

Universidad de Costa Rica
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Civil

**Efecto del Pavimento Asfáltico Reciclado (RAP) en las características
mecánicas de las bases estabilizadas con cemento**

Trabajo Final de Graduación

Que para obtener el grado de Licenciatura en Ingeniería Civil

Presenta:

Pablo Arturo Abarca Cascante

Director del Proyecto de Graduación:

Ing. Mauricio Salas Chaves

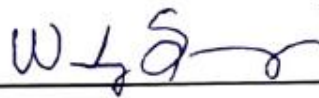
Ciudad Universitaria Rodrigo Facio

Miembros del comité asesor



Ing. Mauricio Salas Chaves, Lic.

Director



Ing. Wendy Sequeira Rojas, M.Sc.

Asesora



Ing. Víctor Cervantes Calvo, Lic.

Asesor



Pablo Arturo Abarca Cascante

Estudiante

Derechos de propiedad intelectual

Fecha: 2021, Junio, 25

El suscrito, Pablo Arturo Abarca Cascante, cédula 1-1581-0696, estudiante de Licenciatura en Ingeniería Civil de la Universidad de Costa Rica, con número de carné **B30005**, manifiesta que es autor del Proyecto Final de Graduación **Efecto del Pavimento Asfáltico Reciclado (RAP) en las características mecánicas de las bases estabilizadas con cemento**, bajo la dirección del **Ing. Mauricio Salas Chaves, Lic.**, quien en consecuencia tiene derechos compartidos sobre los resultados de esta investigación.

Asimismo, hago traspaso de los derechos de utilización del presente trabajo a la Universidad de Costa Rica, para fines académicos: docencia, investigación, acción social y divulgación.

Nota: De acuerdo con la Ley de Derechos de Autor y Derechos Conexos N° 6683, Artículo 7 (versión actualizada el 02 de julio de 2001); “no podrá suprimirse el nombre del autor de las publicaciones o reproducciones ni hacer en ellas interpolaciones, sin una conveniente distinción entre el texto original y las modificaciones o adiciones editoriales”. Además, el autor conserva el derecho moral sobre la obra, Artículo 13 de esta ley, por lo que es obligatorio citar la fuente de origen cuando se utilice información contenida en esta obra.

Dedicatoria

A mis padres y hermanos, quienes siempre me han acompañado y son la razón por la cual he llegado hasta aquí. Por el sacrificio que han hecho para impulsarme desde pequeño a cumplir todas mis metas.

A mi novia, por acompañarme, apoyarme e impulsarme a seguir adelante durante todo el periodo universitario.

Agradecimientos

A mis compañeros de carrera, gracias por todas las historias de alegrías, frustraciones, trasnochadas y por todo el apoyo que nos llevaron a ser colegas y más importe, amigos.

A mi director y asesores, Ing. Mauricio Salas Chaves, a la Ing. Wendy Sequeira Rojas, al Ing. Víctor Cervantes Calvo, y, en general todo el equipo de profesionales de la Unidad de Auditoría Técnica del LanammeUCR, por todo el apoyo brindado durante mis últimos 3 años universitarios y en especial durante el desarrollo de este proyecto.

A las instituciones y empresas con su donación y asesoría hicieron posible este proyecto:

- LanammeUCR: Por la colaboración en la recolección de muestras, la asesoría técnica y el préstamo de los laboratorios para el estudio de los materiales
- CONAVI: Por la gestión de las donaciones de material asfáltico perfilado
- Agregados Guacalillo: Por la donación del agregado de base granular virgen
- CACISA: Por el préstamo de sus laboratorios para el desarrollo experimental de la investigación

Índice General

Capítulo 1: Introducción.....	1
1.1. Justificación	1
1.1.1. Problema específico	1
1.1.2. Importancia	2
1.1.3. Antecedentes teóricos y prácticos del problema	3
1.2. Objetivos	8
1.2.1. Objetivo general.....	8
1.2.2. Objetivos específicos.....	8
1.3. Delimitación del problema	8
1.3.1. Alcance.....	8
1.3.2. Limitaciones.....	10
1.4. Descripción de la metodología	10
1.4.1. Etapa I: Recopilación de información.....	12
1.4.2. Etapa II: Recolección de muestras	12
1.4.3. Etapa III: Aplicación de ensayos de caracterización	18
1.4.4. Etapa IV: Diseño de mezcla, confección y falla de pastillas de BEC	21
1.4.5. Etapa V: Análisis de resultados	23
1.4.6. Etapa VI: Informe final	23
Capítulo 2: Marco teórico	24
2.1. Ingeniería de pavimentos	24
2.2. Tipos de pavimentos.....	24
2.2.1. Pavimentos flexibles	26
2.2.2. Pavimentos Semirígidos	27
2.2.3. Pavimentos rígidos	27
2.3. Mantenimiento y rehabilitación de pavimentos	27

2.4.	Reciclaje de pavimentos deteriorados	28
2.4.1.	Concepto y tipos de reciclajes de pavimentos deteriorados	28
2.5.	Bases estabilizadas con cemento (BEC).....	30
2.6.	Factores que pueden afectar la resistencia de la BEC	31
2.6.1.	Contenido de cemento.....	31
2.6.2.	Agrietamientos.....	32
2.6.3.	Consideraciones de diseño	33
2.7.	Características físicas que influyen en el comportamiento de las BEC.....	34
2.7.1.	Tipos de materiales estabilizados con cemento	34
Capítulo 3: Caracterización de las muestras recolectadas.....		36
3.1.	Ensayos de laboratorio	36
3.1.1.	Granulometría.....	36
3.1.2.	Corrección granulométrica por sobretamaño del agregado.....	39
3.1.3.	Abrasión.....	41
3.1.4.	Durabilidad	42
3.1.5.	Contenido de asfalto	42
3.1.6.	Granulometría del material liberado del asfalto	44
3.1.7.	Contenido de humedad.....	47
3.1.8.	Ensayo para determinar la gravedad específica bruta seca (GBS) y la absorción de agregados gruesos (ASTM C127) y finos (ASTM C128)	47
Capítulo 4: Diseño de mezcla, confección y falla de especímenes de base estabilizada con cemento.....		50
4.1.	Diseño de mezcla	50
4.1.1.	Densidad máxima y humedad óptima de la mezcla de diseño patrón	51
4.1.2.	Resultados del valor porcentual de cemento a utilizar.....	52
4.2.	Confección de pastillas de base estabilizada con distintos porcentajes de material asfáltico perfilado e igual porcentaje de cemento.....	53

4.3. Confección de pastillas de base estabilizada con un 75% de material asfáltico perfilado y diferentes porcentajes de cemento	57
4.4. Falla de especímenes.....	57
Capítulo 5: Presentación y análisis de resultados.....	60
5.1. Análisis comparativo de la resistencia a la compresión para los diferentes porcentajes de material asfáltico perfilado con igual contenido de cemento (Primer estudio de resistencias)	60
5.2. Análisis comparativo de la resistencia a la compresión para muestras con igual contenido de material asfáltico perfilado y distintos porcentajes de cemento (Segundo estudio de resistencias)	68
Capítulo 6: Conclusiones y recomendaciones	75
6.1. Conclusiones.....	75
6.2. Recomendaciones.....	80
Bibliografía.....	82
Apéndices.....	I
Apéndice A: Resultados granulométricos de las muestras utilizadas.....	I
Apéndice B: Resultados granulométricos de las muestras de material asfáltico perfilado luego de la extracción del asfalto.....	III
Apéndice C: Correcciones granulométricas debido al sobretamaño de las muestras de material granular, según las especificaciones de la norma ASTM D558.....	V

Índice de Figuras

Figura 1: Esquema metodológico del proyecto de investigación.....	11
Figura 2. Muestreo de material de base granular.....	13
Figura 3. Primer muestreo de material asfáltico perfilado	14
Figura 4. Ubicación del primer muestreo de material de RAP y el sitio de perfilado.....	14
Figura 5. Segundo muestreo de material asfáltico perfilado.....	15
Figura 6. Ubicación del segundo muestreo de material de RAP y el sitio de perfilado...	16
Figura 7. Tercer muestreo de material asfáltico perfilado y zona de colocación del material	17
Figura 8. Ubicación del tercer muestreo de material asfáltico perfilado y lugar de colocación	17
Figura 9. Cemento hidráulico comercial marca Holcim Fuerte de Uso General	18
Figura 10. Clasificación de la muestra de ensayo de acuerdo a la granulometría del material	20
Figura 11. Estructura de pavimento flexible (izquierda), pavimento semirígido (centro) y pavimento rígido (derecha).....	25
Figura 12. Proceso de reciclado del material deteriorado	29
Figura 13. Transmisión de los esfuerzos en una base granular (izquierda) y una base estabilizada (derecha)	31
Figura 14. Especificaciones granulométricas para agregados granulares de BEC	36
Figura 15. Fotografía de la separación granulométrica aplicada a uno de los agregados granulares.....	37
Figura 16. Gráfico comparativo de los resultados del ensayo de granulometría aplicado a los materiales granulares utilizados.....	38
Figura 17. Fotografía de la separación de muestras en agregado fino, grueso y sobretamaño	39
Figura 18 . Corrección granulométrica por sobretamaño del agregado según la norma ASTM D558 y ASTM D163 (Apéndice C)	40
Figura 19. Resultados del ensayo de abrasión de los materiales granulares utilizados..	41
Figura 20. Fotografías del montaje del ensayo de Reflux, para contenido de asfalto (AASHTO T164).....	43

Figura 21. Resultados del ensayo de contenido de asfalto de los materiales asfálticos perfilados (AASHTO T164)	44
Figura 22. Fotografía del agregado del material asfáltico perfilado luego de la extracción del asfalto.....	45
Figura 23. Resultados granulométricos comparativos del material perfilado M1 antes y después del ensayo de REFLUX para extraer el asfalto (Apéndice B)	45
Figura 24. Resultados granulométricos comparativos del material perfilado M2 antes y después del ensayo de extracción del contenido de asfalto (Apéndice B).....	46
Figura 25. Resultados granulométricos comparativos del material perfilado M3 antes y después del ensayo de extracción del contenido de asfalto (Apéndice B).....	46
Figura 26. Resultados del ensayo para determinar los porcentajes de absorción de los agregados granulares utilizados (ASTM C127 y C128).....	48
Figura 27. Resultados del ensayo para determinar la gravedad específica bruta seca de los agregados granulares utilizados (ASTM C127 y C128).....	49
Figura 28. Mezcla de una de las combinaciones de agregados utilizados para el diseño de mezcla patrón.....	51
Figura 29. Resultados del ensayo Próctor Modificado (ASTM D1557) para ubicar la densidad máxima y la humedad óptima.....	52
Figura 30. Gráfico de resultados del valor de esfuerzo de acuerdo al contenido porcentual de cemento presente en la mezcla.....	53
Figura 31. Gráfico resumen de la matriz de ensayos realizada según el tipo de muestra y dosificación para un valor constante de 3,80% de cemento por peso seco	54
Figura 32. Resumen del proceso de confección de especímenes de BEC.....	55
Figura 33. Pastillas de BEC con diferentes porcentajes de material asfáltico perfilado adicionado a la mezcla	56
Figura 34. Gráfico resumen de la matriz de ensayos realizada para una dosificación constante de 75% de material asfáltico perfilado y distintos porcentajes de cemento	57
Figura 35. Proceso de ganancia de resistencia de las pastillas de BEC en la cámara húmeda.....	58
Figura 36. Proceso de falla a la compresión de pastillas de BEC.....	59
Figura 37. Gráfico comparativo de la resistencia a la compresión para los diferentes porcentajes de material asfáltico perfilado	64

Figura 38. Gráfico comparativo de la densidad de las pastillas de base estabilizada al variar el contenido de material asfáltico perfilado.....	65
Figura 39. Gráfico comparativo de humedades al momento de falla, variando el contenido de material asfáltico perfilado	67
Figura 40. Comparación de las pastillas elaborados con distintos porcentajes de cemento y 75% de material asfáltico perfilado.....	70
Figura 41. Gráfico comparativo de la resistencia a la compresión para los diferentes porcentajes de cemento adicionados a la mezcla con 75% de RAP	72
Figura 42. Gráfico comparativo de la densidad de las pastillas de base estabilizada al variar el contenido de cemento en la mezcla con 75% de RAP	74
Figura 43. Gráfico comparativo de humedades al momento de falla, variando el contenido de cemento en la mezcla con 75% de RAP	74

Índice de Cuadros

Cuadro 1. Resumen del material recopilado para la confección de ensayos de laboratorio	12
Cuadro 2. Contenido de cemento según los agregados de la mezcla de la BEC.....	35
Cuadro 3. Resultados del ensayo de durabilidad del agregado fino y grueso del material de base granular virgen (ASTM D3744)	42
Cuadro 4. Humedades promedio registradas para los distintos materiales granulares utilizados	47
Cuadro 5. Resumen de resistencias a la compresión de las tres muestras de material asfáltico perfilado utilizando igual contenido de cemento en la mezcla	66
Cuadro 6. Resumen de densidades de pastillas de BEC que contienen igual contenido de cemento en la mezcla y distintas combinaciones de material asfáltico perfilado.....	66
Cuadro 7. Resumen de humedades durante el proceso de falla de pastillas de BEC de las tres muestras de material asfáltico perfilado utilizando igual contenido de cemento en la mezcla	67
Cuadro 8. Resumen de humedades durante el proceso de falla de pastillas de BEC con 75% de material asfáltico perfilado de las tres muestras estudiadas, utilizando distintos porcentajes de cemento.....	71
Cuadro 9. Resumen de resistencias a la compresión de las tres muestras de material asfáltico perfilado utilizando distintos porcentajes de cemento adicionados a la mezcla con 75% de RAP	73
Cuadro 10. Resumen de densidades secas de las tres muestras de material asfáltico perfilado utilizando distintos porcentajes de cemento adicionados a la mezcla con 75% de RAP.....	73

Índice de abreviaturas

AASTHO: American Association of State Highway and Transportation Officials

ASTM: American Society for Testing and Materials

BEC: Base estabilizada con cemento

CONAVI: Consejo Nacional de Vialidad

CR – 2010: Manual de Especificaciones Generales para la Construcción de Carreteras, Caminos y Puentes

GBS: Gravedad específica bruta seca

kg: kilogramo

km: kilómetro

LanammeUCR: Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales de la Universidad de Costa Rica

m: metro

mm: milímetro

MOPT: Ministerio de Obras Públicas y Transportes de Costa Rica

MPa: Megapascales

RAP: Reclaimed Asphalt Pavement

UCR: Universidad de Costa Rica



UNIVERSIDAD DE
COSTA RICA

EIC Escuela de
Ingeniería Civil

02 de julio del 2021
EIC-0783-2021

**Señor
Pablo Abarca Cascante
Presente**

Estimado estudiante:

Según el artículo 39 del reglamento de Trabajos Finales de Graduación, la Escuela de Ingeniería Civil se complace en otorgarle la aprobación con distinción de su Trabajo Final de Graduación denominado "Efecto del pavimento asfáltico reciclado (RAP) en las características mecánicas de las Bases estabilizadas con cemento."

Por este motivo le manifestamos nuestras más sinceras felicitaciones por su dedicación y empeño.

Atentamente,

**Ing. Flor Muñoz Umaña, M.Sc.
Directora
Escuela de Ingeniería Civil**

GAA

C. Archivo

Universidad de Costa Rica
Facultad de Ingeniería

EIC Escuela de
Ingeniería Civil



Año de las Universidades Públicas
por la conectividad como
derecho humano universal
BICENTENARIO DE LA
INDEPENDENCIA DE COSTA RICA

☎ 2511-6645 / 2511-6647 / 2511-6648 Dirección electrónica www.eic.ucr.ac.cr

Programa acreditado por la Agencia de Acreditación de Programas de Ingeniería y de Arquitectura-AAPIA

Abarca Cascante, Pablo Arturo

Efecto del Pavimento Asfáltico Reciclado (RAP) en las características mecánicas de las bases estabilizadas con cemento

Proyecto de graduación – Ingeniería Civil – San José, Costa Rica.

P. A. Abarca C., 2021

xxii, 84, [6]h; ils col – 19 ref

Resumen

En la presente investigación se evaluó el efecto en las características mecánicas de las bases estabilizadas con cemento hidráulico (BEC) al utilizar material asfáltico perfilado como agregado granular. Se evalúa el desempeño a la compresión de bases estabilizadas generadas a partir de 3 distintas muestras de material asfáltico perfilado (RAP) y una muestra de material de base granular virgen.

El desarrollo experimental se divide en 2 estudios de resistencias a la compresión. El primer estudio se basa en el cálculo de un diseño de mezcla patrón que es utilizado por todas las combinaciones de mezcla de las 3 muestras de material asfáltico. El diseño de mezcla patrón se realiza para un porcentaje de 25% de RAP y se aplican los mismos criterios de diseño para las combinaciones de 0%, 40%, 50%, 60%, 75% y 100% de este material en la matriz de agregados granulares. Los resultados de este estudio indican que a mayor contenido de RAP se obtienen valores menores de resistencia a la compresión y de absorción, comprometiendo la integridad de la BEC.

En el segundo estudio se evalúa la demanda de cemento necesaria para lograr obtener resultados aceptables de resistencia a la compresión al utilizar un contenido de material asfáltico de 75%. Los resultados indican que se requiere un contenido de cemento cercano al 6% del peso seco total de la mezcla, es decir cerca de un 60% más que la mezcla patrón utilizada para el primer estudio de resistencias a la compresión. P.A.A.C

Palabras claves: Base estabilizada con cemento hidráulico, material asfáltico perfilado, resistencia a la compresión inconfiada, absorción de humedad, contenido de asfalto.

Ing. Mauricio Salas Chaves, Lic.

Escuela de Ingeniería Civil

Capítulo 1: Introducción

1.1. Justificación

1.1.1. Problema específico

Los trabajos de tratamiento o mejoramiento de la capa de base en carreteras se emplean para brindar una mayor durabilidad y nivel de servicio, especialmente en vías que presentan un alto volumen de tránsito. La estabilización del material de base permite aumentar la resistencia a la compresión del material, mejorando el comportamiento estructural ante las cargas de tránsito y una mejor resistencia ante la erosión (Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales (LanammeUCR), 2019).

En Costa Rica, el material más utilizado para la estabilización de bases en carreteras es el cemento hidráulico, el cual, se adiciona para mejorar las propiedades de resistencia mecánica, resistencia al clima, los indicadores de plasticidad y elasticidad, la degradación de los agregados, entre otros. Además, permite el reciclado de pavimentos existentes sin importar su condición de deterioro, así como el uso de materiales granulares que no cumplen con las especificaciones técnicas de base granular en su condición virgen (Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales (LanammeUCR), 2011).

Cuando se trata de un proyecto de rehabilitación de la calzada utilizando base estabilizada con cemento, generalmente, la superficie de ruedo existente es pulverizada y mezclada con parte del material de base existente y el cemento hidráulico. La carpeta asfáltica existente recuperada y mezclada puede significar un porcentaje importante del total del material mejorado. Este material asfáltico puede incidir en las características mecánicas de la base estabilizada resultante y su utilización no se encuentra normado o especificada para el diseño estructural de carreteras (Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales (LanammeUCR), 2019).

El Manual de Especificaciones Generales para la Construcción de Carreteras, Caminos y Puentes (de ahora en adelante CR – 2010) en las secciones 302 y 303, actualizadas en el año 2017, detalla las especificaciones a cumplir para las bases estabilizadas con cemento, en términos de agregados, resistencia y procesos constructivos; sin embargo, no se menciona el material asfáltico recuperado (RAP) que es incluido en la mezcla como parte de los agregados, únicamente se realiza una mención general de las características que debe

cumplir todo material granular reciclado, específicamente las características granulométricas que debe cumplir (Ministerio de Obras Públicas y Transportes (MOPT), 2010).

El procedimiento de incorporación del material asfáltico recuperado como agregado en la matriz de bases estabilizadas con cemento (de ahora en adelante BEC), aún no se encuentra normado en el país, ni se ha adoptado alguna metodología internacional específica para este tipo de materiales, tanto a nivel de diseño como para el proceso constructivo. Debido a esto, los procedimientos constructivos, dosificaciones y tipos de agregados presentan alta variabilidad, afectando los resultados de sus características mecánicas (especialmente en la resistencia a la compresión e integridad de la mezcla) y por ende su desempeño a nivel operativo.

En la Unidad de Auditoría Técnica del Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales de la Universidad de Costa Rica (de ahora en adelante LanammeUCR), se han evaluado diversos proyectos a nivel nacional que incluyen el diseño y proceso constructivo de las bases estabilizadas con cemento (BEC). Los resultados de estos ensayos indican que generalmente, la resistencia mecánica a la compresión de las BEC presentan valores mayores al límite superior especificado en el CR – 2010, lo cual puede generar problemas de agrietamiento a corto y mediano plazo, y por ende, requerir una intervención prematura de la vía (Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales (LanammeUCR), 2011).

1.1.2. Importancia

Las BEC proporcionan una alternativa apropiada para la construcción de carreteras en el país debido a su aporte estructural, la variabilidad de los materiales de base en distintas regiones del país, el clima altamente lluvioso y la presencia de niveles freáticos muy superficiales en gran cantidad de zonas. Esta técnica constructiva permite la colocación de bases que presentan una capacidad estructural adecuada, durabilidad y estabilidad volumétrica, por ende, carreteras con mayor capacidad estructural. El espesor de la capa recuperada generalmente se encuentra entre los valores de 20 y 35 cm, donde, generalmente se incluye la totalidad del espesor de la carpeta asfáltica existente y parte de la base granular. Estos espesores son variables y dependen de la calidad y cantidad de intervenciones que ha sufrido la estructura, además, puede requerir o no la inclusión de material de base granular virgen para mejorar las características de la mezcla (Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales (LanammeUCR), 2011).

El proceso de reciclado de la carpeta asfáltica existente mediante tratamientos “in situ” con cemento hidráulico, es una técnica moderna que permite aprovechar al máximo los materiales, disminuyendo de forma notable las consecuencias ambientales que se generan al extraer nuevos materiales, principalmente en transporte, explotación de nuevas canteras de material granular y la disposición del material granular removido de la carpeta asfáltica que muchas veces es desechado o almacenado por mucho tiempo. Por lo anterior, el uso de material reciclado RAP es una técnica económica que logra reducir entre 30% a 40% la inversión de la obra, respecto a las técnicas tradicionales de rehabilitación, principalmente por no utilizar agregados nuevos, la reducción del costo por acarreo y su bajo costo de mantenimiento (Flores, 2016).

La presente investigación pretende evaluar y recomendar el contenido máximo de material asfáltico recuperado (RAP) en la matriz de las mezclas de bases estabilizadas con cemento, sin perjudicar sus características estructurales de diseño, reduciendo la variabilidad en los procedimientos de diseño y por ende en los productos colocados. Además, se evalúa el contenido de cemento hidráulico requerido para obtener una BEC que cumpla satisfactoriamente los parámetros nacionales de calidad, incluso si se llegaran a utilizar porcentajes altos de RAP en la mezcla de BEC. De forma análoga, se evalúan las principales características propias de estos agregados, con el fin de determinar su efecto en las características mecánicas de las BEC.

1.1.3. Antecedentes teóricos y prácticos del problema

Los procesos de mejoramiento de bases de carretera son cada vez más comunes en los proyectos de obra nueva y rehabilitaciones de carreteras existentes, en nuestro país. Se vuelve más relevante mejorar la Red Vial Nacional debido a la creciente demanda del transporte y por ende un aumento en las cargas de servicio. Para ello, la utilización de técnicas que permitan una mayor durabilidad de la carretera permiten evitar o reducir intervenciones importantes a corto plazo, lo cual es de interés tanto para la Administración como a nivel de funcionamiento. Durante el año 2017 en Costa Rica se invirtieron cerca de 125 mil millones de colones en la conservación de las carreteras pavimentadas que forman parte de la red vial nacional (CONAVI, 2017), donde más del 50% (MOPT, 2017) están siendo rehabilitadas o construidas utilizando bases estabilizadas con cemento (Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales (LanammeUCR), 2018).

En el 2020, la Asamblea Legislativa de Costa Rica aprobó la "*Ley Para El Uso De Materiales Reciclados En Obras De Infraestructura Vial (Ley De Pavimentos Reciclados)*" con el fin de utilizar materiales que históricamente se han desechado, almacenado o utilizado de forma errónea, en la matriz de agregados de los proyectos viales. La ley establece que en todo proyecto de construcción, reconstrucción, conservación, mantenimiento y rehabilitación que ejecute el Estado o las municipalidades en vías nacionales o cantonales, un mínimo del 50% del volumen total del pavimento a emplear deberá consistir en materiales reciclados. El texto aprobado indica que será el LanammeUCR el ente encargado de emitir y actualizar la lista de materiales que se deberán reutilizar (Asamblea Legislativa de la República, 2020).

1.1.3.1. Publicaciones e investigaciones a nivel nacional

Los procedimientos y características de las bases estabilizadas con cemento, han sido el objeto de múltiples investigaciones a nivel nacional, principalmente por parte del LanammeUCR. Estas investigaciones generalmente están asociadas al efecto generado por la resistencia de estos elementos en el comportamiento general del pavimento y su relación con posibles deterioros a corto y largo plazo. Sin embargo, no existen investigaciones relacionadas con el efecto del material asfáltico recuperado (RAP) sobre las características mecánicas de estos elementos.

Recientemente (2019) el LanammeUCR publicó la "*Guía para inspectores para la construcción de bases estabilizadas con cemento hidráulico*". Esta guía tiene como objetivo proporcionar una herramienta a los inspectores de campo para ejecutar e inspeccionar la utilización de técnicas adecuadas durante las labores de estabilización de bases con cemento. La guía describe el procedimiento detallado para la construcción de obras con técnicas eficientes y debidamente aprobadas por la administración, con el fin de garantizar la calidad de los trabajos a lo largo de la Red Vial Nacional (Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales (LanammeUCR), 2019).

El LanammeUCR en el 2018, realizó un informe con respecto a especificaciones para bases estabilizadas con cemento en Costa Rica. El objetivo de este informe era calibrar las especificaciones para el diseño, construcción y desempeño de las capas de base granular estabilizadas con cemento utilizadas como parte de una estructura de pavimento. Para ello, se utilizaron tramos de prueba con los mismos materiales estabilizados en laboratorio. Además, se propusieron modificaciones a las especificaciones de bases estabilizadas con

cemento conforme a lo establecido en el Manual de Especificaciones Generales para la Construcción de Carreteras, Caminos y Puentes (CR – 2010) (Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales (LanammeUCR), 2018).

El LanammeUCR en el 2017, publicó un artículo con respecto a la utilización del cemento y el concreto en la infraestructura vial. La publicación, tuvo como objetivo principal informar sobre las investigaciones realizadas que se han desarrollado en el área del cemento y el concreto en la infraestructura vial costarricense. En el artículo se abarcan los estudios realizados a proyectos nacionales evaluados por el LanammeUCR con respecto a bases estabilizadas con cemento, los principales ensayos y los resultados obtenidos en estas evaluaciones. La publicación evaluó rutas nacionales en las que se utilizaron el cemento y/o el concreto en su estructura de pavimento, entre las que se encuentran los proyectos de Cañas – Liberia, Bernardo Soto y Sifón – La Abundancia. Se observa como los resultados del ensayo de resistencia a la compresión de BEC indican que el 50% de los ensayos realizados supera en al menos 1,5 veces el valor de resistencia máxima especificada en la normativa nacional, lo cual puede estar asociado a deterioros prematuros del pavimento (Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales (LanammeUCR), 2017).

Para el año 2014, el LanammeUCR realiza una línea de investigación denominada "*Reciclaje de pavimentos*", la cual se encuentra orientada a buscar soluciones económicas con respaldo científico para mejorar las condiciones de funcionamiento de la Red Vial Nacional de Carreteras. El texto indica como el reciclaje y reutilización de materiales brinda beneficios tanto económicos como ambientales. La investigación describe las principales características de estos materiales, así como las técnicas que se utilizan tanto a nivel nacional como internacional (Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales (LanammeUCR), 2014).

