



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

TEMA:

“EVALUACIÓN COMPARATIVA DEL DISEÑO DE RCD
ESTABILIZADOS CON CEMENTO Y ASFALTO PARA CAPAS
ESTRUCTURALES DE PAVIMENTOS FLEXIBLES”

TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

AUTORES:

ANDERSON STEVEN GRANADOS REYES
ALESSANDRA JAEL SOTO BORBOR

TUTOR:

ING. NESTOR ORRALA VERA MSc

LA LIBERTAD, ECUADOR

2026

DEDICATORIA

A Dios por estar presente siempre, por la fortaleza, sabiduría y sobre todo la oportunidad de alcanzar esta meta.

A mis padres, Christian Granados y Leonela Reyes, por el apoyo incondicional, amor y confianza en mí, lo cual me impulsó a nunca rendirme.

A mi familia por sus consejos y apoyo que me motivo siempre a seguir adelante.

Con mucho cariño este triunfo también es de ustedes.

Granados Reyes Anderson

A mi padre celestial por darme la fortaleza de afrontar cada obstáculo y poder culminar esta etapa de mi vida.

A Digna Rosa, por ser mi estrella guía y ese pilar fundamental que me impulso a nunca rendirme.

A mis padres, por el amor que me brindan, por el apoyo incondicional, gracias por nunca dejarme sola. Este logro es el reflejo de todo el esfuerzo que hicieron para ayudarme a lograr esta meta.

Soto Borbor Alessandra

AGRADECIMIENTOS

A mi Dios, por darme salud, fortaleza, sabiduría y perseverancia para llevar a cabo mi trabajo de titulación.

A mis padres, Christian Granados Rodríguez y Leonela Reyes Tomalá, por estar presentes siempre, por cada sacrificio y trabajo para brindarme educación y confiar en mí.

A mi tutor, Ing. Néstor Alberto Orrala Verá, MSc y al Ing. Richard Ramírez, por su guía y observaciones valiosas en la tesis.

A la empresa INGEOTOP y a nuestra directora Ing. Lucrecia Moreno, PhD, por el acceso a su laboratorio y asesoramiento.

A mi compañera de tesis; a Santiago Salinas y Yajaira Tixe, por ese apoyo en conjunto a lo largo de nuestra formación universitaria.

A mi pareja, Gardenia Orrala Lavayen por su amor, paciencia, apoyo y creer en mí durante mi formación profesional.

A mis familiares, abuelitos, tíos, hermano, primos por sus consejos y alientos para nunca persistir ante cualquier adversidad.

Granados Reyes Anderson

A Dios, por guiarme y darme la fortaleza en mi etapa universitaria, por la salud que me brinda y la oportunidad de permitirme estar presente ante ustedes.

A mis padres, Lilia Borbor Lainez y Daniel Soto Guzman, gracias por su esfuerzo y trabajo para brindarme educación.

A la empresa INGEOTOP por darme acceso a sus instalaciones y guiarnos durante el desarrollo de los ensayos.

De la misma manera, a la Ing. Lucrecia Moreno, PhD por su disposición durante la etapa del desarrollo de ensayos.

A mi tutor, Ing. Néstor Alberto Orrala Vera, MSc, por la paciencia y disposición para cada etapa del desarrollo del trabajo de titulación.

A mi compañero de tesis, gracias por el compromiso, la dedicación y el trabajo en equipo.

Finalmente, agradezco a mis familiares y amigos, por sus palabras motivacionales, por su apoyo y todas las personas que, de una u otra manera, contribuyeron al desarrollo de esta investigación.

Soto Borbor Alessandra

CERTIFICACIÓN DEL TUTOR

En mi calidad de Tutor del Trabajo de Titulación, modalidad Trabajo de Integración Curricular denominado **“Evaluación comparativa del diseño de RCD estabilizados con cemento y asfalto para capas estructurales de pavimentos flexibles”** elaborado por el Sr. GRANADOS REYES ANDERSON STEVEN y SOTO BORBOR ALESSANDRA JAEL, egresados de la Carrera de Ingeniería Civil, FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA de la Universidad Estatal Península de Santa Elena, previo a la obtención del título de Ingenieros Civiles, me permito declarar que luego de haberla dirigido, estudiado y revisado, la apruebo en su totalidad.

TUTOR



Ing. Néstor Orrala Vera, MSc.

La Libertad, a los 23 días del mes de julio del año 2026

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

Nosotros, **Granados Reyes Anderson Steven, Soto Borbor Alessandra Jael**

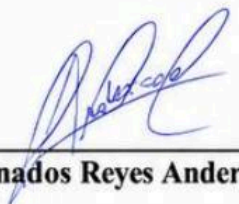
DECLARAMOS QUE:

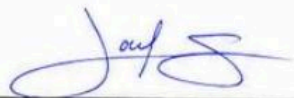
El Trabajo de Titulación “**Evaluación comparativa del diseño de RCD estabilizados con cemento y asfalto para capas estructurales de pavimentos flexibles**” previo a la obtención del título de **Ingenieros civiles**, ha sido desarrollado respetando derechos intelectuales de terceros conforme las citas 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.

La Libertad, a los 30 días del mes de julio del año 2026

LOS AUTORES



Granados Reyes Anderson Steven.

Soto Borbor Alessandra Jael.

AUTORIZACION

Nosotros, **Granados Reyes Anderson Steven, Soto Borbor Alessandra Jael**

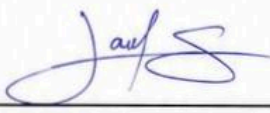
Autorizamos a la Universidad Península de Santa Elena la **publicación** en la biblioteca de la Institución del Trabajo de Titulación denominado “**EVALUACIÓN COMPARATIVA DEL DISEÑO DE RCD ESTABILIZADOS CON CEMENTO Y ASFALTO PARA CAPAS ESTRUCTURALES DE PAVIMENTOS FLEXIBLES**”, cuyo contenido, ideas y criterios son de nuestra exclusiva responsabilidad y total autoría.

La Libertad, a los 30 días del mes de julio del año 2026

LOS AUTORES



Granados Reyes Anderson Steven.



Soto Borbor Alessandra Jael.

CERTIFICADO DE ANTIPLAGIO

En calidad de tutor del trabajo de titulación denominado **“EVALUACIÓN COMPARATIVA DEL DISEÑO DE RCD ESTABILIZADOS CON CEMENTO Y ASFALTO PARA CAPAS ESTRUCTURALES DE PAVIMENTOS FLEXIBLES”**, elaborado por los estudiantes Granados Reyes Anderson Steven y Soto Borbor Alessandra Jael, egresados de la carrera de Ingeniería Civil, de la FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA, de la Universidad Estatal Península de Santa Elena, previo a la obtención del título de Ingeniero Civil, me permito declarar que una vez analizado en el sistema antiplagio, luego de haber cumplido con los requerimientos de valoración, el presente trabajo de titulación, se encuentra con un 2% de la valoración permitida, por consiguiente se procede a emitir el siguiente certificado.

Adjunto del reporte de análisis.

Atentamente,



Ing. Néstor Orrala Vera, MSc
DOCENTE TUTOR
C.I:0925722290

La Libertad, a los 20 días del mes de julio del año 2026

TESIS RCD GRANADOS Y SOTO Compilation
ID : 0ed3dee162caeb8dd53653ef56480364a6ff26b5

2%
Textos sospechosos

Nombre del fichero : TESIS RCD GRANADOS Y SOTO Compilation.txt Tamaño del archivo original : 213,95 kB Número de palabras : 23.480	Depositante : Nestor Orrala Vera Fecha de depósito : 16 de julio de 2026 Tipo de carga : interface fecha de fin de análisis : 16 de julio de 2026
--	--

Resumen (sección 1/2)

Localización de los textos sospechosos en el documento :



Incluido en el porcentaje de textos sospechosos :

Similitudes <1%

Pasajes con similitudes a fuentes encontradas en diferentes colecciones.



Detección de IA <1%

Textos estilísticamente próximos a un texto generado por una IA.
Este índice es un indicador y no una prueba. Comprueba con el autor si domina los conocimientos mencionados en el documento.



No incluido en el porcentaje de textos sospechosos :

Textos entre comillas 1%

Pasajes entre comillas, a menudo indicativos de una cita.

Fuentes de similitudes (sección 2/2)

Similitudes <1%

Pasajes con similitudes a fuentes encontradas en diferentes colecciones.



Fuente principal detectada

Nº	Descripciones	Similitudes	Ubicaciones
1	Bases estabilizadas con emulsión asfáltica para pavimentos... www.dspace.uce.edu.ec/handle/25000/943	<1%	
4	rephip.unr.edu.ar rephip.unr.edu.ar/server/api/core/bitstreams/c1297279-a73c-434a-978c-d7...	<1%	
5	repository.eafit.edu.co repository.eafit.edu.co/server/api/core/bitstreams/c8cbb8cb-5786-4d40-99...	<1%	
6	Estudio del agregado reciclado de residuos de construcción y... repositorio.unal.edu.co/handle/unal/78634	<1%	
8	repositorio.ucv.edu.pe repositorio.ucv.edu.pe/bitstream/20.500.12692/97101/1/Apaza_ACA-SD.pdf	<1%	
9	repository.udistrital.edu.co repository.udistrital.edu.co/bitstreams/739a6a11-013e-4c7e-9794-1615e50...	<1%	

CERTIFICADO DE GRAMATOLOGIA

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 Civil, denominado **"EVALUACIÓN COMPARATIVA DEL DISEÑO DE RCD ESTABILIZADOS CON CEMENTO Y ASFALTO PARA CAPAS ESTRUCTURALES DE PAVIMENTOS FLEXIBLES"**, de los estudiantes: **ANDERSON STEVEN GRANADOS REYES** y **ALESSANDRA Jael SOTO BORBOR**.

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 interesado hacer uso del presente como estime conveniente.

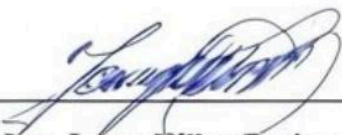
Santa Elena, 16 de Julio del 2026



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

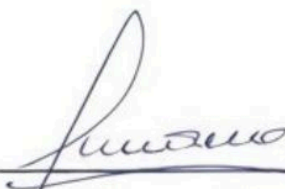
LICENCIADO EN CIENCIAS DE LA EDUCACIÓN
MAGÍSTER EN DISEÑO Y EVALUCIÓN DE MODELOS EDUCATIVOS
Nº DE REGISTRO DE SENECYT 1050-2014-86052892

TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN



Ing. Jonny Villao Borbor, MSc.

DIRECTOR DE CARRERA ENCARGADO



Ing. Luerecia Moreno Alcivar, Ph.D.

DOCENTE ESPECIALISTA



Ing. Nestor Orrala Vera, MSc.

DOCENTE TUTOR



Ing. Richard Ramirez Palma, MSc.

DOCENTE GUÍA DE LA UIC

CONTENIDO

DEDICATORIA.....	ii
AGRADECIMIENTOS	iii
CERTIFICACIÓN DEL TUTOR	v
DECLARACIÓN DE AUTORÍA.....	vi
AUTORIZACION.....	vii
CERTIFICADO DE ANTIPLAGIO	viii
CERTIFICADO DE GRAMATOLOGIA	x
TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN	xi
CONTENIDO.....	xii
LISTA DE TABLAS.....	xvi
LISTA DE FIGURAS	xviii
RESUMEN.....	xx
ABSTRACT	xxi
CAPITULO I.....	1
INTRODUCCIÓN	1
1.1. PROBLEMA DE LA INVESTIGACIÓN	1
1.2. ANTECEDENTES	3
1.3. HIPOTESIS	7
1.3.1. Hipótesis General	7
1.3.2. Hipótesis Específicas.....	7
1.4. OBJETIVOS.....	7
1.4.1. Objetivo General	7
1.4.2. Objetivos Específicos	8
1.5. ALCANCE	8
1.6. VARIABLES	10
1.6.1. Variables Independientes	10
1.6.2. Variables Dependientes	10
CAPITULO II	11
MARCO TEORICO.....	11
2.1. PAVIMENTOS	11
2.2. CLASIFICACIÓN DE UN PAVIMENTO	12

2.3.	PAVIMENTOS FLEXIBLES	12
2.3.1.	Estructura de un pavimento flexible.....	12
2.4.	MATERIALES TRADICIONALES DE PAVIMENTO.....	14
2.4.1.	Materiales tradicionales de cantera	14
2.5.	RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN (RCD).....	16
2.5.1.	Uso de los RCD en la ingeniería vial	18
2.5.2.	Mezclas de materiales granulares con RCD.....	18
2.6.	ESTABILIZACIÓN DE SUELOS Y MATERIALES	19
2.6.1.	Cemento como agente estabilizante	20
2.6.2.	Asfalto como agente estabilizante.....	22
2.7.	PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS DE LOS MATERIALES	24
2.7.1.	Propiedades físicas de los materiales	24
2.7.2.	Propiedades mecánicas de los materiales.....	24
2.8.	ENSAYOS DE LABORATORIO	25
2.8.1.	Contenido de humedad (ASTM D2216)	25
2.8.2.	Granulometría (ASTM D6913).....	26
2.8.3.	Limites de Atterberg (ASTM D4318).....	27
2.8.4.	Proctor modificado (ASTM D1557)	27
2.8.5.	CBR (ASTM D1883)	29
2.8.6.	Resistencia a la compresión simple (ASTM D1633)	29
2.8.7.	Abrasión de los ángeles (ASTM C535)	30
2.8.8.	Gravedad específica (ASTM C127 Y ASTM 128).....	31
2.8.9.	Estabilidad y flujo Marshall (ASTM D6927)	32
2.9.	NORMAS Y ESPECIFICACIONES TÉCNICAS APLICABLES.....	32
CAPITULO III		34
METODOLOGÍA		34
3.1.	ENFOQUE METODOLOGICO Y DISEÑO EXPERIMENTAL.....	34
3.2.	POBLACIÓN Y MUESTRA	34
3.3.	NIVEL DE INVESTIGACIÓN	35
3.4.	MATERIALES Y EQUIPOS.....	36
3.5.	PROCEDIMIENTO METODOLÓGICO	37
3.6.	METODOLOGÍA DEL OE1, CARACTERIZACIÓN FÍSICO-MECÁNICA DE LOS MATERIALES DE ESTUDIO	40

3.6.1.	Toma de muestras representativas de cantera y residuos de construcción.....	40
3.6.2.	Ensayos de mecánica de suelo para la caracterización de los materiales.....	42
3.6.3.	Evaluación de los parámetros establecidos por la MOP – 001-F 2002 para verificación de requisitos técnicos para subbase granular clase 3.....	45
3.6.4.	Determinación del contenido optimo de residuos de la construcción y demolición incorporados en el material granular	46
3.7.	METODOLOGÍA DEL OE2, EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO MECANICO DE MEZCLAS ESTABILIZADAS CON CEMENTO	47
3.7.1.	Distribución de partículas para bases estabilizadas con cemento según MOP- 001-F-2002	48
3.7.2.	Ensayos de caracterización de estabilizados con cemento	48
3.7.3.	Dosificación de las mezclas con cemento	50
3.7.4.	Proceso de compactación	51
3.7.5.	Proceso de capeado o refrentado	54
3.7.6.	Ensayo de compresión simple	54
3.8.	METODOLOGÍA DEL OE3, EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO MECANICO DE MEZCLAS ESTABILIZADAS CON EMULSIÓN ASFÁLTICA.....	55
3.8.1.	Diseño de mezclas estabilizadas con emulsión asfáltica.....	55
3.8.2.	Preparación de las mezclas para las briquetas.....	56
3.8.3.	Proceso de mezcla de los materiales de estudio	56
3.8.4.	Proceso de compactación	57
3.8.5.	Curado y medidas físicas.....	57
3.8.6.	Ensayos volumétricos.....	58
3.8.7.	Contenido óptimo de emulsión asfáltica	61
3.9.	METODOLOGÍA DEL O.E.4, EVALUACIÓN COMPARATIVA DEL COMPORTAMIENTO FÍSICO-MECÁNICO Y DETERMINACIÓN DE LA VIABILIDAD TÉCNICA DE LAS MEZCLAS EVALUADAS	65
CAPITULO IV		68
ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS.....		68
4.1.	ANÁLISIS DE RESULTADOS DEL O.E.1: CARACTERIZACIÓN FÍSICO- MECÁNICA DE LOS MATERIALES DE ESTUDIO	68
4.1.1.	Análisis granulométrico de la subbase granular inicial de estudio	68

4.1.2. Verificación de cumplimiento normativo para materiales de subbase clase 3 y análisis de las propiedades físico-mecánicas.....	69
4.1.4. Variación granulométrica de la mezcla subbase granular + RCD	74
4.1.5. Análisis de la alteración de las propiedades físico-mecánicas de la subbase causadas por la incorporación de RCD	76
4.2. ANALISIS DE RESULTADOS DEL O.E.2: EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO MECANICO DE MEZCLAS ESTABILIZADAS CON CEMENTO	77
4.2.1. Clasificación AASHTO de los materiales de estudio	79
4.2.2. Verificación del porcentaje de compactación alcanzado	81
4.3. ANALISIS DE RESULTADOS DEL O.E.3: EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO MECANICO DE MEZCLAS ESTABILIZADAS CON EMULSIÓN ASFÁLTICA.....	83
4.3.1. Diseño de mezclas asfálticas en frio mediante el Marshall modificado.....	83
4.4. ANALISIS DE RESULTADOS DEL O.E.4: EVALUACIÓN COMPARATIVA DEL COMPORTAMIENTO FÍSICO-MECÁNICO Y DETERMINACIÓN DE LA VIABILIDAD TÉCNICA DE LAS MEZCLAS EVALUADAS.....	89
CAPITULO V	102
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	102
5.1. CONCLUSIONES	102
5.2. RECOMENDACIONES	104
BIBLIOGRAFÍA.....	106
ANEXOS.....	113

LISTA DE TABLAS

Tabla 1 Deflexiones máximas y módulos elásticos de secciones	4
Tabla 2 Deflexiones registradas sobre el agregado natural.....	5
Tabla 3 Resultados FWD celda RCD modelo de pruebas	5
Tabla 4 Usos granulométricos para materiales de bases granulares	15
Tabla 5 Usos granulométricos para material de subbase granular	16
Tabla 6 Requerimiento de cemento para distintos tipos de suelo	21
Tabla 7 Especificaciones para la prueba Proctor Modificado.....	28
Tabla 8 Coordenadas UTM de la cantera Juan Montalvo.....	41
Tabla 9 Requisitos para subbase granular según MOP - 001 - F 2002	46
Tabla 10 Franja Granulométrica según ASTM D3515 tamaño nominal 3/4"	47
Tabla 11 Franja Granulométrica según MOP para bases estabilizadas con cemento.....	48
Tabla 12 Requisitos técnico para base estabilizada con cemento según MOP - 001 - F 2002	49
Tabla 13 Parámetros establecidos por la MOP – 001 F 2002 para bases estabilizadas con emulsión asfáltica	62
Tabla 14 Criterios Marshall.....	62
Tabla 15 Franja granulométrica de Subbase Granular clase 3 según MOP-001-F-2002	68
Tabla 16 Distribución del tamaño de partículas de la Subbase granular de la cantera Juan Montalvo	69
Tabla 17 Verificación de especificaciones técnicas para Subbase Granular clase 3 según MOP-001-F-2002	70
Tabla 18 Resultados de la granulometría 80% Subbase granular + 20% RCD.....	71
Tabla 19 Resultados de la granulometría 70% Subbase granular + 30% RCD.....	72
Tabla 20 Resultados de la granulometría 60% Subbase granular + 40% RCD.....	73
Tabla 21 Resultados de la distribución de partículas de la Subbase Granular de la cantera Juan Montalvo	74
Tabla 22 Resultado de la distribución de partículas de la mezcla de 65% Subbase Granular + 35% RCD según ASTM D3515 para tamaño máximo del agregado 3/4”	75
Tabla 23 Modificaciones causadas por la incorporación de RCD en la subbase granular..	76
Tabla 24 Resultados de acuerdo con la Granulometría exigida para base estabilizada con cemento de la mezcla 65%subbase + 35%RCD.....	78

Tabla 25 Resultados conforme a las especificaciones técnicas establecidas para base estabilizada con cemento según MOP-001-F-2002.....	78
Tabla 26 Resultados para clasificación AASHTO M145	79
Tabla 27 Resultados de resistencia a la compresión simple y verificación del cumplimiento de la resistencia requerida para base estabilizada con cemento según MOP-001	80
Tabla 28 Características físicas de las probetas con su contenido optimo de cemento hidráulico MH en la subbase granular antes del ensayo de compresión simple	81
Tabla 29 Características físicas de las probetas con cemento hidráulico MH en la mezcla conformada por 65% Subbase Granular + 35% RCD antes del ensayo de compresión simple.....	82
Tabla 30 Resultados de las briquetas de acuerdo con las dosificaciones empleadas para subbase + emulsión asfáltica	85
Tabla 31 Resultados de las briquetas de acuerdo con las dosificaciones empleadas para subbase + RCD + emulsión asfáltica.....	88
Tabla 32 Resultados del ensayo Limite de Atterberg para los materiales de estudio.....	90
Tabla 33 Resultados del Proctor modificado, CBR y abrasión para los materiales de estudio	91
Tabla 34 Resultados de Resistencia a la compresión simple de los materiales.....	94
Tabla 35 % de emulsión optima obtenida mediante el ensayo de estabilidad y flujo Marshall	96
Tabla 36 Densidades de la dosificación en los materiales de estudio	97
Tabla 37 Resultados de estabilidad de los materiales de estudio	98
Tabla 38 Resultados del flujo Marshall en los materiales estudiados	99
Tabla 39 Resultados obtenidos de las mezclas de estudio con él % de emulsión optimo.	100

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Corte típico de un pavimento flexible convencional	14
Figura 2 Corte de un pavimento estabilizado con cemento	22
Figura 3 Corte típico de un pavimento estabilizado con emulsión	23
Figura 4 Equipo para el ensayo de Compresión Simple	30
Figura 5 Recolección de las muestras granulares.....	41
Figura 6 Vista satelital de la cantera de estudio	41
Figura 7 Material de RCD proveniente de locales comerciales demolidos	42
Figura 8 Proceso de trituración	42
Figura 9 Tamizado de las muestras	43
Figura 10 Ensayo de Limite de Atterberg	43
Figura 11 Ensayo de Proctor modificado.....	44
Figura 12 Ensayo CBR.....	44
Figura 13 Ensayo de Abrasión de los Ángeles.....	45
Figura 14 Cemento hidráulico MH	50
Figura 15 Dosificación del material con cemento.....	51
Figura 16 Proceso de compactación.....	52
Figura 17 Curado de cilindros.....	52
Figura 18 Proceso de capeado o refrentado	54
Figura 19 Ensayo de compresión simple.....	55
Figura 20 Mezcla de emulsión asfáltica con el material de estudio.....	56
Figura 21 Compactación de las briquetas	57
Figura 22 Curado a 60°C en horno durante 48 horas.....	57
Figura 23 Proceso de ensayo Rice.....	59
Figura 24 Proceso del baño maría a 25 °C.....	60
Figura 25 Ensayo de estabilidad y flujo Marshall.....	60
Figura 26 Briqueta luego de ser sometido al ensayo de TSR.....	65
Figura 27 Curva granulométrica de la combinación 80% subbase granular + 20% RCD...71	
Figura 28 Curva granulométrica de la combinación 70% subbase granular + 30% RCD..72	
Figura 29 Curva granulométrica de la combinación 60% subbase granular + 40% RCD..73	
Figura 30 Curva granulométrica de la Subbase Granular	74

Figura 31 Curva granulométrica de la mezcla conformada por 65% Subbase Granular + 35%RCD	75
Figura 32 Clasificación AASHTO M145	79
Figura 33 Estabilidad vs % emulsión asfáltica de la mezcla de subbase + emulsión asfáltica	84
Figura 34 % Vacíos de aire vs % emulsión asfáltica de la mezcla de subbase + emulsión asfáltica.....	84
Figura 35 Flujo vs % emulsión asfáltica de la mezcla de subbase + emulsión asfáltica	84
Figura 36 Estabilidad vs % emulsión asfáltica de la mezcla de subbase + RCD + emulsión asfáltica.....	86
Figura 37 % de Vacíos vs % emulsión asfáltica de la mezcla de subbase + RCD + emulsión asfáltica.....	87
Figura 38 Flujo vs % emulsión asfáltica de la mezcla de subbase + RCD + emulsión asfáltica	87

“EVALUACIÓN COMPARATIVA DEL DISEÑO DE RCD ESTABILIZADOS CON CEMENTO Y ASFALTO PARA CAPAS ESTRUCTURALES DE PAVIMENTOS FLEXIBLES”

Autor: Granados Reyes Anderson Steven
Soto Borbor Alessandra Jael

Tutor: Ing. Nestor Orrala Vera, MSc.

RESUMEN

Toda construcción genera residuos, que en muchos casos no son aprovechados. Por otro lado, la construcción de pavimentos flexibles sigue dependiendo de materiales de canteras. Por este motivo, resulta necesario evaluar alternativas que permitan determinar el desempeño de otros materiales dentro de capas estructurales de pavimentos flexibles. El presente trabajo de titulación tiene como propósito analizar el comportamiento de una subbase granular y de mezclas de subbase granular con residuos de construcción y demolición, así como dichas mezclas estabilizadas con cemento y emulsión asfáltica, para evaluar su posible uso como capa de base estabilizada en pavimentos flexibles. Para ello se realizarán ensayos de laboratorio para conocer sus propiedades físicas y mecánicas, tales como granulometría, límite de Atterberg, Proctor modificado, CBR, abrasión de los ángeles, resistencia a la compresión simple, gravedad específica, estabilidad y flujo Marshall. Asimismo, se realizará una evaluación comparativa entre el comportamiento de la subbase granular con incorporación de residuos de construcción y demolición frente a una subbase granular convencional de cantera, además determinar si estas mezclas estabilizadas con cemento y emulsión asfáltica cumplen con las especificaciones y normativas para base estabilizada. De este modo, se busca establecer si el uso de residuos de construcción y demolición puede considerarse una opción viable para la construcción de pavimentos flexibles en la provincia de Santa Elena. Para concluir, este trabajo pretende aportar información técnica y experimental sobre el desempeño de los residuos de construcción y demolición aplicados en pavimentos flexibles, contribuyendo al estudio de materiales alternativos en la ingeniería vial.

Palabras claves: Residuos de construcción y demolición, subbase granular, base estabilizada, estabilización con cemento, estabilización con asfalto.

“EVALUACIÓN COMPARATIVA DEL DISEÑO DE RCD ESTABILIZADOS CON CEMENTO Y ASFALTO PARA CAPAS ESTRUCTURALES DE PAVIMENTOS FLEXIBLES”

Autor: Granados Reyes Anderson Steven

Soto Borbor Alessandra Jael

Tutor: Ing. Nestor Orrala Vera, MSc.

ABSTRACT

All construction activity generates waste, which often goes unused. Meanwhile, the construction of flexible pavements continues to rely on quarry-sourced materials. Consequently, it is necessary to evaluate alternatives to determine the performance of other materials within the structural layers of flexible pavements. This study aims to analyze the behavior of granular subbase material and mixtures of granular subbase with construction and demolition waste—including such mixtures stabilized with cement and asphalt emulsion—to evaluate their potential use as stabilized base layers in flexible pavements. To this end, laboratory tests will be conducted to determine physical and mechanical properties, such as particle size distribution, Atterberg limits, Modified Proctor, CBR, Los Angeles abrasion, unconfined compressive strength, specific gravity, and Marshall stability and flow. Furthermore, a comparative evaluation will be performed between the behavior of granular subbase incorporating construction and demolition waste and that of conventional quarry-sourced granular subbase; the study will also determine whether these mixtures, stabilized with cement and asphalt emulsion, meet the specifications and standards for stabilized base layers. Thus, the research seeks to establish whether the use of construction and demolition waste is a viable option for flexible pavement construction in the province of Santa Elena. Ultimately, this work aims to provide technical and experimental data on the performance of construction and demolition waste in flexible pavements, contributing to the study of alternative materials in road engineering.

Keywords: Construction and demolition waste, granular sub-base, stabilized base, cement stabilization, asphalt stabilization.

CAPITULO I

INTRODUCCIÓN

1.1. PROBLEMA DE LA INVESTIGACIÓN

La calidad del pavimento flexible depende de los materiales con los cuales está construida cada una de sus capas estructurales, García et al., (2025), menciona que la causa de que los pavimentos asfálticos tengan poca vida útil, se debe a que en muchos casos presentan dosificaciones incorrectas de ligantes, agregados y proceso adecuado de aplicación, afectando a la resistencia a la fatiga y condicionando el pavimento a deterioro continuo, es por ello que resulta importante primero estudiar las características de los materiales que se vayan a utilizar en la construcción de pavimentos.

En este sentido, es importante la evaluación de los residuos de la construcción y demolición, para evidenciar que tan eficiente va a resultar la utilización de ciertos materiales, debido a que no todos los materiales presentan propiedades adecuadas para la construcción de pavimentos. De acuerdo con información obtenida por la Empresa Pública Metropolitana de Gestión Integral de Residuos Sólidos de Quito, en el año 2024 señala que:

Los Residuos de Construcción y Demolición son desechados de forma inadecuada en el país, los cuales son comúnmente depositados en escombreras o botaderos informales, lo que genera contaminación en quebradas, suelos y otros ecosistemas, mediante estudios se ha evidenciado que en la capital diariamente se producen 6.000 m³ de residuos, de los cuales el 36% pueden ser reutilizados (EMGIRS EP, 2024). Este volumen evidencia la disponibilidad constante de residuos de la construcción y demolición en el Ecuador, lo genera la necesidad de evaluar las propiedades físicas y mecánicas del material y analizar su posible incorporación dentro los materiales granulares destinados a desempeñarse como capas estructurales de los pavimentos flexibles.

Además, esta empresa establece que:

Se ha podido observar que de los residuos desechados, la gran parte está compuesto de tierra con un 44%, hormigón y bloque con 28%, residuos de poda de parques y jardines (11 %), madera (5 %), asfaltos (3 %), cerámicos (1 %) y otros (7 %) (EMGIRS EP, 2024). Estas características donde la mayoría de los residuos contiene elementos como el hormigón y bloques, podrían presentar propiedades físicas y mecánicas similares a los agregados tradicionales de cantera. Sin embargo, no todos los residuos presentan las mismas propiedades, por tal motivo es necesario evaluar la respuesta estructural en las capas del pavimento.

Según Loyo Pozo, (2024), la incorporación de los RCD en proyectos viales podría ser factible debido a la alta generación de residuos con un volumen de 3.203.658,31 m³; no obstante su incorporación en materiales convencionales utilizados para la construcción de pavimentos podría alterar las propiedades físicas y mecánicas (Espejo Vizcarra & Paredes Rosas, 2024). Sin embargo, no todos los residuos podrían ser reutilizados y deben ser clasificados para posteriormente determinar si presentan propiedades adecuadas bajo condiciones controladas de laboratorio en función a la normativa (Bazurto Olarte & Mendoza Gualteros, 2023).

Para reutilizar los materiales que sean extraídos de los Residuos de Construcción y Demolición que cumplan con los parámetro de propiedades físicas y mecánicas y se debe realizar un análisis bajo las normas ASTM; Asphalt Institute MS-14; MOP-001-F, 2002, las cuales definen criterios técnicos para materiales granulares y procesos de estabilización. Sin embargo, el origen de los RCD, su composición y variabilidad genera incertidumbre en función a su comportamiento ya que así se podrá verificar que dichos materiales cuenten con las propiedades tanto físicas como mecánicas para ser utilizados en la construcción de pavimentos.

Pese a los estudios que se han realizado en el Ecuador y específicamente en la provincia de Santa Elena, no se ha logrado conseguir información verídica y experimental que sostenga y permita determinar el comportamiento físico-mecánico de mezclas de material de cantera con los residuos de la construcción y demolición (RCD), así como dichas mezclas

estabilizadas con cemento y asfalto (RC-250 o emulsión asfáltica) bajo criterios establecidos en la (MOP-001-F, 2002), lo cual evidencia un vacío técnico, que limita su posible uso en las capas estructurales de pavimentos flexibles.

Como consecuencia, la falta de estudios experimentales en el contexto local limita que se evidencie el comportamiento de las mezclas con incorporación de RCD comparadas con materiales granulares tradicionales, restringiendo el aprovechamiento de los residuos de la construcción y demolición como sustitución parcial de materiales provenientes de cantera.

A partir del problema identificado, se plantea la siguiente pregunta de investigación:

¿Cómo influye la incorporación de residuos de construcción y demolición estabilizados con cemento hidráulico MH y emulsión asfáltica sobre las propiedades físico-mecánicas de una subbase granular para su utilización como base estabilizada en pavimentos flexibles?

1.2. ANTECEDENTES

Los antecedentes de estabilización se realizan en función de las variables de estudio, las cuales pueden ser trabajo de pregrado, así como también trabajos de investigación (Campos Vázquez, 2024).

Para que una investigación sea verídica, esta debe estar sustentada en trabajos de investigación, artículos científicos y tesis, que hayan sido realizadas y aprobados.

A nivel internacional, en el artículo titulado “Aplicaciones actuales de los áridos reciclados procedentes de la construcción y la demolición” se basa en la reutilización de los materiales que se obtienen a partir de los residuos de construcción y demolición, es así que los materiales reutilizados en comparación a los agregados naturales varían a mayor porosidad, mayor absorción de agua, con un 12% y su densidad en comparación a los agregados naturales que reduce entre un 7% a 9%, con resultados reflejados de 2.2 g/cm³ y 2.6 g/cm³.(Reis et al., 2021). No obstante, en el artículo se evalúa mayormente de como estos

materiales granulares actúan al ponerlos en contacto con los RCD y no evalúa procesos de estabilización con cemento o asfalto, ni su comportamiento en pavimentos flexibles.

