a esfuerzos cortantes y deformaciones permanentes, lo que los convierte en una alternativa más eficiente y duradera en contextos de tráfico medio y alto. En este sentido, la estabilización con emulsión asfáltica ha demostrado ser particularmente efectiva en zonas con alta humedad y baja calidad de agregados, como ocurre en varias regiones costeras de Ecuador.

La falta de estudios comparativos que evalúen el comportamiento técnico y económico de los materiales granulares de Santa Elena bajo distintos métodos de estabilización limita la capacidad de diseñar pavimentos optimizados en función del contexto local. Esta carencia de información impide tomar decisiones fundamentadas sobre cuál técnica resulta más eficiente en términos de desempeño estructural y viabilidad económica.

Por tanto, se plantea la necesidad de realizar un análisis comparativo costo-beneficio entre agentes estabilizadores asfálticos de dos tipos: el asfalto diluido y la emulsión asfáltica, aplicados a materiales granulares de tres canteras representativas de la provincia. Teniendo como fin identificar la alternativa más eficiente para su uso en estructuras de pavimento, considerando tanto el comportamiento mecánico como los costos asociados a su implementación.

1.2 ANTECEDENTES

La estabilización de suelos con agentes asfálticos ha sido ampliamente estudiada en el ámbito de la ingeniería vial como una solución técnica para mejorar el comportamiento mecánico de materiales granulares. Esta técnica permite modificar propiedades como la cohesión, la resistencia a la humedad, la densidad y la rigidez, lo que contribuye a mejorar la capacidad portante y la durabilidad de los pavimentos (Lanamme-UCR, 2020) (Solís, 2021).

Diversos estudios han abordado la aplicación de emulsión asfáltica y asfalto diluido como estabilizantes, evaluando su desempeño en laboratorio y en campo. En Ecuador, (Quiroz, 2017) comparó ambos métodos en suelos de Ambato mediante ensayos de CBR, densidad aparente y humedad óptima, concluyendo que la emulsión asfáltica ofrece ventajas en términos de seguridad ambiental, trabajabilidad y resistencia mecánica. De forma complementaria, (Almeida, 2011) analizó el uso de emulsiones catiónicas de rotura lenta en suelos limo-arenosos, observando mejoras en la capacidad de soporte, aunque con sensibilidad a la dosificación y al tipo de suelo.

A nivel regional, el Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales de Costa Rica (Lanamme-UCR, 2020) desarrolló una metodología de diseño en laboratorio para mezclas suelo-emulsión, incorporando ensayos como el módulo resiliente, la rueda de Hamburgo y la pérdida de masa por humedad. Esta propuesta técnica ha sido adoptada como referencia en varios países latinoamericanos, y destaca la importancia de evaluar el comportamiento de las mezclas estabilizadas bajo condiciones de carga repetida y exposición ambiental.

En Perú, (Kienle Chauca, 2024) estudió el mejoramiento de una base granular mediante la aplicación de emulsión asfáltica CSS-1h, demostrando que esta técnica permite mejorar la resistencia a la deformación permanente, lo que se traduce en una mayor eficiencia estructural en pavimentos semirrígidos. Estos hallazgos refuerzan el

potencial de la estabilización como alternativa técnica frente a la construcción convencional con materiales no tratados.

Desde la perspectiva económica, (Arias & Idrobo, 2022) realizaron un análisis comparativo entre el uso de bases estabilizadas y el transporte de materiales desde otras regiones, concluyendo que la estabilización puede representar una inversión inicial más alta, pero con beneficios estructurales y financieros a largo plazo. (Iñiguez Delgado, 2024) complementaron esta visión al demostrar que la estabilización permite optimizar el diseño estructural del pavimento, reducir el consumo de materiales y mejorar la relación costo-beneficio en zonas con limitaciones geotécnicas.

A pesar de estos avances, la literatura técnica no ha abordado de forma específica el comportamiento de los materiales granulares de Santa Elena bajo distintos métodos de estabilización asfáltica. Tampoco se ha realizado un análisis comparativo que integre criterios técnicos y económicos para determinar la alternativa más eficiente en el contexto local. Esta investigación busca llenar ese vacío, aportando evidencia experimental que permita orientar decisiones de diseño en proyectos viales de la región.

1.3 HIPÓTESIS

1.3.1 Hipótesis General.

La estabilización de materiales granulares provenientes de tres canteras de la provincia de Santa Elena, mediante emulsión asfáltica CSS-1h, demuestra mejoras significativas en su desempeño mecánico en comparación con las estabilizaciones tradicionales realizadas con material granular y asfalto diluido RC-250, esto permite optimizar el costo de construcción en estructuras de pavimentos.

1.3.2 Hipótesis Específica.

H.E.1: Los dos tipos de estabilizantes y los materiales granulares de las tres canteras presentan propiedades físicas y mecánicas dentro de los requisitos técnicos especificados en la norma (MOP - 001-F, 2002).

H.E.2: La estabilización con asfalto diluido y emulsión asfáltica modifica las propiedades mecánicas de los materiales granulares, incrementando su estabilidad, rigidez, resistencia a la deformación y evaluando su comportamiento ante el agua, conforme a los resultados obtenidos mediante el ensayo Marshall (ASTM D6927) y tracción indirecta.

H.E.3: El análisis comparativo de costos entre los métodos de estabilización permite identificar diferencias significativas en el precio unitario de materiales, mano de obra y equipos, lo que contribuye a determinar la alternativa más ventajosa en términos de viabilidad técnica y económica para proyectos viales en Santa Elena.

1.4 OBJETIVOS

1.4.1 Objetivo General.

El objetivo general del proyecto es analizar el desempeño mecánico y de costo de los materiales granulares de tres canteras de la provincia de Santa Elena, estabilizados con asfalto diluido y emulsión asfáltica, para identificar la alternativa más eficiente para su uso en estructuras de pavimentos.

1.4.2 Objetivos Específicos.

O.E.1: Caracterizar los materiales granulares y estabilizantes mediante pruebas de laboratorio, bajo las especificaciones de las normas (ASTM D2487-17, 2017) para los materiales granulares y (NTE INEN 2062, 2024) para los estabilizantes.

O.E.2: Evaluar la influencia de la estabilización con asfalto diluido y emulsión asfáltica sobre las propiedades de los materiales granulares, determinando su estabilidad, flujo, densidad, contenido óptimo de estabilizante; siguiendo la metodología Marshall modificado y el ensayo de resistencia a la tensión indirecta.

O.E.3: Realizar un análisis comparativo costo-beneficio entre los dos métodos de estabilización (asfalto diluido y emulsión asfáltica), para determinar la viabilidad técnica y de costos en proyectos viales de la provincia de Santa Elena.

1.5 ALCANCE

El presente trabajo de investigación se desarrolla con el propósito de evaluar comparativamente los materiales provenientes de tres canteras ubicadas en la provincia de Santa Elena: Juan Montalvo, Tugaduaja y San Vicente. Esta evaluación se orienta a determinar su comportamiento físico-mecánico y su potencial de estabilización mediante el uso de dos agentes bituminosos utilizados en ingeniería vial: el asfalto diluido tipo RC-250 y la emulsión asfáltica CSS-1h. La necesidad de este estudio surge de la demanda de soluciones técnicas eficientes y sostenibles para mejorar la infraestructura vial en zonas de la península, donde las condiciones climáticas, geológicas y presupuestarias requieren enfoques adaptados a los recursos locales.

La fase inicial da paso a la caracterización de los materiales y estabilizantes, mediante una serie de ensayos normalizados bajo estándares (ASTM D2487-17, 2017), permite establecer parámetros fundamentales para identificar el material granular. Se aplicaron pruebas de contenido de humedad (ASTM D2216, 2019), granulometría (ASTM D422, 2014), límites de consistencia (ASTM D4318, 2010), compactación Proctor modificado (ASTM D1557, 2012), resistencia CBR antes y después de la inmersión (ASTM D1883, 2021), y resistencia a la abrasión de agregados gruesos (ASTM C535, 2016). Estos ensayos fueron ejecutados en laboratorio con muestras representativas de cada cantera, recolectadas bajo condiciones controladas y siguiendo procedimientos de muestreo establecidos en la norma (ASTM D75M-19, 2019). Para los estabilizantes se evaluarán sus propiedades siguiendo las normas (NTE INEN 2062, 2024)

La segunda fase del estudio contempla la aplicación de los estabilizantes RC-250 y emulsión asfáltica CSS-1h sobre los materiales caracterizados, con el fin de evaluar su efecto por medio del ensayo Marshall (ASTM D6927) en parámetros como estabilidad, flujo, densidad y contenido óptimo de estabilizante; y el ensayo de resistencia a la tensión indirecta (ASTM D6931, 2017) para evaluar la cohesión interna de las mezclas compactadas y su susceptibilidad a la humedad para cada mezcla de suelo-asfalto. El RC-250, por su naturaleza de curado rápido, ofrece ventajas en términos de penetración

y adherencia, mientras que la emulsión asfáltica CSS-1h, al contener agua y agentes emulsificantes, permite una mejor trabajabilidad y mezcla con el material granular. Ambos productos han demostrado mejorar la resistencia al corte y la durabilidad de las capas estabilizadas en estudios previos como el realizado por (Washington, 2017) en la Universidad Técnica de Ambato.

La comparación entre los dos métodos de estabilización se realiza mediante la elaboración de tablas de resultados, gráficos técnicos y análisis estadístico básico. Según (Rivas Blancas, 2019) observa que la emulsión asfáltica tiende a mejorar la cohesión del material y reducir el índice de plasticidad, mientras que el RC-250 incrementa la resistencia a la penetración y mejora el CBR en condiciones de humedad.

El estudio se limita a la evaluación en laboratorio, sin incluir pruebas de campo. No se consideran aditivos químicos ni polímeros modificadores. Asimismo, se reconoce que los resultados deben ser validados mediante ensayos in-situ en condiciones reales de obra para garantizar su aplicabilidad.

Los resultados obtenidos permiten establecer recomendaciones técnicas para el uso de materiales locales en obras viales, considerando su comportamiento natural y su respuesta a la estabilización con agentes bituminosos. Este trabajo contribuye al conocimiento técnico sobre estabilización de suelos y ofrece una base sólida para el diseño de mezclas estabilizadas adaptadas a las condiciones locales. Además, reduce la dependencia de materiales importados.

1.6 VARIABLES

1.6.1 Variables Dependientes.

Las variables dependientes representan los resultados observables que se ven influenciados por las condiciones de estabilización aplicadas:

- Estabilización de suelos para carreteras
- Propiedades físico – mecánicas
- Relación costo – beneficio

1.6.2 Variables Independientes.

Las variables independientes corresponden a los factores que se manipulan en el proceso de investigación para observar su efecto sobre el comportamiento de los materiales granulares:

- Materiales Granulares de Subbase de la provincia de Santa Elena
- Estabilizantes asfálticos

1.6.3 Matriz de variables.

Tabla 1.1
Matriz de variables

Variable- categoría	Dimensión – Subcategoría	Subcategoría específica- Indicadores	Técnicas e instrumentos	Objetivo específico
Estabilización de suelos para carreteras	Definición	-	Investigación	O.E.2
	Usos como capas estructurales de pavimentos	-	Investigación	O.E.2
	Diseño de mezclas asfálticas en frío, Método Marshall modificado	Ensayo Marshall de estabilidad y flujo Ensayo de razón de resistencia retenida	Método Marshall para mezclas asfálticas en frío. Ensayo de estabilidad y TSR	O.E.2.
Materiales Granulares de Subbase	Definición y usos como capas estructurales de Pavimentos	Definición de subbases granulares clase 3 Usos como capas estructurales de pavimentos	Investigación	O.E.1.
	Propiedades geotécnicas relevantes de las Subbases	Límites de Atterberg. Granulometría. Proctor Modificado. CBR. Abrasión de los ángeles Clasificación ASSHTO	Normas ASTM	O.E.1
	Requisitos técnicos del Material Subbase clase 3	Requisitos MOP 001	Normas MOP 001	O.E.1
Estabilizantes asfálticos	Asfalto diluido de curado rápido RC – 250	Definición y usos en estabilización de suelos para estructuras de pavimentos.	Normas MOP 001	O.E.1

		<p>Caracterización y requisitos según norma MOP 001.</p> <p>Ventajas del asfalto diluido de curado rápido RC - 250.</p> <p>Desventajas del asfalto diluido de curado rápido RC - 250</p>		
	Emulsión asfáltica de rotura lenta CSS - 1h	<p>Definición y usos en estabilización de suelos para estructuras de pavimentos.</p> <p>Caracterización y requisitos según norma MOP 001.</p> <p>Ventajas de la emulsión asfáltica de rotura lenta CSS - 1h.</p> <p>Desventajas de la emulsión asfáltica de rotura lenta CSS - 1h</p>	Normas MOP 001	O.E.1
Relación costo - beneficio	Estudio y comparación de costos de implementación para ambos métodos de estabilización de suelos	<p>Análisis de costos de estabilización con asfalto diluido RC - 250</p> <p>Análisis de costos de estabilización con emulsión asfáltica CSS 1h</p>	<p>Análisis de precios unitarios.</p> <p>Contraloría</p>	O.E.3
	Análisis de beneficios de ambos métodos de estabilización de suelos	<p>Análisis cualitativo y de mejoras en propiedades físico - mecánicas de estabilización con asfalto diluido RC - 250</p> <p>Análisis cualitativo y de mejoras en propiedades físico - mecánicas de estabilización con emulsión asfáltica CSS - 1h</p>	<p>Cálculo de cantidad de materiales necesarios para unidad de metro cubico por cada mezcla</p>	O.E.3

CAPITULO II: MARCO TEÓRICO

2.1 ESTABILIZACIÓN DE SUELOS PARA CARRETERAS

2.1.1 Definición.

La estabilización de suelos comprende técnicas físicas, químicas o mecánicas orientadas a mejorar las propiedades del suelo (textura, resistencia, impermeabilidad) mediante aditivos (cemento, cal, asfaltos, emulsiones) o energía (compactación) (Conarsac, 2023).

Su objetivo es obtener suelos más uniformes, compactos y resistentes, adecuados para soportar cargas y reducir costos de reposición de materiales (Conarsac, 2023). Entre las ventajas de utilizar suelos estabilizados se cuentan el aumento de la capacidad portante, la mejora de la durabilidad y una mayor impermeabilidad, lo cual reduce la erosión, las deformaciones plásticas y la necesidad de importar agregados (Conarsac, 2023).

A nivel estructural, suelos tratados con asfalto obtienen una mayor cohesión, mayor módulo resiliente y menor deformación plástica bajo cargas, lo que los hace ideales como subbase mejorada o bases estabilizadas.

2.1.2 Usos como capas estructurales de pavimentos.

En las estructuras de pavimento, los suelos estabilizados con asfaltos se emplean principalmente como subbase o base granular mejorada. Una capa estabilizada ofrece mayor rigidez inicial y capacidad portante que el suelo natural; de este modo se

puede diseñar un pavimento menos espeso sin perder desempeño (por ejemplo, reducir el espesor de la carpeta asfáltica superior. Además, la capa estabilizada actúa como drenaje parcial al ser menos permeable que la subrasante natural, y protege ésta de la intrusión de finos. Según estudios de caso en Ecuador, la estabilización bituminosa ha permitido optimizar los espesores de las distintas capas y reducir costos de transporte de materiales al requerir menos volumen total de agregado. (Arias & Idrobo, 2022)

En obras existentes, la estabilización con emulsiones o asfaltos diluidos se emplea también para rehabilitación (mezclas recicladas en frío) o sellos de capa base. La capa estabilizada puede quedar expuesta o recubrirse luego con carpeta asfáltica convencional. La elección de estabilizante y porcentaje depende del uso previsto: por ejemplo, para bases de carreteras primarias de alta demanda se exigen mayor estabilidad, mientras que para caminos vecinales se valoran otras propiedades como mayor flexibilidad y menor costo (Arias & Idrobo, 2022)

El material estabilizado se emplea típicamente en capas base de pavimentos, por debajo únicamente de una carpeta asfáltica. Una base o subbase estabilizada permite reducir el espesor total requerido de pavimento al aumentar la capacidad portante de la capa tratada (Belén, 2023)

Las principales funciones estructurales de un pavimento con superficie de concreto asfáltico corresponden a cada capa: la subrasante recibe y transfiere las cargas del tránsito al suelo natural; la subbase y base (capas granular o tratadas) distribuyen las cargas hacia la subrasante y proporcionan rigidez y resistencia estructural; y la carpeta de rodadura (mezcla asfáltica o concreto) soporta directamente el tránsito, resistiendo el desgaste superficial y evitando la penetración de agua a capas inferiores. (Universidad de Sonora, 2008)

2.1.3 Diseño de mezclas asfálticas en frío (método Marshall modificado).

Consiste en preparar probetas compactadas Marshall con varios contenidos de ligante y luego curarlas adecuadamente. A cada mezcla se mide la estabilidad máxima, el flujo (deformación en mm) y el volumen de vacíos, siguiendo las normas ASTM o MOP pertinentes. Los criterios de diseño buscan el contenido óptimo de estabilizante que maximiza la estabilidad Marshall y mantiene el flujo y los vacíos dentro de rangos aceptables establecidos por la norma. También se evalúa la resistencia residual por humedad a través del TSR: se miden las resistencias a la tensión indirecta en condiciones saturadas y secas. (Lanamme-UCR, 2020)

a) *Ensayo Marshall de estabilidad y flujo (ASTM D6927).*

El método Marshall determina el contenido óptimo de asfalto residual y evalúa la estabilidad y flujo de la mezcla asfáltica. Se preparan probetas (65 mm altura x 101.6 mm diámetro) compactadas con martillo standard de 50 golpes por cara. Tras estabilizar la temperatura a 25°C para Marshall modificado, una máquina de carga aplica fuerza diametral hasta falla. Se registra la estabilidad Marshall (carga máxima en Newton o kg) y el flujo Marshall (deformación en 0.25 mm desde inicio de carga hasta la falla).

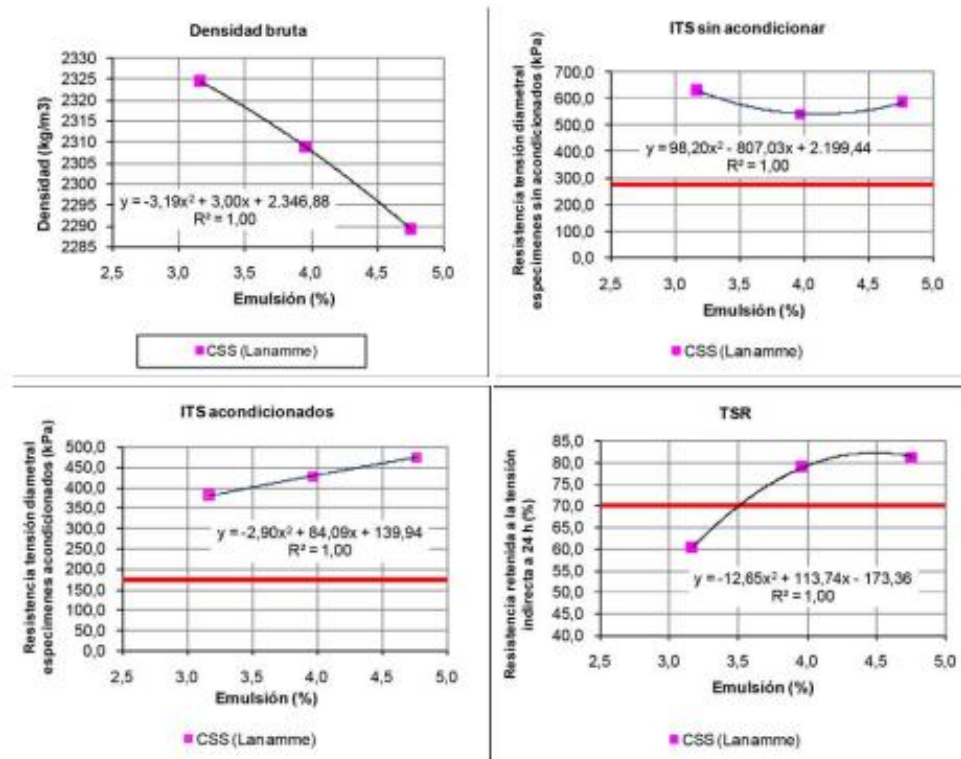
Una alta estabilidad implica que la mezcla resiste esfuerzos elevados sin fallar; un alto flujo indica deformaciones plásticas mayores. Ambos parámetros, junto vacíos, se usan para escoger el contenido óptimo de ligante: se busca mínimo flujo (8–16 unidades 1/100 pulg según norma) que garantice estabilidad mínima requerida (MOP - 001-F, 2002).

b) *Ensayo de Razón de Resistencia Retenida (TSR).*

Para la durabilidad, se emplea la Razón de Resistencia Retenida (TSR) a la tensión indirecta, definida en (ASSHTO T283, 2005), que mide la pérdida de resistencia bajo humedad (ensayo de rotura diametral seco vs húmedo) (Lanamme-UCR, 2020). Un TSR por encima de 70-80% suele aceptarse como indicador de buena resistencia a humedad.

Tabla 2.1

Gráficos de diseño de mezcla estabilizada con emulsión asfáltica: densidad seca, resistencias ITS, flujo y TSR.



En la [referencia de \(Lanamme-UCR, 2020\)](#) se observa un ejemplo de diseño: al aumentar el contenido de emulsión, la densidad bruta de la mezcla compactada varía ligeramente y las resistencias indirectas (ITS) secas aumentan hasta alcanzar un pico. La curva TSR muestra la exigencia mínima de resistencia retenida (línea horizontal), que define la menor proporción de emulsión que garantiza durabilidad. De esta forma, el punto óptimo de emulsión (o asfalto diluido) es el mínimo que cumple estabilidad, flujo y TSR (en la figura, 70% TSR). En bases estabilizadas según normas, el contenido óptimo suele estar entre 3% y 6%, aunque depende del material granular y tipo de asfalto.

2.2 MATERIALES GRANULARES DE SUBBASE

Los materiales granulares de subbase son agregados gruesos naturales o triturados, de granulometría uniforme de grueso a fino, que se ubican sobre la subrasante para soportar las cargas de la capa base o rodadura. En el contexto ecuatoriano, se clasifica la subbase en clases 1, 2 y 3 según (MOP - 001-F, 2002)

2.2.1 Definición y usos como capas estructurales de Pavimentos.

a) *Definición de subbase granular clase 3.*

Según las especificaciones (MOP - 001-F, 2002)(Sección 816-5), “*la subbase Clase 3 está formada por agregados gruesos, obtenidos mediante cribado de gravas o roca mezclados con arena natural o material finamente triturado para alcanzar la granulometría especificada en la Tabla 403-1.1* (MOP - 001-F, 2002). Es decir, la subbase clase 3 se conforma generalmente por gravilla natural cribada y arena. Para esta clase, la Tabla 403-1.1 del (MOP - 001-F, 2002) exige que el 100% del material pase el tamiz de 3" (76,2 mm) y el 100% pase 1½" (38,1 mm), con 30–70% pasando tamiz No.4 (4,75 mm) y 0–20% pasando No.200 (0,075 mm) (MOP - 001-F, 2002) (EMUVISP-EP, 2024). En la práctica, la clase 3 admite más arena fina y grava pequeña que las clases superiores. Además, sus finos naturales deben ser no plásticos (o con límite líquido <25, índice de plasticidad <6) (MOP - 001-F, 2002).

La subbase clase 3 se utiliza típicamente en carreteras secundarias y terciarias o en primeras capas de terraplén, donde no se requieren las mayores rigideces de las clases 1 o 2. Su función es distribuir la carga vehicular a la subrasante y proporcionar drenaje: por eso debe cumplir un CBR mínimo de 30% y un desgaste Los Ángeles $\leq 50\%$ (500 vueltas) (EMUVISP-EP, 2024) (MOP - 001-F, 2002). En la práctica, la elección de la subbase 3 se basa en la disponibilidad de material natural gravoso, buscando reducir costos de trituración. De hecho, la normativa señala que al menos el 30% del material de clases 1 o 2 debe provenir de trituración, mientras que la clase 3 puede ser básicamente natural.

b) Usos como capas estructurales de pavimentos.