En el 2012, el LanammeUCR realizó una publicación titulada "*Experiencia costarricense en diseño, aseguramiento de la calidad y construcción de bases estabilizadas con cemento*". Esta publicación resume de manera histórica el uso de las bases estabilizadas con cemento tanto a nivel nacional como internacional. Se recopilan las principales experiencias con respecto al uso de las bases estabilizadas con cemento en Costa Rica, donde se incluye la resistencia a la compresión de estas obras. De acuerdo a los ensayos de campo realizados por el LanammeUCR, se obtiene que el 89% de los especímenes presentan un valor mayor a 3,9

MPa de resistencia a la compresión inconfiada. Según el CR – 2010, este valor es el máximo permitido en proyectos de infraestructura pública, debido a que valores superiores pueden presentar agrietamientos por contracción lo cual puede comprometer la calidad y durabilidad de la superficie colocada (Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales (LanammeUCR), 2012).

El Ministerio de Obras Públicas y Transportes de Costa Rica (de ahora en adelante MOPT) como parte de sus esfuerzos por normar las prácticas constructivas a nivel nacional, aprobó en el 2010 el "*Manual de Especificaciones Generales para la Construcción de Carreteras, Caminos y Puentes*". El propósito de este manual es lograr la sistematización y uniformidad de criterios en los procesos empleados en el desarrollo y conservación de la Red Vial Nacional. La sección 302 del CR – 2010, establece los procedimientos constructivos y los lineamientos de calidad que se deben cumplir para el mejoramiento de caminos al realizar la estabilización de agregados. Además, algunas otras secciones de este manual se encuentran relacionadas con estas prácticas constructivas de manera que se realicen de acuerdo a criterios científicos comprobados (Ministerio de Obras Públicas y Transportes (MOPT), 2010).

1.1.3.2. Publicaciones e investigaciones a nivel internacional

En el 2017, Fano y Chávez, para optar por el grado de licenciatura en ingeniería civil en la Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas, desarrollaron la tesis titulada "*Diseño estructural de un pavimento básico reciclado y mejorado con cemento portland para diferentes dosificaciones en el proyecto de conservación vial de Huancavelica*". El objetivo principal de la investigación es determinar las propiedades del material del suelo existente en el corredor vial a mejorar con cemento, sometido con un proceso de reciclaje de la carpeta actual. Se analiza específicamente el mejoramiento realizado en el proyecto de conservación vial de Huancavelica en Perú. Se describe la metodología para la caracterización del material reciclado, así como las características mecánicas de las bases estabilizadas al utilizar distintos porcentajes de pavimento asfáltico reciclado (Fano & Chávez, 2017).

Por su parte, el ingeniero Méndez, como requisito para optar por la especialización en Ingeniería de Pavimentos en la Universidad de Nueva Granada, Colombia, desarrolló en el 2015 la investigación titulada "*Evaluación técnica y económica del uso de pavimento asfáltico reciclado (RAP) en vías colombianas*". En el estudio se desarrollan las distintas metodologías de reciclado y la caracterización del material asfáltico. Se incluyen la metodología

constructiva y de diseño que se utiliza para la rehabilitación de carreteras mediante bases estabilizadas con cemento y material asfáltico de reciclaje (Méndez, 2015).

Por otro lado, Restrepo & Stephens desarrollan una investigación en el 2015 como requisito para la especialización en Vías y Transportes en la Universidad de Medellín, Colombia, titulada "*Reciclaje de pavimentos, estudio de las ventajas económicas del reciclaje en frío in situ de pavimentos asfálticos*". En la investigación se describe la metodología utilizada en Colombia para el reciclado de carpetas asfálticas, así como los procesos constructivos para utilizar este material para la rehabilitación de carreteras. Se analizan los distintos procesos de reciclaje en frío del material asfáltico reciclado y su efecto en las características mecánicas de la base estabilizada con cemento (Restrepo & Stephens, 2015).

El ingeniero Mendoza, en el 2015 desarrolló una investigación para optar por el grado de Maestría en Ingeniería Vial en la Universidad de San Carlos, Guatemala, titulada "*Método Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) como una alternativa de rehabilitación de carreteras en Guatemala, proceso de construcción y normas de regularización*". Es esta investigación se desarrollan las metodologías para el reciclaje de carpetas asfálticas *in situ* para la rehabilitación de carreteras a partir de bases estabilizadas con cemento. Se realiza una revisión de las especificaciones internacionales de la American Association of State Highway and Transportation (de ahora en adelante AASHTO) y el Manual Centroamericano Especificaciones para la construcción de Carreteras y Puentes Regionales (de ahora en adelante SIECA), así como las especificaciones de la normativa guatemalteca que la Unidad Ejecutora de Conservación Vial (COVIAL) ha establecido en este país (Mendoza, 2015).

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo general

- Analizar la influencia en las propiedades mecánicas de las bases estabilizadas con cemento al utilizar Pavimento Asfáltico Reciclado (RAP) como agregado granular, a partir de muestreos realizados en proyectos de rehabilitación de la Red Vial Nacional.

1.2.2. Objetivos específicos

- Evaluar el comportamiento de las propiedades mecánicas de las bases estabilizadas con cemento al utilizar distintos porcentajes de material asfáltico perfilado añadido a la mezcla.
- Contrastar las posibles tendencias de los resultados de resistencia a la compresión de especímenes de base estabilizada con cemento, elaborados a partir de tres fuentes de Pavimento Asfáltico Reciclado.
- Identificar los factores que afectan las propiedades mecánicas y constructivas de las bases estabilizadas con cemento, al incluir el material asfáltico perfilado como agregado granular.
- Determinar los valores máximos de RAP que pueden ser incluidos en la mezcla sin variar de manera drástica sus características mecánicas, así como el contenido de cemento necesario para alcanzar valores de resistencia a la compresión que cumplan los parámetros de aceptación vigentes al añadir porcentajes altos de RAP a la mezcla de base estabilizada con cemento.

1.3. Delimitación del problema

1.3.1. Alcance

El estudio se centra en el efecto que pueda generar el uso de pavimento asfáltico reciclado en las características mecánicas de las mezclas de bases estabilizadas con cemento. El comportamiento que presenta este material no se especifica en ninguna norma, manual o investigación, por lo que es despreciado en el diseño de la estructura del pavimento.

La presente investigación, pretende encontrar la relación que existe entre la resistencia a la compresión de las bases estabilizadas a los 7 días y el contenido de material perfilado presente en la mezcla. Se pretende encontrar posibles tendencias y/o factores que afectan de alguna manera las características mecánicas y constructivas de las BEC al utilizar 3 distintas

fuentes de material asfáltico perfilado con diferentes porcentajes de este material añadido a la mezcla. Además, se pretende obtener el porcentaje de cemento necesario para cumplir las especificaciones de las BEC al utilizar una matriz de agregados compuesta mayoritariamente de material asfáltico perfilado.

Los especímenes de ensayo están conformados a partir de una misma fuente de agregado virgen de base granular. El mismo debe cumplir con las especificaciones estipuladas en la Sección 301 de Subbases o Bases granulares del Manual de Especificaciones Generales para la Construcción de Carreteras, Caminos y Puentes (CR – 2010), del Ministerio de Obras Públicas y Transportes (MOPT).

El material estabilizante a utilizar es cemento hidráulico de uso general, el cual, es el más utilizado en este tipo de tratamientos. La cantidad de cemento en la mezcla es constante para todos los especímenes a realizar en el primer estudio, donde, únicamente varía el contenido de material asfáltico perfilado añadido a cada combinación de mezcla. La cantidad de cemento se definirá a partir de un diseño patrón que consiste en el diseño de mezcla que utiliza un 25% de material asfáltico perfilado y un 75% de material de base granular virgen del total de agregados granulares por peso seco de la mezcla.

Se utilizarán 3 diferentes fuentes de este material asfáltico perfilado, extraídas de proyectos de rehabilitación de la Red Vial Nacional. Este material es adicionado en la mezcla en porcentajes del 0%, 25% (patrón), 40%, 50%, 60%, 75% y 100% del total de agregados granulares por peso seco, es decir, para el 0% la mezcla no cuenta con material perfilado y para el 100% todo el material granular virgen es sustituido por el material reciclado. Se utilizará el diseño de mezcla calculado a partir de la combinación del 25% de RAP, las demás combinaciones contarán con igual cantidad de cemento.

El segundo estudio de resistencias a la compresión, pretende obtener el porcentaje de cemento necesario para cumplir las especificaciones de las BEC al utilizar una matriz de agregados compuesta mayoritariamente de material asfáltico perfilado. Para ello, se utiliza un contenido constante de material asfáltico perfilado de 75% como agregado granular y se utilizan los puntos de análisis de 3,8%, 5,0%, 7,0% y 9,0% de contenido de cemento como porcentaje del peso seco total de la mezcla.

1.3.2. Limitaciones

Los ensayos realizados únicamente incluyen un tipo de agregado de base granular virgen para adicionar a la mezcla. Este aspecto no es del todo representativo debido a la variedad de fuentes de agregados en todo el país, por lo cual se utiliza un agregado que cuente con características similares a las bases comúnmente utilizadas para este tipo de intervenciones en las carreteras nacionales.

En el caso del material asfáltico perfilado, se cuenta con la misma limitación que en el agregado de base granular virgen. La variabilidad en los pavimentos asfálticos recuperados a nivel nacional es muy extensa e interfieren gran cantidad de variables que modifican sus características. Entre estas características se encuentra la edad y fatiga del pavimento, su composición y resistencia inicial, contenido de asfalto, condiciones climáticas a las que estuvo sometido, equipo utilizado para el fresado, entre otros. Todas estas variables modifican el comportamiento estructural de este material, generando una cantidad infinita de configuraciones.

Las características actuales del pavimento asfáltico recuperado se pueden cuantificar a partir de ensayos de laboratorio, sin embargo, no se conoce el historial de este pavimento ni su capacidad inicial. Además, las condiciones de laboratorio no reflejan la variabilidad de condiciones constructivas y climáticas que se presentan en el sitio de la obra. Estas condiciones modifican el comportamiento mecánico de la base estabilizada. Resulta imposible reflejar todas estas condiciones, por lo que se aplican los mismos procesos constructivos y condiciones de laboratorio a todos los especímenes en estudio de acuerdo a las normas internacionales de ensayo aprobadas por la Administración (según el CR - 2010).

1.4. Descripción de la metodología

La finalidad del proyecto es determinar el efecto que pueda generar la inclusión del material asfáltico perfilado en la mezcla de bases estabilizadas con cemento, principalmente en sus características mecánicas y constructivas. El desarrollo del proyecto se cubre mediante cinco etapas secuenciales que se describen en esta sección. La investigación corresponde al área técnica de transportes, pero, se apoya con las diferentes áreas de ingeniería civil para el desarrollo de los procesos, análisis y presentación de los resultados. En la **Figura 1** se presenta el esquema completo de investigación a partir de un diagrama de flujo.

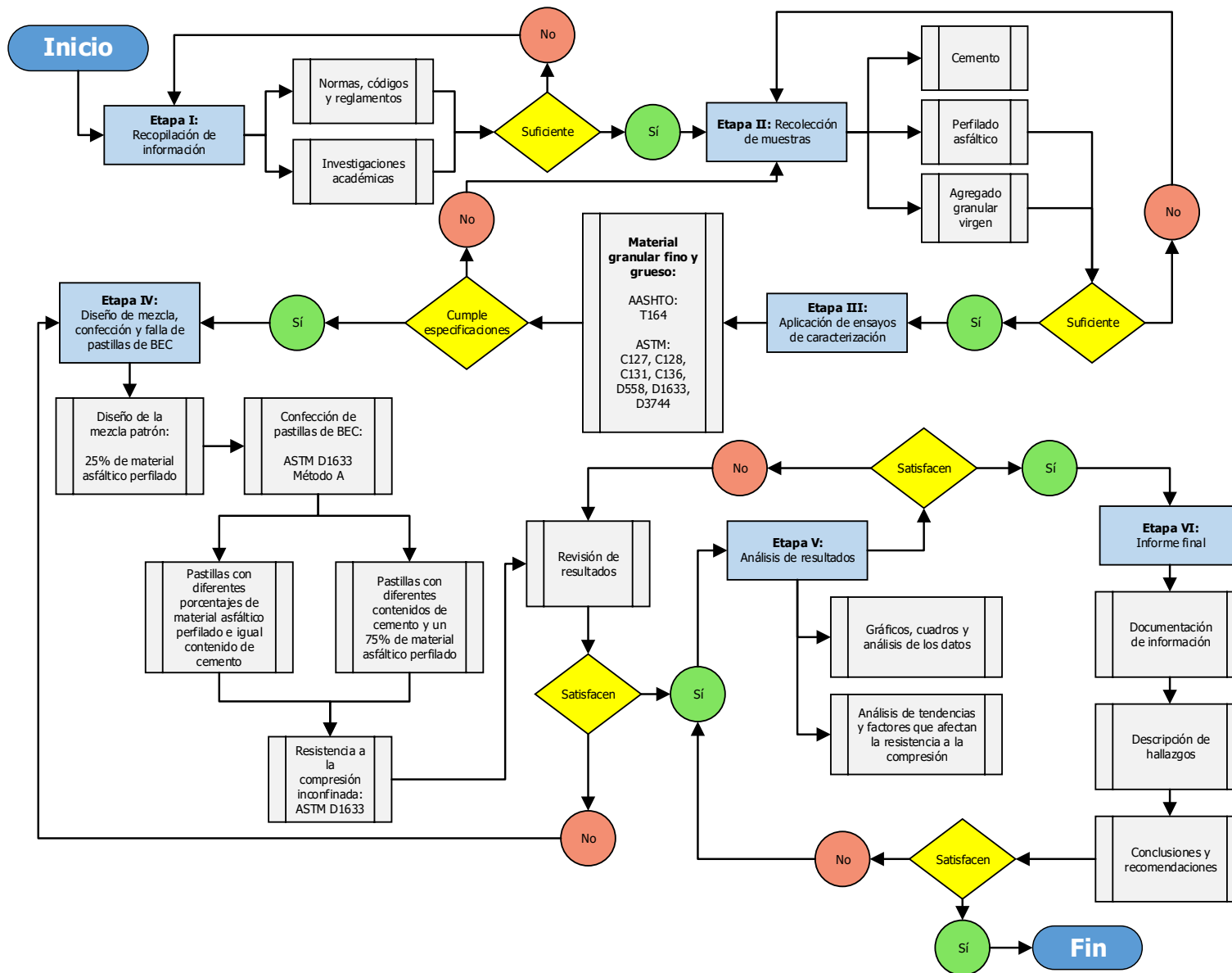


Figura 1: Esquema metodológico del proyecto de investigación

1.4.1. Etapa I: Recopilación de información

En primera instancia, se realiza una revisión bibliográfica de la información nacional e internacional relacionada con el tema de investigación. Esta indagación involucra las normas, códigos y reglamentos que rigen la construcción de bases estabilizadas y el reciclado del material asfáltico perfilado. También, se incluye la búsqueda de información académica de investigación tanto nacional como internacional, así como los resultados de las auditorías técnicas realizadas a proyectos donde se aplican estas prácticas constructivas.

1.4.2. Etapa II: Recolección de muestras

En esta etapa, se realiza el proceso de recolección de los agregados que componen las mezclas de bases estabilizadas con cemento a realizar. Para ello, se recolecta material granular virgen de una sola fuente de agregado que presente características similares al material utilizado en procesos constructivos de este tipo. En el caso del material asfáltico perfilado, se logró la donación por parte de la Gerencia de Conservación de Vías y Puentes del Consejo Nacional de Vialidad (de ahora en adelante CONAVI). En el caso del material cementante, se utiliza cemento hidráulico de uso general. Para la recolección de estos materiales, se contó con el apoyo del LanammeUCR, el cual brinda seguimiento a los proyectos de construcción y rehabilitación.

Cuadro 1. Resumen del material recopilado para la confección de ensayos de laboratorio

Material	Código utilizado	Cantidad recolectada		Origen del material		Proyecto destino
		Sacos	kg	Muestreo	Ubicación	
Base granular virgen	Base	20	1400	Plantel Agregados Guacalillo	San Rafael de Alajuela	-
Perfilado asfáltico 1	M1	6	420	RN 02	Pérez Zeledón	RN 329
Perfilado asfáltico 2	M2	6	420	RN 117	Santo Domingo de Heredia	Desconocido
Perfilado asfáltico 3	M3	6	420	Plantel del MOPT	Santo Domingo de Heredia	RN 114
Cemento hidráulico	-	1	50	-	-	-

1.4.2.1. Material de base granular virgen: San Rafael de Alajuela (Base)

El muestreo fue realizado el 03 de setiembre de 2020, con la colaboración del LanammeUCR. El material de base fue donado por la empresa "Agregados Guacalillo" y se recolectó directamente del apilamiento en la fuente de agregados, tal y como se ilustra en la **Figura 2**. En total fueron recopilados 20 sacos (cerca de 1 500 kg).



Figura 2. Muestreo de material de base granular

1.4.2.2. Muestra de material asfáltico perfilado 1: Pérez Zeledón (M1)

El muestreo fue realizado el 06 de febrero de 2020, con la colaboración de la Unidad de Auditoría Técnica y técnicos de laboratorio del LanammeUCR. El material perfilado se encontraba apilado a un lado de la vía en estado suelto, tal y como se ilustra en la **Figura 3**. En total fueron recopilados 6 sacos (cerca de 420 kg).

Este material corresponde al perfilado realizado el día lunes 27 de enero de 2020 en la Ruta Nacional N°02 (Carretera Interamericana Sur), específicamente en la sección de control SC-10010 (La Ese (Escuela) - San Isidro de El General (RN 243)). El material es colocado en la Ruta Nacional N°329, como parte de los trabajos de mejoramiento de esta ruta de lastre. En

la **Figura 4** se muestran los puntos geográficos tanto del muestreo como la sección perfilada.



Figura 3. Primer muestreo de material asfáltico perfilado

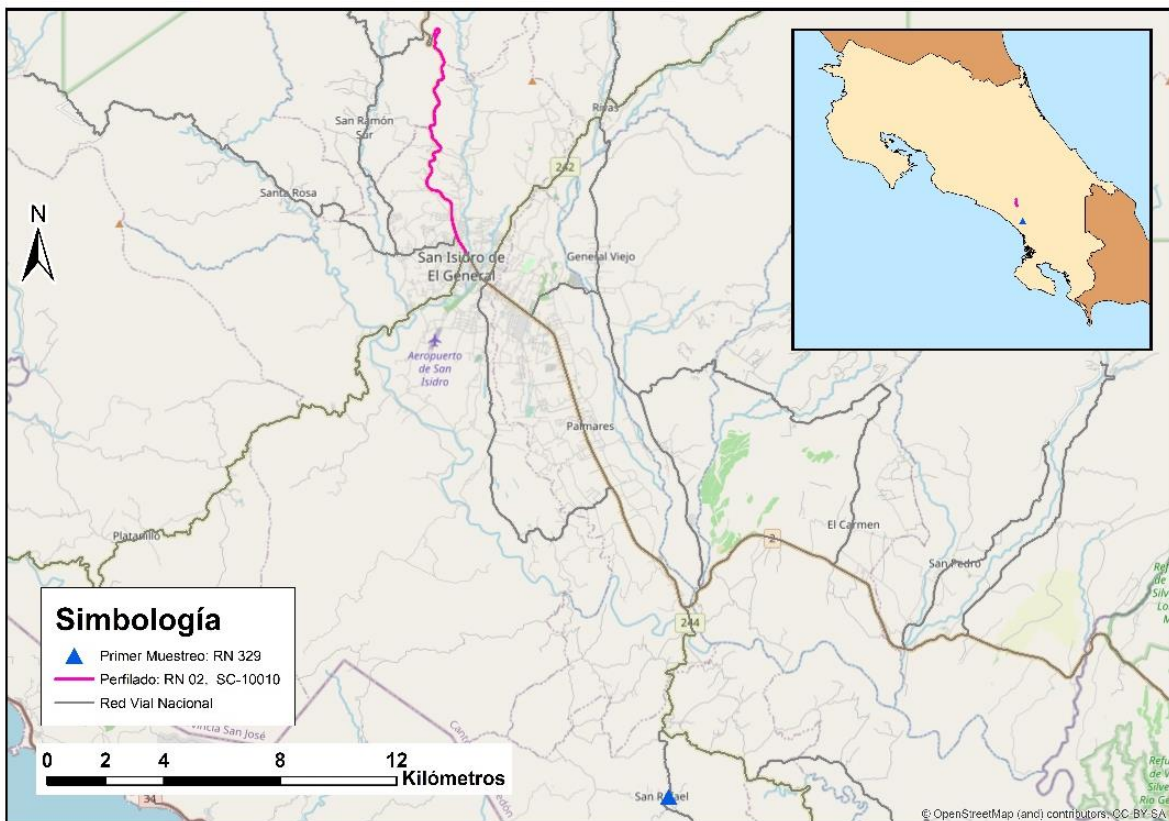


Figura 4. Ubicación del primer muestreo de material de RAP y el sitio de perfilado

1.4.2.3. Muestra de material asfáltico perfilado 2: Santo Domingo de Heredia (M2)

El muestreo fue realizado el 19 de agosto de 2020, con la colaboración de técnicos de muestreo del LanammeUCR. Las labores de perfilado se estaban realizando durante el muestreo (ver **Figura 5**), por lo que se recopilaron 6 sacos (cerca de 420 kg) directamente del equipo de perfilado.

El sitio de muestreo corresponde a la Ruta Nacional N°117, específicamente en la sección de control SC-40430 (Montero o San Miguel (RN N°32) – Los Ángeles de Tures (RN N°116)). Las labores de intervención en esta ruta, corresponden a la colocación de una sobrecapa asfáltica que sustituye la capa superior existente (alrededor de 5 cm) que presenta un alto grado de deterioro (ver **Figura 5**).



Figura 5. Segundo muestreo de material asfáltico perfilado

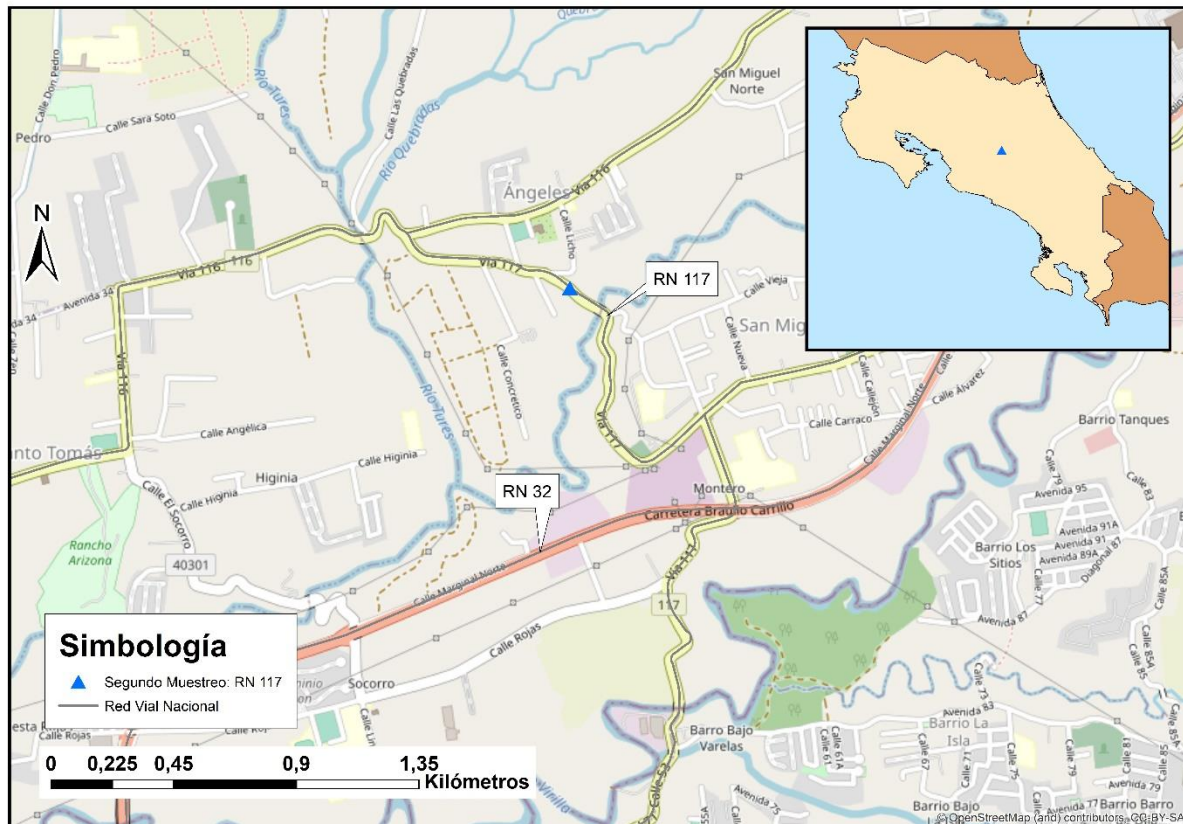


Figura 6. Ubicación del segundo muestreo de material de RAP y el sitio de perfilado

1.4.2.4. Muestra de material asfáltico perfilado 3: Apilamiento Santo Domingo de Heredia (M3)

El muestreo fue realizado el 06 de febrero de 2020, con la colaboración de los técnicos de laboratorio del LanammeUCR. El material perfilado se encontraba apilado a un lado de la vía en estado suelto (ver **Figura 7**). En total fueron recopilados 6 sacos (cerca de 420 kg).

El origen de perfilado de este material es desconocido, ya que proviene del depósito de materiales del MOPT que se encuentra contiguo al lugar de muestreo, por lo que tampoco se conoce el tiempo que ha permanecido en este sitio apilado. Este material fue utilizado para intervenir la Ruta Nacional N°114 (ver **Figura 7**), como material de base para la confección de espaldones y sobrecanchos en esta vía. En la **Figura 8** se muestran los puntos geográficos tanto del muestreo del material como la ruta de intervención con este material.



Figura 7. Tercer muestreo de material asfáltico perfilado y zona de colocación del material

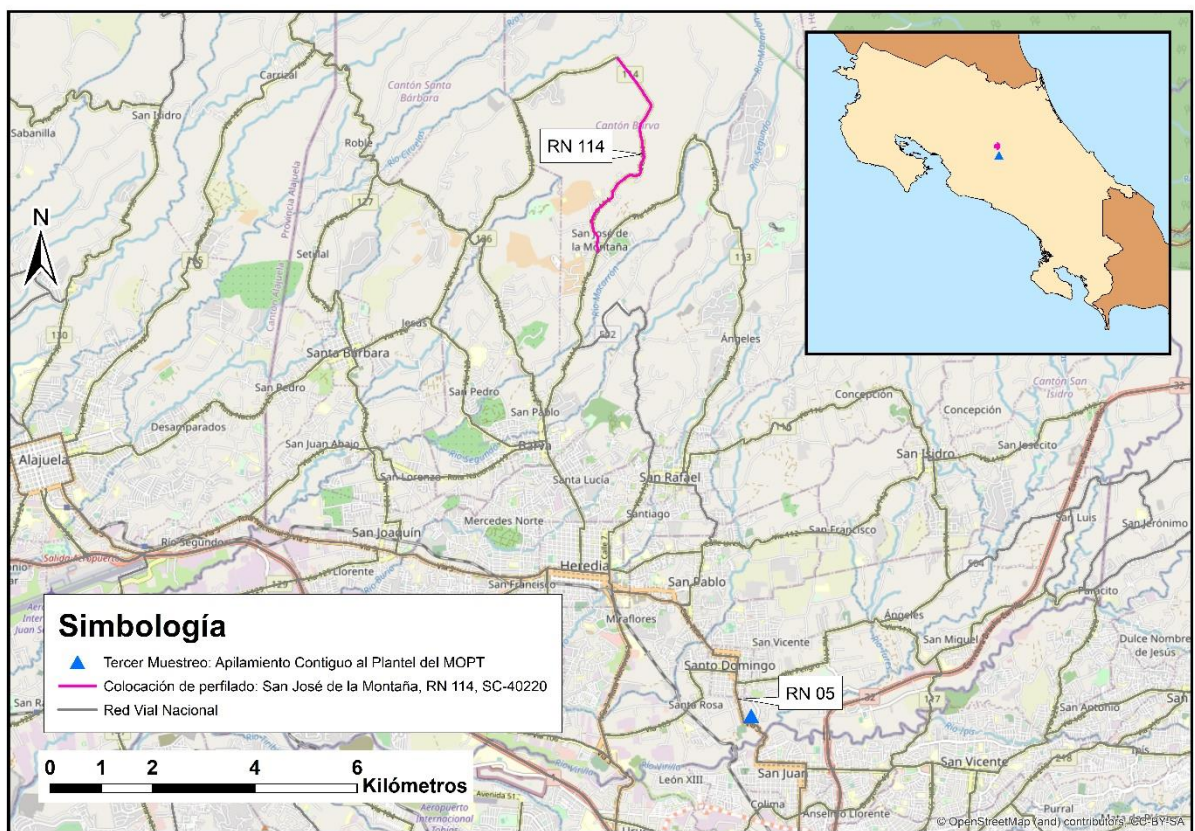


Figura 8. Ubicación del tercer muestreo de material asfáltico perfilado y lugar de colocación

1.4.3.5. Cemento hidráulico: Holcim Fuerte de uso general

El cemento utilizado para la presente investigación es de la marca Holcim del tipo Fuerte de uso general MM/C (C – P) – 28 (Ver **Figura 9**). Este tipo de cemento es comúnmente utilizado para la conformación de bases estabilizadas con cemento hidráulico. Su fabricación y calidad cumple con todos los parámetros y reglamentos técnicos a nivel nacional, por lo que se le asigna el código RTCR 479:2015.



