

Universidad de Costa Rica
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Civil

**Propuesta de una metodología para la evaluación del desempeño de
tratamientos superficiales en laboratorio**

Trabajo de Graduación

Que para obtener el grado de Licenciatura en Ingeniería Civil

Presenta:

Natalia Zúñiga García

Director de Proyecto de Graduación:

Ing. Fabián Elizondo Arrieta, MBa.

Ciudad Universitaria Rodrigo Facio

Hoja de aprobación

Natalia Zúñiga García

Ing. Fabián Elizondo Arrieta, MBa.
Director

Ing. Mónica Jiménez Acuña
Asesora

Ing. Andrea Ulloa Calderón
Asesora

Derechos de propiedad intelectual

Fecha: 2012, octubre, 30

La suscrita, Natalia Zúñiga García, cédula de identidad 4-0201-0445, estudiante de la carrera de Licenciatura en Ingeniería Civil de la Universidad de Costa Rica, con número de carné **A77237**, manifiesta que es autora del Proyecto Final de Graduación **Propuesta de una metodología para la evaluación del desempeño de tratamientos superficiales en laboratorio**, bajo la dirección del **Máster Fabián Elizondo Arrieta**, quien en consecuencia tienen 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 en 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 Dios.

A mis padres

y a mi hermano.

Agradecimientos

A mis padres, Wagner Zúñiga y Marielos García por brindarme las herramientas necesarias para salir adelante y poder avanzar en el presente proyecto y en la vida.

A mi hermano, Wagner Zúñiga y a mi familia, porque siempre que necesité ayuda me la brindaron. A Andrea Collado, por el apoyo y toda la ayuda que me brindó desde que entré a la carrera y durante este trabajo.

A Fabián Elizondo, porque desde el inicio del proyecto estuvo presente para brindar el apoyo y la ayuda necesaria, y por el tiempo y dedicación que le aportó al proyecto.

A Andrea Ulloa, por la ayuda brindada durante todo el proceso y por su guía, aporte y revisión. A Mónica Jiménez, por su colaboración, guía y revisión del proyecto.

A Jorge Salazar, por el aporte de sus conocimientos en emulsiones asfálticas. A Cindy Zúñiga, por su ayuda con los ensayos de caracterización de las emulsiones. A Ernesto Villegas, Ellen Rodríguez y Vivian Bonilla, por su colaboración en el proyecto.

A Juan Carlos Munera, por su interés y aporte al trabajo. A Walter Ramírez y Ronald Sancho, quienes colaboraron en el trabajo de laboratorio. Y al personal del LanammeUCR, por su amabilidad, acogimiento y porque siempre me brindaron la ayuda y el apoyo que necesité.

A Eduardo Pérez, por la comprensión, apoyo y guía que me brindó, y por el aporte de sus conocimientos. Al personal de ProDUS-UCR, por la ayuda brindada a lo largo de la carrera.

A mis amigos, y compañeros, con quienes compartí momentos inolvidables, porque siempre estuvieron en los momentos más difíciles de la carrera para brindar apoyo y ayuda.

Tabla de contenidos

Hoja de aprobación	i
Derechos de propiedad intelectual	iii
Dedicatoria	v
Agradecimientos	vii
Tabla de contenidos	ix
Tabla de figuras	xv
Tabla de cuadros	xxi
Índice de abreviaturas	xxiii
Resumen	xxvii
Capítulo 1. Introducción	1
1.1 Justificación.....	1
1.1.1 El problema específico	1
1.1.2 Importancia	2
1.1.3 Antecedentes teóricos y prácticos	3
1.2 Objetivos.....	4
1.2.1 Objetivo general.....	4
1.2.2 Objetivos específicos.....	4
1.3 Delimitación del problema.....	5
1.3.1 Alcance.....	5
1.3.2 Limitaciones.....	5
1.4 Metodología.....	6

1.4.1	Etapa 1.....	6
1.4.2	Etapa 2.....	6
1.4.3	Etapa 3.....	8
1.4.4	Etapa 4.....	10
1.4.5	Etapa 5.....	10
Capítulo 2.	Marco teórico	11
2.1	Tipos de tratamientos superficiales	11
2.1.1	Tratamiento superficial simple	11
2.1.2	Tratamiento superficial múltiple	12
2.1.3	Tratamiento superficial simple engravillado.....	13
2.1.4	Tratamiento superficial simple inverso engravillado	13
2.1.5	Tratamiento superficial inverso	13
2.1.6	Tratamiento superficial con refuerzo de geotextil	14
2.2	Materiales utilizados en tratamientos superficiales.....	14
2.2.1	Agregado.....	14
2.2.2	Emulsión asfáltica.....	16
2.3	Proceso constructivo	22
2.4	Desempeño de los tratamientos superficiales.....	24
2.4.1	Medición del desempeño	25
2.5	Diseño de un tratamiento superficial.....	30
2.5.1	Diseño de tratamientos superficiales múltiples	33
2.6	Especificaciones nacionales.....	34

2.6.1	Agregado.....	34
2.6.2	Emulsión asfáltica.....	35
2.6.3	Dosificaciones	38
Capítulo 3.	Materiales y metodologías de diseño	43
3.1	Caracterización de los materiales.....	43
3.1.1	Características del agregado.....	43
3.1.2	Características de las emulsiones asfálticas.....	45
3.2	Metodologías de diseño	48
3.2.1	Método de Hanson	49
3.2.2	Método de McLeod	51
3.2.3	Método de Linckenhoyl (regla del décimo).....	52
3.2.4	Método Kearby modificado (Texas DOT).....	53
3.2.5	Metodología ASTM.....	56
3.2.6	Resultados obtenidos.....	57
Capítulo 4.	Métodos de ensayo.....	71
4.1	Preparación de las muestras	71
4.2	Ensayo de medición de pérdida	75
4.3	Ensayo de medición del exceso de asfalto	79
Capítulo 5.	Evaluación del desempeño	85
5.1	Resultado obtenidos de los ensayos utilizando emulsión convencional	87
5.1.1	Ensayo de pérdida	87
5.1.2	Ensayo de exceso de asfalto.....	91

5.1.3	Comparación entre resultados de pérdida y exceso de asfalto	97
5.2	Comparación con el CR-2010	98
5.3	Comparación con las metodologías de diseño	101
5.4	Resultados obtenidos de los ensayos utilizando emulsión modificada	105
5.4.1	Ensayo de pérdida	105
5.4.2	Ensayo de exceso de asfalto.....	108
Capítulo 6.	Conclusiones y recomendaciones	113
6.1	Conclusiones	113
6.1.1	Caracterización de materiales	113
6.1.2	Metodologías teóricas de diseño	113
6.1.3	Métodos de ensayo.....	114
6.1.4	Evaluación del desempeño en laboratorio	115
6.1.5	Desempeño de muestras con emulsión modificada con polímero	116
6.2	Recomendaciones	116
Referencias Bibliográficas.....		119
Apéndices.....		a
Apéndice 1. Ejemplo de cálculo de las metodologías de diseño		c
Apéndice 2. Generalidades del análisis de imágenes digitales.....		k
Apéndice 3. Imágenes analizadas.....		o
Anexos.....		A
Anexo 1. Ensayos de caracterización del agregado.....		C
Anexo 2. Ficha técnica del emulsificante utilizado en las emulsiones.....		G

Anexo 3. Ficha técnica del polímero utilizado en la emulsión modificada	K
Anexo 4. Ensayos de caracterización de las emulsiones	Q
Anexo 5. Prueba del tablero.....	U

Tabla de figuras

Figura 1-1. Esquema metodológico utilizado en el desarrollo del proyecto	7
Figura 2-1. Tratamiento superficial simple (TS-1)	12
Figura 2-2. Tratamiento superficial doble (TS-2).....	12
Figura 2-3. Tratamiento superficial triple (TS-3)	12
Figura 2-4. Tratamiento superficial simple engravillado.....	13
Figura 2-5. Tratamiento superficial simple inverso engravillado.....	13
Figura 2-6. Tratamiento superficial inverso	14
Figura 2-7. Tratamiento superficial reforzado con geotextil	14
Figura 2-8. Ensayo de viscosidad Saybolt Furol.....	18
Figura 2-9. Ensayo de estabilidad de almacenamiento.....	18
Figura 2-10. Tamiz N°20	19
Figura 2-11. Ensayo de tipo de carga	20
Figura 2-12. Ensayo de destilación.....	20
Figura 2-13. Equipo para el ensayo de penetración y muestras ensayadas	21
Figura 2-14. Ductilómetro y briquetas	22
Figura 2-15. Camión distribuidor de emulsión asfáltica	23
Figura 2-16. Equipo distribuidor de agregado tipo compuerta, mecánico y tracción propia, respectivamente	24
Figura 2-17. Zona de buen desempeño del tratamiento superficial.....	25
Figura 2-18. Ensayo Vialit	26
Figura 2-19. Ensayo de Barrido ASTM D7000.....	26
Figura 2-20. Ensayo de Abrasión y Cohesión ESSO	27
Figura 2-21. Procedimiento del Ensayo del Círculo de Arena Modificado.....	28

Figura 2-22. Procesamiento de imágenes para determinar el área exudada en muestras de tratamiento superficial.....	29
Figura 2-23. Ensayo de la Pista Húmeda	30
Figura 2-24. Ensayo de la Rueda Cargada	30
Figura 2-25. Proceso de acomodo del agregado en un tratamiento superficial según Hanson	32
Figura 3-1. Granulometrías utilizadas	44
Figura 3-2. Proceso de fabricación de las emulsiones utilizadas	47
Figura 3-3. Relación entre el porcentaje de recubrimiento y el espesor promedio de capa de agregado	55
Figura 3-4. Cantidad de agregado obtenida del diseño para el TS designación 3A	59
Figura 3-5. Cantidad de agregado obtenida del diseño para el TS designación 3B	59
Figura 3-6. Cantidad de asfalto final obtenida del diseño para el TS designación 3ª	61
Figura 3-7. Cantidad de asfalto final obtenida del diseño para el TS designación 3B	62
Figura 3-8. Cantidad de emulsión final obtenida del diseño para el TS designación 3A	63
Figura 3-9. Cantidad de emulsión final obtenida del diseño para el TS designación 3B.....	63
Figura 3-10. Comparación entre la cantidad de agregado obtenida del diseño y la recomendada por el CR-2010, designación 3A.....	65
Figura 3-11. Comparación entre la cantidad total de agregado obtenida del diseño y la recomendada por el CR-2010, designación 3A	66
Figura 3-12. Comparación entre la cantidad de agregado obtenida del diseño y la recomendada por el CR-2010, designación 3B.....	67
Figura 3-13. Comparación entre la cantidad total de agregado obtenida del diseño y la recomendada por el CR-2010, designación 3B.....	67
Figura 3-14. Comparación entre la cantidad de asfalto obtenida del diseño y la recomendada por el CR-2010, designación 3A.....	68
Figura 3-15. Comparación entre la cantidad total de asfalto obtenida del diseño y la recomendada por el CR-2010, designación 3A.....	69

Figura 3-16. Comparación entre la cantidad de asfalto obtenida del diseño y la recomendada por el CR-2010, designación 3B.....	69
Figura 3-17. Comparación entre la cantidad total de asfalto obtenida del diseño y la recomendada por el CR-2010, designación 3B.....	70
Figura 4-1. Moldes para el ensayo de exceso de asfalto	71
Figura 4-2. Dimensiones de los moldes para el ensayo de exceso de asfalto	72
Figura 4-3. Moldes para el ensayo de pérdida.....	72
Figura 4-4. Dimensiones de los moldes para el ensayo de pérdida.....	73
Figura 4-5. Proceso de fabricación de las muestras.....	76
Figura 4-6. Procedimiento del ensayo de pérdida	78
Figura 4-7. Determinación del área efectiva en el ensayo de pérdida	79
Figura 4-8. Medición de la deformación en la muestra de exceso de asfalto	80
Figura 4-9. Procedimiento del ensayo de exceso de asfalto.....	81
Figura 4-10. Procedimiento utilizado en el análisis de imágenes digitales.....	84
Figura 5-1. Pérdida de material contra cantidad total de asfalto, emulsión convencional	88
Figura 5-2. Pérdida de material contra cantidad total de asfalto, identificación de pendientes	89
Figura 5-3. Pérdida de material acumulada durante el ensayo para las distintas dosificaciones de asfalto, en peso húmedo (TS 3A, CRS-1)	90
Figura 5-4. Pérdida de material acumulada durante el ensayo para las distintas dosificaciones de asfalto, en peso húmedo (TS 3B, CRS-1)	90
Figura 5-5. Cantidad de arena adherida por unidad de área contra cantidad total de asfalto, CRS-1 ..	92
Figura 5-6. Comparación entre muestras del ensayo de exceso de asfalto, designación 3A	93
Figura 5-7. Muestra analizada mediante procesamiento de imágenes digitales	94
Figura 5-8. Asfalto expuesto contra cantidad total de asfalto, emulsión convencional (designación 3A)	95

Figura 5-9. Asfalto expuesto contra cantidad total de asfalto, emulsión convencional (designación 3B)	95
Figura 5-10. Deformación promedio, emulsión convencional (designación 3A)	96
Figura 5-11. Deformación promedio, emulsión convencional (designación 3B)	96
Figura 5-12. Pérdida y asfalto expuesto contra cantidad total de asfalto, emulsión convencional (designación 3A).....	97
Figura 5-13. Pérdida y asfalto expuesto contra cantidad total de asfalto, emulsión convencional (designación 3B).....	98
Figura 5-14. Cantidad de agregado utilizado en las muestras y recomendada por CR-2010 (TS 3A)....	99
Figura 5-15. Cantidad de agregado utilizado en las muestras y recomendada por CR-2010 (TS 3B)....	99
Figura 5-16. Comparación de la pérdida y el asfalto expuesto con el CR-2010, emulsión convencional (designación 3A).....	100
Figura 5-17. Comparación de la pérdida y el asfalto expuesto con el CR-2010, emulsión convencional (designación 3B).....	101
Figura 5-18. Comparación de la cantidad de agregado por capas de las muestras de laboratorio con los resultados de las metodologías de diseño (designación 3A).....	102
Figura 5-19. Comparación de la cantidad de agregado por capas de las muestras de laboratorio con los resultados de las metodologías de diseño (designación 3B).....	102
Figura 5-20. Comparación de la cantidad de agregado total de las muestras de laboratorio con los resultados de las metodologías de diseño (designación 3A)	103
Figura 5-21. Comparación de la cantidad de agregado total de las muestras de laboratorio con los resultados de las metodologías de diseño (designación 3B)	103
Figura 5-22. Comparación de la pérdida y el asfalto expuesto con los resultados de las metodologías de diseño (designación 3A)	104
Figura 5-23. Comparación de la pérdida y el asfalto expuesto con los resultados de las metodologías de diseño (designación 3B)	105
Figura 5-24. Pérdida de material contra cantidad total de asfalto, emulsión convencional y modificada	106

Figura 5-25. Pérdida acumulada durante el ensayo, en peso húmedo (TS 3A, CRS-1 y CRS-P).....	107
Figura 5-26. Pérdida acumulada durante el ensayo, en peso húmedo (TS 3B, CRS-1 y CRS-P).....	107
Figura 5-27. Cantidad de arena adherida por unidad de área contra cantidad total de asfalto, emulsión convencional y modificada.....	109
Figura 5-28. Asfalto expuesto contra cantidad total de asfalto, emulsión convencional y modificada (designación 3A).....	109
Figura 5-29. Asfalto expuesto contra cantidad total de asfalto, emulsión convencional y modificada (designación 3B).....	110
Figura 5-30. Deformación promedio, emulsión convencional y modificada (designación 3A)	110
Figura 5-31. Deformación promedio, emulsión convencional y modificada (designación 3B).....	111

Tabla de cuadros

Cuadro 2-1. Parámetros de diseño para cada metodología	31
Cuadro 2-2. Rangos requeridos para la granulometría de los agregados en tratamientos superficiales de simple y múltiple capa.....	34
Cuadro 2-3. Características requeridas del agregado utilizado en tratamientos superficiales	35
Cuadro 2-4. Especificaciones de caras fracturadas.....	35
Cuadro 2-5. Especificaciones de aceptación para emulsiones asfálticas aniónicas.....	36
Cuadro 2-6. Especificaciones de aceptación para emulsiones asfálticas catiónicas.....	37
Cuadro 2-7. Cantidades aproximadas de material para tratamientos superficiales simples	38
<i>Cuadro 2-8. Tasa de aplicación para asfalto rebajado</i>	<i>38</i>
Cuadro 2-9. Cantidades aproximadas de material para tratamientos superficiales dobles.....	39
Cuadro 2-10. Cantidades aproximadas de material para tratamientos superficiales triples	39
Cuadro 2-11. Cantidades aproximadas de material para tratamientos superficiales múltiples usando cemento asfáltico o asfalto rebajado.....	40
Cuadro 2-12. Cantidades aproximadas de material para tratamientos superficiales múltiples usando emulsión asfáltica.....	41
Cuadro 3-1. Granulometría del agregado utilizado	43
Cuadro 3-2. Características del agregado utilizado.....	45
Cuadro 3-3. Formulación, emulsión CRS-1.....	46
Cuadro 3-4. Formulación, emulsión CRS-P.....	46
Cuadro 3-5. Características de las emulsiones utilizadas.....	48
Cuadro 3-6. Parámetros de diseño utilizados	49
Cuadro 3-7. Factor de desperdicio	50
Cuadro 3-8. Factor de tráfico	51
Cuadro 3-9. Factor de corrección por textura.....	51

Cuadro 3-10. Resultados de la prueba del tablero.....	53
Cuadro 3-11. Cantidades de materiales para tratamientos superficiales bituminosos.....	56
Cuadro 3-12. Tabla de conversiones aproximadas de peso unitario suelto a kilogramos por metro cuadrado	57
Cuadro 3-13. Determinación de parámetros utilizados.....	57
Cuadro 3-14. Cantidades agregado.....	58
Cuadro 3-15. Cantidades de asfalto	61
Cuadro 3-16. Cantidades de emulsión asfáltica.....	62
Cuadro 5-1. Muestras realizada para cada ensayo, designación 3A.....	85
Cuadro 5-2. Muestras realizada para cada ensayo, designación 3B.....	85
Cuadro 5-3. Cantidad de agregado utilizado en las muestras de laboratorio	86
Cuadro 5-4. Cantidad de asfalto utilizado en las muestras de laboratorio.....	87
Cuadro 5-5. Resultados y características de las muestras utilizadas en el ensayo pérdida, CRS-1	88
Cuadro 5-6. Resultados y características de las muestras del ensayo de exceso de asfalto, CRS-1	91
Cuadro 5-7. Resultados y características de las muestras del ensayo pérdida, emulsión modificada	105
Cuadro 5-8. Resultados y características de las muestras utilizadas en el ensayo de exceso de asfalto, emulsión modificada.....	108

Índice de abreviaturas

A –Factor de corrección por absorción de asfalto en el agregado.

$A_{\text{asfalto expuesto}}$ –Área cubierta por la huella de la rueda que presenta asfalto expuesto (ensayo de exceso de asfalto).

$A_{\text{asfalto expuesto crítico}}$ –Área cubierta por la huella de la rueda que presenta asfalto expuesto en condición crítica (ensayo de exceso de asfalto).

$A_{\text{asfalto expuesto no crítico}}$ –Área cubierta por la huella de la rueda que presenta asfalto expuesto en condición no crítica (ensayo de exceso de asfalto).

Ad –Gramos de arena Ottawa adheridos a la muestra de tratamiento superficial en el ensayo de exceso de asfalto.

Ada –Arena Ottawa adherida por unidad de área (ensayo de exceso de asfalto).

A_e –Área efectiva en la que el hule tiene contacto sobre la muestra (ensayo de pérdida).

A_{estudio} –Área cubierta por la huella de la rueda en el ensayo de exceso de asfalto.

A_{muestra} –Área total de la muestra de tratamiento superficial en el ensayo de exceso de asfalto.

$A_{\text{sin asfalto expuesto}}$ –Área cubierta por la huella de la rueda que no presenta asfalto expuesto (ensayo de exceso de asfalto).

ASTM –*American Society for Testing and Materials*.

CR-2010– Manual de especificaciones para la construcción de carreteras, caminos y puentes 2010.

C –Factor de corrección por condición climática.

CRS – *Cationic rapid setting* (catiónica de rompimiento rápido).

CRS-P – *Cationic rapid setting modified with polymer* (catiónica de rompimiento rápido modificada con polímero).

d –Espesor promedio de capa de agregado.

d – Tamaño mínimo del agregado.

D – Tamaño máximo del agregado.