De la misma manera, se considera la tesis de Guaje Guerra, (2020) realizada a nivel internacional sobre el “Estudio del agregado reciclado de residuos de construcción y demolición en celdas de confinamiento con llantas desechadas para la construcción de obras viales en Colombia”, la cual se basó en determinar las características físicas y mecánicas que poseen los materiales que se encuentran en los residuos de construcción y demolición aplicados en los pavimentos como capa estructural, mediante ensayos de deflexión, índice de penetración dinámica y módulo elástico.

Los resultados reportados por el autor indican que los agregados reciclados tienen un mejor comportamiento mecánico frente a los agregados naturales, reflejando una menor deflexión (1.75 mm contra 2.64 mm), lo cual indica mayor rigidez y capacidad de soporte.(Guaje Guerra, 2020).

De la misma manera, reportaron un índice de penetración dinámica menor y mayor modulo elástico llegando hasta los (201 MPa contra 57 MPa), por la misma razón tienden a soportar mayores cargas lo cual podría generar una estructura de pavimento más resistentes. Por otro lado, al aplicarse el confinamiento lateral, mejoró en gran medida el desempeño del material teniendo un módulo elástico de hasta 764 MPa, demostrando que el sistema distribuye mejor las cargas y tiene más resistencia estructural.

Tabla 1

Deflexiones máximas y módulos elásticos de secciones

SECCIÓN	Deflexión máxima (mm)	Módulo elástico MPa (SIMCApave)	Módulo elástico MPa (PLAXIS 3D)
Celda RCD	1,75	201	186
Agregado natural	2,64	57	55
Frontera de celda RCD	1,16	764	-

Tabla 2

Deflexiones registradas sobre el agregado natural

Carga (KN)	Presión (KPa)	Deflexión (mm)
31,0	437,99	2,632
31,5	445,54	2,642
31,4	444,28	2,635
<u>31,3</u>	<u>442,60</u>	<u>2,64</u>

Tabla 3

Resultados FWD celda RCD modelo de pruebas

Carga (KN)	Presión (KPa)	Deflexión (mm)
32,0	453,11	1,753
31,3	443,16	1,866
31,5	445,92	1,644
<u>31,6</u>	<u>447,40</u>	<u>1,75</u>

Fuente: (Guaje Guerra, 2020)

Como se puede observar en las tablas 1, 2 y 3 los materiales presentes en los residuos de construcción y demolición poseen menor deflexión y tienden a soportar mayores cargas, lo cual garantiza que las estructuras no se deformen fácilmente durante su vida útil. Reflejada en menores deflexiones y en un mayor módulo elástico, permitiendo de esta manera que el material se deforme menos ante las cargas y presente un comportamiento más estable como parte de la estructura del pavimento.

A nivel nacional, el estudio desarrollado por Averos et al., (2022) acerca del “Reciclaje y reaprovechamiento de los residuos de concreto en pavimentos” se encuentra basado en la utilización de la parte más fina de los escombros de hormigón menores a 2mm y se considera que este tipo de material puede actuar como refuerzo real de la subrasante, y destacan que:

En los análisis de TG y DTG, del cemento y RC-fino, se observa diferentes porcentajes de masa residual de 95,68 % (cemento) y 84,71 % (RCD-C fino), a 1000°C. Ambos materiales muestran coincidencia en relación con la mayor pérdida de masa en el rango de 450 a 750°C. Otras coincidencias son los puntos (1) y (2), que de acuerdo con Rigo [29] corresponde a los hidróxidos de calcio y carbonatos de calcio, respectivamente. Los resultados de TG y DTG muestran algunas similitudes entre el cemento y el RCD-C fino.(Averos et al., 2022). Estos resultados evidencian un comportamiento térmico similar entre materiales, debido a que ambos materiales tienen pérdida de masa residual a temperatura semejante, lo que respalda su posible uso como material estabilizado con cemento hidráulico MH.

A partir de estos resultados los autores manifiestan que los residuos de hormigón triturado en su fracción fina (RCD-C fino) aún conservan capacidad cementante, lo que avala su

incorporación a las mezclas destinadas a las capas estructurales de los pavimentos. Pese a ello este estudio se limita solo al análisis del material en la fracción fina sin mezclarlo con ningún material granular, ni conlleva procesos de estabilización con cemento hidráulico MH o emulsión asfáltica CSS-1h para pavimentos.

Este estudio es relevante para la presente investigación, ya que demuestra el potencial que tiene los RCD en proyectos viales. Sin embargo, no evalúa su comportamiento físico y mecánico de material granular de cantera mezclado con residuos de la construcción y demolición, ni su efecto de estabilización con cemento hidráulico MH y emulsión asfáltica CSS-1h. Lo cual justifica la necesidad de evaluar el desempeño de los RCD dentro de una subbase granular de cantera y dicha mezcla estabilizada con cemento hidráulico MH y emulsión asfáltica CSS-1h con el fin de determinar la viabilidad técnica de estas mezclas de estudio como posible material de base estabilizada para pavimentos flexibles en la provincia de Santa Elena.

En conjunto, los antecedentes evidencian que los residuos de la construcción y demolición presentan propiedades físicas y mecánicas que respaldan su posible aplicación en proyectos viales. Los estudios referenciados demuestran que los RCD podrían presentar un desempeño estructural comparable e incluso superior a los materiales granulares de cantera. Sin embargo, estos estudios se limitan y no presentan evaluaciones de mezclas de subbase granular con RCD, así como estabilizados con cemento y emulsión asfáltica en condiciones de servicio. En consecuencia los antecedentes justifican la necesidad de llevar a cabo la presente investigación, enfocada en determinar la viabilidad de la incorporación de RCD en subbase granular y verificar si dicha mezcla estabilizada con cemento y emulsión asfáltica cumple con los parámetros establecidos en la MOP-001-F, (2002), para desempeñarse como base estabilizada en pavimentos flexibles en la provincia de Santa Elena.

1.3. HIPOTESIS

1.3.1. Hipótesis General

Las mezclas de material de cantera con residuos de la construcción y demolición (RCD), estabilizadas con cemento hidráulico MH y emulsión asfáltica CSS-1h, mejoran las propiedades físico-mecánicas respecto a los materiales convencionales de cantera.

1.3.2. Hipótesis Específicas

H.E.1: El uso de residuos de construcción y demolición (RCD) en mezclas con material de subbase granular puede alterar las propiedades físicas y mecánicas del material granular.

H.E.2: La estabilización con cemento hidráulico MH de las mezclas subbase granular de la cantera Juan Montalvo + RCD puede incrementar la resistencia mecánica del material, observada mediante ensayos de Proctor y resistencia a la compresión simple, lo que favorece a su aplicación como material de base estabilizada con cemento hidráulico MH en pavimentos flexibles.

H.E.3: La estabilización de las mezclas subbase granular de la cantera Juan Montalvo + RCD + emulsión asfáltica puede aumentar la cohesión y estabilidad del material, mejorando su comportamiento en ensayos Marshall y favoreciendo su aplicación como material estabilizado con emulsión asfáltica CSS1-h en pavimentos flexibles.

1.4. OBJETIVOS

1.4.1. Objetivo General

Evaluar el comportamiento físico-mecánico de mezclas de material de subbase granular de cantera con residuos de la construcción y demolición (RCD), estabilizado con cemento y emulsión asfáltica, para establecer si reúnen las condiciones idóneas para su

posible uso como material de base estabilizada en pavimentos flexibles en la provincia de Santa Elena.

1.4.2. Objetivos Específicos

O.E.1: Caracterizar las propiedades físicas y mecánicas del material de subbase granular de la cantera Juan Montalvo y de mezclas de subbase granular + RCD, mediante ensayos en laboratorio que permitan determinar las variaciones y comportamiento de la adición de RCD en los pavimentos flexibles.

O.E.2: Determinar el comportamiento mecánico del estabilizado con cemento de las mezclas “subbase granular + cemento hidráulico MH” y “subbase granular + RCD + cemento hidráulico MH”, mediante ensayos de Proctor modificado y resistencia a la compresión simple para la evaluación del comportamiento estructural como base estabilizada con cemento.

O.E.3: Analizar las propiedades mecánicas de las mezclas de “subbase granular + asfalto” y “subbase granular + RCD + emulsión asfáltica”, mediante ensayos de Estabilidad y flujo Marshall, para la evaluación comparativa del rendimiento estructural como base estabilizada con emulsión asfáltica.

O.E.4: Comparar el comportamiento físico-mecánico de la subbase granular y mezclas con RCD, estabilizadas con cemento y emulsión asfáltica, mediante el análisis de sus resultados bajo normativas como la ASTM, Asphalt Institute MS-14 y MOP-001-F, 2002, para conocer la variación de las propiedades físico-mecánicas y el comportamiento del material sometido a procesos de estabilización, para la posible aplicación como base estabilizada en un pavimento flexible.

1.5. ALCANCE

La presente investigación es de tipo comparativa y experimental debido a que se basa en evaluar el comportamiento tanto físico como mecánico de los residuos de construcción y

demolición mezclado con subbase granular de cantera y dicha mezcla estabilizada con cemento hidráulico MH y emulsión asfáltica.

El estudio de esta investigación se llevará a cabo en el laboratorio de la facultad de ciencias de la ingeniería de la Universidad Estatal Península de Santa Elena, la misma que tendrá como objetivo principal evaluar si los residuos de las construcciones y demoliciones aportan algún tipo de mejora en la construcción de pavimentos flexibles en base al material de subbase granular y alcanzar condiciones aptas para un posible uso como base estabilizada en los pavimentos, utilizando material granular de la cantera Juan Montalvo y residuos de construcción y demolición, obtenidos de locales comerciales demolidos de la provincia de Santa Elena. Los resultados, estarán orientados a materiales empleados en pavimentos flexibles, dentro de la provincia y no representa necesariamente el comportamiento de materiales provenientes de otras regiones del país.

La investigación se limita a la evaluación físico-mecánico de mezclas de subbase granular con incorporación de RCD estabilizadas con cemento hidráulico MH y emulsión asfáltica mediante ensayos normalizados ASTM y criterios establecidos en la MOP-001-F 2002. No se incluyen análisis químicos, mineralógicos, microestructurales.

Los resultados permitirán evaluar la viabilidad técnica del uso de RCD como material para capas de bases estabilizadas en pavimentos flexibles, sin embargo, no constituyen un procedimiento de diseño estructural.

Finalmente, se establece que la investigación sólo se realizará en el laboratorio, por lo que se limita al análisis de variables físicas y mecánicas del material sin incluir evaluaciones económicas, ambientales o de sostenibilidad asociados al aprovechamiento de residuos de construcción y demolición. Al ser un estudio exclusivamente desarrollado en el laboratorio los resultados representan el comportamiento del material bajo condiciones controladas. En consecuencia, no se consideran factores propios de servicios tales como: variaciones mecánicas, tránsito vehicular real, proceso de envejecimiento, humedad estacional o fatiga por carga repetida.

1.6. VARIABLES

1.6.1. Variables Independientes

Tipo de mezcla y método de estabilización del material de subbase granular de cantera: i) Material de subbase granular de cantera; ii) Mezcla de subbase granular de cantera + RCD triturado y tamizado; iii) Mezcla de subbase granular de cantera + cemento hidráulico MH; iv) Mezcla de subbase granular de cantera + RCD + cemento hidráulico MH; v) Mezcla de subbase granular de cantera + emulsión asfáltica; vi) Mezcla de subbase granular de cantera + RCD + emulsión asfáltica.

1.6.2. Variables Dependientes

Las variables dependientes representan los resultados observables que se ven influenciados por la caracterización del material y las condiciones de estabilizaciones aplicadas:

Material granular sin estabilizar: i) Humedad presente en el material; ii) distribución de partículas; iii) Limite líquido y plasticidad del material; iv) humedad optima y densidad seca maxima; v) Capacidad de soporte; vi) desgaste del material.

Material estabilizado con cemento: i) humedad optima y densidad seca maxima; ii) Resistencia a la compresión

Material estabilizado con emulsión asfáltica: i) densidad relativa del material con respecto al agua; ii) Estabilidad y flujo.

CAPITULO II

MARCO TEORICO

2.1. PAVIMENTOS

Los pavimentos están conformados por capas superpuestas las cuales están diseñadas para soportar y distribuir cargas, por ende, deben tener estructurarse donde las deformaciones se mantengan en los límites admisibles. (Terrones Hernández, 2021).

De acuerdo con la AASHTO, (1993), para el diseño estructural de pavimentos flexibles se tienen que considerar los espesores de sus capas estructurales, los coeficientes estructurales de los materiales utilizados en sus capas, el coeficiente de drenaje de la capa de base y subbase granular y el módulo resiliente que tiene la subrasante del proyecto vial, donde por medio de estos parámetros se permite determinar la capacidad de soporte y distribución de las cargas causadas por el tránsito vehicular. Entonces de esto depende las capas que puede conformar una estructura de pavimento flexible que generalmente está conformada por su capa de rodadura o carpeta asfáltica, base granular, subbase granular y su subrasante.

Por otro lado, la AASHTO, (1993), establece que para el diseño de pavimentos rígidos se fundamenta en la determinación del espesor de la losa de hormigón, la cual distribuye los esfuerzos hacia las capas inferiores del pavimento, además se considera el módulo de elasticidad del hormigón, el coeficiente de transmisión de carga y coeficiente de drenaje, parámetros que determinan la capacidad de soporte y distribución de cargas hacia la subrasante causadas por el tránsito vehicular. De acuerdo con su estructura Laura Guzmán, (2019), menciona que el pavimento rígido puede estar conformada por su losa de hormigón, apoyada en capa de base granular; sin embargo, de acuerdo con a las condiciones del proyecto vial y sus criterios de diseño, también puede requerir de capa de subbase granular, la misma que puede cumplir la función de apoyo en lugar de una capa de base granular.

Asimismo, cuando la subrasante presenta una baja capacidad portante del suelo es necesario mejorarla o estabilizarla, garantizando un adecuado desempeño estructural del pavimento. Partiendo de estas consideraciones, el suelo juega un papel fundamental en la construcción

de pavimentos, ya que existen suelos que no están aptos para la construcción, los mismos que hay que mejorarlos y también realizar un estudio para decidir cuál de los tipos de pavimento resulta más conveniente.

2.2. CLASIFICACIÓN DE UN PAVIMENTO

De acuerdo con Blackman, (2022), menciona que un pavimento depende varios factores que permiten comprender primeramente su uso en el proyecto vial, su composición y su desempeño estructural en condiciones de servicio. Entre estos factores esta el lugar donde prestan los servicios, la calidad de su diseño, el número de elementos, materiales utilizados y la forma en la que se transmiten las cargas a la subrasante. Por lo cual estos factores permiten diferenciar los pavimentos según su composición y función en condiciones de servicio.

En base a los tipos de pavimentos existentes, se considera pertinente analizar los pavimentos flexibles debido a su amplio uso en obras viales y por la capacidad que tienen sus capas estructurales para contribuir a la disipación y distribuir los esfuerzos a las capas inferiores.

2.3. PAVIMENTOS FLEXIBLES

Según Terrones Hernández, (2021), alude que el pavimento flexible está conformada por una superficie asfáltica, el cual puede incluir concreto asfáltico en caliente o en frío, además de micro pavimentos o mortero asfáltico y se estructura por su capa de rodadura, apoyada sobre las capas de base granular y subbase granular.

2.3.1. Estructura de un pavimento flexible

Capa de rodadura o Carpeta asfáltica: Como lo expresa Quintana & Lizcano, (2023) “La capa de rodadura o carpeta asfáltica debe soportar de manera directa el peso del tránsito vehicular y transmitir las cargas a las capas inferiores de manera progresiva, la cual está compuesta básicamente por mezclas asfálticas compuestas por agregado pétreo, ligado con material asfáltico.”

Base Granular: Asimismo, Quintana & Lizcano, (2023) complementa que “La base granular es una de las capas estructurales del pavimento flexible, conformada con materiales granulados que aporten calidad al pavimento, teniendo como finalidad distribuir las cargas de manera progresiva a las capas inferiores; además cuando las condiciones del proyecto vial y la capacidad de soporte en la subrasante sea adecuada, el material de base granular podría apoyarse directamente sobre la subrasante.”

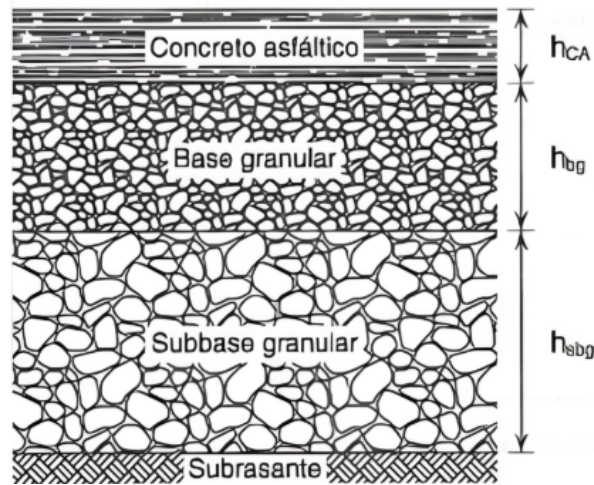
Subbase Granular: Castellanos Devia et al., (2020) menciona que “La capa de subbase granular está formada por materiales granulares tales como la arena y triturados, la cual podría aplicarse apoyada sobre la subrasante y debajo de la base granular, también contribuye a la distribución de las cargas hacia la subrasante, sirviendo de apoyo para la capa de base granular.”

Subrasante: Terrones Hernández, (2021) expresa que “La capa subrasante es la capa del terreno natural, la cual debe soportar la estructura del pavimento; además, los espesores de la estructura del pavimento están influenciadas a raíz de las características de la subrasante.”. Por ende, en ciertos casos la subrasante tiende a ser mejorada para reforzar su calidad.

En la norma AASHTO 93 se menciona que “El método "CBR" para diseño de pavimentos fue uno de los primeros en usarse. Se basa en que a menor valor de CBR de subrasante, se requieren mayores espesores de pavimento para protegerlo de las solicitaciones de tránsito” (AASHTO, 1993).

Figura 1

Corte típico de un pavimento flexible convencional



Fuente: (Mendoza Torres, 2019)

En la figura 1 se evidencia que el pavimento flexible y cuando las condiciones del proyecto vial lo requieran, podría estar compuesto su capa de rodadura o carpeta asfáltica, base y subbase granular y su subrasante, donde la capa de rodadura tiende a recibir las cargas del tránsito de manera directa, mientras que la base y subbase granular contribuyen a la distribución de las cargas de manera progresiva hacia la subrasante.

2.4. MATERIALES TRADICIONALES DE PAVIMENTO

2.4.1. Materiales tradicionales de cantera

Con respecto a los materiales convencionales de cantera utilizados en la construcción de pavimentos flexibles, su dependencia recae en las capas de base y subbase granular debido a las propiedades físicas y mecánicas que estas poseen. La base granular está conformada por la combinación de grava, piedra y arena, la cual debe cumplir con una capacidad de soporte mayor o igual al 80%, un índice de plasticidad que no debe superar el 6%, límite líquido que tampoco debe superar el 25% y un coeficiente de desgaste menor a 40%, tal y como lo establece la (MOP-001-F, 2002).

Las bases granulares se clasifican esto dependiendo de su granulometría y cantidad de agregado triturado, dentro de la clasificación tenemos tipos de bases, la primera es la de clase 1 la cual esta está compuesta por agregados finos y gruesos con un 100% de agregados gruesos, la segunda es la de clase 2 quien esta está compuesta por fracciones de roca o grava, donde al menos el 50% de agregado grueso debe ser material triturado, la tercera es la de clase 3 la cual esta está compuesta igualmente por fracciones de roca o grava, pero con al menos el 25% de agregado grueso triturado y por ultimo tenemos la de clase 4 conformada por agregados triturados, la misma que no cuenta con un % mínimo de agregado triturado (Meza & Piusseaut, 2019).

Tabla 4

Usos granulométricos para materiales de bases granulares

TAMICES		% en peso que pasa a través de los tamices de malla cuadrada				
		CLASE 1		CLASE 2	CASE 3	CLASE 4
Pulgadas	mm	Tipo A	Tipo B			
2	50.8	100	---			100
1 $\frac{1}{2}$	38,1	70-100	100			
1	25,4	55-85	70-100	100		60-90
3/4	19	50-80	60-90	70-100	100	
3/8	9,5	35-60	45-75	50-80	-	
N°4	4.76	25-50	30-60	35-65	45-80	20-50
Nº10	2	20-40	20-50	25-50	30-60	
Nº40	0.425	10-25	10-25	15-30	20-35	
N°200	0.075	2-12	2-12	3-15	3-15	0-15

Fuente: (Meza & Piusseaut, 2019)

En la norma técnica del Ministerio de Obras Públicas, MOP-001-F-2002 señala que para la subbase, los agregados deben contar con un índice de plasticidad por debajo de 6%, un límite líquido de 25% como máximo, un coeficiente de desgaste que no supere el 50% y una capacidad de soporte igual o mayor a 30% (MOP-001-F, 2002).

Sin embargo, la investigación no analiza la base granular de cantera y se enfoca exclusivamente en evaluar un material de subbase granular con incorporación de RCD y dicha mezcla estabilizarla con cemento hidráulico MH y emulsión asfáltica.

El Ministerio de Obras Publicas MOP-001-F-2002 manifiesta que se clasifica según el material y su proceso de obtención la subbase se divide en 3 clases. Donde los materiales de la subbase de clase 1 se han extraído de la trituración de roca y grava de la cual el 30% de agregados se obtendrán a partir de la trituración, los materiales de la clase 2 están formados por piedras trituradas o cribado en yacimientos de piedras fragmentadas naturalmente o de gravas, y graduados dentro de los límites de clase de granulométricos de clase 2 y por último los elementos de la clase 3 son los agregados gruesos provenientes de la grava o roca cribada o roca mezclada con arena natural o material triturado y así alcanzar la granulometría especificada en la tabla 5 (MOP-001-F, 2002).

Tabla 5

Usos granulométricos para material de subbase granular

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	--
1½''(38,1 mm)	100	70-100	--
N°4(4.75 mm)	30-70	30-70	30-70
N°40(0.425 mm)	10-35	15-40	--
N°200(0.075 mm)	0-15	0-20	0-20

Fuente: (MOP-001-F, 2002), Tabla 403-1.1

2.5. RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN (RCD)

Según Villalobos & Valverde, (2025), los RCD son residuos de hormigón, bloques y ladrillos, generados durante excavaciones, reparaciones o demoliciones, los cuales pueden estar constituidos de residuos de hormigón, asfalto, bloques, ladrillo y suelos.

De acuerdo a Cuzcano Quispe et al., (2021) manifiesta que los RCD pueden dividirse en 3 grupos, RCD aprovechables, RCD no aprovechables y otros, en el primer grupo se encuentran los residuos de construcción y demolición aprovechables estos residuos son los que contienen algún tipo de mezcla como el concreto, cerámica, arena, grava, bloque, ladrillo adherido en el material, ahora los RCD no aprovechables vienen hacer los que materiales peligrosos o contaminados como los residuos reactivos y explosivos, y por ultimo tenemos

otros tipos de residuos los cuales ya no se pueden reutilizar debido a su desgaste o deformación. Por otro lado, los residuos no aprovechables, tienen características peligrosas, son residuos reactivos, corrosivos, explosivos y tóxicos, materiales contaminados o mezclados que pierden sus propiedades e imposibilitan su reutilización.

En la ingeniería vial, en el ámbito de la construcción los residuos que más se suelen reutilizar son los de origen pétreo aquellos que destacan frente a otros tipos de residuos debido a sus propiedades físico-mecánicas que pueden impulsar a su aplicación dentro de la estructura un pavimento ya que estos contienen ciertas características las cuales aportan en la construcción del pavimento. Sin embargo, todo depende de su granulometría, contenido de finos y su nivel de trituración.

En cuanto a su comportamiento, Lara Torres, (2025), menciona que los componentes que se extraen de los residuos de construcción y demolición contienen agregados que presentan desempeños similares o superiores a los agregados de origen natural. Adicionalmente reporto que un alto contenido de hormigón reciclado podría influir en la disminución del CBR, mientras que agregar la fracción más fina del hormigón reciclado podría no influir en la mejora de su resistencia. Sin embargo, la capacidad de soporte obtenida mediante el CBR depende de varios factores como el nivel de trituración, el porcentaje de incorporación y el tipo de material reciclado empleado en el estudio.

Respecto a la composición de los residuos de la construcción y demolición Arévalo Rivera, (2025), manifiesta que los materiales que se encuentran en los residuos de RCD son muy heterogéneos debido a que se pueden encontrar variedades de residuos como hormigón, material asfáltico, material granular natural adherido al hormigón, mampostería, metales, ladrillos, cerámica, vidrios, plásticos, entre otros residuos más. No obstante, al ser materiales muy heterogéneos esto podría condicionar el pavimento, partiendo de que cada material reciclado presentaría aportes diferentes al pavimento debido a sus diferentes características.

Por este motivo, los residuos de construcción y demolición presentan una posible alternativa potencial para su incorporación en materiales granulares y surge la necesidad de evaluación de la influencia de las propiedades físicas y mecánicas del RCD incorporada en un material de subbase granular.

2.5.1. Uso de los RCD en la ingeniería vial

De acuerdo con Bazurto Olarte & Mendoza Gualteros, (2023) aluden que en el ámbito de la construcción vial el uso de RCD podría ser favorable para los pavimentos, donde en este estudio se reportaron en condiciones de investigación valores de CBR en base granular convencional de 80% mientras que el material con RCD obtuvo un 118%, de la misma manera, para la subbase granular su capacidad de soporte obtenida a través del CBR fue del 30% a diferencia del material con RCD que fue de 75%, evidenciando la necesidad de evaluar cada mezcla en función a las características particulares.

Guaje Guerra, (2020), señala que los agregados que se han obtenido de los residuos de construcción y demolición poseen menor deflexión con 1.75 mm contra 2.64 mm del agregado natural resultados que son obtenidos por medio del ensayo de Falling Weight Deflectometer (FWD), donde al tener menor deflexión induce a un comportamiento estructural considerable que demuestra el potencial que podrían tener los agregados reciclados en los pavimentos.

De igual manera, Reis et al., (2021) señalan que los elementos áridos que se obtienen de los residuos reciclados de construcción y demolición tienden a tener mayor porosidad por lo que suelen absorber más cantidad de agua. En consecuencia, se deben considerar estas características en la construcción de los pavimentos debido a que las alteraciones de las propiedades físicas del material pueden condicionar el desempeño estructural de los pavimentos. Pese a esto hay que recalcar que no todos los áridos que proviene de los residuos tienden a ser defectuosos ya que en muchas de las ocasiones su calidad llega a depender del nivel de compactación, porosidad y absorción, las mismas que pueden ir variando, dependiendo del material.

2.5.2. Mezclas de materiales granulares con RCD

Es importante mencionar que cuando se incorporan residuos de construcción y demolición a una mezcla esta tiende a alterar sus propiedades físicas y mecánicas tales como la granulometría, los límites de Atterberg, la resistencia al desgaste, la humedad optima y densidad seca máxima del material y su capacidad de soporte. En este sentido, Llumigusin

Sarzosa & Pallango Unapanta, (2022), manifiestan que el mejoramiento mecánico consiste en la combinación de materiales de distintas características granulométricas con el fin de que cuando se realizan estas mezclas se pueda evidenciar una mejora del comportamiento del material. Pese a ello es importante mencionar que antes de incorporar estos agregados a una mezcla es indispensable una evaluación técnica para verificar si las propiedades físico-mecánicas son adecuadas para su uso en pavimentos flexibles.

Arévalo Rivera, (2025), manifiesta que la incorporación de los RCD en materiales que serán destinados para la construcción de pavimentos deben ser analizados bajo condiciones controladas de laboratorio debido a que este tipo de material trae consigo otros materiales como cerámica, hormigón, metal, mampostería y otros componentes con características físicas diferentes y por esta razón la incorporación de RCD requiere de evaluación técnica y clasificación para determinar su posible aplicación dentro de una estructura de pavimentos flexibles.

Por otro lado, optar por estabilizado con cemento hidráulico MH y emulsión asfáltica en la mezcla de estudio conformada por RCD con subbase granular, requiere la determinación de las propiedades físicas y mecánicas por medio de ensayos de laboratorio de suelos, en función a normativas como la ASTM; Asphalt Institute MS-14; MOP-001-F, 2002 y poder verificar si sus propiedades cumplen con los parámetros establecidos en las normas y establecer si podría o no desempeñarse como material de base estabilizada.

2.6. ESTABILIZACIÓN DE SUELOS Y MATERIALES

La estabilización de suelos y materiales tiene gran influencia en la construcción de pavimentos flexibles, debido a que este proceso induce el aumento de la resistencia mecánica y podría mejorar el desempeño estructural de los materiales, además la estabilización actúa en conjunto con procesos de compactación, lo cual podría favorecer e inducir al aumento de la cohesión, la capacidad de soporte y la rigidez del material de estudio, contribuyendo a la disminución de deformaciones producidas por el tránsito vehicular (Zurita Gil et al., 2023).

El proceso de compactación suele ser una de las etapas finales por el cual pasa el pavimento, debido a que permite incrementar la densidad del material aplicado y reduce la presencia de

vacíos favoreciendo al desarrollo de las propiedades mecánicas y su capacidad de soporte antes las cargas del tránsito vehicular; asimismo, la compactación se debe realizar en función a los niveles de densidad establecidos en la ASTM, 2003; MOP-001-F, 2002, garantizando un adecuado desempeño de los materiales empleados en los proyectos viales.

Según, Llumigusin Sarzosa & Pallango Unapanta, (2022), mencionan que el proceso de estabilización tiene diferentes métodos de clasificación, los mismos que se dividirán dependiendo al material que se vaya a utilizar. Donde uno de los métodos es la estabilización mecánica, la cual consiste en la combinación de materiales con distintas características granulométricas y poder mejorar esa distribución de las partículas e inducir al aumento de la capacidad portante del material.

La estabilización con asfalto permite incorporar la cohesión entre partículas, la resistencia mecánica, además podría reducir la vulnerabilidad a la humedad. Para Maylle Paima & Avila Tarma, (2023), este método de estabilización ayuda a que todos los materiales se adhieran de mejor manera entre sí. Por otro lado, está la estabilización con cemento hidráulico MH, la misma que ayuda a que la mezcla incremente su cohesión, sea más resistente y rígida debido a la acción cementante entre las partículas.

Por ello, para la mezcla de subbase granular de cantera con RCD, emplear procesos de estabilización con cemento hidráulico MH y emulsión asfáltica podría ser una alternativa viable para la construcción de pavimentos flexibles.

2.6.1. Cemento como agente estabilizante

Para comprender la utilidad del cemento en procesos de estabilización primero debemos conocer su definición, siendo un material conglomerante que está formado por extractos calcáreos y arcillosos las cuales han pasado por un proceso de calcinación a altas temperaturas (Doza Saboya & Pinedo Burga, 2023). Por ello, el cemento podría emplearse como agente estabilizante debido a su capacidad de fraguado y endurecimiento. Surita Gil et al., (2023), alude que utilizar cemento en la mezcla para construir pavimentos ayudara a mejorar la resistencia y estabilidad; además este proceso de estabilización permite que se aplique en suelos existentes, donde es importante mencionar que los suelos más adecuados

para ser sometidos a proceso de estabilización con cemento son los granulares tipo A-1, A-2 y A-3 con finos de plasticidad baja o media, $LL < 40$ y $IP < 18$ reflejados en la tabla 6.

Tabla 6

Requerimiento de cemento para distintos tipos de suelo

Clasificación de suelos	Rango típico de cemento
AASHTO	(% peso)
A-1-a	3-5
A-1-b	5-8
A-2	5-9
A-3	7-11
A-4	7-12
A-5	8-13
A-6	9-15
A-7	10-16

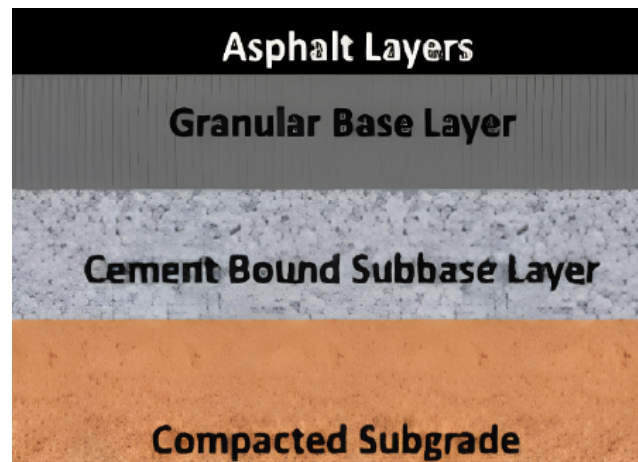
Fuente: (Surita Gil et al., 2023)

La tabla 6 se muestra el requerimiento de cemento que necesita cada suelo dependiendo a su tipo según la AASHTO, donde los suelos granulares que presentan mejor comportamiento natural es el suelo (A1-A2) los cuales necesitan cantidades más bajas de cemento, a diferencia de los suelos A-6 y A-7 que necesitan mayor cantidad de cemento debido a que presentan plasticidad en su composición. Sin embargo, la dosificación no es fija debido a que dependen de las propiedades físico-mecánicas de cada material, determinadas mediante ensayos de laboratorio.

Según Piqueras, (2021), menciona que el proceso de estabilización con cemento se encuentra dividido en fases: la primera fase es la preparación del suelo, la segunda fase es la de mezclado “in situ”, la tercera fase es la compactación se trata de compactar capas de entre 20 a 30 cm, la cuarta fase es la ejecución de juntas y la última fase es la de curado de la mezcla. (Piqueras, 2021). Permitiendo identificar el proceso constructivo de la estabilización con cemento y las actividades que intervienen para lograr una buena ejecución en campo. En este contexto, el cemento es considerado uno del material más utilizado en la construcción de pavimentos viales debido a que posee propiedades físicas-mecánicas extraordinarias que proporciona a los materiales granulares y puedan satisfacer las condiciones y diseño establecido.