Figura 9. Cemento hidráulico comercial marca Holcim Fuerte de Uso General
Fuente. Holcim, 2020

1.4.3. Etapa III: Aplicación de ensayos de caracterización

Las bases estabilizadas con cemento deben cumplir parámetros específicos para ser utilizados en proyectos de infraestructura vial. Los parámetros de aceptación de los materiales se encuentran estipulados en el CR – 2010. En el caso específico de las BEC, corresponde a la *“Sección 302: Base granular estabilizada con cemento”* de este manual. Esta sección incluye los principales lineamientos para la aceptación de los materiales, los lineamientos para el diseño de mezcla, procedimientos constructivos, control de calidad, así como todas las normas y parámetros aplicables para cada uno de los materiales y/o procesos constructivos.

En el caso específico de los agregados granulares que conforman la matriz de BEC, se hace referencia a la *“Subsección 703.21: Agregados para capas de base estabilizadas con cemento”* del CR – 2010, tanto para agregados de base granular virgen como materiales granulares reciclados. Este manual hace referencia a las normas de ensayo internacionales de la American Society of Testing Materials (de ahora en adelante ASTM) y la American Association of State Highway and Transportation Officials (de ahora en adelante AASHTO). En el caso del cemento hidráulico, no se requiere la aplicación de ensayos de caracterización,

por lo que, en caso de ser necesario, se utilizan los valores de la ficha técnica del fabricante. A continuación, se describen de manera general los procedimientos de ensayo aplicados para la caracterización de los materiales:

- **Análisis granulométrico: Norma ASTM C136**

Se aplica un análisis granulométrico completo tanto de gruesos como finos, de las 4 muestras de material granular (3 de material asfáltico perfilado y 1 de base granular virgen). Se utiliza la siguiente combinación de mallas de mayor a menor tamaño: 2 pulg (50 mm), 1 pulg (25,4 mm), $\frac{3}{4}$ pulg (19 mm), $\frac{1}{2}$ pulg (12,5 mm), $\frac{3}{8}$ pulg (9,5 mm), No. 4 (4,75 mm), No. 8 (2,36 mm), No. 16 (1,18 mm), No. 30 (0,60 mm), No. 50 (0,3 mm), No. 100 (0,15 mm) y finalmente la No. 200 (0,075 mm). Además, se aplica el mismo procedimiento a los 3 materiales asfálticos perfilados luego de la extracción del asfalto, de manera que, todos los ensayos granulométricos son comparables y deben cumplir las especificaciones granulométricas de acuerdo al CR – 2010, en la tabla 703 – 20 de la Subsección 703.21: Agregados para capas de base estabilizadas con cemento (ver **Figura 14**).

- **Abrasión: Norma ASTM C131**

Este ensayo permite determinar la resistencia a la degradación de agregados granulares gruesos inferiores a 37,5 mm, utilizando la máquina de ensayo de Los Ángeles. Se realiza el mismo procedimiento de ensayo para las muestras de agregado granular, ya que, cumplen los mismos parámetros granulométricos según la norma ASTM C131. Las muestras cuentan con una graduación tipo B, la cual utiliza un 50% de material ubicado entre las mallas $\frac{3}{4}$ pulg (19 mm) y $\frac{1}{2}$ pulg (12,5 mm) y el restante 50% entre las mallas de $\frac{1}{2}$ pulg (12,5 mm) y $\frac{3}{8}$ pulg (9,5 mm), para un total de 5 000 g de material granular (ver **Figura 10**). Este tipo de graduación (tipo B) utiliza 11 esferas de acero para el proceso abrasivo, con un peso total de 4 580 g.

Tamaño de mallas (aberturas cuadradas)		Masa por tamaño indicado, g			
Pasando	Retenido	Graduación			
		A	B	C	D
37,5 mm (1 ½ pulg)	25,0 mm (1 pulg)	1 250 ± 25	-	-	-
25,0 mm (1 pulg)	19,0 mm (¾ pulg)	1 250 ± 25	-	-	-
19,0 mm (¾ pulg)	12,5 mm (1/2 pulg)	1 250 ± 10	2 500 ± 10	-	-
12,5 mm (1/2 pulg)	9,5 mm (3/8 pulg)	1 250 ± 10	2 500 ± 10	-	-
9,5 mm (3/8 pulg)	6,3 mm (1/4 pulg)	-	-	2 500 ± 10	-
6,3 mm (1/4 pulg)	4,75 mm (No.4)	-	-	2 500 ± 10	-
4,75 mm (No.4)	2,36 mm (No.8)	-	-	-	5 000 ± 10
Total		5 000 ± 10	5 000 ± 10	5 000 ± 10	5 000 ± 10

Figura 10. Clasificación de la muestra de ensayo de acuerdo a la granulometría del material
Fuente. ASTM C131, 2020

- **Durabilidad: Norma ASTM D3744**

El ensayo de durabilidad fue aplicado al material de base granular virgen tanto la sección de agregado grueso (entre las mallas ¾ y No. 4) como la sección fina (pasando la malla No. 4), utilizando el procedimiento de la norma de ensayo ASTM D3744. Este método asigna un valor relacionado al material arcilloso que puede ser generado al someter el agregado a una degradación mecánica. En el caso de las muestras de material asfáltico perfilado, el ensayo de durabilidad no es representativo debido a que las caras expuestas del agregado se encuentran recubiertas con asfalto.

- **Contenido de asfalto: Norma AASHTO T164 (Método B)**

Los agregados asfálticos fueron recopilados luego del proceso de perfilado y no se realiza ningún otro tratamiento posterior al muestreo. Por esta razón, gran parte del material se encuentra recubierto por asfalto, además, algunos de los agregados gruesos corresponden a conglomerados de asfalto y agregado fino. El contenido de asfalto presente en el agregado se obtiene a partir de la norma de ensayo AASHTO T164 Método B). Este procedimiento utiliza un equipo de extracción de vidrio con un juego de filtros, un calentador tipo plancha y un equipo condensador. La condensación del agua, la aplicación de un disolvente y el choque de temperatura provoca un flujo continuo del agua que extrae lentamente el asfalto presente en el agregado.

- **Absorción de humedad y Gravedad específica (GBS): Normas ASTM C127 (finos) y C128 (gruesos)**

Los procedimientos de ensayo de las normas ASTM C127 y C128, permiten determinar la gravedad específica bruta seca (GBS) y la absorción de los agregados granulares tanto la sección gruesa como su parte fina. La determinación de la gravedad específica bruta seca y la absorción de los agregados granulares permite conocer el comportamiento de los materiales al entrar en contacto con la mezcla de agua y cemento (mortero). Estos aspectos indican la porosidad tanto externa como interna de los agregados, así como el grado de permeabilidad que presentan sus caras externas. El ensayo fue aplicado a las 4 muestras de materiales granulares utilizados en la presente investigación.

1.4.4. Etapa IV: Diseño de mezcla, confección y falla de pastillas de BEC

1.4.4.1. Diseño de mezcla

Se realiza un diseño de mezcla para una combinación de agregados con una concentración baja de material asfáltico perfilado como muestra patrón. La muestra utilizada como patrón está conformada por un 25% de material asfáltico perfilado y un 75% de material de base granular virgen. Estos dos materiales completan el 100% de materiales granulares por peso seco con las respectivas correcciones por humedad de acuerdo a los valores registrados para agregado fino y grueso.

En primera instancia, se deben ubicar los valores de densidad y humedad óptima de la mezcla, Para ello, se utiliza el ensayo Próctor Modificado (ASTM D1557) con un total de 6 puntos de análisis de humedad para una concentración preliminar de 4,0% de cemento presente en la mezcla.

Se realizan 2 estudios de resistencia a la compresión. El primero, utiliza un mismo porcentaje de cemento agregado a todas las combinaciones de mezcla, mientras que el segundo utiliza distintos porcentajes de cemento, pero igual cantidad de material asfáltico perfilado. En el primer caso, se debe ubicar el contenido de cemento óptimo a utilizar. Para ello, se realizan tres juegos de pastillas con distintos porcentajes de cemento de acuerdo al procedimiento de ensayo de la norma ASTM D1633 (método A). Este método utiliza la energía de compactación del ensayo Próctor Modificado con especímenes de 101,6 mm (4,0 pulg) de altura y 116,8 mm (4,6 pulg) de diámetro. El valor porcentual de cemento a utilizar corresponde al punto de

mejor ajuste correlacionado con el valor de resistencia a la compresión inconfiada de 3,0 MPa. En el segundo estudio de resistencias, se utiliza una concentración constante de 75% de material asfáltico perfilado y distintos porcentajes de cemento hidráulico añadido a la mezcla, de igual manera, se busca el mejor ajuste de la resistencia de 3,0 MPa y el respectivo valor porcentual de cemento hidráulico.

1.4.4.2. Confección y falla de pastillas de BEC

Los dos estudios de resistencias a la compresión se realizan con la misma metodología tanto de preparación, curado y falla de las pastillas de BEC, de acuerdo a las especificaciones contenidas en el CR – 2010, el procedimiento de ensayo a utilizar corresponde a la norma ASTM D1633 (Método A). La estandarización de los procedimientos permite que los resultados sean comparables entre sí para todas las combinaciones de mezcla de cada uno de los dos estudios.

En el **primer estudio** de resistencias, se realiza la confección de especímenes con diferentes porcentajes de material asfáltico perfilado e igual contenido de cemento para las 3 muestras de análisis. En total se evalúan 6 puntos de contenido de material asfáltico perfilado por muestra (3 muestras) y una combinación utilizando únicamente material de base granular virgen. Las combinaciones de mezcla analizadas corresponden a los porcentajes de 0%, 25% (diseño patrón), 40%, 50%, 60%, 75% y 100% de material asfáltico perfilado, el restante porcentaje de material granular es completado con el material de base granular virgen. En total, se realizan 5 pastillas de BEC para cada combinación, sumando un total de 95 pastillas para este primer estudio.

En el caso del **segundo estudio**, se utiliza un contenido de material asfáltico perfilado constante de 75,0% del total del peso seco de los agregados granulares, y, el restante 25,0% es completado por el material de base granular virgen. Este contenido de material asfáltico es alto, por lo que se requiere un contenido de cemento mayor en la mezcla. Para conocer el punto óptimo de cemento requerido, se utilizan puntos de análisis con diferentes porcentajes de cemento, los cuales, están correlacionados con la resistencia a la compresión inconfiada para un valor óptimo de 3,00 MPa. En total se utilizan 4 diferentes concentraciones de cemento añadida a la mezcla, siendo el primer punto el utilizado en las combinaciones del primer estudio. Los restantes puntos de concentración corresponden a los

porcentajes de 5,00%, 7,00% y 9,00% por peso seco del total de la mezcla. De igual manera, se utilizaron 5 pastillas por punto de análisis, sumando 45 pastillas de BEC.

La **falla** de pastillas de BEC se realiza al cumplir 7 días luego de su confección. Durante este periodo, las pastillas deben permanecer en una cámara húmeda ganando resistencia. Para el proceso de falla, las pastillas deben permanecer 4 horas totalmente sumergidas en agua, de manera que permita obtener el valor de resistencia crítico al estar completamente saturado. Este procedimiento de falla se conoce como curado en húmedo y falla en húmedo, y corresponde al proceso más utilizado en las normas para encontrar los valores de resistencia del concreto y otros materiales que utilizan algún material cementante.

1.4.5. Etapa V: Análisis de resultados

Durante esta etapa, se grafican y analizan los resultados obtenidos de los ensayos con el fin de encontrar tendencias y/o aspectos relacionadas con el comportamiento mecánico de las diferentes combinaciones de mezcla de BEC. Se analiza el efecto de la cantidad de RAP presente en la mezcla y la relación que existe entre la resistencia a la compresión y características propias de cada uno de los materiales que componen las mezclas. Se realiza un análisis tanto comparativo como individual de las tendencias que presentan las muestras de material asfáltico perfilado como componente de las BEC.

1.4.6. Etapa VI: Informe final

La finalización del análisis permite documentar de manera clara y resumida los resultados obtenidos, así como describir los hallazgos encontrados a lo largo del proceso experimental. Finalmente, se formulan las conclusiones generales del estudio y se generan las recomendaciones para la utilización del material asfáltico perfilado como componente granular de las BEC. En la sección de recomendaciones, se incluyen propuestas generales de investigaciones que pueden complementar la presente investigación, tanto a nivel académico como práctico.

Capítulo 2: Marco teórico

2.1. Ingeniería de pavimentos

La estructura de pavimento es el conjunto de capas conformadas por diferentes materiales diseñados en conjunto y que se encuentran sobre el nivel superior del terreno de fundación (subrasante). Su función principal es proporcionar una superficie de rodadura uniforme, de color y textura apropiados, que permita el tránsito seguro y confortable de vehículos, a velocidades operacionales deseadas bajo cualquier condición climática y cualquier otro agente perjudicial posible. La estructura debe ser capaz de transmitir adecuadamente los esfuerzos producidos por las cargas del tráfico al terreno de fundación sin sufrir daños durante el proceso (Fano & Chávez, 2017).

El objetivo de la ingeniería de pavimentos es generar diseños adecuados al menor costo posible, optimizando los procesos de construcción y mantenimiento, alargando la durabilidad del pavimento. Corresponde a un área multidisciplinaria donde están estrechamente relacionados múltiples conceptos y técnicas de ingeniería como la ciencia de materiales, sistemas y planificación del transporte, geotecnia, ingeniería estructural y muchas otras áreas (Fano & Chávez, 2017).

2.2. Tipos de pavimentos

Los pavimentos se pueden clasificar de acuerdo a su estructura y comportamiento en tres grandes grupos: Pavimentos Flexibles, Pavimentos Semirígidos y Pavimentos Rígidos. La selección del tipo de pavimento a utilizar dependerá de los recursos iniciales disponibles, de la capacidad estructural requerida en función del tráfico, la capacidad de brindar mantenimiento adecuado y la vida útil de la vía a intervenir.

Existen múltiples configuraciones de la estructura de pavimento a utilizar, debido principalmente a factores de tránsito y de las características específicas de la subrasante. Las configuraciones de capas más utilizadas (básicas) en pavimentos flexibles, semirígidos y rígidos se muestran en la **Figura 11**. Con base en estas configuraciones se pueden variar sus espesores y sus características mecánicas individuales con el fin de obtener los mejores resultados al menor costo posible.

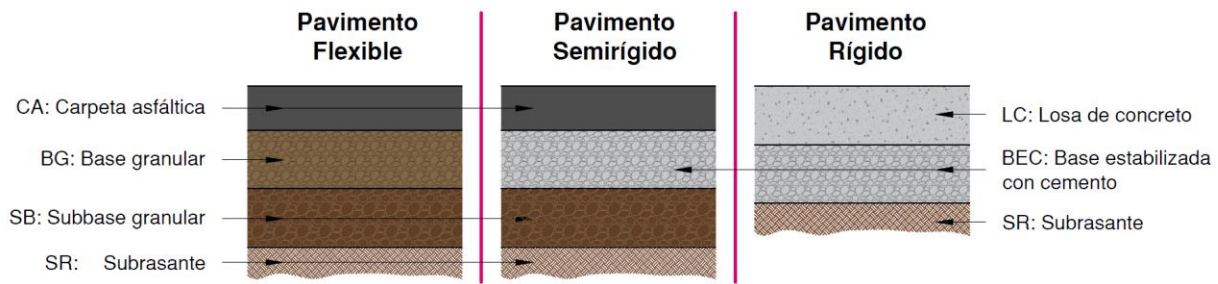


Figura 11. Estructura de pavimento flexible (izquierda), pavimento semirígido (centro) y pavimento rígido (derecha)

Estas capas están compuestas por distintos materiales que presentan diferentes propiedades mecánicas con el objetivo de disipar y distribuir la carga desde la capa superior hasta la subrasante. Las capas ubicadas en la parte superior de la estructura requieren de un material más resistente, debido a que experimentan tensiones mayores que la parte inferior. Es por ello, que la calidad y el precio de los materiales es mayor en las capas más próximas a la superficie y menor cuando se acerca a la subrasante. A continuación, de manera general se enlistan las principales características de las diferentes capas de la estructura de pavimento (Fano & Chávez, 2017):

- **Capa de rodamiento:** Corresponde a la capa superior de la estructura de pavimento. El tipo de material utilizado para esta capa (asfalto o concreto) define el tipo de estructura de pavimento y el comportamiento ante los fenómenos externos y la transmisión de esfuerzos a las capas inferiores. Su función es brindar buenas condiciones de serviciabilidad a los usuarios y proteger la estructura de las cargas del tráfico y el medioambiente:
 - **Protección al tráfico:** El tráfico de vehículos perjudica la capa de rodamiento principalmente de dos maneras. En **primera** instancia, se generan tensiones debido a las cargas de tránsito. Las características de la resistencia del material deben ser capaces de resistir todas estas tensiones sin deformarse ni fracturarse. La **segunda** protección que debe considerar esta carpeta, corresponde a la acción abrasiva de los neumáticos, lo cual puede originar un pulimento de la superficie, reduciendo la fricción de la carretera y generando superficies resbaladizas con alto grado de peligrosidad para los usuarios.

- **Protección al medioambiente:** La carpeta debe brindar impermeabilidad para evitar el efecto del escurrimiento y la humedad en las capas inferiores. Además, debe ser capaz de soportar el efecto de la radiación solar.
- **Base:** Esta capa tiene la función de mitigar las tensiones verticales del tránsito que logran atravesar la carpeta de rodadura. Esta capa absorbe la mayor cantidad de esfuerzos de toda la estructura, debido a que se encuentra en confinamiento. Dependiendo de las características de los materiales presentes y la capacidad estructural demandada, se pueden utilizar dos tipos de bases:
 - **Bases granulares:** Generalmente están constituidas por grava triturada y mezcla natural de agregado y suelo.
 - **Bases estabilizadas:** Están constituidas por los materiales de las bases granulares anteriormente mencionadas, así como una adición de algún estabilizador entre cemento Portland, cal o materiales bituminosos.
- **Subbase:** Esta capa no siempre es requerida en la estructura de pavimento, ya que depende de las condiciones del sitio, de la capacidad estructural de las capas superiores y de las demandas del tránsito. Entre las principales funciones de esta capa se encuentran el transmitir los esfuerzos del tránsito a la subrasante, brindar una barrera para el agua subterránea del sitio, evitar que las capas superiores sufran contaminación de materiales del suelo, además de brindar mayor confinamiento del material de base aumentando la capacidad estructural.
- **Subrasante:** Esta estructura corresponde al material natural del sitio y generalmente no se requiere de la sustitución de material. Las características de resistencia de este material determinan las características y requerimientos de la estructura de pavimentos a utilizar. Las capas superiores de pavimento deben ser capaces de disipar los esfuerzos generados por el tránsito, de manera que los esfuerzos que llegan al suelo (subrasante) no excedan su capacidad soportante.

2.2.1. Pavimentos flexibles

Estos pavimentos están conformados por una superficie de rodadura de mezcla asfáltica y capas granulares de base y subbase, las cuales sirven para disipar y distribuir las cargas del tránsito hasta el suelo de fundación. La carpeta de rodamiento no presenta juntas de expansión debido a que el material asfáltico es capaz de absorber las deformaciones sin generar agrietamientos. Generalmente requieren una estructura inferior de pavimento con

mayor capacidad, debido a que los esfuerzos y deformaciones de las cargas del tránsito se transmiten con mayor magnitud que en pavimentos rígidos.

2.2.2. Pavimentos Semirígidos

Los pavimentos semirígidos generalmente están compuestos por una superficie flexible de concreto asfáltico que se apoya sobre una capa de material granular tratada con algún agente estabilizante. Esta combinación permite alcanzar mayor capacidad estructural sin perder las propiedades de un pavimento flexible.

2.2.3. Pavimentos rígidos

Estos pavimentos están conformados por una losa superior de concreto hidráulico, apoyada generalmente en una capa de base granular o material estabilizado. La distribución de esfuerzos en esta estructura es muy diferente a la de pavimentos flexibles, ya que la mayor cantidad de esfuerzos es absorbida y distribuida por toda el área de la losa gracias a la capacidad a la tensión del concreto, por lo que los esfuerzos y deformaciones por unidad de área son muy bajos y no requieren de gran estructura inferior.

2.3. Mantenimiento y rehabilitación de pavimentos

El principal objetivo de las acciones de mantenimiento y rehabilitación de pavimentos, consisten en mantener las condiciones de servicio y la integridad estructural de acuerdo a las condiciones de diseño y funcionalidad. Estas prácticas permiten extender la vida útil de las vías y aplazar intervenciones mayores que conllevan una mayor inversión. El deterioro de la estructura de pavimentos es un proceso lento que puede verse acelerado por la permeabilidad de las capas estructurales y un inadecuado manejo de las aguas pluviales.

Existen múltiples técnicas de mantenimiento y rehabilitación de pavimentos dependiendo de la gravedad de la condición de deterioro, el origen del mismo y la disponibilidad de recursos. El mantenimiento se aplica cuando la estructura de pavimento no se encuentra comprometida. En el caso de la rehabilitación, se puede aplicar de manera superficial o en caso de mayor daño, una rehabilitación a profundidad. La intervención superficial, consiste en la sustitución y/o reparación de la capa de rodadura, mientras, la intervención a profundidad consiste en la sustitución y/o reconfiguración de las capas dañadas de la estructura de pavimento. Esta última técnica permite la reutilización de los agregados existentes al adicionar agentes estabilizantes.

2.4. Reciclaje de pavimentos deteriorados

2.4.1. Concepto y tipos de reciclajes de pavimentos deteriorados

El reciclaje de pavimentos corresponde a la reutilización de materiales que forman parte de alguna o varias capas estructurales del pavimento existente y que han cumplido largos periodos de funcionamiento, presentando notables deterioros. Estos materiales pueden ser utilizados de alguna manera como agregados para la rehabilitación y/o construcción de esa u otra carretera (Restrepo & Stephens, 2015).

Uno de los materiales comúnmente reutilizado en gran cantidad de proyectos es el pavimento asfáltico reciclado (RAP). Este material está compuesto por aquellas capas asfálticas que forman parte de la estructura de pavimento y que son recuperadas, procesadas y reutilizadas como materiales de construcción. Estos materiales pueden ser obtenidos de la remoción de pavimentos fatigados, desechos de plantas asfálticas, así como materiales rechazados en campo (Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales (LanammeUCR), 2014).

Existen múltiples técnicas de reutilización del pavimento asfáltico recuperado, tanto en caliente como en frío. Según la Asociación de Reciclaje y Reclamo de Asfaltos de los Estados Unidos, existen 5 métodos de reciclado de materiales asfálticos (Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales (LanammeUCR), 2014):

- **Remoción y reutilización en frío:** consiste en la remoción del pavimento existente a una profundidad parcial. Esta técnica se utiliza en Costa Rica cuando se aplican sobrecapas asfálticas. El material asfáltico recuperado puede ser utilizado como material de base granular, reparación de pavimentos, para el mejoramiento de caminos de lastre de bajo volumen vehicular, entre otros.
- **Reciclado en caliente en planta:** consiste en la combinación del material de RAP con agregados y cemento asfáltico virgen para producir una mezcla asfáltica en caliente con las características necesarias de acuerdo a las demandas del tráfico.
- **Reciclado en sitio en frío:** consiste en la escarificación de la capa asfáltica y combinar este material con una emulsión asfáltica de quiebre medio o lento, así como material granular virgen (si fuese necesario) para formar un material que inmediatamente se coloca y compacta formando una nueva carpeta asfáltica.

- **Reciclado en sitio en caliente:** esta técnica consiste en la aplicación de calor a la capa asfáltica existente, permitiendo la escarificación, mezcla, colocación y compactación del material. Este método puede requerir la incorporación de agregado y cemento asfáltico virgen.
- **Reparación a profundidad total:** esta técnica consiste en la intervención de la totalidad de la carpeta asfáltica y una porción del espesor de la base o subbase granular. Estas capas son uniformemente pulverizadas, mezclada y compactadas, para conformar una base granular que cumpla con las demandas del tránsito de la vía. Este método puede requerir la incorporación de material granular virgen y algún material cementante (cemento hidráulico, cal, emulsiones asfálticas, entre otros).

En la presente investigación se realiza el estudio de las características mecánicas de las bases estabilizadas con cemento al incluir material asfáltico perfilado como agregado granular. Esta técnica corresponde a la reparación a profundidad total y utiliza cemento hidráulico y material de base granular virgen. El proceso de construcción de bases estabilizadas con cemento mezcladas en sitio, utiliza los materiales propios de la estructura de pavimentos deteriorados como agregados para la confección de la nueva base estabilizada. Este proceso involucra la escarificación de la carpeta asfáltica y parte de la base granular existente, tal y como se ilustra en la **Figura 12**. Esta acción permite pulverizar las capas superiores del pavimento, agregar el cemento hidráulico, homogenizar la mezcla y adicionar la humedad requerida según el diseño.

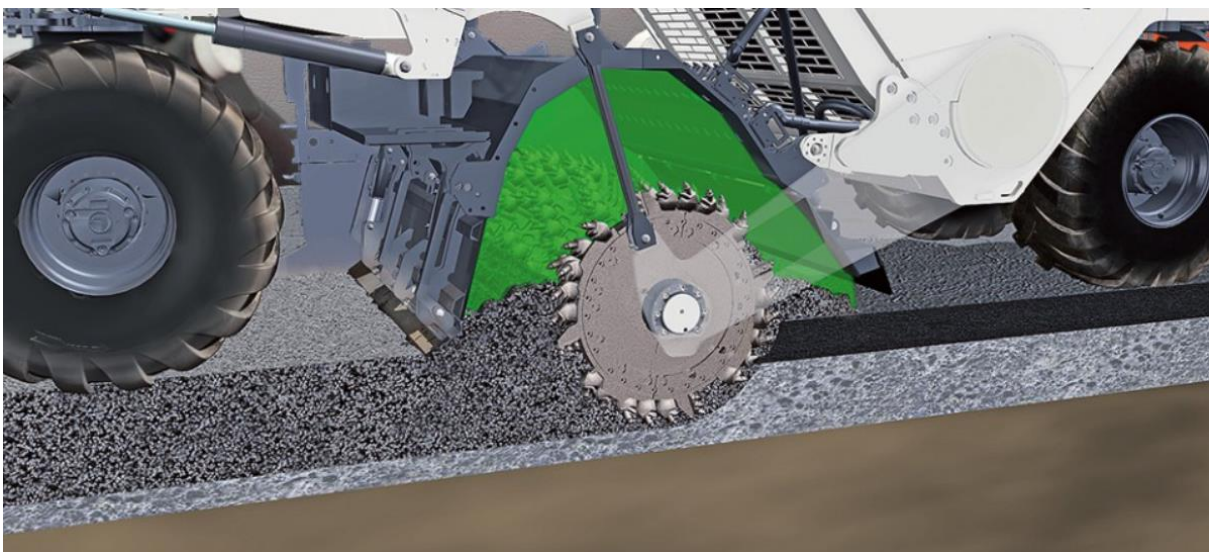


Figura 12. Proceso de reciclado del material deteriorado
Fuente. WIRTGEN, 2018

Entre las ventajas que brinda este proceso, se encuentra el aprovechamiento de los recursos, ya que, el reciclaje de los agregados existentes reduce la extracción de materiales de las fuentes primarias y minimiza el transporte de materiales al sitio de colocación. Solo en Estados Unidos, se producen cerca de 50 millones de toneladas de RAP al año provenientes de carreteras deterioradas, de las cuales, el 33% son utilizadas para reciclaje en caliente, el 47% son utilizadas para reciclaje en frío y cerca del 20% son descartadas y se convierten en material de desecho (Mendoza, 2015).