Def –Deformación promedio del espécimen de tratamientos superficial en el ensayo de exceso de asfalto.

d_{f1} –Profundidad final desde la parte superior del molde hasta el tratamiento superficial en el punto 1 (ensayo de exceso de asfalto).

d_{f2} –Profundidad final desde la parte superior del molde hasta el tratamiento superficial en el punto 2 (ensayo de exceso de asfalto).

d_{f3} –Profundidad final desde la parte superior del molde hasta el tratamiento superficial en el punto 3 (ensayo de exceso de asfalto).

d_{f4} –Profundidad final desde la parte superior del molde hasta el tratamiento superficial en el punto 4 (ensayo de exceso de asfalto).

d_{f5} –Profundidad final desde la parte superior del molde hasta el tratamiento superficial en el punto 5 (ensayo de exceso de asfalto).

d_{i1} –Profundidad inicial desde la parte superior del molde hasta el tratamiento superficial en el punto 1 (ensayo de exceso de asfalto).

d_{i2} –Profundidad inicial desde la parte superior del molde hasta el tratamiento superficial en el punto 2 (ensayo de exceso de asfalto).

d_{i3} –Profundidad inicial desde la parte superior del molde hasta el tratamiento superficial en el punto 3 (ensayo de exceso de asfalto).

d_{i4} –Profundidad inicial desde la parte superior del molde hasta el tratamiento superficial en el punto 4 (ensayo de exceso de asfalto).

d_{i5} –Profundidad inicial desde la parte superior del molde hasta el tratamiento superficial en el punto 5 (ensayo de exceso de asfalto).

e –Porcentaje de recubrimiento del agregado.

E –Altura de agregado recubierto por ligante.

E –Factor de corrección por desperdicio.

FI –Índice Flakiness o índice de lajas.

G o G_{bs} –Gravedad específica bruta seca.

H –Dimensión mínima promedio del agregado.

ISSA –*International Slurry Surfacing Association.*

k –Cantidad de agregado obtenida de la prueba del tablero.

K –Factor de corrección por estación climática.

L –Dosis de aplicación de asfalto.

P – Factor de corrección por textura superficial.

Pa –Pérdida de material por unidad de área (ensayo de pérdida).

PA_{asfalto expuesto} –Porcentaje del área de estudio cubierta por asfalto expuesto (ensayo de exceso de asfalto).

PA_{asfalto expuesto crítico} –Porcentaje del área de estudio cubierta por asfalto expuesto en condición crítica (ensayo de exceso de asfalto).

Pe – Gramos de material perdidos en diez minutos de ensayo, en peso seco (ensayo de pérdida).

P –Peso inicial de la muestra de tratamiento superficial en el ensayo de exceso de asfalto.

P_{is} – Peso inicial seco de la muestra de tratamiento superficial del ensayo de pérdida.

P_{ih} – Peso inicial húmedo de la muestra de tratamiento superficial del ensayo de pérdida.

P_f –Peso final de la muestra de tratamiento superficial en el ensayo de exceso de asfalto.

P_{fs} – Peso final seco de la muestra de tratamiento superficial del ensayo de pérdida.

P_{Pe} – Porcentaje de material perdido en diez minutos de ensayo, en peso seco (ensayo de pérdida).

P_{Pe_{2h}} – Porcentaje de material perdido en dos minutos de ensayo, en peso húmedo (ensayo de pérdida).

P_{Pe_{5h}} – Porcentaje de material perdido en cinco minutos de ensayo, en peso húmedo (ensayo de pérdida).

P_{Pe_{8h}} – Porcentaje de material perdido en ocho minutos de ensayo, en peso húmedo (ensayo de pérdida).

P_{Pe_{10h}} – Porcentaje de material perdido en diez minutos de ensayo, en peso húmedo (ensayo de pérdida).

P_s –Peso seco de la muestra de tratamiento superficial después de 1000 ciclos de ensayo (ensayo de exceso de asfalto).

P_{2h} – Peso húmedo de la muestra de tratamiento superficial del ensayo de pérdida después de dos minutos de ensayo.

P_{5h} – Peso húmedo de la muestra de tratamiento superficial del ensayo de pérdida después de dos minutos de ensayo.

P_{8h} – Peso húmedo de la muestra de tratamiento superficial del ensayo de pérdida después de dos minutos de ensayo.

P_{10h} – Peso húmedo de la muestra de tratamiento superficial del ensayo de pérdida después de dos minutos de ensayo.

Q – Dosis de agregado.

RECOPE – Refinadora Costarricense de Petróleo.

S – Dosis de agregado en términos volumétricos.

SBR – *Styrene-butadieneruber* (caucho estireno-butadieno).

SFS – *SayboltFurol seconds* (segundosSayboltFurol).

T – Factor de tráfico.

T_m – Tamaño medio del agregado.

TS – Tratamiento superficial.

TS-1– Tratamiento superficial simple.

TS-2 – Tratamientos superficial doble.

TS-3– Tratamientos superficial triple.

V – Vacíos en el agregado condición suelta.

W – Peso unitario suelto del agregado.

Δ – Tamaño promedio del agregado.

Zúñiga García, Natalia.
Propuesta de una metodología para la evaluación del desempeño de tratamientos superficiales en laboratorio
Proyecto de graduación – Ingeniería Civil – San José, C.R.:
N. Zúñiga G., 2012
xxvii, 121, [40]h; ils. col.– 29 refs.

Resumen

El objetivo principal de esta investigación es proponer una metodología para evaluar el desempeño de tratamientos superficiales en laboratorio. Esta metodología es desarrollada mediante la adaptación de ensayos utilizados en sellos de lechada asfáltica, en los que se mide la pérdida de agregado y la exudación, que corresponden a los modos de fallas más comunes.

Se adaptó el ensayo de pista húmeda (ISSA TB 100) para evaluar la pérdida de agregado, y mediante el ensayo de rueda cargada (ISSA TB 109) se midió el exceso de asfalto y se cuantificó la exudación. Adicionalmente, se midió la deformación de las muestras del ensayo de exceso de asfalto, y se realizó un análisis fotográfico mediante el programa ArcGIS para determinar el porcentaje de área de la muestra que presenta exudación.

Mediante el ensayo de pérdida fue posible discriminar entre especímenes con distinta cantidad de emulsión asfáltica. Por otro lado, con la medición de la deformación en las muestras del ensayo de exceso de asfalto, no se obtuvo ninguna relación entre deformación y cantidad de asfalto. A través de la medición de la adhesión de arena se observó una disminución de la arena adherida al aumentar la cantidad de asfalto, contrario a los resultados esperados. Con el análisis fotográfico se pudo determinar la cantidad de asfalto a partir de la cual se empieza a dar exudación, en las muestras de tratamiento superficial realizadas en el laboratorio.

Adicionalmente, se compararon los resultados obtenidos de desempeño con las cantidades de material obtenidas de cinco metodologías teóricas de diseño y con las cantidades indicadas en el Manual de especificaciones para la construcción de carreteras, caminos y puentes (CR-2010).

TRATAMIENTO SUPERFICIAL; EMULSIÓN ASFÁLTICA; PAVIMENTOS; DESEMPEÑO.

Ing. Fabián Elizondo Arrieta, MBa.

Escuela de Ingeniería Civil

Capítulo 1. Introducción

1.1 Justificación

1.1.1 El problema específico

Los tratamientos superficiales constituyen una técnica económica y eficiente para el mantenimiento de pavimentos y sirven como superficie de ruedo en rutas de bajo volumen de tránsito. En Costa Rica por lo general son colocados sin un diseño previo, se emplean métodos empíricos para la selección de materiales y cantidades, además no existe un control de calidad estricto. Esto ha generado una serie de deficiencias en cuanto al desempeño, tales como exudación y pérdida de agregado, que limitan la vida útil del tratamiento.

La pérdida o desprendimiento de material en tratamientos superficiales se presenta cuando se dosifica una cantidad baja de ligante asfáltico. Si por el contrario se tiene exceso de ligante, el tratamiento es más susceptible a presentar exudación, que se define como la presencia de asfalto en la superficie y ocasiona una disminución en la fricción.

En el país se utilizan emulsiones asfálticas como ligante en la construcción de tratamientos superficiales, las cuales no poseen ningún tipo de aditivo. Al modificar la emulsión se obtiene una variación en el desempeño pero implica un aumento en el costo del tratamiento superficial.

Las especificaciones vigentes establecidas en el Manual de especificaciones para la construcción de carreteras, caminos y puentes (CR-2010), presentan rangos de dosificaciones recomendados, sin embargo, estos fueron establecidos en países donde las condiciones climáticas y las propiedades de los materiales son distintas a las presentadas en Costa Rica.

A través de esta investigación, se realiza un estudio en el que se ejecutan comparaciones entre las dosificaciones de materiales sugeridas por el CR-2010, respecto a las que se obtienen mediante métodos de diseño determinísticos basados en las características de los materiales. Se evalúa, además, la variación en el desempeño de muestras de tratamiento superficial a escala de laboratorio.

Para evaluar la variación en el desempeño de las distintas muestras, se propone la implementación de ensayos con los que se pueda discriminar entre distintos tratamientos superficiales midiendo el desempeño. Se cuantifica, además, la mejora en el desempeño de tratamientos superficiales al utilizar una emulsión modificada con polímero, mediante la comparación con los resultados obtenidos utilizando emulsión sin aditivos.

1.1.2 Importancia

Es necesario que las técnicas de preservación de pavimentos empleadas sean efectivas, para lograr mejorar las condiciones de ruedo actuales. Por medio del diseño y la construcción de tratamientos superficiales apropiados, se obtienen pavimentos con una mayor vida útil, que requieren de menos inversión para brindar un desempeño adecuado. De esta manera es posible disminuir los gastos y mejorar las condiciones de servicio.

Ante la problemática relacionada con una deficiente capacidad funcional, durabilidad y problemas prematuros de algunos tratamientos superficiales, surge la necesidad de implementar una metodología de diseño mediante la cual sea posible evaluar la efectividad del tratamiento en futuras condiciones de servicio y donde se puedan evaluar los materiales propios del proyecto.

Mediante la verificación experimental de la variación del desempeño en muestras de tratamiento superficial, se puede obtener un indicio del comportamiento que se presentará en el campo. Se logra cuantificar el efecto de la variación de las dosificaciones y puede ayudar a alargar la vida útil del tratamiento, mejorando la efectividad del mismo, e incluso bajar costos en cuanto a desperdicio de materiales.

Al poder comparar la variación en el desempeño de un tratamiento superficial que utiliza aditivos en el ligante, es posible evaluar la mejora y considerar si el costo adicional del aditivo es compensado con dicha mejora. Por lo tanto podría valorarse la incorporación de ligante modificado, como por ejemplo emulsión asfáltica modificada con polímero, al mercado nacional.

Observar el comportamiento de los tratamientos superficiales considerando las condiciones y los materiales propios del país, puede ayudar a valorar la eficacia de las especificaciones nacionales, que provienen de países donde los materiales poseen características distintas y que además tienen diferentes condiciones de servicio. Por lo que podría ser un primer paso

para la mejora de las disposiciones respecto a esta técnica de preservación, que se encuentran vigentes actualmente en Costa Rica.

1.1.3 Antecedentes teóricos y prácticos

Sittenfeld (1979) investigó sobre los usos y abusos de los tratamientos superficiales en Costa Rica. En la investigación se realizó una comparación de los diseños obtenidos por el Método Australiano y el Método del Instituto de Asfalto (McLeod) con los Manuales de Especificaciones Generales para la Construcción de caminos, carreteras y puentes de los años de 1972 y 1977 (CR-72 y CR-77). Además, se compararon los resultados obtenidos para muestras de tratamientos superficiales tomadas de proyectos construidos en distintas zonas del país.

Como resultado de la investigación realizada por Sittenfeld, se obtuvo que el método de McLeod y las especificaciones CR-77 recomendaban dosificaciones altas de agregado, en comparación con las cantidades aplicadas en los proyectos realizados en el país que fueron parte del estudio, esto puede deberse al menor peso específico de los agregados nacionales. Por otro lado, se obtuvo que las cantidades de asfalto especificadas tanto en el CR-72 como en el CR-77 son mayores que las obtenidas por las metodologías de diseño Australiana y McLeod.

Perera (1987) realizó una investigación donde se estudiaron los métodos de diseño de tratamientos superficiales, así como los principios teóricos y prácticos en que se basan. Los métodos presentados fueron: Hanson, Instituto del Asfalto (McLeod) y Kearby. Estos métodos se aplicaron a un proyecto en el país, como resultado se obtuvo que el Método McLeod proporciona una dosificación mayor, tanto para agregados como para el ligante, mientras que mediante el método de Hanson se obtuvieron menores dosificaciones.

Leiva (2005) realizó una investigación para el Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales (LanammeUCR), en la que se compararon diferentes metodologías de diseño. En esta investigación se evaluaron cuatro escenarios distintos donde se variaron los parámetros de diseño de tratamientos superficiales y se utilizaron las siguientes metodologías: método de McLeod, regla del décimo, metodología ASTM, método de Texas DOT, método de Hanson y se realizó una comparación con el Manual de especificaciones para la construcción de carreteras, caminos y puentes del año 2002 (CR-2002).

Mediante la investigación realizada por Leiva se obtuvo que todas las metodologías presentaban resultados similares entre sí, sin embargo, el CR-2002 recomienda dosis superiores al promedio de los diseños obtenidos. Esto debido a que se consideran absorciones bajas, por lo que el autor recomienda aplicar las correcciones por absorción.

Leiva realizó, además, una valoración de la funcionalidad de los tratamientos superficiales aplicando la prueba de la mancha de arena (ASTM E 965), la cual mide el porcentaje de material embebido en el ligante, y la relaciona con la resistencia a la abrasión. Se utilizaron solamente los métodos de Texas y ASTM, aplicando una variación de 15 % inferior y superior al contenido de ligante obtenido por el diseño y se evaluaron dos escenarios distintos. Como resultado se obtuvo que solamente la metodología de diseño de Texas, cumplió con el criterio que establece que el ligante debe de cubrir por lo menos $\frac{2}{3}$ (66 %) de la altura media del agregado.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo general

Proponer una metodología para la evaluación del desempeño de tratamientos superficiales en laboratorio.

1.2.2 Objetivos específicos

- Estudiar las características, el proceso constructivo y los distintos tipos de tratamientos superficiales.
- Obtener la caracterización de algunos de los materiales que se utilizan en la construcción de tratamientos superficiales en el país.
- Aplicarlos distintos métodos de diseño de tratamientos superficiales empleando materiales utilizados en Costa Rica y compararlos con el CR-2010.
- Adaptar y evaluar la aplicabilidad de los ensayos que miden el desempeño en sellos de lechada asfáltica (*slurryseal*) a los tratamientos superficiales.
- Evaluar el desempeño de un tratamiento superficial mediante los ensayos adaptados para dicho fin, utilizando emulsión convencional y modificada con polímero y variando la dosificación de emulsión utilizada.

- Valorar la variación presentada en el desempeño de los tratamientos superficiales al utilizar emulsión asfáltica modificada con polímeros.

1.3 Delimitación del problema

1.3.1 Alcance

- Se realizaron los ensayos tomando en cuenta una única fuente de agregados.
- Se ensayaron tratamientos superficiales triples (TS-3).
- Se emplea agregado silíceo, proveniente de la confluencia entre el río Toro Amarillo y el río Sucio, en Guápiles.
- Se utilizaron cuatro granulometrías diferentes con tamaño máximo nominal de: 12,5 mm, 9, 5mm, 4,75 mm y arenas.
- Con las granulometrías utilizadas se conformaron dos designaciones distintas de tratamiento superficial triple: 3A (con tamaño máximo nominal de la primera capa de 9,5 mm) y 3B (con tamaño máximo nominal de la segunda capa de 12,5 mm), según lo establecido en el CR-2010.
- Los materiales utilizados son de uso común en tratamientos superficiales aplicados en el país.
- La adaptación que se realizó a los ensayos de sellos de lechada asfáltica se utilizó con el fin de discriminar el comportamiento de los tratamientos superficiales al variar la cantidad de emulsión.
- Se utilizan dos tipos de emulsiones: catiónica de rompimiento rápido y catiónica de rompimiento rápido modificada con polímero.
- Se utilizó caucho estireno-butadieno (SBR) como polímero en la emulsión modificada.

1.3.2 Limitaciones

- No se poseen ensayos estandarizados para medir la pérdida y la exudación en un tratamiento superficial en el país.
- Las granulometrías fueron conformadas para cumplir con las granulometrías establecidas en el CR-2010.
- No se poseen emulsiones asfálticas modificadas en el mercado nacional.
- El desempeño se evaluará en el laboratorio y de manera comparativa.

- En Costa Rica no se realizan registros sobre la aplicación de tratamientos superficiales.
- No se contemplan valoraciones en campo.
- Las emulsiones fueron elaboradas en el LanammeUCR.

1.4 Metodología

La metodología seguida para la elaboración del proyecto se muestra en la Figura 1-1.

1.4.1 Etapa 1

La Etapa 1 correspondió a la fase teórica en la que se realizó una consulta bibliográfica acerca de las distintas metodologías de diseño, métodos de ensayo utilizados, trabajos realizados anteriormente y aspectos relacionados con los tratamientos superficiales. Se efectuaron búsquedas en recursos como trabajos finales de graduación, publicaciones realizadas a nivel nacional e internacional y reglamentos vigentes.

1.4.2 Etapa 2

Durante la Etapa 2 se realizó una caracterización a los materiales. Del agregado se evaluaron características como: tamaño del agregado, peso unitario suelto y gravedad específica, los cuales son parámetros necesarios para la aplicación de las distintas metodologías de diseño teóricas, parte de esta información fue facilitada por elLanammeUCR. Se realizaron los siguientes ensayos:

- Densidad, gravedad específica y absorción de agregados gruesos (ASTM C 127).
- Densidad, gravedad específica y absorción de agregados finos (ASTM C 128).
- Densidad bruta (peso unitario) y vacíos en agregados (ASTM C 29).
- Análisis granulométrico (ASTM C 136).
- Abrasión del agregado en la Máquina de los Ángeles (ASTM C 131).
- Índice de durabilidad (ASTM D3744).
- Determinación de las caras fracturadas en agregados (ASTM D 5821).

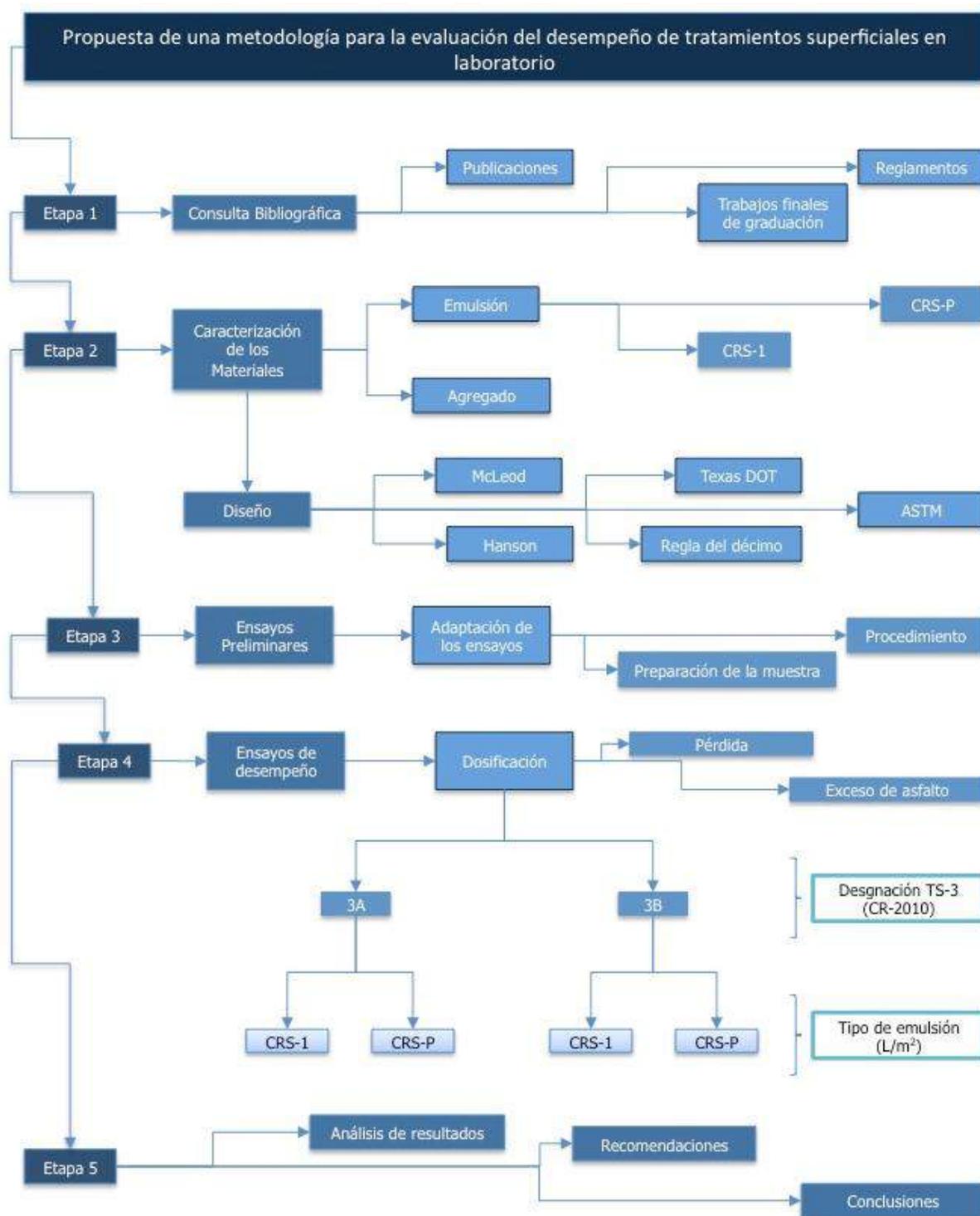


Figura 1-1. Esquema metodológico utilizado en el desarrollo del proyecto

Se utilizaron dos emulsiones asfálticas, catiónica de rompimiento rápido (CRS-1) y catiónica de rompimiento rápido modificada con polímero (CRS-P), ambas fueron elaboradas en el LanammeUCR. Para caracterizar las emulsiones, se realizaron los siguientes ensayos:

- Viscosidad SayboltFurol a 50 °C, ASTM D 244 (34-38) o AASHTO T 59 (34-38).
- Prueba de estabilidad de almacenamiento 24 h, ASTM D 244 (82-88) o AASHTO T 59 (82-88).
- Porcentaje de demulsibilidad en 35 mL de dioctilsulfosucinato de sodio al 0,8 %, ASTM D 244 (39-44) o AASHTO T 59 (39-44).
- Porcentaje retenido en el tamiz N°20, ASTM D 244(58-63) o AASTHO T 59 (58-63).
- Tipo de carga eléctrica de la emulsión, ASTM D 244 (28-33) o AASHTO T 59 (28-33).
- Destilación, ASTM D 244 (11-15 y 21-27) o AASHTO T 59 (11-15 y 21-27).
- Penetración del residuo obtenido por destilación a 25 °C, 100 g, 5 s, ASTM D 5 o AASHTO T 49.
- Solubilidad en tricloroetilenodel residuo obtenido por destilación, ASTM D 2042 o AASHTO T 44.
- Ductilidad del residuo obtenido por destilación, 25°C, 50 mm/min, ASTM D 113 o AASHTO T 51.