Figura 2

Corte de un pavimento estabilizado con cemento



Fuente: (Papatzani et al., 2019)

La figura 2 presenta subbase estabilizada con cemento y en base a las especificaciones, esta estabilización se usa con el objetivo de modificar la resistencia, la rigidez y disminuir la susceptibilidad a la humedad. Se puede observar claramente que existen 4 capas, el proceso de estabilización puede ser utilizado en cualquier capa, se utiliza principalmente para modificar la resistencia y deshumidificar el suelo. No obstante, la estabilización puede emplearse en la base como en la capa de subbase, dependiendo en gran medida de las condiciones establecidas en el proyecto vial.

2.6.2. Asfalto como agente estabilizante

Para Muñoz Pérez et al., (2023), manifiesta que el asfalto es un aglutinante bituminoso que es muy utilizado en el ámbito de la construcción el cual está formado por asfáltenos y maleatos, además debido a que su composición posee propiedades impermeabilizantes las cuales contribuyen a disipar las filtraciones, por lo cual, se considera al asfalto como un agente estabilizante en la industria de la construcción vial debido a que contiene propiedades de impermeabilización.

El asfalto podría ser uno de los agentes estabilizantes más viable, ya que el mismo permite incorporar la cohesión entre partículas, la resistencia mecánica, además reduce la

vulnerabilidad a la humedad con respecto a los aspectos fundamentales para garantizar el mejor desempeño estructural del pavimento (Maylle Paima & Avila Tarma, 2023).

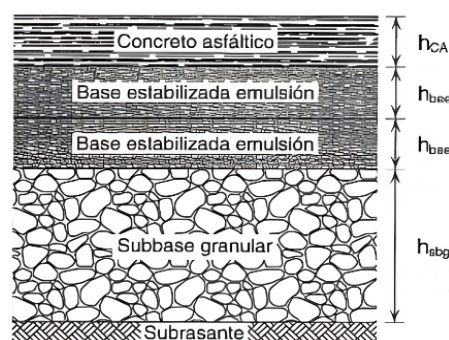
En este contexto, la estabilización asfáltica se puede realizar mediante diferentes tipos de ligantes como por ejemplo la emulsión asfáltica, de la misma manera se puede realizar con asfaltos diluidos como el RC-250. Por una parte, la emulsión asfáltica actúa de manera de un ligante que recubre las partículas del material granular además genera una matriz cohesiva para mejorar el comportamiento mecánico del material (Maylle Paima & Avila Tarma, 2023), mientras que el RC-250 mejora el asfalto de curado rápido tiende a mejorar las propiedades del suelo haciendo que este sea más resistente, logrando que alcance su estabilidad volumétrica, tenga buena permeabilidad y durabilidad (Mejia Vidal, 2022).

La AASHTO, (1993), menciona que las estructuras que contienen asfalto tienden a tener mayor resistencia y rigidez esto debido al uso del ligante, pese a ello es importante que para evaluar su eficacia se realicen ensayos de laboratorio.

El desempeño de las mezclas de subbase con RCD estabilizadas con asfalto, dependen del ligante asfáltico que se utilice, donde sus dosificaciones requieren de pruebas de laboratorio de suelo. En este caso, Paima & Tarma, (2023) realizaron un estudio mediante ensayos de estabilidad y flujo Marshall, teniendo como objetivo la influencia que tiene el porcentaje de emulsión en el material granular, ejecutando el ensayo con porcentaje de 3% a 6%, para obtener el porcentaje óptimo de emulsión asfáltica el cual fue de 4.8% con una estabilidad respectiva de 980 kg, teniendo un adecuado comportamiento mecánico.

Figura 3

Corte típico de un pavimento estabilizado con emulsión



Fuente: (Mendoza Torres, 2019)

En la figura 3 se puede observar un corte típico de un pavimento estabilizado con emulsión específicamente en la capa de base, aunque también se puede realizar en la capa de subbase, sin embargo, las condiciones y especificaciones del proyecto vial son las que dictaminan que material requiere procesos de estabilización con asfalto debido al aporte que podría causar en el material como una mejor cohesión, capacidad de soporte y estabilidad del material.

2.7. PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS DE LOS MATERIALES

Los pavimentos flexibles contienen propiedades físicas y mecánicas que influyen en su comportamiento dentro del pavimento.

2.7.1. Propiedades físicas de los materiales

Las propiedades físicas de los materiales contribuyen a una construcción de calidad de pavimentos flexibles, debido a la distribución de partículas, el proceso de compactación e interacción entre sí. Por ello, entre las propiedades físicas que presentan los materiales esta el análisis granulométrico, proceso que clasifica el material según su tamaño teniendo influencia directamente en la compactación con el suelo, asimismo la textura de los agregados influye ya que la fricción interna aumenta (Solorzano Garcia & Caspi Taris, 2025).

De la misma manera, la densidad y absorción de agua vinculadas al nivel de compactación y la presencia vacíos en los materiales de alta porosidad, puede condicionar la calidad del material cuando estas son expuestas a humedad (Solorzano Garcia & Caspi Taris, 2025).

2.7.2. Propiedades mecánicas de los materiales

Entre las propiedades mecánicas que tienen los materiales esta la rigidez, la cual se caracteriza mediante el módulo resiliente, parámetro que presenta la capacidad que tiene el material para recuperarse luego de recibir las cargas del tránsito vehicular (Múnera Miranda & Aguiar Moya, 2020).

Asimismo, otra de las propiedades mecánicas de la determina mediante en ensayo de CBR, parámetro que refleja la capacidad de soporte del material, considerando la reacción que tiene el material frente a las cargas y deformación ante la penetración (Solorzano Garcia & Caspi Taris, 2025).

En conjunto, las propiedades físicas y mecánicas permiten conocer el comportamiento de los materiales en condiciones de servicio. Además, los ensayos de laboratorio son fundamentales para determinar si el material cumple con las especificaciones técnicas que requieren los materiales para la construcción de los pavimentos.

2.8. ENSAYOS DE LABORATORIO

Para poder determinar las propiedades físicas y mecánicas que presentan los materiales de estudio como la subbase y la mezcla de subbase con RCD y dichas mezclas estabilizadas con emulsión asfáltica y cemento hidráulico MH, se deben realizar ensayos de laboratorio de suelos, debido los ensayos permiten determinar la influencia que podría tener el RCD, en la construcción de pavimentos flexibles, considerando su posible desempeño como base estabilizada.

En base a los objetivos de la investigación, se realizarán ensayos de laboratorio, los cuales permiten caracterizar y realizar un análisis comparativo de las propiedades físicas y mecánicas de los materiales y evaluar su posible desempeño como base estabilizada en pavimentos flexibles.

2.8.1. Contenido de humedad (ASTM D2216)

La ASTM D 2216, (2019), establece que el ensayo de contenido de humedad consiste en determinar la cantidad de agua que presentan las muestras de estudios, por medio del secado en un horno a un temperatura de 110 ± 5 °C para determinar el contenido de humedad después del secado, estableciendo diferencias entre el peso seco y el peso húmedo.

Vasquez Tapia & Lopez Rojas, (2021), menciona que el contenido de humedad es uno de los ensayos fundamentales para las construcciones, debido a que permite determinar la presencia

de agua en los materiales que se utilizaran en la construcción, teniendo influencia en proceso de compactación, la densidad y sobre todo en el comportamiento del material.

2.8.2. Granulometría (ASTM D6913)

Roche et al., (2025), señalan que la granulometría de un material se clasifica según el tamaño de las partículas trituradas de dicho material, la clasificación se lo realiza por medio de tamices de diferentes tamaños de abertura que permite ir separando las partículas gruesas y finas, este proceso granulométrico es importante en la construcción de pavimentos ya que permite que los materiales se compacten de mejor manera y contribuye a la disminución de vacíos en el material.

La ASTM D 6913, (2017), establece que la granulometría permite cuantificar el porcentaje retenido y pasante en cada tamiz, para posteriormente realizar la curva granulométrica del suelo estudiado.

De acuerdo con el Ministerio de Transporte y Obras Públicas MOP-001-F, (2002), establecen rangos granulométricos para los materiales y se clasifican según su distribución de partículas, reflejada anteriormente en la tabla 5. La cual muestra la clasificación granulométrica para subbases granulares, en la misma también se puede observar que se clasifica en 3 tipos de subbase y esto depende del tamaño de cada partícula, permitiendo verificar la distribución de partículas del material de subbase granular y subbase granular + RCD, en función a los parámetros establecidos por la MOP-001-F, 2002.

La granulometría es un parámetro de interés en la presente investigación ya que permite la distribución de las partículas de la subbase granular de cantera y la mezcla de subbase con RCD, y verificar la influencia que tiene la incorporación de RCD en el material de subbase, lo cual podría influir en su capacidad de compactación, además un adecuado proceso granulométrico favorece a la distribución de las partículas reflejada en una mayor densidad seca máxima obtenida mediante el ensayo Proctor, por lo cual, estas características podrían influir en el análisis del posible uso de la mezcla como material de base estabilizada en pavimentos flexibles.

2.8.3. Límites de Atterberg (ASTM D4318)

Los límites de Atterberg son importantes dentro de la presente investigación debido a que permiten la evaluación de la fracción fina de la mezcla de estudio, frente a variaciones de humedad determinando el límite líquido y la plasticidad de la subbase y subbase con RCD. De acuerdo con Bazurto Olarte & Mendoza Gualteros, (2023), reflejan una alteración de la plasticidad del material granular frente al material con RCD, con valores de plasticidad de 15% frente a 13% (material con RCD), así mismo el límite líquido está en 30% frente a 28% del material con RCD. Por ello, la incorporación de RCD puede modificar la plasticidad del material debido a los cambios en la distribución de las partículas finas afectando la estabilidad y la capacidad portante del material por las variaciones de la humedad.

Rodríguez, (2023), expresa que el estudio de los límites de Atterberg se basa en el límite líquido y plástico los materiales bajo condiciones de variaciones de la humedad, condicionando el desempeño adecuado de los materiales en diferentes condiciones de cargas y humedad, lo cual se debe a que el índice de plasticidad del material podría asociarse con problemas de pérdida de la capacidad, lo cual es importante ya que cada material suele actuar de distinta manera ante la presencia de altas cargas y la cantidad de humedad presente.

2.8.4. Proctor modificado (ASTM D1557)

Reyes Cardenas & Sarmiento Morris, (2024), manifiestan que el Proctor modificado se utiliza principalmente para establecer la relación que existe entre la humedad y la densidad, con el objetivo de obtener la densidad seca máxima y la humedad óptima del material ensayado. Este ensayo se lleva a cabo en moldes de 4 o 6 pulgadas con su respectiva muestra de suelo, las cuales han sido sometidas a una energía de compactación, simulando las cargas que deben soportar los pavimentos, además se realiza bajo varios métodos (A, B y C), diferenciados por el tamaño del molde, número de golpes por capa y tamaño máximo de las partículas.

Reis et al., (2021), en condiciones de investigación señala la densidad del agregado que contiene RCD en comparación a los agregados naturales con resultados reflejados de 2.2 g/cm³ y 2.6 g/cm³. Sin embargo, al ser muy heterogéneo, esto podría variar dependiendo

también de su nivel de trituración, el porcentaje de incorporación, por ende, resulta de gran interés en la presente investigación la determinación de la densidad seca máxima junto a su humedad optima ya que una adecuado proceso de compactación favorece al acomodo de partículas, reduciendo incluso los volúmenes de vacíos presentes en el material y como consecuencia podría mejorar la resistencia mecánica y la capacidad portante de la mezcla de estudio.

Según Das, (2015), la prueba de Proctor Modificado se usa un molde con un volumen de 943.3 cm³ o 2124 cm³ dependiendo del método aplicado (A, B, C), el suelo se compacta en 5 capas por un pistón de 44.5 N, con caída libre de 457.2 mm y el número de golpe depende del método aplicado, de acuerdo a la tabla 7:

Tabla 7

Especificaciones para la prueba Proctor Modificado

Concepto	Método A	Método B	Método C
Diámetro del molde	101.6 mm	101.6 mm	152.4 mm
Volumen del molde	943.3 cm ³	943.3 cm ³	2124 cm ³
Peso del pistón	44.5 N	44.5 N	44.5 N
Altura de caída del pistón	457.2 mm	457.2 mm	457.2 mm
Número de golpes del pistón por capa de suelo	25	25	56
Número de capas de compactación	5	5	5
Energía de compactación	2696 kN·m/m ³	2696 kN·m/m ³	2696 kN·m/m ³
Suelo por usarse	Porción que pasa la malla No. 4 (4.75 mm). Se usa si 20% o menos por peso de material es retenido en la malla No. 4.	Porción que pasa la malla de 9.5 mm. Se usa si el suelo retenido en la malla No. 4 es más del 20%, y 20% o menos por peso es retenido en la malla de 9.5 mm.	Porción que pasa la malla de 19 mm. Se usa si más de 20% por peso de material es retenido en la malla de 9.5 mm, y menos de 30% por peso es retenido en la malla de 19 mm.

Fuente: (Das, 2015)

En la tabla 7 se puede observar las especificaciones para la prueba Proctor Modificado en la mismas que existen 3 métodos en los cuales se evalúan los siguientes parámetros: diámetro y volumen del molde, peso y altura de caída del pistón, números de golpes del pistón por capa de suelo, energía de compactación.

La selección del método depende del tamaño máximo nominal de los agregados presente en el material de estudio, de acuerdo con su granulometría, ya que este parámetro determina, el molde a utilizar y el proceso de compactación adecuado para de esta manera obtener datos representativos.

Por ello, para la selección del método para aplicar en esta investigación se consideró la granulometría de la subbase granular y de la subbase granular mezclada con RCD, de esta manera el método elegido garantiza que la distribución de partículas sea compatible con las especificaciones de ASTM D1557-12, (2021), en cuanto a las dimensiones del molde, el número de golpes por capa con su energía de compactación a través del pisón, lo cual permite determinar la densidad seca máxima y la humedad óptima de los materiales de estudio.

2.8.5. CBR (ASTM D1883)

Flores Ruiz & Romero Mendo, (.2023) mencionan que el ensayo de CBR se basa en determinar la capacidad que tendrá el suelo para soportar las cargas del tránsito vehicular, evaluando la calidad de la base, subbase y subrasante, simulando de manera aproximada las cargas que pueden soportar los materiales en condiciones de servicio.

Asimismo, bajo condiciones de investigación experimental de laboratorio de suelo, reporta resultados de CBR por parte de la subbase granular con un 30%, a diferencia del material que contiene RCD con un 75% de CBR (Flores Ruiz & Romero Mendo, 2023). Lo cual, permite establecer que incorporación de RCD podría modificar favorablemente la resistencia de la mezcla frente a cargas de tránsito.

Por este motivo el CBR es fundamental para la presente investigación debido a que mide la resistencia a la penetración a través de un pisón que permite evaluar la capacidad portante de los materiales para la construcción de los pavimentos (AASHTO, 1993).

2.8.6. Resistencia a la compresión simple (ASTM D1633)

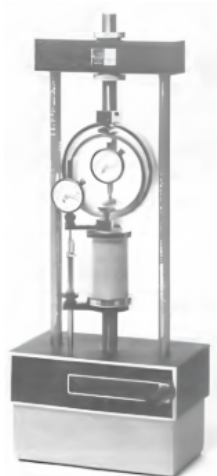
Según Figueredo Dávila, (2025), indica que la resistencia a compresión simple mide la capacidad que tiene un material cuando este es expuesto a cargas axiales hasta alcanzar su

falla. Asimismo, Korpys et al., (2024), señalan que el ensayo de compresión simple la compresión simple evalúa el nivel de rigidez que posee el material hasta cuando este se rompa verificando su rigidez del material.

El ensayo de resistencia a la compresión simple es importante para la investigación debido a que la investigación busca estabilizar las mezclas con incorporación de RCD, permitiendo la determinación del esfuerzo máximo de compresión que pueden soportar estos materiales antes de fallar y analizar si cumplen con las especificaciones para desempeñarse como base estabilizada bajo las especificaciones de la (MOP-001-F, 2002).

Figura 4

Equipo para el ensayo de Compresión Simple



Fuente: (Das, 2015)

En la figura 4 se puede observar el equipo que se usa para el ensayo de compresión simple, este equipo es el que permite que se aplique una carga axial controlada al material hasta alcanzar su falla, evaluando la resistencia a la compresión simple de los materiales. Parámetro que será fundamental para analizar la influencia que tiene los RCD en el material de subbase granular estabilizado con cemento hidráulico MH.

2.8.7. Abrasión de los ángeles (ASTM C535)

Según Tipán Martínez, (2023), alude que el ensayo de abrasión de los ángeles hace referencia a la resistencia al desgaste que presentan los agregados gruesos por medio de la acción de

impacto por medio de la máquina de abrasión. Donde el resultado de desgaste se da en porcentaje, además de evidenciar la capacidad del material para resistir el desgaste y fragmentación generador por las cargas del tránsito, sirviendo como un control de calidad para el diseño. En aplicaciones de subbase granular, la MOP-001-F, (2002) exige que los materiales sometidos al ensayo de abrasión deben tener un porcentaje de desgaste máximo de 50%.

Lara Torres, (2025), en su investigación experimental de laboratorio, de una subbase con incorporación de hormigón reciclado refleja valores de abrasión en la subbase granular de 30.54% para la subbase convencional, mientras que con un 10% y 15% de hormigón reciclado incorporado en la subbase, refleja resultados de 31.74% y 43.34%. Evidenciando que el agrega de hormigón reciclado aumenta ligeramente el desgaste del material, sin embargo, dichas mezclas siguen permaneciendo dentro de los límites establecidos por la MOP-001-F-2002.

2.8.8. Gravedad específica (ASTM C127 Y ASTM 128)

La gravedad específica también conocida como densidad relativa según la Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 857, (2010) la densidad relativa (gravedad específica) (SSS) corresponde a la relación entre densidades de los materiales saturadas superficialmente seca como del agua destilada a una temperatura determinada. En esta condición, los poros permeables de las partículas se encuentran llenos de agua a diferencia de la superficie externa que estará sin humedad.

Según el, Asphalt Institute MS-14, (2005), caracterizar los materiales sometidos a estabilización con emulsión asfáltica es importante para evaluar el desempeño de las mezclas. Por ende, la gravedad específica es un parámetro fundamental para el diseño Marshall debido a que permite el cálculo de las propiedades volumétricas de los materiales que conforman la mezcla como los vacíos de aire (V_a), permitiendo verificar la estructura interna y cómo influye la presencia de emulsión asfáltica CSS-1h en el material granular de estudio.

Las características de los agregados gruesos se evalúan bajo las normas ASTM C127 y para los agregados finos bajo las normas ASTM C128 mediante el método del matraz.

2.8.9. Estabilidad y flujo Marshall (ASTM D6927)

Según Anaya, (2025), para medir la estabilidad y flujo Marshall se utilizan probetas que cuentan con mezcla asfáltica, con el fin de verificar cual es la carga máxima que estas muestras pueden soportar antes de fallar, en este caso, indicando la resistencia en condiciones controladas de laboratorio.

De acuerdo a Calva Herrera & Muñoz Pérez, (2022) aluden que el flujo muestra la capacidad que tiene la mezcla para resistir asentamientos y deformaciones, además es importante recordar que la gravedad específica tanto en las mezclas de subbase como la mezcla con residuos de construcción y demolición dependen de las propiedades que poseen las partículas del material, donde la alteración de resultados podría depender de factores como su origen, el nivel de trituración, presencias de vacíos internos.

Por este motivo aplicar el ensayo de estabilidad y flujo Marshall en la presente investigación es fundamental debido a que, por una parte, la estabilidad Marshall representa la carga máxima que puede soportar el material hasta alcanzar su falla, mientras el flujo la deformación plástica que tiene la carga máxima alcanzada. En conjunto, son parámetros que permiten el análisis de la capacidad resistente y deformabilidad del material, determinando el desempeño del material antes las cargas que produce el tránsito vehicular.

2.9. NORMAS Y ESPECIFICACIONES TÉCNICAS APLICABLES

El siguiente trabajo de investigación se apoya en normas y especificaciones técnicas que permitan el respaldo de la evaluación comparativa de materiales para pavimento flexible.

Bajo este enfoque, se consideran las siguientes normas y especificaciones técnicas en la investigación:

- **ASTM**

La American Society for Testing and Materials (ASTM), constituye a la base metodológica en la realización de los ensayos establecidos para la presente investigación, esto debido a que establecen de manera específica el proceso de cada ensayo a realizarse, por lo cual garantiza procesos y criterios técnicos establecidos, reduciendo la variabilidad experimental.

- **MOP-001-F-2002**

Las especificaciones Generales para la Construcción de Caminos y Puentes, establecen requisitos técnicos y criterios de aceptación para los materiales utilizados en los pavimentos y esto constituye a la base metodológica debido a que se emplearan especificaciones para subbase granular, considerando el análisis granulométrico, limite líquido, índice de plasticidad, CBR y el porcentaje de desgaste, asimismo criterios para base estabilizada con cemento hidráulico MH y los criterios Marshall para las mezclas asfálticas, con parámetros como el número de golpes por cara, la estabilidad, flujo, % de vacíos, los cuales sirven como parámetros claves para la evaluación del desempeño de las mezclas de estudio.(MOP-001-F, 2002).

- **ASPHALT INSTITUTE**

El Asphalt Institute, por medio del Asphalt Cold Mix Manual MS-14, presenta alineamientos técnicos para la elaboración de mezclas con emulsión asfáltica, por ende, se referencia este manual para el proceso de elaboración y evaluación del material de estudio estabilizado con emulsión asfáltica CSS-1H ya que hace énfasis al procedimiento como el curado de las briquetas compactadas, estableciendo el curado en horno durante 48 horas a 60°C antes de ser sometido al ensayo Marshall, así mismo dosificaciones con 3 réplicas por porcentaje, por ende este manual tiene fundamentos claves para la presente investigación, aportando en el proceso de estabilizado con emulsión asfáltica.

CAPITULO III

METODOLOGÍA

3.1. ENFOQUE METODOLOGICO Y DISEÑO EXPERIMENTAL

La metodología que se ha utilizado en esta investigación principalmente está basada en evaluar las propiedades físicas y mecánicas presentes en la capa de subbase granular tanto de los materiales que se obtienen de canteras y de los residuos de construcción y demolición (RCD), ya que de esa manera se logra verificar si dichos materiales son aptos para su respectiva utilización.

Asimismo, se define como un diseño experimental debido a que, de acuerdo con Arias González, (2022), en este tipo de diseño se manipulan de forma deliberada variables independientes para analizar su efecto sobre variables dependientes. Las respectivas pruebas de laboratorio se realizaron en la Universidad Estatal Península de Santa Elena bajo los estándares de las normas, para su procedimiento experimental.

Esta investigación está realizada bajo un enfoque cuantitativo y experimental-comparativo, esto debido a que se utilizaron datos numéricos al momento de comparar el comportamiento físico y mecánico de los materiales de subbase granular de origen natural con los residuos de la construcción y demolición (RCD), esto luego de que dicho material haya atravesado por algún proceso de estabilización con algún material, comparar el comportamiento físico-mecánico de las mezclas con RCD frente a una subbase granular tradicional de cantera y evaluar el desempeño de un material de subbase granular + RCD sometido a procesos de estabilización con cemento y emulsión asfalto en función a las normas vigentes.

3.2. POBLACIÓN Y MUESTRA

La población de estudio está conformada por material de subbase granular y RCD pétreos aptos para ser reutilizados e incorporados en mezclas con subbase granular.

La muestra fue conformada por: i) Material Granular de Subbase clase 3, obtenido de la cantera Juan Montalvo, provincia de Santa Elena; ii) Material de RCD proveniente de locales comerciales demolidos en el cantón Santa Elena.

En esta investigación se ha utilizado como muestra el material granular, el cual tiene un tamaño total de 400 kg de subbase y 150 kg de RCD. El mismo que ha sido evaluado bajo las normas de la Sociedad Estadounidense para Pruebas y Materiales ASTM D75/D75M-19, (2019), la cual se aplica realizando la recolección en los puntos altos, medios e inferiores de los acopios y su posterior cuarteo. La recolección de las diferentes muestras se las ha tomado de diversos puntos de acopio garantizando así que las propiedades físicas y mecánicas sean variadas, en el caso de los residuos de construcción y demolición, las muestras que serán tomadas pasaran primero por un proceso de trituración en donde las partículas serán separadas granulométricamente.

El RCD proviene de locales comerciales demolidos y seleccionados únicamente por material pétreo, el cual será sometido a un proceso de trituración y clasificación granulométrica para su utilización en las mezclas.

3.3. NIVEL DE INVESTIGACIÓN

El nivel de la investigación es de tipo experimental - comparativa.

Esta investigación se utiliza el tipo experimental – comparativa debido a que en las muestras se evalúan las propiedades tanto físicas-mecánicas como químicas del material tanto de subbase granular de cantera de origen natural como el material que se obtiene a partir de los residuos de construcción y demolición como mezclas de subbase granular. Al respecto, Arias Gonzáles, (2021) señala que este nivel se fundamenta en la manipulación de variables independientes para analizar sus efectos y establecer contrastes técnicos entre los grupos evaluados.

De este modo, se estudia como las propiedades del material subbase van cambiando cuando se les incorpora residuos de construcción y demolición debido a que se analizan alteraciones de las propiedades del material de subbase, así como el efecto de esta mezcla al someterse a

proceso de estabilización con cemento y emulsión asfáltica, con el fin de determinar su influencia en el desempeño como material de base estabilizada en pavimentos flexibles.

Los niveles de investigación son importantes dentro de la investigación ya que estos por medio de las pruebas de laboratorio permiten evidenciar el efecto que causa en la subbase granular al momento de incorporar residuos de construcción y demolición (RCD), así como también permite observar cómo las propiedades físicas-mecánicas de los materiales van cambiando en función a especificaciones y normativas vigentes en nuestro país y a nivel internacional.

3.4. MATERIALES Y EQUIPOS

Para la elaboración de la investigación se han utilizado varios materiales y equipos entre ellos equipos del Laboratorio de Suelos de la Universidad Estatal Península de Santa Elena, requeridos para la caracterización física y mecánica del material de subbase granular proveniente de cantera y mezclas de subbase granular con residuos de construcción y demolición (RCD) y dichas mezclas estabilizadas con cemento hidráulico MH y emulsión asfáltica, los cuales han resultado de gran ayuda ya que han permitido observar cómo van cambiando las propiedades físicas y mecánicas cuando se les mezcla con un distinto material granulado, en esta ocasión se ha utilizado material de subbase granular de origen natural y material obtenido a través de los residuos de construcción y demolición, así como también diferentes mezclas estabilizadoras siguiendo las especificaciones ASTM, MOP-001-F-2002 y ASPHALT INSTITUTE.

Materiales: a) Material de subbase granular clase 3 de la cantera Juan Montalvo, perteneciente a la provincia de Santa Elena; b) Los residuos de construcción y demolición (RCD) de origen pétreo son los productos de los edificios demolidos del cantón de Santa Elena, que fueron tratados con procesos de selección, trituración y clasificación granulométrica previamente; c) Cemento hidráulico MH como agente estabilizante; d) Emulsión asfáltica catiónica CSS-1H como agente estabilizante bituminoso; e) Agua potable durante la preparación de mezclas y control de los humedecimientos de los ensayos de compactación.

Equipos de laboratorio: a) Juego de tamices estándar para análisis granulométrico; b) Balanza digital de precisión; c) Horno de secado para determinación de humedad; d) Equipo Proctor Modificado; e) Moldes y equipo para ensayo CBR; f) Equipo para determinación de gravedad específica; g) Máquina de abrasión Los Ángeles; h) Equipo Marshall para estabilidad y flujo; i) Máquina de compresión simple; j) Recipientes y bandejas de mezcla; k) Pisón o compactador manual de laboratorio; l) Herramientas menores de laboratorio (espátulas, cucharas, brochas, etc.).

Todos los materiales y equipos que se han utilizado en esta investigación han ayudado a evaluar el comportamiento de las propiedades físicas-mecánicas y químicas de las diferentes mezclas, las mismas que han sido evaluadas bajo las normas ASTM, Asphalt Institute MS-14 y MOP-001-F, 2002.

3.5. PROCEDIMIENTO METODOLÓGICO

El procedimiento metodológico de esta investigación se desarrolló de una manera experimental-comparativa, dirigido a verificar el comportamiento físico y mecánico que se encuentra dividida en cuatro fases directamente vinculadas a los objetivos específicos, mismo que se ha basado únicamente en estudiar el comportamiento de las propiedades físicas y mecánicas del material granular extraído de canteras y de los residuos de construcción y demolición, así como también las mezclas estabilizadas con cemento hidráulico MH y emulsión asfáltica.

3.5.1. EVALUACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS FÍSICAS Y MECÁNICAS DE LA SUBBASE GRANULAR Y DE MEZCLAS CON LOS RCD

Para evaluar las características físicas y mecánicas de la subbase granular se utilizaron dos tipos de materiales: el primer material que se utilizó fue el material de subbase granular extraído de la cantera Juan Montalvo, el cual se analiza si cumple como material de subbase granular clase 3 y el segundo material fue extraído de los residuos de construcción y demolición, no sin antes ser triturado para ser mezclado con el material granular de subbase hasta obtener una distribución de partículas de la mezcla

que sea compatible con las exigencias de la ASTM D3515-01, (2001), debido a que la mezcla posteriormente va a ser sometida proceso de compactación y elaboración de briquetas para estabilizados con emulsión asfáltica CSS-1h, permitiendo obtener un material con una distribución de partículas controlada. En esta fase se utilizaron dosificaciones de 20%, 30%, 40% para encontrar el contenido optimo de RCD para la mezcla con subbase granular.

Para evaluar las características físicas y mecánicas de la subbase granular se utilizaron dos tipos de materiales: el primer material que se utilizo fue el material de subbase granular extraído de la cantera Juan Montalvo, el cual se analiza si cumple como material de subbase granular clase 3 y el segundo material fue extraído de los residuos de construcción y demolición, no sin antes ser triturado para ser mezclado con el material granular de subbase hasta obtener una distribución de partículas de la mezcla que sea compatible con las exigencias de la ASTM D3515-01, (2001), debido a que la mezcla posteriormente va a ser sometida proceso de compactación y elaboración de especímenes para los estabilizados con cemento hidráulico MH y emulsión asfáltica CSS-1h, permitiendo obtener un material con una distribución de partículas controlada. En esta fase se utilizaron dosificaciones de 20%, 30%, 40% para encontrar el contenido optimo de RCD para la mezcla con subbase granular.

Una vez obtenido el contenido optimo de RCD se procede a realizar todos los ensayos de laboratorio de suelos dispuestos en las variables dependientes del estudio, determinando el contenido de humedad, granulometría, límites de Atterberg, abrasión de Los Ángeles y CBR y de esta manera verificar las modificaciones de las propiedades físicas y mecánicas y determinar si condiciona el desempeño del material destinado a construcción de pavimentos flexibles.

3.5.2. EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE LAS MEZCLAS ESTABILIZADAS CON CEMENTO HIDRÁULICO MH

Posterior al contenido optimo del RCD en la subbase granular, se verifico que la granulometría cumpla con los parámetros exigidos para base estabilizada con cemento

según MOP-001-F, (2002), sección 815, tabla 404-6.1. No obstante, en caso de no satisfacer los límites granulométricos exigidos se buscaría la incorporación de RCD que cumpla con las exigencias de la MOP-001-F, (2002) para base estabilizada con cemento.

Como agente estabilizante se utilizó el cemento hidráulico MH (moderado calor de hidratación), partiendo de la realización del ensayo de Proctor modificado para obtener la humedad óptima de los materiales de estudio y en base a esto determinar la cantidad de agua necesaria para cada cilindro.

Para esta evaluación se definen dosificaciones de cemento de 3%, 4%, 5%, moldeando un total de 6 cilindros experimentales, distribuidos en 2 réplicas por mezcla. Dichos especímenes se sometieron a un proceso de curado durante un periodo de 7 y 28 días.

Los resultados generados permitirán evaluar el incremento de la resistencia que podría generar la estabilización con cemento y la cantidad óptima de cemento hidráulico MH, para alcanzar la resistencia mínima exigida para bases estabilizadas con cemento hidráulico MH, mediante la máquina de compresión simple.

3.5.3. EVALUACIÓN DE LA CAPACIDAD DE LAS MEZCLAS ESTABILIZADAS CON EMULSIÓN ASFÁLTICA

En la estabilización con asfalto, se elaboraron mezclas estabilizadas con emulsión asfáltica CSS-1H a distintas dosificaciones. Donde se llevará a cabo el diseño de mezcla siguiendo el procedimiento Marshall, usando dosificaciones con diferentes porcentajes de emulsión asfáltica (2%, 4%, 6%, 8%) y fabricando un total de 12 briquetas Marshall en base a 3 réplicas por porcentaje de emulsión asfáltica conforme a la metodología de diseño para mezclas asfálticas en frío establecidas en el manual Asphalt Institute MS-14, (2005), para evaluar la capacidad de las mezclas bajo distintas dosificaciones de emulsión asfáltica y determinar el porcentaje óptimo de emulsión asfáltica que necesita cada material de estudio.

Una vez establecido el porcentaje de óptimo de emulsión asfáltica, se procederá a la fabricación de briquetas de ensayo que fueron evaluadas con las pruebas de estabilidad

y flujo Marshall, cuyos resultados permitieron conocer la cohesión, estabilidad y comportamiento mecánico de las mezclas estabilizadas frente a las cargas aplicadas y, por lo tanto, determinar su posible utilización como material de base estabilizada con asfalto, dichos resultados permitieron observar el porcentaje óptimo de emulsión asfáltica, de esa manera se empezaron a fabricar briquetas de ensayo las cuales tenían como objetivo evidenciar la mezcla cuando se le aplicaba cierta cantidad de carga.

3.5.4. ANÁLISIS COMPARATIVO Y EVALUACIÓN DE LA FACTIBILIDAD TÉCNICA

En última instancia, se realizó un análisis comparativo y una evaluación de la factibilidad técnica de las subbases granulares, de igual manera las mezclas que se obtuvieron de los residuos de construcción y demolición (RCD), así como también las mezclas estabilizadas con cemento y las mezclas estabilizadas convencionalmente con emulsión asfáltica. Para efectuar este análisis experimental – comparativo de las variables dependientes (propiedades físicas y mecánicas), se definió como grupo de control a la muestra de subbase granular de cantera.