La subbase granular de clase 3 forma parte de la estructura inferior del pavimento flexible o semirrígido. Se coloca directamente sobre la subrasante compactada y bajo la capa base. Su espesor varía según diseño, pero suele ser de 20–30 cm. Sus principales usos son proporcionar una buena capacidad portante inicial y servir de carpeta de transición en estructuras flexibles, o como base de asiento en pavimentos rígidos. Aunque por sí sola no se considera material estructural definitivo, contribuye a la vida útil del pavimento al mejorar el soporte de la base o la losa y al servir como capa de drenaje. Las especificaciones (MOP - 001-F, 2002) exigen que la subbase cumpla los requisitos de granulometría, abrasión y plasticidad mencionados, garantizando así que soporte adecuadamente la base o base estabilizada colocada encima (EMUVISP-EP, 2024).

2.2.2 Propiedades geotécnicas relevantes de las subbases.

Para evaluar y controlar las subbases de clase 3, se consideran las siguientes propiedades geotécnicas clave:

a) Límites de Atterberg (ASTM D4318).

Los límites de Atterberg caracterizan la plasticidad de suelos finos (limo/arcilla), indicando humedades críticas de transición de consistencia. El límite líquido (LL) es el contenido de agua donde el suelo pasa de plástico a líquido (surco de Casagrande de 12.7 mm con 25 golpecitos).

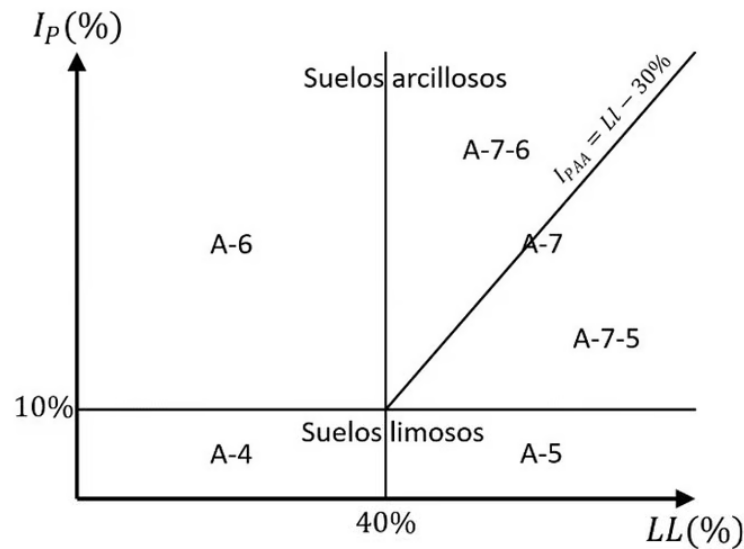
El límite plástico (LP) es donde pasa de semisólido a plástico (muestra aplastada formándose un hilo de 3mm). De ellos se obtiene el índice de plasticidad $IP = LL - LP$, que refleja la proporción de arcilla activa. Estos ensayos sirven para clasificar suelos y prever comportamientos (posible expansividad o flujo).

Procedimiento: homogeneizar suelo fino, ajustar contenidos de agua, realizar ensayos de Casagrande y de hilo.

Interpretación: suelos con IP alto indican arcillas con alta plasticidad (sensible a cambios de humedad), lo cual afecta la estabilidad; valores $IP < 6$ y $LL < 25$ son requeridos en subbase según (MOP - 001-F, 2002)

Figura 2.1

Carta de plasticidad según la metodología de clasificación (AASHTO, 1993)



b) Granulometría (ASTM D422/D6913).

El ensayo de granulometría determina la distribución de tamaños de partículas en un suelo o agregado por tamizado, siguiendo (ASTM D6913, 2004). Se seca la muestra, se tamiza por apilamiento de mallas de progresiva abertura y se pesa el material retenido en cada tamiz. El propósito es obtener la curva granulométrica, que informa si el material es grava, arena o limo y su grado de uniformidad. Parámetros clave son el % pasando cada tamiz, la granulometría óptima para mezcla y el coeficiente de uniformidad (CU). Una buena gradación mejora la compactación y la densidad del suelo, mientras que un exceso de finos puede causar expansión. En general, se interpreta que mezclas densas (bien gradadas) aportan mayor estabilidad al pavimento.

c) *Proctor Modificado (ASTM D1557).*

La compactación Proctor modificado establece la densidad máxima alcanzable de un suelo bajo esfuerzo estándar y su correspondiente contenido óptimo de humedad. Siguiendo (ASTM D1557, 2012), se compactan varias muestras a distintos contenidos de agua en molde cilíndrico, golpeadas con martillo de 4.54 kg desde 457 mm (llenando en capas). Cada ensayo arroja la densidad seca obtenida. Trazando densidad vs. contenido de humedad se obtiene la curva Proctor; su vértice indica el peso unitario seco máximo (MDD) y el contenido óptimo de humedad (OMC).

Estos parámetros son clave para diseñar la compactación de subrasantes y subbases: compactar con humedad cercana al OMC garantiza máxima densidad y resistencia. El resultado se interpreta de acuerdo con especificaciones: por ejemplo, el (MOP - 001-F, 2002) exige compactar la subbase al menos al 98% de la densidad Proctor modificada. Un exceso de agua (lado “húmedo” de la curva) o muy poca (lado “seco”) reduce la densidad y capacidad portante. El ensayo resume la relación humedad-densidad del suelo bajo un esfuerzo controlado

d) *CBR – California Bearing Ratio (ASTM D1883).*

El Índice de Capacidad de Soporte (CBR) evalúa la resistencia a la penetración de un suelo compactado, reflejando su capacidad portante relativa. Según ASTM D1883, se compacta la muestra en un molde estándar y se fuerza a penetrar un émbolo de 50 mm de diámetro a velocidad fija (1.27 mm/min). Se registra la presión necesaria para penetrar 2.54 mm y 5.08 mm.

El CBR (%) se calcula comparando esta presión con la de una muestra estándar de grava calibrada. Valores altos de CBR indican suelos rígidos y aptos para bases/carpetas; valores bajos se asocian a suelos blandos o expansivos. Para subbase Clase 3, (MOP - 001-F, 2002) exige $CBR \geq 30\%$.

El CBR es útil para dimensionar espesores de pavimento según tránsito. En interpretación, un CBR bajo advierte necesidad de estabilización o mayor espesor de pavimento para lograr la capacidad deseada.

e) Abrasión de los ángeles (ASTM C535).

El ensayo Los Ángeles de abrasión mide la resistencia al desgaste de agregados bajo impactos, usando una máquina rotatoria con pesas circulares. Según ASTM C535 (agregado grueso $>3/4''$), se introduce una muestra y 12 bolas de acero en el tambor, se gira 500 revoluciones, luego se separa el agregado molido del polvo y se calcula el porcentaje de pérdida de masa. Este porcentaje indica la dureza/tenacidad del material: para base se acepta $\leq 45\%$ y para carpeta $\leq 35\%$ de pérdida. Un valor menor indica agregado resistente a la trituración.

En el contexto de subbase, (MOP - 001-F, 2002) exige $\leq 50\%$ (ensayo de Los Ángeles). En diseño, agregados con índice alto de abrasión pueden causar degradación prematura de la capa, por lo que este parámetro es clave en la selección de material.

f) Clasificación AASHTO.

Aunque no se utiliza en diseño, clasificar el suelo por AASHTO T-245 brinda información del tipo de material. Las clases A-1, A-2 y A-3 corresponden a suelos granulares (gravas y arenas). Según AASHTO, los suelos de subbase idealmente son A-1-a/b, A-2-4/5 o A-3, con bajos índices de grupo ($IG < 10$). Por ejemplo, un suelo A-2-4 (grava limosa poco plástica) suele ser deseable para subbase. Aunque la norma INVIAS no exige explícitamente la clasificación AASHTO, ésta se usa en algunos estudios para caracterizar el material. La clasificación AASHTO se basa en porcentajes pasantes tamiz #200, LL e IP del suelo, dividiendo los suelos finos (A-4 a A-7) de los granulares (A-1 a A-3) (Gavidia, 2018)

Figura 2.2
Sistema de clasificación de suelos AASHTO

Clasificación General	Material Granular						Material limo arcillosos				
	A-1		A-2				A-3	A-4	A-5	A-6	A-7
Subgrupos	A-1a	A-1b	A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7					A-7-5
% pasante #10 #40 #200	50% máx 30% máx 15% máx	50% máx 25% máx	35% máx	35% máx	35% máx	35% máx	51% mín 10% máx	36% mín	36% mín	36% mín	36% mín
Características del material que pasa por el tamiz #40 LL Ip			40% máx 10% máx	41% mín 10% máx	40% máx 11% mín	41% mín 11% mín	N.P.	40% máx 10% máx	41% mín 10% máx	40% máx 11% mín	41% mín 11% mín
Ig	0	0	0	0	4 máx	4 máx	0	8 máx	12 máx	16 máx	20 máx
Tipo de material	Fragmentos pétreos de gravas y arenas		Gravas y arenas, limosas y arcillosas				Arena fina	Suelos limosos		Suelos arcillosos	

2.2.3 Requisitos técnicos del material subbase clase 3.

Las normas MOP-001 establecen requisitos específicos para la subbase de agregados. La sección 816-2 (Requisitos comunes) indica que todos los agregados de subbase deben presentar los parámetros mencionados: gradación uniforme, desgaste Los Ángeles ≤ 50 , finos no plásticos ($IP < 6$, $LL < 25$). Además, la Sección 403-1.02 exige en la práctica que el CBR sea $\geq 30\%$ y limita la finura excesiva: “la porción que pase No.40 debe tener $IP < 6$ y $LL < 25$; la capacidad de soporte corresponderá a un CBR $\geq 30\%$ ”. Estas especificaciones (derivadas del (MOP - 001-F, 2002)) aseguran que el material granular de la subbase clase 3 sea apto para construir la capa de base encima.

En síntesis, la subbase clase 3 debe ser un material granular bien graduado y no plástico, con abrasión moderada y capacidad de soporte mínima, conforme a la Tabla 403-1.1 y Sección 816 del (MOP - 001-F, 2002) (EMUVISP-EP, 2024).

En el caso de la provincia de Santa Elena, las canteras evaluadas (Tugaduaja, Juan Montalvo, San Vicente) deberán ajustarse a estos límites de gradación y límites de Atterberg para ser clasificadas como subbase clase 3.

2.3 ESTABILIZANTES ASFÁLTICOS

Los estabilizantes asfálticos empleados en pavimentos son productos derivados del petróleo diseñados para mezclarse con agregados en frío. En este estudio se consideran dos tipos principales: el asfalto diluido de curado rápido (RC-250) y la emulsión asfáltica catiónica de rotura lenta (CSS-1h). Cada uno tiene características propias en su composición y comportamiento.

2.3.1 Asfalto diluido de curado rápido RC-250.

a) Definición y usos en estabilización de suelos para estructuras de pavimentos.

El asfalto diluido RC-250 (Rapid Curing 250) es un asfáltico de baja viscosidad al cual se ha agregado un solvente (normalmente gasolina o queroseno) para reducir su viscosidad de transporte. En Ecuador se le conoce como “asfalto de caminos”: es una sustancia viscosa, de color oscuro, disponible en envases cilíndricos de 54 galones y transportada en camiones cisterna. El RC-250 está formulado para volatilizar rápidamente el diluyente al esparcirlo, dejando una película de asfalto base (pen. 80/100) que se adhiere a los agregados. Su temperatura ideal de mezcla se sitúa entre 27°C y 66°C (CivilGeeks, 2011) , lo que facilita su uso en frío sin requerir calentamiento excesivo.

En estabilización de suelos, el RC-250 se usa para recubrir partículas granulares y proveer cohesión. Es especialmente habitual en vías de bajo volumen donde hay abundancia de suelo arenoso o grava; allí permite formar una capa compactada unida, reduciendo polvo y mejorando la resistencia. El RC-250 se emplea tanto en mezcla en frío (material granular + RC-250 + compactación) como en aplicaciones superficiales (regulación o riego de imprimación) que ofrecen cierta estabilización.

b) Caracterización y requisitos según norma MOP 001.

La norma (MOP - 001-F, 2002)(Sección 810-3) define propiedades del asfalto diluido RC-250. En la Tabla 810-3.1 se establecen exigencias como viscosidad

cinemática 250–500 cSt a 60 °C, y puntos de destilación específicos. Según (MOP - 001-F, 2002), el RC-250 destila el 50% de su volumen a 225°C y al 70% a 260°C. El residuo asfáltico por destilación debe ser $\geq 65\%$ vol. Los residuos resultantes tienen penetración 80–120 (a 25°C) y ductilidad mínima 100 cm (a 25°C), indicando un asfalto base relativamente blando. La temperatura de rociado en obra recomendada es 60–107 °C y de carga 91–135 °C.

El cumplimiento de estos parámetros garantiza que el RC-250 tenga la fluidez adecuada y un punto de inflamación seguro (>27 °C abierto). La norma (ASTM D2028, 2021) coincide en definir al RC-250 como un asfalto de baja viscosidad (250 cSt) apto para mezclas en frío. En la práctica de laboratorio, se verifica que el producto cumpla con dichas viscosidades y contenido de agua ($<0,2\%$).

c) *Ventajas del asfalto diluido de curado rápido RC - 250.*

Entre las ventajas del RC-250 están su bajo costo relativo y su sencillez de uso. Al ser un producto muy conocido y de alta disponibilidad, su precio por litro suele ser considerablemente menor que el de las emulsiones asfálticas (CivilGeeks, 2011). Además, el RC-250 no contiene agua, por lo que no requiere tiempos de curado adicionales, y ofrece una adherencia inicial inmediata al compactar (una vez evaporados los solventes). Su uso permite una manipulación en frío relativamente sencilla (temperatura moderada) y emite menos vapores durante el curado que asfaltos más pesados. Según (CivilGeeks, 2011), el proceso de estabilización con asfaltos diluidos se basa en la rápida evaporación, formando pronto la película asfáltica que recubre el material (CivilGeeks, 2011).

Otra ventaja es su mayor penetración en los agregados finos: el solvente le permite mezclarse bien con suelos limosos, garantizando mejor recubrimiento. En su ficha técnica, se observa que el RC-250 proporciona cohesión mejorada sin requerir calentamiento complejo. En comparación con la emulsión, el RC-250 genera menor volumen de mezclas húmedas (no hay componente acuoso

que evaporar), acelerando el curado. De hecho, la normativa permite incluso compactar el material estabilizado en obra, sin necesidad de dejarlo secar mucho tiempo.

d) *Desventajas del asfalto diluido de curado rápido RC – 250.*

Entre las desventajas del RC-250 se cuenta la alta volatilidad del solvente, que requiere precaución en su manejo por razones de salud y medio ambiente. La (MOP - 001-F, 2002) alerta que no debe superarse la temperatura de aplicación indicada, pues un exceso de calor puede evaporar demasiado rápido el solvente y afectar la uniformidad de mezcla.

Otro aspecto es la emisión de vapores orgánicos: aunque la MOP limita el contenido de agua a $<0,2\%$, el compuesto formado (asfalto disuelto) sigue siendo inflamable y genera contaminantes. Adicionalmente, a pesar de su rapidez de curado, el RC-250 suele penetrar más en el material absorbente, lo que puede requerir algo más de contenido para garantizar cohesión total; es decir, la eficiencia del enlace puede ser menor comparada con emulsiones catiónicas, dado que éstas contienen tensoactivos diseñados para adhesión.

Entre las desventajas del RC-250 se cuenta la alta volatilidad del solvente, que requiere precaución en su manejo por razones de salud y medio ambiente. La (MOP - 001-F, 2002) alerta que no debe superarse la temperatura de aplicación indicada, pues un exceso de calor puede evaporar demasiado rápido el solvente y afectar la uniformidad de mezcla. Otro aspecto es la emisión de vapores orgánicos: aunque la MOP limita el contenido de agua a $<0,2\%$, el compuesto formado (asfalto disuelto) sigue siendo inflamable y genera contaminantes. Adicionalmente, a pesar de su rapidez de curado, el RC-250 suele penetrar más en el material absorbente, lo que puede requerir algo más de contenido para garantizar cohesión total; es decir, la eficiencia del enlace puede ser menor comparada con emulsiones catiónicas, dado que éstas contienen tensoactivos diseñados para adhesión.

Finalmente, el RC-250 no es ideal para todos los tipos de suelo: los muy arenosos o finos requieren mucha cantidad para recubrir sus partículas, y los suelos muy húmedos pueden diluir el solvente. Como señala (CivilGeeks, 2011), la emulsión (aunque más cara) puede ofrecer mejor rendimiento con ciertos suelos arcillosos debido a la formación de capas finas. Las desventajas principales del RC-250 son su volatilidad, riesgos de salud, requerimiento de manejo cuidadoso de temperatura y, en algunos casos, un menor efecto estabilizante por contenido de finos altos.

2.3.2 Emulsión asfáltica de rotura lenta CSS - 1h.

a) Definición y usos en estabilización de suelos para estructuras de pavimentos.

Las emulsiones asfálticas catiónicas son dispersiones de finas gotitas de asfalto en agua con un emulsificante cargado positivamente. La designación CSS-1h significa Cationic Slow-Setting, High viscosity, es decir, emulsión catiónica de rotura lenta y alta viscosidad. En la práctica, la CSS-1h es un líquido marrón oscuro estable, con buena capacidad adhesiva. Al aplicarse sobre un material granular húmedo o seco, los glóbulos de asfalto quedan suspendidos temporalmente en el medio acuoso. Con el tiempo (y a cierta temperatura), el emulsificante pierde carga y las gotas de asfalto se aglomeran (“rompen” la emulsión), liberando el agua y formando películas bituminosas que recubren las partículas.

En estabilización de bases y subbases, la CSS-1h se utiliza para mezclas en frío similares al RC-250: se mezcla la emulsión con el suelo, se compacta y se deja fraguar. Es especialmente indicada para suelos con algo de humedad inicial, pues la presencia de agua en la mezcla acelera la ruptura de la emulsión cuando entra en contacto con la fase acuosa del medio. Además, las emulsiones catiónicas se adhieren fuertemente a minerales cargados negativamente (como la arcilla y arena), creando buena unión. Por ello, las emulsiones CSS-1h se han

empleado exitosamente en estabilización de suelos granulares, mejorando cohesión y resistencia mecánica final.

La CSS-1h se usa también en mezclas frías para bases y en tratamientos superficiales (riegos de liga, sellos de fisuras), pero su principal ventaja es en mezclas donde se requiere alta calidad de recubrimiento y durabilidad ante tráfico pesado. En Ecuador se ha recomendado su uso incluso en subrasantes problemáticos para reforzarlos antes de construir la base (ASTM D2397, 2020). Su rotura lenta da mayor tiempo de trabajo (lo cual es útil en grandes volúmenes de mezcla) y logra una capa cohesiva sin necesidad de calentar los agregados.

b) *caracterización y requisitos según norma MOP 001.*

La (MOP - 001-F, 2002)(Sección 810-4) clasifica las emulsiones por tipo de emulsionante y velocidad de rotura. Las CSS-1h se enmarcan en las “emulsiones catiónicas de rotura lenta” (CSS). Aunque la norma no da propiedades numéricas específicas para CSS-1h, sí indica que estas emulsiones deben cumplir normas internacionales (por ejemplo, (ASTM D2397, 2020)).

En la práctica, sus características incluyen viscosidad moderada (para permitir bombeo), contenido de agua controlado (<40%), y estabilidad a sedimentación. La (MOP - 001-F, 2002)(Sección 810-4) clasifica las emulsiones por tipo de emulsionante y velocidad de rotura. Las CSS-1h se enmarcan en las “emulsiones catiónicas de rotura lenta” (CSS). Aunque la norma no da propiedades numéricas específicas para CSS-1h, sí indica que estas emulsiones deben cumplir normas internacionales (por ejemplo, (ASTM D2397, 2020)). En la práctica, sus características incluyen viscosidad moderada (para permitir bombeo), contenido de agua controlado (<40%), y estabilidad a sedimentación.

El documento de la planta YPF citado establece que las CSS-1h deben proporcionar buena adherencia y cubrimiento con agregados descrito como “buena adherencia entre agregado y asfalto” (UNNA, 2020)

Otras fichas técnicas (ASTM) indican parámetros como 60-65% de asfalto en la emulsión, tamaño de gota medio, y carga positiva. La emulsión CSS-1h es no inflamable (el agua previene ignición) y se emulsiona con agentes catiónicos (sales cuaternarias de amonio) para interactuar con las cargas negativas del suelo.

c) ***Ventajas de la emulsión asfáltica de rotura lenta CSS - 1h.***

Las emulsiones CSS-1h presentan varias ventajas técnicas. Primero, el mayor tiempo de trabajo: al ser de rotura lenta, permiten la mezcla y extendidos uniformes de grandes volúmenes antes de fraguar, facilitando un mejor control y terminación final (Realquim, 2023). Esto es útil en caminos largos o donde se requiere transporte y extendido eficiente. Segundo, ofrecen excelente adherencia y cohesión: los aditivos catiónicos generan fuerte unión con los áridos, lo cual se traduce en alta resistencia inicial y durabilidad. En la ficha técnica CSS-1h se cita expresamente que “*se genera buena adherencia entre agregado y asfalto*” y “*se obtiene adecuada cohesión de la mezcla*” (UNNA, 2020). Además, al incluir agua, las emulsiones reducen emisiones de solventes y no requieren altas temperaturas de trabajo, lo que mejora la seguridad ambiental y térmica de la mezcla.

Las emulsiones CSS-1h presentan varias ventajas técnicas. Primero, el mayor tiempo de trabajo: al ser de rotura lenta, permiten la mezcla y extendidos uniformes de grandes volúmenes antes de fraguar, facilitando un mejor control y terminación final (Realquim, 2023). Esto es útil en caminos largos o donde se requiere transporte y extendido eficiente. Segundo, ofrecen excelente adherencia y cohesión: los aditivos catiónicos generan fuerte unión con los áridos, lo cual se traduce en alta resistencia inicial y durabilidad. En la ficha técnica CSS-1h se cita expresamente que “*se genera buena adherencia entre agregado y asfalto*” y “*se obtiene adecuada cohesión de la mezcla*” (UNNA, 2020). Además, al incluir agua, las emulsiones reducen emisiones de solventes y no requieren altas temperaturas de trabajo, lo que mejora la seguridad ambiental y térmica de la mezcla.

Otras ventajas incluyen versatilidad de uso (aplican bien con distintos agregados, incluso húmedos) y adaptación a diversos climas: la presencia de agua facilita la ruptura en condiciones templadas, mientras que su formulación catiónica evita que el asfalto se desencole en suelos con alta carga de finos.

En aplicación, la emulsión CSS-1h puede integrar finos que en RC-250 serían absorbidos sin vincularse al asfalto, por lo que a veces se requieren menores contenidos para lograr estabilidad equivalente. Según fuentes comerciales, la emulsión lenta es ideal para proyectos que requieren precisión, mantenimiento preventivo o mezclas en frío ecológicas (como slurry seal) (Realquim, 2023). Finalmente, el producto terminado es menos susceptible a fisuras térmicas iniciales, dado que la emulsión retira lentamente el agua, reduciendo tensiones internas al fraguar.

d) *Desventajas de la emulsión asfáltica de rotura lenta CSS - 1h.*

Entre las desventajas principales está el tiempo de curado prolongado. A diferencia del RC-250 que seca rápido al aire, la emulsión CSS-1h puede tardar horas o días en romper completamente, especialmente en climas fríos o humedades altas. Esto retrasa la apertura al tráfico pesado y puede requerir que la mezcla estabilizada se cure bajo película plástica en obra. Además, las emulsiones necesitan un manejo cuidadoso: deben recircularse si se almacenan mucho tiempo para evitar sedimentación (pérdida de estabilidad) (UNNA, 2020), y son sensibles a enfriamiento extremo (por debajo de $\sim 0^{\circ}\text{C}$ pierden fluidez) y al arrastre de agua; en zonas muy lluviosas un excesivo remojo post-aplicación podría retrasar su endurecimiento.

Entre las desventajas principales está el tiempo de curado prolongado. A diferencia del RC-250 que seca rápido al aire, la emulsión CSS-1h puede tardar horas o días en romper completamente, especialmente en climas fríos o humedades altas. Esto retrasa la apertura al tráfico pesado y puede requerir que la mezcla estabilizada se cure bajo película plástica en obra. Además, las emulsiones necesitan un manejo cuidadoso: deben recircularse si se almacenan

mucho tiempo para evitar sedimentación (pérdida de estabilidad) (UNNA, 2020) , y son sensibles a enfriamiento extremo (por debajo de $\sim 0^{\circ}\text{C}$ pierden fluidez) y al arrastre de agua; en zonas muy lluviosas un excesivo remojo post-aplicación podría retrasar su endurecimiento.