Luego de tener caracterizados los materiales, se realizó el diseño teórico que consiste en obtener la dosificación de agregados en kg/m² y de emulsión en L/m², mediante las distintas metodologías de diseño. Las metodologías de diseño evaluadas son: método de McLeod, regla del décimo, metodología ASTM, método de Texas DOT y método de Hanson.

1.4.3 Etapa 3

Para evaluar el desempeño de los tratamientos superficiales se partió del equilibrio que debe existir entre la pérdida de agregado y la exudación. Si un tratamiento superficial posee una alta dosificación de emulsión resistirá mejor la pérdida ocasionada por el tránsito pero será más susceptible a presentar exudación.

Dado que en el país no se cuenta con ensayos estandarizados para realizar la evaluación del desempeño en tratamientos superficiales, se plantea aplicar dos ensayos estandarizados por la norma ISSA (*International Slurry Surfacing Association*) utilizados para cuantificar el exceso de asfalto y determinar el desprendimiento de agregado (desgaste) en sellos de lechada

asfáltica (*slurryseal*). Para poder aplicarlos se propuso, en la Etapa 3, realizar una adaptación de los mismos mediante ensayos preliminares que determinarán las consideraciones necesarias en cuanto a la preparación de la muestra y el procedimiento de ensayo. Los ensayos de sellos de lechada asfáltica que fueron adaptados son: Ensayo de la Rueda Cargada y la Adhesión de Arena (ISSA TB 109) y Ensayo de la Pista Húmeda (ISSA TB 100).

Como consideración adicional, se propuso evaluar una serie de fotografías de las muestras ensayadas utilizadas para medir el exceso de asfalto, con el fin de determinar mediante inspección visual y utilizando el programa ArcGIS, el área de la muestra que se encuentra cubierta con asfalto de manera excesiva.

El programa empleado en el procesamiento de las imágenes digitales, es utilizado para el estudio de sistemas de información geográfico. A través de este programa se analizan imágenes satelitales para determinar el uso de suelo de una zona específica, por lo que se aplica de manera análoga este análisis en las imágenes obtenidas de las muestras ensayadas, para discriminar áreas de las muestras de tratamiento superficial que presenten distintas propiedades, tales como sectores con asfalto exudado.

Para realizar el análisis de las imágenes digitales, se tomaron en cuenta conceptos basados en ensayos implementados por la Universidad del Estado de Carolina del Norte para la evaluación del desempeño de tratamientos superficiales. Estos ensayos son descritos por Ju San Lee y Richard Kim en su publicación: *Understanding the Effects of Aggregate and Emulsion Application Rates on Performance of Asphalt Surface Treatments* en la tesis doctoral: *Performance Based Evaluation of Asphalt Surface Treatments Using Third Scale Model Mobile Loading Simulator*, realizada por Ju San Lee bajo la dirección de Richard Kim.

En el análisis de fotografías se definieron dos conceptos: asfalto expuesto y asfalto expuesto crítico. La muestra ensayada exhibe la condición de asfalto expuesto no crítico cuando el agregado se encuentra cubierto por asfalto a causa del proceso de fabricación de la muestra, donde el asfalto cubre cierta área de agregado que depende de la cantidad de asfalto que se utilice. El estado de asfalto expuesto crítico se da cuando el asfalto se acumula en la superficie de la muestra, es una condición similar a la exudación.

1.4.4 Etapa 4

La Etapa 4 consistió en la realización de los ensayos para determinar la pérdida y el exceso de asfalto en un tratamiento superficial. Se emplean cuatro granulometrías distintas, de las cuales es posible conformar dos designaciones de tratamientos superficiales tipo TS-3: 3A y 3B, según indica el CR-2010. Por lo tanto, se realizan ensayos para dos combinaciones diferentes de estas granulometrías, la primera donde la primera capa posee un tamaño máximo nominal de 9,5 mm (designación 3A) y la segunda donde posee 12,5 mm (designación 3B).

Para determinar la cantidad de agregado a utilizar se realizaron diferentes muestras con las dosificaciones de agregado por capa, según la granulometría que presentan, esto para observar el acomodo que se presenta dentro un área determinada según las características que presenta el material (tamaño máximo, peso específico, entre otras).

Las cantidades de emulsión de las muestras se variaron de manera que se cubrieran los rangos especificados por el CR-2010. Además se evaluaron cantidades mayores y menores a este rango, para observar si se presenta o no alguna mejora en el desempeño, valorada mediante los ensayos descritos.

1.4.5 Etapa 5

En la Etapa 5 se realizó el análisis de resultados, en el que se evaluó si los resultados obtenidos coinciden con los esperados y se analizaron las posibles causas, diferencias y fuentes de error. Se analizaron los resultados obtenidos de las metodologías teóricas de diseño y se realizó la comparación con la especificación nacional.

Finalmente se realizaron las recomendaciones y conclusiones obtenidas mediante la realización del proyecto, se analizó el cumplimiento de los objetivos planteados y se realizó un informe escrito del proyecto.

Capítulo 2. Marco teórico

Los tratamientos superficiales se definen como un riego de ligante, normalmente emulsión asfáltica de rompimiento rápido convencional o modificada, seguido de una cobertura de agregados de tamaño uniforme (Leiva, 2005).

La capacidad estructural de un tratamiento superficial es reducida, sus características están orientadas hacia la funcionalidad. La función principal es proveer una superficie estable y antideslizante en cualquier tipo de clima, siendo además una capa sellante, resistente a la infiltración del agua, que protege las capas subyacentes.

Las características principales de un tratamiento superficial son: agrega poca resistencia estructural, provee una superficie de rodadura de características similares a las de un pavimento flexible, elimina la emisión de polvo y protege la estructura de la base y subrasante (impermeabiliza).

La durabilidad de un tratamiento superficial depende de varios factores, entre ellos: intensidad del tránsito, condiciones del pavimento o base existente, estructura del pavimento existente (espesores y materiales presentes), condiciones climáticas, existencia y estado de los drenajes, materiales utilizados, metodología constructiva empleada, control de calidad y maquinaria empleada en el proceso constructivo.

2.1 Tipos de tratamientos superficiales

2.1.1 Tratamiento superficial simple

Un tratamiento superficial simple o TS-1 se define como una aplicación única de asfalto o emulsión asfáltica a cualquier superficie asfáltica o granular (nueva o existente), seguida de una capa de agregado de tamaño uniforme (variable dependiendo de las condiciones de tránsito esperadas), como se muestra en la Figura 2-1. El espesor de este tratamiento es aproximadamente igual al tamaño máximo nominal del agregado.

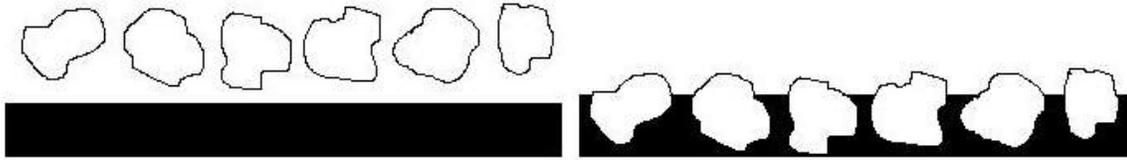


Figura 2-1. Tratamiento superficial simple (TS-1)

2.1.2 Tratamiento superficial múltiple

Un tratamiento superficial múltiple corresponde a dos o más tratamientos superficiales simples colocados uno sobre otro. En tratamientos superficiales múltiples, tales como el tratamiento superficial doble (TS-2) y el tratamiento superficial triple (TS-3), el proceso se repite para una segunda e incluso una tercera vez, con el tamaño del agregado descendiendo en cada aplicación en aproximadamente la mitad del tamaño de la capa anterior, como se muestra en la Figura 2-2 y la Figura 2-3.

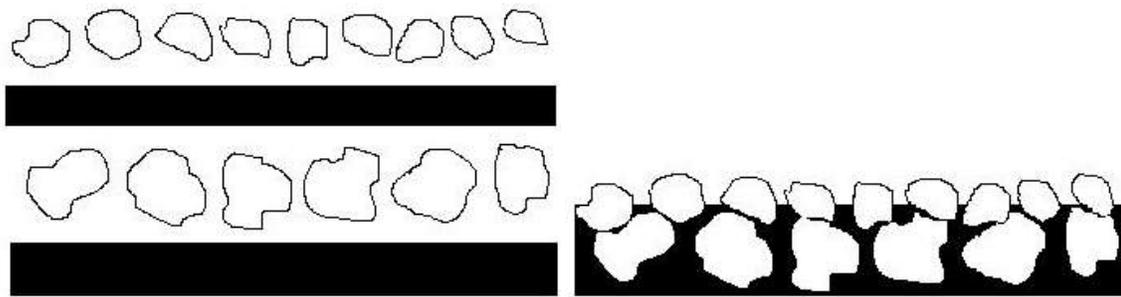


Figura 2-2. Tratamiento superficial doble (TS-2)

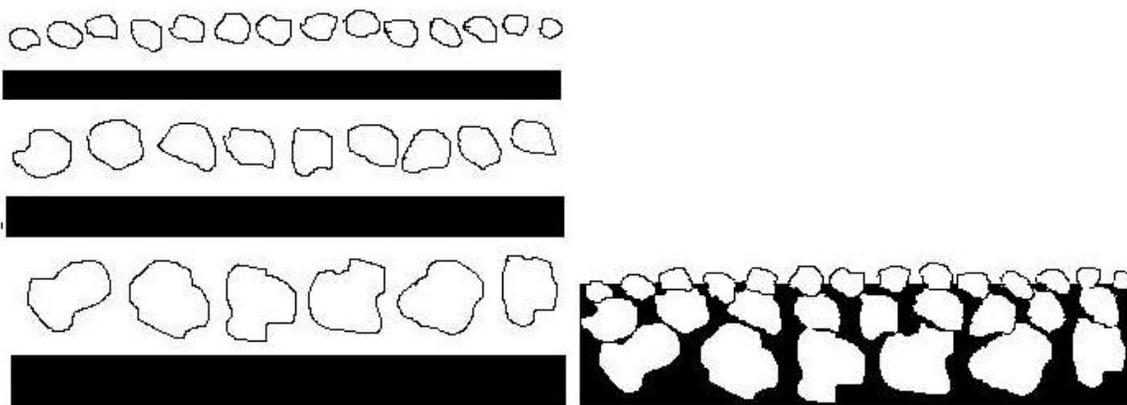


Figura 2-3. Tratamiento superficial triple (TS-3)

2.1.3 Tratamiento superficial simple engravillado

El tratamiento superficial simple engravillado se utiliza generalmente en Europa como alternativa al TS-2. Consiste en una primera capa con agregado grueso y un porcentaje mayor de vacíos, esta capa se compacta y luego se distribuye una segunda capa de agregados de menor tamaño (sin aplicación previa de ligante) que se incrusta en los vacíos de la primera capa, como se observa en la Figura 2-4. Este tratamiento se recomienda para elevados niveles de tráfico.

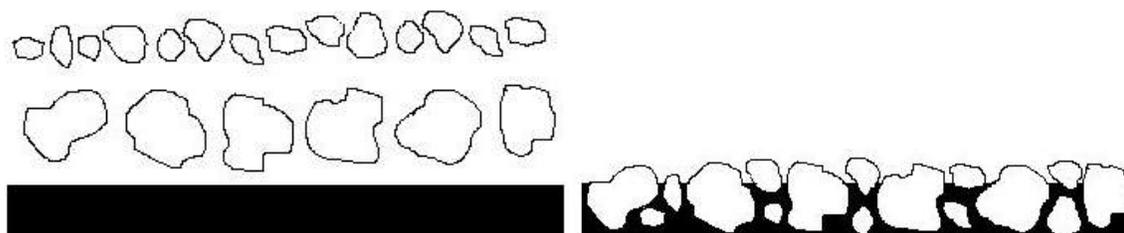


Figura 2-4. Tratamiento superficial simple engravillado

2.1.4 Tratamiento superficial simple inverso engravillado

El tratamiento superficial simple inverso engravillado es recomendado para pavimentos exudados o situaciones de tráfico pesado y altas temperaturas de servicio. La primera capa de agregados se distribuye sin aplicación previa del ligante asfáltico, posteriormente se aplica el ligante y la segunda capa de agregados, para finalmente compactar, como se observa en la Figura 2-5.

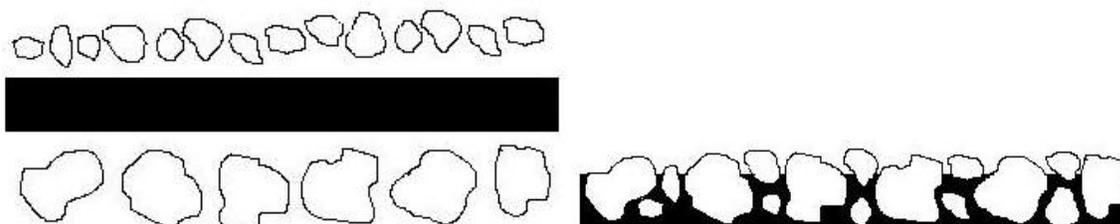


Figura 2-5. Tratamiento superficial simple inverso engravillado

2.1.5 Tratamiento superficial inverso

El tratamiento superficial inverso, mostrado en la Figura 2-6, es similar al TS-2, sin embargo, la granulometría aumenta de tamaño en la segunda capa, al contrario del TS-2 donde se da una disminución. Es utilizado para corregir exudación.

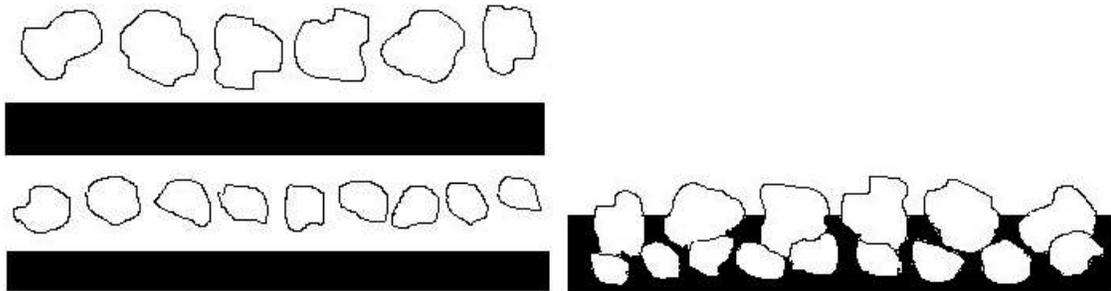


Figura 2-6. Tratamiento superficial inverso

2.1.6 Tratamiento superficial con refuerzo de geotextil

Los tratamientos superficiales con refuerzo de geotextil (Figura 2-7), son colocados generalmente en superficies sumamente oxidadas y con agrietamientos.

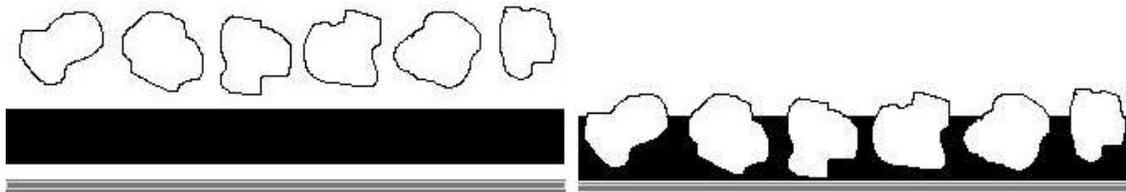


Figura 2-7. Tratamiento superficial reforzado con geotextil

2.2 Materiales utilizados en tratamientos superficiales

2.2.1 Agregado

El agregado utilizado en la construcción de tratamientos superficiales debe ser resistente, limpio, de tamaño uniforme y preferiblemente cúbico, esto para cumplir adecuadamente con sus principales funciones: resistir y transmitir las cargas del tránsito al pavimento, resistir la abrasión del tránsito y las condiciones climáticas, y proveer una resistencia al deslizamiento. Por lo tanto, es necesario que el agregado cumpla con los lineamientos establecidos en el CR-2010, sección 703.10.

2.2.1.1 Resistencia

El agregado será sometido a la abrasión generada por el tránsito vehicular, por lo que se requiere que sea lo suficientemente duro para evitar que se generen partículas quebradas

por acción del tráfico sobre la superficie. El desgaste por abrasión de la Máquina de Los Ángeles no debe ser mayor a 40 %, según lo establece el CR-2010.

2.2.1.2 Limpieza

La limpieza está relacionada con la presencia de elementos ajenos al agregado, como por ejemplo polvo, arcilla o limos. Esto genera un aumento de la superficie a cubrir por lo que se requiere una mayor cantidad de ligante asfáltico, además puede generar una inadecuada adherencia entre el asfalto y el agregado. En el caso en que el ligante sea una emulsión, la presencia de suciedad en el agregado puede ocasionar un aumento en la velocidad de rompimiento, por lo que genera malos acabados.

2.2.1.3 Adherencia

La adherencia es el esfuerzo que se necesita para desprender el asfalto de la superficie del agregado. Existen dos tipos de adherencia, la activa que se manifiesta inmediatamente en el material cuando el agregado hace contacto con la emulsión, dejando una película que no se elimina fácilmente, esta adhesividad es nula o insignificante. La adhesividad pasiva se fija luego de que la emulsión rompe (Pintor, 1985). Entre las condiciones que aumentan la adherencia se encuentran el uso de ligante con alta viscosidad y agregado rugoso y limpio.

2.2.1.4 Tamaño

El tamaño de un agregado se refiere a la distribución de la granulometría del material. En un tratamiento superficial es requerido un tamaño uniforme, la partícula de mayor tamaño no debe medir más de dos veces el diámetro de la más pequeña.

En graduaciones con mucha diferencia de tamaños, las partículas más pequeñas son cubiertas en gran parte por la película de asfalto, mientras que las partículas de mayor tamaño no tienen empotramiento adecuado, por lo que son susceptibles a ser barridas por el tránsito. Una graduación uniforme logra que el tratamiento superficial posea una fijación adecuada y un envolvimiento uniforme, además de lograr distribuir uniformemente las cargas y facilitar la dosificación (Perera, 1987).

El tamaño máximo del agregado está ligado a las condiciones del tránsito en la zona, así como a la cantidad de emulsión asfáltica que pueda ser aplicada por el distribuidor sin que

escurra por la superficie. En el caso de tratamientos superficiales múltiples, las capas superiores deben de disminuir su tamaño máximo de manera progresiva.

2.2.1.5 Forma

La forma cúbica es la más deseable para la construcción de tratamientos superficiales, las partículas planas o elongadas tienden a alinearse sobre sus caras planas y son cubiertas completamente por el asfalto, por lo que se genera una superficie resbaladiza y no uniforme. Por otro lado, los agregados redondos poseen una fricción interna baja, tienden a rodar y ser desplazados por el tránsito.

La tendencia de un agregado a tener partículas planas es medida por el índice de lajas o índice *Flakiness*, que corresponde al porcentaje por peso de partículas que tienen su dimensión mínima inferior al 60 % de la dimensión media del agregado. Las caras fracturadas se miden mediante el porcentaje del material que posee una cara fracturada o dos o más caras fracturadas.