Los valores obtenidos se contrapusieron con los requisitos establecidos para las subbases granulares convencionales en la normativa ASTM, Asphalt Institute MS-14 y la MOP-001-F-2002, a partir de lo cual se realizó la evaluación de la influencia que ejercían los RCD y los agentes estabilizantes sobre las propiedades físico-mecánicas del material y se evaluó que resulta factible utilizar material de los residuos de construcción y demolición, y agentes estabilizadores en la construcción de pavimentos flexibles.

3.6. METODOLOGÍA DEL OE1, CARACTERIZACIÓN FÍSICO-MECÁNICA DE LOS MATERIALES DE ESTUDIO

3.6.1. Toma de muestras representativas de cantera y residuos de construcción

Para las muestras de la cantera Juan Montalvo como material granular, el muestreo se realizó conforme a la norma ASTM D75/D75M, donde se tomaron tres submuestras representativas como referencia en la parte superior, media, y base de acopio, las cuales

posteriormente fueron colocadas en una superficie limpia y se mezclaron con pala, obteniendo un material compuesto, correspondiente al material granular para la elaboración de todos los ensayos de laboratorio y réplicas de la presente investigación con un total de 400 kg de material representativo de subbase granular.

Figura 5

Recolección de las muestras granulares



Figura 6

Vista satelital de la cantera de estudio



Tabla 8

Coordenadas UTM de la cantera Juan Montalvo

Cantera Juan Montalvo, provincia de Santa Elena
Zona 17S, Este: 534764 m, Norte: 9747933 m

Las muestras de residuos de construcción y demolición se las han tomado de construcciones de locales comerciales que han sido demolidos y de origen pétreo donde se seleccionó el material que posteriormente fue sometido a procesos de trituración.

De este frente se extrajo una cantidad total de 150 kg de material RCD. El criterio de selección empleado consistió en la separación selectiva de la fracción puramente pétreo o

mineral (compuesta principalmente de hormigón y morteros de cemento), aplicando un protocolo estricto de exclusión manual para descartar contaminantes no deseados como madera, yeso, plásticos, vidrios y metales, asegurando así que las impurezas orgánicas o químicas no interfieran en el comportamiento físico-mecánico de las mezclas estabilizadas.

Figura 7

Material de RCD proveniente de locales comerciales demolidos



Figura 8

Proceso de trituración



3.6.2. Ensayos de mecánica de suelo para la caracterización de los materiales

En esta sección se describen los ensayos de mecánica de suelo para la caracterización de los materiales, debido a que mediante los ensayos se permite evaluar si el material granular de subbase granular cumple con los requisitos físicos y mecánicos exigidos por las normas de la ASTM para subbase granular de clase 3.

- a) Contenido de humedad (ASTM D2216)
- b) Granulometría (ASTM D6913), mediante el tamizado del material, permite identificar la distribución de partículas y su clasificación.

Figura 9

Tamizado de las muestras



La figura 9 refleja el proceso del ensayo de granulometría tanto para la subbase y la mezcla de subbase con RCD, bajo la normativa ASTM D6913, con el fin de determinar la distribución de partículas de los materiales y realizar la curva granulometría, de acuerdo con el porcentaje que pasa por cada tamiz.

c) Límites de Atterberg (ASTM D4318), para determinar el límite líquido, límite plástico y índice de plasticidad de los materiales de estudio y evaluar el comportamiento en condiciones de cambio de humedad.

Figura 10

Ensayo de Limite de Atterberg



La figura 10 ilustra el procedimiento del ensayo límites de Atterberg conforme a la norma ASTM D312, con el objetivo de determinar la plasticidad, cohesión y consistencia de la

fracción fina del material de estudio, determinando así los contenidos de humedad presentes en el material pasando de un estado semisólido a plástico y líquido.

d) Proctor Modificado (ASTM D1557), permite determinar la densidad y medad optima de los materiales de estudio, mediante la aplicación de energía de compactación controlada.

Figura 11

Ensayo de Proctor modificado



La Figura 11 ilustra el proceso de compactación correspondiente al ensayo Proctor Modificado (ASTM D1557), con el fin de establecer las condiciones óptimas de compactación del material de estudio mediante la determinación de la Densidad seca máxima y la humedad óptima para un determinado nivel de compactación.

e) Capacidad de soporte (CBR) (ASTM D1883), evalúa la capacidad portante de un material compactado.

Figura 12

Ensayo CBR



La Figura 12 presenta el procedimiento empleado para la determinación del CBR conforme

a la ASTM D1883, con el fin de determinar la capacidad de soporte de los materiales de estudio.

f) Abrasión de los ángeles (ASTM C535), determina la resistencia de los agregados gruesos al desgaste, mediante la acción combinada de impacto y abrasión dentro de la maquinaria de Abrasión de los Ángeles.

Figura 13

Ensayo de Abrasión de los Ángeles



En la Figura 13 se observa el desarrollo del ensayo de Abrasión de Los Ángeles ejecutado según la ASTM C535, cuyo propósito es la determinación la resistencia mecánica al desgaste de los agregados gruesos al cuantificar el porcentaje de degradación o bien, el porcentaje de trituración de las partículas ocasionada por el efecto del impacto y la acción de frotamiento mecánico.

3.6.3. Evaluación de los parámetros establecidos por la MOP – 001-F 2002 para verificación de requisitos técnicos para subbase granular clase 3.

Según parámetros establecidos por la MOP-001-F, (2002), entre los requisitos técnicos para que un material granular se pueda desempeñar como subbase clase 3 están los límites granulométricos reflejados en la Tabla 5 del capítulo 2, los cuales corresponden a los límites de gradación para los materiales granulares de subbase tanto para clase 1, 2, 3.

De la misma manera, entre los parámetros exigidos para que el material pueda desempeñarse como subbase clase 3 debe cumplir simultáneamente con los límites de consistencia, capacidad de soporte mínima y no superar el porcentaje de desgaste exigido.

Tabla 9

Requisitos para subbase granular según MOP - 001 - F 2002

ENSAYO	TOLERANCIA
LL	$\leq 25\%$
IP	$< 6\%$
CAPACIDAD DE SOPORTE	$\geq 30\%$
ABRASIÓN	$\leq 50\%$

Fuente: (MOP-001-F, 2002), sección 403.1.02.

Nota: LL = Limite Liquido; IP = Indice de Plasticidad.

La tabla 9 refleja que debe de tener un Limite Liquido menor o igual que 25%, un índice de plasticidad inferior a 6%, una capacidad de soporte mayor o igual al 30% y un porcentaje de desgaste determinado mediante el ensayo de Abrasión de los Ángeles de 50% como máximo.

3.6.4. Determinación del contenido optimo de residuos de la construcción y demolición incorporados en el material granular

Posterior a la verificación del material inicial como subbase granular clase 3 se determina el contenido optimo de RCD incorporado en la subbase granular, en la cual se realizaron varias combinaciones, entre la subbase y RCD, 20%, 30% y 40% respectivamente, verificando que la granulometría cumpla con los limites granulométricos exigidos en la ASTM D3515-01, (2001), debido a que la presente investigación someterá la mezcla optima a procesos de estabilización emulsión asfáltica, por ende la granulometría que cumpla con las exigencias se empleara para los ensayos del O.E.1 y O.E.3 de la investigación, asimismo se definió el contenido optimo de RCD considerando la factibilidad de preparación y procesamiento del material. Posteriormente se verifica que el contenido optimo de RCD en la subbase cumpla con la granulometría exigida en la MOP-001-F, (2002) tabla 404-6.1, para estabilizados con

cemento de acuerdo al O.E.2. No obstante, en caso de no satisfacer la franja granulométrica se buscará la incorporación de RCD que cumpla con los límites exigidos.

Luego se realizan los ensayos de caracterización del material, límites de Atterberg, CBR y abrasión de los ángeles para verificar las modificaciones que provoca la incorporación de RCD en las propiedades físicas y mecánicas del material inicial y si pudiera condicionar su desempeño en las capas granulares de pavimentos flexibles.

Cabe recalcar que la selección de la distribución granulométrica correspondiente a un tamaño máximo nominal del agregado de 3/4", por ende se referencian los rangos granulométricos de acuerdo a la norma ASTM D3515-01 para 3/4".

Tabla 10

Franja Granulométrica según ASTM D3515 tamaño nominal 3/4"

TAMIZ	ABERTURA	ASTM D3515
3"	76.2 mm	100
1 1/2"	38.1 mm	100
1"	25.4 mm	100
3/4"	19.0 mm	90-100
3/8"	9,5 mm	56-80
Nº 4	4.75 mm	35-65
Nº 8	2.36 mm	23-49
Nº 50	0.300 mm	5-19
Nº 200	0.075 mm	2-8

3.7. METODOLOGÍA DEL OE2, EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO MECANICO DE MEZCLAS ESTABILIZADAS CON CEMENTO

La evaluación del desempeño mecánico de los materiales de estudio estabilizados con cemento hidráulico MH se llevan a cabo en función a las especificaciones MOP-001-F-2002, iniciando por la verificación de la franja granulométrica exigida para bases estabilizadas con cemento de acuerdo con la sección 815 tabla 404-6.1.

3.7.1. Distribución de partículas para bases estabilizadas con cemento según MOP-001-F-2002

De acuerdo con el contenido óptimo de RCD incorporado al material inicial de subbase granular de la cantera Juan Montalvo se analiza si la distribución de partículas satisface las exigencias para bases estabilizadas con cemento, para su posterior caracterización mecánica mediante ensayos de laboratorio.

Tabla 11

Franja Granulométrica según MOP para bases estabilizadas con cemento

TAMIZ	Porcentaje en peso que pasa a través de los tamices de malla cuadrada
3" (76.2 mm.)	100
¾" (19.0 mm.)	60 - 100
Nº. 4 (4.75 mm.)	40 - 75
Nº 10 (2.00 mm.)	30 - 50
Nº 40 (0.425 mm.)	15 - 35
Nº 200 (0.075 mm.)	5 - 15

Fuente: (MOP-001-F, 2002), sección 815, tabla 404-6.1.

La tabla 10 refleja los límites granulométricos en función al porcentaje que pasa por cada tamiz exigido, requiriendo mayor contenido de agregados gruesos y poca presencia de finos en el material destinado para bases estabilizadas con cemento establecidos por el Ministerio de Obras Públicas.

3.7.2. Ensayos de caracterización de estabilizados con cemento

Para la metodología del OE2 y la evaluación del desempeño mecánico de mezclas estabilizadas de material de subbase granular + cemento y subbase granular + RCD + cemento, sometidas a estabilización específicamente con cemento hidráulico MH (moderado calor de hidratación), se necesita realizar varios ensayos de caracterización de estabilizados con cemento, para ello se ha procedido a trabajar con dos tipos de mezcla: en la primera mezcla se utiliza material de subbase granular y cemento, y en la segunda mezcla se utiliza subbase granular, cemento y residuos de construcción y demolición, dicha estabilización se

realizó bajo las normas de la ASTM D1632-17 para la elaboración y curado de los cilindros y la resistencia a la compresión simple suelo-cemento la norma ASTM D 1633.

Para estas caracterizaciones se realizarán ensayos de resistencia a la compresión simple bajo la norma ASTM D1633, para determinar las caracterizaciones de la mezcla se realizaron ensayos donde se puede medir la resistencia a compresión simple de las mezclas estabilizadas con cemento y su posible desempeño como material de base estabilizada.

Previo al proceso de estabilización se verificó el cumplimiento de los requisitos establecidos para materiales destinados a bases estabilizadas con cemento hidráulico MH.

Esta fase tiene como propósito evaluar el efecto que induce el cemento hidráulico MH, en el desempeño mecánico de las mezclas, subbase granular + RCD y examinar su posible uso como material de base estabilizada determina si la incorporación de cemento ayuda a mejorar las características mecánicas de las mezclas.

Para evaluar el desempeño de las mezclas estabilizadas con cemento, se referencian requisitos técnicos establecidos en las especificaciones MOP-001-F, (2002), los cuales establecen los siguientes parámetros:

Tabla 12

Requisitos técnico para base estabilizada con cemento según MOP - 001 - F 2002

ENSAYO	TOLERANCIA
LL	$\leq 30\%$
IP	$< 9\%$
F'c	$\geq 18 \text{ Kg/cm}^2$ (7 días)
GRADO DE COMPACTACIÓN	100%

Fuente: (MOP-001-F, 2002), sección 815-2.03; 404-2.04 y 404-6.04

Nota: LL = Limite Liquido; IP = Índice de Plasticidad; F'c = Resistencia a la compresión.

Estos parámetros técnicos reflejados en la tabla 11 permiten verificar el desempeño de las propiedades físico-mecánicas de las mezclas evaluadas, y establecer su viabilidad como material de base estabilizada en los pavimentos flexibles y los requisitos técnicos para la

base estabilizada con cemento, los cuales son: límite de líquido, índice de plasticidad, la resistencia a compresión y el 100 % de la densidad máxima de referencia.

Cabe recalcar que, para los materiales de estudio, se adoptó un criterio conservador, si bien el material se diseña como material de base de suelo-cemento sección 815-2.02 debido a su distribución de partículas, se integran parámetros de caracterización como el LL, IP y grado de compactación, de acuerdo con la sección 815-2.03 como filtro de calidad complementario, garantizando que la materia no presente una plasticidad excesiva y un adecuado proceso de compactación.

3.7.3. Dosificación de las mezclas con cemento

Para la elaboración de los cilindros de los materiales de estudio (subbase y subbase + RCD), se realizaron varias dosificaciones para determinar el contenido óptimo de cemento hidráulico MH en las mezclas estabilizadas. Previo al proceso de dosificación se verificó la clasificación AASHTO, de acuerdo con los ensayos de caracterización física, las cuales los materiales de estudio corresponden a el grupo A-1-a según clasificación AASHTO. Por ende, se consideraron dosificaciones de cemento hidráulico MH con adición de 3%, 4%, y 5% en función al peso de la muestra de 12000 gramos por cilindro, las cuales se encuentran dentro del rango de cemento en función al tipo de material establecido por (Surita Gil et al., 2023), específicamente en la tabla 6 del marco teórico.

Cabe que recalcar que por cada porcentaje de cemento hidráulico MH 3%, 4% y 5% (del peso del material para cada cilindro), con 2 réplicas por porcentaje, es un total de 6 cilindros distribuidos por porcentaje de cemento hidráulico MH y por cada material de estudio, es decir un total de 12 cilindros (suelo-cemento).

Figura 14

Cemento hidráulico MH



Nota: Cemento tipo MH (moderado calor de hidratación) empleado como conglomerante para la estabilización de los materiales de estudio.

El contenido de agua se determinó a partir del contenido óptimo de humedad obtenido mediante el ensayo Proctor Modificado ASTM D1557, es decir si el Proctor modificado obtuvo un 7% de humedad optima, el 7% de 12000 (peso del material a ensayar por cilindro) equivalen a 840 mililitros de agua necesaria para cada cilindro a realizarse.

Una vez obtenido el material necesario para el proceso de estabilización, como primer paso, se mezcló el material de subbase granular con cemento, hasta tener una mezcla homogénea, posteriormente se añadirá una cierta cantidad de agua, una vez que la mezcla esta lista se procederá a realizar el proceso de compactación

Figura 15

Dosificación del material con cemento



Nota: Mezcla del material con su dosificación establecida, para su posterior compactación

3.7.4. Proceso de compactación

Para el diseño de estas mezclas se tomó como referencia los procedimientos de las especificaciones MOP-001-F, 2002 (suelo-cemento) y ASTM D1632-17 (orientada en especímenes moldeados).

Para el proceso de compactación, la mezcla fue colocada en moldes de cilindros en cuatro capas, donde cada capa fue compactada mediante un rotomartillo con accesorio compactador, además antes de añadir la siguiente capa de muestra a compactar se raya la

superficie con un destornillador plano con el fin de favorecer la adherencia entre capas. Cabe recalcar que el proceso de moldeo y elaboración de especímenes se realzo conforme a la norma (ASTM D1632-17, 2017).

Figura 16

Proceso de compactación



Nota: Compactación de los cilindros en 4 cuatros capas.

Una vez concluido el proceso de compactación de los materiales de estudio se deja en reposo el material durante 3 días, para su posterior desencofrado, las cuales luego fueron envueltas con plástico para conservar la humeada interna del material y evitar perdida de humedad, garantizando un adecuado proceso de curado hasta ser sometido a compresión simple, asimismo, fueron almacenados en condiciones ambientales de laboratorio para evitar exposición directa con el sol, hasta alcanzar las edades de 7 y 28 días para ser sometido al ensayo de compresión simple. Cabe recalcar que el procedimiento de elaboración de las probetas y curado de los materiales de estudio se realizó tomando de referencia la norma (ASTM D1632-17, 2017).

Figura 17

Curado de cilindros



Nota. Curado de los materiales de estudio para evitar pérdida de humedad y garantizar resultados más precisos en la muestra sometida a ensayo de compresión simple.

Posteriormente se registran las características físicas de las probetas, considerando el diámetro, la altura y el peso de cada probeta elaborada, para determinar el área del cilindro y con ello la densidad de cada probeta, para determinar el grado de compactación objetivo de 100% de acuerdo a las especificaciones MOP-001-F, (2002), para bases estabilizadas con cemento.

En este sentido, las fórmulas para el cálculo de área, densidad y grado de compactación son las siguientes:

$$\text{Area de la base de la probeta} = \pi x \left(\frac{\text{diametro}}{2} \right)^2 \quad \text{Ecuación (1)}$$

Donde:

$$\pi = 3.1416$$

Diámetro: cm

Para la densidad de las mezclas

$$\text{Densidad} = \left(\frac{\text{Peso}}{\text{Area} \times \text{Altura}} \right) \quad \text{Ecuación (2)}$$

Peso = gramos

Area = cm²

Altura = cm

$$\text{Grado de compactacion (\%)} = \frac{\text{Densidad seca de la probeta}}{\text{Densidad seca maxima del Proctor}} \times 100 \quad \text{Ecuación (3)}$$

Estos parámetros sirven para caracterizar el espécimen y reportar las condiciones en la que fue elaborada cada probeta según su dosificación y verificar si cumple con el grado de compactación exigido en función al 100 % de la densidad máxima de referencia determinada mediante la ASTM D1557.

3.7.5. Proceso de capeado o refrentado

El refrentado conforme a la norma ASTM C617/C617M-23, (2023) se realizó con el fin de obtener superficies planas y paralelas que permitan una distribución uniforme de esfuerzos durante el ensayo de compresión simple de acuerdo con la (ASTM D 1633, 2007).

El proceso de capeado se lo realiza mediante un mortero compuesto por cemento, arena y agua, el cual se coloca para obtener superficies planas y paralelas que permitan una distribución uniforme de esfuerzos durante el ensayo de compresión simple. Luego se procederá a colocar el cilindro sobre la superficie que se encuentra capeada, de la misma manera se ejerce un poco de fuerza para compactarla y por último cuando el molde de capeado y el cilindro se encuentren seco se procede a retirarlo el molde de capeado junto con el cilindro dejando secar hasta obtener un material uniforme y se pueda realizar el proceso en ambas caras del cilindro (arriba y abajo).

Figura 18

Proceso de capeado o refrentado



3.7.6. Ensayo de compresión simple

Después del proceso de capeado se realiza el ensayo de compresión simple de acuerdo a la ASTM D1633, para determinar la resistencia que poseen los cilindros a los 7 y 28 días, con el fin de obtener el porcentaje óptimo de cemento, mediante el material ensayado que refleje 25 Kg/cm^2 de resistencia de acuerdo con la MOP-001-F, (2002), esto se lo realiza para verificar cual es el porcentaje adecuado de cemento que hay que utilizar para que el suelo se encuentre estabilizado.

Cabe recalcar que el criterio de falla se establece cuando el espécimen alcanza su carga máxima o presenta una rotura evidente y la velocidad de carga es de 1.27 mm/min (0.05

in/min) de movimiento del cabezal de la máquina de compresión simple de acuerdo con la norma ASTM D1633.

Figura 19

Ensayo de compresión simple



Nota: Rotura de cilindros de los materiales estabilizados mediante compresión simple, para evaluar el comportamiento mecánico de los materiales de estudio conformados por “subbase granular + cemento hidráulico MH” y “subbase granular + RCD + cemento hidráulico MH”.

3.8. METODOLOGÍA DEL OE3, EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO MECANICO DE MEZCLAS ESTABILIZADAS CON EMULSIÓN ASFÁLTICA.

3.8.1. Diseño de mezclas estabilizadas con emulsión asfáltica

La granulometría utilizada para el diseño de la mezcla estabilizada con emulsión asfáltica correspondió al material clasificado de acuerdo a la ASTM D3515-01, (2001), y se realizó un diseño de mezcla asfáltica, donde se evaluaron 4 puntos con porcentajes de emulsión asfáltica de: 2%, 4%, 6% y 8% (del peso del material para cada briqueta), con 3 réplicas por porcentaje, es decir un total de 12 briquetas distribuidas por porcentaje de emulsión asfáltica y por cada material del estudio, es decir 24 briquetas para determinar el porcentaje de asfalto óptimo de cada mezcla.

Luego de este proceso se realizaron 12 briquetas adicionales con el porcentaje óptimo de emulsión asfáltica que fue determinado previamente mediante el diseño Marshall, donde las briquetas fueron sometidas a estabilidad y flujo Marshall, conservación de estabilidad, de

acuerdo a los parámetros establecidos por la MOP-001-F, (2002) para estabilizados con emulsión asfáltica y resistencia a la tracción indirecta retenida (TSR) con el fin de analizar el desempeño mecánico de las mezclas estudiadas en condiciones de servicio y humedad.

3.8.2. Preparación de las mezclas para las briquetas

Para la preparación de la mezcla para la construcción de las briquetas se ha utilizado 1200 gramos del material, así como también una cierta cantidad de emulsión en base al diseño Marshall, el proceso de preparación se realizó de igual manera en base a las características mecánicas que poseen los materiales como la humedad optima que fue obtenida mediante el ensayo de Proctor modificados según la norma ASTM D1557, usando el método C de acuerdo con la granulometría.

3.8.3. Proceso de mezcla de los materiales de estudio

Se utilizo un total de 1200 gramos del material en estado seco, el cual se dosifico la cantidad de agua de acuerdo con la humedad optima del Proctor modificado por ejemplo para el material granular de subbase se le agrego el 7.2% del peso del material, es decir un total de 72 gramos de agua, la cual fue agregada al material, para posteriormente mezclar y lograr una mezcla homogénea lista para agregar la emulsión asfáltica de acuerdo al porcentaje de diseño Marshall, por ejemplo para 8% se utilizó 96 gramos de emulsión asfáltica de acuerdo al peso del material.

Figura 20

Mezcla de emulsión asfáltica con el material de estudio



Nota: Mezclado del material de estudio con la emulsión asfáltica CSS-1H, hasta obtener una mezcla homogénea y continuar con el proceso de compactación de las briquetas con su respectiva dosificación.

3.8.4. Proceso de compactación

De acuerdo con el procedimiento de Marshall modificado aplicada en mezclas estabilizadas con emulsión asfáltica CSS-1H, se llevó a cabo la compactación de las briquetas aplicando una energía de compactación de 75 golpes por cara. Las dimensiones de la briketa son de 101.5 mm de diámetro y altura de ≈ 57 -59 mm (ASTM D6927, 2022).

Figura 21

Compactación de las briquetas



Nota. Proceso de compactación de las briquetas a 75 golpes por cara de la muestra ensayada.

3.8.5. Curado y medidas físicas

Para el proceso de curado y obtención de las medidas físicas de las briquetas que contienen emulsión asfáltica, las briquetas han sido sometidas en un horno a una temperatura de 60°C durante 48 horas para favorecer la evaporación de agua de la emulsión, de acuerdo con el procedimiento descrito en el manual (Asphalt Institute MS-14, 2005). Una vez ya secas las briquetas y se registraron medidas físicas se procedió a desencostrarlas para así tomar las medidas tanto de su diámetro, altura y pesos en aire, peso superficialmente seco y peso sumergido de la briketa para determinar las propiedades volumétricas y mecánicas de las mezclas.

Figura 22

Curado a 60°C en horno durante 48 horas



3.8.6. Ensayos volumétricos

a) PESO ESPECÍFICO DE LAS BRIQUETAS

Para el peso específico de las briquetas se toma inicialmente el peso en aire, peso saturado superficialmente seco y peso sumergido, datos numéricos que luego son reemplazados en la fórmula para determinar el peso específico:

$$Gmb = \frac{Wa}{W_{sss} - W_{sumergido}} \quad \text{Ecuación (4)}$$

Donde:

Gmb = Gravedad específica aparente de mezclas asfálticas compactadas

Wa = Peso de la briketa seca

Wsss = Peso saturado superficialmente seco (SSS)

Wsumergido = Peso sumergido

b) PESO ESPECIFICO BULK COMBINADO DE LOS AGREGADOS (GSB)

Se determino la gravedad específica bulk combinada de los agregados en función a las gravedades específicas de los agregados gruesos y finos. Donde, se agregaron las porciones de los agregados de acuerdo con la granulometría de diseño de la mezcla de estudio.

$$Gsb = \frac{100}{\frac{\%Agregado\ grueso}{Gsb\ Grueso} + \frac{\%Agregado\ Fino}{Gsb\ Fino}} \quad \text{Ecuación (5)}$$

Donde el GSB grueso proviene de

$$Gsb\ Grueso = \frac{W_{seco}}{W_{sss} - W_{sumergido}} \quad \text{Ecuación (6)}$$

Wseco = Peso de la muestra seca

Wsss = Peso saturado superficialmente seco (SSS)

Wsumergido = Peso sumergido, usando la canastilla

Y para el GSB Fino proviene de

$$Gsb\ Fino = \frac{W_{seco}}{W_{matraz\ con\ agua} + W_{sss} - W_{matraz\ con\ agua\ y\ muestra}} \text{ Ecuación (7)}$$

Donde:

A= Peso de muestra seca

B= Peso del matraz con agua

D= Peso saturado superficialmente seco

C= Peso matraz + agua + muestra

El % Agregado Grueso y % Agregado Fino provienen del análisis granulométrico del diseño de la mezcla

c) GRAVEDAD ESPECIFICA MÁXIMA TEORICA (Gmm)

Para seguir con el diseño Marshall es fundamental el cálculo de %Vacíos de aire, VMA y VFA, el Gmb y Gsb y también es importante el cálculo de la gravedad específica teórica máxima o ensayo rice de acuerdo con la norma (ASTM D 2041, 2000).

$$Gmm = \frac{A}{A+B-E} \text{ Ecuación (8)}$$

Donde:

A = Masa de la muestra seca

D = Masa del recipiente de vacío (olla metálica) + agua

E = Masa de recipiente de vacío (olla metálica) + muestra + agua

Figura 23

Proceso de ensayo Rice



Nota: Las figuras muestran las etapas del ensayo Rice; en la izquierda, el llenado del recipiente con agua y muestra; a la derecha, el proceso de evacuación de aire (vacío), para determinar la gravedad específica máxima teórica.

d) Ensayo de estabilidad Marshall

Antes de someter las briquetas al ensayo de estabilidad Marshall, se realizó por 2 horas a 25°C el baño maría. Posteriormente se realizó el ensayo de estabilidad de Marshall de acuerdo a la norma ASTM D6927, (2022) con velocidad constante de aplicación de carga vertical de 50.8 mm/min (2 in/min) para determinar la estabilidad y flujo de Marshall en las mezclas estabilizadas con emulsión asfáltica CSS-1H. Con el fin de evaluar las propiedades mecánicas que poseen las mezclas que contienen emulsión asfáltica, se contemplan los criterios de aceptación establecidos por normativa MOP-001-F, (2002) para bases estabilizadas, los cuales exigen una estabilidad mínima de 750 lbs y un rango de flujo admisible de 5 a 18 centésimas de pulgada (1/100”).

Figura 24

Proceso del baño maría a 25 °C



Nota: Proceso de inmersión de las muestras de estudio sometidas a baño maría a 25°C para su posterior ensayo.

Figura 25

Ensayo de estabilidad y flujo Marshall



Nota: Rotura de briquetas en la presa Marshall para determinar la estabilidad y el flujo.

Los resultados reflejados permitieron realizar las curvas de estabilidad vs emulsión, flujo vs emulsión, %Vacíos de aire vs emulsión y determinar el porcentaje de emulsión asfáltica óptimo como estabilizante de las mezclas, subbase granular + emulsión asfáltica y subbase granular + RCD + emulsión asfáltica y evaluar el desempeño mecánico como material estabilizado con asfalto.

3.8.7. Contenido óptimo de emulsión asfáltica

El contenido óptimo de emulsión asfáltica se establece a partir de los resultados del ensayo Marshall, considerando como criterio principal la estabilidad, donde primero se identificó la mezcla que presenta mayor estabilidad y dicha dosificación se verificó que cumpla con los parámetros de diseño Marshall como el flujo, porcentajes de vacíos de aire, además de un TSR superior a 70%, los cuales satisfacen los rangos establecidos para mezclas estabilizadas en frío.

a) Análisis de las propiedades mecánicas de las mezclas con el contenido óptimo de emulsión asfáltica CSS-1h

Para realizar el análisis de las propiedades mecánicas de las mezclas con el contenido óptimo de emulsión asfáltica, se confeccionó un total de 12 briquetas distribuidas en dos grupos experimentales de 6 briquetas: grupo 1 se ensayó tras 2 horas de inmersión a 25°C, 3 briquetas para Marshall y 3 para tracción indirecta, de la misma manera el grupo 2 se ensayó tras 24 horas de inmersión a 25°C, 3 briquetas para obtener la estabilidad retenida y 3 para tracción indirecta, siguiendo la metodología de diseño y preparación con emulsión asfáltica del (Asphalt Institute MS-14, 2005), y criterios de aceptación conforme a la (MOP-001-F, 2002).

El ensayo utilizado en las briquetas servirá para evaluar la estabilidad y la resistencia de tracción de los materiales.

Tabla 13

Parámetros establecidos por la MOP – 001 F 2002 para bases estabilizadas con emulsión asfáltica

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

Fuente: (MOP-001-F, 2002), tabla 404-4.2

La tabla 12 detalla los parámetros exigido para bases estabilizadas con emulsiones asfálticas, requiriendo una estabilidad mínima de 750 lb, garantizando un material resistente antes las cargas del tránsito vehicular y mitigar daños a corto plazo, mientras que el flujo asegura una deformabilidad controlada, lo que permite evitar obtener un material muy rígido que pueda tener problemas como el agrietamiento, por ello es fundamental para determinar el desempeño adecuado de los materiales de estudio conformada por 65% subbase y 35% RCD para su posible aplicación como base estabilizada con emulsión asfáltica

Tabla 14

Criterios Marshall

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 (lb)	2200	----	1800	----	1200	----	1000	2400
Flujo (1/100")	8	14	8	14	8	16	8	16
% de vacíos en mezcla								
Capa Intermedia	3	8	3	8	3	8	3	8

Fuente: (MOP-001-F, 2002) sección 4 Tabla 405.5.4

La tabla 13 muestra criterios de aceptación y parámetros que la MOP-001-F (2002) específica para el diseño Marshall, entre los que se incluyen: el número de golpes, la estabilidad, el flujo y el porcentaje de vacíos. Los criterios técnicos, son la base para evaluar el desempeño mecánico y son tomados en cuenta en el diseño de las mezclas estabilizadas con emulsión asfáltica desarrolladas en esta investigación. Se usarán los parámetros de estabilidad, flujo y porcentaje de vacíos para elegir el contenido óptimo de emulsión y comprobar si las mezclas con incorporación de RCD cumplen los requisitos técnicos necesarios para su posible aplicación como material de base estabilizada en pavimentos flexibles.

b) Ensayo de Conservación de Estabilidad Marshall

Para determinar la conservación de estabilidad Marshall se evalúa principalmente la estabilidad Marshall de 12 briquetas ensayadas, divididas en 2 grupos, donde el grupo 1 se ensaya tras 2 horas de inmersión a 25°C, 3 briquetas por material de estudio y el grupo 2 se ensaya tras 24 horas de inmersión a 25°C, 3 briquetas por material de estudio, es decir un total de 12 briquetas, divididas en 6 briquetas para subbase + emulsión asfáltica y 6 briquetas para subbase + RCD + emulsión asfáltica.

Para el cálculo de la conservación de estabilidad Marshall se determinó mediante la relación de la estabilidad Marshall promedio tras 24 horas de inmersión y la estabilidad Marshall promedio tras 2 horas de inmersión, expresando como resultado el porcentaje de estabilidad retenida.

$$\text{Estabilidad retenida } \% = \frac{\text{Estabilidad (24 horas)}}{\text{Estabilidad (2 horas)}} \times 100 \quad \text{Ecuación (9)}$$

Donde:

Estabilidad (24 horas) = estabilidad promedio de las 3 briquetas ensayadas tras 24 horas de inmersión

Estabilidad (2 horas) = estabilidad promedio de las 3 briquetas ensayadas tras 2 horas de inmersión

De acuerdo con la MOP-001-F, (2002), la estabilidad retenida mínima debe ser 70%, criterio utilizado para evaluar la susceptibilidad de las mezclas evaluadas frente acción de agua.

c) Tensile Strength Ratio o Relación de Resistencia a la Tracción (TSR)

Para la durabilidad de los materiales destinados a construcción de pavimentos se emplea la Razón de Resistencia Retenida (TSR) a la tracción indirecta, en función a la norma AASHTO T 283, (2005), la cual mide la pérdida de resistencia en condiciones de humedad (Lanamme-UCR, 2025). Un TSR tiende a ser aceptado cuando supera los 70% siendo un indicador de resistencia a la humedad.

El ensayo de TSR, es decir la resistencia a la tracción indirecta, se evaluó mediante el uso del cabezal de Lottman adaptado a la prensa Marshall. Donde las briquetas se dividieron en 2 grupos por horas; por una parte, estaban las briquetas sometidas a inmersión por 2 horas a 25°C y por otro lado las que fueron sometidas a 24 horas a la misma temperatura, siguiendo la metodología establecida en el manual (Asphalt Institute MS-14, 2005).