Otra consideración es el costo: las emulsiones suelen ser más caras que el RC-250. Según un informe de campo, la emulsión puede costar alrededor del doble que el RC-250 por unidad de volumen, y en el proceso de estabilización típica se usa una proporción mayor (hasta 2–3 veces más volumen) (CivilGeeks, 2011) . Esto se debe a que, al contener agua, se requiere mayor peso de emulsión para alcanzar igual contenido de asfalto útil.

También la infraestructura de dosificación en obra es más compleja (tanques de agua, bombas de emulsión). En cuanto al desempeño, aunque mejora resistencia en frío, puede tener menor rigidez inicial absoluta que una mezcla con RC curado, por lo que las especificaciones de estabilidad deben considerarse. En resumen, los desafíos de la CSS-1h son su costo inicial alto, el tiempo y condiciones de curado, y el manejo logístico más elaborado (almacenaje, uniformidad de mezcla).

2.4 RELACIÓN COSTO – BENEFICIO

El análisis costo–beneficio en estabilización compara la inversión económica (materiales, obra) con las mejoras en desempeño estructural aportadas por cada método (RC-250 vs CSS-1h).

2.4.1 Estudio y comparación de costos de implementación para ambos métodos de estabilización de suelos.

a) *Análisis de costos de estabilización con asfalto diluido RC – 250.*

Para el RC-250, el costo unitario de estabilización incluye: precio del asfalto diluido (aprox. \$401,58 por m³ en Ecuador), mano de obra, equipo de mezcla (a veces solo mezclador mecánico ligero o pala) y compactación. Dado que el RC-250 tiene bajo precio, el costo material suele ser moderado. Sin embargo, al carecer de agua, requiere cantidades de asfalto relativamente altas para recubrir el material. Se deben considerarse los costos de los diluyentes y tomar las medidas de seguridad por su carácter inflamable.

En Ecuador, el análisis de precio unitario (m³ estabilizado) muestra que el RC-250 suele ser más barato en términos de insumos directos. Sin embargo, al requerir mayor contenido, el consumo total puede aproximarse al de la emulsión. Un estudio comparativo encontró que, aunque el asfalto diluido era menor en precio, el volumen necesario de emulsión era 3 veces menor. (CivilGeeks, 2011).

Para calcular costos por m³: se multiplica el requerimiento óptimo (% de RC-250) por el costo por litro, más los costos de recursos humanos y equipo por hora. Finalmente, según (Arias & Idrobo, 2022), las bases con RC-250 resultaron económicamente menos eficientes que con emulsión en sus casos, debido a mayores espesores requeridos para cumplir criterios estructurales (CivilGeeks, 2011)

b) *Análisis de costos de estabilización con emulsión asfáltica CSS 1h.*

En el caso de la emulsión CSS-1h, el cálculo de costos incluye el precio del producto (aprox. \$425,43 por m³, generalmente mayor que RC-250), la logística de bombeo/mezcla y el control de curado. Las emulsiones se venden por peso de asfalto en emulsión (USD por kg de residuo bituminoso), lo que encarece el estabilizante. No obstante, para alcanzar la misma resistencia, las mezclas con emulsión suelen requerir un menor porcentaje (por ejemplo 4–6%) comparado con el RC (6–8%) (Lanamme-UCR, 2020). Además, su afinidad con agregados puede permitir mayores incorporaciones de finos sin sacrificar capacidad. (Arias & Idrobo, 2022) encontraron que un diseño con 6% de emulsión era suficiente para cumplir criterios de diseño en base y resultó estructuralmente viable.

El costo por m³ estabilizado con CSS-1h se deriva de multiplicar el consumo óptimo por el precio de la emulsión, sumando mano de obra especializada (operarios de planta de emulsión) y posible protección de humedad. En muchos proyectos, la emulsión puede aplicar a temperaturas más bajas, ahorrando energía de planta. Sin embargo, el estudio de (Arias & Idrobo, 2022) indicó que, a pesar del mayor costo por litro, el espesor reducido de capas estabilizadas con emulsión compensó en presupuesto final, haciendo la emulsión más rentable globalmente

2.4.2 Análisis de beneficios de ambos métodos de estabilización de suelos.

a) *Análisis cualitativo y de mejoras en propiedades físico – mecánicas de estabilización con asfalto diluido RC – 250.*

La estabilización con RC-250 mejora principalmente la firmeza inicial y la cohesión del material. Al evaporarse el solvente, el asfalto base actúa como liga entre partículas, aumentando la estabilidad Marshall y la densidad compactada. Esto se traduce en un mayor CBR efectivo en obras y menor deformación bajo carga. Estudios previos muestran que los suelos estabilizados con RC-250

pueden alcanzar incrementos notables de CBR (por ejemplo, de 20% a 45–50%) y estabilidad Marshall por encima de 800–1000 kgf (CivilGeeks, 2011) (Arias & Idrobo, 2022). Además, al ser un material impermeable relativamente, la subbase estabilizada con RC-250 ofrece una barrera de vapor, reduciendo daños por ciclos de humedad. Sin embargo, su consistencia más rígida puede conferir menor flexibilidad inicial que la emulsión. En cuanto a la durabilidad, el RC-250 confiere buen comportamiento a largo plazo si se logra un contenido adecuado: las partículas quedan permanentemente encapsuladas en asfalto.

b) Análisis cualitativo y de mejoras en propiedades físico – mecánicas de estabilización con emulsión asfáltica CSS – 1.

Por su parte, la CSS-1h mejora tanto la resistencia a la tracción como la cohesión interna. Los estudios indican que, al fraguar la emulsión, el asfalto rodea completamente las partículas finas de arena, limos o arcilla, formando una matriz rígida, pero algo flexible. Esto eleva el módulo resiliente del suelo y la resistencia indirecta a tensión (ITS). Además, las emulsiones suelen aportar mejor TSR (retención de resistencia por humedad) porque el recubrimiento bituminoso preserva las capas finas del lavado de agua.

El reporte de (Lanamme-UCR, 2020) muestra un TSR superior al 70% para contenidos óptimos de emulsión. En la práctica, suelos tratados con CSS-1h presentan mejor compactación y menor permeabilidad residual comparado con mezclas solamente con agua. Por otro lado, la emulsión puede aportar algo de ductilidad adicional ante cargas cíclicas, evitando grietas prematuras.

Adicionalmente, desde el punto de vista de conservación, la emulsión mejora el desempeño ante ciclos de congelamiento-descongelamiento (menos daños higroscópicos). Por todo ello, la relación costo-beneficio de la emulsión suele ser favorable cuando se consideran la duración del pavimento y menores mantenimientos, tal como concluyen varios estudios: “la alternativa más viable, en términos de presupuesto constructivo y desempeño estructural, es una base estabilizada con 6% de emulsión asfáltica” (Arias & Idrobo, 2022)

CAPITULO III: METODOLOGÍA

3.1 ENFOQUE METODOLÓGICO Y DISEÑO EXPERIMENTAL

La investigación se desarrolla con un enfoque cuantitativo-experimental aplicado, con el objetivo de evaluar el comportamiento físico-mecánico y económico de materiales granulares provenientes de tres canteras de la provincia de Santa Elena, estabilizados con dos agentes asfálticos (RC-250 y emulsión catiónica CSS-1h).

Se empleó un diseño factorial completo 3×2 (3 canteras \times 2 estabilizantes) para obtener seis combinaciones experimentales y determinar, por medio de ensayos normalizados, el contenido óptimo de estabilizante y las propiedades mecánicas asociadas. El esquema general del diseño experimental se reporta en la Figura 3.1 del documento.

3.2 POBLACIÓN Y MUESTRA

La población de estudio son los materiales granulares extraídos en la provincia de Santa Elena. Se seleccionaron tres canteras representativas: Juan Montalvo, Tugaduaja y San Vicente (coordenadas UTM en Tabla 3.1). El muestreo de campo se realizó conforme a la práctica recomendada para agregados (ASTM D75M-19, 2019), extrayendo muestras representativas de cada montículo en la base, mitad y cima del montón, y opositando para obtener la muestra de trabajo del laboratorio. Las cantidades colectadas fueron suficientes para cubrir todos los ensayos previstos y sus réplicas.

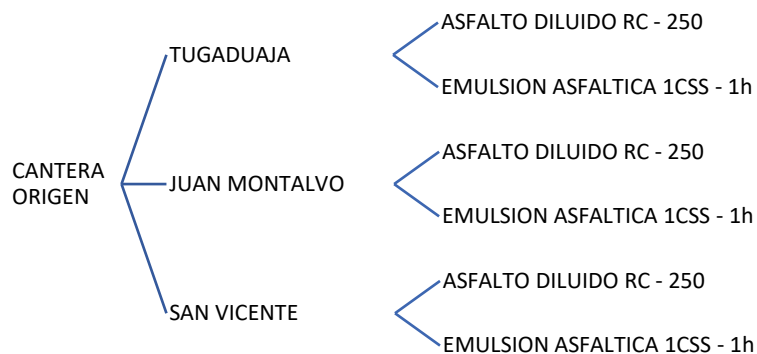
Cadena de custodia y etiquetado: cada muestra se identificó con un código de cantera, fecha y ubicación GPS; se registraron condiciones ambientales y se mantuvo la trazabilidad hasta su ingreso a laboratorio (fichas de ensayo).

3.3 DISEÑO EXPERIMENTAL FACTORIAL

Para analizar el desempeño mecánico y de costo de cada material al ser mezclado con ambos tipos de estabilizantes (objetivo general), se empleó un diseño experimental factorial realizando diseños de mezclas con ambos tipos de estabilizante asfáltico para cada uno de los tres materiales granulares del estudio (obteniendo seis combinaciones suelo - asfalto) como se muestra en la Figura 3.1.

Figura 3.1

Esquema factorial de combinación suelo – estabilizante asfáltico



3.4 FASES DE LA METODOLOGIA

El trabajo se llevó a cabo en tres fases orientadas a cada uno de los objetivos específicos del proyecto de investigación:

Fase 1: Caracterización de los materiales: suelos y estabilizadores asfálticos (vinculada a O.E.1)

En esta fase se detalla la obtención y preparación de muestras representativas de las tres canteras y de los estabilizantes asfálticos considerados (asfalto diluido RC-250 y emulsión asfáltica CSS – 1h). Se incluyen detalles sobre el muestreo en campo, la manipulación y conservación de las muestras, así como los ensayos aplicados tanto a los agregados como a los estabilizantes. Esta fase caracteriza las propiedades de ambos

insumos según las especificaciones de la normativa MOP 001 y es esencial para determinar su aptitud en formulación de mezclas para procesos de estabilización.

Fase 2: Evaluación experimental del desempeño con estabilizantes (vinculada a O.E.2)

Aquí se explica el procedimiento seguido para formular y ensayar las mezclas estabilizadas con asfalto diluido y con emulsión asfáltica. Se detalla la metodología para preparar probetas, los ensayos específicos realizados y las observaciones operativas registradas durante la mezcla, el curado y la rotura de las briquetas. Esta fase aclara cómo se determinan el contenido óptimo de estabilizante, la estabilidad y demás propiedades de cada combinación, y por qué esos resultados son la base técnica para el análisis económico posterior.

Fase 3: Análisis comparativo costo–beneficio (vinculada a O.E.3)

En esta fase se explica cómo se traducen los resultados experimentales en insumos económicos y operativos para la toma de decisiones. Se detalla el cálculo de cantidades de materiales por metro cúbico, la conformación del análisis de precio unitario y la forma en que se relacionan costos con indicadores de desempeño de las mezclas. Además, se describe la evaluación cualitativa de aspectos operativos, de salud y ambientales que complementan la comparación económica. El propósito es orientar al lector sobre cómo se integran las evidencias técnicas y económicas para proponer la alternativa más eficiente y las recomendaciones para su validación en obra.

3.5 METODOLOGÍA DE OE1, CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES

3.5.1 Toma de muestras representativas de cada cantera.

Para cada una de las 3 canteras se aplicó el siguiente procedimiento: se tomaron al menos 3 submuestras por punto (base, medio y punta del montón), se unificaron las submuestras y se obtuvo la muestra compuesta, se aseguró volumen suficiente para todos los ensayos y réplicas; todas las muestras se protegieron de la contaminación y se etiquetaron (identificador, fecha, coordenadas).

Figura 3.2

Recolección y etiquetado de muestras granulares



Figura 3.3

Vista Satelital de la provincia de Santa Elena y las canteras de estudio

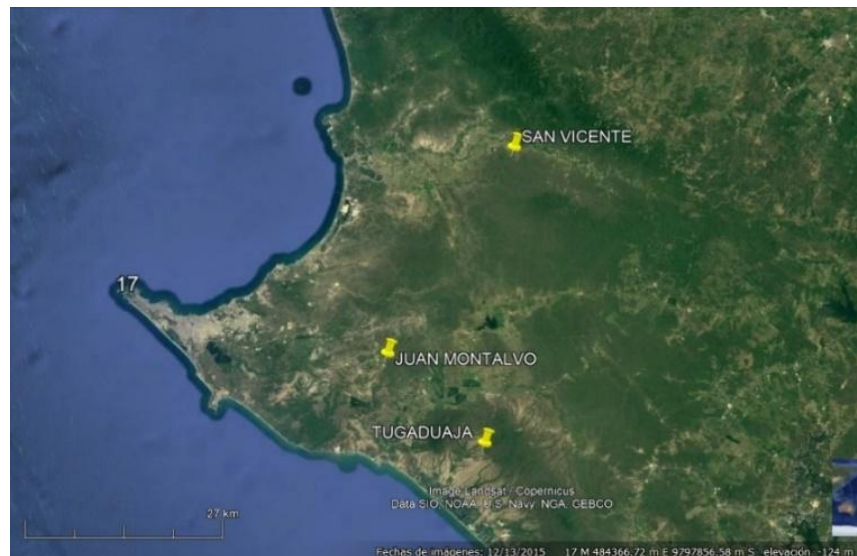


Tabla 3.1
Coordenadas UTM de las canteras representativas de Santa Elena

CANTERA JUAN MONTALVO	Zona 17S, Este: 534764 m, Norte: 9747933 m
CANTERA TUGADUAJA	Zona 17S, Este: 551895 m, Norte: 9776289 m
CANTERA SAN VICENTE	Zona 17S, Este: 547791 m, Norte: 9735598 m

3.5.2 Ensayos de mecánica de suelos para caracterización de los materiales granulares.

En este apartado se describen los ensayos necesarios para determinar si el material cumple con los requisitos de una subbase clase 3 aplicando las normas ASTM correspondientes.

- a) Contenido de humedad natural: ASTM D2216.
- b) Granulometría vía húmeda: ASTM D422
- c) Límites de Atterberg: ASTM D4318.
- d) Compactación Proctor modificado: ASTM D1557.
- e) CBR (antes y después de inmersión): ASTM D1883.
- f) Abrasión Los Ángeles: ASTM C535.

3.5.3 Verificación de cumplimiento con requisitos técnicos de subbase clase 3.

La norma (MOP - 001-F, 2002) tiene los siguientes requisitos técnicos para que un material granular se pueda caracterizar como subbase clase 3, que está definida por dicha norma como “*Subbases construidas con agregados naturales y procesados que cumplan los requisitos establecidos, y que se hallen graduados uniformemente dentro de los límites indicados para la granulometría Clase 3, en la Tabla 403-1.1.*”

Tabla 3.2*Banda granulométrica para clasificación de material de subbase.*

400 – Estructura del Pavimento

Tabla 403-1.1

TAMIZ	Porcentaje en peso que pasa a través de los tamices de malla cuadrada		
	CLASE 1	CLASE 2	CLASE 3
3" (76.2 mm.)	--	--	100
2" (50.4 mm.)	--	100	--
1 1/2 (38,1 mm.)	100	70 - 100	--
Nº 4 (4.75 mm.)	30 - 70	30 - 70	30 - 70
Nº 40 (0.425 mm.)	10 - 35	15 - 40	--
Nº 200 (0.075 mm.)	0 - 15	0 - 20	0 - 20

Tabla 3.3*Requisitos según MOP 001 para materiales de subbase*

PROPIEDAD	REQUERIMIENTO MOP 001 PARA SUBBASE
LL	≤ 25
IP	< 6
CBR	≥ 30%
ABRASION	≤ 50

3.5.4 Ensayos de caracterización de estabilizadores asfálticos.

En este apartado se enlistan los ensayos y requisitos técnicos necesarios para caracterizar cada uno de los estabilizantes y la norma ASTM correspondiente:

a) *Ensayos para asfalto diluido de curado rápido RC – 250.*

- Viscosidad cinemática a 60 °C → ASTM D2170
- Viscosidad Saybolt-Farol → ASTM D88
- Punto de inflamación → ASTM D92
- Agua (%) → ASTM D95
- Destilación (% en volumen total destilado) → ASTM D402
- Residuo por destilación a 360 °C → ASTM D402
- Viscosidad absoluta a 60 °C → ASTM D2171
- Penetración a 25 °C, 100 g, 5 s → ASTM D5
- Ductilidad a 25 °C, 5 cm/min → ASTM D113
- Solubilidad en tricloroetileno (%) → ASTM D2042

b) *Ensayos para emulsión asfáltica de rotura lenta CSS – 1h.*

- Viscosidad furor a 25 °C → ASTM D244
- Estabilidad al almacenaje 24 h → ASTM D244
- Ensayo del tamiz → ASTM D244
- Residuo por evaporación → ASTM D244
- Penetración del residuo a 25 °C, 100 g, 5 s → ASTM D5
- Ductilidad del residuo a 25 °C, 5 cm/min → ASTM D113
- Solubilidad en tricloroetileno (%) → ASTM D2042

3.5.5 Verificación de cumplimiento con requisitos técnicos de estabilizadores asfálticos.

a) *Requisitos técnicos para asfalto diluido de curado rápido RC 250.*

La norma MOP 001 tiene los siguientes requisitos técnicos para que un asfalto diluido se pueda caracterizar como asfalto diluido de curado rápido RC – 250.

Tabla 3.4

Requisitos según MOP 001 para Asfalto diluido de curado rápido

PROPIEDAD	UNIDAD DE MEDIDA	REQUERIMIENTO MOP 001
VISCOCIDAD CINEMATICA A 60C	mm ² /s	250 – 500
VISCOCIDAD SAYBOLD - FUROL, sl	SSF	125 – 250
PUNTO DE INFLAMACION	C	≥ 27
AGUA %	%	≤ 0,2
DESTILACION, % en volumen total destilado a 190 C	%V	-
DESTILACION, % en volumen total destilado a 225 C	%V	≥ 35
DESTILACION, % en volumen total destilado a 260 C	%V	≥ 60
DESTILACION, % en volumen total destilado a 315 C	%V	≥ 80
RESIDUO POR DESTILACION A 360 C	%V	≥ 65
VISCIDAD ABSOLUTA A 60 C, poises	Pa s	600 – 2400
PENETRACION, a 25C, 100gr, 5s	Dmm	80 – 120
DUCTILIDAD, a 25C, 5cm/mm, cm.	Cm	≥ 100
SOLUBILIDAD EN TRICLOROETILENO %	%m/m	≥ 99

b) *Requisitos técnicos para emulsión asfáltica de rotura lenta CSS 1 h.*

La norma MOP 001 tiene los siguientes requisitos técnicos para que una emulsión asfáltica se pueda caracterizar como emulsión asfáltica catiónica de rotura lenta CSS – 1h.

Tabla 3.5

Requisitos MOP 001 Emulsiones asfálticas catiónicas de rotura lenta

PROPIEDAD	UNIDAD DE MEDIDA	REQUERIMIENTO MOP 001
VISCOSIDAD FUROL, a 25 °C, s.	Seg	20 – 100
ESTABILIDAD AL ALMACENAJE 24 h, %	%	≤1
ENS. DEL TAMIZ	%	≤0,1
RESIDUO, %	%	≥ 57
PENETRACION, a 25C, 100gr, 5s	Dmm	40 – 90
DUCTILIDAD, a 25C, 5cm/mm, cm.	Cm	≥ 40
SOLUBILIDAD EN TRICLOROETILENO %	%	≥ 97,5

3.6 METODOLOGÍA DEL OE2, DISEÑO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS EN FRÍO USANDO EL MÉTODO MARSHALL MODIFICADO.

3.6.1 Resumen de metodología del OE2.

Para cada una de las seis combinaciones suelo – asfalto se realizó un diseño de mezcla asfáltica, y para cada diseño se evaluaron 4 puntos de porcentaje de estabilizante por combinación: 2%, 4%, 6% y 8% (sobre masa seca del material), con 3 réplicas por punto, es decir un total de 12 briquetas iniciales por cada diseño para determinar el comportamiento de la mezcla con diferentes porcentajes de estabilizante y determinar un porcentaje de asfalto óptimo.

Posteriormente, a modo de determinación de las propiedades de las combinaciones suelo - asfalto, se realizaron 12 briquetas más para cada uno de los seis diseños de mezclas asfálticas. Estas briquetas se dosificaron según el porcentaje de estabilizante óptimo encontrado. Este segundo grupo fue destinado a ensayos de conservación de estabilidad Marshall y TSR después de condiciones de saturación de las mezclas.

3.6.2 Preparación de las mezclas.

Para cada briqueta se utilizaron 1000 gramos de suelo y la cantidad de estabilizante requerida por cada punto de dosificación.

El modo de empleo de cada estabilizante es distinto, por un lado, la emulsión trabaja con el suelo en su humedad óptima de Proctor y el asfalto diluido, por el contrario, necesita que el suelo carezca de humedad para lograr una adherencia óptima con las partículas de material granular. A continuación, se detalla el procedimiento realizado para cada modo de estabilización.

a) Usando asfalto diluido RC – 250.

Para cada briqueta se usaron 100 gramos de suelo en estado seco al cual se dosifico el asfalto diluido en porcentaje de su peso, así, por ejemplo, para el punto de 2% se utilizaron 20 gramos de asfalto diluido. Para lograr una mejor trabajabilidad del RC – 250 se elevó su temperatura sin superar los 60 C ya que con temperaturas mayores a la mencionada el solvente se evaporaría. Se integraron ambos materiales hasta lograr una mezcla homogénea.

Figura 3.4

Mezcla con asfalto diluido



b) Usando emulsión asfáltica CSS – 1h.

Se usaron 1000 gramos de suelo en estado seco al cual se dosifico agua según la humedad óptima del Proctor, así por ejemplo al material de Juan Montalvo se le agrego el 7,85% de agua según el peso del material, es decir, 78.5 gramos de agua. Se integró el suelo con el agua hasta lograr una mezcla homogénea, de esta forma el suelo está listo para recibir la emulsión asfáltica la cual se dosifico en función del peso seco del material, es decir que para el punto de 2% se utilizaron 20 gramos de emulsión previamente agitada.

Figura 3.5
Mezcla de emulsión asfáltica con material granular



3.6.3 Compactación.

A ambos métodos de estabilización se les proporciono la misma energía de compactación, 50 golpes por cara, conforme al procedimiento de Marshall modificado para mezclas en frío. Las dimensiones objetivo de la briqueta fueron diámetro 101.6 mm y altura \approx 63–65 mm (ASTM D6927).

3.6.4 Curado y medidas físicas iniciales.

Las briquetas se curaron en horno a 60 °C durante 48 horas para favorecer la evaporación de solventes (en RC-250) y parte del contenido libre de agua de la emulsión en el caso de CSS-1h.

Tras el curado y enfriamiento se desmoldaron, se midieron diámetro y altura y se registraron los pesos en aire, superficialmente seco y sumergido para determinar densidades aparentes y absorciones.

Figura 3.6
Curado en horno a 60°C por 48 horas



3.6.5 Mediciones y ensayos volumétricos.

a) *Determinación de Peso específico o GSB de las briquetas.*

Para determinar el peso específico o GSB de las mezclas a cada briqueta se le tomo su peso en aire, peso sumergido y superficialmente seco, valores que posteriormente son remplazados en la siguiente fórmula para obtener el dato deseado.

$$G_{mb} = \frac{w_A}{W_{SSS} - W_{SUMER}}$$

Donde:

w_A = Peso en aire

W_{SSS} = Peso superficialmente seco (PSSS)

W_{SUMER} = Peso sumergido

b) *Gravedad específica teórica máxima Gmm.*

Para el cálculo de parámetros de las mezclas como vacíos de aire, VMA y VFA; son necesario, además de las densidades medidas (G_{mb} y G_{sb}), determinar la gravedad específica teórica máxima o G_{mm} por ensayo ASTM D2041.