2.2.2 Emulsión asfáltica

Una emulsión asfáltica es una dispersión de dos fases: asfalto (fase dispersa) y agua (fase dispersante). La emulsificación del asfalto se logra con la acción de un agente emulsificante, que corresponde a una molécula formada por una cabeza polar o iónica y una cadena hidrocarbonada, y la aplicación de energía mecánica. Al producirse la emulsión, los glóbulos de asfalto adquieren la carga eléctrica de la cabeza polar, que puede ser positiva (emulsión catiónica) o negativa (emulsión aniónica). Como todos los glóbulos adquieren la misma carga, se repelen unos a otros, de este modo la dispersión se hace estable (Leiva, 2005).

La tasa de sedimentación o velocidad de rompimiento corresponde a la rapidez en la que se separan las fases que componen la emulsión (asfalto y agua). Entre los factores que influyen en la velocidad de rompimiento se encuentra la afinidad entre la emulsión y el agregado, así como el tipo y concentración del emulsificante, las características de los agregados (granulometría) y los factores climáticos. Las emulsiones aniónicas presentan una mejor adhesión en agregados calcáreos que en silíceos, mientras que para emulsiones catiónicas se da una mejor adhesión en agregados silíceos.

La nomenclatura utilizada para la identificación de emulsiones asfálticas toma en cuenta el tipo de carga que presenta, si se trata de emulsiones catiónicas se coloca el prefijo C, sino aparece la letra C se infiere que es una emulsión aniónica. También se incluye dentro de la nomenclatura la velocidad de rompimiento, se utiliza RS (*rapidsetting*) cuando se trata de emulsiones de rompimiento rápido, MS (*mediumsetting*) en emulsiones de rompimiento medio y SS (*slowsetting*) cuando se da un rompimiento lento.

El sistema de nomenclatura incluye, además, la clasificación de la emulsión de acuerdo con el grado de viscosidad que posea, se colocan los sufijos 1 y 2 en emulsiones con viscosidad SayboltFurol a 50 °C entre los rangos 20-100 s y 100-400 s, respectivamente. Cuando se utilizan asfaltos duros, con penetraciones a 25 °C entre 40 y 50 décimas de milímetro, generalmente se coloca la letra h (*hard*) como sufijo (Avenidaño et al, 2008).

Las emulsiones asfálticas pueden contener aditivos para mejorar una o más de las siguientes propiedades: reología del residuo, propiedades de manufactura y adhesión o compatibilidad ligante-agregado. Cuando se utiliza látex como aditivo, la viscosidad de la emulsión tiende a descender, debido al contenido de sal que posee y a que se da una amplia distribución de tamaños de partículas. Para aumentar la viscosidad en estos casos, se puede aumentar el contenido de ligante, o modificar con el aditivo la fase de asfalto en vez del jabón (Akszo Nobel).

2.2.2.1 *Ensayos de caracterización*

a. Ensayo de viscosidad SayboltFurol

Mediante la prueba de viscosidad SayboltFurol se determina el grado de fluidez de la emulsión. Se realiza con un viscosímetro del tipo Furol en el que se determina el tiempo que tarda la emulsión en llenar un matraz aforado de 60 cm³, como se muestra en la Figura 2-8. Durante el ensayo, la emulsión se encuentra a 25 °C o a 50 °C, según el tipo de emulsión. Los resultados se presentan en segundos SayboltFurol (SFS).



Figura 2-8. Ensayo de viscosidad SayboltFurol

Fuente: <http://www.humboldtmg.com>

b. Prueba de estabilidad de almacenamiento

La prueba de estabilidad de almacenamiento mide la tendencia de las partículas de asfalto a sedimentarse durante el almacenamiento de la emulsión. Se realiza colocando emulsión en una probeta de 500mL, como se muestra en la Figura 2-10, la probeta con emulsión se deja a temperatura ambiente durante 24 horas, posteriormente se extraen muestras de 50 mL de la parte superior e inferior de la probeta y se determina el residuo asfáltico por evaporación, la especificación indica que la diferencia entre ambas muestras no debe de ser mayor al 1%.

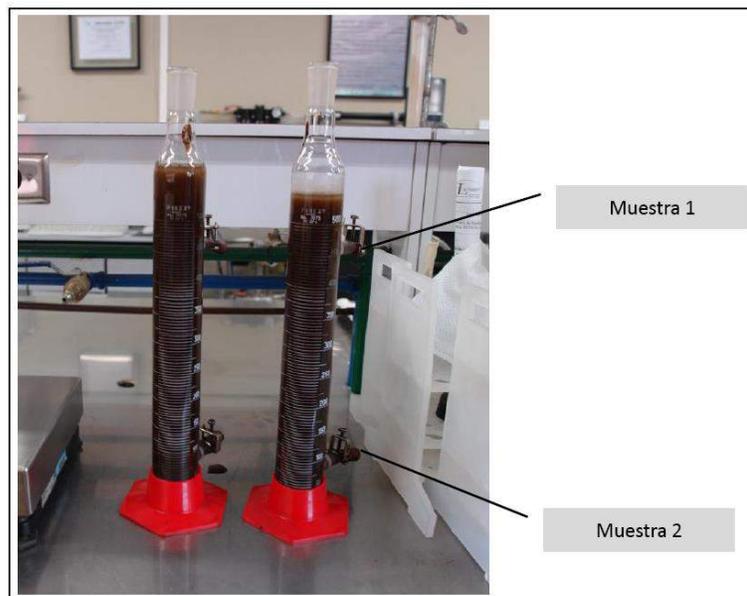


Figura 2-9. Ensayo de estabilidad de almacenamiento

c. Ensayo de porcentaje de demulsibilidad

La demulsibilidad es una medida de la reactividad de la emulsión. Para determinar el porcentaje de demulsibilidad se le adiciona dioctilsulfosucinato de sodio al 0,8 % a una muestra de emulsión, se decanta la emulsión rota, se lava con agua y se pone en el horno para evaporar el agua aún presente. Posteriormente se calcula el porcentaje de demulsibilidad por deferencia de pesos.

d. Ensayo de porcentaje retenido en el tamiz N°20

A través del ensayo para determinar el porcentaje retenido en el tamiz N°. 20 (mostrado en la Figura 2-10) se obtiene la cantidad de muestra que posee un tamaño mayor que 850 micrones, dicho porcentaje debe de ser menor que 0,1 %. En este ensayo se pasan 500 mL de emulsión asfáltica a 25 °C a través de la malla N° 20, posteriormente se lava y se seca la malla para determinar la cantidad de asfalto retenido.



Figura 2-10. Tamiz N°20

e. Prueba de tipo de carga eléctrica de la emulsión

Mediante el ensayo de tipo de carga se determina si la emulsión es aniónica o catiónica. Se introducen dos electrodos en la emulsión y se hace pasar una carga eléctrica por un tiempo determinado, mediante inspección visual se determina cuál electrodo posee mayor cantidad de asfalto depositado. En la Figura 2-11 se muestra el equipo utilizado en este ensayo y una muestra de emulsión catiónica ensayada.

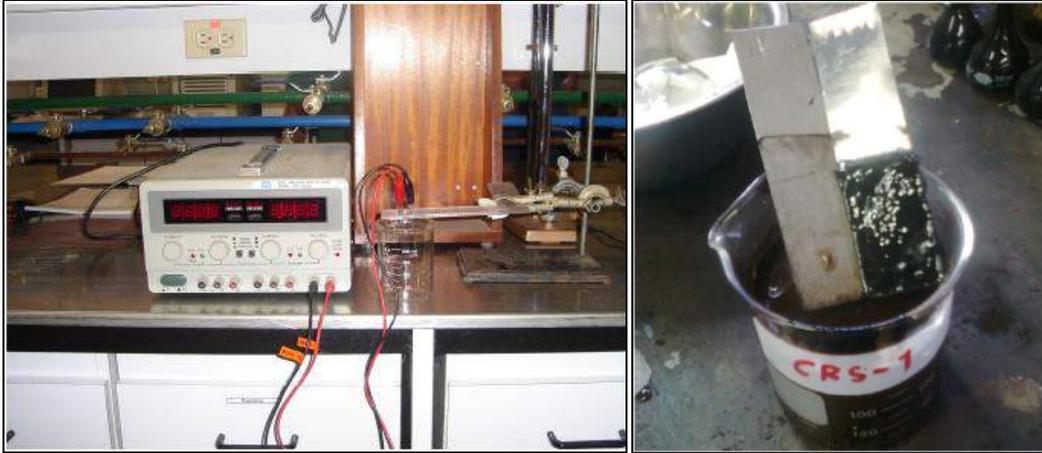


Figura 2-11. Ensayo de tipo de carga

Fuente: <http://www.lanamme.ucr.ac.cr>

f. Ensayo de destilación

Con la prueba de destilación es posible determinar las proporciones de agua y de residuo asfáltico. Mediante el proceso de destilación se separa el agua y los aceites presentes en la emulsión, por lo que dentro del alambique de destilación queda solamente el residuo asfáltico, este residuo normalmente es utilizado para otras pruebas de caracterización. En la Figura 2-12 se presenta el equipo empleado en la destilación de la muestra de emulsión asfáltica.



Figura 2-12. Ensayo de destilación

Fuente: <http://www.lanamme.ucr.ac.cr>

g. Ensayo de penetración del residuo obtenido por destilación

Mediante la prueba de penetración es posible determinar la dureza del residuo asfáltico. El residuo obtenido por destilación se coloca en una cápsula, se introduce en un baño a 25 °C, posteriormente se deja caer una aguja de 100 g durante 5 s y se mide la penetración en décimas de milímetro, el equipo utilizado se muestra en la Figura 2-13, es esta figura se presenta, además, una muestra luego del ensayo.



Figura 2-13. Equipo para el ensayo de penetración y muestras ensayadas

h. Ensayo de Solubilidad en tricloroetileno del residuo obtenido por destilación

La solubilidad en tricloroetileno se utiliza para medir la pureza del residuo asfáltico. La muestra de asfalto es disuelta en tricloroetileno, posteriormente la disolución se pasa a través de un filtro, se determina cuánto material es retenido por el filtro y se estima el porcentaje de material disuelto.

i. Prueba de ductilidad del residuo obtenido por destilación

El residuo de asfalto obtenido por destilación es colocado en una briqueta y se deja en un baño a 25 °C durante 90 minutos, posteriormente se coloca en un ductilómetro, como el mostrado en la Figura 2-14, la muestra se elonga a razón de 50 mm/min hasta que se rompa y se determina la distancia a la que se rompió, la cual se define como ductilidad.



Figura 2-14. Ductilómetro y briquetas

2.3 Proceso constructivo

En la construcción de tratamientos superficiales se deben realizar una serie de actividades definidas, una de ellas consiste en la preparación de la superficie, donde se realizan los trabajos de reparación requeridos para mantener la capacidad estructural y la serviciabilidad del pavimento, tales como bacheo y sello de grietas, en caso de ser colocado sobre carpeta asfáltica. Además es importante tener una superficie limpia, por lo que generalmente se realiza un barrido inicial (en el caso de pavimentos existentes) por lo menos un día antes de la colocación del tratamiento.

Para la aplicación de la emulsión asfáltica se utiliza un camión distribuidor, que distribuye en forma uniforme la tasa de emulsión establecida. Este equipo, mostrado en la Figura 2-15, posee una bomba que se encarga de expulsar la emulsión a través de las boquillas, las disposiciones de estas boquillas y la altura de la barra regadora deben de estar balanceadas para producir un riego uniforme sobre la superficie.

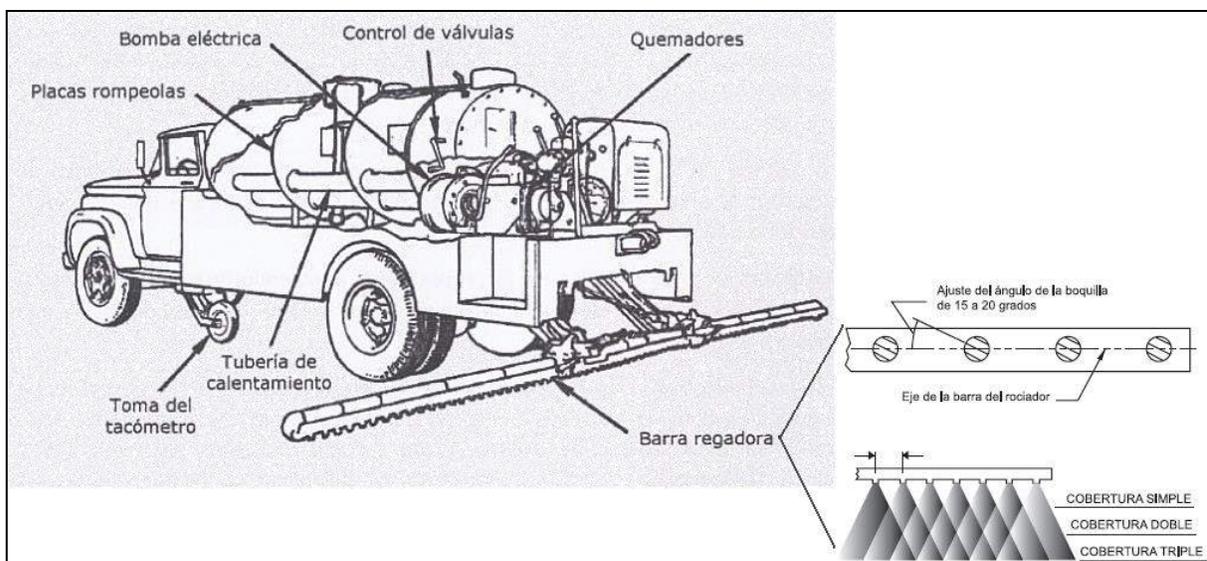


Figura 2-15. Camión distribuidor de emulsión asfáltica

Fuente: Leiva, 2005.

Modificado por: Autora, 2012.

La distribución del agregado se realiza inmediatamente después de la colocación del ligante asfáltico mediante un equipo de distribución, el cual coloca la cantidad establecida de agregado de manera uniforme. Existen tres tipos de equipos distribuidores: distribuidor de compuerta, mecánico y de tracción propia, en la Figura 2-16 se muestran los diferentes tipos de equipo de distribución de agregado.

Inmediatamente después de la colocación del agregado se realiza la compactación. Este proceso requiere de un compactador de llantas de hule que permite incrustar los agregados dentro del ligante asfáltico, por lo que se favorece su adherencia sin triturar los agregados, como sucedería con un compactador de rodillo. Una vez que el tratamiento superficial se ha curado adecuadamente, se retiran las partículas sueltas mediante el proceso de barrido de la superficie. En el caso de tratamientos superficiales múltiples, los procesos descritos anteriormente se repiten hasta completar las capas deseadas.

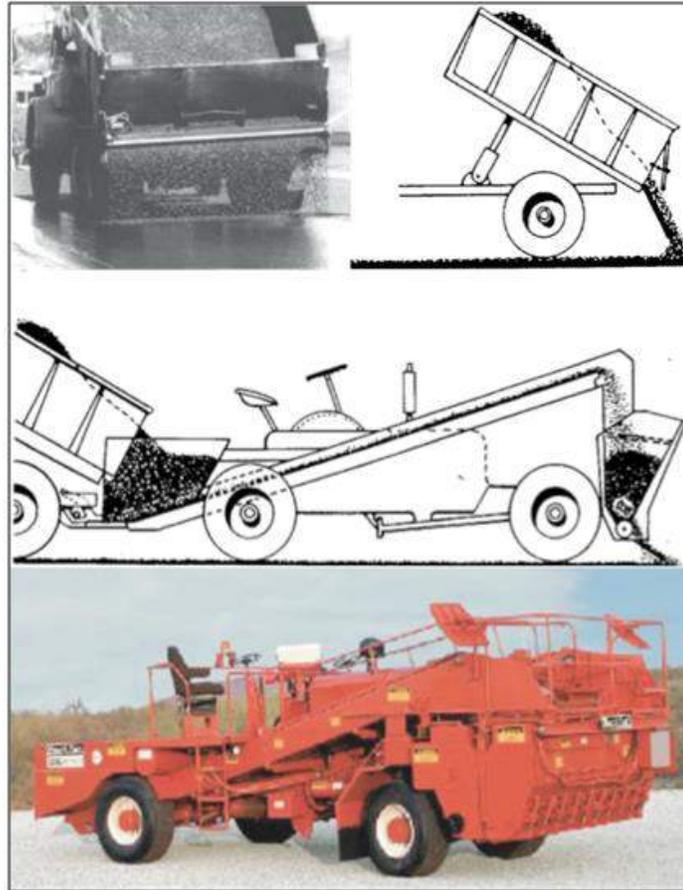


Figura 2-16. Equipo distribuidor de agregado tipo compuerta, mecánico y tracción propia, respectivamente

Fuente: Leiva, 2005 y CR-2010, 2010.

Modificado por: Autora, 2012.

2.4 Desempeño de los tratamientos superficiales

Para cada proyecto existe un diseño o un rango de diseño que producirá un tratamiento superficial con las características de calidad y desempeño adecuadas. Cuando se dosifica una cantidad de emulsión menor que la indicada, se presenta pérdida de agregado en el tratamiento superficial. Si por el contrario se utilizan cantidades de emulsión mayores se presenta exudación del asfalto, por lo tanto existe una rango o zona de buen desempeño donde ninguna de estas deficiencias se presentan, la Figura 2-17 ilustra esta zona.

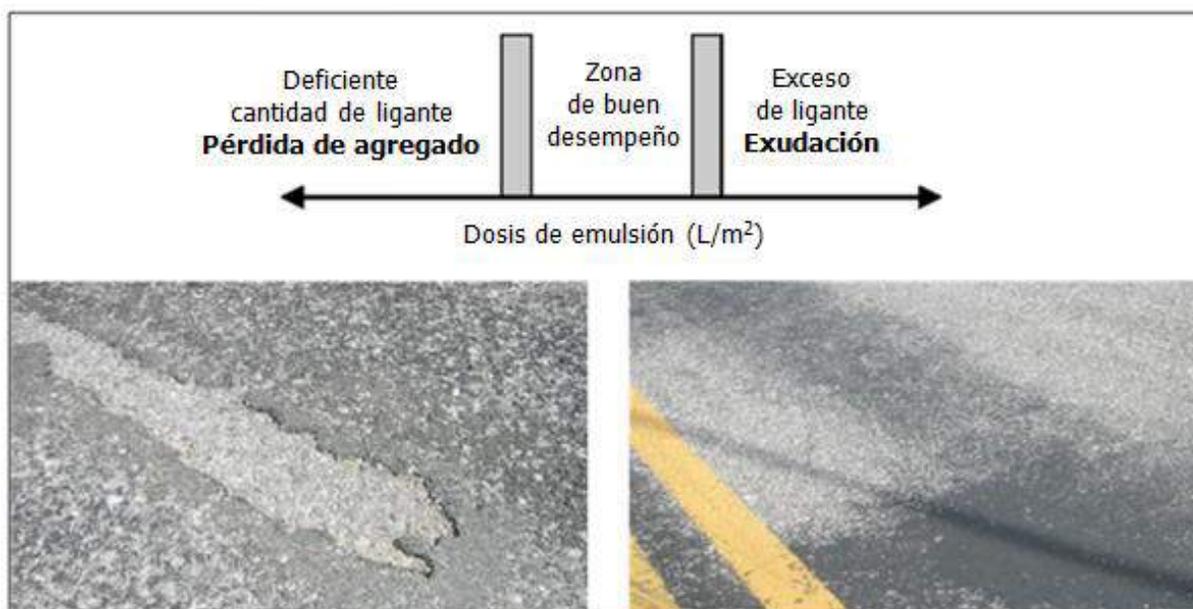


Figura 2-17. Zona de buen desempeño del tratamiento superficial

Fuente: Leiva, 2005 y Kim et al, 2005.

Modificado por: Autora, 2012.

2.4.1 Medición del desempeño

A nivel internacional existen distintas maneras de cuantificar el desempeño de un tratamiento superficial, tanto en el campo como en el laboratorio. Debido a que la pérdida de agregado es la falla que, por lo general, se presenta con más frecuencia, las metodologías para medir el desempeño se encuentran enfocadas en valorar dicha pérdida. Sin embargo, también existen metodologías para medir aspectos como profundidad embebida del agregado y exceso de asfalto.

Mediante el Ensayo Vialit, estandarizado por la norma *British Standard* EN 12272-3, se mide la retención del agregado utilizando un dispositivo que permite lanzar una bola de acero inoxidable de 50 mm de diámetro aproximado y un peso de 500 g, desde 500 mm de altura. La muestra de tratamiento superficial es colocada volteada, es decir, con el agregado hacia abajo y la bola es lanzada tres veces, posteriormente se pesa la muestra y por diferencia se obtiene la cantidad de material desprendido.



Figura 2-18. Ensayo Vialit

Fuente: Aktas et al, 2011.