La importancia de este parámetro radica en su capacidad para medir la susceptibilidad al daño por humedad y la pérdida de cohesión de la mezcla compactada. Un valor de TSR alto indica que el material conserva la mayor parte de su resistencia mecánica tras ser saturado, garantizando una alta durabilidad ante el agrietamiento y desprendimiento (stripping) provocado por el agua. Por el contrario, un TSR bajo denota una alta vulnerabilidad al deterioro prematuro por efectos ambientales. Para esta investigación, se establece como criterio de aceptación un valor mínimo de TSR del 70% límite técnico requerido para asegurar el correcto desempeño del material como base estabilizada en pavimentos flexibles.

$$St = \frac{2P_{max}}{\pi td} \quad \text{Ecuación (10)}$$

Donde:

St: resistencia de la rotura a la tracción indirecta

Pmax: Carga máxima aplicada al momento de la falla

t: espesor de la briketa (cm)

d: diámetro de la briketa (cm)

La resistencia de la rotura a la tracción indirecta (St) fue calculada para determinar la resistencia de cada briketa sometida al proceso de rotura. Siendo un proceso fundamental para determinar el cálculo de la Razón de resistencia retenida (TSR), debido a que este parámetro se obtiene de la relación de la resistencia a la tracción indirecta en estado de humedad y en estado seco, por ende, con el TSR se determina el porcentaje de resistencia que conservan las briquetas después del proceso de inmersión.

$$TSR = \frac{St_{cond}}{St_{no\ cond}} \times 100\% \quad \text{Ecuación (11)}$$

Donde:

St, cond: Resistencia a la tracción indirecta promedio de las briquetas sometidas a proceso de inmersión de 24 horas a 25°C.

St, no cond: Resistencia a la tracción indirecta promedio de las briquetas sometidas a proceso de inmersión de 2 horas a 25°C.

Figura 26

Briqueta luego de ser sometido al ensayo de TSR



Nota: sección interna de la muestra de estudio estabilizada con emulsión asfáltica (CSS-1H), tras la rotura a la tracción indirecta, orientada para evaluar la pérdida de cohesión y susceptibilidad al agua de la muestra.

3.9. METODOLOGÍA DEL O.E.4, EVALUACIÓN COMPARATIVA DEL COMPORTAMIENTO FÍSICO-MECÁNICO Y DETERMINACIÓN DE LA VIABILIDAD TÉCNICA DE LAS MEZCLAS EVALUADAS

i) Comparación de las propiedades físicas y mecánicas de las mezclas evaluadas al incorporar RCD

La evaluación comparativa de las propiedades físicas y mecánicas se realizó mediante el análisis de los resultados obtenidos en los ensayos de caracterización de subbase granular, mezcla modificada, con incorporación del 35% de RCD, para ellos se compararon parámetros como LL, IP, γ , ω_{opt} , CBR y abrasión.

Esta Comparativa se efectuó considerando las variaciones observadas entre ambos materiales verificando simultáneamente el cumplimiento de los requisitos establecidos, en la normativa MOP-001-F, (2002), para materiales destinados a subbase clase 3 y posteriormente con la determinación de contenido óptimo de RCD mediante la ASTM D3515-01, (2001), se determinó el impacto de la incorporación del RCD sobre el comportamiento mecánico del material de estudio y su posible aplicación en capas granulas para pavimentos flexibles.

ii) Comparación del desempeño de las mezclas estabilizadas con cemento hidráulico MH

La viabilidad técnica de las mezclas estabilizadas con cemento hidráulico MH se determinó mediante la comparación de $F'c$ en función a sus dosificaciones los cuales serán contrastados de acuerdo a las especificaciones de la MOP-001-F, (2002), considerando la evolución de $F'c$ y la cantidad necesaria de cemento hidráulico MH para alcanzar la resistencia exigida.

De esta manera se determinó la influencia que tiene el RCD en el comportamiento mecánico del material de estudio y determinamos su posible desempeño como base estabilizada con cemento hidráulico MH.

iii) Comparación del desempeño de las mezclas estabilizadas con emulsión asfáltica CSS-1h

En las mezclas estabilizadas con emulsión asfáltica CSS-1h, la evaluación comparativa se realizó mediante los resultados que se obtuvieron del ensayo de estabilidad y flujo Marshall y las especificaciones establecidas en la MOP-001-F-2002. Donde se verificó la estabilidad y flujo Marshall, conservación de estabilidad, y TSR, de la mezcla con su contenido óptimo de emulsión asfáltica, comparativamente de cada material ensayado, lo cual permitirá analizar la capacidad que tienen las mezclas para soportar las cargas del tránsito, además de su capacidad de deformación, y su comportamiento ante presencia de agua. Permitiendo evaluar la influencia que tiene la incorporación del RCD en el comportamiento mecánico del material estabilizado con emulsión asfáltica y determinar su posible desempeño como material de base estabilizada con emulsión asfáltica.

iv) Evaluación del cumplimiento de las normas

Todos los resultados obtenidos en función a los ensayos de laboratorio serán contrastados de acuerdo a especificaciones y normas establecidas en la ASTM; MOP-001-F, 2002; Asphalt Institute, según cada ensayo. Este análisis permitirá verificar si los resultados de las mezclas estudiadas cumplen como los parámetros exigidos para materiales de pavimentos flexibles.

Para finalizar se determinará la viabilidad técnica de la incorporación de RCD en las mezclas estudiadas sometidas a procesos de estabilización con cemento y emulsión asfáltica, y analizar su posible uso en los pavimentos flexibles ya que esto permitirá observar si el material reutilizado posee las características necesarias para ser utilizado en la construcción de pavimentos, de la misma manera se podrá observar cómo actúan cada uno de los materiales al ponerse el contacto con el pavimento cuando se realice la emulsión asfáltica.

CAPITULO IV

ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

4.1. ANALISIS DE RESULTADOS DEL O.E.1: CARACTERIZACIÓN FÍSICO-MECÁNICA DE LOS MATERIALES DE ESTUDIO

Para evaluar la influencia del RCD sobre las propiedades del material de estudio inicialmente se realiza la caracterización físico-mecánica de la subbase granular de cantera y subbase con incorporación de RCD.

4.1.1. Análisis granulométrico de la subbase granular inicial de estudio

Partiendo de la verificación del cumplimiento de requisitos técnicos de subbase granular 3 establecidos en tabla 5 (Usos granulométricos para material de subbase granular), reportando los siguientes resultados establecidos en la siguiente tabla:

Tabla 15

Franja granulométrica de Subbase Granular clase 3 según MOP-001-F-2002

Subbase granular de la cantera Juan Montalvo				
Tamiz	Abertura	% que pasa	MOP 403-1.1	
3"	76.2 mm	100	100	Cumple
N° 4	4.75 mm	55.05	30-70	Cumple
N° 200	0.075 mm	9.36	0-20	Cumple

Los resultados evidenciados en la tabla 14 reflejan que el material inicial de subbase granular de la cantera Juan Montalvo cumple con la franja granulométrica de subbase clase 3, con poca presencia de finos. Sin embargo, para desempeñarse como subbase clase 3 debe satisfacer varios límites exigidos en las especificaciones MOP-001-F-2002.

Tabla 16

Distribución del tamaño de partículas de la Subbase granular de la cantera Juan Montalvo

Distribución del tamaño de las partículas (%)			
Grava (3"-N°4)	Gruesa (3"-3/4")	5.04%	44.95%
	Fina (3/4"- N°4)	39.91%	
Arena (N°4-N°200)	Gruesa (N°4 - N°10)	15.71%	45.69%
	Media (N°10 - N°40)	17.47%	
	Fina (N°40 - N°200)	12.51%	
Finos (>N°200)			9.36%

El análisis de resultados evidencia que la composición del material de subbase granular de la cantera Juan Montalvo reflejada en la tabla 15 está compuesta por un 44.95% de agregado grueso, 45.69% de arena y 9.36% de finos, lo cual muestra el predominio que tiene las fracciones gruesas y arenosas del material con un 90.64%, siendo una grava arenosa, características de una material de subbase utilizada para la construcción de pavimentos, además estas características contribuyen al desarrollo de una estructura con poca plasticidad y adecuada respuesta estructural frente a las cargas de tránsito vehicular, mientras que la presencia de pocos finos en el material disminuye la susceptibilidad a la retención de agua y deformaciones por cambio de humedad.

4.1.2. Verificación de cumplimiento normativo para materiales de subbase clase 3 y análisis de las propiedades físico-mecánicas

La caracterización del material inicial de subbase granular permitieron determinar las propiedades físicas y mecánicas mediante ensayos de límites de Atterberg que permite obtener el límite líquido y la plasticidad del material, asimismo la capacidad de soporte de los materiales por medio del ensayo CBR y la resistencia al desgaste con el ensayo de Abrasión de los Ángeles, los cuales permiten verificar la influencia de las características de la subbase granular en los pavimentos flexibles.

Tabla 17

Verificación de especificaciones técnicas para Subbase Granular clase 3 según MOP-001-F-2002

MATERIAL	ENSAYOS	RESULTADOS	MOP 403.1.02.	CUMPLIMIENTO
SUBBASE JUAN	LL	24.41 %	$\leq 25 \%$	CUMPLE
	IP	5.40 %	$< 6 \%$	CUMPLE
MONTALVO	CBR	35.54 %	$\geq 30 \%$	CUMPLE
	ABRASIÓN	42.70 %	$\leq 50 \%$	CUMPLE

Nota: LL (Limite liquido); IP (Índice de plasticidad)

Los resultados de la caracterización de la subbase granular detallada en la tabla 16 evidencian que el material cumple con las exigencias para que un material pueda desempeñarse como subbase granular en los pavimentos flexibles, de acuerdo con la MOP-001-F, (2002), por una parte los valores de limite liquido e índice de plasticidad reflejan una reducida susceptibilidad en condiciones de cambio de temperatura, asimismo el valor de CBR determina que el material presenta una adecuada capacidad portante, además el desgaste del material al no superar los 50%, indica que el agregado no presenta una pérdida excesiva del material por efecto del desgaste.

El cumplimiento de las especificación exigidas para una subbase clase 3 confirmó que el material inicial (Subbase clase 3 de la cantera Juan Montalvo) presenta condiciones adecuadas para ser utilizado como referencia para la investigación, lo cual da paso a la determinación del contenido optimo del RCD conforme a la (ASTM D3515-01, 2001).

4.1.3. Determinación del contenido optimo de RCD incorporado en la subbase granular

Para la determinación del contenido optimo de RCD incorporado en la subbase granular se realizaron varias combinaciones en función a los limites granulométricos (ASTM D3515-01, 2001), reportando los siguientes resultados:

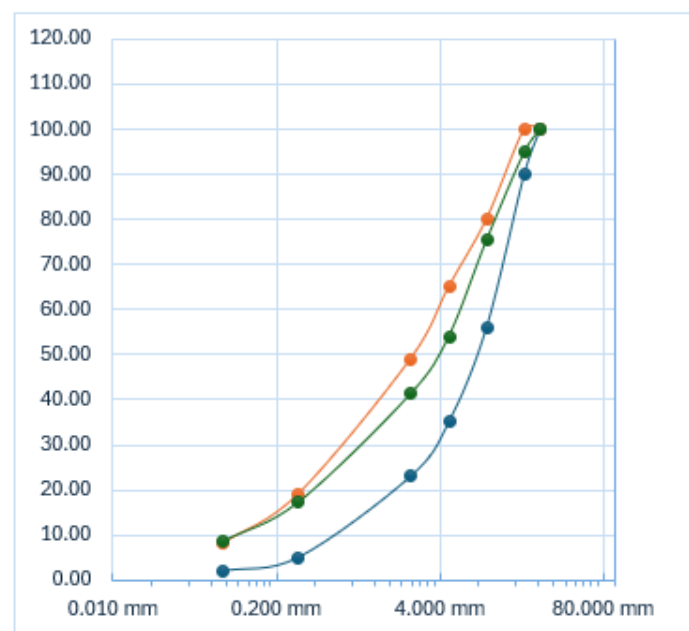
Tabla 18

Resultados de la granulometría 80% Subbase granular + 20% RCD

TAMIZ	ABERTURA	% QUE PASA	ASTM D3515	
3"	76.2 mm	100	100	CUMPLE
1 1/2"	38.1 mm	100	100	CUMPLE
1"	25.4 mm	100	100	CUMPLE
3/4"	19.0 mm	94.95	90-100	CUMPLE
3/8"	9,5 mm	75.41	56-80	CUMPLE
Nº 4	4.75 mm	54.04	35-65	CUMPLE
Nº 8	2.36 mm	41.30	23-49	CUMPLE
Nº 50	0.300 mm	17.22	5-19	CUMPLE
Nº 200	0.075 mm	8.52	2-8	NO CUMPLE

Figura 27

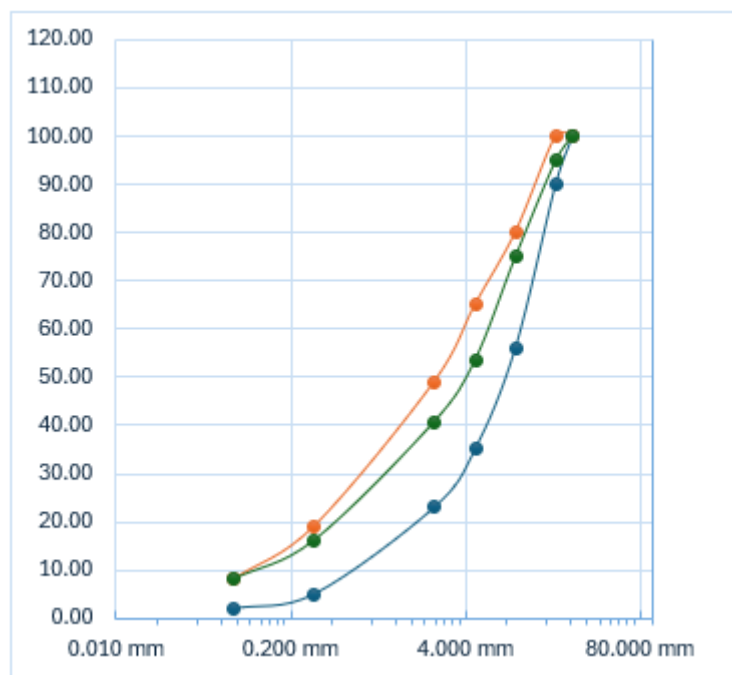
Curva granulométrica de la combinación 80% subbase granular + 20% RCD



Los resultados de la granulometría con la combinación del 80% subbase granular + 20% RCD, presentadas en la tabla 17 y figura 27, evidencian modificaciones en la distribución granulométrica debido al aporte de partículas con mayor tamaño y menor contenido de finos en el RCD. Sin embargo, en el tamiz Nº 200 el porcentaje pasa el límite establecido por la ASTM D3515-01, (2001) para tamaño máximo del agregado 3/4", es decir no cumple con el límite exigido.

Tabla 19*Resultados de la granulometría 70% Subbase granular + 30% RCD*

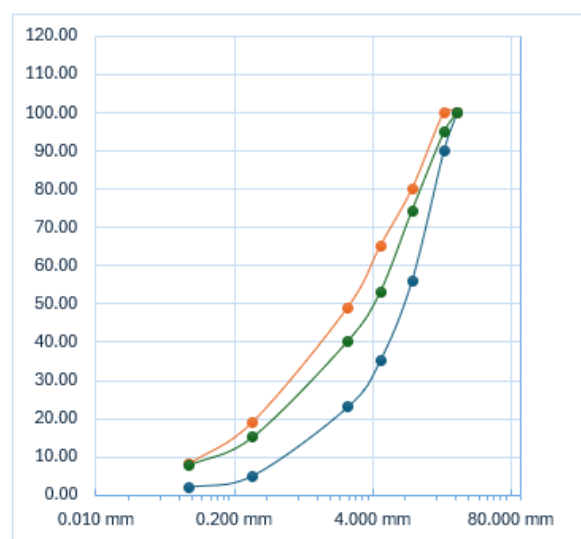
Tamiz	Abertura	% que pasa	ASTM d3515	
3"	76.2 mm	100	100	CUMPLE
1 1/2"	38.1 mm	100	100	CUMPLE
1"	25.4 mm	100	100	CUMPLE
3/4"	19.0 mm	94.94	90-100	CUMPLE
3/8"	9,5 mm	74.93	56-80	CUMPLE
N° 4	4.75 mm	53.53	35-65	CUMPLE
N° 8	2.36 mm	40.77	23-49	CUMPLE
N° 50	0.300 mm	16.16	5-19	CUMPLE
N° 200	0.075 mm	8.10	2-8	NO CUMPLE

Figura 28*Curva granulométrica de la combinación 70% subbase granular + 30% RCD*

Los resultados de la granulometría con la combinación de 70% subbase granular + 30% RCD evidencian como se va modificando la granulometría y como disminuye en el tamiz N°200 en comparación con el 20% de RCD debido a que reduce el contenido de finos en el material, sin embargo, aún no cumple en su totalidad con los límites granulométricos exigidos por la (ASTM D3515-01, 2001).

Tabla 20*Resultados de la granulometría 60% Subbase granular + 40% RCD*

TAMIZ	ABERTURA	% QUE PASA	ASTM D3515	
3"	76.2 mm	100	100	CUMPLE
1 1/2"	38.1 mm	100	100	CUMPLE
1"	25.4 mm	100	100	CUMPLE
3/4"	19.0 mm	94.94	90-100	CUMPLE
3/8"	9,5 mm	74.44	56-80	CUMPLE
Nº 4	4.75 mm	53.03	35-65	CUMPLE
Nº 8	2.36 mm	40.25	23-49	CUMPLE
Nº 50	0.300 mm	15.09	5-19	CUMPLE
Nº 200	0.075 mm	7.67	2-8	CUMPLE

Figura 29*Curva granulométrica de la combinación 60% subbase granular + 40% RCD*

Los resultados de la combinación del 60% subbase granular + 40% RCD cumplen con las especificaciones exigidas para subbase granular, sin embargo, a partir de los resultados se seleccionó una dosificación intermedia de 65% subbase granular + 35% RCD debido a que presenta el menor contenido de RCD que permitió satisfacer los límites granulométricos exigidos en la ASTM D3515-01, (2001), siendo la dosificación utilizada para el desarrollo de la investigación.

4.1.4. Variación granulométrica de la mezcla subbase granular + RCD

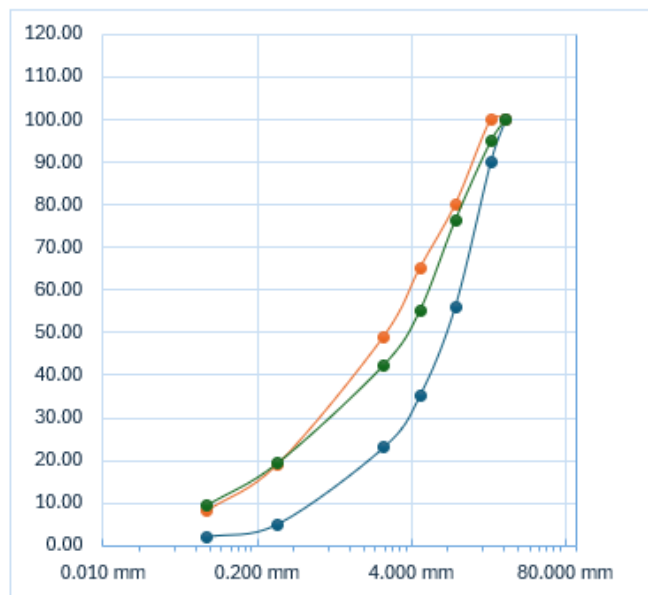
Tabla 21

Resultados de la distribución de partículas de la Subbase Granular de la cantera Juan Montalvo

TAMIZ	ABERTURA	% QUE PASA	ASTM D3515	
3"	76.2 mm	100	100	CUMPLE
1 1/2"	38.1 mm	100	100	CUMPLE
1"	25.4 mm	100	100	CUMPLE
3/4"	19.0 mm	94.96	90-100	CUMPLE
3/8"	9,5 mm	76.37	56-80	CUMPLE
Nº 4	4.75 mm	55.05	35-65	CUMPLE
Nº 8	2.36 mm	42.35	23-49	CUMPLE
Nº 50	0.300 mm	19.36	5-19	NO CUMPLE
Nº 200	0.075 mm	9.36	2-8	NO CUMPLE

Figura 30

Curva granulométrica de la Subbase Granular



Los resultados de la distribución granulométrica de la subbase granular de la cantera Juan Montalvo mostrados en la tabla 20 y figura 30 evidencia la necesidad de modificación granulométrica debido a que no cumple con los límites granulométricos exigido por la ASTM D3515-01, para tamaño máximo nominal de 3/4", por la presencia de material fino

superior al límite permisible. Por esta razón se incorporó el 35% de RCD para mejorar la distribución de partículas del material.

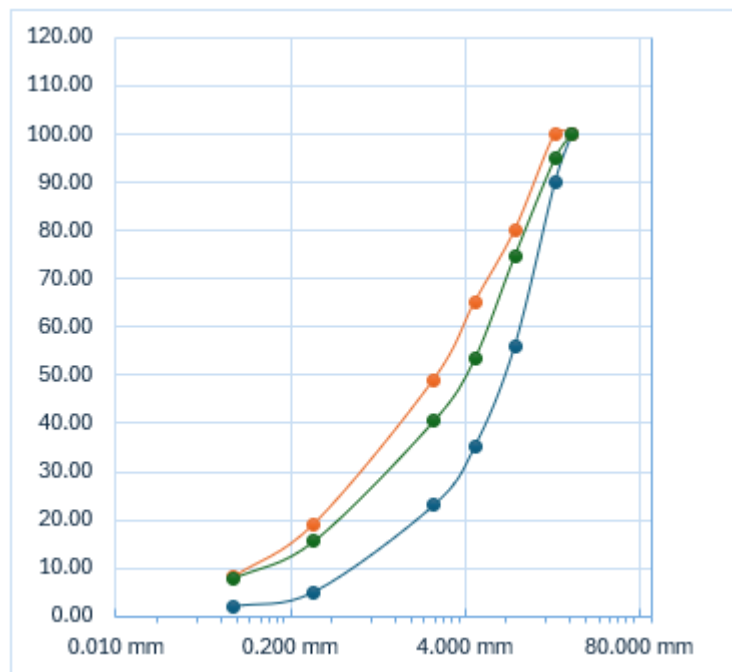
Tabla 22

Resultado de la distribución de partículas de la mezcla de 65% Subbase Granular + 35% RCD según ASTM D3515 para tamaño máximo del agregado 3/4"

TAMIZ	ABERTURA	% QUE PASA	ASTM D3515	
3"	76.2 mm	100	100	CUMPLE
1 1/2"	38.1 mm	100	100	CUMPLE
1"	25.4 mm	100	100	CUMPLE
3/4"	19.0 mm	94.94	90-100	CUMPLE
3/8"	9,5 mm	74.68	56-80	CUMPLE
Nº 4	4.75 mm	53.28	35-65	CUMPLE
Nº 8	2.36 mm	40.50	23-49	CUMPLE
Nº 50	0.300 mm	15.62	5-19	CUMPLE
Nº 200	0.075 mm	7.88	2-8	CUMPLE

Figura 31

Curva granulométrica de la mezcla conformada por 65% Subbase Granular + 35%RCD



Los resultados presentados en la tabla 20 Y 21 de la granulometría evidencian que agregar el 35% de RCD a la subbase granular altera la distribución de partículas de la subbase, pasando de 19.36% a 15.62% en el pasante del tamiz Nº 50, de la misma manera en el tamiz Nº200 se redujo de 9.36% a

7.88%, permitiendo que se ubiquen dentro de los límites establecidos en la ASTM D3515-01, (2001), para tamaño máximo de agregados 3/4". Este comportamiento se debe a que la incorporación de RCD presenta una distribución de partículas diferente a la subbase granular, aportando con partículas de mayor tamaño y reduciendo el contenido finos presentes en el material.

4.1.5. Análisis de la alteración de las propiedades físico-mecánicas de la subbase causadas por la incorporación de RCD

La caracterización de los materiales mediante la combinación de subbase con RCD permitieron determinar las condiciones del material, y la influencia que tiene el RCD en las propiedades físicas y mecánicas mediante ensayos de límites de Atterberg que permite obtener el límite líquido y la plasticidad del material, asimismo la capacidad de soporte de los materiales por medio del ensayo CBR y la resistencia al desgaste con el ensayo de Abrasión de los Ángeles, los cuales permiten evaluar si la adición del RCD condiciona el desempeño del material inicial de estudio.

Tabla 23

Modificaciones causadas por la incorporación de RCD en la subbase granular

MATERIAL	ENSAYO	RESULTADOS	MOP 403.1.02.	CUMPLIMIENTO
SUBBASE-JUAN MONTALVO	LL	24.41 %	≤ 25 %	CUMPLE
	IP	5.40 %	< 6 %	CUMPLE
	CBR	35.54 %	≥ 30 %	CUMPLE
	ABRASIÓN	42.70 %	≤ 50 %	CUMPLE
SUBBASE+RCD	LL	20.92 %	≤ 25 %	CUMPLE
	IP	4.98 %	< 6 %	CUMPLE
	CBR	31.87 %	≥ 30 %	CUMPLE
	ABRASIÓN	48.90 %	≤ 50 %	CUMPLE

Nota: LL (Limite liquido); IP (Índice de Plasticidad)

Los resultados de la caracterización de los materiales de estudio reflejados en la tabla 22 evidencian que la adición de RCD al material granular de subbase altera las propiedades físico-mecánicas del material, sin embargo las modificaciones no afectan el cumplimiento de los requisitos establecidos en la MOP-001-F, (2002) para que el material de subbase granular pueda desempeñar como subbase clase 3.

En este contexto, se evidencia una disminución en cuanto al límite líquido de los materiales de 24.41% a 20.92%, lo cual indica que el material con incorporación de RCD modificó las características de la fracción fina del material, disminuyendo la cantidad de agua para alcanzar su estado líquido. Asimismo, el Índice de plasticidad disminuyó de 5.40% a 4.98%, reflejando menor plasticidad, debido al menor aporte de partículas finas plásticas por parte de los RCD en la subbase. Además, se evidencia una disminución de la capacidad portante del material, debido a la alteración de la estructura granular generada por la adición de RCD pasando de 35.54% a 31.87%. Por otro lado, el porcentaje de desgaste mediante ensayo de Abrasión de los Ángeles aumentó de 42.70% a 48.90%, teniendo una menor resistencia al desgaste frente al material convencional de subbase, aunque sigue manteniéndose dentro del rango establecido. En este sentido, estos resultados indican una alteración de las propiedades físico-mecánicas del material de subbase convencional, pero se conservan las características necesarias como material de subbase granular. No obstante, debido a que el objetivo de la investigación no solo es caracterización del material sino, también evaluar la posibilidad de emplear estas mezclas con incorporación de RCD como material de base estabilizada, es necesario determinar su comportamiento sometido a proceso de estabilización con cemento y analizar si es posible su desempeño como material de base estabilizada.

4.2. ANALISIS DE RESULTADOS DEL O.E.2: EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO MECANICO DE MEZCLAS ESTABILIZADAS CON CEMENTO

Una vez caracterizada la subbase granular y la subbase + RCD se procedió con la evaluación del efecto que puede causar la adición del cemento a los materiales de estudio, donde se comparan los siguientes ensayos: Proctor modificado y la resistencia a la compresión simple, con el fin de analizar su posible aplicación como material de base estabilizada con cemento.

Sin embargo, como primer punto de análisis se verifica si cumple con los parámetros establecidos en la MOP-001-F, (2002), para base estabilizada, requiriendo, límites granulométricos según la tabla 404-6.1, un límite líquido menor al 30% y un índice de

plasticidad menor que 9% según la sección 815-2.03, lo cual se refleja en la siguiente tabla de datos.

Tabla 24

Resultados de acuerdo con la Granulometría exigida para base estabilizada con cemento de la mezcla 65%subbase + 35%RCD

Tamiz	% Que pasa	MOP 404-6.1	Cumplimiento
3" (76.2 mm)	100	100	Cumple
¾" (19.0 mm)	94.94	60 - 100	Cumple
Nº. 4 (4.75 mm)	53.28	40 - 75	Cumple
Nº 10 (2.00 mm)	37.48	30 - 50	Cumple
Nº 40 (0.425 mm)	17.56	15 - 35	Cumple
Nº 200 (0.075 mm)	7.88	5 - 15	Cumple

Los resultados evidenciados en la tabla 23, permiten determinar que el contenido optimo de RCD cumple con las exigencias granulométricas de la MOP-001-F-2002, y esto se atribuye a que durante el proceso de trituración de los residuos conformados por hormigón, bloques, ladrillos y cerámicas se fracturaron en partículas de tamaño grueso, medio y con poca presencia de finos en el material, lo cual permitió que el material de mezcla conformada por 65% subbase y 35% RCD pueda satisfacer los limites exigidos.

Tabla 25

Resultados conforme a las especificaciones técnicas establecidas para base estabilizada con cemento según MOP-001-F-2002

MATERIAL	ENSAYOS	RESULTADOS	MOP 815-2.03.	CUMPLIMIENTO
SUBBASE	LL	24.41 %	≤ 30 %	CUMPLE
GRANULAR	IP	5.40 %	< 9 %	CUMPLE
SUBBASE +	LL	20.92 %	≤ 30 %	CUMPLE
RCD	IP	4.98 %	< 9 %	CUMPLE

Nota: LL (Limite liquido); IP (Índice de Plasticidad)

Los resultados obtenidos a partir del ensayo de límites de Atterberg durante la caracterización de los materiales del estudio evidencian que ambos material cumplen con los requisitos exigidos para LL y IP establecidos en la MOP-001-F, (2002), lo cual indica que el

material esta apto para ser sometido a estabilización con cemento hidráulico MH, presentando plasticidades adecuadas.

4.2.1. Clasificación AASHTO de los materiales de estudio

Tabla 26

Resultados para clasificación AASHTO M145

Parámetros AASHTO	Subbase Granular	65%Subbase + 35%RCD
Tamiz N°10 (2.00 mm)	39.34	37.48
Tamiz N° 40 (0.425 mm)	21.87	17.56
Tamiz N° 200 (0.075 mm)	9.36	7.88
LL	24.41 %	20.92 %
IP	5.40 %	4.98 %

Nota: LL (Limite liquido); IP (Índice de Plasticidad); Abertura de tamices (2.00 mm, 0.425 mm, 0.075 mm)

Los resultados de la granulometría específicamente en los porcentajes que pasan por el tamiz N°10, N°40, N°200 y los valores de Limite Liquido y el Índice de Plasticidad permitieron clasificar los materiales de acuerdo a la clasificación de la (AASHTO M145-91, 2008).

Figura 32

Clasificación AASHTO M145

Table 2—Classification of Soils and Soil-Aggregate Mixtures

General Classification	Granular Materials (35 Percent or Less Passing 75 μm)							Silt-Clay Materials (More Than 35 Percent Passing 75 μm)			
Group Classification	A-1		A-3	A-2				A-4	A-5	A-6	A-7
	A-1-a	A-1-b		A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7				A-7-5, A-7-6
Sieve analysis, percent passing:											
2.00 mm (No. 10)	50 max	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
0.425 mm (No. 40)	30 max	50 max	51 min	—	—	—	—	—	—	—	—
75 μm (No. 200)	15 max	25 max	10 max	35 max	35 max	35 max	35 max	36 min	36 min	36 min	36 min
Characteristics of fraction passing 0.425 mm (No. 40)											
Liquid limit	—	—	—	40 max	41 min	40 max	41 min	40 max	41 min	40 max	41 min
Plasticity index	6 max	—	NP	10 max	10 max	11 min	11 min	10 max	10 max	11 min	11 min ^a
Usual types of significant constituent materials	Stone fragments, gravel and sand		Fine sand	Silty or clayey gravel and sand				Silty soils		Clayey soils	
General rating as subgrade	Excellent to Good							Fair to Poor			

^a Plasticity index of A-7-5 subgroup is equal to or less than LL minus 30. Plasticity index of A-7-6 subgroup is greater than LL minus 30. (See Figure 2.)

Fuente: (AASHTO M145-91, 2008)

La clasificación AASHTO permitió determinar a qué grupo pertenecen los materiales de estudio tanto para subbase granular y para subbase granular con RCD, ambos materiales

siendo parte del A-1-a, los cuales corresponden a materiales granulares de buena calidad, los cuales se caracterizan por tener poca presencia de finos y una reducida plasticidad. Esta clasificación permitió establecer las dosificaciones de cemento hidráulico MH presentes en las mezclas con dosificaciones de 3%, 4% y 5% de acuerdo con lo establecido por Surita Gil et al., (2023), en la tabla 6 del capítulo 2, quien alude cierta dosificación para materiales A-1-a. Los cuales reportaron los siguientes resultados:

Tabla 27

Resultados de resistencia a la compresión simple y verificación del cumplimiento de la resistencia requerida para base estabilizada con cemento según MOP-001

Material	Ensayo	Resultados			MOP 404-6.04	Cumplimiento
Subbase granular	Proctor	$\gamma_d \text{ máx}(\text{Kg/m}^3)$	$\omega \text{ opt}(\%)$		---	---
		2170	7		---	---
	Compresión Simple	% de cemento	F'c en 7 días	F'c en 28 días	---	---
		3%	18.05 Kg/cm ²	25.94 Kg/cm ²	$\geq 18 \text{ Kg/cm}^2$ (7 días)	Cumple
		4%	20.11 Kg/cm ²	30.54 Kg/cm ²	$\geq 18 \text{ Kg/cm}^2$ (7 días)	Cumple
		5%	43.27 Kg/cm ²	58.14 Kg/cm ²	$\geq 18 \text{ Kg/cm}^2$ (7 días)	Cumple
Subbase + RCD	Proctor	$\gamma_d \text{ máx}(\text{Kg/m}^3)$	$\omega \text{ opt}(\%)$		MOP 404-6.04	Cumplimiento
		1993	3.5		---	---
	Compresión simple	% de cemento	F'c en 7 días	F'c en 28 días	---	---
		3.2%	18.60 Kg/cm ²	25.78 Kg/cm ²	$\geq 18 \text{ Kg/cm}^2$ (7 días)	Cumple
		4%	23.07 Kg/cm ²	28.07 Kg/cm ²	$\geq 18 \text{ Kg/cm}^2$ (7 días)	Cumple
		5%	29.00 Kg/cm ²	41.68 Kg/cm ²	$\geq 18 \text{ Kg/cm}^2$ (7 días)	Cumple

Datos: $\gamma_d \text{ máx}$ (Densidad seca máxima); $\omega \text{ opt}$ (Humedad optima); F'c (Resistencia a la compresión simple).