2.5. Bases estabilizadas con cemento (BEC)

Las bases estabilizadas con cemento (BEC) son una metodología constructiva para mejorar las características mecánicas y el funcionamiento de la estructura de pavimento de una vía. El concepto de estabilización, se refiere al mejoramiento de las características físicas de un material que en su estado natural no cumple los requisitos mínimos necesarios para las cargas que sufre la estructura de pavimento. Una BEC, corresponde a una mezcla de material granular, cemento y agua, que utiliza energía de compactación para obtener una mayor densidad. La técnica corrige deficiencias del material de base que no cumple especificaciones relacionadas con su dureza, índice plástico, límite líquido, granulometría, entre otros (Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales (LanammeUCR), 2012).

En el 2010, el Ministerio de Obras Públicas y Transportes, aprobó el Manual de Especificaciones Generales para la Construcción de Carreteras, Caminos y Puentes (CR-2010). El contenido de este documento es de aplicación obligatoria en las diferentes fases de las obras viales. En la sección 302 de este manual, se establecen los lineamientos con respecto a las bases granulares estabilizadas con cemento. En el caso del material reciclado producto de la escarificación de la carpeta existente, debe ser pulverizado hasta que por lo menos el 50% de todo el material logre pasar por el tamiz N°4 (4,75 mm), se desecha todo el material retenido en el tamiz de 75 mm y todo aquel material inadecuado indicado por la administración. Si se requiere material adicional, este deberá ser mezclado de acuerdo al diseño de mezcla aprobado por la Administración y cumpliendo con la sección 703 de este manual con respecto a los requisitos granulométricos. Estas especificaciones granulométricas incluyen todos los agregados utilizados en la matriz de la mezcla, incluyendo el material asfáltico reciclado (Ministerio de Obras Públicas y Transportes (MOPT), 2010).

Las BEC presentan características mecánicas cuyo estudio y medición son de suma importancia en la respuesta estructural tanto en el diseño de pavimentos rígidos como flexibles. Entre las principales características mecánicas se encuentran la resistencia a la compresión confinada, el módulo de ruptura a tensión, la impermeabilidad de la capa en eje vertical, la resistencia a cargas cíclicas y la estabilidad en el tiempo de los parámetros anteriormente mencionados. Es importante realizar una comprobación del cumplimiento de estos parámetros con las especificaciones vigentes en el CR – 2010 y en manuales internacionales (Alfaro, 2015).

El comportamiento de la estructura de pavimento al incorporar una capa de base estabilizada con cemento sufre cambios en la manera en que se distribuyen los esfuerzos de las cargas del tránsito, por lo que se separan en pavimentos flexibles (base granular) y pavimentos semirígidos (base estabilizada), tal y como se observa en la **Figura 13**. Este cambio permite utilizar capas inferiores o superiores con menor espesor y/o resistencia, así como una reducción de la frecuencia de intervenciones futuras importantes, brindando un considerable ahorro en la inversión.

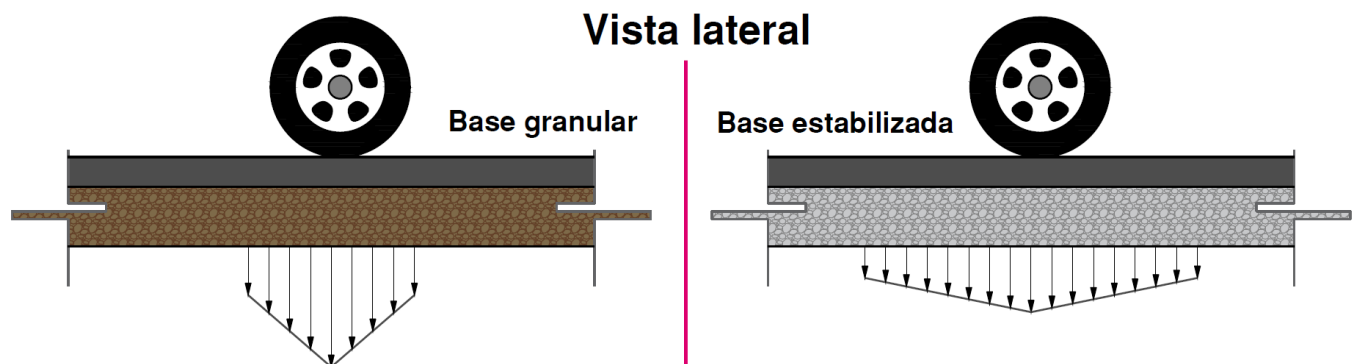


Figura 13. Transmisión de los esfuerzos en una base granular (izquierda) y una base estabilizada (derecha)

2.6. Factores que pueden afectar la resistencia de la BEC

2.6.1. Contenido de cemento

Para los materiales estabilizados con cemento, es importante tomar en cuenta que la fuerza de compresión y tensión alcanzados dependerán de la cantidad de cemento añadido, el tipo de material (reciclado y virgen), la densidad del material compactado y la calidad del curado. La resistencia a la compresión generalmente sigue una tendencia lineal con relación al contenido de cemento, sin embargo, factores externos como la temperatura y la humedad

pueden afectar la velocidad de ganancia de resistencia y la capacidad estructural final (Fano & Chávez, 2017).

Luego de la interacción entre las partículas del cemento y el agua (pasta), se genera una reacción formando uniones cristalinas entre la pasta y los agregados que definen la resistencia final de la BEC. Algunas de estas uniones pueden ser destruidas si se realiza una manipulación excesiva del material luego de haber agregado agua a la mezcla, por lo que es de suma importancia acelerar los trabajos de colocación y compactación del material para obtener los mejores resultados (Alfaro, 2015).

2.6.2. Agrietamientos

El fenómeno de agrietamiento en elementos que incluyen material cementante ocurre debido a que se generan esfuerzos de tensión dentro del material como consecuencia de la contracción interna, que al exceder la resistencia a la tensión del material genera fisuras. Este efecto puede ser controlado y no necesariamente ser perjudicial para la resistencia general del pavimento.

Los materiales estabilizados con cemento tienden a deteriorarse por 2 razones:

- La **primera** y la más común, se genera como producto de la reacción química entre el cemento y el agua. El espaciamiento entre fisuras y el ancho de las mismas se ven influenciados por la combinación de los siguientes factores:
 - **Tipo de material estabilizado:** Algunos materiales tienden a contraerse de forma diferenciada cuando entran en contacto con cemento y agua. Además, algunas impurezas en los agregados pueden generar posibles puntos de fallas.
 - **Contenido de cemento:** La intensidad de las contracciones internas del material de BEC están en función de la cantidad de cemento añadido a la mezcla. Este aspecto obliga a realizar un diseño de mezcla adecuado, tomando en cuenta las características de los agregados y la capacidad estructural requerida (Ver **Cuadro 2**).
 - **Humedad de compactación y curado:** Este factor es uno de los más comunes y de igual forma fácil de resolver. El grado de fisuramiento de la base se encuentra en función de la cantidad de humedad que se pierde durante el proceso de ganancia de resistencia, por lo que debe brindarse una adecuada y abundante hidratación a lo largo de este periodo.

- **Uniones internas entre las distintas capas de pavimento:** En superficies rugosas con buena unión entre la capa estabilizada y la capa inferior, pueden resultar agrietamientos con alta intensidad (espaciamientos) de fisuras muy finas (magnitud). En los casos de uniones entre capas más débiles, son más comunes las fisuras menos intensas (espaciamientos) pero con mayor magnitud (espesor).
- La **segunda** razón está asociada al tráfico de vehículos. Estas fisuras surgen como consecuencia de repetidos esfuerzos de tensión generados por el tráfico sobre la estructura de pavimento. Generalmente estas fisuras inician en la parte inferior de la capa de BEC, ya que es ahí donde se presentan los mayores esfuerzos de tensión y deformación. Este tipo de deterioros tiende a agravarse de forma más acelerada conforme avanza la severidad de los agrietamientos, hasta que finalmente se reflejan en la capa de rodamiento (Fano & Chávez, 2017).

2.6.3. Consideraciones de diseño

Algunos factores constructivos y de diseño pueden influir directamente en las características propias de las bases estabilizadas con cemento. Entre los principales puntos a considerar se encuentran:

- **La calidad del cemento:** al igual que muchos otros productos, el cemento presenta un periodo recomendado para su utilización. Se aconseja utilizar cementos con un tiempo no mayor a 3 meses desde su fabricación y que no hayan estado expuestos a factores de humedad o compactación que puedan perjudicar las características esperadas. En caso de existir dudas de su calidad, es preciso realizar pruebas de laboratorio para verificar sus características.
- **Tipo de cemento:** Se deben utilizar cementos convencionales de uso general y bajo ninguna circunstancia se deben emplear cementos de endurecimiento acelerado, ya que propician el surgimiento de fisuras por contracción.
- **Agregados granulares:** Estos materiales conforman entre el 90% y 96% del volumen total de la BEC y generalmente en proyectos de conservación vial, corresponden en su mayoría al resultado de la escarificación de las carpetas superiores de la estructura del pavimento envejecido.

- **Aplicación uniforme:** Los procesos constructivos deben garantizar una adecuada homogenización de los distintos materiales utilizando métodos de mezclado adecuados según el criterio de la Administración.
- **Diseño de mezcla:** Todos los materiales que componen la mezcla de BEC requieren ser muestreados previo al inicio de los trabajos, con el fin de obtener sus características y realizar un diseño de mezcla que brinde una adecuada resistencia de acuerdo a las especificaciones vigentes.

2.7. Características físicas que influyen en el comportamiento de las BEC

2.7.1. Tipos de materiales estabilizados con cemento

Los materiales que pueden ser estabilizados presentan un amplio rango de tipos de suelos. Los materiales granulares con mayor contenido de grava y arena dan mejores resultados, facilitando la pulverización, el mezclado y requiriendo menor cantidad de cemento. Por otro lado, aquellos materiales finos de baja o media plasticidad, no presentan condiciones constructivas tan favorables como los materiales de grano grueso. Para los materiales con un índice plástico mayor al 30%, presentan dificultades de mezclado con el cemento. De esta manera se pueden dividir las bases estabilizadas según el tipo de agregado existente en dos grupos (Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales (LanammeUCR), 2005):

- Granular: materiales menos cohesivos y gruesos (AASHTO: A-1, A-2 y A-3)
- Grano fino: suelos cohesivos (AAHSTO: A-4, A-5, A-6 y A-7)

Los requerimientos típicos de cemento para cada tipo de se pueden estimar de manera preliminar según la clasificación AASHTO y el sistema unificado de suelos SUCS, los cuales, se enlistan en el **Cuadro 2**. Además, se presenta el contenido de cemento al que se deben realizar los ensayos de laboratorio para estos materiales.

Cuadro 2. Contenido de cemento según los agregados de la mezcla de la BEC

Clasificación		Rango usual de cemento requerido		Contenido estimado de cemento en ensayo de humedad-densidad	Contenido de cemento para ensayo de humedecido-secado, y congelamiento y descongelamiento
AASHTO	SUCS	Porcentaje por volumen (%)	Porcentaje por peso (%)	Porcentaje por peso (%)	Porcentaje por peso (%)
A-1-a	GW, GP, GM, SW, SP, SM	5 a 7	3 a 5	5	3, 5, 7
A-1-b	GM, GP, SM, SP	7 a 9	5 a 8	6	4, 6, 8
A-2	GM, GC, SM, SC	7 a 10	5 a 9	7	5, 7, 9
A-3	SP	8 a 12	7 a 11	9	7, 9, 11
A-4	CL, ML	8 a 12	7 a 12	10	8, 10, 12
A-5	ML, MH, CH	8 a 12	8 a 13	10	8, 10, 12
A-6	CL, CH	10 a 14	9 a 15	12	10, 12, 14
A-7	OH, MH, CH	10 a 14	10 a 16	13	11, 13, 15

Fuente: US Department of Transportation; soil and base stabilization and associated drainage consideration; 1992.

Capítulo 3: Caracterización de las muestras recolectadas

3.1. Ensayos de laboratorio

Las bases estabilizadas con cemento deben cumplir parámetros específicos para ser utilizados en proyectos de infraestructura vial. Los parámetros de aceptación de los materiales se encuentran estipulados en el CR – 2010, y, específicamente para el caso de bases estabilizadas con cemento, corresponde a la “*Sección 302: Base granular estabilizada con cemento*”. Esta sección incluye los principales lineamientos para la aceptación de los materiales, los lineamientos para el diseño de mezcla, procedimientos constructivos, control de calidad, así como todas las normas y parámetros aplicables para cada uno de los materiales y/o procesos constructivos.

En el caso de los agregados granulares que conforman la matriz de BEC, se hace referencia a la “*Subsección 703.21: Agregados para capas de base estabilizadas con cemento*” del CR – 2010, tanto para agregados de base granular virgen como materiales granulares reciclados.

3.1.1. Granulometría

Los materiales deben cumplir una serie de parámetros granulométricos con el fin de garantizar la calidad de los trabajos. El CR – 2010, en la tabla 703 – 20 de la Subsección 703.21 (ver **Figura 14**) establece para el material de base virgen, los límites superior e inferior del porcentaje de material granular pasando para algunas de las mallas. En el caso del agregado reciclado, se establece que al menos el 50% de todo el material granular debe pasar el tamiz No. 4 (4,75 mm).

Agregado virgen		Agregado reciclado
Abertura de la malla	% Pasando	Por lo menos el 50% de todo el material debe pasar por un tamiz No. 4 (4,75 mm). Se desechará todo el material retenido en el tamiz de 75 µm y el material inadecuado por otros motivos.
50 mm	100	
4,75 mm (No 4)	50-100 (±6)	
425 µm (No 40)	20-70 (±4)	
75 µm (No 200)	5-35 (±3)	

Figura 14. Especificaciones granulométricas para agregados granulares de BEC
Fuente: Tabla 703 – 20. Manual de Especificaciones Generales para la Construcción de Carreteras, Caminos y Puentes: CR – 2010 (Actualización 2017)

Para la presente investigación se cuenta con cuatro fuentes de material granular, tres de ellas corresponden a material asfáltico perfilado y el restante corresponde a material de base

granular virgen. Estos materiales fueron sometidos al ensayo de granulometría (ASTM C136) y se utilizan como parámetros comparativos las especificaciones anteriormente mencionadas en la **Figura 14**. Se realiza un análisis granulométrico completo, utilizando la siguiente configuración de mallas de mayor a menor tamaño: 2 pulg (50 mm), 1 pulg (25,4 mm), $\frac{3}{4}$ pulg (19 mm), $\frac{1}{2}$ pulg (12,5 mm), $\frac{3}{8}$ pulg (9,5 mm), No. 4 (4,75 mm), No. 8 (2,36 mm), No. 16 (1,18 mm), No. 30 (0,60 mm), No. 50 (0,3 mm), No. 100 (0,15 mm) y finalmente la No. 200 (0,075 mm) (ver **Figura 15**).



Figura 15. Fotografía de la separación granulométrica aplicada a uno de los agregados granulares

En la **Figura 16** (Apéndice A) se muestran los resultados granulométricos para los tres materiales. En el caso de agregados granulares vírgenes, según el CR – 2010, deben presentar una curva granulométrica que se ubique entre las líneas rojas punteadas. En esta figura, este material se ilustra en color café y con un símbolo de triángulo. La curva del material de base, se ubica por debajo del límite inferior, lo que indica que el material presenta una granulometría con una mayor proporción de agregado con tamaños gruesos (superior a la malla No. 4 de 4,75 mm) y una proporción insuficiente de agregado fino.

En el caso de los tres materiales asfálticos perfilados, el CR – 2010 indica que para agregados granulares reciclados al menos un 50% del material granular debe pasar el tamiz No. 4 (4,75 mm). Tal y como se observa en la **Figura 16** (ver resultados en Apéndice A), ninguno de los tres materiales cumple este requisito, siendo el material granular M3 (Plantel del MOPT en Santo Domingo de Heredia) el que más se acerca a este parámetro con un 49% del material pasando esta malla (línea azul y símbolo de cuadro). Para el caso de M1 (RN No. 02, Pérez Zeledón) y M2 (RN No. 117, Santo Domingo de Heredia), cuentan con porcentajes de 42% y 43% respectivamente, por lo que se encuentran muy alejados de la especificación mínima.

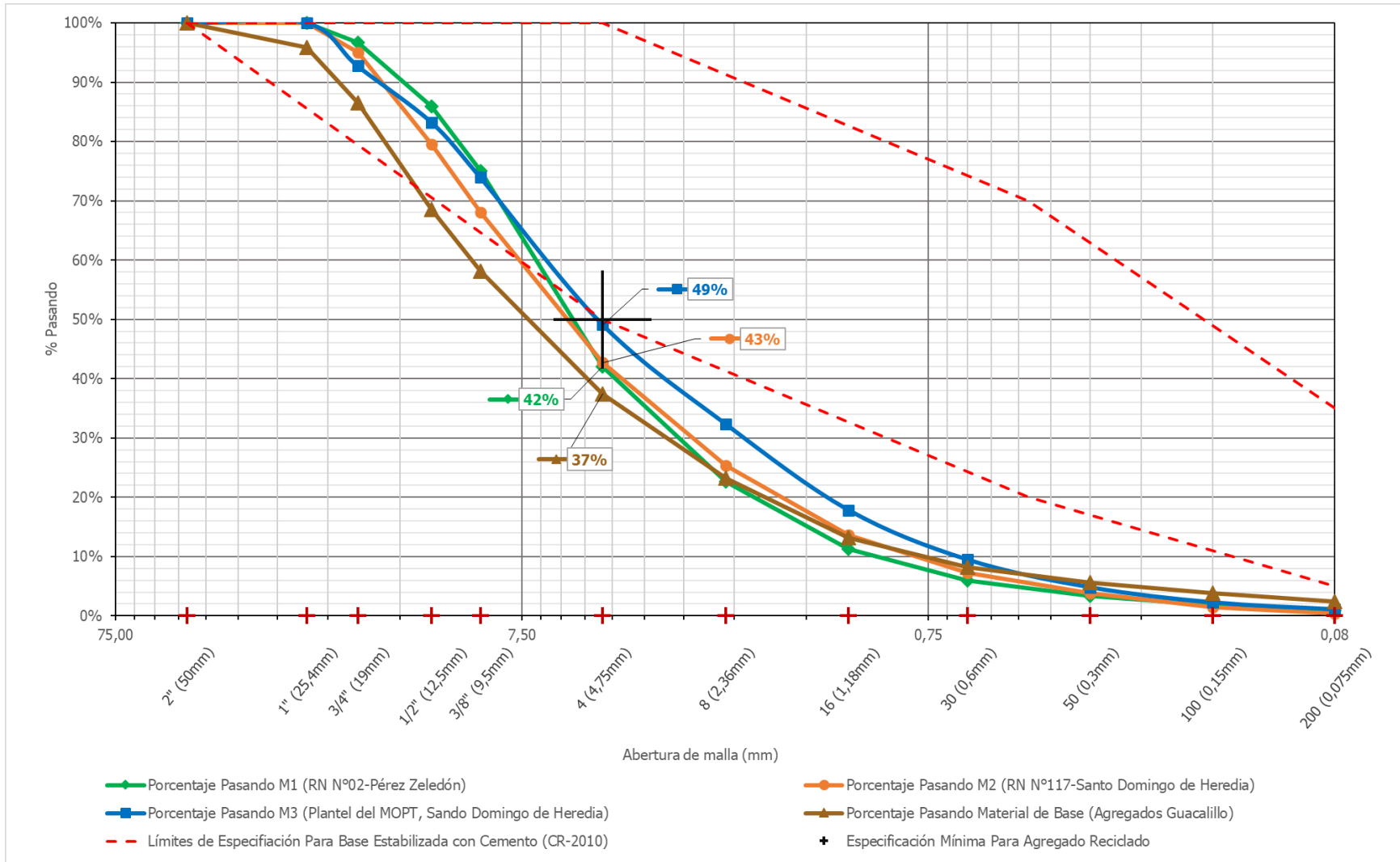


Figura 16. Gráfico comparativo de los resultados del ensayo de granulometría aplicado a los materiales granulares utilizados (ASTM C136) (Apéndice A)

3.1.2. Corrección granulométrica por sobretamaño del agregado

Para la confección de los especímenes de base estabilizada, el agregado debe cumplir con un tamaño máximo de 19 mm (malla No. ¾), esto según las normas de ensayo ASTM D558 y ASTM D1633. Los agregados en estudio contienen un porcentaje del material que supera este tamaño por lo que se debe aplicar la corrección y redistribución del material entre la malla No. ¾ (19 mm) y todas las mallas inferiores, obteniendo así un porcentaje pasando del 100% en el tamiz de mayor tamaño. En la **Figura 17**, se adjuntan fotografías de la separación de las muestras de agregado de base granular virgen y el material asfáltico perfilado M1.

El material con sobretamaño es desechado y se realiza la respectiva corrección granulométrica con el agregado grueso y fino, obteniendo nuevas curvas granulométricas, tal y como se observa en la **Figura 18** (ver resultados en Apéndice C). Luego de la corrección, las curvas granulométricas presentan una ligera mejora, sin embargo, solo el material M3 (Plantel del MOPT en Santo Domingo de Heredia) cumple la especificación mínima (50% pasando la malla No. 4), las otras dos muestras de material perfilado no cumplen esta especificación. Por otra parte, el material de base tampoco cumple los límites mínimos de la especificación (déficit de material fino).



a) Material de base granular virgen

b) Material asfáltico perfilado M1

Figura 17. Fotografía de la separación de muestras en agregado fino, grueso y sobretamaño

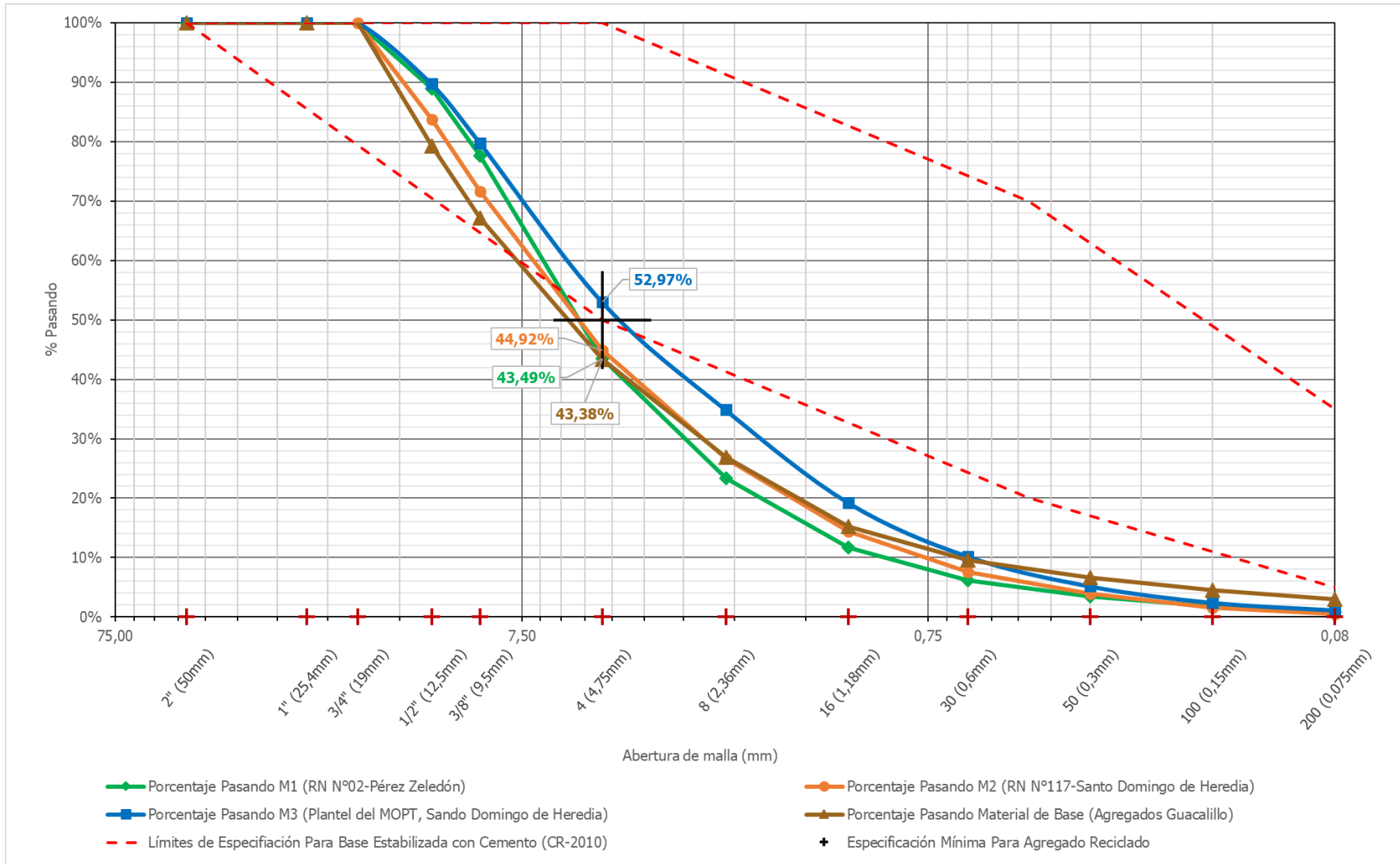


Figura 18 . Corrección granulométrica por sobretamaño del agregado según la norma ASTM D558 y ASTM D163 (Apéndice C)

3.1.3. Abrasión

En el caso del ensayo de abrasión, se utiliza la norma internacional ASTM C131 para los cuatro materiales en estudio. Tal y como lo indica el CR - 2010, el límite máximo de porcentaje de pérdida de la masa es del 50% (tal y como se ilustra en la **Figura 19**), esto indica que luego de realizar el ensayo de abrasión no más del 50% de la masa utilizada debe atravesar la malla No. 12 (1,70 mm). Los resultados obtenidos para los cuatro materiales ensayados, presentan porcentajes de pérdidas menores al límite de la especificación. En el caso del material de base granular virgen, presenta una pérdida del 36,45%, la cual es la más alta de los cuatro materiales analizados.

Los resultados de los materiales asfálticos perfilados fueron de 25,55% para M1 (RN No. 02, Pérez Zeledón), 33,93% para M2 (RN No. 117, Santo Domingo de Heredia) y, por último, un 25,07% para M3 (Plantel del MOPT en Santo Domingo de Heredia). Estos resultados concuerdan con la inspección visual realizada a los materiales, donde la muestra M2 es la que presenta mayor pérdida de masa y corresponde al perfilado de una carpeta con un alto grado de deterioro, tal y como se observa en la **Figura 5**. Se observó que un porcentaje del agregado grueso corresponde a partículas finas unidas por el asfalto presente en el material.