El Ensayo de Barrido (*Sweep Test*), estandarizado por la norma ASTM D7000, se utiliza para aproximar el tiempo de apertura al tránsito luego de colocar el tratamiento superficial. Consiste en someter una muestra del tratamiento superficial a un minuto de ensayo en un equipo que realiza un movimiento orbital, donde un cepillo simula el barrido de la superficie en campo, tal como se muestra en la Figura 2-19, luego del ensayo se calcula la cantidad de agregado perdido. Esta metodología también se ha utilizado para evaluar la pérdida de agregado y la sensibilidad de esta a la variación en la cantidad de emulsión aplicada.

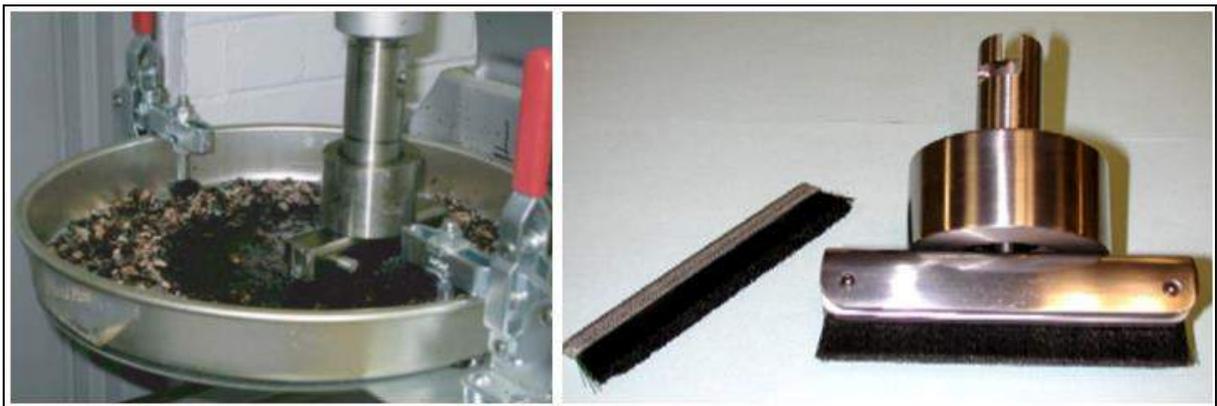


Figura 2-19. Ensayo de Barrido ASTM D7000

Fuente: NCHRP, 2011.

En el Ensayo de Abrasión y Cohesión ESSO (ACTE) se mide la retención del agregado en el tratamiento superficial utilizando un equipo que realiza un movimiento orbital, las muestras se someten a la abrasión de un hule (ver Figura 2-20) durante un tiempo especificado, cada muestra utiliza una cantidad fija de emulsión y de agregado y se varía el tiempo de curado a

30, 60 y 120 minutos. El ensayo de barrido conocido como *MacrosurfacingSweep Test* es muy similar al ensayo de barrido de la norma ASTM D7000 pero utiliza un hule en lugar de un cepillo, como en el ensayo de Abrasión y Cohesión ESSO.

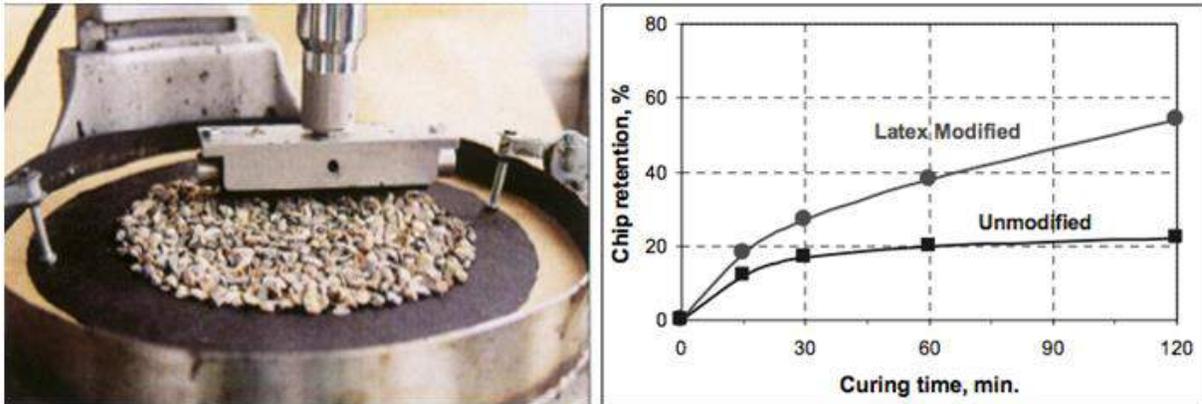


Figura 2-20. Ensayo de Abrasión y Cohesión ESSO

Fuente: Deneuvillers et al, 1998.

El Ensayo de Retención de Pensilvania, conocido como PART por sus siglas en inglés, mide la retención del agregado en un tratamiento superficial mediante el uso de la tamizadora Mary Ann. Este ensayo consiste en colocar una muestra de tratamiento superficial volteada en la tamizadora durante cinco minutos y posteriormente se calcula por diferencia de peso la cantidad de material perdido.

Mediante el Ensayo de Retención del Departamento de Transportes de Texas Tex-216-F, se mide la adherencia del agregado que conforma un tratamiento superficial. En este ensayo se coloca la muestra en una pendiente de 75° con la horizontal y se deja caer todo el material que no se encuentre adherido, se barre ligeramente para remover el material suelto y se obtiene, por diferencia de pesos, la cantidad de material desprendido. Este ensayo es similar al ensayo *FlipOver Test (FOT)*, en el que el espécimen es volteado completamente y se sigue el mismo procedimiento anterior.

La profundidad embebida del agregado se puede medir mediante el Ensayo del Círculo de Arena Modificado. Este método utiliza el peso unitario suelto de una arena estándar para calcular la profundidad promedio a la que el agregado se encuentra embebido. Para esto se pesa la cantidad de arena que llena un anillo con dimensiones establecidas que posteriormente se posiciona sobre la muestra, luego se coloca arena sobre el anillo formando

un cono, se rellena todo el anillo cuidadosamente enrasando la superficie, se retira el material sobrante y se pesa la cantidad de arena final en el anillo. Este procedimiento se describe gráficamente en la Figura 2-21.



Figura 2-21. Procedimiento del Ensayo del Círculo de Arena Modificado

Fuente: Kim et al, 2008.

Debido a que la mayoría de ensayos están relacionados con la pérdida de agregado mediante energía mecánica, recientemente se han evaluado procedimientos más cercanos a las condiciones de campo, como por ejemplo el ensayo que utiliza el Simulador de Carga Móvil de Tercera Escala conocido como MMLS3 por sus siglas en inglés, este equipo somete a las muestras a ciclos unidireccionales de carga que simulan el tránsito vehicular. El ensayo fue desarrollado por la Universidad del Estado de Carolina del Norte y mide la pérdida de agregado mediante la diferencia de pesos del espécimen antes y después de la aplicación de la carga.

El Ensayo MMLS3 también mide el exceso de asfalto mediante procesamiento de imágenes digitales, para esto se toman imágenes de las muestras ensayas mediante un escáner que guarda la imagen en escala de grises con un solo plano de píxeles. Mediante el programa *NationalInstrumentVisionAssistant* (NIVA) se obtienen los histogramas de intensidad contra número de píxeles y se selecciona el área que presenta exudación en una imagen para aislar los efectos de la sombra y del agregado con color oscuro, la intensidad de los píxeles de esta área seleccionada se localiza en el histograma y se utiliza este valor para determinar la exudación en otras muestras, el procedimiento anterior se presenta en la Figura 2-22.

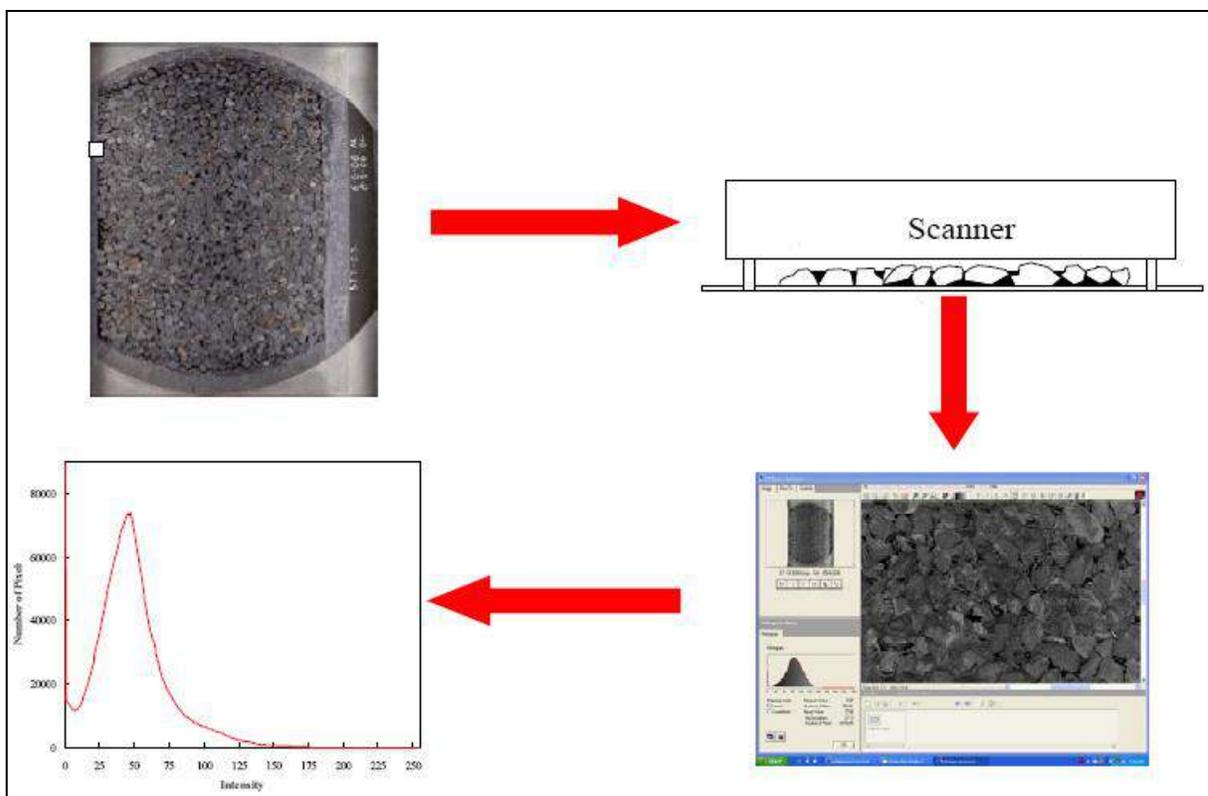


Figura 2-22. Procesamiento de imágenes para determinar el área exudada en muestras de tratamiento superficial

Fuente: Lee, 2007.

Los sellos asfálticos tipo lechada, conocidos como *Slurry Seals*, utilizan ensayos similares a los descritos anteriormente para medir del desempeño. Mediante el Ensayo de la Pista Húmeda (ISSA TB 100) se determina la pérdida por abrasión en una mezcla de lechada asfáltica. El espécimen es sumergido en un baño de agua previamente, posteriormente se erosiona mecánicamente bajo el agua mediante una manguera de hule que se mueve orbitalmente sobre el espécimen por un tiempo específico, como se muestra en la Figura 2-23. El espécimen erosionado se lava para dejarlo sin material suelto, luego se seca y se pesa para obtener, por diferencia, la cantidad de material desprendido.



Figura 2-23. Ensayo de la Pista Húmeda

El ensayo de la rueda cargada (ISSA TB 109) se utiliza para determinar el exceso de asfalto, consiste en hacer pasar una rueda con una carga determinada sobre un espécimen rectangular durante 1000 ciclos, como se muestra en la Figura 2-24. Cuando se nota en el espécimen un brillo (exceso de asfalto) se registra el ciclo en el cual se comenzó a dar. Posteriormente se lava y se seca la muestra, se le añade arena Ottawa y se pasa nuevamente la rueda 100 ciclos más y finalmente se mide la cantidad adherida en el asfalto exudado de la muestra.



Figura 2-24. Ensayo de la Rueda Cargada

2.5 Diseño de un tratamiento superficial

Existen varias metodologías de diseño de tipo determinístico, que se basan en las características de los materiales componentes del tratamiento (granulometría, dureza y peso específico de los agregados, entre otros) y de las condiciones de campo como tipo de pavimento existente y volumen de tránsito, para estimar las cantidades de agregado y de

asfalto o emulsión asfáltica. En el Cuadro 2-1 se muestran los parámetros de diseño utilizados por cada metodología en estudio.

Cuadro 2-1. Parámetros de diseño para cada metodología

Parámetros de diseño	Metodologías de diseño					
	Hanson	McLeod	Regla del décimo	Texas DOT	ASTM-D1369	
Agregado	Gravedad específica bruta seca	X	X		X	
	Peso unitario suelto (kg/m ³)		X		X	X
	Vacíos en el agregado suelto (%)		X		X	
	Índice de Lajas (%)	X	X			
	Absorción de asfalto (%)		X			
	Tamaño máximo (mm)			X		X
	Tamaño mínimo (mm)			X		
	Tamaño medio (mm)	X	X			
Emulsión	Porcentaje de asfalto residual (%)	X	X	X	X	X
Otros	Condición superficial	X	X		X	
	Condición climática		X		X	
	Volumen de tránsito (veh/día)	X	X		X	
	Desperdicio (%)	X	X			

Las metodologías de diseño presentadas por Hanson, en 1934 y por Kearby, en 1953, proporcionaron la base de los futuros métodos de diseño. El método de Hanson, basado en la dimensión mínima promedio del agregado, toma en cuenta los siguientes principios:

1. Cuando el agregado es lanzado aleatoriamente sobre una película de asfalto, las partículas se posicionan de manera que los vacíos entre ellas son aproximadamente 50 %.
2. La compactación acomoda las partículas de agregado de manera que los vacíos se reducen a 30 %.
3. Finalmente, después de un tráfico considerable, las partículas de agregado son acomodadas en su posición más densa, acostados sobre su lado más plano, y los vacíos se reducen a 20%.
4. Debido a que las partículas se encuentran sobre su lado más plano, el espesor promedio es determinado por el promedio de las dimensiones más pequeñas de todas las partículas de agregado, este promedio es conocido como "dimensión mínima promedio".
5. La dimensión mínima promedio puede ser determinada utilizando placas ranuradas, donde la dimensión mínima promedio es la menor distancia perpendicular entre las

dos ranuras a las que las partículas atraviesan justamente, o midiendo una cantidad determinada de partículas individualmente.

6. Tan pronto se conozca la dimensión mínima promedio, es posible calcular la cantidad de agregado por metro cuadrado del proyecto.
7. La dimensión mínima promedio del agregado también es básica para el cálculo de la cantidad de ligante asfáltico a utilizar.
8. Para tener un buen desempeño, la cantidad de ligante asfáltico usada debe de llenar 70 % de los 20 % de espacios vacíos finales, si el volumen de tráfico es bajo. Sin embargo, si se tiene un alto volumen de tráfico, el ligante no debe de llenar más del 60 % del 20 % de vacíos finales.

En la Figura 2-25 se describen gráficamente algunos de los principios mencionados anteriormente.

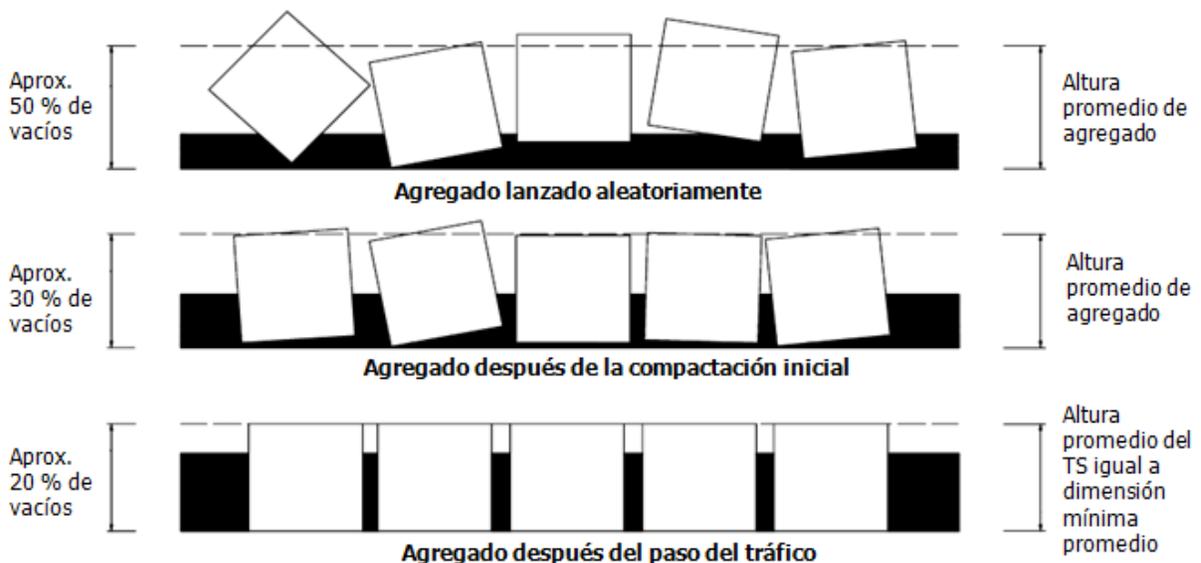


Figura 2-25. Proceso de acomodación del agregado en un tratamiento superficial según Hanson

Fuente: Kim, 2007.

Modificado por: Autora, 2012.

En 1969 Norman McLeod presentó un método de diseño de tratamientos superficiales basado, en parte, en el trabajo realizado por Hanson previamente y además en observaciones y relaciones empíricas. Este método, adoptado en 1979 por el Instituto del Asfalto, toma en consideración que el volumen final del tratamiento superficial es el 20 % del

peso unitario suelto del agregado, por lo que la cantidad de vacíos considerados se reduce y el ligante resultante es menor que la obtenida mediante el método de Hanson.

El método Kearby Modificado, conocido como el método de Texas DOT, fue presentado en 1974 por Epps. Este método propone un cambio adicional a la curva de diseño desarrollada por Kearby en 1934. La tasa de aplicación del agregado es determinada en el laboratorio mediante la prueba del tablero, en el que se coloca agregado sobre un área de madera tipplywood y se determina la cantidad necesaria para cubrirla adecuadamente.

Existen otras metodologías tales como el método Linckenheyl conocido como regla del décimo que toma en cuenta únicamente el tamaño del agregado para la dosificación tanto del agregado como del ligante.

La norma ASTM D 1369 establece dosificaciones de agregado y ligante que dependen del peso unitario suelto y del tamaño del agregado, estas dosificaciones se obtienen mediante tablas de datos obtenidos de dosificaciones típicas utilizadas en distintos proyectos.

2.5.1 Diseño de tratamientos superficiales múltiples

En tratamientos superficiales múltiples, las metodologías de diseño por lo general utilizan el mismo concepto fundamental de diseño, sin importar el número de capas. Sin embargo, es necesario tomar en cuenta algunas consideraciones.

En cuanto a dosis y características del agregado:

- Diseñar cada capa como un tratamiento superficial simple.
- Cada capa debe de tener un tamaño nominal no superior a la mitad del tamaño nominal de la capa inferior.
- No se debe de corregir por pérdida, esto debido a que una cantidad excesiva de agregado puede formar una capa de agregado escasamente cubierto, que ocasiona desprendimiento de las demás capas y puede provocar la pérdida de agregado a causa de la falta de agregado embebido.

En cuanto a tasa de aplicación del asfalto:

- Diseñar cada capa como un tratamiento superficial simple.
- Excepto por la primera capa, no se debe de corregir por textura superficial.

Las tasas de aplicación de ligante en tratamientos superficial múltiple obtenida para cada capa, por lo general, es sumada y dividida en proporciones distintas en cada una de las capas utilizadas. Según Perera (1987), en tratamientos tipo TS-2 se recomienda aplicar 60 % del total de ligante obtenido del diseño en la primera capa y 40 % en la segunda en lugares cálidos, mientras que en zonas frías se recomienda utilizar 40 % en la primera y 60 % en la segunda capa. En tratamientos tipo TS-3 es recomendado utilizar razones de 40 %, 40 % y 20 % o de 30 %, 40 % y 30 % para la primera, segunda y tercera capa, respectivamente.

2.6 Especificaciones nacionales

Las especificaciones vigentes actualmente en el país, en cuanto a tratamientos superficiales, se encuentran establecidas en el Manual de especificaciones para la construcción de carreteras, caminos y puentes (CR-2010). Este manual establece las características de los materiales, el proceso constructivo, recomienda rangos de dosificaciones de los materiales y establece las condiciones de pago del proceso.

2.6.1 Agregado

El agregado utilizado en tratamientos superficiales debe cumplir con los rangos de granulometrías mostrados en el Cuadro 2-2. Además, debe de tener las características mostradas en el Cuadro 2-3 y en el Cuadro 2-4.