Los resultados reflejados en la tabla 25 mediante el ensayo de compresión simple a los 7 y 28 días muestran que la resistencia de los materiales de estudio aumento progresivamente conforme a mayor cantidad de cemento hidráulico tipo MH presente en la mezcla, lo cual se debe a las reacciones de hidratación del cemento, donde se desarrollan productos cementantes que mejoran la unión entre las partículas de los materiales de estudio, obteniendo una estructura más rígida, aumentando su resistencia mecánica.

En este sentido la subbase granular alcanzo valores de resistencia a los 7 días de 18.05 kg/cm², 20.11 kg/cm² y 43.27 kg/cm² para las dosificaciones de 3%, 4% y 5% respectivamente, mientras que para la subbase con RCD se alcanzaron valores de resistencia de 18.60 kg/cm², 23.07 kg/cm² y 29.00 kg/cm² para dosificaciones de 3.2%, 4% y 5%,

evidenciando un porcentaje optimo de cemento tipo MH para la subbase de 3% y para mezcla de subbase con RCD de 3.2% con resistencias a los 7 días de 18.05 kg/cm² y 18.60 kg/cm², superando la resistencia mínima establecida en la MOP-001-F, (2002) para bases estabilizadas con cemento. Cabe recalcar que, aunque las dosificaciones de 4% y 5% presentaron mayores resistencias, el criterio que se estableció es la menor cantidad de cemento hidráulico tipo MH requerida para cumplir con la resistencia para bases estabilizadas con cemento (MOP-001-F, 2002).

La diferencia de cemento requerido entre materiales es mínima con un 0.2% adicional, y esto se debe a que el RCD es muy heterogéneo y disminuye la capacidad de unión de partículas debido a la presencia de mortero adherido en los residuos, por ende, para llegar a la resistencia mínima requerida se necesita de un porcentaje mínimo adicional.

Además, la diferencia de la resistencia a los 28 días por parte de los materiales es de 0.62% lo cual desde el punto de vista técnico no compromete el cumplimiento de las especificaciones técnicas.

4.2.2. Verificación del porcentaje de compactación alcanzado

Como parte de control de la elaboración de los cilindros correspondientes a la dosificación optima de cemento hidráulico MH, se verifico el porcentaje de compactación en función a la densidad objetiva del 100% de acuerdo a la densidad seca máxima del Proctor modificado (ASTM D1557-12, 2021).

Tabla 28

Características físicas de las probetas con su contenido optimo de cemento hidráulico MH en la subbase granular antes del ensayo de compresión simple

% de cemento	Diámetro (cm)			Altura (cm)	Área (cm ²)	Peso (g)	γ (kg/m ³)	γ_{prom} (kg/m ³)
	D1	D2	Promedio					
3%	15.16	15.17	15.17	29.85	180.62	12304	2282.06	2276.56
3%	15.09	15.11	15.10	30.31	179.08	12327	2271.06	

Nota: γ (Densidad) γ_{prom} (Densidad promedio)

$$\% \text{ de compactación} = \frac{2276.56 \text{ kg/m}^3}{2170 \text{ kg/m}^3} \times 100 = 105\%$$

La probeta de la estabilización del material de subbase granular alcanzo un % de compactación de 105%, superando el 100% de la densidad seca máxima del Proctor modificado, lo cual indica una densificación adecuada en función a los parámetros exigido por la (MOP-001-F, 2002). Esto demuestra la densidad alcanzada está relacionada con las características del material y la distribución de partículas, las cuales permiten el acomodo adecuado de agregados en el proceso de compactación del material.

Tabla

29

Características físicas de las probetas con cemento hidráulico MH en la mezcla conformada por 65% Subbase Granular + 35% RCD antes del ensayo de compresión simple

% de cemento	Diámetro (cm)			Altura (cm)	Área (cm ²)	Peso (g)	γ (kg/m ³)	γ_{prom} (kg/m ³)
	D1	D2	Promedio					
3.2%	15.01	15.13	15.07	30.47	178.37	11012	2026.18	2030.31
3.2%	15.15	15.26	15.21	30.61	181.58	11308	2034.44	

Nota: γ (Densidad) γ_{prom} (Densidad promedio)

$$\% \text{ de compactación} = \frac{2030.31 \text{ kg/m}^3}{1993 \text{ kg/m}^3} \times 100 = 102\%$$

Las probetas de la estabilización de la mezcla conformada por 65% Subbase granular con 35% RCD, alcanzo un % de compactación de 102%, lo cual fue ligeramente menor que la subbase convencional (105%), esto evidencia que, aunque la distribución de las partículas del material es clave en el proceso de compactación, la densificación final también depende de otros factores como el origen de las partículas incorporadas y la textura de los residuos reciclados.

4.3. ANALISIS DE RESULTADOS DEL O.E.3: EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO MECANICO DE MEZCLAS ESTABILIZADAS CON EMULSIÓN ASFÁLTICA.

4.3.1. Diseño de mezclas asfálticas en frio mediante el Marshall modificado

Para el diseño de las mezclas asfálticas, se determinó el contenido óptimo de emulsión asfáltica mediante la dosificación de varios porcentajes de emulsión asfáltica en relación con el peso de la muestra ensayada, 2%, 4%, 6% y 8%, con el objetivo de determinar la estabilidad y flujo Marshall y poder definir el porcentaje de emulsión asfáltica por medio de parámetros de diseño como la estabilidad, el flujo y el % de Vacíos de aire, los cuales indican por parte de la estabilidad el aporte que da la emulsión asfáltica en el material contribuyendo a la unión de partículas, y a la capacidad de soportar mayores esfuerzo, así mismo el flujo, parámetro que refleja la capacidad que tiene el material para deformarse hasta alcanzar su falla.

a) MATERIAL DE SUBBASE GRANULAR DE LA CANTERA JUAN MONTALVO ESTABILIZADO CON EMULSION ASFALTICA

En la estabilización del material de subbase granular con emulsión asfáltica, el contenido óptimo de emulsión asfáltica fue de 4%, con el cual se obtuvo una estabilidad de 4175 lb y un flujo de 13.65 (1/100”), donde la estabilidad alcanzada indica que la presencia de emulsión asfáltica CSS-1H en el material favorece a la unión entre partículas lo cual permite soportar mayores esfuerzos hasta alcanzar su falla y el valor del flujo indica que el material tiene la capacidad de deformarse antes de alcanzar su falla, asociada a la flexibilidad que aporta la emulsión asfáltica al material.

Figura 33

Estabilidad vs % emulsión asfáltica de la mezcla de subbase + emulsión asfáltica

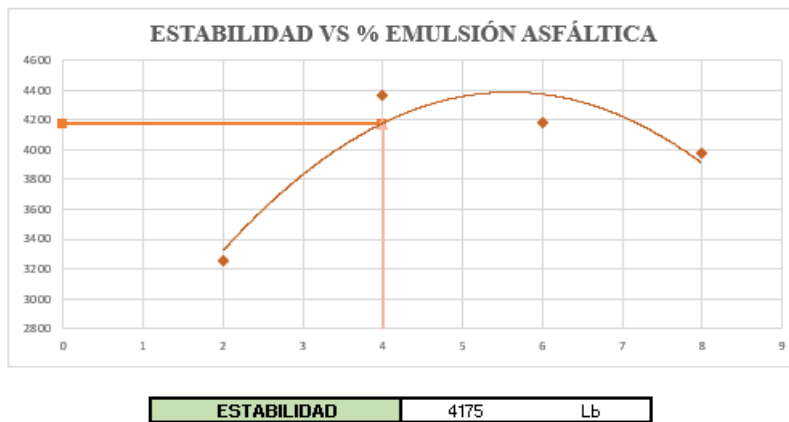


Figura 34

% Vacíos de aire vs % emulsión asfáltica de la mezcla de subbase + emulsión asfáltica

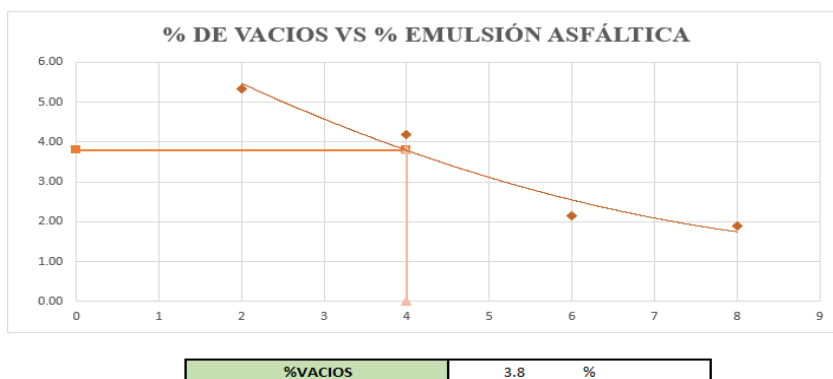


Figura 35

Flujo vs % emulsión asfáltica de la mezcla de subbase + emulsión asfáltica

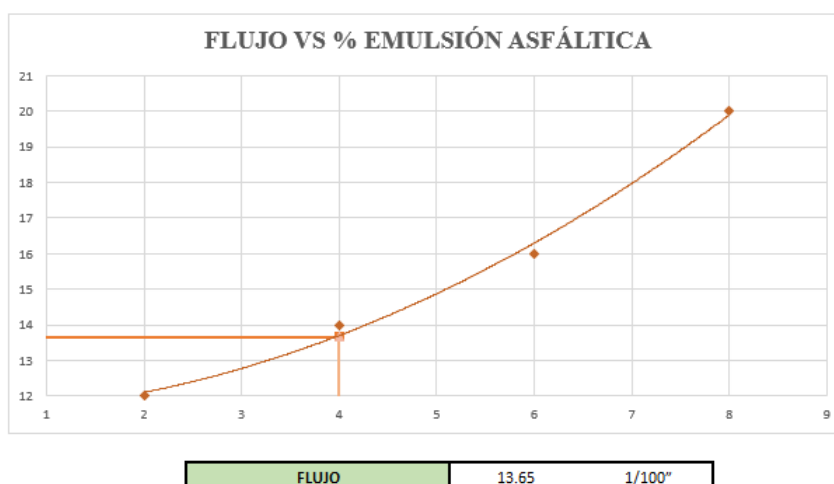


Tabla 30

Resultados de las briquetas de acuerdo con las dosificaciones empleadas para subbase + emulsión asfáltica

% de emulsión asfáltica	Estabilidad (lb)	Flujo (1/100")	%vacíos de aire
2	3259	12	5.34
4	4367	14	4.19
6	4182	16	2.15
8	3971	20	1.88

Los resultados obtenidos mediante el ensayo de estabilidad y flujo Marshall evidencian que la emulsión asfáltica genera cambios en el desempeño mecánico de la subbase granular, debido a que entre la dosificación de 2% y 4% presentan estabilidad en tendencia de aumento pasando de 3259 lb a 4367 lb, lo cual indica que la emulsión asfáltica aportó favoreció en la unión entre las partículas de la subbase granular permitiendo una mayor resistencia antes las cargas del tránsito vehicular, sin embargo sucedió todo lo contrario entre la dosificación de 6% a 8% las cuales su estabilidad disminuye pasando de 4182 lb a 3971 lb y esto se debe a que el exceso de emulsión asfáltica condiciona el material y puede generar reducción en la rigidez de la mezcla.

Con respecto al flujo se observa un incremento a mayor contenido de emulsión asfáltica pasando de 12 a 20 (1/100"), lo cual indica que a mayor contenido de emulsión asfáltica mayor capacidad de deformación; sin embargo, con dosificaciones de emulsión asfáltica de 6% y 8% el flujo del material supera el límite establecido en los criterio Marshall de la (MOP-001-F, 2002), es decir contienen deformaciones excesivas y puede condicionar la rigidez del material.

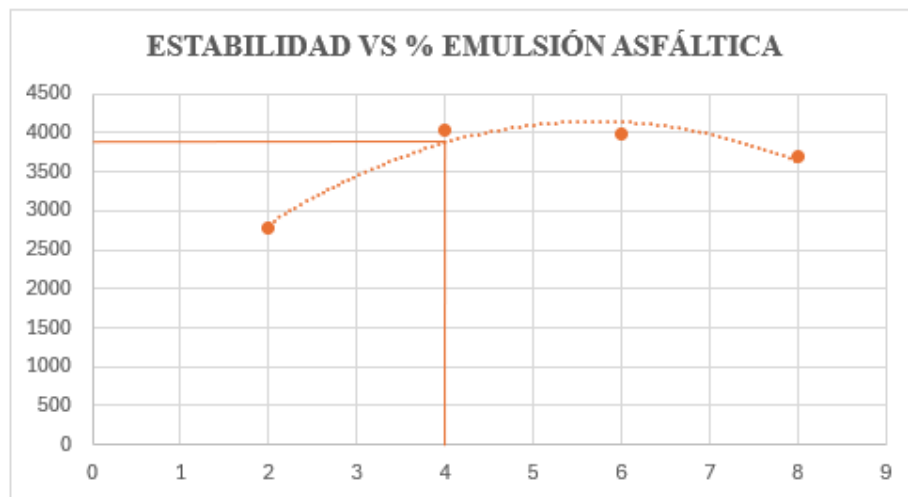
Por otra parte, en lo que respecta a los vacíos de aire, se evidencia una disminución pasando de 5.34% a 1.88% y esto se debe a que la emulsión asfáltica ocupa progresivamente los espacios dentro de la estructura granular, a pesar de esto en las dosificaciones de 6% y 8% los vacíos de aire no alcanzan los valores mínimos requeridos por la MOP-001-F-2002 y esto afecta de la condición interna de la muestra ensayada.

b) MATERIAL DE SUBBASE GRANULAR + RCD ESTABILIZADO CON EMULSION ASFALTICA

Para el material de subbase con incorporación de RCD, se obtuvo un contenido de emulsión óptimo del 4%, con una estabilidad de 3900 lb y un flujo de 13 (1/100”), donde este comportamiento puede estar relacionado a las características de los materiales reciclados, debido a la presencia de mortero adherido y mayor rugosidad superficial, lo cual incrementa la necesidad de emulsión asfáltica para lograr un adecuado recubrimiento y unión entre las partículas, por esta razón la mezcla con incorporación de RCD requiere de cierto porcentaje adicional en comparación con la mezcla del material de subbase convencional.(Mikhailenko et al., 2020). Asimismo, se reportó una estabilidad superior al mínimo establecido de 750 lb, lo que indica que la mezcla también puede soportar mayores esfuerzos gracias a la unión entre partículas que aporta la emulsión asfáltica CSS-1H y por parte del flujo se evidencia que el material tiene la capacidad de deformarse antes de alcanzar su falla.

Figura 36

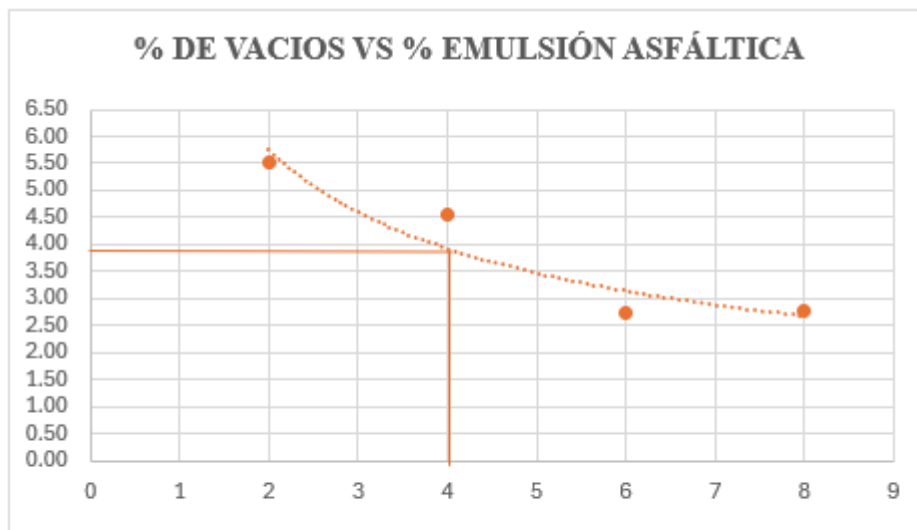
Estabilidad vs % emulsión asfáltica de la mezcla de subbase + RCD + emulsión asfáltica



ESTABILIDAD	3900	Lb
-------------	------	----

Figura 37

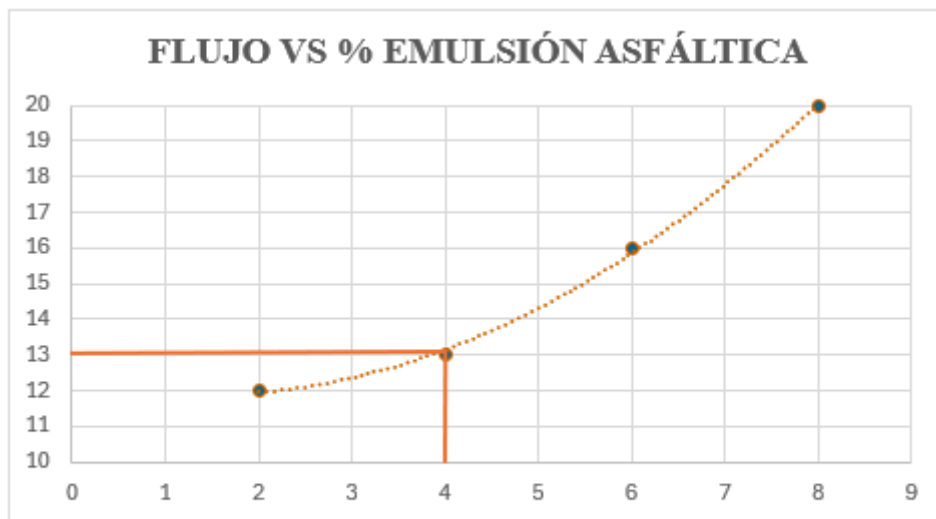
% de Vacíos vs % emulsión asfáltica de la mezcla de subbase + RCD + emulsión asfáltica



%VACIOS	3.9	%
---------	-----	---

Figura 38

Flujo vs % emulsión asfáltica de la mezcla de subbase + RCD + emulsión asfáltica



FLUJO	13.00	1/100"
-------	-------	--------

Tabla 31

Resultados de las briquetas de acuerdo con las dosificaciones empleadas para subbase + RCD + emulsión asfáltica

% de emulsión asfáltica	Estabilidad (lb)	Flujo (1/100")	%vacíos de aire
2	2784	12	5.50
4	4026	13	4.54
6	3986	16	2.73
8	3686	20	2.78

Los resultados del ensayo de estabilidad y flujo Marshall evidencian que el contenido de emulsión asfáltica presente en la mezcla de estudio genera cambios en el comportamiento mecánico de la subbase granular con RCD, en donde se reportaron valores de estabilidad de 2784 lb y 4026 lb respecto al 2% y 4% de emulsión asfáltica, así mismo se evidencia la disminución progresiva de la estabilidad pasando de 3986 lb a 3686 lb para contenido de emulsión asfáltica de 6% y 8%, sin embargo todas las estabilidades superan el límite establecido por la (MOP-001-F, 2002), lo que indica el aporte que tiene la emulsión asfáltica en la unión entre partículas lo cual permite soportar mayores esfuerzos hasta alcanzar su falla, mientras que el flujo aumenta de 12 a 20 (1/100"), indicando mayor deformabilidad de la mezcla de estudio de acuerdo a la proporción de emulsión asfáltica, sin embargo los criterios Marshall establecidos en la MOP-001-F-2002 establecen rangos límites de flujo de 5 a 18 (1/100"), evidenciando que un mayor porcentaje de emulsión aplicado a la mezcla condiciona el material debido a la deformabilidad excesiva. Por otro lado, el % de Vacíos disminuye en relación con el contenido de emulsión asfáltica dentro de la estructura granular pasando de 5.50% a 2.78%.

Por este motivo bajo estos parámetros de diseño se estableció un porcentaje optimo de emulsión de 4%, debido a que esta dosificación cumple simultáneamente con los criterios de diseños Marshall para la mezcla estabilidad.

4.4. ANALISIS DE RESULTADOS DEL O.E.4: EVALUACIÓN COMPARATIVA DEL COMPORTAMIENTO FÍSICO-MECÁNICO Y DETERMINACIÓN DE LA VIABILIDAD TÉCNICA DE LAS MEZCLAS EVALUADAS

La evaluación comparativa de la investigación permitió determinar la influencia que tiene la incorporación de RCD en un material de subbase granular de cantera, así como el efecto que tiene al ser estabilizado con cemento y emulsión asfáltica el material de estudio. La comparación se enfoca en evaluar la alteración de las propiedades físico-mecánicas de una subbase granular de cantera con adición de RCD y cuál es el efecto de dicha mezcla estabilizadas con cemento y emulsión asfáltica, verificando su desempeño en función a especificaciones y normas establecidas en la ASTM, MOP-001-F-2002 y ASPHALT INSTITUTE.

a) COMPARACIÓN DE LAS PROPIEDADES FISICAS Y MECANICAS ENTRE LA SUBBASE GRANULAR Y SUBBASE GRANULAR + RCD

La comparación entre una subbase granular de cantera frente a una subbase con incorporación de RCD, permitió identificar las variaciones de las propiedades físicas y mecánicas del material de estudio y verificar si agregar RCD modifica negativamente las propiedades o si aporta mejoras en el material antes de ser sometido a procesos de estabilización con cemento o asfalto para pavimentos flexibles.

Inicialmente, el material de estudio fue una subbase granular de la cantera Juan Montalvo, considerando que representa a los materiales convencionales de cantera local para capas granulares. Posteriormente, el RCD clasificado, triturado y tamizado fue incorporado al material inicial obteniendo una mezcla modificada, la cual una vez obtenido el porcentaje óptimo de RCD incorporado en la subbase granular fue evaluada mediante ensayos como límite de Atterberg, Proctor, CBR y Abrasión.

Los resultados obtenidos permiten determinar que la incorporación de RCD a la subbase, genera alteraciones en las propiedades, pero no representan disminución del desempeño, sino una modificación de su estructura interna.

De acuerdo con los resultados del ensayo Limite de Atterberg, se obtuvieron los siguientes resultados:

Tabla 32

Resultados del ensayo Limite de Atterberg para los materiales de estudio

MATERIAL DE ESTUDIO	ENSAYO	RESULTADOS
SUBBASE	LL	24.41 %
JUAN MONTALVO	IP	5.40 %
SUBBASE+RCD	LL	20.92 %
	IP	4.98 %

Nota: LL (Limite liquido); IP (Indice de Plasticidad).

La disminución del límite líquido pasando de 24.41% a 20.92% indica que el material con incorporación de RCD modifico las características de la fracción fina del material, disminuyendo la cantidad de agua para alcanzar su estado líquido.

Por parte del índice de plasticidad, disminuye de 5.40% a 4.98%, debido a que las partículas provenientes de hormigón, bloques, ladrillos, cerámicas trituradas presentan un comportamiento como material granular y presentan de baja plasticidad por su composición mineral y proceso de fabricación. Siendo un punto clave y favorable para una capa granular de pavimento flexible, debido a que una menor plasticidad conduce a una mejora de estabilidad y previene ciclos de ahuellamientos.

Por otra parte, de acuerdo con los resultados del ensayo de Proctor modificado, CBR y abrasión de los ángeles, se obtuvieron las γ , ω_{opt} , capacidad de soporte y % de desgaste de los materiales de estudios reflejados en la tabla 32:

Tabla 33*Resultados del Proctor modificado, CBR y abrasión para los materiales de estudio*

Material	Ensayo	Resultados	
Subbase Juan Montalvo	Proctor	$\gamma_d \text{ máx}(\text{Kg/m}^3)$	$\omega \text{ opt}(\%)$
		2170	7
	CBR	35.54%	
	Abrasión	42.70%	
Subbase + RCD	Proctor	$\gamma_d \text{ máx}(\text{Kg/m}^3)$	$\omega \text{ opt}(\%)$
		1993	3.5
	CBR	31.87%	
	Abrasión	48.90%	

De acuerdo con los resultados obtenidos del ensayo de Proctor modificados se evidencia una disminución de la densidad seca máxima en la mezcla de subbase + RCD con una densidad de 1993 Kg/m³ frente a 2170 kg/m³ del material de subbase granular sin RCD. Esta disminución se debe a que el material de RCD este compuesto por materiales de distintos orígenes, procesos de fabricación, nivel de trituración, textura y esto afecta en el acomodo interno de las partículas, lo cual genera menor densidad seca máxima en el material de estudio.

Con respecto al contenido de humedad optima se evidencia una disminución, de 7% (Subbase) a 3.5% (Subbase + RCD), resultado que demuestra que el material con incorporación de RCD requiere de menos contenido de agua para lograr su máxima densificación en la compactación, debido a la modificación de la distribución granulométrica y la interacción entre agregados reciclados y el material de subbase granular.

En el ensayo de CBR, la subbase presento una capacidad portante de 35.54%, mientras de la mezcla de subbase + RCD presento una capacidad portante de 31.87%. Esta disminución está ligada a la modificación de la estructura granular de la mezcla con adición de RCD debido a que cambia la distribución de partículas, influyendo en la resistencia ante la penetración del pistón. Lo cual coincide con lo reportado por Lara Torres, (2025), quien en condiciones de investigación experimental de laboratorio analizo el impacto de los RCA en una subbase granular, evidenciando que la incorporación del 10% de RCD en el material de subbase disminuye su capacidad portante pasando de 90.52% de CBR a 79.51%; además,

esto no solo depende de cuanto material de RCD se le agrega a la mezcla, sino que también puede influir el origen de los RCD y el nivel de trituración.

Como otro punto de análisis está el incremento en el ensayo de Abrasión de los Ángeles, presentando por parte de la subbase una resistencia al desgaste de 42.70% frente al 48.90% de la mezcla de subbase + RCD. Reflejando que la presencia de RCD genera una menor resistencia al desgaste frente al material granular de subbase, debido a que el hormigón y el bloque contiene partículas adheridas que generan mayor desprendimiento al momento de ser sometido al ensayo de Abrasión de los Ángeles. Este comportamiento coincide con lo reportado por Lara Torres, (2025), quien menciona que la presencia de RCD incrementa el desgaste del material sin embargo no condiciona el material debido a que se encuentra dentro de los límites admisibles de desgaste.

Ante estas condiciones del material de mezcla con la incorporación de RCD si altera las propiedades físicas y mecánicas del material de subbase disminuyendo sus propiedades en menor medida, sin embargo, no afecta en las características del material para ser sometido a proceso de estabilización con cemento hidráulico MH y emulsión asfáltica CSS-1h.

En conjunto a todos los resultados de la caracterización tanto para los materiales de subbase como para la mezcla de subbase granular + RCD se evidencio la influencia que tiene los residuos triturados en la distribución granulométrica aportando con una distribución granulométrica dentro de los límites establecidos por la ASTM D3515-01 y esto debido a pocas partículas finas presentadas por el RCD, así mismo en el índice de plasticidad en comparación con el material convencional de subbase la plasticidad del materia reduce, lo que indica una menor susceptibilidad del material en condiciones de humedad.

Por parte del ensayo de Proctor modificado, el material con RCD requiere de menor contenido de humedad para alcanzar su densidad seca máxima y esto se debe al contribuir con el mejoramiento de la distribución de partículas y disminuir la absorción de agua en la mezcla.

En cuando a la capacidad de soporte del material obtenida a través del ensayo de CBR, disminuyo pasando de 35.54% en subbase granular a 31.87% en la subbase con RCD lo cual

puede ocasionarse debido a la modificación de la estructura granular de la subbase agregando RCD, sin embargo, no condiciona el material debido a que supera la capacidad de soporte mínima de 30% establecida por la MOP-001-F-2002.

Finalmente, el desgaste del material de subbase en comparación con la subbase con incorporación de RCD aumenta su desgaste debido a que la presencia de hormigón y bloque tiene partículas adheridas lo cual causa mayor desprendimiento al someterse al ensayo de Abrasión de los ángeles, sin embargo, esta alteración en su desgaste no condiciona su desempeño debido a que se mantiene en los límites admisibles exigidos.

Por ende, la incorporación del 35% de RCD al material de subbase granular en la presente investigación en condiciones experimentales de laboratorio representa una alternativa técnicamente viable, permitiendo aprovechar los residuos generados en las construcciones y demoliciones, sin comprometer un adecuado desempeño, siempre y cuando exista un control de calidad en el proceso constructivo de los pavimentos flexibles.

b) COMPARACION DE MEZCLAS ESTABILIZADAS CON CEMENTO

Con el propósito de evaluar la influencia de la incorporación del 35% de RCD sobre una subbase granular sometida a estabilización con cemento, se comparan los resultados obtenidos para la subbase granular y la mezcla modificada de subbase con RCD. Considerando la resistencia a la compresión simple a 7 y 28 días y determinar si el material resultante alcanza los requisitos establecidos para desempeñarse como base estabilizada con cemento hidráulico MH.

El proceso de estabilización con cemento permitió determinar la influencia del cemento como agente estabilizante en los materiales estudiados, considerando la subbase granular de cantera y la mezcla modificada de 65% de subbase granular + 35% de RCD, con el fin de verificar la viabilidad técnica del uso de subbase + RCD + cemento como posible material destinado para una capa de base estabilizada con cemento para pavimentos flexibles.

La estabilización con cemento permite mejorar las propiedades mecánicas de los materiales de estudio, aumentando la cohesión interna de los materiales, la resistencia y evitando deformaciones por las cargas del tránsito vehicular.

Uno de los puntos claves del cemento como agente estabilizante se debe a que permite compensar las diferencias de CBR, densidad, desgaste, mencionadas anteriormente, debido a que genera una mayor cohesión entre los agregados.

Los resultados obtenidos mediante el ensayo de compresión simple fueron los siguientes:

Tabla 34

Resultados de Resistencia a la compresión simple de los materiales

Material de estudio	Ensayo	Resultados		
		% cemento	F'c en 7 días (Kg/cm ²)	F'c en 28 días (Kg/cm ²)
Subbase (Juan Montalvo)	Compresión	3%	18.05	25.94
	simple	4%	20.11	30.54
		5%	43.27	58.14
Subbase + RCD	Compresión	% cemento	F'c en 7 días (Kg/cm ²)	F'c en 28 días (Kg/cm ²)
		3.2%	18.60	25.78
		4%	23.07	28.07
		5%	29.00	41.68

Los resultados del ensayo de resistencia a la compresión simple determinan la resistencia del material sometido a una carga axial aplicada hasta alcanzar su falla induciendo que la incorporación del 35% RCD altera las propiedades mecánicas de la subbase, sin embargo, de acuerdo con los resultados obtenidos en el laboratorio la incorporación de residuos de la construcción y demolición no condiciona el material bajo procesos de estabilizados con cemento hidráulico tipo MH.

Al analizar las resistencias obtenidas a los 28 días reflejadas en la tabla 32, la reducción de la resistencia en el contenido óptimo de cemento, es de aproximadamente 0.62% diferencia que desde el punto de vista técnico no compromete el cumplimiento de las especificaciones.

Por otra parte, la mezcla de 35% de RCD y 65% de material de subbase granular, requiere de más contenido de cemento, pero de manera mínima con una dosificación de 3.2% a los 28 días, mientras que para el material de subbase granular requiere de 3% de cemento

hidráulico MH. En este sentido, la diferencia de cemento requerido es mínima con un 0.2% adicional, y esto se debe a que el RCD es muy heterogéneo y disminuye la capacidad de unión de partículas debido a la presencia de mortero adherido en los residuos, por ende, para llegar a la resistencia mínima requerida necesita un porcentaje mínimo adicional.

Cabe recalcar que la diferencia del grado de compactación específicamente con su contenido óptimo de cemento hidráulico MH en la subbase granular (105%) y la mezcla conformada por el 65% subbase granular + 35% RCD (102%) se relaciona con la alteración de la composición del material inicial y como consecuencia, modifico su comportamiento durante el proceso de compactación. Sin embargo, superan el límite exigido alcanzando porcentajes superiores al 100% de grado de compactación que establece la (MOP-001-F, 2002).

Por lo tanto, la incorporación del 35% de RCD para la presente investigación resulta viable en estabilizados con cemento hidráulico MH y puede desempeñarse como material de base estabilizada con cemento, debido a que cumple con todos los requisitos técnicos para una base estabilizada con cemento de acuerdo con la MOP-001-F-2002 sección 815-2.02; 404-6.04 y Tabla 404-6.1.

c) COMPARACIÓN DE MEZCLAS ESTABILIZADAS CON EMULSIÓN ASFÁLTICA

El proceso de estabilización con emulsión asfáltica permitió analizar el comportamiento que tiene la emulsión asfáltica como agente estabilizante en los materiales estudiados como la subbase y la mezcla de 65% subbase + 35% RCD, con el fin de determinar la viabilidad técnica de usar subbase + RCD + emulsión asfáltica como alternativa de material estabilizado con emulsión asfáltica para pavimentos flexibles.

Cabe recalcar que la estabilización con emulsión asfáltica en los materiales de estudio busca mejorar las propiedades mediante un ligante que permite la unión entre partículas y una mejor cohesión, además de mejorar la resistencia antes las cargas del tránsito vehicular.

A partir de los resultados obtenidos mediante los ensayos de estabilidad y flujo Marshall, se evalúa de manera comparativa la influencia que tiene la incorporación de RCD en materiales granulares sometidos a procesos de estabilización con emulsión asfáltica.