Figura 3.7

Preparación de muestras con los puntos de dosificación para ensayo Rice



$$G_{mm} = \frac{A}{A + D - E}$$

Donde:

A = masa de la muestra **seca en aire** (g).

D = masa del **picnómetro (matraz) lleno con agua** a la temperatura de ensayo (g).

E = masa del **picnómetro lleno con agua + la muestra dentro** (g).

3.6.6 Ensayo de estabilidad Marshall.

Antes del ensayo, cada briqueta se condicionó en baño maría durante 2 horas a 25 °C. Se aplicó el ensayo Marshall (ASTM D6927) para determinar estabilidad y flujo. Se graficaron las curvas estabilidad vs. % asfalto y flujo vs. % asfalto.

Figura 3.8.

Baño maría para estabilización de temperatura previo a ensayo Marshall



Figura 3.9
Ensayo de estabilidad Marshall



3.6.7 Selección del contenido óptimo de estabilizante.

El contenido óptimo se seleccionó para cada combinación suelo – asfalto considerando un volumen de aire de 4,5%. El contenido óptimo se definió como el porcentaje de estabilizante que cumplió simultáneamente los siguientes criterios técnicos:

- a) Proporcionó una estabilidad Marshall elevada en comparación con otros porcentajes sin inducir un flujo excesivo que comprometiera trabajabilidad o servicio.
- b) Generó densidades y vacíos dentro de los rangos aceptables para mezclas estabilizadas en frío.
- c) Demostró comportamiento aceptable en trabajabilidad de las mezclas.

3.6.8 Verificación de propiedades físico-mecánicas de la mezcla con contenido óptimo de estabilizante.

Se realizaron 12 briquetas más para cada combinación suelo – asfalto, usando la dosificación guiada por el contenido óptimo de estabilizante. Se dividieron en dos grupos de 6 briquetas: grupo A se ensayó tras 2 horas de inmersión a 25 °C (3 briquetas para Marshall y 3 para tracción indirecta); grupo B se ensayó tras 24 horas de inmersión a 25 °C (3 Marshall y 3 tracción indirecta). A cada briketa del segundo ciclo se le registraron las mismas medidas físicas y ensayos volumétricos usando las mismas normas y metodologías que en la fase inicial.

El objetivo de este paso es evaluar las propiedades de estabilidad, flujo, conservación de la estabilidad y TSR de las mezclas con el contenido óptimo de estabilizante y verificar que estos parámetros están dentro de los parámetros adecuados. En la

Tabla 3.6 se especifican los valores mínimos de estabilidad y el rango del flujo que debe tener una capa de material estabilizado con asfalto según la norma (MOP - 001-F, 2002)

Tabla 3.6
Requisitos de estabilidad y flujo para Base Estabilizada (MOP - 001-F, 2002)

TABLA 404-4.2

ESTABILIDAD	FLUJO
MARSHALL	(1/100")
750 lbs. min.	5-18

Tabla 3.7

Crterios Marshall establecidos por el (MOP - 001-F, 2002) para mezclas asfálticas.

TABLA 405.5.4

TIPO DE TRAFICO	Muy Pesado		Pesado		Medio		Liviano	
CRITERIOS MARSHALL	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.
No. De Golpes/Cara	75		75		50		50	
Estabilidad (libras)	2200	----	1800	----	1200	----	1000	2400
Flujo (pulgada/100)	8	14	8	14	8	16	8	16
% de vacíos en mezcla								
- Capa de Rodadura	3	5	3	5	3	5	3	5
- Capa Intermedia	3	8	3	8	3	8	3	8
- Capa de Base	3	9	3	9	3	9	3	9
% Vacíos agregados	VER TABLA 405-5.5							
Relación filler/betún	0.8	1.2	0.8	1.2				
% Estabilidad retenida luego 7 días en agua temperatura ambiente								
- Capa de Rodadura	70	----	70	----				
- Intermedia o base	60	----	60	----				

a) *Ensayo de conservación de estabilidad Marshall.*

Se evaluó la conservación de la estabilidad y la susceptibilidad al agua de las mezclas por medio del ensayo Marshall transcurridas 2 y 24 horas en estado de saturación de las briquetas en baño maría a 25 °C. El objetivo es determinar en qué porcentaje son capaces las mezclas de conservar su estabilidad en estados de humedad, simulando condiciones climáticas extremas en campo.

b) *Razón de Resistencia Retenida (TSR).*

Utilizando el cabezal de Lottman en la prensa Marshall se evalúa el TSR, se dividieron las briquetas en dos grupos: Grupo A (inmersión 2 h a 25 °C) y

Grupo B (inmersión 24 h a 25 °C). Se calcularon TSR como la relación entre la resistencia indirecta en condiciones húmedas y la resistencia en condiciones secas. Se estableció como criterio mínimo un $TSR \geq 70\%$.

$$St = \frac{2 P_{max}}{\pi t d}$$

donde:

St es la resistencia a la rotura por tracción indirecta.

Pmax es la carga máxima o carga de rotura.

t es el espesor de la briqueta.

d es el diámetro de la briqueta.

$$TSR = \frac{St, \text{cond}}{St, \text{no cond}} \times 100\%$$

donde:

St,cond = resistencia a tracción indirecta de las briquetas **condicionadas** (24h sumergidas)

St,no cond = resistencia a tracción indirecta de las briquetas **no condicionadas**. (2h sumergidas)

Figura 3.10
Cabezal Lottman



Figura 3.11

Briqueta post ensayo de resistencia a la tracción indirecta (RTI) para evaluar el esfuerzo a la tensión de las mezclas asfálticas



3.6.9 Control de calidad y consideraciones operativas.

- a) Los equipos (compactadora, prensa Marshall, balanzas, horno) se calibraron antes de la campaña de ensayos.
- b) Se controlaron y registraron las condiciones ambientales del laboratorio (temperatura y humedad) en las fases críticas de mezclado, curado y ensayo.
- c) Se verificó la homogeneidad de mezcla por observación visual antes de compactar cada briqueta.
- d) Se documentaron todas las operaciones en fichas de ensayo que incluyeron identificación de cantera, porcentaje de estabilizante, número de briqueta, condiciones de curado y resultados de medidas físicas y mecánicas.

Se evaluaron además las especificaciones pertinentes de la normativa nacional para estabilizantes (NTE INEN 2062, 2024)

3.7 METODOLOGIA DE OE3. COMPARACION COSTO – BENEFICIO DE LAS MEZCLAS

3.7.1 Resumen de metodología de OE3.

La metodología del OE3 se desarrolla en dos grandes fases: 1. Análisis de costos de implementación de cada combinación suelo–estabilizante; 2. Análisis costo–beneficio integrando mejoras técnicas, vida útil y factores ambientales. Ambas fases se articulan con los resultados obtenidos en O.E.1 (caracterización) y O.E.2 (ensayos Marshall modificados y tracción indirecta).

3.7.2 Análisis de costos de implementación de cada combinación suelo-asfalto.

a) *Cálculo de cantidades para unidad de m3.*

Para cada combinación suelo - asfalto, se calcula la cantidad de material granular y estabilizante necesarias para producir 1 m³ de mezcla compactada.

Los pasos metodológicos son:

- a) Tomar, de los ensayos de O.E.2, el contenido óptimo de estabilizante (porcentaje en peso, % p/p) y la densidad seca máxima de la mezcla (kg/m³ o g/cm³) obtenida mediante el método Marshall modificado.
- b) Convertir el contenido óptimo (% p/p) a masa de estabilizante por m³:

$$m_{estab} = \left(\frac{\%_{opt}}{100} \right) \times m_{mezcla}$$

- c) donde m_{mezcla} es la masa total por m³ de mezcla compactada (kg/m³).

- d) Calcular la masa de material granular por m³, consideramos un factor de compactación de 15 %:

$$m_{suelo} = (m_{mezcla} - m_{estab}) \times \text{factor de compactación}$$

- e) Convertir masas a volúmenes si se requiere (usando densidades reales) para coincidencia con las unidades de precios (m^3).
- f) Repetir el procedimiento para cada combinación y obtener una tabla de insumos por $1 m^3$: masa/volumen de agregado, masa/volumen de estabilizante, agua (si aplica), aditivos.

b) *Análisis de precio unitario APU por $/m^3$.*

Se construye el APU para cada combinación expresado en USD/ m^3 , integrando costos directos e indirectos. La fuente de los precios de agregados y maquinaria fue tomada de listados y tarifas del Municipio de Santa Elena (se utilizaron los precios oficiales vigentes). Los precios de estabilizantes se obtuvieron mediante consulta a proveedores, EMULDEC (emulsión asfáltica) y Constructora Morocho (RC-250). Para detallar el APU debemos considerar los siguientes componentes:

- a) Equipos y maquinaria: costo por hora de motoniveladora, rodillo vibratorio liso, rodillo de neumático, tanquero distribuidor de asfalto y tanquero distribuidor de agua (solo aplica para mezclas con emulsión asfáltica). Se usan los rendimientos técnicos para convertir horas a m^3 ejecutados. (Fuentes: listados municipales y catálogos técnicos). Además, debemos incluir la herramienta menor, que se cuantifica considerando el 5% del costo de mano de obra.
- b) Mano de obra: tarifas y jornales según la Contraloría General del Estado (valores actualizados).
- c) Materiales: costo del agregado por m^3 , costo del estabilizante y del agua para las mezclas con emulsión asfáltica.
- d) Costos indirectos: seguros, administración, pequeñas herramientas, imprevistos. Se uso como valor estándar el 20% de los costos directos.

- e) Rendimientos: productividad esperada de mano de obra y equipos
(Fuente: rendimientos reales tomados en obra de estabilización vial).

Finalmente, el Precio unitario en m^3 de producción y compactado de cada mezcla será la suma de los costos de equipos, herramienta menor, mano de obra, materiales y costos indirectos necesarios para producir y compactar un m^3 .

3.7.3 Análisis costo beneficio de cada combinación suelo-asfalto.

El análisis costo-beneficio se desarrolló con un enfoque mixto, combinando criterios cuantitativos y cualitativos orientados a determinar la alternativa suelo-asfalto más eficiente técnica y económicamente para su aplicación en estructuras de pavimento. Esta fase permitió relacionar los costos de implementación con el desempeño mecánico y las condiciones de uso y durabilidad de las mezclas estabilizadas obtenidas en el laboratorio.

c) Enfoque cuantitativo.

El análisis cuantitativo se enfocó principalmente en la relación entre el costo unitario y la estabilidad Marshall de cada mezcla estabilizada. Para ello, se utilizó el costo total por metro cúbico (USD/ m^3) obtenido en el análisis de precios unitarios (APU) y la estabilidad Marshall (Lb) determinada experimentalmente en el laboratorio para cada combinación de suelo - asfalto. El indicador de relación costo/estabilidad refleja el nivel de eficiencia de cada alternativa: cuanto menor es el costo requerido por unidad de estabilidad alcanzada, mayor es la viabilidad económica y técnica del método de estabilización. Este análisis permite comparar objetivamente las seis combinaciones (tres canteras \times dos estabilizantes) en términos de desempeño estructural frente al costo de implementación real.

Los resultados obtenidos se interpretaron considerando la coherencia entre el costo de los materiales, la respuesta mecánica y la factibilidad de aplicación en

campo, priorizando la alternativa con mejor equilibrio entre estabilidad y costo por metro cúbico.

d) *Enfoque cualitativo.*

El análisis cualitativo complementó la evaluación técnica y económica mediante la comparación de condiciones operativas, ambientales y de comportamiento de los estabilizantes.

Este componente se basó en la observación de las características de las mezclas durante su preparación, curado y comportamiento posterior, así como en las propiedades intrínsecas de los ligantes asfálticos y su compatibilidad con los materiales granulares evaluados. Los criterios considerados fueron los siguientes:

- a) Trabajabilidad: se evaluó la facilidad de mezclado, extendido y compactación de los materiales estabilizados, así como el control de humedad durante el proceso de conformación.
- b) Impactos en la salud y el medio ambiente: se consideró la emisión de vapores y compuestos volátiles durante el mezclado, los riesgos por manipulación del producto y la influencia ambiental asociada a su aplicación.
- c) Adherencia y cohesión: se analizó la capacidad del ligante para recubrir las partículas del agregado y mantener la unión interna de la mezcla después del curado, observando su consistencia y homogeneidad.
- d) Riesgos por altas temperaturas de trabajo: se tuvo en cuenta la seguridad durante el proceso de aplicación, considerando el requerimiento de calentamiento del asfalto diluido frente a la emulsión asfáltica, que puede aplicarse en frío.

- e) Compatibilidad con agregados en cualquier estado de humedad: se revisó la respuesta de cada estabilizante ante la presencia de humedad en el agregado, destacando la ventaja de la emulsión asfáltica por su capacidad de mezclarse con materiales húmedos.
- f) Adaptación a diferentes climas: se analizó el comportamiento de los ligantes frente a condiciones de temperatura y humedad ambiental, considerando su desempeño esperado en las condiciones climáticas típicas de la provincia de Santa Elena.
- g) Asfalto efectivo en la mezcla: se evaluó la cantidad de ligante residual que realmente permanece en el material luego del proceso de curado, afectando directamente la cohesión y la durabilidad del pavimento.
- h) Tiempos de curado: se observó la rapidez con que cada tipo de mezcla alcanza su resistencia final y la posibilidad de habilitar el tránsito o las capas superiores en un tiempo razonable tras su ejecución.
- i) Este conjunto de aspectos cualitativos permitió valorar la viabilidad práctica, ambiental y operativa de cada tipo de estabilización, complementando el resultado obtenido en el análisis cuantitativo.

a) *Integración de resultados.*

Finalmente, los resultados de ambos enfoques fueron integrados para establecer una comparación global entre las alternativas.

La combinación suelo–asfalto con menor costo relativo por unidad de estabilidad y con mejores condiciones de trabajabilidad, compatibilidad, seguridad y sostenibilidad ambiental se consideró como la opción más eficiente y viable para su aplicación en la construcción de capas granulares estabilizadas en la provincia de Santa Elena.

CAPITULO IV: ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

4.1 ANALISIS DE RESULTADOS DEL O.E.1. CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES

4.1.1 Ensayos de mecánica de suelos para caracterización de materiales granulares.

Comparativamente, los ensayos de mecánica de suelos resumidos en la **Tabla 4.1** demostraron que Tugaduaja muestra la mayor capacidad mecánica CBR pero su clasificación A-2-6 y un índice de plasticidad intermedio sugieren mayor presencia de finos; Juan Montalvo presenta el mejor equilibrio entre densidad Proctor alta, buen CBR y menor abrasión; en San Vicente llama la atención la baja densidad Proctor y la mayor abrasión, que reducen su idoneidad directa y requieren verificación de ensayos y/o estabilización previa antes de su uso en capas estructurales.

Tabla 4.1
Características física-mecánicas de cada Cantera de estudio

ENSAYO/ CANTERA	JUAN MONTALVO	TUGADUJ A	SAN VICENTE
Humedad de sitio %	9,43%	7,83%	9,13%
Limite Liquido %	22,1	21,3	21,85
Limite plástico %	16,15	18,38	15,91
Índice de Plasticidad %	5,95	2,92	5,94
Clasificación AASHTO	A - 1 a	A - 2 - 6	A - 1 a
Densidad seca máxima de Proctor g/cm ³	2,183	2,129	1,72
Humedad óptima %	7,85	7,35	6,9
CBR (%) con °Gc= 100%	34,40	39,23	30
Abrasión (%)	41,24%	46,61%	48,98%

4.1.2 Verificación de cumplimiento con requisitos técnicos de subbase clase 3.

Los resultados de la verificación evidenciados en la **Tabla 4.2** frente a los requisitos del MOP-001 para subbase clase 3 indican que las tres canteras cumplen todas las exigencias evaluadas. Las propiedades presentan límites líquidos por debajo de 25 % e índices de plasticidad menores a 6%, por lo que el comportamiento plástico se mantiene dentro de lo aceptable para subbases. En capacidad portante, los CBR reportados cumplen la exigencia mínima del 30 %; finalmente, los ensayos de abrasión están por debajo del umbral del 50 %, confirmando resistencia al desgaste adecuada según la norma.

Como observaciones comparativas relevantes, varios parámetros están próximos a los límites normativos. Por ejemplo, el IP de Juan Montalvo y el CBR de San Vicente se sitúan en el umbral de aceptación, lo que indica menor margen de seguridad frente a variaciones del material en extracción o en obra. Estos resultados mantienen a las tres canteras dentro de la clasificación de “subbase clase 3” establecida en la tabla, pero señalan la conveniencia de un control de calidad continuo durante la explotación para asegurar que los valores no se desvíen por causas de heterogeneidad o humedad.

Tabla 4.2
Verificación de especificaciones para subbases según MOP-001

CANTERA	PROPIEDAD	RESULTADO DE LABORATORIO	REQUERIMIENTO MOP 001 PARA SUBBASE	CUMPLIMIENTO	CARACTERIZACION
JUAN MONTALVO	LL	22,1	≤ 25	CUMPLE	SUB-BASE CLASE 3
	I P	5,95	< 6	CUMPLE	
	CBR	34,40	≥ 30%	CUMPLE	
	ABRACION	41,24%	≤ 50	CUMPLE	
TUGADUAJA	LL	21,3	≤ 25	CUMPLE	SUB-BASE CLASE 3
	I P	2,92	< 6	CUMPLE	
	CBR	39,23	≥ 30%	CUMPLE	
	ABRACION	46,61%	≤ 50	CUMPLE	
SAN VICENTE	LL	21,85	≤ 25	CUMPLE	SUB-BASE CLASE 3
	I P	5,94	< 6	CUMPLE	
	CBR	30	≥ 30%	CUMPLE	
	ABRACION	48,98%	≤ 50	CUMPLE	

4.1.3 Ensayos de caracterización de estabilizadores asfálticos.

Tabla 4.3

Resultados de los estabilizantes ensayados en laboratorio

ENSAYO / ESTABILIZANTE	UNIDAD DE MEDIDA	RC-250	CSS-1h
VISCOSIDAD CINEMATICA A 60C	mm ² /s	350	-
VISCOSIDAD SAYBOLD - FUROL, sl	SSF	165	-
PUNTO DE INFLAMACION	C	47	-
AGUA %	%	0	-
DESTILACION, % en volumen total destilado a 190 C	%V	46	-
DESTILACION, % en volumen total destilado a 225 C	%V	70	-
DESTILACION, % en volumen total destilado a 260 C	%V	86	-
DESTILACION, % en volumen total destilado a 315 C	%V	94	-
RESIDUO POR DESTILACION A 360 C	%V	76	59,9%
VISCIDAD ABSOLUTA A 60 C, poises	Pa s	1618	-
PENETRACION, a 25C, 100gr, 5s	dmm	105	0,69
DUCTILIDAD, a 25C, 5cm/mm, cm.	cm	110	77,7
SOLUBILIDAD EN TRICLOROETILENO %	%m/m	99,92	98,9
VISCOSIDAD FUROL, a 25 °Gc, s.	seg	-	39,67
ESTABILIDAD AL ALMACENAJE 24 h, %	%	-	0,27%
ENS. DEL TAMIZ	%	-	0,03%
PUNTO DE REBLANDECIMIENTO	°C	-	51,6

4.1.4 Verificación de cumplimiento con requisitos técnicos de los respectivos estabilizadores asfálticos.

El análisis de la verificación técnica de los estabilizadores asfálticos empleados evidencia que tanto el asfalto diluido RC-250 como la emulsión asfáltica catiónica CSS-1h cumplen con los parámetros establecidos en la norma MOP-001 como se muestra en la **Tabla 4.4** y **Tabla 4.6**, demostrando su idoneidad para procesos de estabilización de suelos.

a) *Caracterización de asfalto diluido de curado rápido RC 250.*

Tabla 4.4

Verificación de requerimiento para RC-250 según MOP 001

TIPO DE ESTABILIZADOR	PROPIEDAD	RESULTADO LABORATORIO	UNIDAD DE MEDIDA	REQUERIMIENTO MOP 001	CARACTERIZACION	
ASFALTO DILUIDO DE CURADO RAPIDO	VISCOSIDAD CINEMATICA A 60C	350	mm ² /s	250 – 500	CUMPLE	RC – 250
	VISCOSIDAD SAYBOLD - FUROL, sI	165	SSF	125 – 250	CUMPLE	RC – 250
	PUNTO DE INFLAMACION	47	C	≥ 27	CUMPLE	RC – 250
	AGUA %	0	%	≤ 0,2	CUMPLE	RC – 250
	DESTILACION, % en volumen total destilado a 190 C	46	%V	-	-	RC – 250
	DESTILACION, % en volumen total destilado a 225 C	70	%V	≥ 35	CUMPLE	RC – 250
	DESTILACION, % en volumen total destilado a 260 C	86	%V	≥ 60	CUMPLE	RC – 250
	DESTILACION, % en volumen total destilado a 315 C	94	%V	≥ 80	CUMPLE	RC – 250
	RESIDUO POR DESTILACION A 360 C	76	%V	≥ 65	CUMPLE	RC – 250
	VISCOSIDAD ABSOLUTA A 60 C, poises	1618	Pa s	600 – 2400	CUMPLE	RC – 250
	PENETRACION, a 25C, 100gr, 5s	105	dmm	80 – 120	CUMPLE	RC – 250
	DUCTILIDAD, a 25C, 5cm/mm, cm.	110	cm	≥ 100	CUMPLE	RC – 250
	SOLUBILIDAD EN TRICLOROETILENO %	99,92	%m/m	≥ 99	CUMPLE	RC – 250

b) Caracterización de emulsión asfáltica catiónica de rotura lenta CSS – 1h.

Tabla 4.5

Verificación de requerimiento para Emulsión asfáltica Cms-1h según MOP 001

TIPO DE ESTABILIZADOR	PROPIEDAD	RESULTADO LABORATORIO	UNIDAD DE MEDIDA	REQUERIMIENTO MOP 001	CUMPLE	CARACTERIZACION
EMULSIONES ASFALTICAS CATIONICAS DE ROTURA LENTA	VISCOSIDAD FUROL, a 25°C, s.	39,67	Seg	20 – 100	CUMPLE	CSS - 1h
	ESTABILIDAD AL ALMACENAJE 24 h, %	0,27%	%	≤1	CUMPLE	CSS - 1h
	ENS. DEL TAMIZ	0,032%	%	≤0,1	CUMPLE	CSS - 1h
	RESIDUO, %	59,9%	%	≥ 57	CUMPLE	CSS - 1h
	PENETRACION, a 25C, 100gr, 5s	0,69	Dmm	40 – 90	CUMPLE	CSS - 1h
	DUCTILIDAD, a 25C, 5cm/mm, cm.	77,7	Cm	≥ 40	CUMPLE	CSS - 1h
	SOLUBILIDAD EN TRICLOROETILENO %	98,9	%	≥ 97,5	CUMPLE	CSS-1h

4.2 ANALISIS DE RESULTADOS DEL O.E.2. DISEÑO DE MEZCLAS ASFALTICAS EN FRIO USANDO EL MÉTODO MARSHALL MODIFICADO

4.2.1 Selección de contenido óptimo de estabilizante.

Para la determinación del contenido óptimo de estabilizante se adoptó un volumen de aire de 4,5 % (dentro del rango permisible de 3 % a 9 %) garantizando así una adecuada compactación de las mezclas.

Dado que en todos los puntos de dosificación las estabilidades obtenidas superaron ampliamente el mínimo exigido para bases estabilizadas, es factible considerar un volumen de aire superior al mínimo, pues ello permite alcanzar contenidos óptimos menores y, por ende, reducir costos de implementación; no obstante, el aire no puede incrementarse en exceso porque daría lugar a contenidos óptimos demasiado bajos y comprometería la trabajabilidad en obra. En consecuencia, el contenido óptimo de estabilizante se determinó aplicando este criterio y manteniendo el flujo dentro del intervalo aceptable de 8 a 14, con lo cual se asegura un equilibrio entre costo, compactación, resistencia y deformabilidad de las mezclas asfálticas.

a) **Cantera Juan Montalvo – Emulsión asfáltica CSS – 1h.**

En la mezcla elaborada con material de la cantera Juan Montalvo y emulsión asfáltica, el contenido óptimo se alcanzó con un 2,88 % de emulsión (Figura 4.1) con el cual se espera una estabilidad 3552,40lb y un flujo de 14.32,(Figura 4.2 y 4.3) valores que cumplen los criterios Marshall, garantizando buena compactación y resistencia a la deformación.