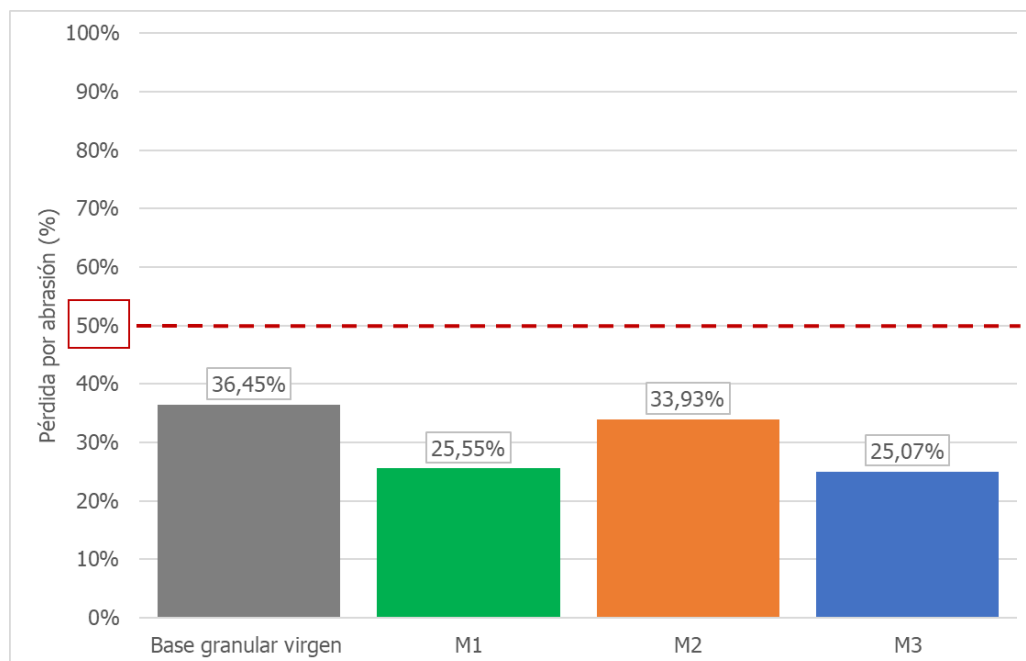


Figura 19. Resultados del ensayo de abrasión de los materiales granulares utilizados (ASTM C131)

3.1.4. Durabilidad

El ensayo de durabilidad fue aplicado al material de base granular virgen tanto al agregado grueso (entre las mallas $\frac{3}{4}$ y No. 4) como la sección fina (pasando la malla No. 4), utilizando el procedimiento de la norma de ensayo ASTM D3744. El CR – 2010 indica que el valor mínimo de durabilidad para estos materiales es de 35,00%. Los resultados obtenidos para el material en estudio corresponden a valores de 71% para la sección gruesa y de 67% para el apartado fino, por lo que el material cumple satisfactoriamente este apartado.

Cuadro 3. Resultados del ensayo de durabilidad del agregado fino y grueso del material de base granular virgen (ASTM D3744)

Material	Granulometría (mallas)	Índice de durabilidad	Límite mínimo según la norma
Base granular virgen	Grueso (3/4 a #4)	71,00%	35,00%
	Fino (inferior a #4)	67,00%	

3.1.5. Contenido de asfalto

El contenido de asfalto presente en el agregado se obtiene a partir de la norma de ensayo AASHTO T164 (ver **Figura 20**) comúnmente conocido como "ensayo de Reflux". Esta característica del agregado reciclado no se encuentra normada ni se utiliza como referencia para el diseño de mezcla de bases estabilizadas con cemento, sin embargo, en la presente investigación se utiliza para caracterizar el agregado que se está utilizando en la mezcla de BEC.

Los agregados asfálticos fueron recopilados luego del proceso de perfilado y no se realiza ningún otro tratamiento luego del muestreo. Por esta razón, gran parte del material se encuentra recubierto por el asfalto, además, algunos de los agregados gruesos corresponden a conglomerados de asfalto y agregado fino.



a) Material asfáltico utilizado



b) Montaje del ensayo



c) Filtros utilizados



d) Agregados liberados del asfalto

Figura 20. Fotografías del montaje del ensayo de Reflux, para contenido de asfalto (AASHTO T164)

En el caso de los agregados asfálticos utilizados para la investigación (ver **Figura 21**), los resultados de contenido de asfalto son de 4,70% para la muestra M1 (RN No. 02, Pérez Zeledón), 5,40% para M2 (RN No. 117, Santo Domingo de Heredia) y finalmente 4,50% para M3 (Plantel del MOPT en Santo Domingo de Heredia). Estos contenidos de asfalto son similares a los utilizados en mezclas asfálticas en caliente (MAC) convencionales, siendo M2 la que contiene un porcentaje de asfalto superior a las otras muestras, lo cual concuerda con la inspección visual del agregado, ya que, se logra ubicar mayor cantidad de conglomerados de asfalto – agregado fino en comparación con las otras dos muestras, además, presenta una coloración más oscura. Estos valores de contenido de asfalto podrían indicar que no son mezclas asfálticas muy viejas y que presentaban un contenido de asfalto alto al momento de su colocación.

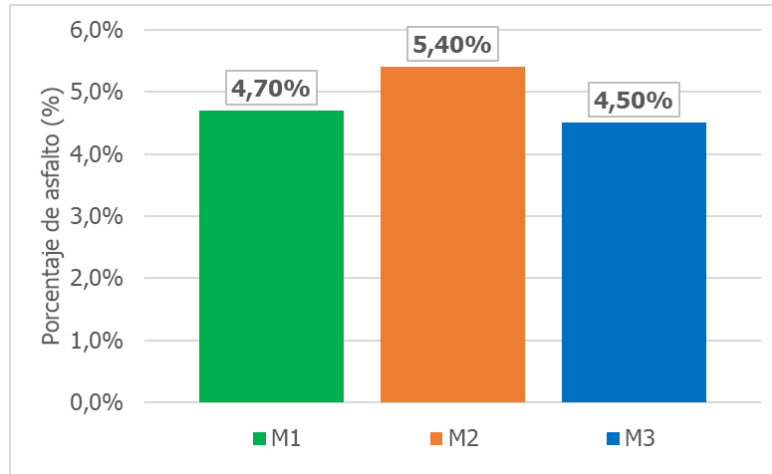


Figura 21. Resultados del ensayo de contenido de asfalto de los materiales asfálticos perfilados (AASHTO T164)

3.1.6. Granulometría del material liberado del asfalto

El agregado utilizado para el ensayo de contenido de asfalto, queda libre y se logra la separación de los conglomerados de asfalto con material fino, permitiendo encontrar la granulometría real del agregado (ver **Figura 22**). Tal y como se observa en la **Figura 23**, **Figura 24** y **Figura 25** (ver resultados en Apéndice B), la curva granulométrica de los tres materiales liberados del asfalto cumplen el criterio de aceptación para materiales granulares reciclados al contar con al menos un 50% del material pasando la malla No. 4 (4,75 mm). Estos gráficos muestran la comparación entre la granulometría aplicada al material original con la corrección por sobretamaño y la curva luego de la extracción del asfalto.



Figura 22. Fotografía del agregado del material asfáltico perfilado luego de la extracción del asfalto

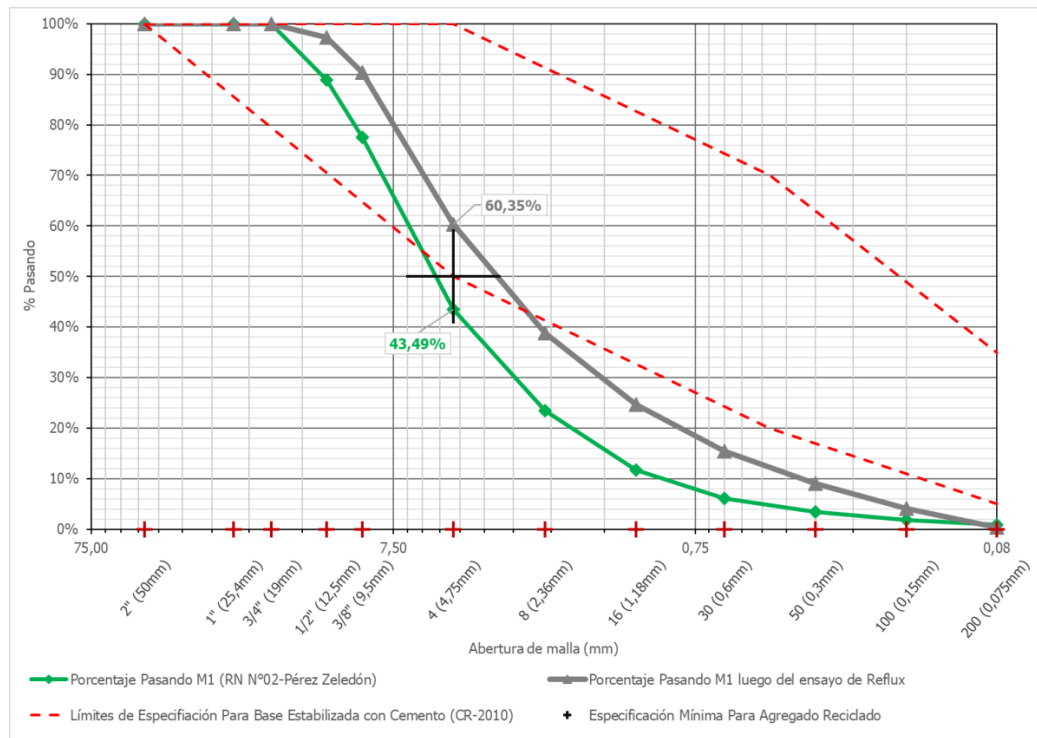


Figura 23. Resultados granulométricos comparativos del material perfilado M1 antes y después del ensayo de REFLEX para extraer el asfalto (Apéndice B)

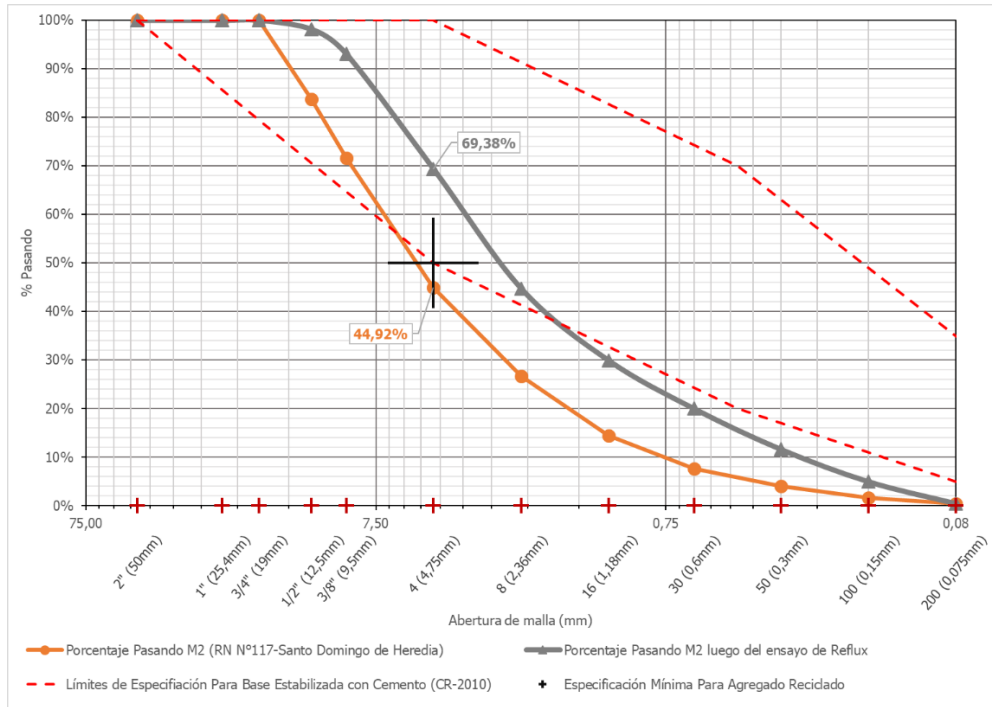


Figura 24. Resultados granulométricos comparativos del material perfilado M2 antes y después del ensayo de extracción del contenido de asfalto (Apéndice B)

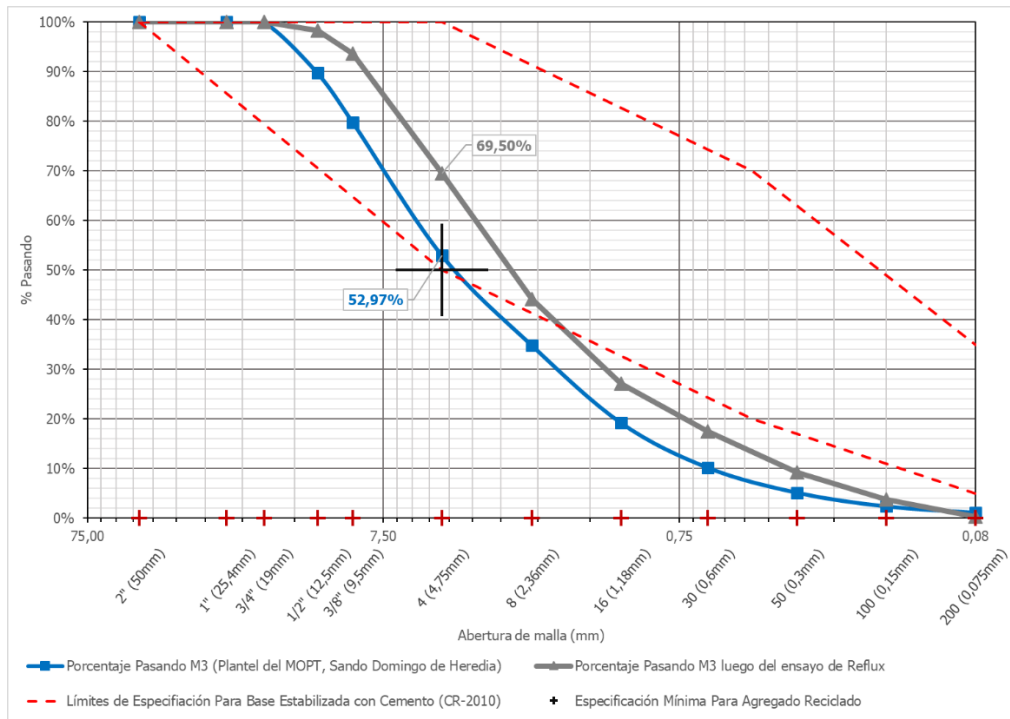


Figura 25. Resultados granulométricos comparativos del material perfilado M3 antes y después del ensayo de extracción del contenido de asfalto (Apéndice B)

3.1.7. Contenido de humedad

Las muestras de investigación fueron sometidas al menos a un ensayo semanal sobre su contenido de humedad, tanto para agregado fino como grueso, con el fin de que este factor no altere los resultados de resistencia a la compresión y se realice la respectiva corrección por peso y humedad de las muestras. Los materiales se encontraban en un lugar cerrado para evitar variaciones fuertes de humedad, esto permite que los resultados de humedad se mantengan constantes durante el proceso experimental.

En el **iError! No se encuentra el origen de la referencia.** se muestran los resultados de humedad para cada material. Se evidencia como el agregado de base granular virgen presenta humedades mucho mayores a los agregados asfálticos perfilados, lo cual evidencia una relativa impermeabilidad del material perfilado (ver **Figura 26** de **Sección 3.1.8**) debido al contenido de asfalto (ver **Figura 21** de la **Sección 3.1.5**) que recubre la superficie del agregado.

Cuadro 4. Humedades promedio registradas para los distintos materiales granulares utilizados

Muestra	Humedad material fino (Mallas 3/4 a #4)	Humedad material grueso (Mallas inferiores a #4)	Humedad general del material (todas las mallas)
Base granular virgen	3,57%	3,64%	3,60%
Perfilado M1	0,79%	0,39%	0,62%
Perfilado M2	0,71%	0,65%	0,68%
Perfilado M3	0,65%	0,61%	0,63%

3.1.8. Ensayo para determinar la gravedad específica bruta seca (GBS) y la absorción de agregados gruesos (ASTM C127) y finos (ASTM C128)

La determinación de la gravedad específica bruta seca y la absorción de los agregados granulares permite conocer el comportamiento de los materiales al entrar en contacto con la mezcla de agua y cemento (mortero). Estos aspectos indican la porosidad tanto externa como interna de los agregados, así como el grado de permeabilidad que presentan sus caras externas (principalmente el caso del material asfáltico perfilado). La permeabilidad y porosidad del agregado son variables que influyen directamente en la adherencia entre agregados, compactación, densidad y resistencia a la compresión de las pastillas de BEC.

En la **Figura 26** se muestran los resultados de los porcentajes de absorción de las distintas muestras tanto en el apartado fino como en el grueso. De manera comparativa, se tiene que el agregado de base granular virgen presenta valores de absorción cercanos al 10%, siendo su sección fina quien presenta mayor absorción con respecto a la gruesa. En el caso de las tres muestras de material asfáltico perfilado, se obtienen resultados cercanos al 2% de absorción, siendo de igual manera el agregado fino quien presenta los valores más altos de absorción.

Los resultados de absorción de los agregados asfálticos perfilados concuerdan con el ensayo de contenido de asfalto del **Apartado 3.1.5** de esta investigación, donde se concluye que M1 (RN No. 02, Pérez Zeledón) presenta el porcentaje intermedio entre las tres muestras, M2 (RN No. 117, Santo Domingo de Heredia) el que presenta el mayor porcentaje y finalmente M3 (Plantel del MOPT en Santo Domingo de Heredia) presenta el porcentaje menor. Esto se debe a que el asfalto presente en los agregados se encuentra recubriendo las caras expuestas y sellando gran cantidad de poros y grietas del agregado. Esto genera una condición de impermeabilidad muy alta que puede generar problemas de adherencia al utilizar porcentajes altos de material asfáltico en la mezcla de base estabilizada con cemento.

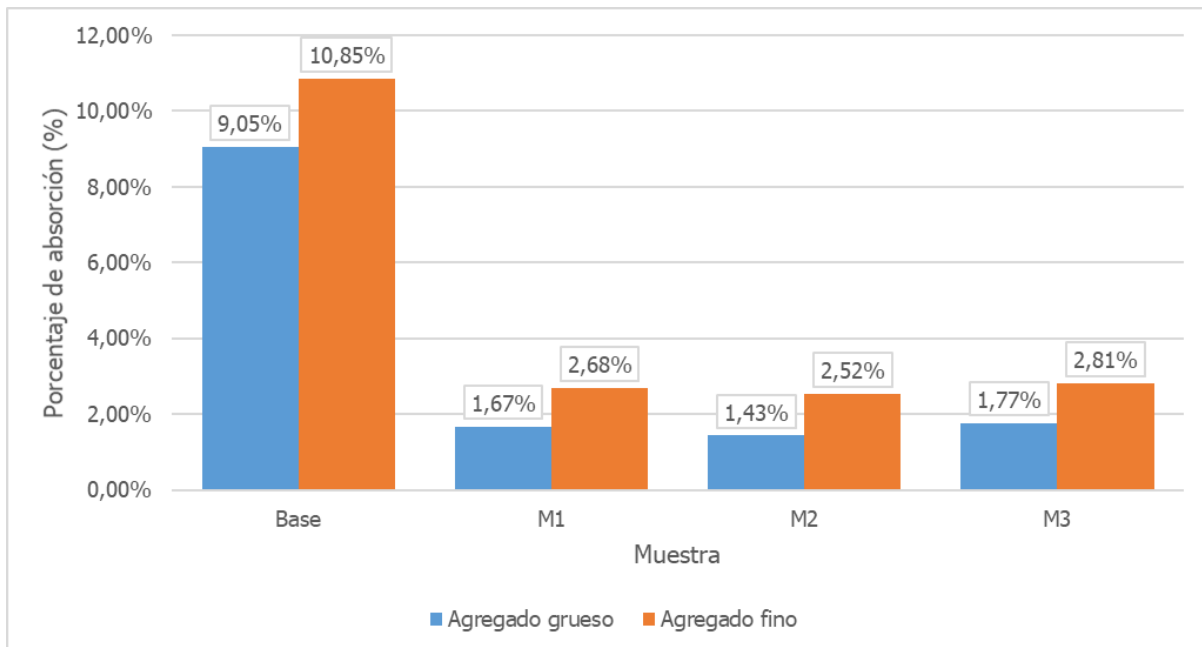


Figura 26. Resultados del ensayo para determinar los porcentajes de absorción de los agregados granulares utilizados (ASTM C127 y C128)

En la **Figura 27** se muestran los resultados de la gravedad específica bruta seca (GBS) de las 4 muestras de análisis, tanto para el agregado grueso como su parte fina. El gráfico muestra los resultados de manera comparativa siendo el material de base granular virgen el que presenta valores inferiores cercanos a 2 050 kg/m³. Por su parte, las muestras de material perfilado M1 y M3 presentan valores muy similares, siendo el agregado grueso el de mayor densidad con resultados superiores a los 2 500 kg/m³ y las secciones finas se encuentran cercanos a los 2 350 kg/m³. En el caso de la muestra M2, los resultados son ligeramente inferiores a las otras 2 muestras de material asfáltico perfilado, con un valor en su parte gruesa de 2 409 kg/m³ y su parte fina igual a 2 301 kg/m³.

Estos valores deben analizarse cuidadosamente al medir la densidad y compactación de las distintas combinaciones de mezcla, ya que, mayor densidad no equivale a mayor compactación. Por ende, los especímenes que contienen mayor contenido de material asfáltico perfilado presentan una densidad mucho mayor pero no necesariamente esto favorece la resistencia a la compresión, ya que esto se debe a la densidad propia de los agregados individuales y no es del todo representativo para las distintas combinaciones de mezclas.

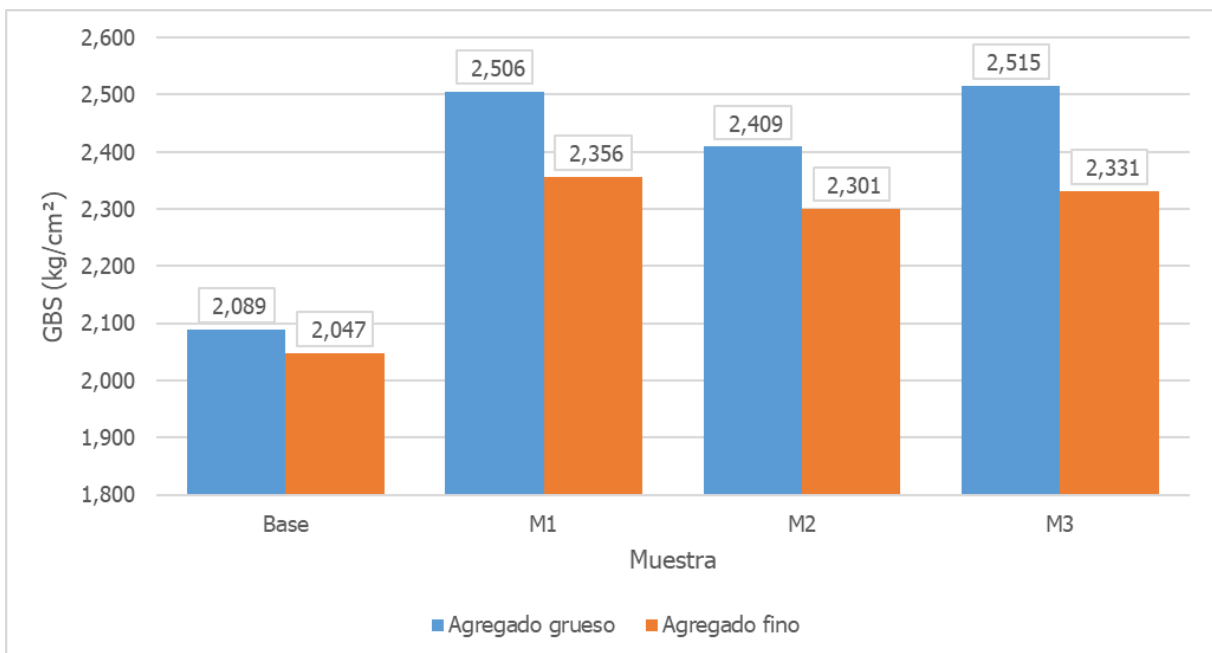


Figura 27. Resultados del ensayo para determinar la gravedad específica bruta seca de los agregados granulares utilizados (ASTM C127 y C128)

Capítulo 4: Diseño de mezcla, confección y falla de especímenes de base estabilizada con cemento

4.1. Diseño de mezcla

El diseño de mezcla se realiza para una combinación de agregados de manera que los resultados puedan ser comparables para todas las combinaciones de mezcla y las distintas fuentes de agregados. La muestra utilizada como patrón corresponde a la conformada por un 25% de material asfáltico perfilado y un 75% de material de base granular virgen. Estos dos materiales completan el 100% de materiales granulares por peso seco con las respectivas correcciones por humedad de acuerdo a los valores registrados para agregado fino y grueso (ver **iError! No se encuentra el origen de la referencia.**).

El objetivo principal del diseño de mezcla es determinar el contenido de cemento como porcentaje del peso total de los agregados en condición seca que da como resultado un valor de resistencia a la compresión inconfiada de 3,00 Megapascales (MPa). Este valor de esfuerzo corresponde al punto medio de los límites máximo (3,9 MPa) y mínimo (2,1 MPa) de acuerdo a las especificaciones del CR – 2010, de manera que los resultados de los especímenes de ensayo se encuentren dentro de este rango al brindar condiciones similares a la muestra de ensayo patrón (dosificación, granulometría, humedad, compactación, curado, tipo y edad de falla, entre otros).

Para encontrar el contenido de cemento a utilizar se realizan tres juegos de especímenes con distintos porcentajes de cemento de acuerdo al procedimiento de ensayo de la norma ASTM D1633, específicamente el Método A (ver **Figura 28**). Este método utiliza la energía de compactación del ensayo Próctor Modificado con especímenes de 101,6 mm (4,0 pulg) de altura y 116,8 mm (4,6 pulg) de diámetro. El valor porcentual de cemento a utilizar corresponde al punto de mejor ajuste correlacionado con el valor de 3,0 MPa de resistencia a la compresión.



Figura 28. Mezcla de una de las combinaciones de agregados utilizados para el diseño de mezcla patrón

4.1.1. Densidad máxima y humedad óptima de la mezcla de diseño patrón

Para encontrar los valores de densidad y humedad óptima, se utiliza el ensayo Próctor Modificado (ASTM D1557) para una combinación de mezcla inicial que incluye un contenido de cemento preliminar de 4,0% del peso seco de la mezcla. Se realizan seis puntos de análisis, donde tres de estos puntos presentan un valor de humedad inferior a la óptima (curva seca) y los restantes tres son superiores a este valor (curva húmeda). La intersección de estas curvas permite ubicar el punto de mayor densidad seca donde se presenta la humedad óptima de compactación. Este valor de humedad se utiliza como parámetro para el diseño de mezcla.

El valor de humedad óptima encontrado corresponde a 9,80% del peso total en condición seca de la mezcla, tal y como se ilustra en la **Figura 29**. Por su parte, el valor de densidad seca obtenido para la humedad óptima es de 1 967 kg/m³.