En ambos materiales de estudio, tanto para subbase granular y subbase granular con RCD requieren de un porcentaje óptimo de emulsión asfáltica de 4%, el cual cumple con los parámetros de diseño Marshall; Sin embargo, la subbase sin incorporación de RCD presenta condiciones favorables para la estabilización con emulsión, pero su distribución de partículas no se ajusta a los límites granulométricos exigidos en la ASTM D3515, lo cual condiciona el material por ahuellamiento en condiciones de servicio.

Por parte de la mezcla conformada por 65% subbase y 35% RCD produjo variaciones mínimas de estabilidades y flujo, lo cual, desde un punto de vista técnico, no condiciona el desempeño del material.

Tabla 35

% de emulsión óptima obtenida mediante el ensayo de estabilidad y flujo Marshall

Material	Contenido óptimo de emulsión asfáltica (%)
Subbase granular	4
Subbase granular + RCD	4

Los resultados muestran que la incorporación del 35% RCD clasificado triturado y tamizado, no condiciona el material de mezcla requiriendo el mismo porcentaje de emulsión tanto para subbase y subbase con RCD, garantizando estabilidad y durabilidad en condiciones de servicio.

Sin embargo, las propiedades del material de subbase se modifican y esto se debe a se implementaron residuos de hormigón, bloques, ladrillos y cerámicas, los cuales presentan una textura más irregular y mayor cantidad de superficies expuestas en comparación con la subbase granular, provocando alteraciones mínimas de estabilidad, densidad, flujo, vacíos de aire.

Respecto a la **densidad** tanto de la “subbase granular + emulsión asfáltica” y de la mezcla conformada por el “65% subbase + 35% RCD + emulsión asfáltica” se obtuvieron los siguientes resultados:

Tabla 36

Densidades de la dosificación en los materiales de estudio

Material	% de emulsión asfáltica	γ (t/m ³)
Subbase granular	2	2.55
	4	2.47
	6	2.40
	8	2.33
Subbase granular + RCD	2	2.39
	4	2.32
	6	2.25
	8	2.19

Nota: γ (Densidad)

Los resultados con respecto a la densidad de los materiales bajo dosificaciones evidencian una tendencia que a mayor contenido de emulsión asfáltica la densidad del material disminuye. En el caso del material de subbase granular pasa de 2.55 t/m³ con 2% de emulsión a 2.33 t/m³ con 8% de emulsión, debido a que a mayor contenido de emulsión el ligante ocupa mayor espacio en el material y disminuye la proporción de partículas minerales, reduciendo su densidad.

De la misma manera, la mezcla de subbase + RCD pasa de 2.39 t/m³ con 2% de emulsión a 2.19 t/m³ con 8% de emulsión, evidenciando una reducción de densidad del material en comparación con la subbase y esto se debe a que el material de RCD presenta diferentes características físicas a la subbase granular, generando alteraciones en el peso unitario y el acomodo interno de partículas.

En definitiva, la disminución de densidad en el material con RCD no condiciona su función como material estabilizado con emulsión asfáltica debido a que corresponde a una situación parcial del material reciclado y mantiene una adecuada capacidad resistente.

Por otro lado, **la estabilidad** de los materiales de estudio se ve reflejada en la siguiente tabla:

Tabla 37

Resultados de estabilidad de los materiales de estudio

Material	% de emulsión asfáltica	Estabilidad (lb)
Subbase granular	2	3259
	4	4367
	6	4182
	8	3971
Subbase granular + RCD	2	2784
	4	4026
	6	3986
	8	3684

Para la subbase granular se evidencia que la estabilidad incrementa desde 2% con estabilidad de 3259 lb hasta alcanzar su punto máximo de 4367 lb con el 4% de emulsión asfáltica, posterior a esos el exceso de emulsión asfáltica hace que la estabilidad comience a disminuir de 6% a 8% con estabilidades de 4182 lb y 3971 lb respectivamente.

Este incremento de estabilidad de 2% a 4 %, se presenta debido a que la emulsión asfáltica comienza a cubrir las partículas de los materiales y activa la cohesión, mientras que de 6% a 8% la estabilidad disminuye debido a que se reduce la fricción entre partículas y aumenta la deformación en el material de estudio.

En cuanto a la mezcla de la subbase + RCD + emulsión asfáltica se evidencia un comportamiento similar de 2% a 4% la estabilidad aumenta mientras que de 6% a 8% la estabilidad disminuye. Asimismo, presenta reducción de estabilidad en comparación con la subbase granular con valores de estabilidad de 2784 lb con 2%, 4026 lb con 4%, 3986 lb con 6% y 3686 lb con el 8%.

Sin embargo, aunque la mezcla con incorporación del 35% de RCD presente valores inferiores de estabilidad en comparación con el material de subbase granular de cantera, cumple ampliamente con el valor mínimo establecido por la MOP-001-F, (2002). Esto

demuestra que la incorporación de RCD al material de subbase granular no condiciona su desempeño en cuanto a la estabilidad del material.

Por otro lado, se evaluó el flujo Marshall, el cual determina la deformación de un material antes de fallar, siendo importante para generar un equilibrio entre la resistencia y la capacidad de deformación.

A continuación, en la tabla 37 se presentan los resultados del **flujo Marshall** tanto para la subbase + emulsión asfáltica CSS-1h y para la mezcla conformada por 65% de Subbase con 35% de RCD + emulsión asfáltica CSS-1h:

Tabla 38

Resultados del flujo Marshall en los materiales estudiados

Material	% de emulsión asfáltica	Flujo (1/100")
Subbase granular	2	13
	4	14
	6	17
	8	20
Subbase granular + RCD	2	12
	4	13
	6	16
	8	20

Los resultados del flujo Marshall en los materiales evidenciaron un incremento en relación con el contenido de emulsión asfáltica en la subbase granular pasando de 13 con el 2% de emulsión asfáltica hasta 20 con el 8% de emulsión, dejando en evidencia que a mayor contenido de emulsión se tiene mayor capacidad de deformación gracias a la reducción de la fricción interna entre las partículas de los materiales de estudio.

Asimismo, para los materiales combinados con 65% de subbase y 35% RCD, se determinó un comportamiento semejante pasando de 12 con el 2% de emulsión asfáltica hasta 20 con el 8% de emulsión, aunque la mezcla presento valores de flujo ligeramente menores reflejando una estructura inicial con mayor rigidez debido a las diferencias físicas del material de RCD frente al material de subbase granular, lo que modifica el acomodo interno de las partículas.

Cabe recalcar que a pesar del incremento del contenido de emulsión ambos materiales presentan valores semejantes, demostrando que la incorporación de los RCD al material de subbase granular de cantera no altera su comportamiento de manera negativa.

Con respecto a los resultados de estabilidad Marshall se establece que los materiales de estudio mantengan un equilibrio entre resistencia y capacidad de deformación, permitiendo la aplicación del ensayo de tracción indirecta bajo el contenido óptimo de emulsión asfáltica.

Tabla 39

Resultados obtenidos de las mezclas de estudio con el % de emulsión óptimo

	Subbase granular		Subbase granular + RCD		Especificaciones técnicas
% Emulsión óptimo	4		4		-
γ (t/m ³)	2.46		2.34		-
%Vacíos de aire	4.03%		4.24%		3% - 8%
Sumergido	2h	24h	2h	24h	-
Estabilidad (lb)	4383.40	3433.46	4043.58	2876.51	> 750 lb
Flujo (1/100")	14	15	13	14	5 - 18
S_t (psi)	50.87	39.11	47.26	35.29	-
Flujo (1/100")	10	10	11	11	-
Conservación de estabilidad y TSR					
TSR	76.89%		74.67%		> 70%
Estabilidad	74.58%		71.14%		> 70%

Nota: Especificaciones MOP-001-F, (2002), sección 4 Tabla 404-4.2; 405-5.4 y AASHTO T 283. γ (Densidad); S_t (Resistencia a la tracción indirecta en psi).

Estos resultados evidencian que ambas mezclas de estudio bajo el contenido óptimo de emulsión asfáltica superan los parámetros establecidos para estabilidad de 750 lb, alcanzando por parte de la subbase granular valores de 4383.40 lb frente a 4043.58 lb en condiciones de 2 horas de inmersión. De la misma manera ambos materiales de estudio luego de las 24 horas de inmersión mantienen esa tendencia superioridad, en cuanto a la estabilidad y su requisito técnico mínimo. Sin embargo, la estabilidad y densidad disminuyo debido al contenido de RCD.

Este comportamiento observado coincide con lo reportado por (Ding et al., 2020), quienes señalan la tendencia de que a mayor contenido de agregados reciclados (RA), la estabilidad y la densidad disminuyen respectivamente.

Con respecto a los vacíos de aire, en ambos materiales de estudios se evidencian valores dentro de los rangos establecidos para vacíos de aire con 4.03% para la subbase granular y 4.24% para la mezcla modificada de subbase + RCD, lo cual indica una adecuada compactación. Además, los datos de TSR y conservación de estabilidad son superiores al límite mínimo de 70%, reflejando que la incorporación de 35% de residuos de la construcción y demolición (RCD) a un material de subbase granular mantiene una resistencia adecuada frente a condiciones de humedad.

Para finalizar, considerando los contenidos óptimos de emulsión asfáltica para los materiales de estudio, con el 4% para la Subbase granular y el 4% para la Subbase con incorporación de RCD, se evaluó el desempeño de ambos materiales estabilizados con emulsión asfáltica mediante estabilidad, flujo, tracción indirecta y conservación de estabilidad. Donde los resultados indican que la mezcla de 35% RCD + 65% de Subbase granular + emulsión asfáltica, cumplen con todos los parámetros establecidos en la MOP-001-F, (2002).

Por ende, se puede afirmar que la incorporación del RCD permite obtener una mezcla con un desempeño adecuado para ser empleado como base estabilizada con emulsión asfáltica en pavimentos flexibles.

CAPITULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. CONCLUSIONES

Con respecto al **objetivo general**, la incorporación del 35% de RCD en una subbase granular estabilizada con cemento y emulsión asfáltica demostró ser técnicamente viable. Esto se debe a que la mezcla conformada por 65% de subbase y 35% de RCD cumplió con los requisitos de la normativa MOP-001-F (2002) para estabilizados, obteniéndose una resistencia a la compresión de $f'c = 25.78 \text{ kg/cm}^2$ por parte del estabilizado con cemento hidráulico MH, valor superior al mínimo de $f'c = 25 \text{ kg/cm}^2$ exigido, así mismo la estabilización con emulsión asfáltica cumplió con los parámetros de diseño exigido superando la estabilidad mínima de 750 lb con 3900 lb y un flujo Marshall de 13 (1/100"), que está dentro del rango exigido de 5 a 18 (1/100"), además de presentar un porcentaje de vacíos de 3.9%, cumpliendo con el rango especificado entre 3% y 8%. Por lo tanto, se confirma que el material presenta un comportamiento mecánico adecuado para su utilización como material de base estabilizada en pavimentos flexibles.

En la caracterización de los materiales mediante el **objetivo específico 1**, los ensayos de laboratorio determinaron que la incorporación del 35% de RCD modificó las propiedades físicas y mecánicas de la subbase de cantera. Específicamente, se registró una disminución de 3.49 unidades en el límite líquido (equivalente a una disminución relativa del 14.30%) y una disminución de 0.42 unidades en el índice de plasticidad (7.78% respecto al material original), así como un aumento en el porcentaje de desgaste de 6.2% y una variación en el CBR, el cual bajó de 55% a 47%. A pesar de estas variaciones, la mezcla óptima (65% subbase y 35% RCD) cumplió estrictamente con las especificaciones granulométricas requeridas, presentando condiciones óptimas para continuar con el proceso de estabilización.

El análisis del **objetivo específico 2**, relacionado con la estabilización del material de estudio con cemento hidráulico MH, se determinó mediante el ensayo de Proctor modificado y resistencia a la compresión simple con una dosificación óptima de 3.2% en la mezcla conformada por 65% subbase y 35% RCD, alcanzando una resistencia de 25.78 kg/cm^2 a los

28 días. Estos resultados representan una diferencia de resistencia de 0.62% y requiere un incremento de 0.2% en el contenido de cemento hidráulico MH en comparación con la mezcla de subbase con cemento hidráulico MH. Sin embargo, desde un punto de vista técnico no compromete el cumplimiento de las especificaciones exigidas para una base estabilizada con cemento hidráulico MH y se establece que la incorporación de RCD permite obtener un material con resistencia suficiente para desempeñarse como material de base estabilizada con cemento para pavimentos flexibles.

En relación con el **objetivo específico 3**, enfocado en la estabilización del material de estudio con emulsión asfáltica CSS-1H, mediante ensayos de estabilidad y flujo Marshall permitió identificar que la mezcla conformada por 65% subbase y 35% RCD, se ajustó a los límites granulométricos exigidos, presentó un contenido óptimo de emulsión asfáltica de 4%, un TSR superior al 70% y parámetros Marshall dentro de los límites establecidos, demostrando que la mezcla de estudio posee una adecuada capacidad portante, una deformabilidad compatible con el diseño y una resistencia aceptable a daños causados por presencia de humedad. Confirmando su viabilidad técnica para desempeñarse como base estabilizada con emulsión asfáltica en pavimentos flexibles.

Para finalizar, la evaluación comparativa del **objetivo específico 4** enfocado en la comparación de las propiedades físicas y mecánicas de la subbase granular y la mezcla modificada conformada por 65% de subbase y 35% de RCD y dichos materiales estabilizados con cemento hidráulico MH y emulsión asfáltica CSS - 1H, permitió establecer que la incorporación del 35% de RCD modificó las propiedades físicas y mecánicas del material convencional; sin embargo, dichas variaciones no comprometieron el cumplimiento de los requisitos normativos ni el desempeño de las mezclas estabilizadas evaluadas.

Los resultados obtenidos corresponden a condiciones controladas de laboratorio y a un tipo específico de RCD proveniente principalmente de actividades de demolición, compuesto por hormigón, bloques, ladrillos y mortero adherido. Debido a la naturaleza heterogénea de los residuos de construcción y demolición, el comportamiento mecánico de las mezclas podría variar en función del origen del material reciclado, el grado de trituración, la composición mineralógica y las condiciones de ejecución en campo. Asimismo, debido al número limitado de tratamientos evaluados y al carácter exploratorio de la investigación, el análisis

se desarrolló mediante comparación descriptiva de resultados, sin la aplicación de herramientas estadísticas inferenciales. Por ello, los resultados obtenidos deben interpretarse dentro del alcance experimental del estudio y constituyen una base para futuras investigaciones a mayor escala.

5.2. RECOMENDACIONES

Con respecto al **objetivo general**, se recomienda que antes de utilizar en obra la mezcla de una subbase con RCD estabilizada con cemento hidráulico MH o emulsión asfáltica CSS-1H, se verifique que el material con destino a construcciones viales cumpla con las especificaciones exigidas, por medio de pruebas de laboratorio de suelo para garantizar un buen desempeño y durabilidad a largo plazo de acuerdo con las condiciones que requiera el proyecto vial.

En la caracterización de los materiales con respecto al **Objetivo específico 1**, se recomienda establecer protocolos estrictos de selección y control de calidad de los RCD, debido a que su origen, nivel de trituración y tamizado tiene gran influencia en las propiedades físicas y mecánicas del material, asimismo se recomienda evaluar porcentajes de incorporación de RCD cercanos al 35 % debido a que se busca optimizar simultáneamente granulometría y desempeño mecánico.

En la estabilización con cemento hidráulico MH, de acuerdo con el **Objetivo específico 2**, se recomienda buscar otras dosificaciones debido a que la presencia de RCD puede influir en la demanda de cemento en la mezcla, asimismo implementar ensayos que complementen el desempeño como su comportamiento a la fatiga y respalden su aplicación como base estabilizada con cemento hidráulico MH.

Para la estabilización con emulsión asfáltica de acuerdo con el **objetivo específico 3**, se recomienda estudiar otros tipos de emulsión asfáltica y porcentajes de RCD para cada material evaluado, debido a que la incorporación de RCD puede modificar la demanda de ligante de la mezcla. También se recomienda garantizar una distribución homogénea de la emulsión asfáltica durante el proceso de mezclado y respetar los tiempos de curado establecidos antes de la ejecución del ensayo Marshall.

De acuerdo con **el objetivo específico 4** enfocado en la comparación de las propiedades físicas y mecánicas de la subbase granular y la mezcla modificada conformada por 65% de subbase y 35% de RCD y dichos materiales estabilizados con cemento hidráulico MH y emulsión asfáltica CSS-1H, se recomienda a futuras investigaciones incorporar un análisis estadístico inferencial, para que de esta manera se determine si los resultados de la investigación presentan diferencias estadísticamente significativas, fortaleciendo la confiabilidad de los resultados obtenidos de mediante los ensayos de laboratorio de suelo.

Para trabajos en campo se recomienda un proceso de mezclado homogéneo específicamente en la distribución de la emulsión asfáltica y la cantidad de agua que requiera el material, obtenido mediante el ensayo Proctor, específicamente en el % de humedad optima, los cuales tiene gran influencia en la unión de partículas de los materiales y aportan mayor resistencia para las capas estructurales de los pavimentos flexibles.

Finalmente, se recomienda la utilización de la mezcla modificada conformada por subbase granular + RCD y está estabilizada con cemento hidráulico MH y emulsión asfáltica CSS-1H siempre y cuando cumplan con los parámetros exigidos en las normativas vigentes.

BIBLIOGRAFÍA

AASHTO. (1993).

https://www.academia.edu/34103801/DISENO_DE_PAVIMENTO_METODO_AA_SHTO_93_ESPANOL_1_

AASHTO M145-91. (2008). En *AASHTO M145-91*. <https://pdfcoffee.com/aashto-m-145-2008-pdf-free.html>

AASHTO T 283. (2005). En *Scribd*. <https://es.scribd.com/document/285954750/Metodo-Lottman-MODIFICADO-v2>

Anaya, E. E. (2025). *Evaluación de la estabilidad y flujo de una mezcla asfáltica con sustitución parcial de asfalto por residuos plásticos* [Universidad Autonoma de Querétaro]. <https://ri-ng.uaq.mx/handle/123456789/11403>

Arévalo Rivera, J. P. (2025). *Evaluación de materiales tipo RCD de Bogotá para diseñar losa de concreto en pavimento rígido* [Universidad Nacional de Colombia]. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/89491>

Arias Gonzáles, J. (2021). *DISEÑO Y METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN. ASTM*. (2003). [PDF].

ASTM C617/C617M-23. (2023). En *Scribd*.

<https://www.scribd.com/document/697730413/ASTM-C617-C617M-23>

ASTM D 1633. (2007). <https://es.scribd.com/document/372804424/ASTM-D-1633-00-Espanol-pdf>

ASTM D 2041. (2000). <https://es.scribd.com/document/59341222/ASTM-D-2041-Gravedad-Especific-Maxima-Teorica-en-Mezclas-Bituminosas>

ASTM D 2216. (2019). En *ASTM D 2216—19—Laboratory Determination of Water (Moisture) Content of Soil and Rock by Mass I | PDF | Soil | Water*. <https://www.scribd.com/document/695891573/ASTM-D-2216-19-Laboratory-Determination-of-Water-Moisture-Content-of-Soil-and-Rock-by-Mass1>

ASTM D 6913. (2017). En *ASTM D 6913/D6913M - 17*. <https://pdfcoffee.com/astm-d-6913-pdf-free.html>

ASTM D75/D75M-19. (2019). En *Scribd*.

<https://es.scribd.com/document/864658719/ASTM-D75-D75M-19>

ASTM D1557-12. (2021). En *ASTM D1557-12*.

- ASTM D1632-17. (2017). <https://es.scribd.com/document/746373950/ASTM-D-1632-ESPANOL>
- ASTM D3515-01. (2001). <https://pdfcoffee.com/astm-d-3515-pdf-pdf-free.html>
- ASTM D6927. (2022). <https://es.scribd.com/document/780691749/ASTM-D6927-22-2>
- Averos, S. del R. O., Ortega, J. C. B., & Ortíz, A. C. (2022). Reciclaje y reaprovechamiento de los residuos de concreto en pavimentos. *Green World Journal*, 5(01). <https://doi.org/10.53313/gwj51015>
- Bazurto Olarte, N. P., & Mendoza Gualteros, Y. A. (2023). *Diseño de la estructura de pavimento flexible con material RCD para la base y subbase en la carrera 19 entre 18 y carrera 16 del municipio de Girardot Cundinamarca* [Thesis]. <http://repository.unipiloto.edu.co/handle/20.500.12277/12754>
- Blackman, H. L. (2022). *DISEÑO ESTRUCTURAL DE PAVIMENTOS FLEXIBLES Y RÍGIDOS: NUEVOS Y DE REFUERZO (Vías Urbanas, Estacionamientos, Carreteras y Aeropuertos)*.
- Calva Herrera, L. O., & Muñoz Pérez, S. P. (2022). Estabilidad y flujo de mezclas asfálticas en caliente incorporando escorias de acero. *Infraestructura Vial*, 24(43), 1-10. <https://doi.org/10.15517/iv.v24i43.48421>
- Campos Vázquez, L. (2024). *QUÉ SON LOS Antecedentes de Investigación: Conceptos y Relevancia*. Studocu. <https://www.studocu.com/es-mx/document/instituto-tecnologico-de-ciudad-guzman/taller-de-investigacion-ii/que-son-los-antecedentes-de-investigacion/83499522>
- Castellanos Devia, Y. M., Gonzalez Apache, K. A., & Salas Pinzón, J. D. (2020). *Evaluación de la resistencia de la base y sub-base granular con asfaltita en porcentajes 50% -50%, 70% -30% y 100%* [Thesis]. <http://repository.unipiloto.edu.co/handle/20.500.12277/7508>
- Cuzcano Quispe, L. M., Contreras Velarde, K. M., Huarac López, S. L., & Bellido Roque, L. A. (2021). *APROVECHAMIENTO DE LOS RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN [RCD] EN LAS EDIFICACIONES*.
- Das, B. M. (2015). *Fundamentos De Ingenieria Geotecnica*. <https://dokumen.pub/fundamentos-de-ingenieria-geotecnica.html>
- Ding, L., Zhang, J., Feng, B., & Li, C. (2020). Performance Evaluation of Recycled Asphalt Mixtures Containing Construction and Demolition Waste Applicated as

- Pavement Base. *Advances in Civil Engineering*, 2020(1), 8875402.
<https://doi.org/10.1155/2020/8875402>
- Diseño y evaluación del desempeño de mezclas en frío con emulsión y pavimento asfáltico recuperado: Parte 2: Evaluación a escala real.* (2025).
<https://www.lanamme.ucr.ac.cr/repositorio/handle/50625112500/3112>
- Doza Saboya, D. R., & Pinedo Burga, J. P. G. (2023). *Estudio De La Contracción Del Concreto Cementoarena, Con Cemento Portland Tipo I Y Aditivo Superplastificante Masterease 3900, Iquitos—2022* [Universidad Científica del Perú]. <http://hdl.handle.net/20.500.14503/2558>
- EMGIRS EP. (2024, julio 15). [Quito será la primera ciudad del país en reciclar residuos de construcción – EMGIRS EP]. *Quito será la primera ciudad del país en reciclar residuos de construcción – EMGIRS EP*. <https://emgirs.gob.ec/quito-sera-la-sede-del-congreso-de-la-cocal-en-2026/>
- Espejo Vizcarra, A. P., & Paredes Rosas, C. F. (2024). *Influencia por adición de residuos de construcción y demolición en propiedades físico-mecánicas de suelos en la provincia de Ilo, 2024.*
- Figueredo Dávila, J. L. (2025). Resistencia a la compresión simple de suelos arcillosos tratados con cenizas de caña de azúcar y fibras de polietileno de alta densidad, tramo Tomay Kichwa—Ambo, Huánuco—2024. *Universidad de Huánuco*.
<https://repositorio.udh.edu.pe/handle/20.500.14257/6368>
- Flores Ruiz, L. J., & Romero Mendo, C. A. R. (2023). *Análisis correlacional entre el Índice de Penetración y el Índice CBR en el Módulo de Reacción de la subrasante de la ciudad de Pucallpa, Ucayali* [Universidad Ricardo Palma - URP].
<https://hdl.handle.net/20.500.14138/7203>
- García, F., Rosado, H., Parrales, H., & Calle, V. (2025). *Revisión literaria del uso de pavimentos flexibles con adición de cauchos reciclados y polietileno.* (p.
<https://repositorio.saberec5.com.ec/index.php/saberec/catalog/book/23>).
- Guaje Guerra, J. A. (2020). *Estudio del agregado reciclado de residuos de construcción y demolición en celdas de confinamiento con llantas desechadas para la construcción de obras viales en Colombia* [Universidad Nacional de Colombia].
<https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/78634>

- INSTITUTO DEL ASFALTO Manual—MS-14 Asphalt—Cold—Mix* (Tercera Edición). (2005). <https://pdfcoffee.com/instituto-del-asfalto-manual-ms-14-asphalt-cold-mix-pdf-free.html>
- Korpys, C. I., Drewes, M., Gauna, D., Pettersen, J., & Escribano, M. (2024). Variación de la resistencia a la compresión simple en suelos residuales con adición de cemento portland normal. *JIDeTEV*, (14). <https://autoresjidetev.fio.unam.edu.ar/index.php/jidetev/article/view/134>
- Lara Torres, T. (2025). *Estudio del impacto de los agregados de concreto reciclado en el comportamiento mecánico de una subbase granular del departamento del Atlántico* [Corporacion Universidad de la Costa]. <https://repositorio.cuc.edu.co/entities/publication/repositorio.cuc.edu.co>
- Laura Guzmán, M. S. (2019). *Análisis comparativo entre dos tipos de pavimentos para el campus de la UNALM* [Universidad Nacional Agraria La Molina]. <https://hdl.handle.net/20.500.12996/3931>
- Llumigusin Sarzosa, L. F., & Pallango Unapanta, M. J. (2022). *Utilización de la ceniza volcánica, con diferentes métodos de activación puzolánica, para la estabilización de suelos con resistencia a compresión menor a 80 KN/m²*. [bachelorThesis, Quito : EPN, 2022.]. <https://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/23407>
- Loyo Pozo, G. D. (2024). *Gestión de Residuos de Construcción y Demolición (RCD) en el Distrito Metropolitano de Quito (DMQ)* [PUCE - Quito]. <https://repositorio.puce.edu.ec/handle/123456789/46237>
- Maylle Paima, A., & Avila Tarma, P. E. (2023a). Elaboración de un diseño de mezcla para la estabilización de un suelo con emulsión asfáltica tipo CSS-1h y pavimento asfáltico reciclado (RAP) basado en el procedimiento de Marshall modificado. *Infraestructura Vial*, 25(44), 1-17. <https://doi.org/10.15517/57hqmc88>
- Maylle Paima, A., & Avila Tarma, P. E. (2023b). Elaboración de un diseño de mezcla para la estabilización de un suelo con emulsión asfáltica tipo CSS-1h y pavimento asfáltico reciclado (RAP) basado en el procedimiento de Marshall modificado. *Infraestructura Vial*, 25(44), 1-17. <https://doi.org/10.15517/57hqmc88>
- Mejia Vidal, H. M. (2022). Estabilización de talud con asfalto liquido rc-250 en la localidad de La Victoria – distrito de Santa Rosa – Ayacucho. *Universidad Peruana Los Andes*. <http://repositorio.upla.edu.pe/handle/20.500.12848/5287>

- Mendoza Torres, E. S. (2019). *Relación entre los métodos de diseño de pavimento flexible empírico mecanístico ASSHTO 93 y Shell para determinar la vida útil del pavimento* [Universidad Ricardo Palma - URP].
<https://hdl.handle.net/20.500.14138/2800>
- Meza, M. I. Z., & Piusseaut, E. T. (2019). Materiales granulares tratados con emulsión asfáltica para su empleo en bases o subbases de pavimentos flexibles. *Revista de Arquitectura e Ingeniería*, 13(3), 1-11.
- Mikhailenko, P., Rafiq Kakar, M., Piao, Z., Moises, B., & Lily, P. (2020). Incorporation of recycled concrete aggregate (RCA) fractions in semi-dense asphalt (SDA) pavements: Volumetrics, durability and mechanical properties. *Construction and Building Materials*, 264, 120166.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120166>
- MOP-001-F. (2002). chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgclefindmkaj/https://www.mit.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2021/01/MPR_Chimborazo_Cumanda_Especificaciones-Tecnicas-MOP-001-F-2002.pdf
- MS-19 Manual Basico de Emulsiones Asfálticas. (2004). <https://pdfcoffee.com/ms-19-manual-basico-de-emulsiones-asfalticas-2-pdf-free.html>
- Múnera Miranda, J. C., & Aguiar Moya, J. P. (2020). Estimación del módulo resiliente para materiales granulares de Costa Rica. *Infraestructura Vial*, 21(37), 12-20.
<https://doi.org/10.15517/yjc5c386>
- Muñoz Pérez, S. P., Morante Santamaría, M. M., & Huamán Manayay, H. F. (2023). Revisión sistemática del comportamiento convencional y reológico del biocompuesto asfalto-biomasas producidas. *Revista UIS Ingenierías*, 22(2), 15-28.
- NTE INEN 857. (2010). En *Densidad y Absorción de Áridos Gruesos* (Primera Edición).
<https://es.scribd.com/document/364038726/857>
- Paima, A. M., & Tarma, P. E. A. (2023). Elaboración de un diseño de mezcla para la estabilización de un suelo con emulsión asfáltica tipo CSS-1h y pavimento asfáltico reciclado (RAP) basado en el procedimiento de Marshall modificado. *Infraestructura Vial*, 25(44). <https://www.redalyc.org/journal/4782/478276305005/>
- Papatzani, S., Grammatikos, S., & Paine, K. (2019). Permeable Nanomontmorillonite and Fibre Reinforced Cementitious Binders. *Materials*, 12, 3245.
<https://doi.org/10.3390/ma12193245>

- Piqueras, V. Y. (2021, febrero 22). Estabilización de suelos con cemento. *El blog de Víctor Yepes*. <https://victoryepes.blogs.upv.es/2021/02/22/estabilizacion-de-suelos-con-cemento/>
- Quintana, H. A. R., & Lizcano, F. A. R. (2023). *Pavimentos. Materiales, construcción y diseño - 2da edición: Materiales, construcción y diseño*. Ecoe Ediciones.
- Reis, G. S. dos, Quattrone, M., Ambrós, W. M., Grigore Cazacliu, B., & Hoffmann Sampaio, C. (2021). Current Applications of Recycled Aggregates from Construction and Demolition: A Review. *Materials*, 14(7), 1700. <https://doi.org/10.3390/ma14071700>
- Reyes Cardenas, J. E., & Sarmiento Morris, J. E. (2024). *Estudio experimental de correlaciones entre ensayos proctor modificado, CBR y densidad relativa en suelos granulares usuales empleados en la ciudad de Iquitos, 2022* [Universidad Científica del Perú]. <http://hdl.handle.net/20.500.14503/3254>
- Roche, E. O., Cabrera, J. D. H., & Plasencia, G. R. (2025). Evaluación de la granulometría en los áridos empleados por la Empresa Provincial de la Construcción. *Universidad & ciencia*, 14(2), e8721-e8721. <https://doi.org/10.5281/zenodo.15333752>
- Rodríguez, W. Á. G. (2023). Análisis comparativo de las técnicas de laboratorio para determinar los límites de Atterberg en suelos de la ciudad de Oruro – Bolivia. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, 7(4), 7289-7312. https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v7i4.7475
- Solorzano Garcia, E. E., & Caspi Taris, D. J. (2025). *Características físicas, mecánicas e hidráulicas evaluadas en el pavimento flexible del corredor vial El Arenal—Guaranda* [bachelorThesis, Riobamba]. <http://dspace.unach.edu.ec/handle/51000/15626>
- Surita Gil, L. E., Fernández Huamán, R. I., & Chahuares Paucar, L. (2023). Aporte estructural de capa base granular estabilizada con cemento Portland tipo I versus emulsión asfáltica catiónica para vías urbanas. *Gaceta Técnica*, 24(2), 4-22. (World). <https://doi.org/10.51372/gacetatecnica242.2>
- Terrones Hernandez, J. Y. (2021). *Evaluación de agregados obtenidos de residuos de construcción y demolición estabilizados con aditivo terrasil para la utilización en base y subbase de pavimentos, Chiclayo 2019* [Universidad Católica Santo Toribio de Mogrovejo]. <http://hdl.handle.net/20.500.12423/4267>

- Tipán Martínez, J. A. (2023). *Caracterización geológica de nuevas fuentes de aprovechamiento de material pétreo en el sector urbano de la isla Santa Cruz—Galápagos* [FICT. ESPOL].
<http://www.dspace.espol.edu.ec/handle/123456789/59496>
- Vasquez Tapia, C. M., & Lopez Rojas, L. F. (2021). *Influencia de melaza de caña y residuos de construcción y demolición en la estabilización del suelo para trocha carrozable, Chiclayo-2021* [Universidad César Vallejo].
<https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/91482>
- Villalobos, A. M., & Valverde, A. M. G. (2025). Implementación de los Residuos de Construcción y Demolición (RCD) en Concretos Estructurales. *Revista Veritas de Difusão Científica*, 6(1), 314-355. <https://doi.org/10.61616/rvdc.v6i1.411>

ANEXOS

ANEXOS O.E.1 CARACTERIZACION DE MATERIALES

Recolección de material granular de cantera Juan Montalvo



Recolección de material RCD



Ensayo de Granulometría material de cantera Juan Montalvo



Ensayo Proctor modificado



Toma de lecturas de hinchamiento de muestras sumergidas CBR



Ensayo de penetración CBR



ANEXOS DE O.E.2. DETERMINAR EL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DEL ESTABILIZADO CON CEMENTO

Preparación de mezcla con los diferentes porcentajes de cemento



Proceso de compactación de la mezcla



Desencofrado del espécimen



Toma de pesos y medidas



Preparación para Ensayo de compresión simple



Ensayo de Compresión Simple



ANEXOS DE O.E.3. ANALIZAR LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE LAS MEZCLAS ESTABILIZADAS CON EMULSION ASFALTICA