Figura 4.1

Gráfica %Vacíos vs %Emulsión - Cantera Juan Montalvo

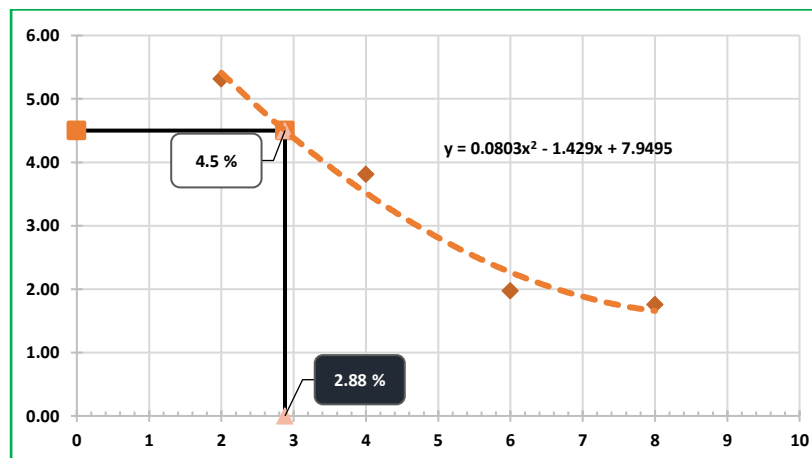


Figura 4.2 Tabla 4.6

Resultados de las briquetas con distintos porcentajes de emulsión - Cantera Juan Montalvo

%EMULSIÓN	ESTABILIDAD (Lb)	FLUJO (%)	% VACÍOS
2	3023	14	5,31
4	4132	15	3,81
6	4148	17	1,97
8	4007	20	1,75

Figura 4.1
Gráfica %Vacíos vs %Emulsión - Cantera Juan Montalvo

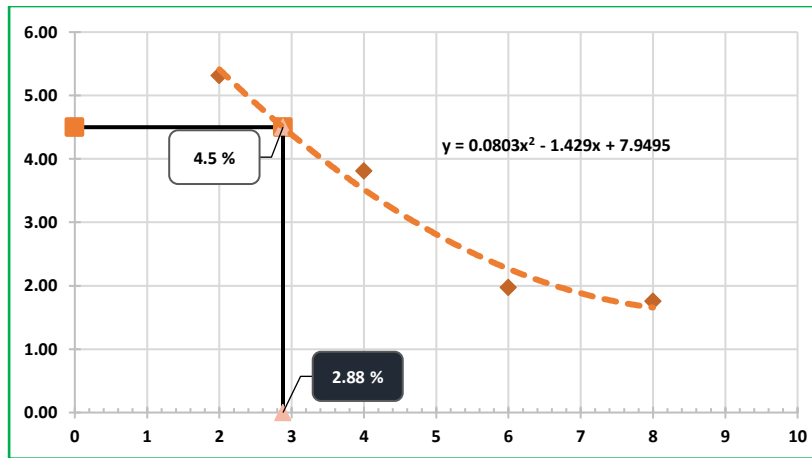


Figura 4.2
Gráfica Estabilidad vs %Emulsión - Cantera Juan Montalvo

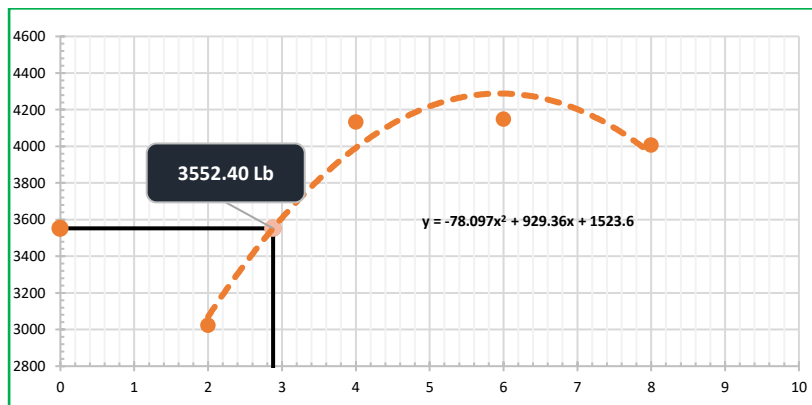
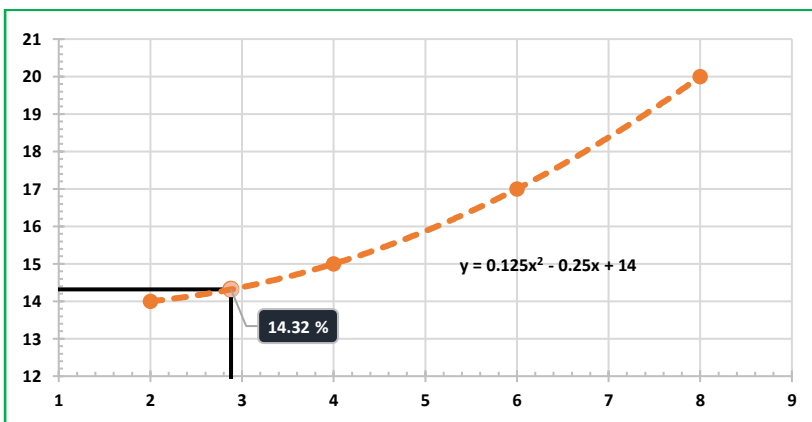


Figura 4.3
Gráfica %Flujo vs %Emulsión - Cantera Juan Montalvo



b) *Cantera Tugaduaja – Emulsión asfáltica CSS – 1h.*

Para la cantera Tugaduaja, el contenido óptimo de emulsión se determinó en 2,72 %, (Figura 4.4), correspondiente al punto donde la estabilidad fue de 3872,72 lb con un flujo de 12,24 (Figura 4.5 y Figura 4.6. Este resultado refleja una mezcla que asegura desempeño mecánico favorable y durabilidad ante cargas repetidas.

Tabla 4.7

Resultados de las briquetas con distintos porcentajes de emulsión - Cantera Tugaduaja

%EMULSIÓN	ESTABILIDAD (Lb)	FLUJO (%)	% VACÍOS
2	3070	11	5,54
4	5016	15	2,78
6	4527	18	2,41
8	3856	24	1,49

Figura 4.4
Gráfica %Vacíos vs %Emulsión - Cantera Tugaduaja

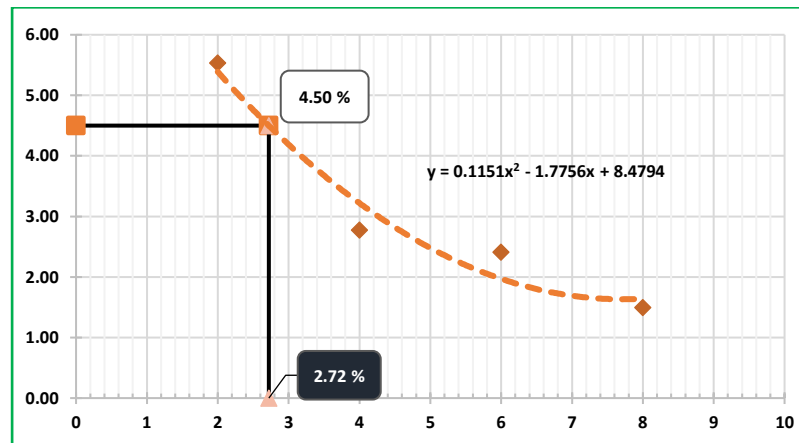


Figura 4.5
Gráfica Estabilidad vs %Emulsión - Cantera Tugaduaja

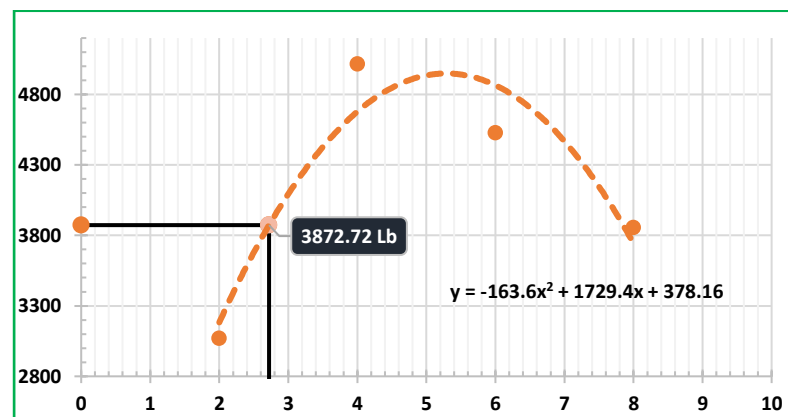
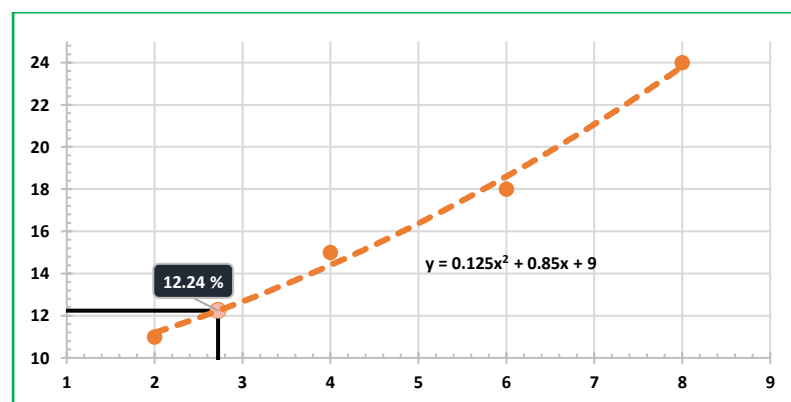


Figura 4.6
Gráfica %Flujo vs %Emulsión - Cantera Tugaduaja



c) *Cantera San Vicente – Emulsión asfáltica CSS – 1h.*

En la mezcla de la cantera San Vicente con emulsión asfáltica, el contenido óptimo de emulsión se estableció en 3,06 % Figura 4.7, obteniéndose una estabilidad de 3228,09 lb y flujo de 13,11 (Figura 4.8 y Figura 4.9). La mezcla mostró un comportamiento mecánico confiable para su uso en capas de base estabilizada.

Tabla 4.8

Resultados de las briquetas con distintos porcentajes de emulsión - Cantera San Vicente

%EMULSIÓN	ESTABILIDAD (Lb)	FLUJO (%)	% VACÍOS
2	2968	13	5,50
4	3446	13	3,73
6	3393	15	2,99
8	3314	16	2,72

Figura 4.7
Gráfica %Vacíos vs %Emulsión - Cantera San Vicente

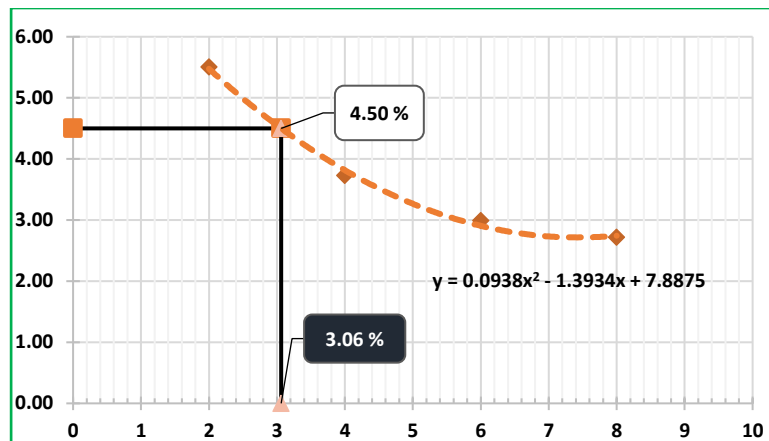


Figura 4.8
Gráfica Estabilidad vs %Emulsión - Cantera San Vicente

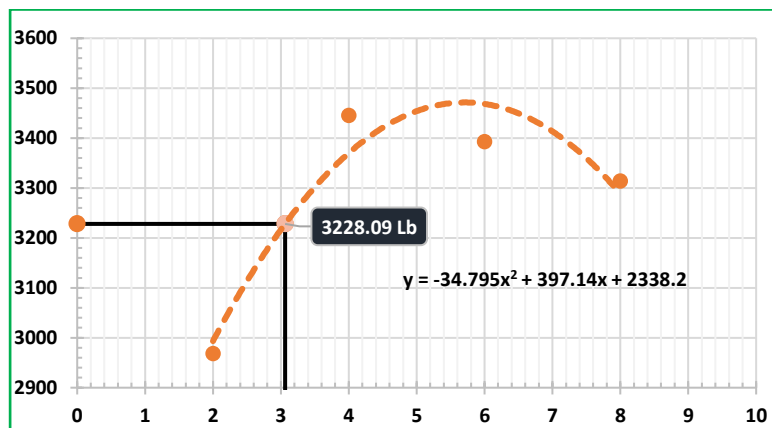
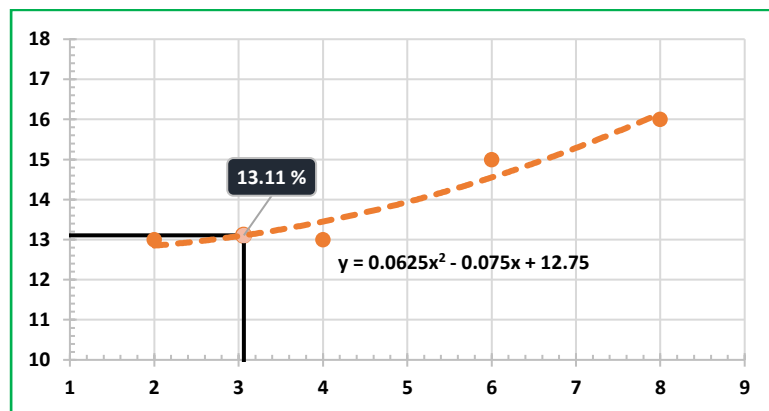


Figura 4.9
Gráfica %Flujo vs %Emulsión - Cantera San Vicente



d) *Cantera Juan Montalvo – Asfalto diluido RC – 250.*

El material de la cantera Juan Montalvo estabilizado con asfalto diluido presentó un contenido óptimo de 3,60 % Figura 4.10, alcanzando una estabilidad de 2883,30 lb y flujo de 12,23 (Figura 4.11 y Figura 4.12). Aun utilizando el mismo porcentaje de vacíos para todas las mezclas, podemos observar una menor eficiencia en estabilidades con respecto a la estabilización con emulsión, pero sin estar por debajo de lo mínimo especificado para estas mezclas.

Tabla 4.9

Resultados de las briquetas con distintos porcentajes de RC 250 - Cantera Juan Montalvo

% RC-250	ESTABILIDAD (Lb)	FLUJO (%)	% VACÍOS
2	2102	11	6,82
4	3031	13	4,03
6	3574	14	2,21
8	3674	17	1,47

Figura 4.10
Gráfica %Vacíos vs %RC 250 - Cantera Juan Montalvo

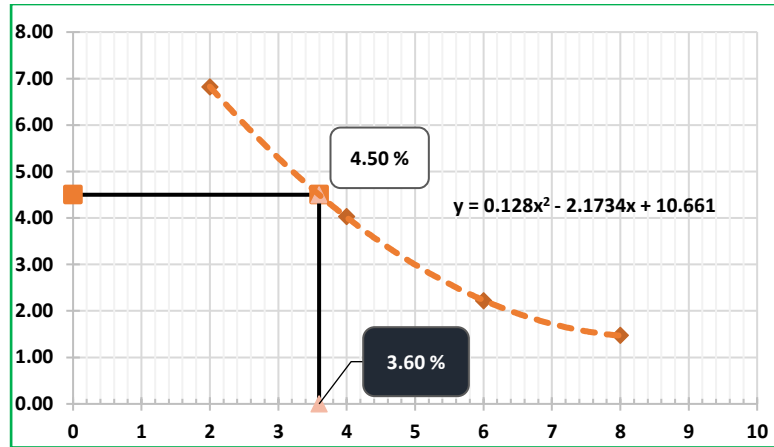


Figura 4.11
Gráfica Estabilidad vs %RC 250 - Cantera Juan Montalvo

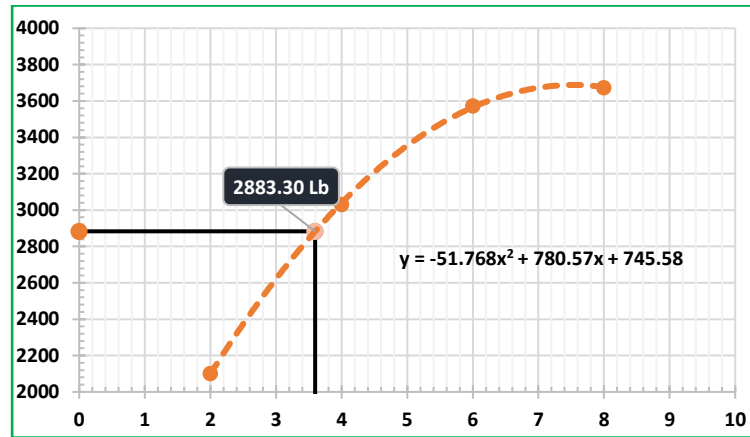
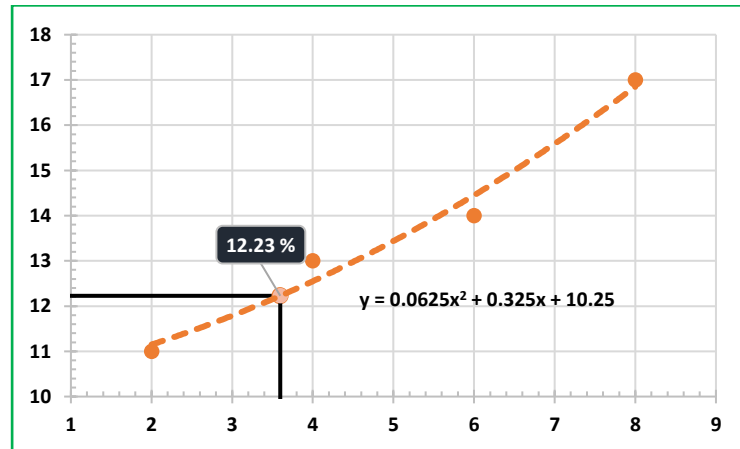


Figura 4.12
Gráfica %Flujo vs %RC 250 - Cantera Juan Montalvo



e) **Cantera Tugaduaja – Asfalto diluido RC – 250.**

En la cantera Tugaduaja estabilizada con asfalto diluido, el contenido óptimo de estabilizante fue de 3,51% Figura 4.13, con una estabilidad esperada de 3056,5 lb y flujo de 9,86 (Figura 4.14 y Figura 4.15). Como observación se aprecia una menor eficiencia en términos de estabilidad frente a la estabilización realizada con emulsión, sin embargo, siguen siendo estabilidades altas con respecto a las especificaciones mínimas para materiales estabilizados.

Tabla 4.10

Resultados de las briquetas con distintos porcentajes de RC 250 - Cantera Tugaduaja

% RC-250	ESTABILIDAD (Lb)	FLUJO (%)	% VACÍOS
2	2087	9	6,91
4	3244	10	4,03
6	4012	13	1,38
8	3978	16	0,41

Figura 4.13
Gráfica %Vacíos vs %RC 250 - Cantera Tugaduaja

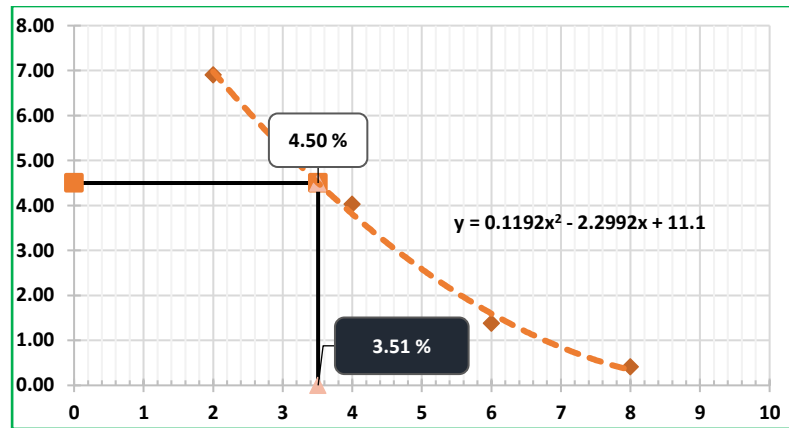


Figura 4.14
Gráfica Estabilidad vs %RC 250 - Cantera Tugaduaja

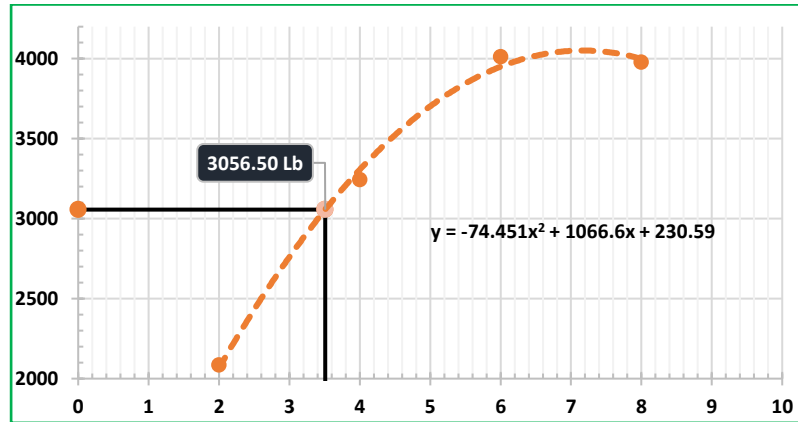
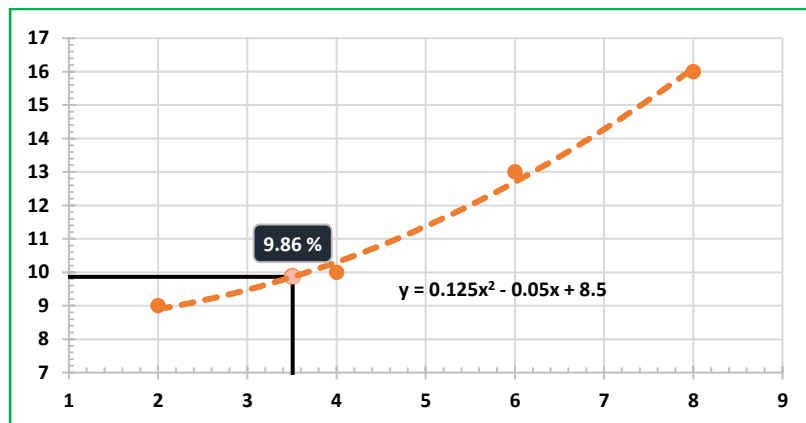


Figura 4.15
Gráfica %Flujo vs %RC 250 - Cantera Tugaduaja



f) Cantera San Vicente – Asfalto diluido RC – 250.

Para la mezcla correspondiente a la cantera San Vicente con asfalto diluido, el contenido óptimo de estabilizante se definió en 4,11% Figura 4.16, logrando una estabilidad de 2782,62 lb y flujo de 12,88 (Figura 4.17 y Figura 4.18), las estabilidades resultaron menos eficientes en comparación con las obtenidas mediante estabilización con emulsión, pero siguen siendo superiores a las mínimas requeridas para bases estabilizadas.