Cuadro 2-2. Rangos requeridos para la granulometría de los agregados en tratamientos superficiales de simple y múltiple capa

No. de tamiz estándar	Abertura (mm)	Porcentaje pasando (por peso)					
		Designación de la granulometría					
		A	B	C	D	E	F
1½"	37,5	100 ⁽¹⁾					
1"	25	90-100 (3)	100 ⁽¹⁾				
¾"	19	0-35 (5)	90-100 (3)	100 ⁽¹⁾			
½"	12,5	0-12 (3)	0-35 (5)	90-100 (3)	100 ⁽¹⁾		
3/8"	9,5	---	0-12 (3)	0-35 (5)	85-100 (3)	100 ⁽¹⁾	100 ⁽¹⁾
No. 4	4,75		---	0-12 (3)	0-35 (5)	85-100 (3)	85-100
No. 8	2,36				0-8 (3)	0-23 (4)	---
No. 200	0,075		0-1 (1)	0-1 (1)	0-1 (1)	0-1 (1)	0-10

⁽¹⁾ El procedimiento estadístico no aplica.

() Tolerancia permisible.

Fuente: CR-2010, 2010.

Cuadro 2-3. Características requeridas del agregado utilizado en tratamientos superficiales

Abrasión de Los Ángeles (AASHTO T 96)	40 % máx.
Densidad, AASHTO T 19 M	1100 Kg/m ³ mín.
Revestimiento y desnudamiento en mezcla Bitumen - Agregado, AASHTO T 182	95 % mín.
Revestimiento adherido al agregado FLH T 512	0,5 % máx.
Partículas planas y elongadas, en una proporción 1:3 y el peso calculado por masa como un promedio ponderado de la malla 9,5 mm, ASTM D 4791	10 % máx.
Índice de fractura, FLH T 508	30 % máx.
Índice de durabilidad (grueso), AASHTO T 210	35 mín.
Índice de durabilidad (fino), AASHTO T 211	35 mín.
Arcilla y partículas friables, AASHTO T 112	1 % máx.
Agregados livianos, AASHTO M 195	No se deben usar

Fuente: CR-2010, 2010.

Cuadro 2-4. Especificaciones de caras fracturadas

Tráfico en millones de ejes equivalentes de 8,2 ton	Para capas intermedias	Para capas de rodamientos
	Porcentaje por peso con una o más caras fracturadas / porcentaje por peso con dos o más caras	Porcentaje por peso con una o más caras fracturadas / porcentaje por peso con dos o más caras
Inferior o igual a 30	80 / 75	95 / 90
Inferior a 100	95 / 90	100 / 100
Superior o igual a 100	100 / 100	100 / 100

Nota: 80 / 75 indica que el 80 % o más del agregado grueso debe de tener mínimo una cara fracturada y el 75 % del agregado grueso debe de tener mínimo dos caras fracturadas. Los ejes equivalentes de 8,2 toneladas serán estimados para un período de carga de 20 años

Fuente: CR-2010, 2010.

2.6.2 Emulsión asfáltica

Para las emulsiones aniónicas se aplican las especificaciones mostradas en el Cuadro 2-4, en el caso de emulsiones catiónicas se aplican las especificaciones del Cuadro 2-5.

Cuadro 2-5. Especificaciones de aceptación para emulsiones asfálticas aniónicas

Tipo Grado	Rompimiento rápido		Rompimiento medio				Rompimiento lento		Rompimiento acelerado							
	RS-1		RS-2		MS-1		MS-2		MS-2h		SS-1		SS-1h		QS-1h	
	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.
Ensayos en emulsiones																
Viscosidad, Saybolt Furol a 25 °C SFS	20	100			20	100	100	...	100	...	20	100	20	100	20	100
Viscosidad, Saybolt Furol a 50 °C SFS																
Estabilidad al almacenamiento 24 h, % ⁽¹⁾		1		1			1		1			1		1		1
Demulsibilidad, %	60		60													
Recubrimiento y resistencia al agua																
Recubrimiento, agregado seco					Bueno		Bueno		Bueno							
Recubrimiento, luego de rociado					Reg.		Reg.		Reg.							
Recubrimiento, agregado húmedo					Reg.		Reg.		Reg.							
Recubrimiento, luego de rociado					Reg.		Reg.		Reg.							
Ensayo de malla N° 20, %		0,10		0,10		0,10		0,10		0,10		0,10		0,10		0,10
Ensayo de mezclado con cemento, %												2,0		2,0		N/A
Destilación																
Residuo, %	55		63		55		65		65		57		57		57	
Ensayos de residuo por destilación																
Penetración a 25 °C, 100 g, 5 s	100	200	100	200	100	200	100	200	40	90	100	200	40	90	40	90
Ductilidad, 25 °C, 5 cm/min, cm	40		40		40		40		40		40		40		40	
Solubilidad en tricloroetileno, %	97,5		97,5		97,5		97,5		97,5		97,5		97,5		97,5	

⁽¹⁾ Este requerimiento de ensayos en muestras representativas puede ser obviado si se logra una aplicación exitosa del material en el campo.

Nota 1: Emulsiones QS-1H deben de cumplir con los requerimientos especificados en ASTM D3910.

Nota 2: Emulsiones QS-1h es utilizado para sistemas de lechadas asfálticas aceleradas Quick slurry seals.

Nota 3: Todas las pruebas referidas a esta tabla se deberán realizar de acuerdo con los métodos ASTM D-244.

Fuente: CR-2010, 2010.

Cuadro 2-6. Especificaciones de aceptación para emulsiones asfálticas catiónicas

Tipo Grado	Rompimiento rápido		Rompimiento medio		Rompimiento lento		Rompimiento acelerado							
	CRS-1		CRS-2		CMS-1		CMS-2h		CSS-1		CSS-1h		CQS-1h	
	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.
Ensayos en emulsiones														
Viscosidad, Saybolt Furol a 25 °C SFS									20	100	20	100	20	100
Viscosidad, Saybolt Furol a 50 °C SFS	20	100	100	400	50	450								
Estabilidad al almacenamiento 24 h, % ⁽¹⁾		1		1		1		1		1		1		1
Demulsibilidad, %	40		40											
Recubrimiento y resistencia al agua														
Recubrimiento, agregado seco					Bueno	Bueno								
Recubrimiento, luego de rociado					Reg.	Reg.								
Recubrimiento, agregado húmedo					Reg.	Reg.								
Recubrimiento, luego de rociado					Reg.	Reg.								
Carga de partícula	Posit.		Posit.		Posit.		Posit.		Posit.		Posit.		Posit.	
Ensayo de malla N° 20, %		0,10		0,10		0,10		0,10		0,10		0,10		0,10
Ensayo de mezclado con cemento, %										2,0		2,0		N/A
Destilación														
Aceite destilado, volumen de emulsión, %		3		3		12		12						
Residuo, %	60		65		65		65		57		57		57	
Ensayos de residuo por destilación														
Penetración a 25 °C, 100 g , 5 s	100	250	100	250	100	250	40	90	100	250	40	90	40	90
Ductilidad, 25 °C, 5 cm/min, cm	40		40		40		40		40		40		40	
Solubilidad en tricloroetileno, %	97,5		97,5		97,5		97,5		97,5		97,5		97,5	

⁽¹⁾ Este requerimiento de ensayos en muestras representativas puede ser obviado si se logra una aplicación exitosa del material en el campo.

Nota 1: Emulsiones QS-1H deben de cumplir con los requerimientos especificados en ASTM D3910.

Nota 2: Emulsiones QS-1h es utilizado para sistemas de lechadas asfálticas aceleradas Quick slurry seals.

Nota 3: Todas las pruebas referidas a esta tabla se deberán realizar de acuerdo con los métodos ASTM D-244.

Fuente: CR-2010, 2010.

2.6.3 Dosificaciones

El CR-2010 recomienda cantidades aproximadas de material para tratamientos superficiales tomando en cuenta el tipo de ligante y el tipo de tratamiento superficial, dichas cantidades se muestran del Cuadro 2-7 al Cuadro 2-12. Se recomienda realizar una comprobación en campo de las dosificaciones y hacer correcciones en caso de que sea necesario.

Cuadro 2-7. Cantidades aproximadas de material para tratamientos superficiales simples

Designación	Tamaño máximo nominal del agregado (mm)	Granulometría del agregado ⁽¹⁾	Cantidad estimada de agregado (kg/m ²) ⁽²⁾	Cantidad estimada de emulsión asfáltica (L/m ²) ⁽³⁾	Cantidad estimada de cemento asfáltico (L/m ²) ⁽³⁾
1A	19,0	B	22 - 27	1,8 - 2,5	1,2 - 1,
1B	12,5	C	14 - 16	1,4 - 2,0	0,9 - 1,4
1C	9,5	D	11 - 14	0,9 - 1,6	0,6 - 1,1
1D	4,75	E	8 - 11	0,7 - 1,0	0,5 - 0,8
	Arenas	F	5 - 8	0,5 - 0,8	0,4 - 0,7

Fuente: FP-03 Metric Units, Standard Specifications for Construction of Roads and Bridges on Federal Highway Projects, FHWA, Estados Unidos.

⁽¹⁾ Ver tabla de rangos requeridos para la granulometría de los agregados en tratamientos superficiales de simple y múltiple capa del CR-2010.

⁽²⁾ Las masa de agregado se refieren a agregados que tienen una gravedad específica de 2,65, determinadas por AASHTO T 84 y AASHTO T 85. Deberán hacerse las correcciones de dosificación cuando el agregado de diseño tenga una gravedad específica bruta sobre 2,75 o por debajo de 2,55; aplicando el método que defina el contratante.

⁽³⁾ Se debe ajustar el contenido de asfalto de la primera aplicación basados en la condición de la carretera.

Fuente: CR-2010, 2010.

Cuadro 2-8. Tasa de aplicación para asfalto rebajado

Aplicación de las cargas	Designación de tratamiento superficial y granulometría del agregado ⁽¹⁾				
	B	C	D	E	F
Aplicación de asfalto rebajado o cemento asfáltico (L/m ²)	1,80	1,15	0,90	0,70	0,70

⁽¹⁾ Ver tabla de rangos requeridos para la granulometría de los agregados en tratamientos superficiales de simple y múltiple capa del CR-

Fuente: CR-2010, 2010.

Cuadro 2-9. Cantidades aproximadas de material para tratamientos superficiales dobles

Designación (espesor)	Tamaño máximo nominal del agregado (mm)	Granulometría del agregado (1)	Cantidad estimada de agregado (kg/m ²) (2)	Cantidad estimada de emulsión asfáltica (L/m ²) (3)	Cantidad estimada de cemento asfáltico (L/m ²) (3)
2A (12,5 mm)					
1era Aplic.	9,5	D	14 - 19	0,9 - 1,4	0,5 - 1,0
2da Aplic.	4,75	E	5 - 8	1,4 - 1,8	0,8 - 1,3
2B (16,0 mm)					
1era Aplic.	12,5	C	16 - 22	1,4 - 1,8	0,8 - 1,3
2da Aplic.	4,75	E	8 - 11	1,8 - 2,3	1,1 - 1,5
2C (19,0 mm)					
1era Aplic.	19,0	B	22 - 27	1,6 - 2,3	1,0 - 1,5
2da Aplic.	9,5	D	11 - 14	2,3 - 2,7	1,5 - 1,9

Fuente: FP-03 Metric Units, Standard Specifications for Construction of Roads and Bridges on Federal Highway Projects, FHWA, Estados Unidos.

(1) Ver tabla de rangos requeridos para la granulometría de los agregados en tratamientos superficiales de simple y múltiple capa del CR-2010.

(2) Las masa de agregado se refieren a agregados que tienen una gravedad específica de 2,65, determinadas por AASHTO T 84 y AASHTO T 85.

(3) Se debe ajustar el contenido de asfalto de la primera aplicación basados en la condición de la carretera.

Fuente: CR-2010, 2010.

En el presente estudio se evalúan específicamente las dosificaciones indicadas en el Cuadro 2-10, correspondientes a un tratamiento superficial tipo TS-3, se evalúan los tratamientos con designación 3A y 3B.

Cuadro 2-10. Cantidades aproximadas de material para tratamientos superficiales triples

Designación (espesor)	Tamaño máximo nominal del agregado (mm)	Granulometría del agregado (1)	Cantidad estimada de agregado (kg/m ²) (2)	Cantidad estimada de emulsión asfáltica (L/m ²) (3)	Cantidad estimada de cemento asfáltico (L/m ²) (3)
3A (12,5 mm)					
1era Aplic.	9,5	D	14 - 19	0,9 - 1,4	0,5 - 1,0
2da Aplic.	4,75	E	5 - 8	1,1 - 1,6	0,7 - 1,2
3ra Aplic.	Arenas	F	5 - 8	0,9 - 1,4	0,5 - 1,0
3B (16,0 mm)					
1era Aplic.	12,5	C	16 - 22	0,9 - 1,4	0,5 - 1,0
2da Aplic.	9,75	D	8 - 11	1,4 - 1,8	0,8 - 1,3
3ra Aplic.	4,75	E	5 - 8	0,9 - 1,4	0,5 - 1,0
3C (19,0 mm)					
1era Aplic.	19,0	B	22 - 27	1,1 - 1,6	0,7 - 1,2
2da Aplic.	9,5	D	11 - 14	1,4 - 1,8	0,8 - 1,3
3ra Aplic.	4,75	E	5 - 8	1,1 - 1,6	0,7 - 1,2

Fuente: FP-03 Metric Units, Standard Specifications for Construction of Roads and Bridges on Federal Highway Projects, FHWA, Estados Unidos.

(1) Ver tabla de rangos requeridos para la granulometría de los agregados en tratamientos superficiales de simple y múltiple capa del CR-2010.

(2) Las masa de agregado se refieren a agregados que tienen una gravedad específica de 2,65, determinadas por AASHTO T 84 y AASHTO T 85.

(3) Se debe ajustar el contenido de asfalto de la primera aplicación basados en la condición de la carretera.

Fuente: CR-2010, 2010.

Cuadro 2-11. Cantidades aproximadas de material para tratamientos superficiales múltiples usando cemento asfáltico o asfalto rebajado

Secuencia de operación ^{(1) (2)}	Designación de tratamiento superficial y granulometría de agregado				
	AT - 19	AT - 27	AT - 33	AT - 38	AT - 61
Primera capa.					
Aplicar cemento asfáltico (L/m ²)	1,00	1,15	1,15	1,35	0,90
Distribuir agregado (kg/m ²)					
Granulometría D	13				
Granulometría C		19			
Granulometría B			21	27	
Granulometría A					38
Segunda capa.					
Aplicar cemento asfáltico (L/m ²)	0,60	1,15	1,35	1,55	1,80
Distribuir agregado (kg/m ²)					
Granulometría E	6	8			
Granulometría D			7	11	
Granulometría C					11
Tercera capa.					
Aplicar cemento asfáltico (L/m ²)				0,70	0,90
Distribuir agregado (kg/m ²)					
Granulometría E				5	7
Cuarta capa.					
Aplicar cemento asfáltico (L/m ²)					0,90
Distribuir agregado (kg/m ²)					
Granulometría F ⁽³⁾					5
B Total					
Cemento asfáltico (L/m ²)	1,60	2,30	2,75	2,90	4,56
Agregado (kg/m ²)	19	27	33	38	61

⁽¹⁾ Ver tabla de rangos requeridos para la granulometría de los agregados en tratamientos superficiales de simple y múltiple capa del CR-2010.

⁽²⁾ Las masa de agregado se refieren a agregados que tienen una gravedad específica de 2,65, determinadas por AASHTO T 84 y AASHTO T 85. Deberán hacerse las correcciones de dosificación cuando el agregado de diseño tenga una gravedad específica bruta sobre 2,75 o por debajo de 2,55; aplicando el método que defina el contratante.

⁽³⁾ Después de que se concluya la distribución del agregado se incorporará agregado fino (granulometría F) en todas las áreas con cemento asfáltico en aparente exceso.

Fuente: CR-2010, 2010.

Cuadro 2-12. Cantidades aproximadas de material para tratamientos superficiales múltiples usando emulsión asfáltica

Secuencia de operación ⁽¹⁾ ⁽²⁾	Designación de tratamiento superficial y granulometría de agregado				
	AT - 19	AT - 27	AT - 33	AT - 38	AT - 61
Primera capa.					
Aplicar cemento asfáltico (L/m ²)	1,00	1,55	2,00	2,25	1,80
Distribuir agregado (kg/m ²)					
Granulometría D	13				
Granulometría C		17			
Granulometría B			19	21	
Granulometría A					38
Segunda capa.					
Aplicar cemento asfáltico (L/m ²)	1,15	1,15	1,15	1,15	2,00
Distribuir agregado (kg/m ²)					
Granulometría E	6	5	9		11
Granulometría D				11	
Tercera capa.					
Aplicar cemento asfáltico (L/m ²)		1,15	1,15	1,15	1,15
Distribuir agregado (kg/m ²)					
Granulometría E		5	5	6	7
Cuarta capa.					
Aplicar cemento asfáltico (L/m ²)					1,15
Distribuir agregado (kg/m ²)					5
Granulometría F ⁽³⁾					5
B Total					
Cemento asfáltico (L/m ²)	2,15	3,85	4,30	4,55	6,10
Agregado (kg/m ²)	19	27	33	38	61

⁽¹⁾ Ver tabla de rangos requeridos para la granulometría de los agregados en tratamientos superficiales de simple y múltiple capa del CR-2010.

⁽²⁾ Las masa de agregado se refieren a agregados que tienen una gravedad específica de 2,65, determinadas por AASHTO T 84 y

⁽³⁾ Después de que se concluya la distribución del agregado se incorporará agregado fino (granulometría F) en todas las áreas con

Fuente: CR-2010, 2010.

Capítulo 3. Materiales y metodologías de diseño

3.1 Caracterización de los materiales

En el proyecto se utilizó agregado proveniente de Guápiles, específicamente de la confluencia entre el río Toro Amarillo y el río Sucio, donde se ubica el Quebrador Guápiles de la empresa MECO. La emulsión convencional empleada es catiónica de rompimiento rápido y la emulsión modificada consiste en emulsión catiónica de rompimiento rápido modificada con polímero de caucho estireno-butadieno conocido como SBR, ambas fueron fabricadas en el Lanamme UCR.

3.1.1 Características del agregado

Se utilizó agregado con cuatro distintas graduaciones: C, D, E y F, según lo establecido en el CR-2010, cada una se muestra en la Figura 3-1. La distribución granulométrica se muestra en el Cuadro 3-1.

Cuadro 3-1. Granulometría del agregado utilizado

No. de tamiz estándar	Abertura (mm)	Porcentaje pasando (por peso)							
		C		D		E		F	
		Agregado utilizado	CR-2010	Agregado utilizado	CR-2010	Agregado utilizado	CR-2010	Agregado utilizado	CR-2010
3/4"	19,00	100	100 ⁽¹⁾						
1/2"	12,50	99,6	90-100 (3)	100	100 ⁽¹⁾				
3/8"	9,50	18,1	0-35 (5)	98,3	85-100 (3)		100 ⁽¹⁾		100 ⁽¹⁾
No. 4	4,75	0,2	0-12 (3)	0,4	0-35 (5)	100	85-100 (3)	100	85-100
No. 8	2,36				0-8 (3)	0,0	0-23 (4)	60,5	---
No. 200	0,075	0,2	0-1 (1)	0,2	0-1 (1)	0,0	0-1 (1)	0,3	0-10

⁽¹⁾ El procedimiento estadístico no aplica.

() Tolerancia permisible.

Fuente: LanammeUCR, 2011 y CR-2010, 2010.