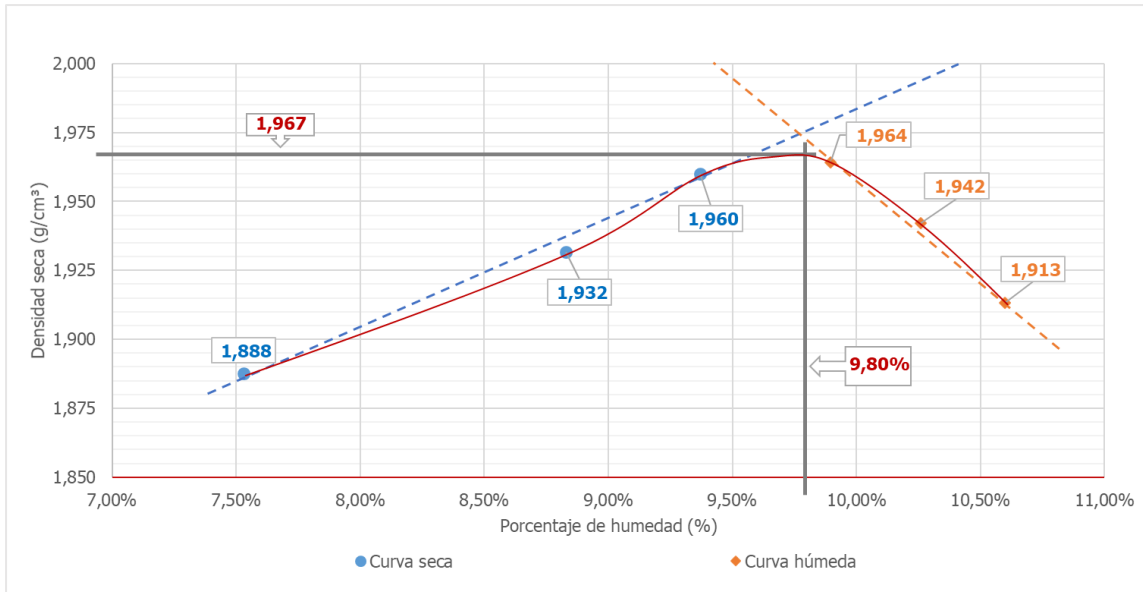


Figura 29. Resultados del ensayo Próctor Modificado (ASTM D1557) para ubicar la densidad máxima y la humedad óptima

4.1.2. Resultados del valor porcentual de cemento a utilizar

El contenido de cemento a utilizar para las diferentes combinaciones de mezcla corresponde al mejor ajuste para un valor de resistencia a la compresión de 3,0 MPa utilizando los resultados de tres puntos con distinta concentración de cemento y su respectivo valor de resistencia. Tal y como se observa en la **Figura 30**, se analizaron los puntos de 3,0%, 4,0% y 5,0% de contenido de cemento con respecto al peso seco de toda la mezcla. Estos puntos de análisis son usuales para ubicar el porcentaje de cemento óptimo, según el CR-2010, el contenido de cemento se puede ubicar entre los valores de 3,0% y 9,0% dependiendo de las características de los agregados, sin embargo, no se recomienda la adición de contenidos altos de cemento debido a que representa por peso el material más caro de la mezcla, además, pueden generar altas resistencias que podrían inducir a agrietamientos de la base estabilizada.

En el presente estudio, para el contenido de 3,0% de cemento se obtuvo un valor de resistencia a la compresión de 2,77 MPa, para el contenido de 4,0% un valor de 3,10 MPa y finalmente para 5,0% un valor de 3,56 MPa, es decir, los tres puntos utilizados como parámetro se encuentran dentro de los límites de resistencia permitidos y corresponden a un valor inferior a la resistencia objetivo y dos valores superiores, por lo que se puede aproximar el porcentaje de cemento óptimo a utilizar para el diseño de mezcla general. Tal y como se

ilustra en la **Figura 30**, el valor objetivo da como resultado un contenido de 3,80% de cemento como porcentaje del peso seco del total de la mezcla. A manera de ejemplo, al realizar una mezcla de 1,00 tonelada, se requiere añadir 38 kg de cemento, es decir cerca de un 75% de un saco de 50 kg (tamaño comercial).

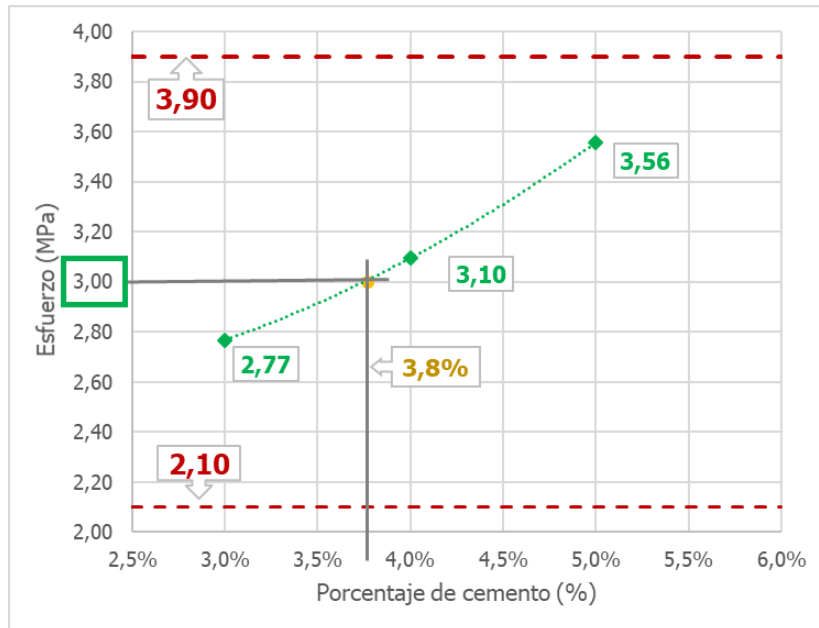


Figura 30. Gráfico de resultados del valor de esfuerzo de acuerdo al contenido porcentual de cemento presente en la mezcla

4.2. Confección de pastillas de base estabilizada con distintos porcentajes de material asfáltico perfilado e igual porcentaje de cemento

La confección y falla de especímenes de BEC se realiza de acuerdo a la norma de ensayo ASTM D1633 (Método A) según las especificaciones contenidas en el CR – 2010. En este apartado se utilizan los criterios del diseño de mezcla de la **Sección 4.1** para la confección de los especímenes de BEC, al utilizar igual contenido de cemento (3,80% del peso seco) para todas las combinaciones de mezcla, tal y como se aprecia en la **Figura 31**.

Los resultados encontrados pueden ser comparables entre sí, permitiendo evaluar el efecto que generan las tres muestras de material perfilado al incluirse en distintas proporciones del peso total de la muestra. Tal y como se ilustra en la **Figura 31**, en total se realizaron 6 combinaciones de mezcla para cada una de las muestras de material perfilado, además, se realizó una combinación utilizando únicamente material de base. En total, en este apartado

se realizaron 19 combinaciones de mezcla, utilizando juegos de 5 pastillas de BEC para cada uno de los ensayos, sumando un total de 95 pastillas de BEC.

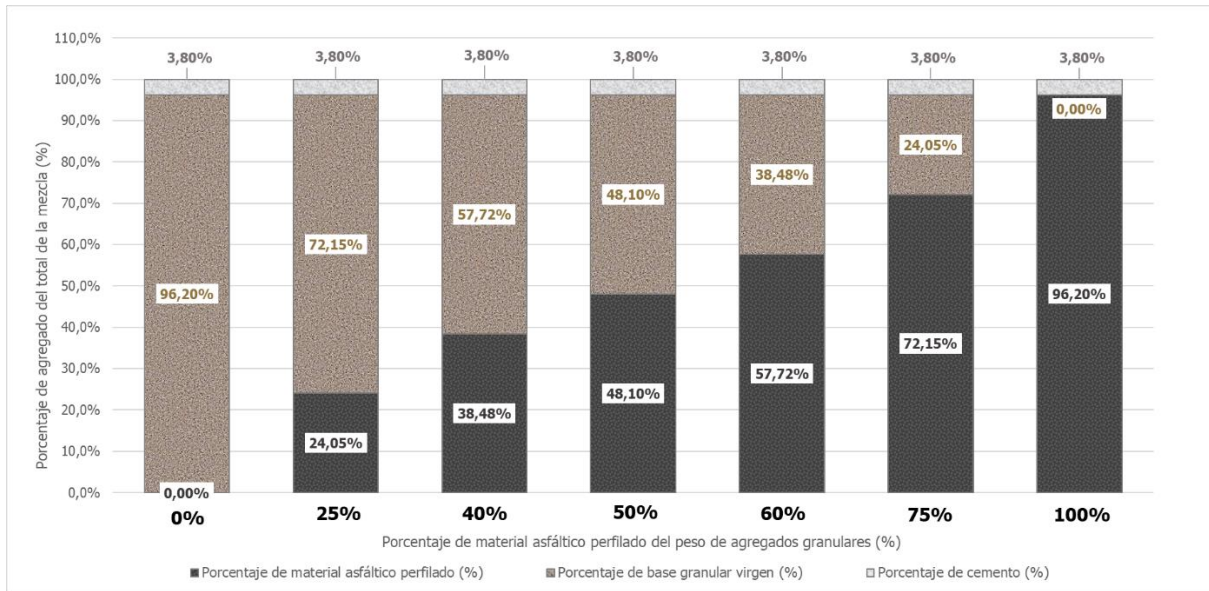


Figura 31. Gráfico resumen de la matriz de ensayos realizada según el tipo de muestra y dosificación para un valor constante de 3,80% de cemento por peso seco

En la **Figura 32** se adjuntan fotografías a manera de ejemplo del proceso de confección de especímenes de BEC para la combinación de mezcla de 40% de material asfáltico perfilado. El proceso de confección de pastillas es idéntico para todas las combinaciones de mezcla, de manera que puedan ser comparables. En primera instancia se realiza la mezcla de agregados granulares, cemento y agua. Luego, se realiza el proceso de compactación de acuerdo a la norma de ensayo (ASTM D1633) que utiliza la energía de compactación del ensayo Próctor Modificado.

Finalmente, se mejora el acabado de la cara superior del espécimen y se procede con la extracción de los moldes. Durante las primeras horas (alrededor de 10 horas) posteriores a la confección, se debe impedir el escape de agua durante el proceso de fraguado, por lo cual, las pastillas se introducen en bolsas plásticas debidamente selladas. Los restantes días antes de la falla, las pastillas permanecen en una cámara húmeda. En la **Figura 33** se adjuntan a manera de ejemplo, fotografías del acabado de las pastillas de BEC.



a) Mezcla de agregados, cemento y agua



b) Compactación de pastillas de BEC



c) Afinado de cara superior



d) Extracción de pastillas



e) Acabado final



f) Almacenamiento de pastillas

Figura 32. Resumen del proceso de confección de especímenes de BEC



a) 0% de RAP



b) 25% de RAP



c) 40% de RAP



d) 50% de RAP



e) 60% de RAP



f) 75% de RAP



g) 100% de RAP

Figura 33. Pastillas de BEC con diferentes porcentajes de material asfáltico perfilado adicionado a la mezcla

4.3. Confección de pastillas de base estabilizada con un 75% de material asfáltico perfilado y diferentes porcentajes de cemento

En esta sección se evalúa la relación que existe entre el contenido de cemento presente en la mezcla y la resistencia a la compresión, para especímenes elaborados con un porcentaje del 75% de material asfáltico perfilado y utilizando material de base granular virgen para completar el restante 25% del peso del espécimen. Este experimento permite ubicar el contenido de cemento necesario para obtener una muestra que cumpla con los parámetros de resistencia según el CR – 2010. Tal y como se ilustra en la **Figura 34**, se utilizan los valores porcentuales de cemento adicionado a la mezcla por peso seco de 3,80 % (utilizado en la **Sección 4.2**), 5,00%, 7,00% y 9,00%.

El cemento corresponde al material más costoso por peso de la mezcla, por lo que debe existir un diseño de mezcla optimizado que permita obtener una BEC que cumpla con las especificaciones vigentes al menor costo posible. En el presente caso de estudio, el uso de materiales reciclados permite reducir los costos de extracción y acarreo de nuevos materiales, lo cual puede reflejarse en un ahorro significativo a pesar del uso de un valor porcentual de cemento más elevado.

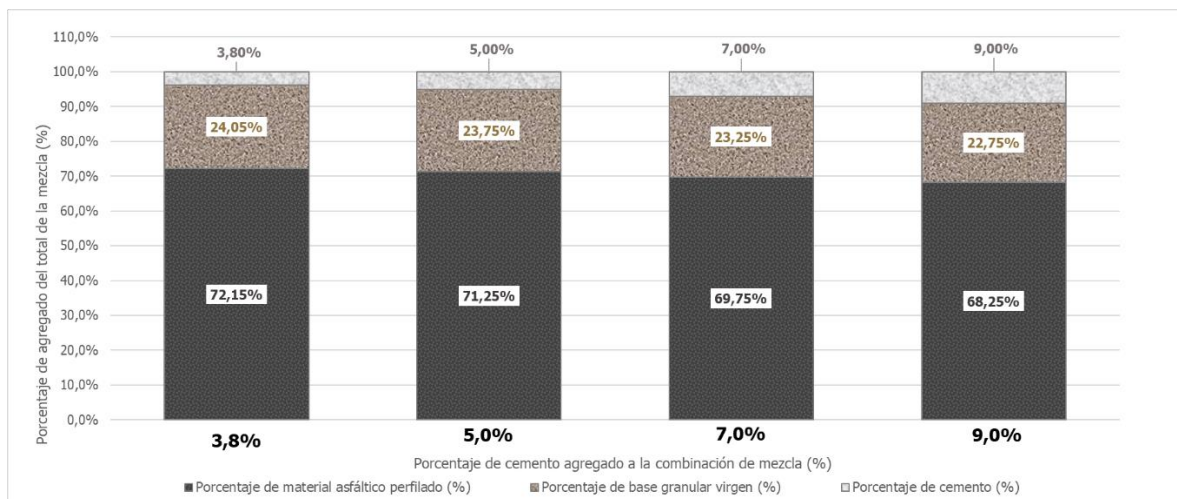


Figura 34. Gráfico resumen de la matriz de ensayos realizada para una dosificación constante de 75% de material asfáltico perfilado y distintos porcentajes de cemento

4.4. Falla de especímenes

Las pastillas de BEC se fallan 7 días después de su confección. Durante este periodo los especímenes deben permanecer en una cámara húmeda ganando resistencia (ver **Figura**

35). Antes de la falla a la compresión, las pastillas deben permanecer sumergidas durante las 4 horas anteriores al momento de falla, con el fin de obtener el valor de resistencia más crítico (ver **Figura 36**), es decir, se realiza el procedimiento de curado en húmedo y falla en húmedo. Además, se debe medir su diámetro, su altura y su peso con el fin de obtener su densidad húmeda y posteriormente la seca al obtener la humedad al secar al horno una porción de la pastilla fallada.

La falla a la compresión se realiza con un equipo debidamente calibrado para proporcionar una carga con una tasa de crecimiento constante de 70 KPa/s, tal y como lo indica la norma de ensayo ASTM D1633 (ver **Figura 36**). El momento justo de la falla de pastillas de BEC no es perceptible a simple vista, por lo que se utiliza el mayor valor de resistencia registrado por el equipo.



Figura 35. Proceso de ganancia de resistencia de las pastillas de BEC en la cámara húmeda



a) Sumersión de las muestras (4 horas)



b) Medición de peso y dimensiones



c) Resistencia a la compresión inconfiada



d) Momento de falla de la pastilla

Figura 36. Proceso de falla a la compresión de pastillas de BEC

Capítulo 5: Presentación y análisis de resultados

5.1. Análisis comparativo de la resistencia a la compresión para los diferentes porcentajes de material asfáltico perfilado con igual contenido de cemento (Primer estudio de resistencias)

Para este **primer estudio** de resistencias, los ensayos tanto de confección como de falla de pastillas se realizan utilizando como variable fundamental el contenido de material asfáltico perfilado presente en la mezcla, manteniendo las demás variables constantes, de manera que los resultados pueden ser comparables entre sí. Al utilizar 3 distintas fuentes de material asfáltico perfilado, se evalúa la variabilidad de estos materiales, tanto en sus características como en su comportamiento como agregado para las BEC.

El diseño de mezcla utilizado para todas las distintas combinaciones se basa en el diseño patrón de 25% de material asfáltico perfilado para la muestra M1 (ver **Sección 4.1**). Este diseño da como resultado un porcentaje de cemento igual a 3,80% del peso seco total de los agregados. En el caso de la humedad óptima de la mezcla, el diseño patrón da como resultado un valor de 9,80% del peso total, sin embargo, al aumentar el porcentaje de material asfáltico perfilado, la mezcla requiere menos humedad debido a que este agregado presenta un porcentaje de absorción mucho menor al material de base granular virgen (ver **Figura 26** de la **Sección 3.1.8**).

El diseño de mezcla anteriormente mencionado, se realiza con el fin de obtener un valor de resistencia igual a 3,00 MPa al utilizar un 25% de material asfáltico perfilado para M1. Tal y como se muestra en el gráfico de la **Figura 37** de resistencia a la compresión inconfiada, para la combinación de mezcla de 25% de material perfilado (mezcla de diseño), en el caso de M1 el valor obtenido fue de 3,09 MPa, para M2 es de 2,77 MPa y finalmente M3 con un 3,01 MPa. Los valores obtenidos son muy cercanos al valor promedio de resistencia buscado, lo cual permite evaluar el comportamiento de las distintas combinaciones al utilizar mayor contenido de material asfáltico perfilado en las mezclas e igual porcentaje de cemento.

En el caso de la combinación de mezcla que utiliza únicamente material de base granular virgen, la resistencia a la compresión presenta un aumento considerable con un valor de 3,71 MPa, lo cual evidencia que este material granular presenta mejores características para la

confección de BEC que el material asfáltico perfilado. Este valor de resistencia se encuentra dentro del rango aceptable según el CR – 2010, sin embargo, al evaluar los costos de los materiales (mayor valor por peso seco del cemento) se puede optimizar el valor porcentual de cemento de manera que se acerque al valor buscado de 3,00 MPa.

En el gráfico comparativo de la resistencia a la compresión (**Figura 37 - Cuadro 5**) se observa la tendencia relativamente lineal negativa que presentan las combinaciones de mezcla que contienen 0%, 25%, 40%, 50% y 60% de material asfáltico perfilado. Esta tendencia se presenta en las 3 muestras de material asfáltico perfilado, iniciando en un valor de 3,71 MPa para 0% de material asfáltico perfilado y finalizando en un valor de 2,26 MPa (promedio de las tres muestras) para el 60% de material asfáltico perfilado. El punto de análisis de 60% de material asfáltico perfilado es el último que logra cumplir el límite mínimo de resistencia del CR – 2010, sin embargo, se encuentra un poco alejado del valor promedio buscado de 3,00 MPa, lo cual indica que requiere de más contenido de cemento para alcanzar la resistencia buscada.

La tendencia lineal descrita cambia notoriamente entre el valor de 60% y 75% de material perfilado. La diferencia entre estos 2 puntos de análisis es de un 15% adicional de material perfilado, sin embargo, la caída en la resistencia es cercana al 50%, es decir, pasa de una resistencia promedio de 2,26 MPa para el valor de 60% a un valor promedio de 1,16 MPa para el contenido de 75% de material asfáltico perfilado. Este resultado indica que para una sustitución de material del 75% de RAP no se logra cumplir el mínimo de resistencia de acuerdo a la normativa vigente al utilizar las condiciones del diseño de mezcla patrón. Para esta condición es necesario realizar un diseño de mezcla adicional y reevaluar el costo – beneficio de utilizar este material asfáltico a elevados porcentajes en la mezcla.

El último punto de estudio corresponde a la combinación de mezcla que utiliza el 100% de material granular asfáltico perfilado. Tal y como se ilustra en la **Figura 37 (Cuadro 5)**, el valor de resistencia promedio obtenido de las 3 muestras es cercano a 0,90 MPa (no cumple el criterio mínimo de resistencia de acuerdo al CR – 2010). Esta concentración de material asfáltico en una mezcla de BEC no se recomienda, ya que, presenta serios problemas de adherencia y compactación que dificultan la confección de los especímenes en el laboratorio, lo cual se ve reflejado en lo que pueda suceder durante la construcción en campo.

Para poder llevar los resultados de la combinación de mezcla del 100% de material asfáltico perfilado a los valores de resistencia mínimos, se requieren concentraciones muy altas de cemento, además, los problemas de adherencia y compactación de la mezcla no permiten una conformación adecuada debido a su alto grado de impermeabilidad.

Los puntos de análisis corresponden a juegos de 5 pastillas con el fin de obtener un valor más acertado. En la **Figura 37 (Cuadro 5)** se adjunta el valor de la desviación estándar para cada punto de análisis, obteniendo valores muy bajos, lo cual indica la confiabilidad y estandarización de los ensayos. El promedio de la desviación estándar de toda la nube de datos mostrada en el gráfico es de 0,08 MPa, siendo el valor más alto de 0,23 MPa. Según la norma de ensayo (ASTM D1633), la desviación estándar usual para este ensayo (múltiples repeticiones) para un mismo operador tiene un valor de 6,1% del valor de resistencia encontrado, valor mucho más alto que el registrado en el presente estudio, por lo que se puede afirmar que los ensayos realizados presentan valores altos de precisión.

En la **Figura 38 (Cuadro 6)** se muestran los resultados de los valores de densidades por juego de pastillas mostrados en la **Figura 37.(Cuadro 5)** Se evidencia como al aumentar el contenido de material asfáltico perfilado presente en la mezcla, de igual manera aumenta la densidad de las pastillas. La diferencia en la densidad va desde un valor de 1 823 kg/m³ para el valor de 0% hasta un valor promedio de 1 977 kg/m³ para el caso de 100% de perfilado asfáltico. Esta diferencia en la densidad de las pastillas se debe a que el material asfáltico perfilado presenta una densidad mucho mayor (mayor peso) que el material de base granular virgen (Ver **Figura 27** de la **Sección 3.1.8**). Este aspecto no necesariamente está vinculado con la compactación o capacidad a la compresión inconfina de las distintas mezclas.

Los valores de densidad muestran un comportamiento muy similar para las muestras M1 y M3, mientras que M2 muestra resultados de densidad inferiores. Este aspecto obedece a los resultados individuales de densidad de las 3 muestras de material asfáltico perfilado, donde, M2 presenta la densidad más baja (Ver **Figura 27** de la **Sección 3.1.8**). Además, M2 presenta el mayor contenido de asfalto (ver **Figura 21** de la **Sección 3.1.5**) y el menor valor de absorción (Ver **Figura 26** de la **Sección 3.1.8**), lo cual dificulta el proceso de compactación de la mezcla, reduce la densidad de la pastilla y compromete la integridad de la misma.

La absorción máxima de las pastillas se logra obtener antes del proceso de falla, ya que, se utiliza el procedimiento de curado en húmedo y falla en húmedo, es decir, se realiza el proceso de ganancia de resistencia en una cámara húmeda y 4 horas antes de la falla, las pastillas se encuentran totalmente sumergidas. Este procedimiento permite evaluar la condición más crítica de la mezcla. Además, permite encontrar el valor de absorción máximo de la mezcla. Este valor corresponde al porcentaje de humedad del material justo después de la falla e indica la absorción de los agregados y/o vacíos en los especímenes.

En el gráfico de la **Figura 39 (Cuadro 7)** se muestran los resultados de humedad para todas las combinaciones de mezcla durante el proceso de falla. La tendencia de los datos muestra una disminución del contenido de humedad de las pastillas al aumentar el contenido de material asfáltico perfilado. Esta disminución va desde un valor de 11,4% para la mezcla que solo utiliza material de base granular virgen, hasta un valor promedio de humedad de 8,3% para las combinaciones de mezcla que utilizan únicamente material asfáltico perfilado como agregado.

Estos resultados de humedad concuerdan con los ensayos realizados de absorción de los agregados (Ver **Figura 26** de la **Sección 3.1.8**) y del contenido de asfalto (ver **Figura 21** de la **Sección 3.1.5**), ya que, la muestra que presenta los menores puntos de humedad corresponde al material perfilado M2, mientras que las otras 2 muestras (M1 y M3) presentan humedades muy similares tal como se ha presentado con otras de las características.

Los resultados del presente estudio demuestran que es posible la incorporación de material asfáltico reciclado en porcentajes máximos entre 50% y 60% sin requerir un aumento drástico del contenido de cemento ni afectar las propiedades de trabajabilidad e integridad, cumpliendo los parámetros especificados en el CR – 2010.

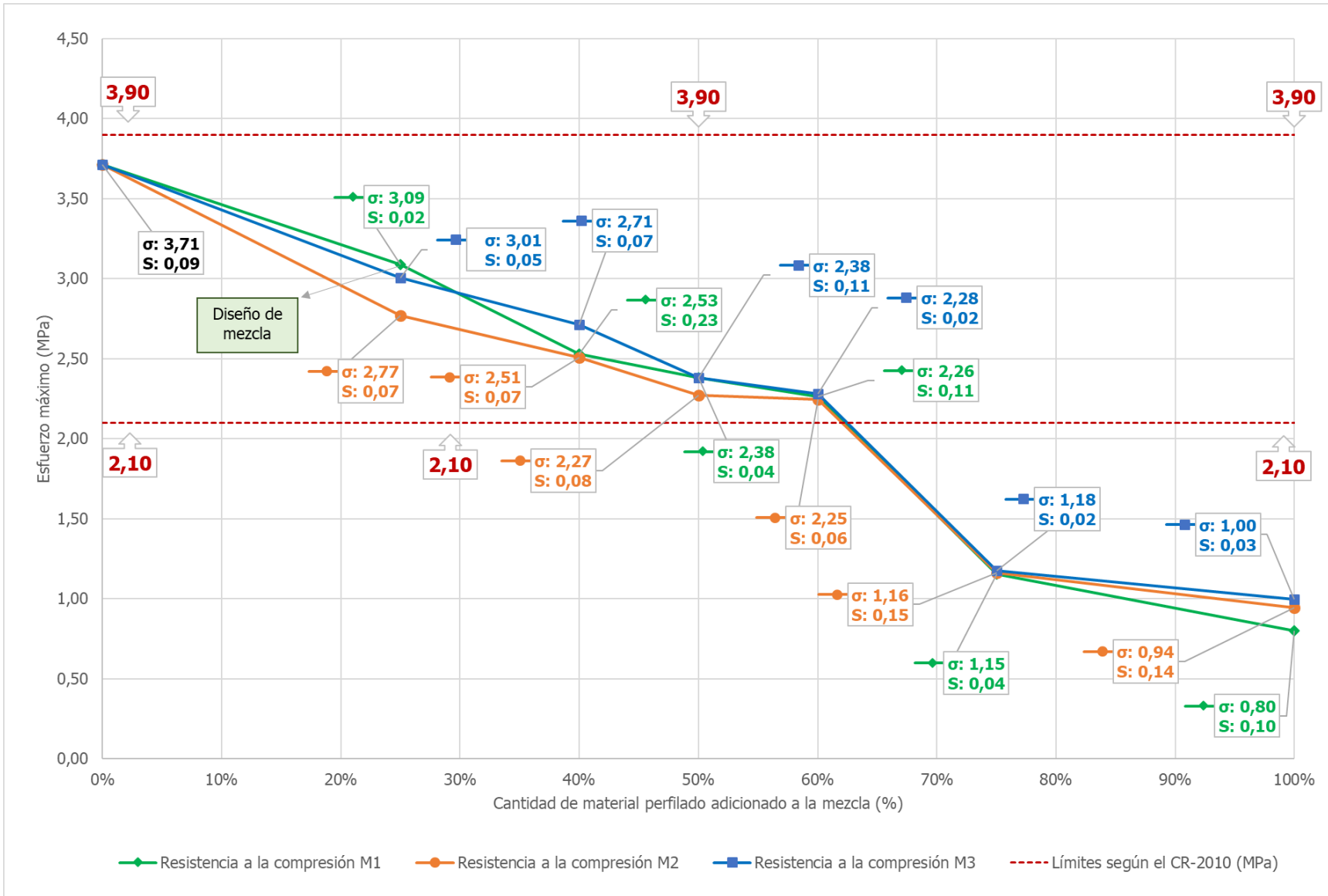


Figura 37. Gráfico comparativo de la resistencia a la compresión para los diferentes porcentajes de material asfáltico perfilado