Tabla 4.11

Resultados de las briquetas con distintos porcentajes de RC 250 - Cantera San Vicente

% RC-250	ESTABILIDAD (Lb)	FLUJO (%)	% VACÍOS
2	1683	11	7,33
4	2889	12	5,17
6	3032	16	2,12
8	3089	18	1,74

Figura 4.16
Gráfica %Vacíos vs %RC 250 - Cantera San Vicente

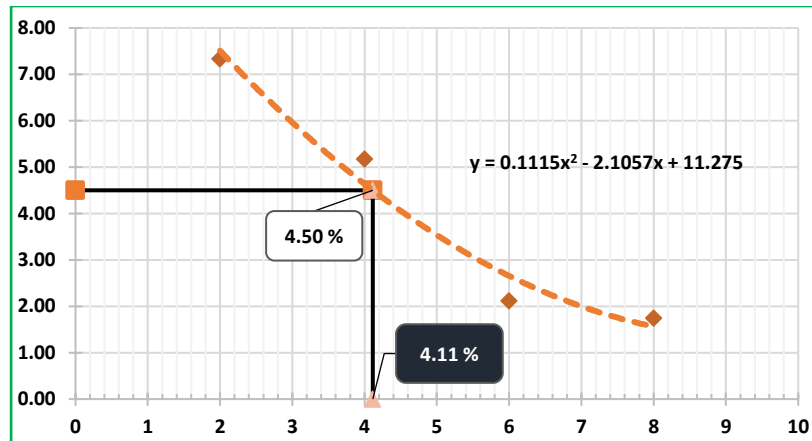


Figura 4.17
Gráfica Estabilidad vs %RC 250 - Cantera San Vicente

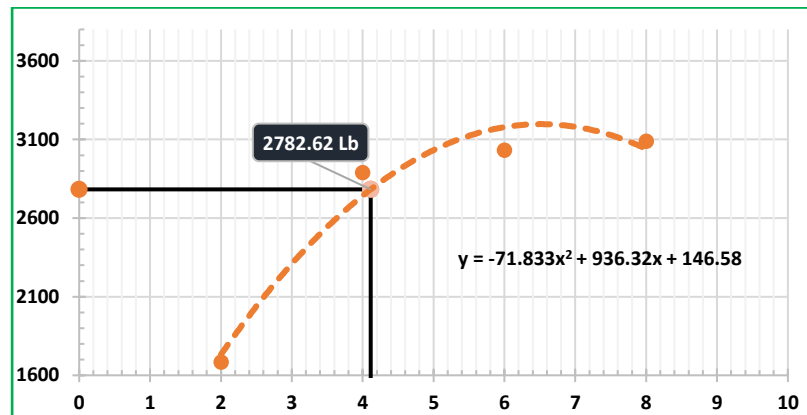
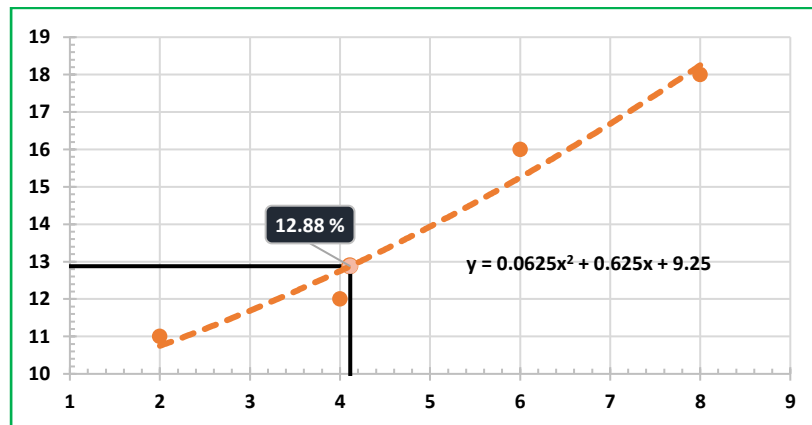


Figura 4.18
Gráfica %Flujo vs %RC 250 - Cantera San Vicente

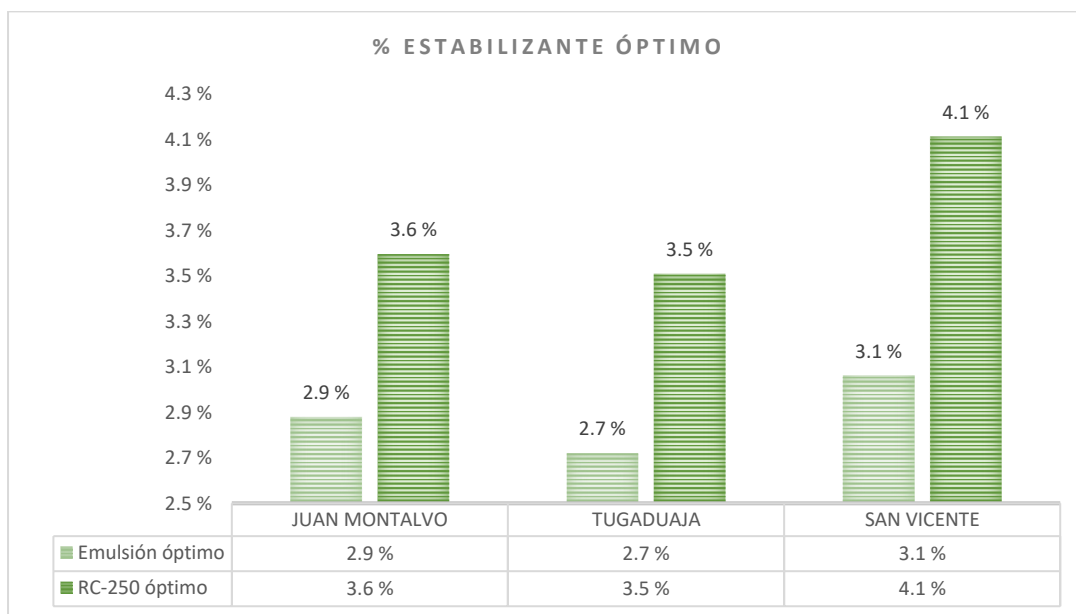


g) Resumen y comparación de contenidos de estabilizante óptimo.

Las mezclas con asfalto diluido requirieron sistemáticamente más ligante que las mezclas con emulsión. En términos porcentuales, la emulsión demandó entre 26–31 % menos volumen de estabilizante por m³ respecto al asfalto, lo que se traduce en un ahorro directo de material.

Figura 4.19

Porcentajes de estabilizante óptimo requerida para cada mezcla.



4.2.2 Verificación y comparación de propiedades físico – mecánicas de las mezclas con contenido óptimo de estabilizante.

Los resultados experimentales (Tabla 4.12 y Tabla 4.13) muestran diferencias sistemáticas entre las mezclas estabilizadas con emulsión CSS-1h y con RC-250, que se relacionan con la naturaleza del ligante y la calidad de los materiales granulares. A continuación, se detalla un **análisis comparativo entre propiedades** de las mezclas con asfalto diluido y emulsión asfáltica.

- a) En cuanto al **contenido óptimo de estabilizante**, las mezclas con asfalto diluido requieren porcentajes mayores (3,51–4,11 %) frente a las mezclas con emulsión (2,72–3,06 %). Esto se explica porque el RC-250, al aplicarse sobre suelos esencialmente secos, es parcialmente absorbido por las partículas y por tanto exige mayor dosificación; igualmente, cuando la calidad del suelo decrece el contenido óptimo tiende a incrementarse para compensar la menor cohesión del agregado.
- b) Respecto a la **densidad de la mezcla**, las formulaciones con RC-250 presentan densidades mayores (2,52–2,55 t/m³) que las con emulsión (2,46–2,47 t/m³), coherente con el mayor porcentaje de estabilizante incorporado y el mayor residuo bituminoso por unidad de volumen que aporta el RC.
- c) Los **volúmenes de aire** obtenidos para todas las mezclas se ubican dentro del rango permisible (3–9 %) y son cercanos al valor de diseño adoptado (4,5 %): se observan vacíos en el intervalo aproximado 3,19–4,75 %, lo que indica que la compactación aplicada en laboratorio alcanzó los criterios de densidad esperados y que la selección del vacío de diseño fue adecuada para control operativo.
- d) En cuanto a las **estabilidades Marshall**, ambos estabilizantes generaron estabilidades por encima del mínimo requerido para bases estabilizadas; sin embargo, las mezclas con emulsión alcanzaron los valores máximos más altos, lo que implica mayores coeficientes estructurales en un diseño de pavimento tipo AASHTO y, por ende, la posibilidad de reducir significativamente los espesores de capa y las cantidades de material necesario. Además, las estabilidades siguen la jerarquía de calidad de canteras confirmando la influencia del material granular en el rendimiento final.

- e) **Los flujos** se mantuvieron dentro de las especificaciones (8–14) para la mayoría de los casos; las mezclas con emulsión tienden a presentar flujos ligeramente superiores (mayor deformabilidad) que las con RC, lo que se interpreta positivamente: al compensar la elevada rigidez de alta estabilidad sobre todo de las mezclas con emulsión, un flujo mayor aporta ductilidad y reduce la probabilidad de fractura frágil o generación de deformaciones permanentes concentradas, mejorando el comportamiento en servicio bajo cargas repetidas.
- f) Finalmente, en la **conservación de estabilidad y TSR** (indicadores de resistencia retenida frente a humedad), las mezclas con emulsión mostraron valores consistentemente superiores y por encima del umbral de aceptación ($> 70\%$ para ambos criterios) evidenciando buena resistencia a la acción del agua. En contraste, las mezclas con RC-250 mostraron TSR aceptables en general, pero las canteras Juan Montalvo y San Vicente presentaron retenciones de estabilidad por debajo del 70% lo que sugiere una mayor sensibilidad a la humedad y posible pérdida de resistencia tras condiciones de saturación. La emulsión ofrece una mayor seguridad frente a la pérdida de resistencia por humedad, mientras que el RC-250 podría requerir mayor contenido, tratamientos complementarios o controles de obra más estrictos donde la exposición al agua sea relevante.

a) *Mezclas con emulsión asfáltica CSS – 1h.*

Tabla 4.12

Resultados obtenidos de las mezclas preparadas con el %Emulsión óptimo

	JUAN MONTALVO		TUGADUAJA		SAN VICENTE		ESPECIFICACIONES
% EMULSIÓN ÓPTIMO	2,88		2,72		3,06		-
DENSIDAD DE LA MEZCLA (t/m ³)	2,46		2,47		2,46		-
% VOLUMEN DE AIRE	3,90%		4,75%		3,96%		3% - 9%
SUMERGIDO	2h	24h	2h	24h	2h	24h	-
ESTABILIDAD (Lb)	3624,10	2588,04	3856,86	2935,88	3106,31	2189,74	> 750 lbs
FLUJO (%)	14	15	12	13	12	14	8% - 14%
ESFUERZO A LA TENSIÓN (psi)	35,82	27,77	36,25	29,02	27,74	20,69	-
FLUJO (%)	9	9	8	8	8	10	-
CONSERVACION DE ESTABILIDAD Y TSR							
TSR	77,51%		80,06%		74,57%		> 70%
ESTABILIDAD	71,41%		76,12%		70,49%		> 70%

b) *Mezclas con asfalto diluido RC – 250.*

Tabla 4.13

Resultados obtenidos de las mezclas preparadas con el %RC-250 óptimo

	JUAN MONTALVO		TUGADUAJA		SAN VICENTE	
RC Óptimo (%)	3.60		3.51		4.11	
DENSIDAD DE LA MEZCLA (t/m ³)	2.55		2.52		2.52	
% VOLUMEN DE AIRE	4.11%		3.19%		3.75%	
polvo / asfalto	1.47		1.33		1.46	
SUMERGIDO	2h	24h	2h	24h	2h	24h
ESTABILIDAD (Lb)	2836.26	1882.47	3026.55	2158.05	2921.78	1818.84
FLUJO (%)	12	15	10	13	11	13
St (psi)	33.49	24.41	33.66	25.56	33.97	24.40
FLUJO (%)	10	8	8	6	10	8
CONSERVACION DE LA ESTABILIDAD						
TSR	72.89%		75.92%		71.83%	
ESTABILIDAD	66.37%		71.30%		62.25%	

4.3 ANALISIS DE RESULTADOS DE O.E.3. COMPARACION COSTO / BENEFICIO DE LAS MEZCLAS

4.3.1 Análisis de costos de implementación.

a) *Cálculo de cantidades de material granular y estabilizante por unidad m³.*

Al comparar los volúmenes y los análisis de costo por m³, se observa en las Tabla 4.14 y

Tabla 4.15 que las mezclas con asfalto diluido requieren una mayor cantidad de estabilizante producto de sus altos requerimientos en contenidos de asfalto optimo frente a las mezclas con emulsión, lo que se traduce en mayor consumo de estabilizante para producir un metro cubico de mezcla.

Tabla 4.14

Cálculo de volúmenes de materiales para la mezcla por cada m³ - Emulsión

	JUAN MONTALVO	TUGADUAJA	SAN VICENTE
VOLUMEN EMULSIÓN	0,071 m ³	0,067 m ³	0,075 m ³
VOLUMEN MATERIAL GRANULAR	0,93 m ³	0,93 m ³	0,92 m ³
VOLUMEN DE AGUA			
VOLUMEN TOTAL	1,00 m ³	1,00 m ³	1,00 m ³

Tabla 4.15

Cálculo de volúmenes de materiales para la mezcla por cada m³ - RC 250

	JUAN MONTALVO	TUGADUAJA	SAN VICENTE
VOLUMEN RC-250	0,096 m ³	0,093 m ³	0,108 m ³
VOLUMEN MATERIAL	0,90 m ³	0,91 m ³	0,89 m ³
VOLUMEN TOTAL	1,00 m ³	1,00 m ³	1,00 m ³

b) *Análisis de precio unitario de estabilización de suelos.*

En el análisis de precio unitario por m³, la comparación de las Tabla 4.16 y Tabla 4.17 muestra que, aunque el asfalto diluido requiere menores costos de equipo y mano de obra (ya que no usan tanqueros distribuidores de agua como en el caso de la emulsión asfáltica), su mayor consumo de estabilizante eleva el precio total, como resultado, el costo unitario final por m³ es menor para las mezclas con emulsión que para las equivalentes con asfalto diluido. posicionando a la emulsión como la alternativa más económica de implementar.

Tabla 4.16

Análisis de costos para 1 m³ de mezcla con emulsión asfáltica CSS-1h

RUBRO	DESCRIPCION	JUAN MONTALVO	TUGADUAJA	SAN VICENTE
1	EQUIPOS	\$3,68	\$3,68	\$3,68
2	MANO DE OBRA	\$1,16	\$1,16	\$1,16
3	MATERIALES	\$36,38	\$34,86	\$38,32
4	GASTOS DE IMPREVISTOS (20%)	\$8,24	\$7,94	\$8,63
TOTAL		\$49,47	\$47,64	\$51,79

Tabla 4.17

Análisis de costos para 1 m³ de mezcla con asfalto diluido RC-250

RUBRO	DESCRIPCION	JUAN MONTALVO	TUGADUAJA	SAN VICENTE
1	EQUIPOS	\$1,76	\$1,76	\$1,76
2	MANO DE OBRA	\$0,64	\$0,64	\$0,64
3	MATERIALES	\$44,60	\$43,20	\$49,52
4	GASTOS DE IMPREVISTOS (20%)	\$9,40	\$9,12	\$10,38
TOTAL		\$56,41	\$54,72	\$62,31

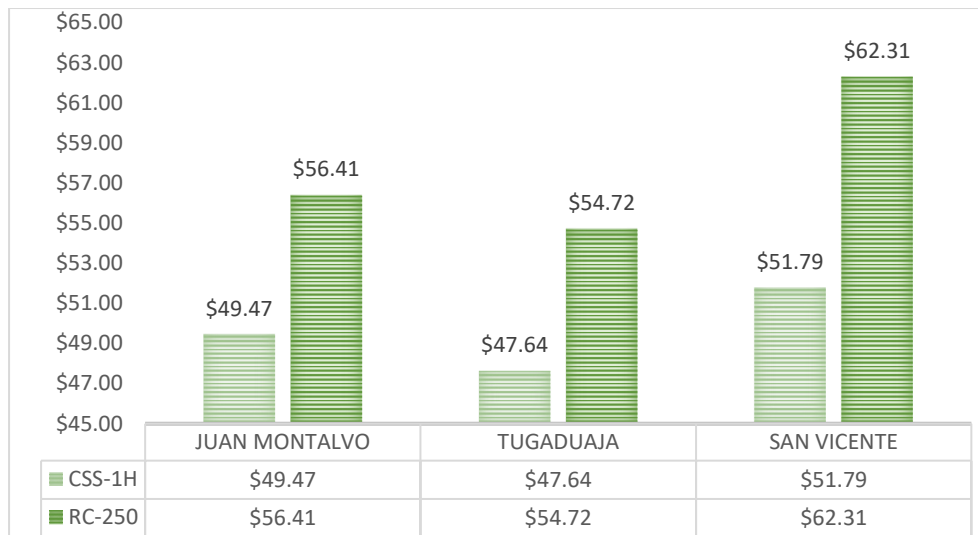
c) *Resumen de análisis de costos de implementación.*

Tabla 4.18

Resumen de costos para fabricación

\$ / M ³ DE MEZCLA	EMULSIÓN	RC-250
JUAN MONTALVO	\$49,47	\$56,41
TUGADUAJA	\$47,64	\$54,72
SAN VICENTE	\$51,79	\$62,31

Figura 4.20
Costos de fabricación para 1m³ de mezcla



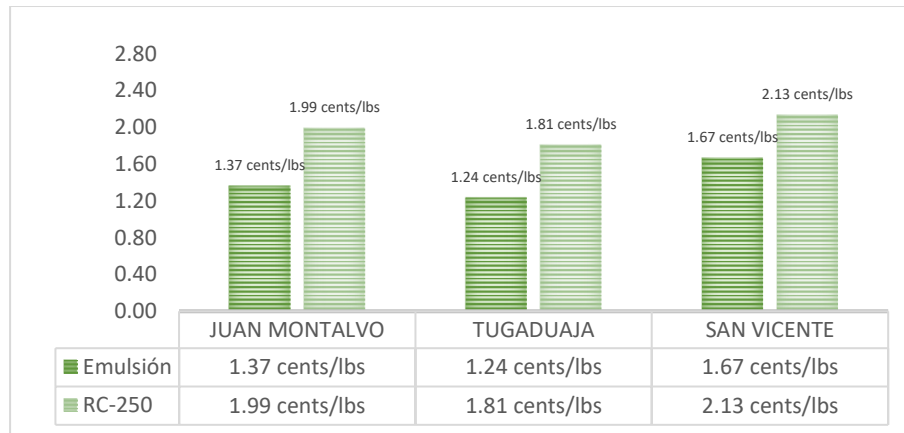
4.3.2 Análisis y comparación costo / beneficio.

a) Análisis comparativo. Relación Costo / Estabilidad.

El análisis cuantitativo de la razón costo/estabilidad muestra de forma clara que las mezclas estabilizadas con emulsión asfáltica CSS-1h son más costo-efectivas que las estabilizadas con asfalto diluido. Al dividir el costo por m³ entre la estabilidad Marshall obtenida a contenido óptimo se obtiene una razón promedio sensiblemente menor para la emulsión, lo que representa una reducción en el costo por unidad de resistencia de 31% para Juan Montalvo y Tugaduaja y 22% para San Vicente cuando se emplea emulsión; esta ventaja se explica por la combinación de menores consumos de ligante y estabilidades superiores logradas con la emulsión, pese a que RC presenta menores costos de equipo y mano de obra. Además, la cantera Tugaduaja mantiene la mejor relación costo/estabilidad en ambos estabilizantes por sus estabilidades más altas, mientras que San Vicente presenta la menor eficiencia económico-estructural.

Figura 4.21

Comparación de la razón costo/estabilidad para cada mezcla



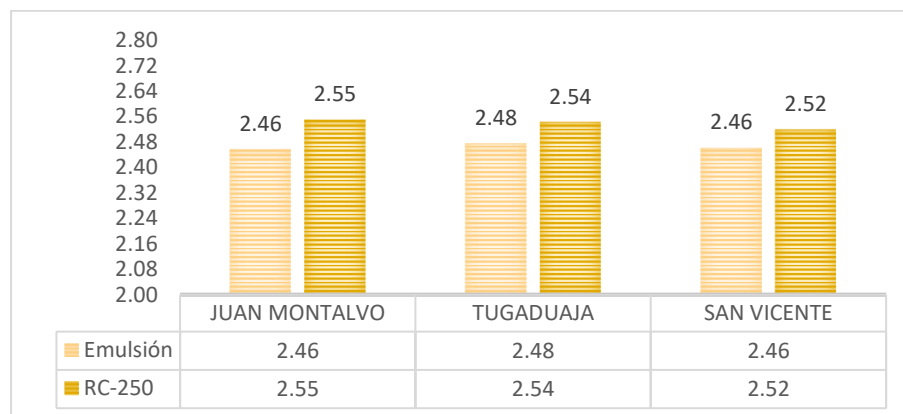
b) *Análisis comparativo de las propiedades de las mezclas.*

• **Análisis comparativo de Peso específico de las mezclas (GMB).**

El Gmb resulta ligeramente mayor en las mezclas con asfalto diluido que con emulsión, con incrementos relativos del orden de $\approx 2-4\%$. Esa mayor densidad implica material más pesado por m^3 (y, potencialmente, mayor consumo energético en transporte por unidad de mezcla). En términos de costo-beneficio, el ligero aumento de Gmb con asfalto diluido podría ser positiva para el asfalto diluido, sin embargo, no justifica el mayor gasto en estabilizante; la emulsión entrega densidades suficientes a menor coste y con mejores prestaciones mecánicas, por lo que sigue siendo más eficiente económicamente.

Figura 4.22

Densidades de las briquetas mezcladas con estabilizante óptimo

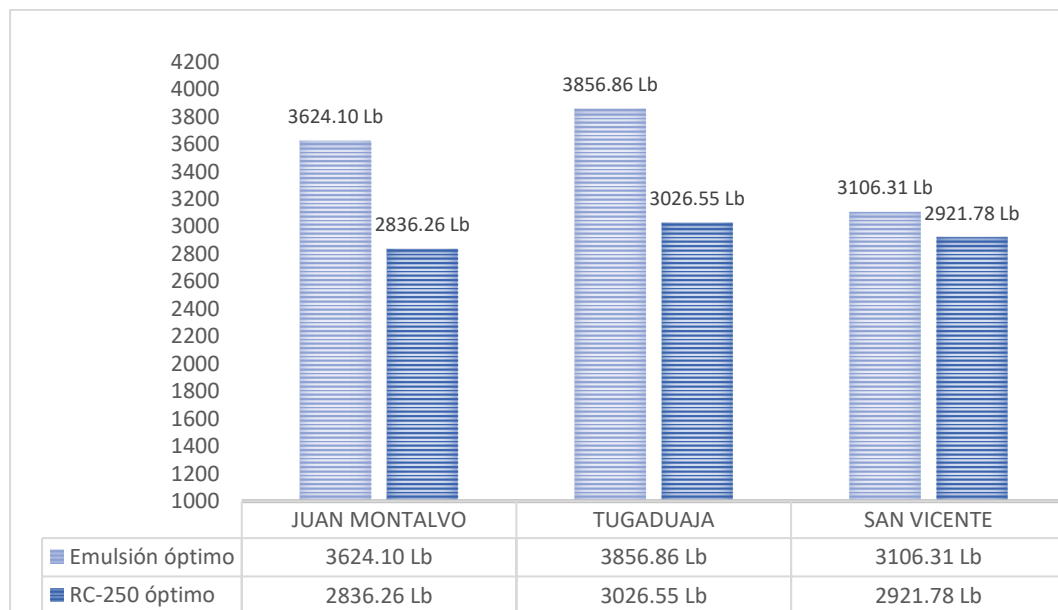


- **Análisis comparativo de Estabilidad Marshall de las mezclas.**

La emulsión CSS-1h produjo estabilidades superiores: comparando valores a contenido óptimo, las mejoras respecto a asfalto diluido fueron de 27–28 % en Juan Montalvo y Tugaduaaja y 6 % en San Vicente. En términos de diseño estructural esto se traduce en mayores coeficientes estructurales y posibilidad de reducir espesores de capa (ahorro en agregados y mano de obra). Desde la óptica costo-beneficio la emulsión ofrece mayor “resistencia por dólar invertido” porque combina menor consumo de ligante con estabilidades significativamente mayores, promoviendo ahorro en material y obras a mediano plazo; el asfalto diluido entrega estabilidades menores a mayor gasto en ligante, por lo que es menos eficiente.