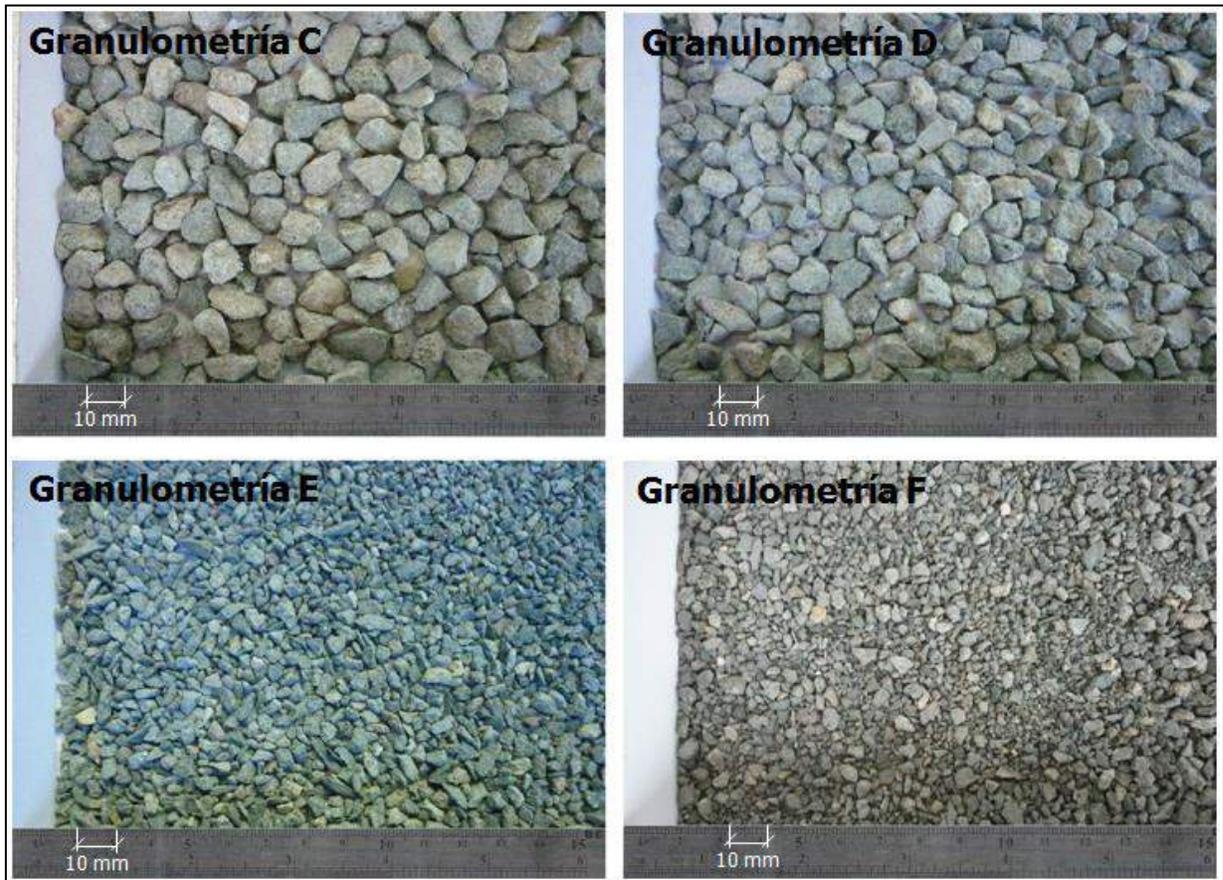


Figura 3-1. Granulometrías utilizadas

Como se observa en la Figura 3-1, el agregado utilizado es altamente cúbico. A este agregado se le realizó ensayos para caracterización, en el Anexo 1 se muestran los resultados obtenidos de los ensayos. Los resultados de la caracterización se muestran en el Cuadro 3-2.

Cuadro 3-2. Características del agregado utilizado

Característica	Granulometría				
	C	D ⁽¹⁾	E	F ⁽¹⁾	
Gravedad específica	Gs	2,80	2,79	2,81	2,78
	Gbs	2,67	2,65	2,64	2,63
	Gbss	2,71	2,70	2,70	2,69
Densidad	Ds (kg/m ³)	2789	2781	2802	2776
	Dbss (kg/m ³)	2659	2648	2630	2624
	Dbss (kg/m ³)	2705	2695	2691	2679
Absorción (%)		1,7%	1,8%	2,3%	2,1%
Peso unitario envarillado (kg/m ³)	Promedio	1485	1504	1389	1484
	Desv. Est.	11,01	1,52	0,95	7,04
Peso unitario suelto (kg/m ³)	Promedio	1440	1379	1333	1382
	Desv. Est.	2,40	2,59	5,11	2,59
Vacíos en el agregado envarillado (%)	Promedio	44,3%	43,1%	47,3%	43,4%
	Desv. Est.	0,41%	0,06%	0,04%	0,27%
Vacíos en el agregado suelto (%)	Promedio	46,0%	47,8%	49,4%	47,3%
	Desv. Est.	0,09%	0,24%	0,19%	0,10%
Abrasión de agregado en la máquina de los Ángeles	Tipo de abrasión	C			
	Desgaste (%)	23,8%			
Índice de durabilidad	Muestra 1	90		98	
	Muestra 2	90		96	
	Muestra 3	90		97	
Porcentaje de arcillas y partículas friables	3,46%		12,68%		
Porcentaje de agregado con cara fracturada por masa	1 cara	0%		0%	
	2 o más caras	100%		100%	

⁽¹⁾ Proporcionado por LanammeUCR, 2011.

3.1.2 Características de las emulsiones asfálticas

Las emulsiones utilizadas en el proyecto fueron fabricadas en el LanammeUCR utilizando como emulsificante el Redicote EM44A fabricado por Akszo Nobel, la ficha técnica del producto se presenta en el Anexo 2. Para la emulsión modificada se utilizó el aditivo Butonal NX 1138 fabricado por BASF como polímero, en el Anexo 3 se presenta la ficha técnica. El asfalto utilizado corresponde a un asfalto tipo AC 30, comercializado por la Refinadora Costarricense de Petróleo (RECOPE).

Para hacer las emulsiones empleadas se utilizó un molino coloidal de un litro de capacidad. La formulación para realizar la emulsión convencional se muestra en el Cuadro 3-3, en el Cuadro 3-4 se muestra la formulación utilizada en la fabricación de la emulsión modificada con polímero.

Cuadro 3-3. Formulación, emulsión CRS-1

Agua	39,65%
Emulsificante (Redicote EM 44A)	0,25%
HCl (37 % de concentración)	0,10%
Asfalto (AC 30)	60,00%
Total	100,00%

Cuadro 3-4. Formulación, emulsión CRS-P

Agua	37,80%
Emulsificante (Redicote EM 44A)	0,25%
HCl (37 % de concentración)	0,10%
SBR (Butonal NX 1138)	1,85%
Asfalto (AC 30)	60,00%
Total	100,00%

Para fabricar la emulsión CRS-1 primero se realizó la fase jabonosa, conformada por agua, emulsificante y ácido clorhídrico. Se utilizó ácido clorhídrico con 37% de concentración y se procuró que el potencial de hidrógeno (pH) de la fase jabonosa tuviera un valor de 2 (según la formulación del emulsificante). Posteriormente, la fase jabonosa a 60 °C de temperatura se incorporó en el molino coloidal, el cual fue lavado previamente con agua a 60 °C y fase jabonosa a la misma temperatura. Por último se agregó el asfalto a 135 °C en el molino junto con la fase jabonosa y finalmente se extrajo la emulsión asfáltica.

La emulsión modificada fue realizada siguiendo los mismos pasos descritos anteriormente, excepto que el polímero fue agregado a la fase jabonosa justo antes de incorporarla al molino coloidal. La cantidad de polímero se calculó como 2% de la cantidad de asfalto, tomando en cuenta que el contenido de sólidos del Butonal NX 1138 es de 65 %. En la Figura 3-2 se ilustra gráficamente el proceso de realización de las emulsiones asfálticas empleadas.

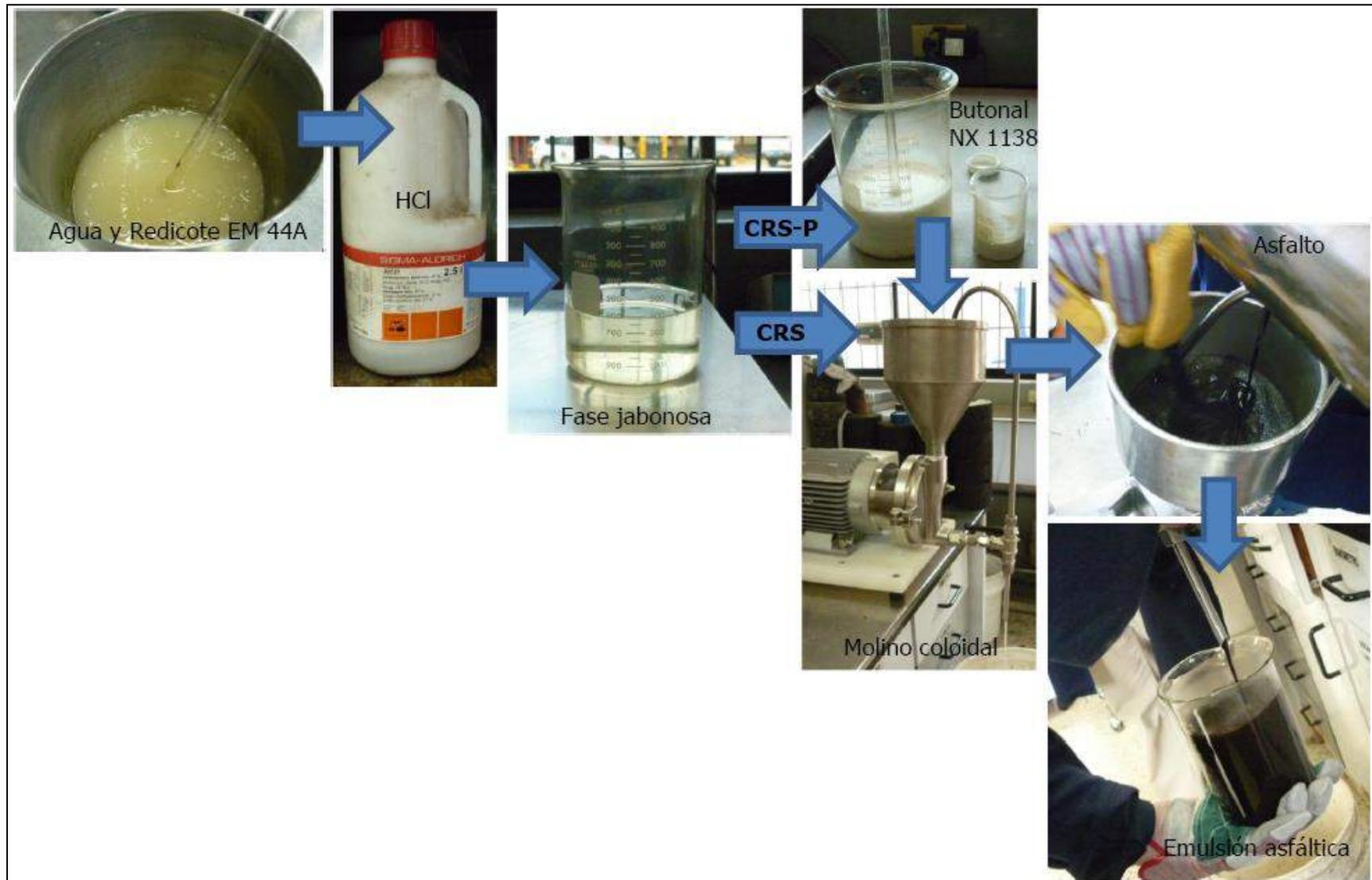


Figura 3-2. Proceso de fabricación de las emulsiones utilizadas

A las emulsiones utilizadas se les realizó una caracterización para conocer las propiedades de cada una, en el Cuadro 3-5 se muestran los resultados obtenidos. En el Anexo 4 se presentan los datos obtenidos en cada ensayo realizado. Cabe resaltar que para las emulsiones modificadas, no se posee una normativa que defina las características que se deben de cumplir.

Cuadro 3-5. Características de las emulsiones utilizadas

Ensayo	CRS-1	CR-2010 (CRS-1)		CRS-P
		Mín.	Máx.	
Ensayos en emulsiones				
Viscosidad, Saybolt Furol a 50 °C SFS ⁽¹⁾	15 ± 10	20	100	15 ± 10
Estabilidad al almacenamiento 24 h, %	0,2		1	1,5
Demulsibilidad, %	46,1703	40		69,3019
Carga de partícula	Positiva	Positiva		Positiva
Ensayo de malla N° 20, %	0,008		0,10	0,001
Tamaño promedio de partículas (µm) ⁽¹⁾	2,558		10,00	3,492
Destilación				
Aceite destilado, volumen de emulsión, %	0,5		3	0,5
Residuo, %	59,3	60		59,5
Ensayos de residuo por destilación				
Penetración a 25 °C, 100 g , 5 s ⁽¹⁾	52 ± 1	100	250	63 ± 1
Ductilidad, 25 °C, 5 cm/min, cm ⁽¹⁾	100	40		100
Solubilidad en tricloroetileno, % ⁽¹⁾	99,99036 ± 0,04	97,5		99,9302 ± 0,04

⁽¹⁾ Proporcionado por LanammeUCR, 2012.

3.2 Metodologías de diseño

Las metodologías de diseño analizadas dependen de ciertos parámetros de los materiales utilizados, como los mostrados en el Cuadro 2-1. De la caracterización realizada a materiales empleados en la fabricación de las muestras de tratamientos superficial en laboratorio, se obtienen los valores mostrados en el Cuadro 3-6.

Debido a que la absorción del asfalto en el agregado es menor a la absorción del agua, y dado que estas absorciones son del orden de 2 % en el material utilizado, se considera que la absorción de asfalto es menor que 1,5 %. Además se toma la condición de clima tropical, que es la que se presenta en el país, y se asume que la estación climática a la que se construye es en época seca. Los diseños se realizan para un volumen de tránsito de 500 a 1000 vehículos por día, que corresponde al volumen de tránsito para el que generalmente se realizan tratamientos superficiales en Costa Rica.

Cuadro 3-6. Parámetros de diseño utilizados

Parámetros de diseño	Designación 3A			Designación 3B		
	D	E	F	C	D	E
Gravedad específica bruta seca (Gbs)	2,65	2,64	2,63	2,67	2,65	2,64
Peso unitario suelto (kg/m ³)	1379	1333	1382	1440	1379	1333
Agregado	Vacíos en el agregado suelto (%)	47,8%	49,4%	47,3%	46,0%	49,4%
	Índice de Flakiness(%)	0,0%	0,0%	26,2%	6,0%	0,0%
	Absorción de agua (%)	1,8%	2,3%	2,1%	1,7%	1,8%
	Absorción de asfalto (%)	< 1,5%	< 1,5%	< 1,5%	< 1,5%	< 1,5%
	Tamaño medio agregado (mm)	7,1	3,5	2,0	10,6	7,1
Emulsión	Porcentaje de asfalto residual (%)	60%	60%	60%	60%	60%
	Condición superficial	Liso	Capa 2	Capa 3	Liso	Capa 2
Otros	Condición climática	Clima tropical				
	Estación climática de construcción	Verano	Verano	Verano	Verano	Verano
	Volumen de tránsito (veh/día)	500 - 1000	500 - 1000	500 - 1000	500 - 1000	500 - 1000

Mediante las distintas metodologías de diseño, se realiza el diseño de dos tratamientos superficiales tipo TS-3 (designación 3A y 3B). Debido a que se trata de tratamientos múltiples, se toman las proporciones de dosificación de ligante de 30 %, 40 % y 30 %, para la primera, segunda y tercera capa, respectivamente, con base en la cantidad total de asfalto obtenida de los diseños teóricos. Estas proporciones corresponden a las utilizadas en las dosificaciones recomendadas por el CR-2010.

A excepción de la metodología de Texas DOT, la tasa de aplicación de emulsión asfáltica se determina al dividir la cantidad obtenida de asfalto entre la cantidad de asfalto residual de la emulsión, que en este caso es 60 %.

3.2.1 Método de Hanson

3.2.1.1 Dosis de agregado

Según los principios establecidos por Hanson, la dimensión mínima promedio será el promedio del espesor final del tratamiento superficial, y el volumen final corresponderá a 20% de vacíos y 80% de agregado. Por lo tanto, el espesor final de agregado se puede expresar como el 80% de la dimensión mínima promedio, con esto se puede obtener la tasa de aplicación de agregado mediante la Ecuación 3-1.

$$Q = 0,80 \cdot G \cdot H \cdot E \quad \text{Ecuación 3-1}$$

Donde,

Q= Dosis del agregado en kg/m².

G= Gravedad específica bruta seca.

H= Dimensión mínima promedio del agregado (mm).

$$H = \frac{T_m}{1,139285 + 0,011506(FI)} \quad \text{Ecuación 3-2}$$

Donde,

T_m= Tamaño medio del agregado, abertura del tamiz teórico por el cual pasa el 50% del agregado (mm).

FI= Índice Flakiness (%), porcentaje en peso de partículas que tienen su dimensión mínima inferior a 0,6 veces la dimensión media del agregado.

E= Factor de desperdicio, mostrado en el Cuadro 3-7.

Cuadro 3-7. Factor de desperdicio

Desperdicio	Factor de desperdicio
5%	1,05
4%	1,04
3%	1,03
2%	1,02

Fuente: Instituto del Asfalto, 1979.

3.2.1.2 Dosis de ligante

La dosis de ligante se obtiene de la cantidad de vacíos, que corresponden al 20 % de la dimensión mínima promedio, y del porcentaje de vacíos que deben ser llenados con asfalto, que depende de la cantidad de tráfico que se tenga, según indican los principios de Hanson. Por lo tanto, la tasa de aplicación del ligante se calcula con la Ecuación 3-3.

$$L = 0,20 \cdot H \cdot T + P \quad \text{Ecuación 3-3}$$

Donde,

L= Dosis de aplicación de asfalto en L/m².

H= Dimensión mínima promedio del agregado (mm).

T= Factor de tráfico, mostrado en el Cuadro 3-8.

P= Factor de corrección por textura superficial en L/m² (Cuadro 3-9).

Cuadro 3-8. Factor de tráfico

Tráfico vehicular por día	< 100	100 - 500	500 - 1000	1000 - 2000	> 2000
Factor de tráfico ⁽¹⁾	0,85	0,75	0,70	0,65	0,60

⁽¹⁾ Expresa en forma decimal el porcentaje de vacíos que deben de ser llenados con asfalto.

Nota: Estos factores no toman en cuenta la absorción de la superficie o del agregado.

Fuente: Instituto del Asfalto, 1979.

Cuadro 3-9. Factor de corrección por textura

Textura de pavimento existente	Factor de corrección por textura (L/m²)
Negra, asfalto exudado	-0,04 a -0,27
Lisa, no porosa	0,00
Ligeramente porosa y oxidada	0,14
Ligeramente porosa, oxidada y picada	0,27
Gravemente porosa, oxidada y picada	0,40

Fuente: Instituto del Asfalto, 1979.

3.2.2 Método de McLeod

3.2.2.1 Dosis de agregado

Tomando en cuenta ciertos principios de Hanson, McLeod realiza correcciones a las ecuaciones basadas en la observación, con la Ecuación 3-4 se obtienen la tasa de agregado.

$$Q = (1 - 0,4 \cdot V) \cdot H \cdot G \cdot E \quad \text{Ecuación 3-4}$$

Donde,

Q= Dosis del agregado en kg/m².

H= Dimensión mínima promedio del agregado (mm).

V= Vacíos en el agregado condición suelta (forma decimal).

$$V = 1 - \frac{W}{1000 \cdot G} \quad \text{Ecuación 3-5}$$

Donde,

W=Peso unitario suelto del agregado (kg/m³).

G= Gravedad específica bruta seca.

E= Factor de desperdicio, mostrado en el Cuadro 3-7.

3.2.2.2 Dosis de ligante

La dosis de ligante se determina mediante la Ecuación 3-6.

$$L = C \cdot (0,4 \cdot H \cdot T \cdot V + P + A) \quad \text{Ecuación 3-6}$$

Donde,

L= Dosis de aplicación de asfalto en L/m².

C= Factor de corrección por condición climática.

C=0,9 en climas tropicales.

C=1,2 en climas muy fríos.

H= Dimensión mínima promedio del agregado (mm).

V= Vacíos en el agregado condición suelta (forma decimal).

T= Factor de tráfico, mostrado en el Cuadro 3-8.

P= Factor de corrección por textura superficial en L/m² (Cuadro 3-9).

A= Factor de corrección por absorción de asfalto en el agregado en L/m²:

A=0,00 L/m² si la absorción del asfalto en el agregado < 1,5%

A=0,09 L/m² si la absorción del asfalto en el agregado > 1,5%

3.2.3 Método de Linckeheyl (regla del décimo)

Para esta metodología se tiene que D es el tamaño máximo del agregado y d el tamaño mínimo, si el promedio de estos valores (que corresponde al tamaño medio) es mayor que 10 mm las dosificaciones de agregado difieren del material que tiene tamaño medio menor o igual que 10 mm, de acuerdo con la Ecuación 3-7 y la Ecuación 3-8, respectivamente.

3.2.3.1 Dosis de agregado

La dosis de agregado para material que posee un tamaño medio mayor a 10 mm se determina mediante la Ecuación 3-7, mientras que para material con tamaño medio menor o igual a 10 mm, se determina con la Ecuación 3-8.

$$Q = 0,90 \cdot \Delta \quad (\text{Para } \Delta > 10 \text{ mm}) \quad \text{Ecuación 3-7}$$

$$Q = 3 + 0,70 \cdot \Delta (\text{Para } \Delta \leq 10 \text{ mm}) \quad \text{Ecuación 3-8}$$

Donde,

Q= Dosis del agregado en kg/m².

Δ= Tamaño medio del agregado (mm):

$$\Delta = \frac{D+d}{2} \quad \text{Ecuación 3-9}$$

3.2.3.2 Dosis de ligante

La dosis de ligante depende de la dosis de agregado, se calcula con la Ecuación 3-10.

$$L = 0,10 \cdot Q \quad \text{Ecuación 3-10}$$

Donde,

L= Dosis de aplicación de asfalto en L/m².