Dosificación de emulsión asfáltica en suelo previamente humedecido



Compactación de las briquetas



Curado de briquetas en horno



Desencofrado de las briquetas



Toma de pesos sumergidos



Regulación de temperatura en baño María



Rotura Marshall a briquetas con estabilizante óptimo



Ensayo a Tracción indirecta a briquetas con estabilizante óptimo



Briqueta de emulsión asfáltica después de ensayo TSR



ANEXOS DE O.E.4. COMPARAR EL COMPORTAMIENTO FÍSICO-MECÁNICO DE LA SUBBASE GRANULAR DE CANTERA Y MEZCLAS CON RCD, ESTABILIZADAS CON CEMENTO Y EMULSIÓN ASFÁLTICA

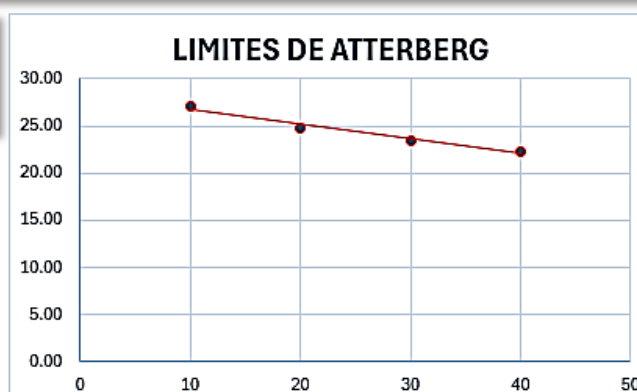
Resultados del ensayo Limite de Atterberg para los materiales de estudio

MATERIAL DE ESTUDIO	ENSAYO	RESULTADOS
SUBBASE-JUAN MONTALVO	LL	24.41 %
	IP	5.40 %
SUBBASE+RCD	LL	20.92 %
	IP	4.98 %

Resultados del ensayo Limite de Atterberg en la Subbase Granular

LÍMITE LÍQUIDO				
Recipiente #	C8	IA	K1	T
Masa de recipiente + muestra húmeda (P1)	25.2	26.28	26.07	30.11
Masa de recipiente + muestra seca (P2)	21.59	22.45	21.98	25.06
Masa de agua ($P3 = P1 - P2$)	3.61	3.83	4.09	5.05
Masa de recipiente (P4)	5.41	6.16	5.43	6.42
Masa de muestra seca ($P5 = P2 - P4$)	16.18	16.29	16.55	18.64
% de humedad ($W = P3 \cdot 100 / P5$)	22.31	23.51	24.71	27.09
# de golpes	40	30	20	10
LÍMITE PLÁSTICO				
Recipiente #	L1	P5	XL	
Masa de recipiente + muestra húmeda (P1)	23.48	23.04	23.87	
Masa de recipiente + muestra seca (P2)	20.76	20.38	21.04	
Masa de agua ($P3 = P1 - P2$)	2.72	2.66	2.83	
Masa de recipiente (P4)	6.25	6.36	6.38	
Masa de muestra seca ($P5 = P2 - P4$)	14.51	14.02	14.66	
% de humedad ($W = P3 \cdot 100 / P5$)	18.75	18.97	19.30	

RESULTADOS	
Limite Liquido =	24.41
Limite Plástico =	19.01
Índice de Plasticidad =	5.40

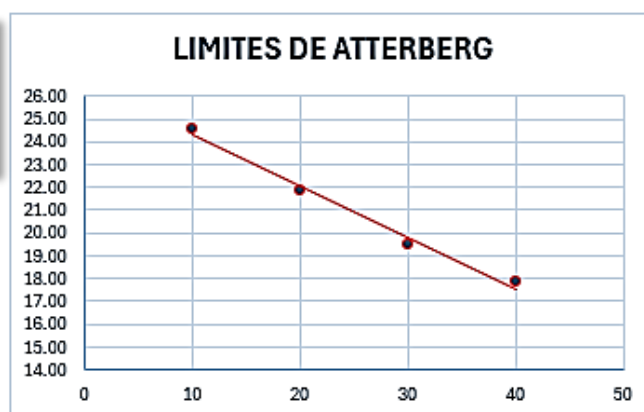


Resultados del ensayo Limite de Atterberg en la mezcla conformad por 65% Subbase Granular + 35% RCD

LÍMITE LÍQUIDO				
Recipiente #	I8	C8	X8	X1
Masa de recipiente + muestra húmeda (P1)	24.35	25.46	25.95	27.37
Masa de recipiente + muestra seca (P2)	21.5	22.31	22.34	23.2
Masa de agua ($P3 = P1 - P2$)	2.85	3.15	3.61	4.17
Masa de recipiente (P4)	5.5	6.12	5.82	6.21
Masa de muestra seca ($P5 = P2 - P4$)	16	16.19	16.52	16.99
% de humedad ($W = P3 \cdot 100 / P5$)	17.81	19.46	21.85	24.54
# de golpes	40	30	20	10

LÍMITE PLÁSTICO			
Recipiente #	H4	N7	V5
Masa de recipiente + muestra húmeda (P1)	22.79	22.17	23.34
Masa de recipiente + muestra seca (P2)	20.53	19.9	20.95
Masa de agua ($P3 = P1 - P2$)	2.26	2.27	2.39
Masa de recipiente (P4)	6.12	5.74	6.11
Masa de muestra seca ($P5 = P2 - P4$)	14.41	14.16	14.84
% de humedad ($W = P3 \cdot 100 / P5$)	15.68	16.03	16.11

RESULTADOS	
Limite Líquido =	20.92
Limite Plástico =	15.94
Índice de Plasticidad =	4.98



Resultados del Proctor modificado, CBR y abrasión para los materiales de estudio

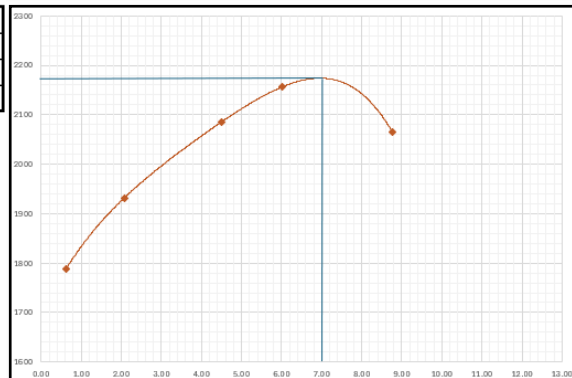
Material	Ensayo	Resultados	
Subbase Juan Montalvo	Proctor	$\gamma_d \text{ máx}(\text{Kg/m}^3)$	$\omega \text{ opt}(\%)$
		2170	7
	CBR	35.54%	
	Abrasión	42.70%	
Subbase + RCD	Proctor	$\gamma_d \text{ máx}(\text{Kg/m}^3)$	$\omega \text{ opt}(\%)$
		1993	3.5
	CBR	31.87%	
	Abrasión	48.90%	

Resultados del ensayo Proctor Modificado en la Subbase Granular

Masa del cilindro (P7)	6245
Volumen del cilindro (V)	2046.8
Masa del martillo (kg)	10 lb
Altura de caída del martillo (cm)	45.72
Tipo de ensayo	Modificado
# de capas	5
# de golpes por capa	56

DATOS DEL ENSAYO										
PUNTO #	1		2		3		4		5	
MATERIAL PARA ENSAYO	GRUESO	FINO	GRUESO	FINO	GRUESO	FINO	GRUESO	FINO	GRUESO	FINO
RECIPIENTE N°	IA	—	T	—	4	—	N	—	NI	—
Masa de recipiente + muestra húmeda (P1)	53.30	—	51.81	—	58.90	—	50.33	—	81.90	—
Masa de recipiente + muestra seca (P2)	53.07	—	51.10	—	57.10	—	48.43	—	76.70	—
Masa de agua (P3 = P1 - P2)	0.23	—	0.71	—	1.80	—	1.90	—	5.20	—
Masa de recipiente (P4)	16.51	—	16.78	—	17.08	—	16.89	—	17.42	—
Masa de muestra seca (P5 = P2 - P4)	36.56	—	34.32	—	40.02	—	31.54	—	59.28	—
% de humedad (W = P3 x 100 / P5)	0.63	—	2.07	—	4.50	—	6.02	—	8.77	—
% de humedad promedio	0.63	—	2.07	—	4.50	—	6.02	—	8.77	—
% de humedad añadida al suelo	TN	—	100	—	200	—	350	—	600	—
Masa de cilindro + suelo húmedo (P6)	9930	—	10280	—	10705	—	10925	—	10840	—
Masa de suelo húmedo (P8 = P6 - P7)	3685	—	4035	—	4460	—	4680	—	4595	—
Densidad húmeda del suelo (Dh = P8 / V)	1800	—	1971	—	2179	—	2286	—	2245	—
Densidad seca del suelo Ds = Dh / (1 + W/100)	1789	—	1931	—	2085	—	2157	—	2064	—

RESULTADOS		
% OPTIMO HUMEDO	7	%
DENSIDAD SECA MAXIMA	2.17	gr/cm ³
=	2170	kg/m ³

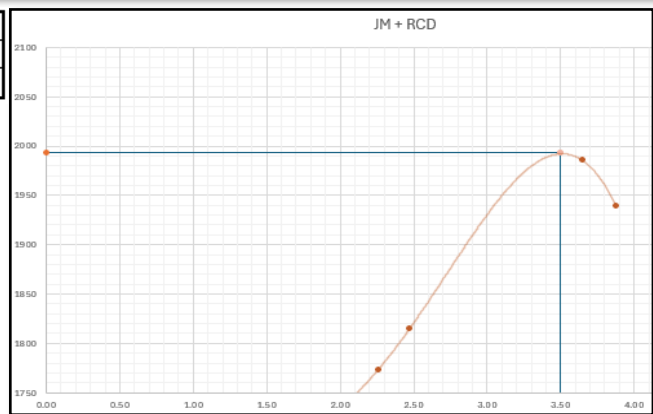


Resultados del ensayo Proctor Modificado en la mezcla conformada por 65% Subbase Granular + 35% RCD

Masa del cilindro (P7)	6245
Volumen del cilindro (V)	2046.8
Masa del martillo (kg)	4.54
Altura de caída del martillo (cm)	45.72
Tipo de ensayo	Modificado
# de capas	5
# de golpes por capa	56

DATOS DEL ENSAYO										
PUNTO #	1		2		3		4		5	
MATERIAL PARA ENSAYO	GRUESO	FINO	GRUESO	FINO	GRUESO	FINO	GRUESO	FINO	GRUESO	FINO
RECIPIENTE N°	C7	---	G8	---	I8	---	H8	---	C8	---
Masa de recipiente + muestra húmeda (P1)	58.20	---	103.10	---	87.20	---	68.40	---	91.60	---
Masa de recipiente + muestra seca (P2)	58.00	---	101.20	---	85.50	---	66.60	---	88.80	---
Masa de agua (P3 = P1 - P2)	0.20	---	1.90	---	1.70	---	1.80	---	2.80	---
Masa de recipiente (P4)	17.42	---	17.01	---	16.76	---	17.19	---	16.57	---
Masa de muestra seca (P5 = P2 - P4)	40.58	---	84.19	---	68.74	---	49.41	---	72.23	---
% de humedad (W = P3 x 100 / P5)	0.49	---	2.26	---	2.47	---	3.64	---	3.88	---
% de humedad promedio	0.49		2.26		2.47		3.64		3.88	
% de humedad añadida al suelo	TN		100		200		350		600	
Masa de cilindro + suelo húmedo (P6)	9720		9956		10052		10458		10368	
Masa de suelo húmedo (P8 = P6 - P7)	3475		3711		3807		4213		4123	
Densidad húmeda del suelo (Dh = P8 / V)	1698		1813		1860		2058		2014	
Densidad seca del suelo Ds = Dh / (1 + W/100)	1689		1773		1815		1986		1939	

RESULTADOS	
%OPTIMO HUMEDO	3.50
DENSIDAD SECA MAXIMA	1993



Resultados del ensayo CBR de diseño en la Subbase Granular

MOLDE N°	I	XVIII	6	PESO DEL MARTILLO:	10.00 Lb
PESO MOLDE	5855	6559	6719		
VOLUMEN MOLDE	2352.01	2337.4	2351.88	ALTURA DEL MARTILLO:	18.00 "
No DE GOLPES CAPA:	12	25	56		
N° de ensayo:	1	2	3		

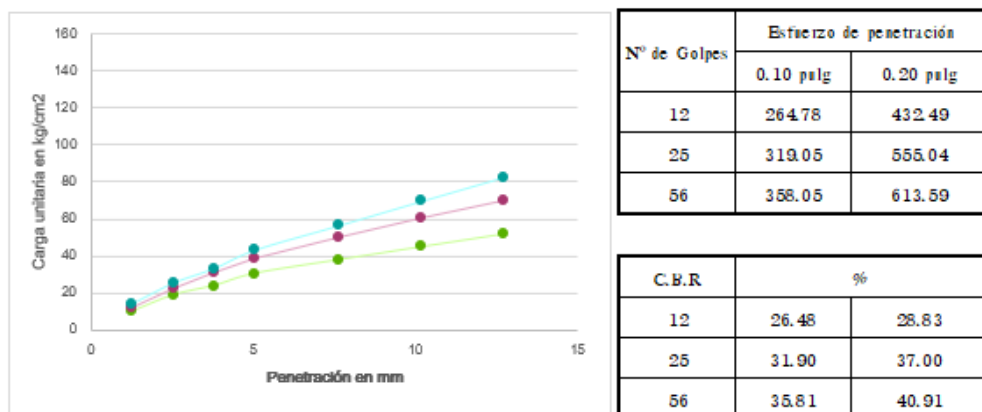
ANTES DE LA INMERSION				
No DE GOLPES CAPA:		12 Golpes x capa	25 Golpes x capa	56 Golpes x capa
HUMEDAD	Nº recipiente	C	R	O
	Wh + r	222.37	294.19	294.61
	Ws + r	213.7	282.35	282.15
	Ww	8.67	11.84	12.46
	r	54.28	33.01	33.64
	Ws	159.42	249.34	248.51
	w (%)	5.44	4.75	5.01
MOLDE NUMERO		I	XVIII	6
Molde + suelo húmedo (P)		9958	11421	12067
Molde		5855	6559	6719
Suelo húmedo (W)		4103	4862	5348
Suelo seco (Ws)		3891.37	4641.59	5092.66
Contenido de agua (w)		5.44	4.75	5.01
Densidad húmeda (H)		1.74	2.08	2.27
Densidad seca (S)		1.65	1.99	2.17

DESPUES DE LA INMERSION							
No DE GOLPES CAPA:		12 Golpes x capa		25 Golpes x capa		56 Golpes x capa	
		ARRIBA	ABAJO	ARRIBA	ABAJO	ARRIBA	ABAJO
HUMEDAD	Nº recipiente	C11	V1	Z8	W1	B8	Q1
	W _h + r	67.28	71.68	69.64	66.24	77.39	58.8
	W _s + r	64.72	67.88	66.83	63.33	74.4	56.36
	W _w	2.56	3.8	2.81	2.91	2.99	2.44
	r	18.39	16.52	17.18	16.95	16.95	16.83
	W _s	46.33	51.36	49.65	46.38	57.45	39.53
	w (%)	5.53	7.40	5.66	6.27	5.20	6.17
Promedio w (%)		6.46		5.97		5.69	
Molde + suelo húmedo (P)		10103		11482		12072	
Molde		5855		6559		6719	
Suelo húmedo (W)		4248		4923		5353	
Suelo seco (W _s)		3990.150		4645.789		5064.883	
Contenido de agua (w)		6.46		5.97		5.69	
Densidad húmeda (H)		1.81		2.11		2.28	
Densidad seca (S)		1.70		1.99		2.15	

HINCHAMIENTO			
Lectura inicial	1.58	1.11	1.74
24 horas	1.59	1.16	1.77
48 horas	1.61	1.18	1.78
72 horas	1.62	1.17	1.81
HINCHAMIENTO %	0.80	1.20	1.40

NUMERO DE ENSAYO		1	2	3	1	2	3
Tamiz ASTM Abertura / N°.		CARGA DE PENETRACION EN Lb			CARGA DE PENETRACION EN Kg		
1.27 mm	(0.05")	428.12	523.82	615.56	194.6	238.1	279.8
2.54 mm	(0.10")	831.82	1002.32	1124.86	378.1	455.6	511.3
3.81 mm	(0.15")	1063.26	1372.8	1483.24	483.3	624	674.2
5.06 mm	(0.20")	1358.72	1743.72	1927.64	617.6	792.6	876.2
7.62 mm	(0.30")	1687.18	2239.82	2517.24	766.9	1018.1	1144.2
10.16 mm	(0.40")	2002.22	2692.36	3108.38	910.1	1223.8	1412.9
12.70 mm	(0.50")	2313.74	3129.5	3692.26	1051.7	1422.5	1678.3

Tamiz ASTM Abertura / N°.		CARGA UNITARIA EN Lb/pulg ²			CARGA UNITARIA EN Kg/cm ²		
1.27 mm	(0.05")	136.27	166.74	195.94	9.581	11.723	13.776
2.54 mm	(0.10")	264.78	319.05	358.05	18.616	22.431	25.174
3.81 mm	(0.15")	338.45	436.98	472.13	23.795	30.723	33.194
5.06 mm	(0.20")	432.49	555.04	613.59	30.407	39.024	43.140
7.62 mm	(0.30")	537.05	712.96	801.26	37.758	50.126	56.334
10.16 mm	(0.40")	637.33	857.00	989.43	44.809	60.254	69.564
12.70 mm	(0.50")	736.49	996.15	1175.28	51.780	70.037	82.631



COMPACTACION				
Contenido de Humedad		6.46	5.97	5.69
Densidad Seca		1.65	1.99	2.17
CBR(%)				
CBR%	0,1 in	26.48	31.90	35.81
	0,2in	28.83	37.00	40.91
	Promedio	27.66	34.45	38.36
Densidad Seca		1.70	1.99	2.15

A 0,1 de penetración	
Densidad Max	2.17
CBR Dis.	35.54

Resultados del ensayo Abrasión de los Ángeles en la mezcla conformada por 65% Subbase Granular + 35% RCD

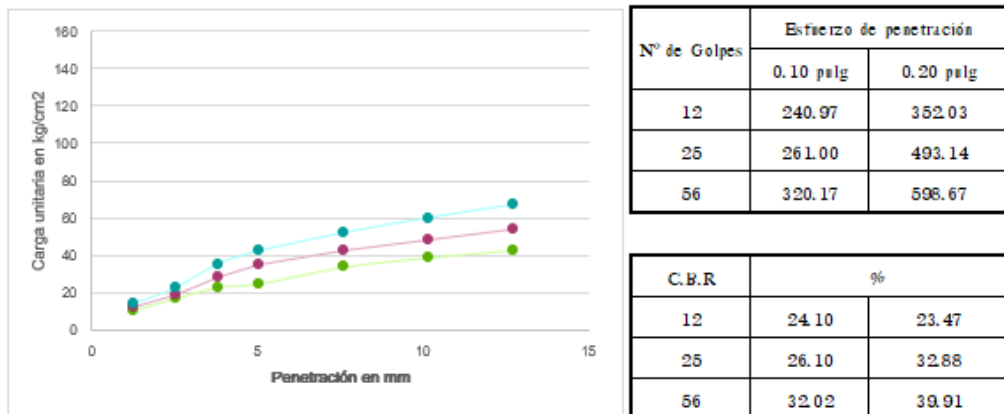
MOLDE Nº	III	V	XII	PESO DEL MARTILLO:	10.00 Lb
PESO MOLDE	5803	5888	6654		
VOLUMEN MOLDE	2329.41	2318.79	2339.21	ALTURA DEL MARTILLO	18.00 "
No DE GOLPES CAPA:	12	25	56		
Nº de ensayo:	1	2	3		

ANTES DE LA INMERSION				
No DE GOLPES CAPA:		12 Golpes x capa	25 Golpes x capa	56 Golpes x capa
HUMEDAD	Nº recipiente	X8	V2	D8
	W _k + r	72.1	56.7	59.9
	W _s + r	70.7	55.25	58.5
	W _w	1.4	1.45	1.4
	r	16.51	16.67	16.46
	W _s	54.19	38.58	42.04
	w (%)	2.58	3.76	3.33
MOLDE NUMERO		III	V	XII
Molde + suelo húmedo (P)		10263	10452	11384
Molde		5803	5888	6654
Suelo húmedo (W)		4460	4564	4730
Suelo seco (W _s)		4347.68	4398.68	4577.56
Contenido de agua (w)		2.58	3.76	3.33
Densidad húmeda (H)		1.91	1.97	2.02
Densidad seca (S)		1.87	1.90	1.96

DESPUES DE LA INMERSION							
No DE GOLPES CAPA:		12 Golpes x capa		25 Golpes x capa		56 Golpes x capa	
		ARRIBA	ABAJO	ARRIBA	ABAJO	ARRIBA	ABAJO
HUMEDAD	Nº recipiente	Q3	L	TI	D8	C12	G8
	Wh + r	70.89	78.71	74.81	80.23	70.17	81.79
	Ws + r	64.9	71.6	68.9	73.6	65.7	74.1
	Ww	5.99	7.11	5.91	6.63	4.47	7.69
	r	16.39	17.18	16.53	16.46	18.16	17.19
	Ws	48.51	54.42	52.37	57.14	47.54	56.91
	w (%)	12.35	13.07	11.29	11.60	9.40	13.51
Promedio w (%)		12.71		11.44		11.46	
Molde + suelo húmedo (P)		10688		10818		11887	
Molde		5803		5888		6654	
Suelo húmedo (W)		4885		4930		5233	
Suelo seco (Ws)		4334.266		4423.743		4695.060	
Contenido de agua (w)		12.71		11.44		11.46	
Densidad húmeda (H)		2.10		2.13		2.24	
Densidad seca (S)		1.86		1.91		2.01	

HINCHAMIENTO							
Lectura inicial		1.03		1.12		1.93	
24 horas		1.03		1.12		1.93	
48 horas		1.05		1.14		1.95	
72 horas		1.07		1.14		1.97	
HINCHAMIENTO %		0.80		0.40		0.80	
NUMERO DE ENSAYO		1	2	3	1	2	3
Tamiz ASTM Abertura / N°.		CARGA DE PENETRACION EN Lb			CARGA DE PENETRACION EN Kg		
1.27 mm	(0.05")	467.06	531.3	620.62	212.3	241.5	282.1
2.54 mm	(0.10")	757.02	819.94	1005.84	344.1	372.7	457.2
3.81 mm	(0.15")	1017.94	1282.82	1567.72	462.7	583.1	712.6
5.06 mm	(0.20")	1105.94	1549.24	1880.78	502.7	704.2	854.9
7.62 mm	(0.30")	1502.6	1897.28	2317.26	683	862.4	1053.3
10.16 mm	(0.40")	1726.12	2158.42	2672.34	784.6	981.1	1214.7
12.70 mm	(0.50")	1903.22	2427.7	2983.64	865.1	1103.5	1356.2

Tamiz ASTM Abertura / N°.		CARGA UNITARIA EN Lb/pulg ²			CARGA UNITARIA EN Kg/cm ²		
1.27 mm	(0.05")	148.67	169.12	197.55	10.453	11.890	13.889
2.54 mm	(0.10")	240.97	261.00	320.17	16.942	18.350	22.510
3.81 mm	(0.15")	324.02	408.33	499.02	22.781	28.709	35.085
5.06 mm	(0.20")	352.03	493.14	598.67	24.750	34.671	42.091
7.62 mm	(0.30")	478.29	603.92	737.61	33.627	42.460	51.859
10.16 mm	(0.40")	549.44	687.05	850.63	38.630	48.304	59.806
12.70 mm	(0.50")	605.81	772.76	949.72	42.593	54.331	66.772



COMPACTACION				
Contenido de Humedad		12.71	11.44	11.46
Densidad Seca		1.87	1.90	1.96
CBR(%)				
CBR%	0,1 in	24.10	26.10	32.02
	0,2in	23.47	32.88	39.91
	Promedio	23.78	29.49	35.96
Densidad Seca		1.86	1.91	2.01

A 0,1 de penetracion	
Densidad Max	1.96
CBR Dis.	31.87

Resultados del ensayo Abrasión de los Ángeles en la Subbase Granular

MÉTODO PARA AGREGADO GRUESO DE TAMAÑO MAYOR A 3/4

Método:	3	12 N° de Esferas, 1000 N° de Revoluciones, 30 minutos de tiempo de		
TAMIZ		PESO ANTES DEL ENSAYO	PESO DESPUES POR TAMIZ N° 12 (gr)	% DE PERDIDA
PASA	RETIENE			
1 1/2"	1"	5000 ± 50		
1"	3/4"	5000 ± 25		
		10019	5741	42.70%

% DE PERDIDA	42.70%
--------------	--------

NORMA MTOP CAPÍTULO 800 MATERIALES; SECCIÓN 816. SUBBASES DE AGREGADOS ITEM 816 - 2
% DE PERDIDA ≤ 50% Si cumple

Resultados del ensayo Abrasión de los Ángeles en la mezcla conformada por 65% Subbase Granular + 35% RCD

MÉTODO PARA AGREGADO GRUESO DE TAMAÑO MAYOR A 3/4

Método:	3	12 N° de Esferas, 1000 N° de Revoluciones, 30 minutos de tiempo de rotación		
TAMIZ		PESO ANTES DEL ENSAYO	PESO DESPUES POR TAMIZ N° 12 (gr)	% DE PERDIDA
PASA	RETIENE			
1 1/2" 1"	1" 3/4"	5000 ± 25 5000 ± 25		
		10039	5130	48.90%
% DE PERDIDA 48.90%		NORMA MTOP CAPÍTULO 800 MATERIALES: SECCIÓN 816, SUBBASES DE AGREGADOS ITEM 816 - 2 % DE PERDIDA ≤ 50% Si cumple		

Resultados de Resistencia a la compresión simple de los materiales de estudio

Material de estudio	Ensayo	Resultados		
		% cemento	F'c en 7 días (Kg/cm²)	F'c en 28 días (Kg/cm²)
Subbase (Juan Montalvo)	Compresión simple	3%	18.05	25.94
		4%	20.11	30.54
		5%	43.27	58.14
		% cemento	F'c en 7 días (Kg/cm²)	F'c en 28 días (Kg/cm²)
Subbase + RCD	Compresión simple	3.2%	18.60	25.78
		4%	23.07	28.07
		5%	29.00	41.68

Resultados de Resistencia a la compresión en la Subbase Granular

A los 7 días:

IDENTIFICACIÓN DEL CILINDRO	N°	FECHA DE VACIADO	DIAMETRO CILINDRO (cm)			ALTURA (cm)	ÁREA (cm²)	PESO (g)	DENSIDAD	ROTURA					PROMEDIO
			D1	D2	PROMEDIO					FECHA	EDAD (días)	CARGA (KN)	RESISTENCIA (MPa)	RESISTENCIA (Kg/cm²)	
3% de Cemento	1	20-05-26	15.30	15.31	15.31	30.67	183.97	12930	2291.54	27-05-26	7	31.8	1.80	18.36	18.05
	2	20-05-26	15.35	15.22	15.29	30.39	183.49	12740	2284.64	27-05-26	7	30.21	1.74	17.75	
4% de Cemento	1	20-05-26	15.12	15.22	15.17	30.00	180.74	12533	2311.39	27-05-26	7	34.04	1.93	19.65	20.11
	2	20-05-26	15.00	15.02	15.01	30.29	176.95	12420	2317.24	27-05-26	7	35.55	2.018	20.58	
5% de Cemento	1	19-05-26	15.16	15.13	15.15	29.95	180.15	12320	2283.42	26-05-26	7	75.98	4.30	43.81	43.27
	2	19-05-26	15.30	15.31	15.31	30.48	183.97	12600	2246.98	26-05-26	7	74.05	4.19	42.74	

A los 28 días:

IDENTIFICACIÓN DEL CILINDRO	N°	FECHA DE VACIADO	DIAMETRO CILINDRO (cm)			ALTURA (cm)	ÁREA (cm²)	PESO (g)	DENSIDAD (kg/m³)	ROTURA					PROMEDIO
			D1	D2	PROMEDIO					FECHA	EDAD (días)	CARGA (KN)	RESISTENCIA (MPa)	RESISTENCIA (Kg/cm²)	
3% de Cemento	1	20/05/2026	15.16	15.17	15.17	29.85	180.62	12304	2282.06	17/06/2026	28	44.25	2.50	25.55	25.94
	2	20/05/2026	15.09	15.11	15.10	30.31	179.08	12327	2271.06	17/06/2026	28	45.62	2.58	26.34	
4% de Cemento	1	20/05/2026	15.00	15.20	15.10	30.14	179.08	12390	2295.54	17/06/2026	28	54.83	3.10	31.65	30.54
	2	20/05/2026	15.30	15.00	15.15	30.03	180.27	12559	2319.98	17/06/2026	28	50.99	2.89	29.44	
5% de Cemento	1	19/05/2026	15.31	15.18	15.25	30.65	182.53	12566	2246.06	16/06/2026	28	102.26	5.79	59.03	58.14
	2	19/05/2026	15.18	15.23	15.21	30.63	181.58	12609	2267.10	16/06/2026	28	99.21	5.61	57.25	

Resultados de Resistencia a la compresión en la mezcla conformada por 65% Subbase Granular + 35% RCD

A los 7 días:

IDENTIFICACIÓN DEL CILINDRO	N°	FECHA DE VACIADO	DIAMETRO CILINDRO (cm)			ALTURA (cm)	ÁREA (cm2)	PESO (g)	DENSIDAD	ROTURA					PROMEDIO
			D1	D2	PROMEDIO					FECHA	EDAD (días)	CARGA (KN)	RESISTEN CIA (MPa)	RESISTENCIA A (kg/cm2)	
3,2% de Cemento	1	29-05-26	15.22	15.24	15.23	29.84	182.18	11214	2062.87	05-06-26	7	32.26	1.83	18.62	18.60
	2	29-05-26	15.26	15.27	15.27	30.03	183.01	11389	2072.27	05-06-26	7	32.2	1.822	18.58	
4% de Cemento	1	25-05-26	14.97	15.03	15.00	30.14	176.71	10825	2032.41	01-06-26	7	39.02	2.20	22.44	23.07
	2	25-05-26	15.09	14.93	15.01	30.52	176.95	11338	2099.43	01-06-26	7	41.07	2.324	23.70	
5% de Cemento	1	22-05-26	15.26	15.25	15.26	30.31	182.77	11336	2046.25	29-05-26	7	51.54	2.92	29.75	29.00
	2	22-05-26	15.24	15.26	15.25	30.30	182.65	11041	1994.97	29-05-26	7	48.97	2.77	28.25	

A los 28 días:

IDENTIFICACION DEL CILINDRO	N°	FECHA DE VACIADO	DIAMETRO CILINDRO (cm)			ALTURA (cm)	ÁREA (cm2)	PESO (g)	DENSIDAD	ROTURA					PROMEDIO
			D1	D2	PROMEDIO					FECHA	EDAD (días)	CARGA (KN)	RESISTEN CIA (MPa)	RESISTENCIA A (kg/cm2)	
3,2% de Cemento	1	25/05/2026	15.01	15.13	15.07	30.47	178.37	11012	2026.18	22/06/2026	28	40.75	2.50	25.52	25.78
	2	25/05/2026	15.15	15.26	15.21	30.61	181.58	11308	2034.44	22/06/2026	28	41.58	2.553	26.04	
4% de Cemento	1	25/05/2026	14.97	15.03	15.00	30.14	176.71	10825	2032.41	22/06/2026	28	50.15	2.838	28.95	28.07
	2	25/05/2025	1.03	14.93	8.01	30.52	50.39	11330	7367.00	22/06/2026	28	47.1	2.67	27.18	
5% de Cemento	1	22/05/2026	15.26	15.25	15.26	30.31	182.77	11330	2045.17	19/06/2026	28	73.87	4.18	42.636	41.68
	2	22/05/2026	15.24	15.26	15.25	30.30	182.65	11040	1994.79	19/06/2026	28	70.58	3.99	40.72	

Resultados obtenidos en la estabilización con emulsión asfáltica CSS-1h en los materiales de estudio:

% de emulsión óptima obtenida mediante el ensayo de estabilidad y flujo Marshall

Material	Contenido óptimo de emulsión asfáltica (%)
Subbase granular	4
Subbase granular + RCD	4

Densidades de la dosificación en los materiales de estudio

Material	% de emulsión asfáltica	γ (t/m ³)
Subbase granular	2	2.55
	4	2.47
	6	2.40
	8	2.33
Subbase granular + RCD	2	2.39
	4	2.32
	6	2.25
	8	2.19

Resultados de estabilidad de los materiales de estudio

Material	% de emulsión asfáltica	Estabilidad (lb)
Subbase granular	2	3259
	4	4367
	6	4182
	8	3971
Subbase granular + RCD	2	2784
	4	4026
	6	3986
	8	3684

Resultados del flujo Marshall en los materiales estudiados

Material	% de emulsión asfáltica	Flujo (1/100")
Subbase granular	2	13
	4	15
	6	17
	8	20
Subbase granular + RCD	2	12
	4	13
	6	16
	8	20

Resultados obtenidos de las mezclas de estudio con el % de emulsión óptimo

	Subbase granular		Subbase granular + RCD		Especificaciones técnicas
% Emulsión óptimo	4		4		-
γ (t/m ³)	2.46		2.34		-
%Vacíos de aire	4.03%		4.24%		3% - 8%
Sumergido	2h	24h	2h	24h	-
Estabilidad (lb)	4383.40	3433.46	4043.58	2876.51	> 750 lb
Flujo (1/100")	14	15	13	14	5 - 18
S _t (psi)	50.87	39.11	47.26	35.29	-
Flujo (1/100")	10	10	11	11	-
Conservación de estabilidad y TSR					
TSR	76.89%		74.67%		> 70%
Estabilidad	74.58%		71.14%		> 70%