Figura 4.23

Resultados del ensayo Estabilidad Marshall después de 2h sumergidas

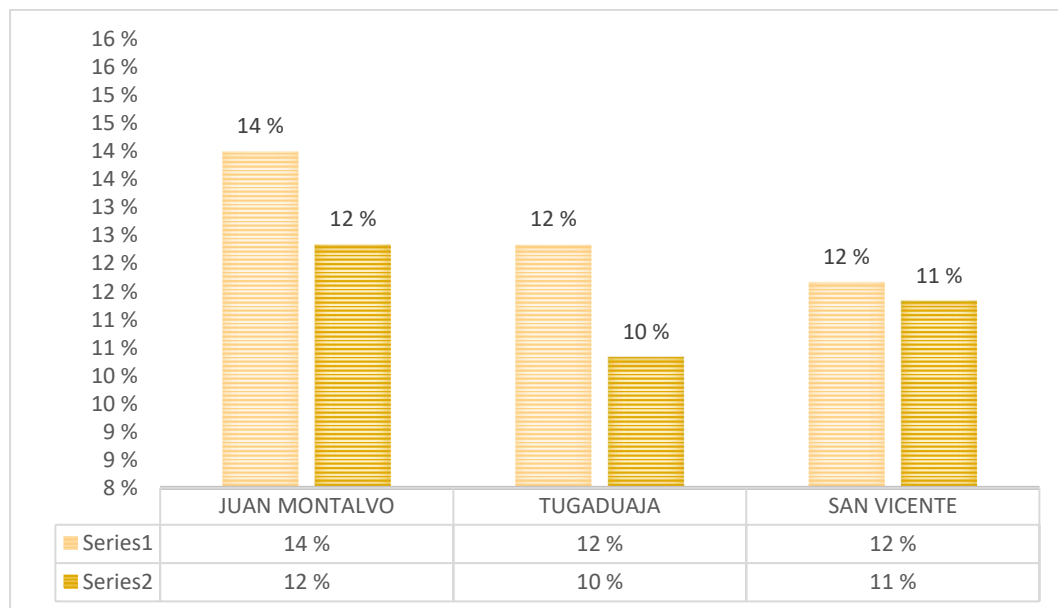


- **Análisis comparativo del flujo.**

Los diagramas muestran flujos ligeramente mayores en mezclas con emulsión. Ese incremento entre el 10–50 % relativo según cantera, siendo el caso de Tugaduaja el más notorio, aporta mayor ductilidad a mezclas que, por sus altas estabilidades, tenderían a ser muy rígidas; en términos prácticos, esto reduce la probabilidad de fractura frágil y de deformaciones permanentes localizadas. En un análisis costo-beneficio cualitativo, ese mayor flujo es positivo: permite combinar alta resistencia con suficiente flexibilidad, evitando reparaciones por fisuración y prolongando la vida útil, lo que nuevamente favorece a la emulsión frente al asfalto diluido.

Figura 4.24

Comparación del flujo de mezclas con estabilizante óptimo

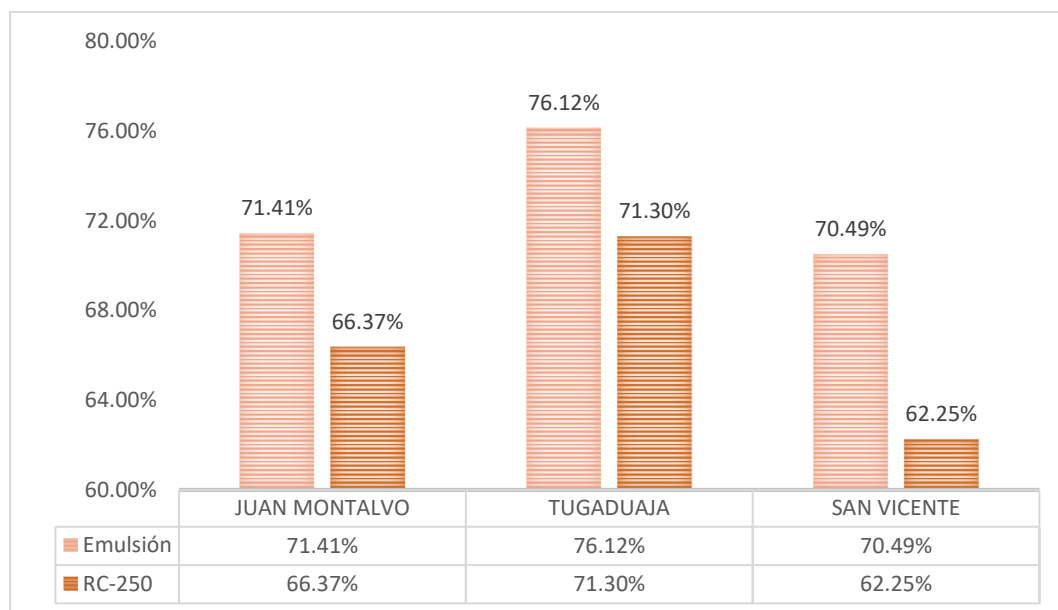


- **Análisis comparativo de Conservación de Estabilidad Marshall de las mezclas.**

La retención de estabilidad fue mejor con emulsión, las mejoras absolutas frente al asfalto diluido rondan 6–13 % según cantera. Esto implica mayor durabilidad frente a humedad y menor probabilidad de rehabilitaciones prematuras. En términos costo-beneficio, mayor conservación reduce costos futuros de mantenimiento y reposición, por lo que la emulsión presenta un beneficio económico rígido: mayor inversión inicial contenida y ahorro en vida útil; el asfalto diluido, con retenciones inferiores en algunos casos, aumenta el riesgo de costos de mantenimiento comparativamente más altos.

Figura 4.25

Conservación de la estabilidad para cada mezcla con estabilizante óptimo

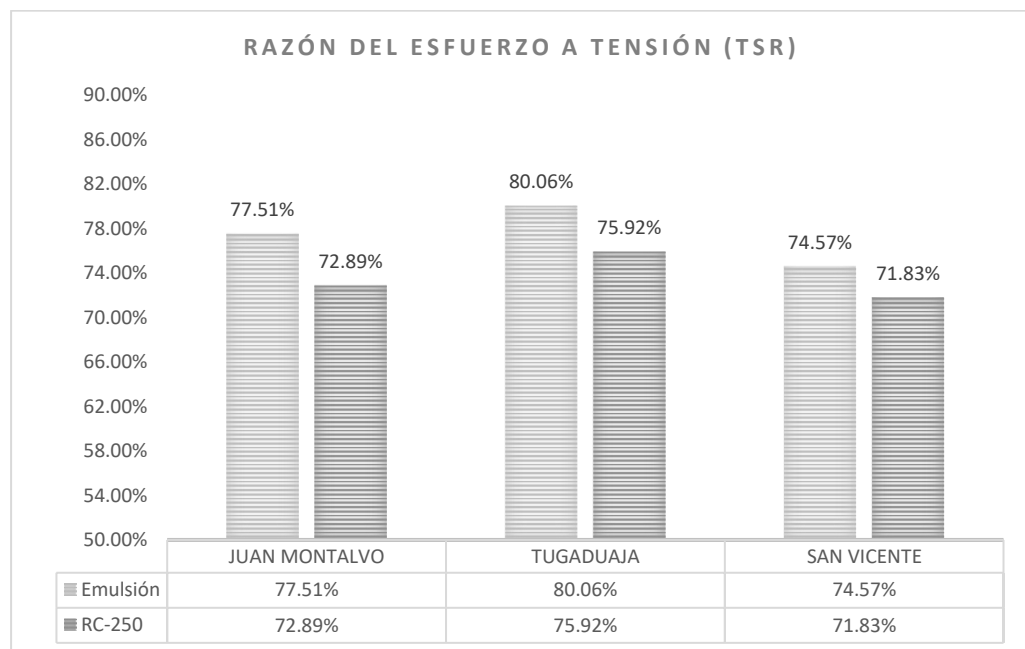


- **Análisis comparativo de Razón del esfuerzo a tensión (TSR) de las mezclas.**

Los TSR promedio son más favorables con emulsión asfáltica frente al asfalto diluido. Las mejoras absolutas son relativamente entre el 4–6 % según la cantera, lo que indica menor sensibilidad a la humedad para mezclas con emulsión. Desde la perspectiva costo-beneficio, un TSR mayor significa menos restricciones de obra (menos requerimientos de protección frente al agua) y menos intervenciones de mantenimiento; por tanto, la emulsión aporta un valor añadido económico tangible al reducir riesgos y costos asociados a daños por humedad.

Figura 4.26

Razón del esfuerzo a la Tensión (TSR) para cada mezcla con estabilizante óptimo



- **Análisis comparativo sobre salud ocupacional.**

Desde un análisis cualitativo, la estabilización de suelos con asfalto diluido implica mayores riesgos para la salud ocupacional debido a la presencia de solventes volátiles y vapores tóxicos que requieren medidas de protección más estrictas, lo que incrementa los costos indirectos de seguridad laboral. En contraste, el uso de emulsión asfáltica, al ser una mezcla base agua, reduce significativamente la exposición a compuestos nocivos y minimiza los riesgos de inhalación y contacto dérmico, ofreciendo mejores condiciones de trabajo y menores costos asociados a la prevención de enfermedades ocupacionales.

- **Análisis comparativo sobre impactos ambientales.**

Desde el punto de vista ambiental, el asfalto diluido genera mayores impactos negativos por la emisión de compuestos orgánicos volátiles y la posible contaminación del suelo y el aire durante su aplicación. Por otro lado, la emulsión asfáltica presenta una ventaja cualitativa en costo-beneficio, ya que su formulación acuosa reduce las emisiones contaminantes, mejora la eficiencia energética y disminuye los costos asociados al control ambiental, posicionándola como una alternativa más sostenible y económica a largo plazo.

CAPITULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 CONCLUSIONES

Respecto al objetivo general se concluye que la estabilización con productos asfálticos mejora de forma clara las propiedades mecánicas de los agregados locales frente a la condición sin tratar. En términos de capacidad portante y resistencia a la tracción, las mezclas con ligantes mostraron incrementos significativos en estabilidad Marshall y en resistencia indirecta respecto al material no estabilizado. Integrando rendimiento técnico y consumo por unidad de mezcla, la emulsión asfáltica CSS-1h emerge como la alternativa con mejor relación costo-beneficio para todas las combinaciones evaluadas, debido a que ofrece las más altas estabilidades, mejor comportamiento frente a humedad, menor consumo volumétrico de estabilizante por m³ de mezcla, por ende menor costo de implementación, proyección de menores costos de mantenimiento, mejor trabajabilidad y menor impacto ambiental y en salud ocupacional.

En correspondencia con el Objetivo Específico 1 sobre la caracterización de materiales, los ensayos de laboratorio confirman que las tres canteras cumplen con los requisitos para ser utilizadas como subbase clase 3, presentando límites de Atterberg, granulometría, CBR y resistencia a la abrasión dentro de rangos aceptables. No obstante, algunos parámetros se encuentran próximos a los límites normativos, lo que indica que la variabilidad natural del yacimiento puede influenciar el comportamiento en obra. Por ello, la caracterización realizada en laboratorio proporciona una base técnica sólida para el diseño de mezclas, pero su reproducibilidad en obra depende de controles de calidad continuos sobre el material de cantera y la compactación alcanzada en campo.

Respecto al Objetivo Específico 2 sobre evaluar el efecto de los estabilizantes sobre las propiedades mecánicas, los resultados muestran que tanto RC-250 como CSS-1h mejoran la estabilidad y la resistencia a la tracción de los suelos estabilizados, pero con matices relevantes; la emulsión CSS-1h tiende a proporcionar una mayor retención de resistencia frente a humedad TSR y una conservación de estabilidad más homogénea entre las tres canteras, mientras que RC-250 presenta mayor variabilidad y, en algunos casos, menores índices de TSR a los especificados por lo que puede requerir aditivos. Volumétricamente, las mezclas con ambos estabilizantes alcanzan vacíos y flujos dentro de los rangos deseados, favoreciendo una combinación equilibrada de resistencia y ductilidad en la subbase estabilizada.

En lo relativo al Objetivo Específico 3 sobre el análisis costo-beneficio, la comparación entre ligantes muestra que, aunque el precio unitario del RC-250 puede ser menor por unidad de volumen, su mayor consumo volumétrico por m³ de mezcla y la menor eficiencia técnica observada en algunos escenarios derivan en un costo real por m³ estabilizado comparable o superior al de la emulsión. La emulsión CSS-1h, con consumos efectivos menores y mejores indicadores de durabilidad (especialmente TSR y estabilidad Marshall en mezclas óptimas), ofrece una mejor relación costo-beneficio cuando se consideran no solo el precio inicial sino el desempeño y los costos de mantenimiento proyectados durante la vida útil del pavimento.

Se identificó que **la combinación Cantera Tugaduaja - Emulsión CSS-1h como la alternativa de mejor desempeño mecánico y económico** dentro del estudio. Esta combinación alcanzó las mayores estabilidades Marshall y valores de TSR, al tiempo que presentó un consumo de ligante por m³ que reduce el costo efectivo de estabilización. Sin embargo, esta recomendación técnica debe matizarse con las condiciones operativas: la emulsión requiere planes de curado y manejo específicos (control de rotura, protección frente a lluvia durante el curado inicial y equipos de dosificación adecuados) y la apertura al tráfico pesado puede requerir tiempos mayores que los que permitiría un proceso con RC-250.

Se reconocen limitaciones importantes que condicionan la extrapolación directa de los resultados de laboratorio a campo: los ensayos se realizaron en condiciones controladas (curado en horno, dosificación y compactación en laboratorio) y no incluyen la respuesta bajo tráfico real ni la influencia de variaciones climáticas estacionales. Por tanto, las proyecciones de vida útil y los beneficios en costos de mantenimiento deben validarse mediante pilotos en obra y monitoreo a mediano plazo. Asimismo, la variación natural de las propiedades en las canteras obliga a implementar un programa de control de calidad de extracción y suministro que garantice la reproducibilidad de las mezclas diseñadas.

En términos operativos y de seguridad, la selección entre emulsión asfáltica CSS – 1h y RC-250 implica diferencias: RC-250 ofrece curado más rápido (ventaja para apertura temprana), pero su manejo exige controles por la presencia de solventes y posibles emisiones, así como control exhaustivo de temperatura. Estas dimensiones deben incorporarse en el presupuesto y en la planificación logística del proyecto, así como en la evaluación ambiental y de salud ocupacional.

5.2 RECOMENDACIONES

Priorizar la emulsión asfáltica CSS-1h para la estabilización de subbases con materiales de las canteras estudiadas, entre las cuales se recomienda priorizar Tugadujaja y Juan Montalvo por su mejor retención frente a humedad (TSR), mayor estabilidad Marshall en mezclas óptimas y menor consumo volumétrico por m³ frente al RC-250, lo que se traduce en una mejor relación costo-beneficio.

Ejecutar ensayos piloto en obra antes de escalamiento midiendo tiempos de rotura/curado, densidad en obra y comportamiento inicial al tráfico. Los pilotos deben contemplar parcelas de control con RC-250 para comparar desempeño real y validar los supuestos de vida útil y costos proyectados.

Implantar muestreo periódico y control de las propiedades críticas de los suelos: granulometría, límites de Atterberg, contenido de humedad y CBR. Dado que algunos parámetros están próximos a los límites normativos, el control reduce la variabilidad en obra y asegura reproducibilidad de las mezclas diseñadas en laboratorio.

Diseñar un protocolo de manejo de la emulsión que incluya control de rotura (ensayos in situ), protección temporal frente a lluvia en las primeras 24 o 48 h, y criterios de apertura al tráfico. Esto mitigará riesgos logísticos y garantizará desempeño inicial.

Reservar el uso de RC-250 solo para situaciones donde la rapidez de curado y la apertura temprana al tráfico sean imprescindibles, y sólo con los controles ambientales y de salud ocupacional adecuados como manejo de solventes, ventilación y plan de mitigación de emisiones. Cuando se utilice RC-250, prever mayores contenidos y controles de mezclado para compensar su mayor absorción y variabilidad observada.

Revisar diseños de sección considerando que las mezclas con emulsión alcanzan mayor eficiencia estructural por m³; esto puede permitir reducción de espesor de subbase o mejores factores de seguridad estructural sin incrementar costos.

Contemplar en el presupuesto de estabilización con emulsión personal capacitado en manejo de emulsiones. Para RC-250: contemplar medidas de seguridad para almacenamiento y transporte de solventes. Estas inversiones logísticas son decisivas para la calidad del producto final.

Crear un formato estándar para registrar dosificación real, temperatura ambiente, humedad, densidad alcanzada, tiempos de curado, observaciones de mezcla y resultados de control de calidad en obra. Estos datos son esenciales para validar la transferencia laboratorio–obra y para publicaciones o escalamiento futuro.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AASHTO. (1993). *American Association of State Highway and Transportation Officials*. Obtenido de <https://la.astm.org/es/standards/aashto/>
- AASHTO T245. (1993). *American Association of State Highway and Transportation Officials*. Obtenido de <https://la.astm.org/es/standards/aashto/>
- Almeida, S. (2011). *Estabilización de suelos con emulsiones asfálticas catiónicas de rotura lenta*. PUCE Quito.
- Arias & Idrobo. (2022). *Análisis comparativo del costo-beneficio generado por la inclusión de bases estabilizadas*. Repositorio EPN.
- ASSHTO T283. (2005). Obtenido de American Association of State Highway and Transportation Officials: <https://la.astm.org/es/standards/aashto/>
- ASTM C535. (2016). *Standard Test Method for Resistance to Degradation of Large-Size Coarse Aggregate by Abrasion and Impact in the Los Angeles Machine*. Obtenido de <https://store.astm.org/c0535-16.html>
- ASTM D1557. (2012). *Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Modified Effort (56,000 ft-lbf/ft³ (2,700 kN-m/m³))*. Obtenido de <https://store.astm.org/d1557-12r21.html>
- ASTM D1559-89. (1989). *Test Method for Resistance of Plastic Flow of Bituminous Mixtures Using Marshall Apparatus*. Obtenido de <https://store.astm.org/d1559-89.html>
- ASTM D1883. (2021). *Standard Test Method for California Bearing Ratio (CBR) of Laboratory-Compacted Soils*. Obtenido de <https://store.astm.org/d1883-21.html>

- ASTM D2028. (2021). *Standard Specification for Cutback Asphalt (Rapid-Curing Type)*. Obtenido de https://store.astm.org/d2028_d2028m-15r21e01.html
- ASTM D2041-03. (2003). *Standard Test Method for Theoretical Maximum Specific Gravity and Density of Bituminous Paving Mixtures*. Obtenido de <https://store.astm.org/d2041-03a.html>
- ASTM D2216. (2019). *Standard Test Methods for Laboratory Determination of Water (Moisture) Content of Soil and Rock by Mass*. Obtenido de <https://store.astm.org/d2216-19.html>
- ASTM D2397. (2020). *Standard Specification for Cationic Emulsified Asphalt*. Obtenido de https://store.astm.org/d2397_d2397m-20.html
- ASTM D2487-17. (2017). *Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System)*. Obtenido de https://store.astm.org/d2487-17.html?utm_source=
- ASTM D422. (2014). *Método de prueba estándar para el análisis del tamaño de partículas de suelos*. Obtenido de <https://store.astm.org/d0422-63r07.html>
- ASTM D4318. (2010). *Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils*. Obtenido de <https://store.astm.org/d4318-10.html>
- ASTM D6913. (2004). *Standard Test Methods for Particle-Size Distribution (Gradation) of Soils Using Sieve Analysis*. Obtenido de <https://store.astm.org/d6913-04r09e01.html>
- ASTM D6927. (s.f.). *Standard Test Method for Marshall Stability and Flow of Asphalt Mixtures*.
- ASTM D6931. (2017). *Standard Test Method for Indirect Tensile (IDT) Strength of Asphalt Mixtures*.

ASTM D75M-19. (2019). *Práctica estándar para el muestreo de agregados*.
Obtenido de https://store.astm.org/d0075_d0075m-19.html

Azanza, A. (2020). *Estabilizados de suelo arena y emulsión*. Obtenido de
https://semsig.org/wp-content/uploads/2020/06/A_200_Estabilizados-de-suelo.pdf?utm_source=

Belén, P. V. (2023). Obtenido de
<https://es.scribd.com/document/627913666/Propiedades-de-la-Subbase-y-la-Base#:~:text=Subbase%20Es%20la%20capa%20de,el%20mejoramie nto%20de%20la%20subrasante>

CivilGeeks. (2011). *civilgeeks.com*. Obtenido de
<https://civilgeeks.com/2011/11/30/estabilizacion-de-suelos-con-asfalto/>

Conarsac. (2023). Obtenido de Conarsac:
<https://conarsac.com/blog/estabilizacion-de-suelo/#:~:text=%C2%BFQu%C3%A9%20es%20estabilizaci%C3%B3n%20de%20suelos%3F>.

EMUVISP-EP. (2024). Obtenido de “ESTUDIO VIAL PARA LA EJECUCION DE OBRAS DE ACERAS, BORDILLOS Y ASFALTADO DE LAS CALLES DE LA URBANIZACIÓN LA MERCED”:
<https://emuvisp.puyo.gob.ec/wp-content/uploads/2024/08/ANEXO-4.1-ESPECIFICACION-TECNICA-ACERAS-BORDILLOS-ASFALTO-signed-signed.pdf#:~:text=contractuales,igual%20o%20mayor%20del%2030%20https://emuvisp.puyo.gob.ec/wp-content/uploads/2024/08/ANEXO-4.1-ESPEC>

Gavidia, A. (2018). Obtenido de <https://www.ingetecnica.com/clasificacion-del-suelo-mediante-el-sistema-aashto#:~:text=,materiales%20granulares%20que%20aportan%20estabilidad>

- Guyer, J. P. (2011). *Introduction to Soil Stabilization in [Tesis de maestría, Continuis Education and Development, Inc.]*. Continuis Education and Development, Inc. Obtenido de <https://www.cedengineering.com/userfiles/An%20Introduction%20to%20Soil%20Stabilization%20for%20Pavements%20R1.pdf>
- Instituto Nacional de Vías, I. (2013). *gerconcesion*. Obtenido de https://gerconcesion.co/invias2013/340%20BASE%20ESTABILIZADA%20CON%20EMULSION%20ASFALTICA.pdf?utm_source=
- Iñiguez Delgado, P. A. (2024). Análisis comparativo de costos entre estabilización y método convencional. *Green World Journal*.
- Kienle Chauca, Y. (2024). Estudio del mejoramiento de una base granular mediante la aplicación de emulsión asfáltica CSS-1h. *Revista Obras y Proyectos, N°36*.
- Lanamme-UCR. (2020). *Guía de diseño para materiales estabilizados con asfalto*.
- Leiva, M. (2018). *METODOLOGÍA DE DISEÑO EN LABORATORIO PARA MATERIALES GRANULARES ESTABILIZADOS CON EMULSIÓN ASFÁLTICA*. Obtenido de https://www.lanamme.ucr.ac.cr/repositorio/bitstream/handle/50625112500/635/Metodolog%C3%ADa%20de%20dise%C3%B1o%20en%20laboratorio%20para%20materiales%20granulares%20estabilizados%20con%20emulsi%C3%B3n%20asf%C3%A1ltica.pdf?utm_source
- MOP - 001-F. (2002). *MINISTERIO DE OBRAS*. Quito. Obtenido de https://www.obraspublicas.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2025/04/BPC_3_7_-Especificaciones_Generales_MOP_001_F_2002.pdf
- NEC - SE - GC. (2015). *NORMA ECUATORIANA DE LA CONSTRUCCION. GEOTECNIA Y CIMENTACIONES*. Dirección de Comunicación Social,

MIDUVI. Obtenido de <https://www.habitatyvivienda.gob.ec/wp-content/uploads/2023/03/7.-NEC-SE-GC-Geotecnia-y-Cimentaciones.pdf>

NTE INEN 2062. (2024). *Productos derivados de petróleo. Emulsiones asfálticas catiónicas. Requisitos*. Obtenido de Instituto Ecuatoriano de Normalización (INEN).

Quiroz, W. F. (2017). *Comparación entre la estabilización de suelos con emulsión asfáltica y con asfalto-diésel*. Universidad Técnica de Ambato.

Realquim. (2023). *Ventajas de las Emulsiones Asfálticas Lentas para Pavimentación*. Obtenido de <https://realquimindustrias.com/ventajas-de-las-emulsiones-asfalticas-lentas-para-pavimentacion/>

Rivas Blancas, Y. Y. (2019). *Estabilizacion del adobe con adición de emulsión asfáltica RC-250 enfrio en el anexo de Cullpa Alta, Huancayo, 2019 [Trabajo de titulación - Superintendencia Nacional de Educación Superior Universitaria (Perú)*. Obtenido de <https://repositorioslatinoamericanos.uchile.cl/handle/2250/7993588>

Rolando Franco, F. E. (2012). *Estudio comparativo entre mezclas asfálticas con diluido RC250 y emulsiones [Tesis de titulación, Universidad de Piura]*. Repositorio Institucional. Obtenido de <https://hdl.handle.net/11042/1334>

Solís, G. V. (2021). *Uso de suelos estabilizados con emulsión asfáltica como parte de la estructura vial en carreteras terciarias y vecinales*. Cuenca.