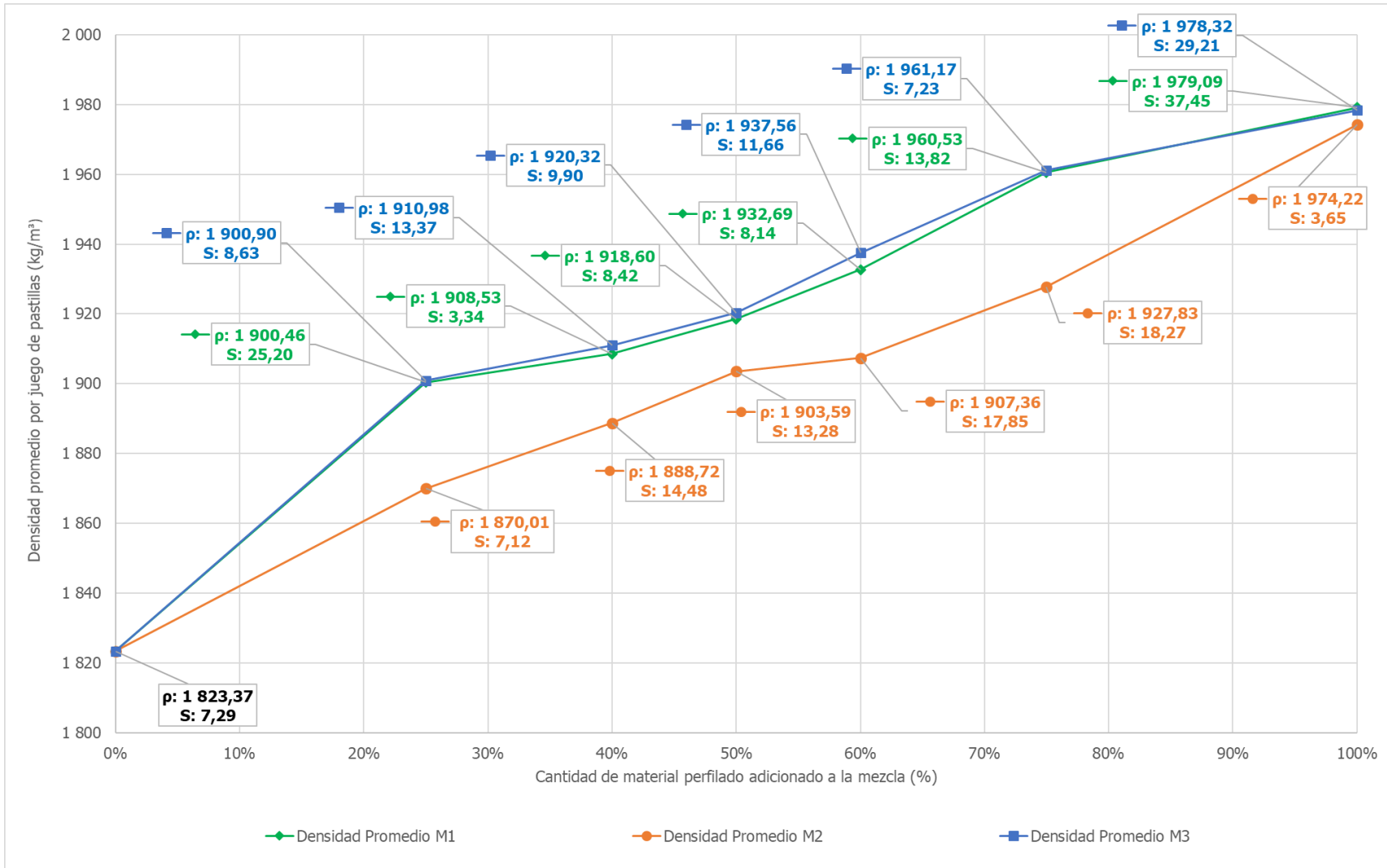


Figura 38. Gráfico comparativo de la densidad de las pastillas de base estabilizada al variar el contenido de material asfáltico perfilado

Cuadro 5. Resumen de resistencias a la compresión de las tres muestras de material asfáltico perfilado utilizando igual contenido de cemento en la mezcla

Porcentaje de material perfilado (%)	M1 (RN N°02-Pérez Zeledón)		M2 (RN N°117-Santo Domingo de Heredia)		M3 (Plantel del MOPT, Santo Domingo de Heredia)	
	Esfuerzo promedio (MPa)	Desviación estándar (MPa)	Esfuerzo promedio (MPa)	Desviación estándar (MPa)	Esfuerzo promedio (MPa)	Desviación estándar (MPa)
0%	3,71	0,09	3,71	0,09	3,71	0,09
25%	3,09	0,02	2,77	0,07	3,01	0,05
40%	2,53	0,23	2,51	0,07	2,71	0,07
50%	2,38	0,04	2,27	0,08	2,38	0,11
60%	2,26	0,11	2,25	0,06	2,28	0,02
75%	1,15	0,04	1,16	0,15	1,18	0,02
100%	0,80	0,10	0,94	0,14	1,00	0,03

Cuadro 6. Resumen de densidades de pastillas de BEC que contienen igual contenido de cemento en la mezcla y distintas combinaciones de material asfáltico perfilado

Porcentaje de material perfilado (%)	M1 (RN N°02-Pérez Zeledón)		M2 (RN N°117-Santo Domingo de Heredia)		M3 (Plantel del MOPT, Santo Domingo de Heredia)	
	Densidad seca (kg/m ³)	Desviación estándar (kg/m ³)	Densidad seca (kg/m ³)	Desviación estándar (kg/m ³)	Densidad seca (kg/m ³)	Desviación estándar (kg/m ³)
0%	1823,37	7,29	1823,37	7,29	1823,37	7,29
25%	1900,46	25,20	1870,01	7,12	1900,90	8,63
40%	1908,53	3,34	1888,72	14,48	1910,98	13,37
50%	1918,60	8,42	1903,59	13,28	1920,32	9,90
60%	1932,69	8,14	1907,36	17,85	1937,56	11,66
75%	1960,53	13,82	1927,83	18,27	1961,17	7,23
100%	1979,09	37,45	1974,22	3,65	1978,32	29,21



Figura 39. Gráfico comparativo de humedades al momento de falla, variando el contenido de material asfáltico perfilado

Cuadro 7. Resumen de humedades durante el proceso de falla de pastillas de BEC de las tres muestras de material asfáltico perfilado utilizando igual contenido de cemento en la mezcla

Porcentaje de material perfilado (%)	Humedad al momento de falla (%)		
	M1 (RN N°02-Pérez Zeledón)	M2 (RN N°117-Santo Domingo de Heredia)	M3 (Plantel del MOPT, Santo Domingo de Heredia)
0%	11,4%	11,4%	11,4%
25%	10,1%	9,9%	10,0%
40%	10,0%	9,7%	9,9%
50%	9,8%	9,6%	9,7%
60%	9,7%	9,5%	9,7%
75%	9,0%	8,8%	8,9%
100%	8,4%	8,0%	8,5%

5.2. Análisis comparativo de la resistencia a la compresión para muestras con igual contenido de material asfáltico perfilado y distintos porcentajes de cemento (Segundo estudio de resistencias)

Los resultados obtenidos en la **Sección 5.1** utilizando un diseño de muestra patrón con igual contenido de cemento, da como resultado una caída abrupta de la resistencia entre los valores de 60% y 75% de material asfáltico perfilado presente en la mezcla. Los valores de resistencia para las pastillas que contienen un 75% de material asfáltico perfilado y un 3,8% de cemento, presentan resultados de resistencia muy inferiores a la especificación mínima de 2,1 MPa. Por esta razón, es necesario evaluar las mezclas con 75% de material perfilado utilizando contenidos de cemento superiores a la mezcla patrón.

El estudio de resistencia a la compresión para diferentes porcentajes de cemento e igual contenido de material perfilado, incluye los porcentajes de 3,8% (resultado de la **Sección 5.1**), 5,0%, 7,0% y 9,0% de cemento según el peso seco total de la mezcla. El uso de porcentajes más altos de cemento se ve reflejado directamente en el costo de los materiales, sin embargo, al utilizar gran cantidad de material asfáltico perfilado se reducen los costos de extracción y acarreo del material de base granular virgen. La conveniencia económica de la utilización o no de porcentajes altos de RAP va a depender de cada proyecto, ya que, intervienen múltiples factores influyen en el valor final de los materiales, por ende, el valor de la intervención.

En el gráfico de la **Figura 41 (Cuadro 9)**, se muestran los resultados de la resistencia a la compresión para los diferentes porcentajes de cemento adicionado a la mezcla con 75% de material reciclado. Como es de esperarse, al aumentar el contenido de cemento de igual manera aumenta el valor de resistencia a la compresión inconfiada, de forma que para un valor inicial de 3,8% de cemento, se tiene una resistencia promedio de 1,16 MPa (inferior al límite mínimo), mientras que para un contenido de 9,0% (el más alto utilizado), el valor de resistencia promedio es de 5,60 MPa (muy superior al límite máximo). Para el caso de 5,0% de cemento, el valor promedio de resistencia a la compresión es de 2,59 MPa (dentro del rango aceptable e inferior al valor promedio de 3,00 Mpa), mientras que para un contenido de 7,0% de cemento, el valor promedio de resistencia es de 4,38 MPa (superior al límite máximo).

En resumen, para el presente estudio, el valor objetivo de resistencia de 3,00 MPa se obtiene al utilizar contenidos de cemento que se encuentren entre 5,0% y 6,0% del peso seco total para mezclas que contienen 75% de material reciclado. Para dimensionar la cantidad de cemento a utilizar, se requiere de al menos 1,2 sacos de cemento (60 kg) por cada tonelada de BEC (1,2 sacos/tonelada) o equivalente a 2,4 sacos (120 kg) por cada metro cúbico de BEC confeccionada (2,4 sacos/m³). Estas dosificaciones de cemento, equivalen cerca de 1,5 veces la cantidad utilizada para el diseño de mezcla patrón que utiliza un 25% de material asfáltico perfilado.

Los valores de desviaciones estándar para la nube de puntos mostrada en el gráfico de la **Figura 41 (Cuadro 9)**, presentan un valor promedio de 0,12 MPa, lo cual indica que los valores obtenidos tienen gran precisión. En cuanto al comportamiento de las curvas de las distintas muestras, se logra observar como de igual manera que en los resultados de la **Sección 5.1**, los valores de resistencia de la muestra M2 se encuentran por debajo de las otras 2 muestras (M1 y M3). Por su parte, la muestra M3 presenta valores superiores a las otras 2 muestras al utilizar contenidos de cemento altos (tanto para 7,0% como 9,0%). Estos comportamientos concuerdan con los demás estudios realizados tanto de contenido de asfalto (ver **Figura 21** de la **Sección 3.1.5**), resistencia a la abrasión (ver **Figura 19** de la **Sección 3.1.3**) y absorción de las muestras (Ver **Figura 26** de la **Sección 3.1.8**), ya que, M2 es quien presenta las condiciones más desfavorables mientras M1 y M3 características más apropiadas (muy similares).

Los valores de densidad correspondientes a las pastillas realizadas con distintos porcentajes de cemento presentan una tendencia creciente, especialmente entre los puntos de 3,8%, 5,0% y 7% de cemento (ver **Figura 42 - Cuadro 10**). Entre los puntos de 7% y 9% la densidad promedio de las muestras no sufre un cambio considerable, por lo que se podría decir que esta característica se llega a estabilizar para valores altos de contenido de cemento. Estas tendencias se deben a que el material fino cementante, junto con el agua (mortero), logran llenar mayor cantidad de vacíos en las pastillas durante la compactación, lo que origina especímenes más sólidos y uniformes.

Al igual que en secciones anteriores, se evidencian valores superiores de densidad para el caso de las pastillas elaboradas con el material asfáltico perfilado M3, seguido por los valores de M1, y finalmente con valores inferiores, la muestra M2. Este comportamiento se ve

reflejado en múltiples características individuales de las muestras, lo cual, da como resultado una superioridad de los valores de resistencia a la compresión obtenidos de las pastillas elaboradas con este material (M3).

La capacidad de absorber humedad de las pastillas al estar completamente sumergida está relacionada directamente con los vacíos en el espécimen y la absorción de los agregados. Al aumentar el contenido de cemento presente en la mezcla se reduce la cantidad de vacíos, sin embargo, el material cementante absorbe más líquido que los agregados granulares, especialmente el material asfáltico perfilado. En la **Figura 43 (Cuadro 8)** se muestran los valores de humedad al momento de la falla al variar el contenido de cemento presente en la mezcla. Se observa un aumento progresivo con una tendencia prácticamente lineal de los valores de humedad al agregar mayor contenido de cemento a la mezcla. En la **Figura 40** se adjunta una fotografía comparativa de las pastillas de BEC al utilizar distintos porcentajes de cemento.



Figura 40. Comparación de las pastillas elaborados con distintos porcentajes de cemento y 75% de material asfáltico perfilado

Cuadro 8. Resumen de humedades durante el proceso de falla de pastillas de BEC con 75% de material asfáltico perfilado de las tres muestras estudiadas, utilizando distintos porcentajes de cemento

Porcentaje de cemento adicionado (%)	Humedad al momento de falla (%)		
	M1 (RN N°02-Pérez Zeledón)	M2 (RN N°117-Santo Domingo de Heredia)	M3 (Plantel del MOPT, Santo Domingo de Heredia)
3,8%	9,0%	8,8%	8,9%
5%	9,2%	9,0%	9,3%
7%	9,6%	9,3%	9,8%
9%	9,9%	9,5%	10,1%

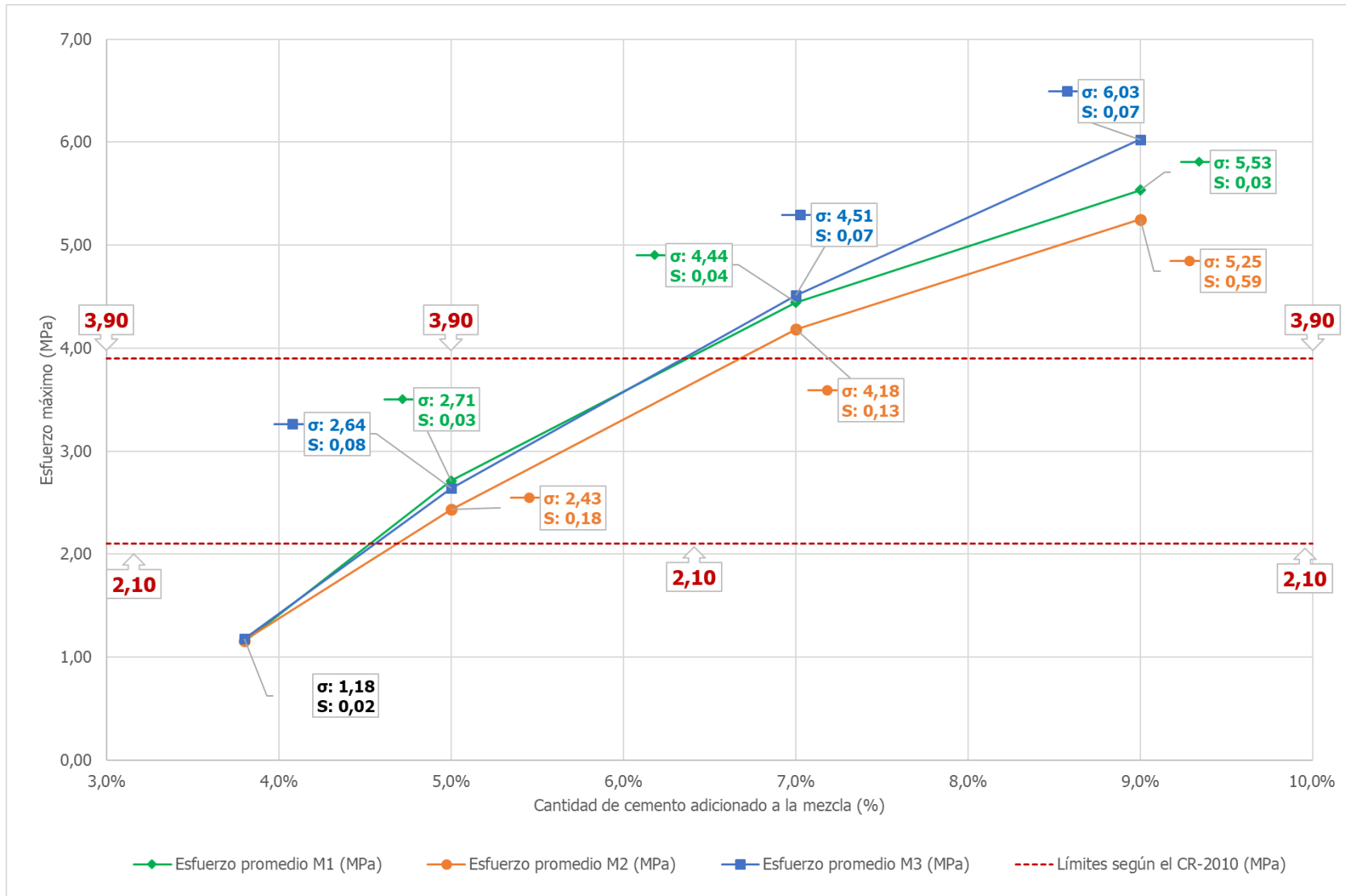


Figura 41. Gráfico comparativo de la resistencia a la compresión para los diferentes porcentajes de cemento adicionados a la mezcla con 75% de RAP

Cuadro 9. Resumen de resistencias a la compresión de las tres muestras de material asfáltico perfilado utilizando distintos porcentajes de cemento adicionados a la mezcla con 75% de RAP

Porcentaje de cemento adicionado (%)	M1 (RN N°02-Pérez Zeledón)		M2 (RN N°117-Santo Domingo de Heredia)		M3 (Plantel del MOPT, Santo Domingo de Heredia)	
	Esfuerzo promedio (MPa)	Desviación estándar (MPa)	Esfuerzo promedio (MPa)	Desviación estándar (MPa)	Esfuerzo promedio (MPa)	Desviación estándar (MPa)
3,8%	1,15	0,04	1,16	0,15	1,18	0,02
5%	2,71	0,03	2,43	0,18	2,64	0,08
7%	4,44	0,04	4,18	0,13	4,51	0,07
9%	5,53	0,03	5,25	0,59	6,03	0,07

Cuadro 10. Resumen de densidades secas de las tres muestras de material asfáltico perfilado utilizando distintos porcentajes de cemento adicionados a la mezcla con 75% de RAP

Porcentaje de cemento adicionado (%)	M1 (RN N°02-Pérez Zeledón)		M2 (RN N°117-Santo Domingo de Heredia)		M3 (Plantel del MOPT, Santo Domingo de Heredia)	
	Densidad seca (kg/m ³)	Desviación estándar (kg/m ³)	Densidad seca (kg/m ³)	Desviación estándar (kg/m ³)	Densidad seca (kg/m ³)	Desviación estándar (kg/m ³)
3,8%	1960,53	13,82	1927,83	18,27	1961,17	7,23
5%	1982,50	1,93	1969,97	3,19	1986,64	6,80
7%	1993,40	4,34	1981,71	7,12	2000,12	4,89
9%	1997,71	5,85	1986,82	8,37	2000,94	7,04

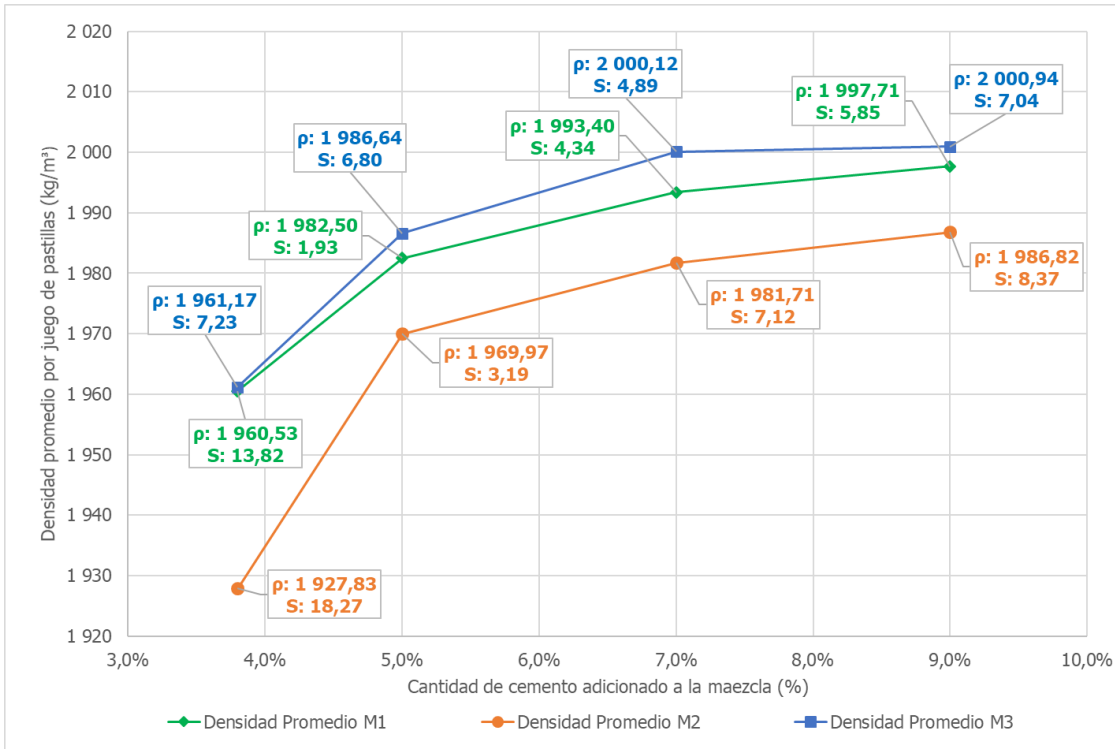


Figura 42. Gráfico comparativo de la densidad de las pastillas de base estabilizada al variar el contenido de cemento en la mezcla con 75% de RAP

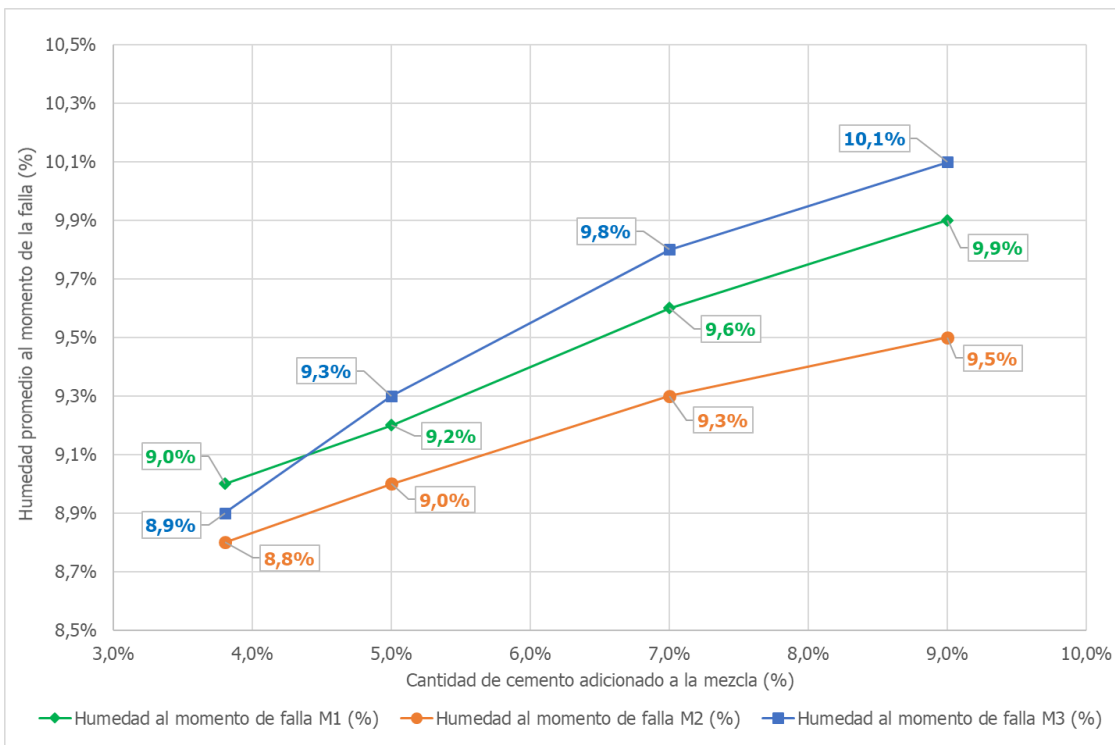


Figura 43. Gráfico comparativo de humedades al momento de falla, variando el contenido de cemento en la mezcla con 75% de RAP

Capítulo 6: Conclusiones y recomendaciones

6.1. Conclusiones

El análisis granulométrico realizado a los 4 materiales de análisis, indica que los agregados poseen una cantidad insuficiente del material fino (pasando la malla N°4), por lo que para cumplir los parámetros de las especificaciones se realizaron algunas correcciones de acuerdo a la norma de ensayo (ASTM D558) para lograr acercar la curva granulométrica a los valores de la especificación. Si estos materiales estuvieran siendo utilizados en un proyecto constructivo, se debe realizar nuevamente el proceso de escarificación hasta obtener un resultado granulométrico de acuerdo a las especificaciones actuales (CR – 2010).

Los resultados del ensayo de abrasión utilizando la Máquina de Los Ángeles, indican que las 4 muestras de material granular cumplen satisfactoriamente el parámetro máximo de 50% (CR – 2010), con valores de 36,45% para el caso del material de base granular virgen, un valor de 33,93% para el caso de la muestra M2 y valores cercanos a 25% para las muestras M1 y M3. Es decir, los materiales asfálticos perfilados presentan valores adecuados, a pesar del deterioro acumulado durante su operación y la gran cantidad de conglomerados (asfalto – finos) presentes en la conformación. Se puede concluir, que el material asfáltico reciclado está conformado por agregados con una calidad superior a los materiales utilizados en bases granulares, por lo que los resultados de abrasión generalmente van a cumplir las especificaciones mínimas (CR – 2010).

El ensayo de durabilidad fue aplicado únicamente al material de base granular virgen, tanto al agregado grueso, como al fino. El valor de especificación mínima según de CR -2010, corresponde a 35%, mientras que los resultados obtenidos fueron de 71% en el agregado grueso y 67% en el caso del fino.

Los agregados reciclados se encuentran recubiertos por asfalto envejecido, reportando un contenido de asfalto adherido de 4,70% para el material M1, el M2 tiene un 5,40% y finalmente M3 presenta un 4,50%. Estos resultados concuerdan con la inspección visual del agregado, ya que, se logra observar mayor cantidad de conglomerados de asfalto – agregado fino en la muestra M2 en comparación con las otras dos muestras. Estos resultados presentaron valores altos de asfalto, lo cual, se traduce en una alta impermeabilidad.

La determinación de la gravedad específica bruta seca y la absorción de los agregados granulares permite conocer el comportamiento de los materiales al entrar en contacto con la mezcla de agua y cemento (mortero). Estos aspectos indican la porosidad tanto externa como interna de los agregados, así como el grado de permeabilidad que presentan sus caras externas (principalmente el caso del material asfáltico perfilado). La permeabilidad y porosidad del agregado son variables que influyen directamente en la adherencia entre agregados, la compactación, su densidad y la resistencia a la compresión de las pastillas de BEC.

En cuanto a los resultados del porcentaje de absorción, de manera comparativa se obtuvo que el agregado de base granular virgen presenta valores de absorción cercanos al 10%, siendo su sección fina quien presenta una mayor absorción en una proporción de 1,2 con respecto a la gruesa. En el caso de las tres muestras de material asfáltico perfilado, se obtienen resultados cercanos al 2% de absorción, siendo de igual manera el agregado fino el que presenta los valores más altos de absorción, en una proporción de 1,7. Estos valores bajos de absorción del material asfáltico reciclado, se deben a la cantidad de asfalto presente en la mezcla. Este valor, afecta directamente la adherencia de estos agregados con el cemento y el agua.

Las muestras de material asfáltico perfilado presentan valores un 20% superiores (aproximadamente) en gravedad específica bruta seca (GBS) con respecto a la muestra de base granular virgen, lo que les confiere un mayor peso (menos cantidad de material para un mismo peso). De manera comparativa, las muestras M1 y M3, presentan valores superiores a la muestra M2, lo cual concuerda con la inspección visual de las muestras, donde este material (M2) se aprecia más deteriorado y con un contenido mayor de conglomerados de asfalto y material fino que presentan una menor densidad.