Torres Garcia, A. I. (2020). *Propuesta metodologica para la evaluacion y mejoramiento con emulsion asfaltica*. Bogotá Colombia. Obtenido de <https://repository.umng.edu.co/server/api/core/bitstreams/7edf2c3e-6557-4813-a594-c98419833c0d/content>

Universidad de Sonora. (2008). Obtenido de <http://tesis.uson.mx/digital/tesis/docs/2944/Capitulo2.pdf>

- UNNA. (2020). *Ficha Técnica CSS-1, CSS-1h*. Obtenido de <https://es.scribd.com/document/579592419/Ficha-Tecnica-CSS-1-CSS-1h-1#:~:text=sedimentaci%C3%B3n%2C%20en%20caso%20de%20almacenamiento>
- Washington, Q. (2017). *COMPARACIÓN ENTRE LA ESTABILIZACIÓN DE SUELOS CON EMULSIÓN ASFÁLTICA, Y LA ESTABILIZACIÓN DE SUELOS CON ASFALTO Y DIÉSEL PARA DETERMINAR CUÁL ESTABILIZACIÓN PROPORCIONA MAYOR DENSIDAD APARENTE Y RELACIÓN DE SOPORTE CBR [Tesis de titulación, U.T.A.]*. Repositorio Intitucional. Obtenido de <https://repositorio.uta.edu.ec/server/api/core/bitstreams/0dfdd325-e826-437c-b3c1-364be151fac5/content>
- Zambrano César, Z. D. (2019). *ESTUDIO DE SUELO Y ESTABILIZACIÓN DEL MATERIAL GRANULAR EXISTENTE CON EMULSIÓN ASFÁLTICA PARA EL DISEÑO DE PAVIMENTO FLEXIBLE, EN LA VÍA LIBERTADOR BOLÍVAR-SITIO NUEVO DE LONGITUD 5 KM, DEL CANTÓN SANTA ELENA, PROVINCIA DE SANTA ELENA [Tesis titulación]*. UNIVERSIDAD ESTATAL PENINSULA DE SANTA ELENA. Obtenido de <http://repositorio.upse.edu.ec:8080/jspui/handle/46000/4768>

7. ANEXOS

7.1 ANEXOS O.E.1. CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES

Cuarteo y preparación de la muestra
- UPSE



Ensayo de granulometría vía húmeda
- UPSE



Ensayo Proctor modificado - UPSE



Ensayo Límites de Atterberg - UPSE



Toma de lecturas de hinchamiento de muestras sumergidas CBR - UPSE



Ensayo de penetración CBR - UPSE



Ensayo de residuos de asfalto - EMULDEC



Ensayo de punto de reblandecimiento - EMULDEC



Ensayo de penetración a estabilizadores
asfálticos - EMULDEC



Ensayo de viscosidad Furol - EMULDEC



Ensayo de viscosidad Brookfield
- EMULDEC



Preparación de muestra para ensayo de
ductilidad - EMULDEC



7.2 ANEXOS DE O.E.2. DISEÑO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS EN FRIO USANDO EL MÉTODO MARSHALL MODIFICADO.

Preparación y tamizado de suelos
- EMULDEC



Dosificación de emulsión asfáltica
en suelo previamente humedecido
- EMULDEC



Mezclas con emulsión asfáltica
- EMULDEC



Mezclas con asfalto diluido
- EMULDEC



Briquetas antes del curado
- EMULDEC



Curado de briquetas en horno a
60°C - EMULDEC



Briquetas con emulsión asfáltica
después del curado - EMULDEC



Briquetas con asfalto diluido
después del curado - EMULDEC



Tomas de diámetros y alturas -
EMULDEC



Tomas de peso en el aire - UPSE



Toma de pesos sumergidos - UPSE



Regulación de temperatura en baño
María a 25°C - EMULDEC



Rotura Marshall a briquetas con estabilizante óptimo - UPSE



Briqueta de emulsión asfáltica después de ensayo TSR -UPSE



7.3 ANEXOS DE ENSAYOS PARA CARACTERIZACIÓN DE SUELOS

Tabla 7.1

Contenido de humedad natural de la cantera Juan Montalvo según la norma ASTM D2216

JUAN MONTALVO	
N° de recipiente	E1
<i>Peso del recipiente (Wr)</i>	35,52
<i>Peso del rec. + Peso de Suelo hum (W1)</i>	540,52
<i>Peso del rec. + Peso de Suelo Seco (W2)</i>	497,00
<i>Peso del agua (Ww=W1-W2)</i>	43,52
<i>Peso del Suelo Seco (Ws=W2-Wr)</i>	461,48
<i>Contenido de humedad (w=(Ww/Ws) x100)</i>	9,43%

Tabla 7.2

Contenido de humedad natural de la cantera Tugaduaaja según la norma ASTM D2216

TUGADUAJA	
N° de recipiente	K
<i>Peso del recipiente (Wr)</i>	34,82
<i>Peso del rec. + Peso de Suelo hum (W1)</i>	532,13
<i>Peso del rec. + Peso de Suelo Seco (W2)</i>	496,00
<i>Peso del agua (Ww=W1-W2)</i>	36,13
<i>Peso del Suelo Seco (Ws=W2-Wr)</i>	461,18
<i>Contenido de humedad (w=(Ww/Ws) x100)</i>	7,83%

Tabla 7.3

Contenido de humedad natural de la cantera San Vicente según la norma ASTM D2216

SAN VICENTE	
N° de recipiente	R6
<i>Peso del recipiente (Wr)</i>	32,86
<i>Peso del rec. + Peso de Suelo hum (W1)</i>	546,6
<i>Peso del rec. + Peso de Suelo Seco (W2)</i>	503,64
<i>Peso del agua (Ww=W1-W2)</i>	42,96
<i>Peso del Suelo Seco (Ws=W2-Wr)</i>	470,78
<i>Contenido de humedad (w=(Ww/Ws) x100)</i>	9,13%

Figura 7.1
 Curva granulométrica de la cantera Juan Montalvo con bandas para subbase clase 3 según la norma ASTM D422

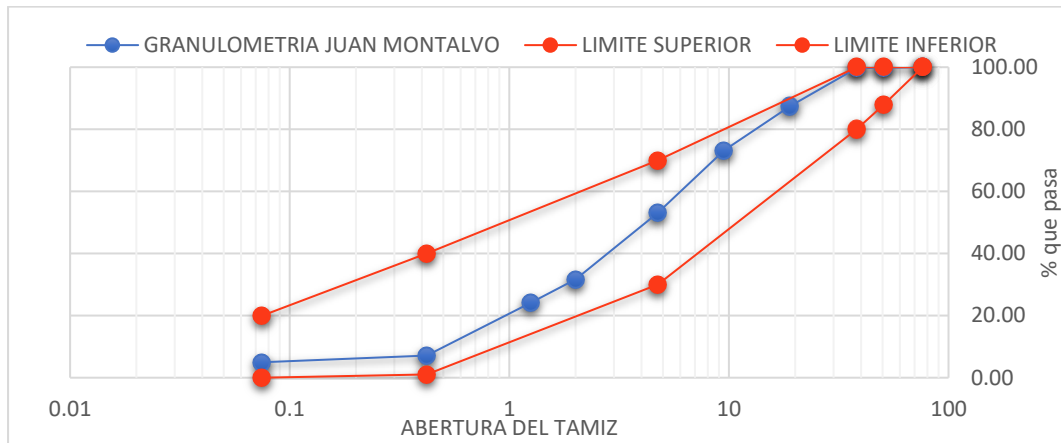


Figura 7.2
 Curva granulométrica de la cantera Tugaduaaja con bandas para subbase clase 3 según la norma ASTM D422

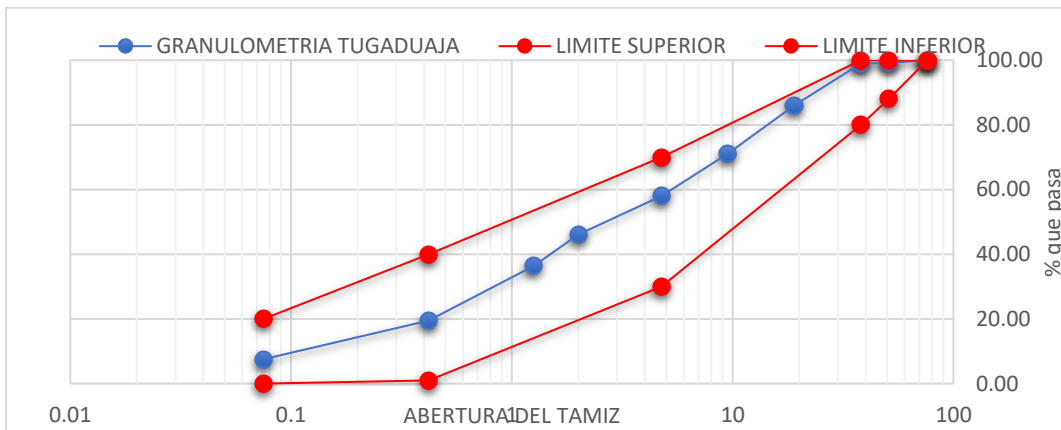


Figura 7.3
 Curva granulométrica de la cantera San Vicente con bandas para subbase clase 3 según la norma ASTM D422

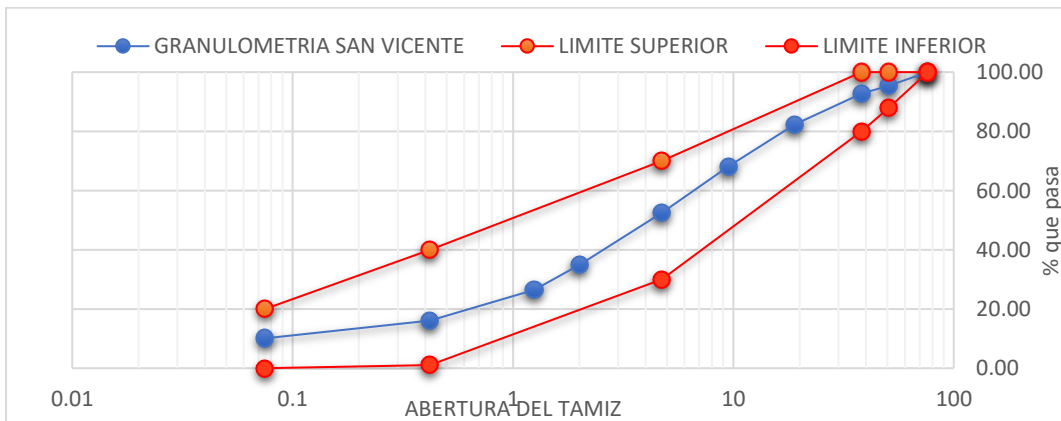


Figura 7.4
Gráfico de Límites de Atterberg - Cantera Juan Montalvo

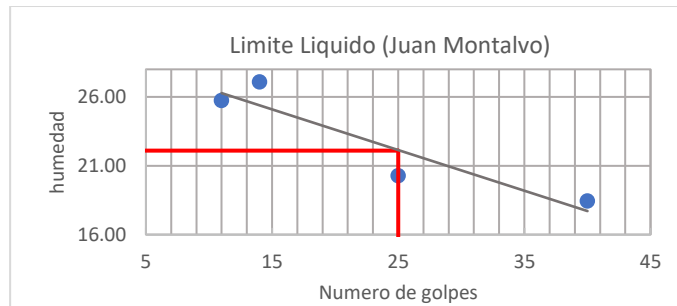


Tabla 7.4
Resultados del Ensayo Límites de Atterberg para la cantera Juan Montalvo según la norma ASTM D4318

<i>LL</i>	<i>LP</i>	<i>IP</i>
22,1	16,15	5,95
	<i>f</i>	

Figura 7.5
Gráfico de Límites de Atterberg - Cantera Tugaduaja

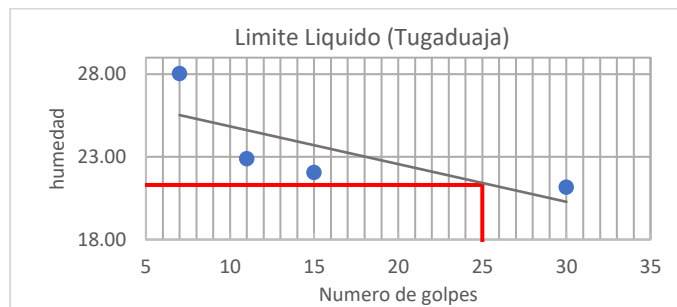


Tabla 7.5
Resultados del Ensayo Límites de Atterberg para la cantera Tugaduaja según la norma ASTM D4318

<i>LL</i>	<i>LP</i>	<i>IP</i>
21,3	18,38	2,92

Figura 7.6
Gráfico de Límites de Atterberg - Cantera San Vicente

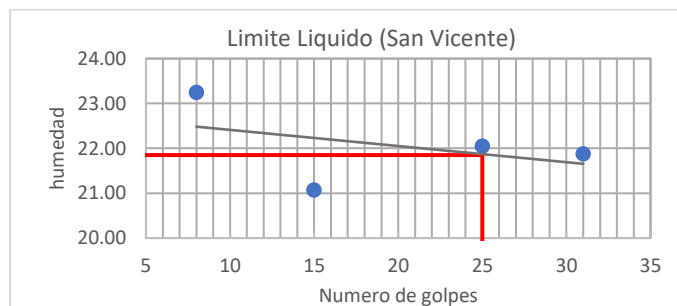


Tabla **7.6**
 Resultados del Ensayo Límites de Atterberg para la cantera San Vicente según la norma ASTM D4318

<i>LL</i>	<i>LP</i>	<i>IP</i>
21,85	15,91	5,94

Figura 7.7
 Curva Proctor - Cantera Juan Montalvo

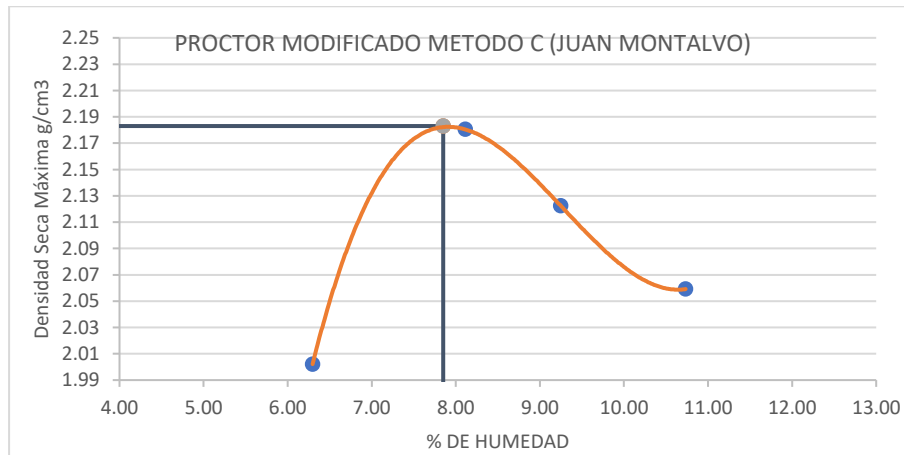


Tabla 7.7
 Resultados del ensayo Proctor modificado de la Cantera Juan Montalvo

JUAN MONTALVO		
%Óptimo húmedo:	7,85	%
Densidad Seca Max	2,183	gr/cm ³
	2183	kg/m ³

Figura 7.8
 Curva Proctor - Cantera Tugaduaja

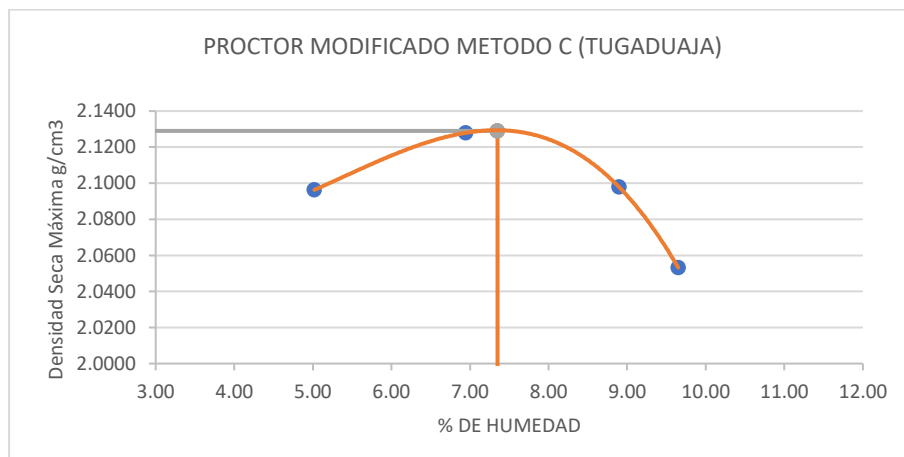


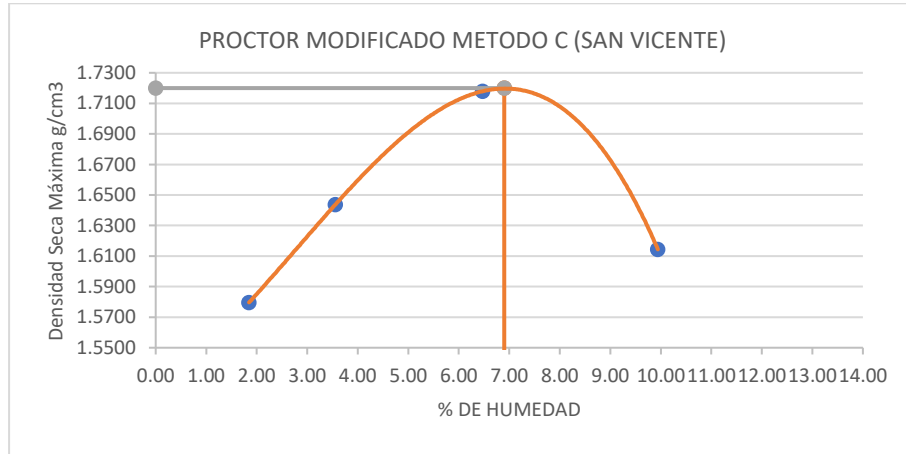
Tabla 7.8

Resultados del ensayo Proctor modificado de la Cantera Tugaduaja

TUGADUAJA		
%Optimo húmedo:	7,35	%
Densidad Seca Max	2,129	gr/cm ³
	2129	kg/m ³

Figura 7.9

Curva Proctor - Cantera San Vicente

**Tabla 7.9**

Resultados del ensayo Proctor modificado de la Cantera San Vicente

SAN VICENTE		
%Optimo húmedo:	6,9	%
Densidad Seca Max	1,72	gr/cm ³
	1720	kg/m ³

Figura 7.10
Gráfico Esfuerzo / Penetración - Cantera Juan Montalvo

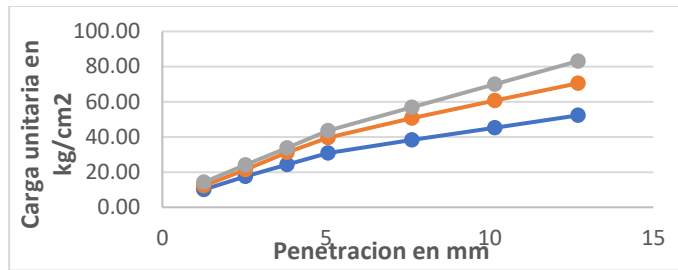


Tabla 7.10
Resultados del ensayo CBR - Cantera Juan Montalvo

PENETRACION 0,1"		
Densidad 100%	2,18	g/cm ³
CBR	34,40	%

Figura 7.11
Gráfico Esfuerzo / Penetración - Cantera Tugaduaja

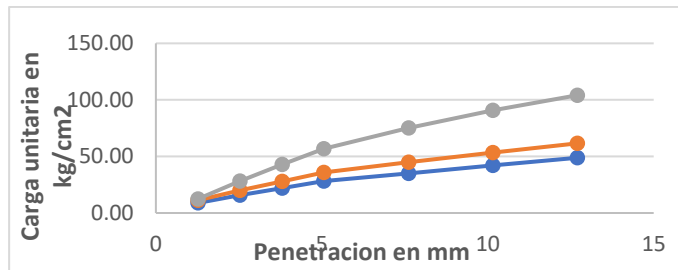


Tabla 7.11
Resultados del ensayo CBR - Cantera Tugaduaja

PENETRACION 0,1"		
Densidad 100%	2,13	g/cm ³
CBR	39,23	%

Figura 7.12
Gráfico Esfuerzo / Penetración - Cantera San Vicente

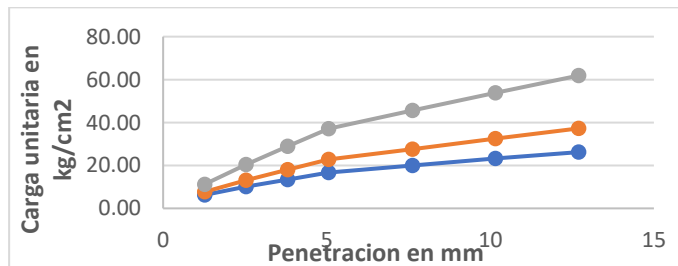


Tabla 7.12

Resultados del ensayo CBR - Cantera San Vicente

PENETRACION 0,1"

Densidad 100%	1,72	g/cm³
CBR	29,64	%

Tabla 7.13

Resultados del ensayo Abrasión de los Ángeles cantera Juan Montalvo

JUAN MONTALVO			
AGREGADO GRUESO Tamaño mayores a 19,0 mm (3/4")			
DESCRIPCION		Unid	DATOS DEL ENSAYO
TAMIZ			GRADACIONES
Que pasa	Retenido sobre		2
75 mm (3")	63,0 mm (2 1/2")	gr	0
63,0 mm (2 1/2")	50,8 mm (2")	gr	0
50,8 mm (2")	38,1 mm (1 1/2")	gr	5019
38,1 mm (1 1/2")	25,4 mm (1")	gr	5020
25,4 mm (1")	19 mm (3/4")	gr	0
MASA ORIGINAL DE LA MUESTRA		gr	10039
NUMERO DE ESFERAS		Unid	12
Masa final de la muestra seca después del ensayo, previo lavado sobre el tamiz de 1,70 mm (N°12) a 1000 revoluciones		gr	5899
PORCENTAJE DE DESGASTE A 1000 REVOLUCIONES		%	41,24%

Tabla 7.14

Resultados del ensayo Abrasión de los Ángeles cantera Tugaduaja

TUGADUAJA			
AGREGADO GRUESO Tamaño mayores a 19,0 mm (3/4")			
DESCRIPCION		Unid	DATOS DEL ENSAYO
TAMIZ			GRADACIONES
Que pasa	Retenido sobre		2
75 mm (3")	63,0 mm (2 1/2")	gr	0
63,0 mm (2 1/2")	50,8 mm (2")	gr	0
50,8 mm (2")	38,1 mm (1 1/2")	gr	5028
38,1 mm (1 1/2")	25,4 mm (1")	gr	5015
25,4 mm (1")	19 mm (3/4")	gr	0
MASA ORIGINAL DE LA MUESTRA		gr	10043
NUMERO DE ESFERAS		Unid	12

Masa final de la muestra seca después del ensayo, previo lavado sobre el tamiz de 1,70 mm (N°12) a 1000 revoluciones	gr	5362
PORCENTAJE DE DESGASTE A 1000 REVOLUCIONES	%	46,61%

Tabla 7.15

Resultados del ensayo Abrasión de los Ángeles cantera San Vicente

SAN VICENTE			
AGREGADO GRUESO Tamaño mayores a 19,0 mm (3/4")			
DESCRIPCION		DATOS DEL ENSAYO	
TAMIZ		Unid	GRADACIONES
Que pasa	Retenido sobre		2
75 mm (3")	63,0 mm (2 1/2")	gr	0
63,0 mm (2 1/2")	50,8 mm (2")	gr	0
50,8 mm (2")	38,1 mm (1 1/2")	gr	5039
38,1 mm (1 1/2")	25,4 mm (1")	gr	5019
25,4 mm (1")	19 mm (3/4")	gr	0
MASA ORIGINAL DE LA MUESTRA		gr	10058
NUMERO DE ESFERAS		Unid	12
Masa final de la muestra seca después del ensayo, previo lavado sobre el tamiz de 1,70 mm (N°12) a 1000 revoluciones		gr	5132
PORCENTAJE DE DESGASTE A 1000 REVOLUCIONES		%	48,98%