Se realizan 2 estudios de resistencia a la compresión inconfiada. El primero, utiliza el mismo porcentaje de cemento hidráulico y distintos porcentajes de material asfáltico perfilado adicionado a la mezcla, mientras que el segundo utiliza distintos porcentajes de cemento, pero igual cantidad de material asfáltico perfilado.

Para el **primer estudio** de resistencias, se realiza un diseño de mezcla patrón para un porcentaje de 25% de material asfáltico perfilado y un 75% de material de base granular

virgen. Se obtuvo un valor de cemento óptimo de 3,80% por peso seco del total de la mezcla para una resistencia de 3,0 MPa. Las combinaciones de mezcla analizadas en este estudio corresponden a los porcentajes de 0%, 25% (diseño patrón), 40%, 50%, 60%, 75% y 100% de material asfáltico perfilado. El restante porcentaje de agregado granular es completado con el material de base granular virgen, utilizando el mismo porcentaje de cemento hidráulico para todas las combinaciones de las 3 muestras analizadas.

En el caso del **segundo estudio** se utilizó un contenido de material asfáltico perfilado constante de 75% del total del peso seco de los agregados granulares (25% de material de base granular virgen). Se utilizaron 4 diferentes concentraciones de cemento añadida a la mezcla, siendo el primer punto el utilizado en las combinaciones del primer estudio. Los restantes puntos de concentración de material cementante correspondieron a los porcentajes de 5,00%, 7,00% y 9,00% del total del peso seco de la mezcla.

Para cada punto de análisis se moldearon 5 pastillas de BEC. En el caso del primer estudio de resistencias se realizaron en total 95 pastillas de BEC, por su parte, en el segundo estudio se realizaron 45 pastillas, sumando un total de 140 pastillas de BEC para todo el proceso de experimental.

La trabajabilidad de las mezclas de BEC presentan cambios notorios durante el proceso de compactación de las pastillas al variar el contenido de RAP añadido. En el caso del **primer estudio** de resistencias, se observa que al aumentar el porcentaje de material asfáltico perfilado añadido, la mezcla reduce su trabajabilidad y se dificultó paulatinamente la compactación de las pastillas. Este comportamiento comprometió la integridad de los especímenes compactados, principalmente para los valores de 75% y 100% de material asfáltico perfilado presente en la mezcla.

Para el **segundo estudio** de resistencias, la trabajabilidad aumentó conforme se añadió mayor porcentaje de cemento a la mezcla de BEC. Este aspecto favoreció la compactación y la integridad de los especímenes fabricados.

Los resultados de resistencias a la compresión del **primer estudio** (igual contenido de cemento y distintos porcentajes de material asfáltico perfilado) presentan una tendencia relativamente lineal descendente para las combinaciones de 0%, 25%, 40%, 50% y 60% de

material asfáltico perfilado analizadas a la mezcla. Los resultados de estas combinaciones cumplen el criterio mínimo de aceptación de 2,10 MPa (CR – 2010), sin importar la procedencia del material asfáltico perfilado (M1, M2 y M3).

La tendencia lineal evidenciada, muestra un cambio notorio al aumentar la cantidad de material perfilado de 60% a 75%. La diferencia entre estos 2 puntos de análisis es de tan solo un 15% adicional de material perfilado, sin embargo, la caída en la resistencia es cercana al 50%. El valor de resistencia promedio para este último punto de análisis es de 1,16 MPa, por lo cual no se cumple el criterio mínimo de aceptación. Para el último punto de análisis correspondiente al 100% de material asfáltico perfilado, el valor promedio de resistencia es de 0,90 MPa, por lo que corresponde al punto más bajo analizado.

En el caso del **segundo estudio** de resistencias (75% de material asfáltico perfilado y distintos porcentajes de cemento) los valores de resistencia inconfiada incrementan notoriamente al aumentar el porcentaje de cemento añadido a la mezcla alcanzando un valor promedio de 5,60 MPa cuando se utiliza un contenido de 9,0% de cemento (valor más alto utilizado). El valor objetivo de una resistencia de 3,0 MPa se logró al utilizar porcentajes de cemento entre 5,0% y 6,0%, con cualquiera de las tres fuentes de material asfáltico perfilado. Es decir, el uso de un 75% de material reciclado en la BEC demanda cerca de un 50% más de cemento hidráulico, con respecto a la BEC que utiliza tan solo un 25% de material asfáltico perfilado añadido a la mezcla.

Los puntos de análisis de resistencias corresponden a juegos de 5 pastillas que permiten obtener un valor más acertado. En ambos estudios se obtuvieron resultados con valores muy bajos de desviación estándar para cada punto de análisis, lo cual indica la confiabilidad, precisión y estandarización de los ensayos.

Al utilizar una mayor cantidad de material asfáltico reciclado, se reduce la calidad de la compactación, pero la densidad general de los materiales aumenta al depender de las densidades de las tres fuentes de material asfáltico perfilado, donde, las densidades de estos materiales son superiores al material de base granular virgen.

Cuando se mantiene constante la cantidad de material asfáltico perfilado (**Segundo Estudio** 75% RAP), las características que rigen la densidad de los especímenes son la calidad de

compactación y el contenido de cemento presente en la mezcla. Estos dos factores se encuentran estrechamente relacionados entre sí, ya que, al aumentar el contenido de cemento se mejoran las condiciones de compactación de la mezcla y las propiedades de densificación, ya que, aumenta al lograr llenar más vacíos, debido a que hay mayor cantidad de finos en la mezcla (mortero). Sin embargo, se logra determinar que este valor de densidad se estabiliza para valores altos de cemento, en el presente estudio se obtienen densidades muy similares para contenidos de cemento de 7% y 9%.

Durante las 4 horas previas a la falla, las pastillas se encuentran completamente sumergidas en agua. Esto permite que la mezcla alcance su mayor grado de saturación, el cual, depende de la absorción de los agregados y los vacíos en la matriz de la mezcla. Las muestras de material asfáltico reciclado presentan un recubrimiento de asfalto que disminuye notoriamente el porcentaje de absorción de agua en los agregados, por lo que, al utilizar mayor cantidad de material asfáltico perfilado en la BEC, los especímenes absorbieron menos cantidad de agua. Este aspecto (tal y como lo demuestran los resultados experimentales) influye en la cohesión de la BEC, ya que, la pasta que se forma durante la reacción del cemento y agua se adhiere a las paredes y vacíos de los agregados, sin embargo, el recubrimiento de asfalto funciona como una barrera impermeable que reduce la efectividad de dicha adherencia.

El uso del RAP para la rehabilitación o construcción de nuevas carreteras puede significar un ahorro económico importante en el costo del proyecto. La utilización de este material reduce la extracción de nuevas fuentes de material granular virgen, así como la reducción del costo de acarreo de estos materiales. Sin embargo, su uso puede estar relacionado con una mayor demanda de cemento (material más caro de la mezcla de BEC por peso), lo cual podría afectar de manera significativa el costo del proyecto. Estos aspectos no se pueden generalizar, por lo que se debe realizar un estudio de costos para cada proyecto en específico.

El presente estudio demuestra que es posible incorporar el material asfáltico reciclado como agregado granular en la matriz de BEC en porcentajes máximos de 50% o 60% sin variar de manera drástica el contenido de cemento, su trabajabilidad e integridad, cumpliendo los parámetros de aceptación del CR – 2010. La presente investigación, demuestra que el reciclaje de este material asfáltico es totalmente factible disminuyendo el desecho o

almacenamiento del material, así como la reducción de la explotación de fuentes de material granular, lo que a la postre genera beneficios directos sobre el medio ambiente.

La técnica constructiva de las BEC utilizando material asfáltico reciclado favorece la implementación de la "*Ley Para El Uso De Materiales Reciclados En Obras De Infraestructura Vial (Ley De Pavimentos Reciclados)*" aprobada el 2020 por la Asamblea Legislativa de Costa Rica. La reutilización de estos agregados corresponde un porcentaje muy importante del volumen total de pavimento que requiere una obra de infraestructura vial, por lo que es apremiante la formulación e implementación de una normativa específica que incluya este material como parte de las buenas prácticas constructivas en carreteras.

6.2. Recomendaciones

Realizar auscultaciones de las carreteras existentes para realizar la medición de los espesores a escarificar, tanto de carpeta asfáltica como material de base con el fin de estimar y cuantificar la cantidad de material asfáltico que se podría reciclar. Este porcentaje puede utilizarse como parámetro inicial para el diseño de mezcla de la BEC.

Utilizar los criterios de absorción, densidad, contenido de asfalto, abrasión y granulometría como caracterización de los agregados asfálticos reciclados, con el fin de optimizar el diseño de mezcla de la BEC.

Se recomienda utilizar los datos y comportamientos encontrados en la presente investigación, como soporte inicial para formular especificaciones sobre el uso de materiales asfálticos reciclados en Costa Rica. Estos resultados pueden ser complementados con más ensayos de resistencias utilizando una matriz de materiales más amplia y diversa, así como la aplicación de otros ensayos que permitirían predecir de manera precisa el comportamiento de la BEC y por ende el diseño de pavimentos a utilizar.

Se recomienda complementar la investigación estudiando el comportamiento del módulo resiliente para distintos porcentajes de material asfáltico reciclado y contrastar esos resultados con los valores de resistencia a la compresión inconfiada.

Realizar un estudio de durabilidad de las pastillas de BEC que utilizan material asfáltico perfilado con el fin de identificar si existe algún efecto en la integridad y durabilidad al entrar en contacto con factores climáticos, de abrasión y de fatiga.

Aplicar un estudio costo – beneficio del uso de una matriz de agregados compuesta mayoritariamente de material asfáltico perfilado, debido a que se debe adicionar un porcentaje mayor de cemento a la mezcla, pero se reducen los costos de acarreo y extracción de material de base granular virgen.

Incluir la presente investigación como insumo para la formulación de normativas que establezcan el uso adecuado de los productos asfálticos reciclados en BEC. La técnica de reciclaje en frío desarrollada en el presente estudio, puede ser incluida dentro de las prácticas constructivas y especificaciones a desarrollar por el LanammeUCR, de acuerdo a la nueva *“Ley Para El Uso De Materiales Reciclados En Obras De Infraestructura Vial (Ley De Pavimentos Reciclados)”* publicada en el 2020 por la Asamblea Legislativa de Costa Rica, así como en futuras publicaciones de manuales o guías que incluyan estas prácticas constructivas.

Bibliografía

- Alfaro, J. P. (2015). *Análisis experimental de las variables mecánicas que definen el comportamiento de las bases estabilizadas para carreteras ante cargas de fatiga*. Proyecto de graduación para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería Civil, Escuela de Ingeniería Civil, Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica.
- Asamblea Legislativa de la República. (2020). *Ley Para El Uso De Materiales Reciclados En Obras De Infraestructura Vial (Ley De Pavimentos Reciclados)*. San José, Costa Rica.
- Fano, J., & Chávez, M. (2017). *Diseño estructural de un pavimento básico reciclado y mejorado con cemento portland para diferentes dosificaciones en el proyecto de conservación vial de Huancaavelica*. Proyecto de graduación para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería Civil, Universidad Peruana de las Ciencias Aplicadas, Lima, Perú.
- Flores, R. (25 de Febrero de 2016). *Reciclado de pavimentos flexibles IN SITU con cemento en Bolivia*. La Paz, Bolivia. Extraído el 14 de agosto, 2020 del sitio web: <https://www.slideshare.net/roflorla/reciclado-de-pavimentos-flexibles-en-bolivia>.
Obtenido de <https://www.slideshare.net/roflorla/reciclado-de-pavimentos-flexibles-en-bolivia>
- Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales (LanammeUCR). (2005). *Desarrollo de leyes de fatiga para bases estabilizadas con cemento*. Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica.
- Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales (LanammeUCR). (2011). *Bases estabilizadas con cemento. Algunos comentarios sobre sus ventajas e inconvenientes*. Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica.
- Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales (LanammeUCR). (2011). *Evaluación de la calidad del material de subbase y agregado para base estabilizada y de seguridad vial del proyecto de mejoramiento de la Ruta Nacional N°21*. Universidad de Costa Rica, San José Costa Rica.
- Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales (LanammeUCR). (2012). *Evaluación de la calidad del material de base estabilizada y resistencia a la*

compresión del proyecto de mejoramiento de la Ruta Nacional N°3. Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica.

Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales (LanammeUCR). (2012). *Experiencia costarricense en diseño, aseguramiento de la calidad y construcción de bases estabilizadas con cemento.* Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica.

Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales (LanammeUCR). (2014). *Reciclaje de pavimentos.* Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica.

Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales (LanammeUCR). (2017). *El cemento y el concreto en la infraestructura vial.* Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica.

Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales (LanammeUCR). (2017). *Evaluación de la calidad de los materiales. Proyecto: Ruta Nacional N°35 Sección: "Sifón - La Abundancia".* Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica.

Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales (LanammeUCR). (2018). *Calibración de especificaciones para bases estabilizadas con cemento en Costa Rica.* Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica.

Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales (LanammeUCR). (2019). *Guía para inspectores para la construcción de bases estabilizadas con cemento.* Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica.

Méndez, A. (2015). *Evaluación técnica y económica del uso de pavimento asfáltico reciclado (RAP) en vías colombianas.* Proyecto de graduación para optar por el grado de maestría en Ingeniería de Pavimentos, Universidad Militar Nueva Granada, Bogotá, Colombia.

Mendoza, C. (2015). *Método Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) como una alternativa de rehabilitación de carreteras en Guatemala, proceso de construcción y normas de regularización.* Proyecto de graduación para optar por el grado de Maestría en Ingeniería Vial, Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala, San Carlos, Guatemala.

Ministerio de Obras Públicas y Transportes (MOPT). (2010). *Manual de Especificaciones Generales para la Construcción de Carreteras, Caminos y Puentes (CR – 2010)*. San José, Costa Rica.

Restrepo, H., & Stephens, S. (2015). *Reciclaje de pavimentos, estudio de las ventajas económicas del reciclaje en frío IN SITU de pavimentos alfélticos*. Proyecto de graduación para optar por el grado de Maestría en Vías y Transporte, Universidad de Medellín, Medellín, Colombia.

USDOT, FHWA. (2001). *Basic Asphalt Recycling Manual*. Departamento de Transportes de los Estados Unidos, Administración Federal de Carreteras, Asociación de Reciclaje y Reclamo de Asfaltos de los Estados Unidos ARRA.

Apéndices

Apéndice A: Resultados granulométricos de las muestras utilizadas

Cuadro A-1: Resultado granulométrico de la Muestra de material asfáltico perfilado "M1" (RN N°02, Pérez Zeledón)

Masa inicial (g)	Número de malla	Masa retenida (g)	Porcentaje retenido (%)	Porcentaje retenido acumulado (%)	Porcentaje Pasando M1 (RN N°02-Pérez Zeledón)
15 515,00	2" (50mm)	0,00	0%	0%	100%
	1" (25,4mm)	0,00	0%	0%	100%
	3/4" (19mm)	515,50	3%	3%	97%
	1/2" (12,5mm)	1 661,40	11%	14%	86%
	3/8" (9,5mm)	1 697,90	11%	25%	75%
	4 (4,75mm)	5 113,60	33%	58%	42%
	8 (2,36mm)	3 011,70	19%	77%	23%
	16 (1,18mm)	1 752,90	11%	89%	11%
	30 (0,6mm)	833,60	5%	94%	6%
	50 (0,3mm)	400,00	3%	97%	3%
	100 (0,15mm)	247,90	2%	98%	2%
	200 (0,075mm)	147,20	1%	99%	1%
	charola	127,20	1%	100%	0%
Masa final (g)		15 508,90			
Porcentaje de error (%)		0,04%			

Cuadro A-2: Resultado granulométrico de la Muestra de material asfáltico perfilado "M2" (RN N°117, Santo Domingo de Heredia)

Masa inicial (g)	Número de malla	Masa retenida (g)	Porcentaje retenido (%)	Porcentaje retenido acumulado (%)	Porcentaje Pasando M2 (RN N°117-Santo Domingo de Heredia)
8 920,40	2" (50mm)	0,00	0%	0%	100%
	1" (25,4mm)	0,00	0%	0%	100%
	3/4" (19mm)	443,70	5%	5%	95%
	1/2" (12,5mm)	1 380,80	15%	20%	80%
	3/8" (9,5mm)	1 027,90	12%	32%	68%
	4 (4,75mm)	2 260,60	25%	57%	43%
	8 (2,36mm)	1 550,30	17%	75%	25%
	16 (1,18mm)	1 037,00	12%	86%	14%
	30 (0,6mm)	574,50	6%	93%	7%
	50 (0,3mm)	309,40	3%	96%	4%
	100 (0,15mm)	203,90	2%	99%	1%
	200 (0,075mm)	93,00	1%	100%	0%
	charola	40,00	0%	100%	0%
Masa final (g)		8 921,10			
Porcentaje de error (%)		0,01%			

Cuadro A-3: Resultado granulométrico de la Muestra de material asfáltico perfilado "M3"
(Plantel del MOPT, Santo Domingo de Heredia)

Masa inicial (g)	Número de malla	Masa retenida (g)	Porcentaje retenido (%)	Porcentaje retenido acumulado (%)	Porcentaje Pasando M3 (Plantel del MOPT, Santo Domingo de Heredia)
17 442,00	2" (50mm)	0,00	0,00	0,00	100%
	1" (25,4mm)	0,00	0,00	0,00	100%
	3/4" (19mm)	1 269,10	7%	7%	93%
	1/2" (12,5mm)	1 662,30	10%	17%	83%
	3/8" (9,5mm)	1 609,50	9%	26%	74%
	4 (4,75mm)	4 336,60	25%	51%	49%
	8 (2,36mm)	2 932,20	17%	68%	32%
	16 (1,18mm)	2 523,30	14%	82%	18%
	30 (0,6mm)	1 461,90	8%	91%	9%
	50 (0,3mm)	813,80	5%	95%	5%
	100 (0,15mm)	444,40	3%	98%	2%
	200 (0,075mm)	206,60	1%	99%	1%
	charola	186,20	1%	100%	0%
Masa final (g)		17 445,90			
Porcentaje de error (%)		0,02%			

Cuadro A-4: Resultado granulométrico de la Muestra de material de base granular virgen "BASE" (San Rafael de Alajuela)

Masa inicial (g)	Número de malla	Masa retenida (g)	Porcentaje retenido (%)	Porcentaje retenido acumulado (%)	Porcentaje Pasando Material de Base (Agregados Guacalillo)
8 667,10	2" (50mm)	0,00	0%	0%	100%
	1" (25,4mm)	359,80	4%	4%	96%
	3/4" (19mm)	812,20	9%	14%	86%
	1/2" (12,5mm)	1 557,40	18%	31%	69%
	3/8" (9,5mm)	904,70	10%	42%	58%
	4 (4,75mm)	1 786,50	21%	62%	38%
	8 (2,36mm)	1 237,50	14%	77%	23%
	16 (1,18mm)	871,70	10%	87%	13%
	30 (0,6mm)	429,90	5%	92%	8%
	50 (0,3mm)	222,30	3%	94%	6%
	100 (0,15mm)	154,80	2%	96%	4%
	200 (0,075mm)	118,20	1%	97%	3%
	charola	220,70	3%	100%	0%
Masa final (g)		8 675,70			
Porcentaje de error (%)		0,10%			

Apéndice B: Resultados granulométricos de las muestras de material asfáltico perfilado luego de la extracción del asfalto

Cuadro B-1: Resultado granulométrico de la Muestra de material asfáltico perfilado "M1" (RN N°02, Pérez Zeledón) luego de la extracción del asfalto

Masa inicial (g)	Número de malla	Masa retenida (g)	Porcentaje retenido (%)	Porcentaje retenido acumulado (%)	Porcentaje Pasando M1 luego del ensayo de contenido de asfalto
1 441,00	2" (50mm)	0,00	0%	0%	100%
	1" (25,4mm)	0,00	0%	0%	100%
	3/4" (19mm)	0,00	0%	0%	100%
	1/2" (12,5mm)	38,50	3%	3%	97%
	3/8" (9,5mm)	100,30	7%	10%	90%
	4 (4,75mm)	430,30	30%	40%	60%
	8 (2,36mm)	308,40	21%	61%	39%
	16 (1,18mm)	203,60	14%	75%	25%
	30 (0,6mm)	132,10	9%	85%	15%
	50 (0,3mm)	93,30	7%	91%	9%
	100 (0,15mm)	69,60	5%	96%	4%
	200 (0,075mm)	54,60	4%	100%	0%
	charola	4,50	0%	100%	0%
Masa final		1 435,20			
Porcentaje de error (%)		0,40%			

Cuadro B-2: Resultado granulométrico de la Muestra de material asfáltico perfilado "M2" (RN N°117, Santo Domingo de Heredia) luego de la extracción del asfalto

Masa inicial (g)	Número de malla	Masa retenida (g)	Porcentaje retenido (%)	Porcentaje retenido acumulado (%)	Porcentaje Pasando M2 luego del ensayo de Contenido de asfalto
1 460,10	2" (50mm)	0,00	0%	0%	100%
	1" (25,4mm)	0,00	0%	0%	100%
	3/4" (19mm)	0,00	0%	0%	100%
	1/2" (12,5mm)	27,00	2%	2%	98%
	3/8" (9,5mm)	73,50	5%	7%	93%
	4 (4,75mm)	343,70	24%	31%	69%
	8 (2,36mm)	358,70	25%	55%	45%
	16 (1,18mm)	214,20	15%	70%	30%
	30 (0,6mm)	143,60	10%	80%	20%
	50 (0,3mm)	122,20	8%	88%	12%
	100 (0,15mm)	96,20	7%	95%	5%
	200 (0,075mm)	65,40	5%	100%	0%
	charola	6,40	0%	100%	0%
Masa final		1 450,90			
Porcentaje de error (%)		0,63%			

Cuadro B-3: Resultado granulométrico de la Muestra de material asfáltico perfilado "M3"
(Plantel del MOPT, Santo Domingo de Heredia) luego de la extracción del asfalto

Masa inicial (g)	Número de malla	Masa retenida (g)	Porcentaje retenido (%)	Porcentaje retenido acumulado (%)	Porcentaje Pasando M3 luego del ensayo de Contenido de asfalto
1 480,20	2" (50mm)	0,00	0%	0%	100%
	1" (25,4mm)	0,00	0%	0%	100%
	3/4" (19mm)	0,00	0%	0%	100%
	1/2" (12,5mm)	25,00	2%	2%	98%
	3/8" (9,5mm)	68,00	5%	6%	94%
	4 (4,75mm)	355,00	24%	30%	70%
	8 (2,36mm)	371,20	25%	56%	44%
	16 (1,18mm)	252,10	17%	73%	27%
	30 (0,6mm)	140,20	10%	82%	18%
	50 (0,3mm)	121,00	8%	91%	9%
	100 (0,15mm)	80,70	5%	96%	4%
	200 (0,075mm)	50,90	3%	100%	0%
	charola	4,80	0%	100%	0%
Masa final		1 468,90			
Porcentaje de error (%)		0,77%			

Apéndice C: Correcciones granulométricas debido al sobretamaño de las muestras de material granular, según las especificaciones de la norma ASTM D558

Cuadro C-1: Resultado de la corrección granulométrica de la Muestra de material asfáltico perfilado "M1" (RN N°02, Pérez Zeledón)

Masa inicial (g)	Número de malla	Masa retenida (g)	Porcentaje retenido (%)	Porcentaje retenido acumulado (%)	Porcentaje Pasando M1 (RN N°02-Pérez Zeledón)
15 515,00	2" (50mm)	0,00	0%	0%	100%
	1" (25,4mm)	0,00	0%	0%	100%
	3/4" (19mm)	515,50	3%	3%	100%
	1/2" (12,5mm)	1 661,40	11%	14%	89%
	3/8" (9,5mm)	1 697,90	11%	25%	78%
	4 (4,75mm)	5 113,60	33%	58%	43%
	8 (2,36mm)	3 011,70	19%	77%	23%
	16 (1,18mm)	1 752,90	11%	89%	12%
	30 (0,6mm)	833,60	5%	94%	6%
	50 (0,3mm)	400,00	3%	97%	3%
	100 (0,15mm)	247,90	2%	98%	2%
	200 (0,075mm)	147,20	1%	99%	1%
	charola	127,20	1%	100%	0%
Masa final		15 508,90			
Porcentaje de error (%)		0,04%			

Cuadro C-2: Resultado de la corrección granulométrica de la Muestra de material asfáltico perfilado "M2" (RN N°117, Santo Domingo de Heredia)

Masa inicial (g)	Número de malla	Masa retenida (g)	Porcentaje retenido (%)	Porcentaje retenido acumulado (%)	Porcentaje Pasando M2 (RN N°117-Santo Domingo de Heredia)
8 920,40	2" (50mm)	0,00	0%	0%	100%
	1" (25,4mm)	0,00	0%	0%	100%
	3/4" (19mm)	443,70	5%	5%	100%
	1/2" (12,5mm)	1 380,80	15%	20%	84%
	3/8" (9,5mm)	1 027,90	12%	32%	72%
	4 (4,75mm)	2 260,60	25%	57%	45%
	8 (2,36mm)	1 550,30	17%	75%	27%
	16 (1,18mm)	1 037,00	12%	86%	14%
	30 (0,6mm)	574,50	6%	93%	8%
	50 (0,3mm)	309,40	3%	96%	4%
	100 (0,15mm)	203,90	2%	99%	2%
	200 (0,075mm)	93,00	1%	100%	0%
	charola	40,00	0%	100%	0%
Masa final		8 921,10			
Porcentaje de error (%)		0,01%			

Cuadro C-3: Resultado de la corrección granulométrica de la Muestra de material asfáltico perfilado "M3" (Plantel del MOPT, Santo Domingo de Heredia)

Masa inicial (g)	Número de malla	Masa retenida (g)	Porcentaje retenido (%)	Porcentaje retenido acumulado (%)	Porcentaje Pasando M3 (Plantel del MOPT, Sando Domingo de Heredia)
17 442,00	2" (50mm)	0,00	0%	0%	100%
	1" (25,4mm)	0,00	0%	0%	100%
	3/4" (19mm)	1 269,10	7%	7%	100%
	1/2" (12,5mm)	1 662,30	10%	17%	90%
	3/8" (9,5mm)	1 609,50	9%	26%	80%
	4 (4,75mm)	4 336,60	25%	51%	53%
	8 (2,36mm)	2 932,20	17%	68%	35%
	16 (1,18mm)	2 523,30	14%	82%	19%
	30 (0,6mm)	1 461,90	8%	91%	10%
	50 (0,3mm)	813,80	5%	95%	5%
	100 (0,15mm)	444,40	3%	98%	2%
	200 (0,075mm)	206,60	1%	99%	1%
charola	186,20	1%	100%	0%	
Masa final		17 445,90			
Porcentaje de error (%)		0,02%			

Cuadro C-4: Resultado de la corrección granulométrica de la Muestra de material de base granular virgen "BASE" (San Rafael de Alajuela)

Masa inicial (g)	Número de malla	Masa retenida (g)	Porcentaje retenido (%)	Porcentaje retenido acumulado (%)	Porcentaje Pasando Material de Base (Agregados Guacalillo)
8 667,10	2" (50mm)	0,00	0%	0%	100%
	1" (25,4mm)	359,80	4%	4%	100%
	3/4" (19mm)	812,20	9%	14%	100%
	1/2" (12,5mm)	1 557,40	18%	31%	79%
	3/8" (9,5mm)	904,70	10%	42%	67%
	4 (4,75mm)	1 786,50	21%	62%	43%
	8 (2,36mm)	1 237,50	14%	77%	27%
	16 (1,18mm)	871,70	10%	87%	15%
	30 (0,6mm)	429,90	5%	92%	10%
	50 (0,3mm)	222,30	3%	94%	7%
	100 (0,15mm)	154,80	2%	96%	5%
	200 (0,075mm)	118,20	1%	97%	3%
charola	220,70	3%	100%	0%	
Masa final		8 675,70			
Porcentaje de error (%)		0,10%			