Q= Dosis del agregado en kg/m².

3.2.4 Método Kearby modificado (Texas DOT)

El método de Kearby modificado requiere realizar inicialmente la prueba del tablero que consiste en medir la cantidad de agregado necesaria para cubrir un área determinada, en el Cuadro 3-10 se muestran los resultados de la prueba para el material empleado en la fabricación de las muestras de este estudio, en el Anexo 5 se muestran los datos obtenidos del ensayo realizado.

Cuadro 3-10. Resultados de la prueba del tablero

Granulometría	C	D	E	F
Agregado por unidad de área (kg/m ²)	11,70	8,66	5,05	4,10

3.2.4.1 Dosis de agregado

La dosis de agregado se determina mediante la Ecuación 3-11, también es posible calcular la cantidad de agregado en términos de volumen de agregado mediante la Ecuación 3-12.

$$Q = k \quad \text{Ecuación 3-11}$$

$$S = \frac{W}{k} \quad \text{Ecuación 3-12}$$

Donde,

Q= Dosis del agregado en kg/m².

k= Cantidad de agregado obtenida de la prueba del tablero (kg/m²).

S= Dosis del agregado en m²de superficie/m³ de agregado.

W=Peso unitario suelto del agregado (kg/m³).

3.2.4.2 Dosis de ligante

La dosis de ligante se obtiene mediante la Ecuación 3-13.

$$L = E \cdot V \cdot T + P \quad \text{Ecuación 3-13}$$

Donde,

L= Dosis de aplicación de asfalto en L/m².

E= Altura de agregado recubierto por ligante (mm).

$$E = d \cdot e \quad \text{Ecuación 3-14}$$

d= Espesor promedio de capa de agregado (mm).

$$d = 1000 \cdot \frac{k}{W} \quad \text{Ecuación 3-15}$$

e=Porcentaje de recubrimiento del agregado, tomado de la Figura 3-3.

k= Cantidad de agregado obtenida de la prueba del tablero (kg/m²).

W=Peso unitario suelto del agregado (kg/m³).

V= Vacíos en el agregado condición suelta (forma decimal).

T= Factor de tráfico, mostrado en el Cuadro 3-8.

P= Factor de corrección por textura superficial en L/m² (Cuadro 3-9).

En el caso de que se utilicen emulsiones asfálticas, es necesario realizar una corrección según la Ecuación 3-16.

$$L_{emulsión} = L + K \cdot \left(\frac{L}{\%Asfalto\ residual} - L \right) \quad \text{Ecuación 3-16}$$

Donde,

K= Factor de corrección por estación climática.

K=0,4 en verano.

K=0,6 en invierno.

Además se debe de realizar una corrección por temperatura de aplicación de la emulsión, ya que el método parte de una temperatura estándar de 60 °C.

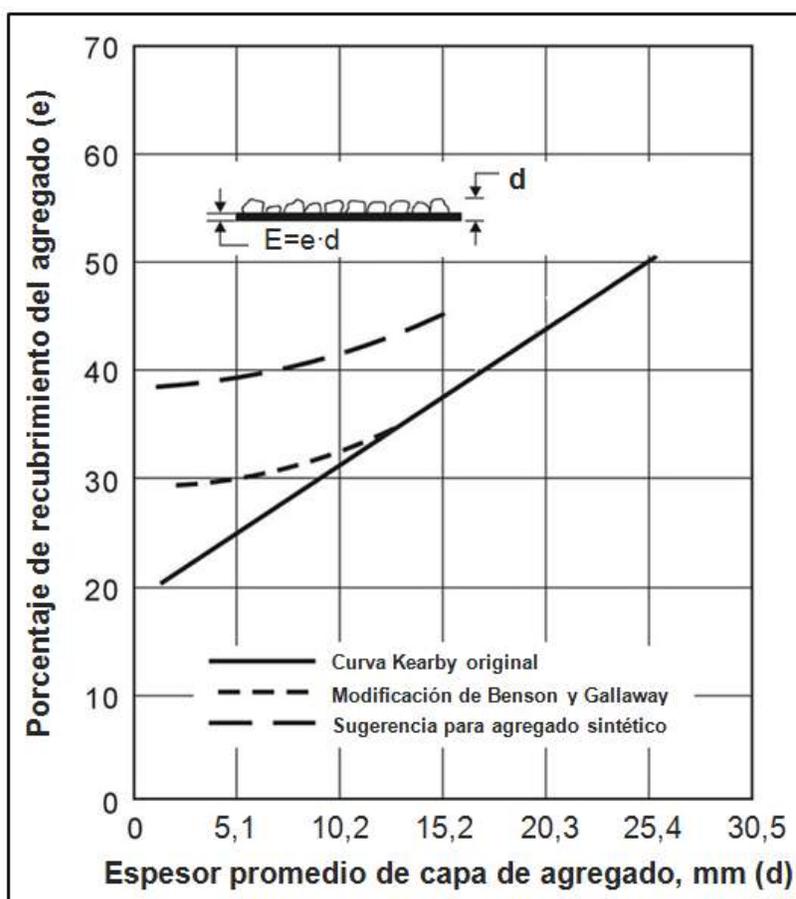


Figura 3-3. Relación entre el porcentaje de recubrimiento y el espesor promedio de capa de agregado

Fuente: NCHRP, 2011.

Modificado por: Autora, 2012.

3.2.5 Metodología ASTM

La norma ASTM D 1369 establece cantidades de material que dependen del tamaño máximo y del peso unitario suelto del agregado. La tasa de aplicación del ligante se determina únicamente con el tipo de tratamiento superficial y el tamaño máximo del agregado, utilizando el Cuadro 3-11.

Para determinar la cantidad de agregado es necesario determinar primero la tasa de aplicación que se toma del Cuadro 3-11, tomando en cuenta el tipo de tratamiento superficial a realizar y el tamaño máximo nominal del agregado. Posteriormente, es posible determinar la cantidad de agregado dependiendo del peso unitario suelto y de la tasa de aplicación determinada anteriormente, esto mediante el Cuadro 3-12.

Para el caso del presente estudio, únicamente es posible emplear el método del ASTM para el tratamiento con designación 3B, ya que las granulometrías empleadas en el tratamiento con designación 3A no se contemplan en el Cuadro 3-11.

Cuadro 3-11. Cantidades de materiales para tratamientos superficiales bituminosos

Tratamiento superficial		Agregado	Material Bituminoso	
Tipo	Aplicación	Tamaño máximo nominal (mm)	Tasa de aplicación típica (m ³ /m ²)	Tasa de aplicación típica (L/m ²) ⁽¹⁾
Simple	Primera capa	25,0 a 12,5	0,017	1,90
		19,0 a 9,5	0,012	1,68
		12,5 a 4,75	0,008	1,04
		9,5 a 2,36	0,006	0,86
		4,8 a 1,2	0,004	0,59
Doble	Primera capa	25,0 a 12,5	0,017	1,90
	Segunda capa	2,5 a 4,75	0,008	1,18
Doble	Primera capa	10,0 a 9,5	0,012	1,68
	Segunda capa	9,5 a 2,36	0,006	0,91
Triple	Primera capa	25,0 a 12,5	0,017	1,90
	Segunda capa	12,5 a 4,75	0,008	1,18
	Tercera capa	4,75 a 1,18	0,004	0,63
Triple	Primera capa	19,0 a 9,5	0,012	1,68
	Segunda capa	9,5 a 2,36	0,006	0,91
	Tercera capa	4,75 a 1,18	0,004	0,63

Nota 1. Los valores son diseños típicos y no necesariamente obtenibles para la precisión indicada.

⁽¹⁾ La experiencia ha demostrado que estas cantidades deben de ser incrementadas ligeramente (de 5 % a 10 %) cuando el material bituminoso a utilizar fue manufacturado para aplicaciones con poco o sin calor.

Fuente: ASTM, 2006.

Cuadro 3-12. Tabla de conversiones aproximadas de peso unitario suelto a kilogramos por metro cuadrado

Peso unitario suelto (kg/m ³)	Cantidad de agregado en kg/m ² según la tasa de aplicación en m ³ /m ²								
	0,0028 m ³	0,0042 m ³	0,0057 m ³	0,0071 m ³	0,0085 m ³	0,0099 m ³	0,0113 m ³	0,0127 m ³	0,0142 m ³
1067,9	3,53	5,42	7,32	9,22	10,85	12,75	14,38	16,27	18,17
1127,2	3,89	5,70	7,59	9,49	11,39	13,29	15,19	17,09	18,99
1186,5	4,07	5,97	8,14	10,04	11,93	14,10	16,00	18,17	20,07
1245,9	4,34	6,24	8,41	10,58	12,48	14,65	16,82	18,99	21,16
1305,2	4,34	6,51	8,95	11,12	13,29	15,46	17,63	19,80	22,24
1364,5	4,61	7,05	9,22	11,66	13,83	16,27	18,44	20,89	23,06
1423,9	4,88	7,32	9,76	11,93	14,38	16,82	19,26	21,70	24,14
1483,2	5,15	7,59	10,04	12,48	15,19	17,63	20,07	22,51	25,23
1542,5	5,15	7,87	10,58	13,02	15,73	18,17	20,89	23,60	26,04
1601,8	5,42	8,14	10,85	13,56	16,27	18,99	21,70	24,41	27,12
1661,2	5,70	8,41	11,12	14,10	16,82	19,80	22,51	25,23	28,21
1720,5	5,70	8,68	11,66	14,65	17,36	20,34	23,33	26,31	29,02
1779,8	5,97	8,95	11,93	15,19	17,90	21,16	24,14	27,12	29,84

Fuente: ASTM, 2006.

3.2.6 Resultados obtenidos

Para las metodologías descritas anteriormente, se determinan cada uno de los parámetros utilizados, estos se resumen en el Cuadro 3-13. En el Apéndice 1 se muestra un ejemplo de cálculo de cada metodología, donde se explica paso a paso el procedimiento y las consideraciones tomadas para obtener los resultados.

Cuadro 3-13. Determinación de parámetros utilizados

Parámetros	Designación 3A			Designación 3B		
	D	E	F	C	D	E
Dimensión mínima promedio H (mm)	6,23	3,07	1,39	8,77	6,23	3,07
Tamaño máximo de agregado D (mm)	9,50	4,75	4,75	12,50	9,50	4,75
Tamaño mínimo de agregado d (mm)	4,75	2,36	0,30	4,75	4,75	2,36
Tamaño medio de agregado Δ (mm)	7,13	3,56	2,53	8,63	7,13	3,56
Resultados prueba del tablero k (kg/m ²)	8,66	5,05	4,10	11,70	8,66	5,05
Espesor promedio de la capa de agregado d' (mm)	6,28	3,79	2,97	8,13	6,28	3,79
Porcentaje de recubrimiento del agregado e	31%	29%	29%	32%	31%	29%
Altura de agregado recubierto por ligante de E (mm)	1,95	1,10	0,86	2,60	1,95	1,10
Factores de corrección						
Por condición climática (C)	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9
Por desperdicio de agregado (E) ⁽¹⁾	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica
Por carga vehicular (T)	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7
Por textura superficial (P) ⁽²⁾	0,0	No aplica	No aplica	0,0	No aplica	No aplica
Por absorción de asfalto (A)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Por estación climática (K)	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4

⁽¹⁾ Debido a que se trata de un tratamiento superficial múltiple no se realiza corrección por desperdicio.

⁽²⁾ Debido a que se trata de un tratamiento superficial múltiple solamente se corrige por textura superficial la primera capa.

Mediante el método de Texas DOT se obtienen alturas finales del agregado (d) con la Ecuación 3-15, que toma en cuenta los resultados de la prueba del tablero y el peso unitario suelto, del Cuadro 3-13 se observa que las alturas obtenidas para cada capa son similares a la dimensión mínima promedio obtenida con la Ecuación 3-2, que solo toma en cuenta el tamaño del agregado y el índice flakiness.

3.2.6.1 Cantidad de agregado

Al aplicar las distintas metodologías en estudio al material utilizado en la preparación de las muestras de laboratorio, se obtienen los resultados mostrados en el Cuadro 3-14. Para la cantidad de agregado. Estos resultados se resumen en los gráficos presentadas en la Figura 3-4 para el TS con designación 3A (primera capa con tamaño máximo nominal de 9,5 mm) y en la Figura 3-5 para el TS con designación 3B (primera capa con tamaño máximo nominal de 12,5 mm).

Cuadro 3-14. Cantidades agregado

Agregado(kg/m ²)		Método de diseño					Promedio	Desviación Estándar
		Hanson	McLeod	Regla del décimo	Texas DOT	ASTM D1369 ⁽¹⁾		
Designación 3A	D	13,21	13,36	7,99	8,66	-	10,80	2,88
	E	6,49	6,51	5,49	5,05	-	5,88	0,73
	F	2,92	2,96	4,77	4,10	-	3,69	0,90
	Total	22,62	22,83	18,24	17,81	-	20,37	2,72
Designación 3B	C	18,74	19,11	9,04	11,70	20,7	15,86	5,15
	D	13,21	13,25	7,99	8,66	10,31	10,68	2,47
	E	6,49	6,51	5,49	5,05	6,43	5,99	0,68
	Total	38,44	38,87	22,51	25,41	37,44	32,53	7,91

⁽¹⁾ El método del ASTM no aplica para el tratamiento con designación 3A

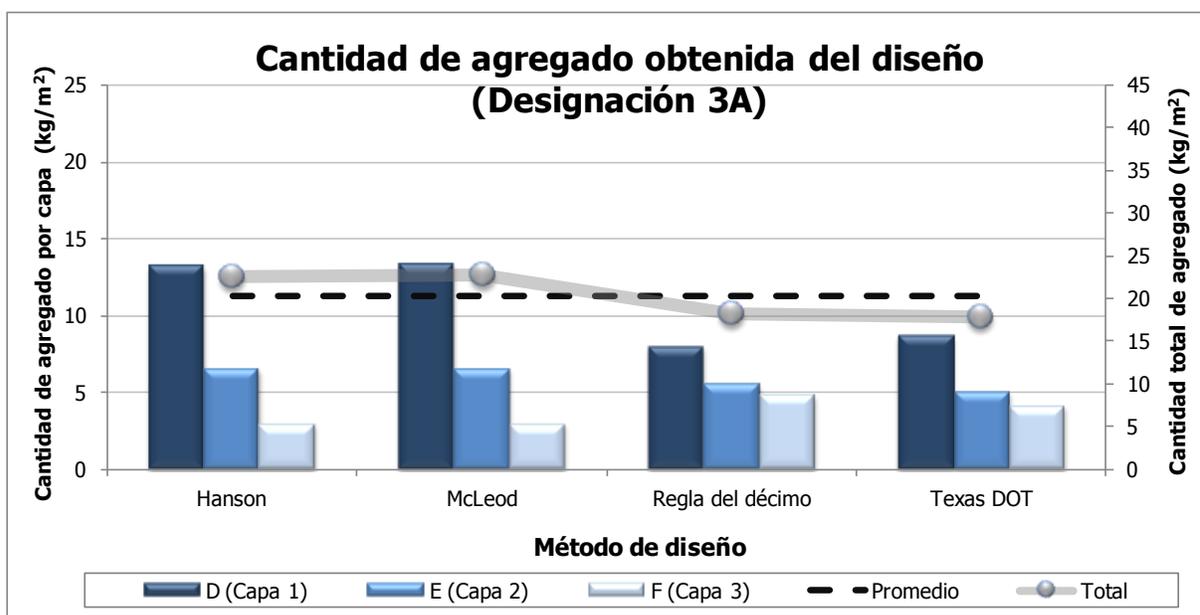


Figura 3-4. Cantidad de agregado obtenida del diseño para el TS designación 3A

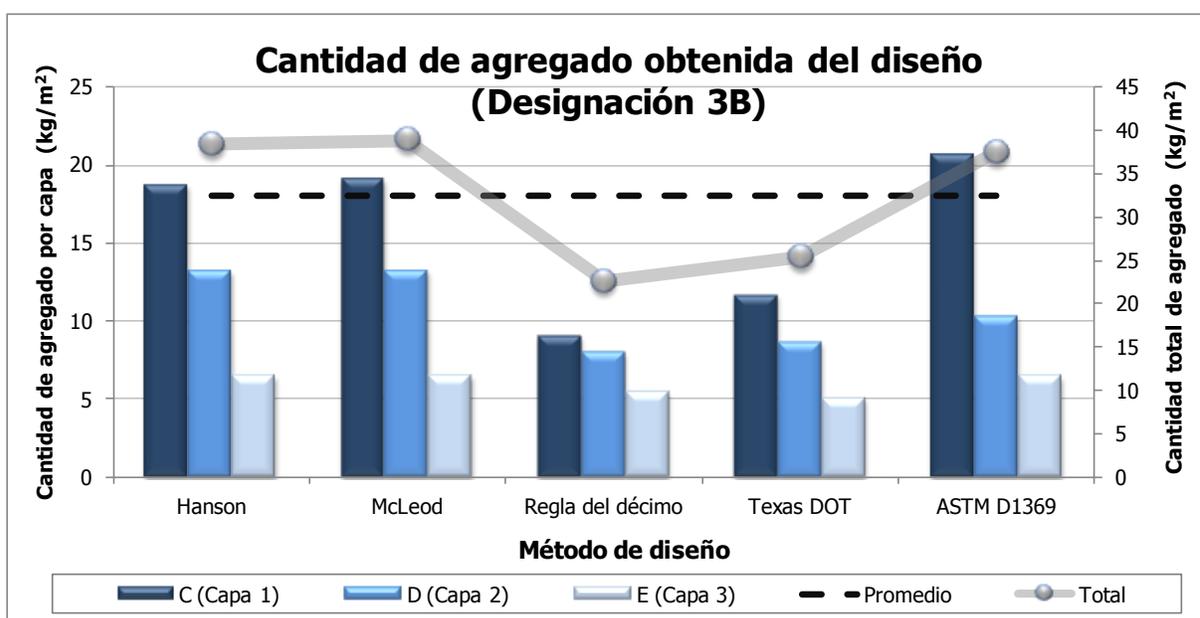


Figura 3-5. Cantidad de agregado obtenida del diseño para el TS designación 3B

De la Figura 3-4 y la Figura 3-5 se observa que la cantidad de agregado obtenida de los métodos de Texas DOT y Linckenheyles la menor, tanto para el TS de la designación 3A como para el de la 3B.

La mayoría de las metodologías de diseño utilizadas, basan sus principios en el concepto de vacíos finales. En el método de Texas DOT se determina la cantidad de agregado mediante

el ensayo del tablero, en el que el agregado se acomoda en posición semi-compactada, colocado de manera que exista una sola capa. Sin embargo, tanto el método de Hanson como el de McLeodtoman en cuenta una condición final del agregado determinada luego de la compactación realizada durante la construcción y por efectos del tráfico de la zona, por lo que ambos consideran menos vacíos finales y esto conlleva a obtener una mayor cantidad de agregado que en el método de Texas DOT.

El método de Hanson y el de McLeod, basados en principios similares, obtienen cantidades parecidas de agregado, la mayor diferencia entre estos dos métodos y las demás metodologías se observa en la cantidad de agregado de la primera capa. Por otro lado, el método de Linckenheyl o regla del décimo, que se basa únicamente en consideraciones de tamaño de agregado y no toma en cuenta aspectos volumétricos del agregado, presenta tasas de aplicación menores que los métodos de Hanson, McLeod y que el del ASTM (en el TS designación 3B).

Par el caso del tratamiento con designación 3B, el método del ASTM presenta una cantidad de agregado similar a los métodos de Hanson y McLeod, sin embargo se presenta una diferencia en cuanto a la distribución del agregado por capa, en el método del ASTM se aprecia que la mayor cantidad de agregado se encuentra en la primera capa.

3.2.6.2 Cantidad de ligante

Los resultados obtenidos para la tasa de aplicación del asfalto se muestran en el Cuadro 3-15. La obtención de las tasas de aplicación de emulsión asfáltica requiere tomar en consideración la cantidad de asfalto residual de la misma, que en este caso corresponde al 60%, los resultados obtenidos se muestran en el Cuadro 3-16. Debido a que se trata de tratamientos superficiales múltiples, es necesario realizar una corrección a la cantidad de ligante en cada capa, que será un porcentaje de la cantidad total obtenida, dicha corrección se muestra también en el Cuadro 3-15 y en el Cuadro 3-16.

Los resultados obtenidos para las dosis de asfalto se resumen en los gráficos mostrados en la Figura 3-6 para el TS designación 3A y en la Figura 3-7 para el TS designación 3B, mientras que para las cantidades de emulsión en la Figura 3-8 y en la Figura 3-9, para los tratamientos con designación 3A y 3B, respectivamente.

Cuadro 3-15. Cantidades de asfalto

Asfalto		Método de diseño					Promedio	Desviación Estándar
		Hanson	McLeod	Regla del décimo	Texas DOT	ASTM D1369 ⁽¹⁾		
Asfalto obtenido (L/m²)								
Designación 3A	D	0,87	0,75	0,80	0,65	-	0,77	0,09
	E	0,43	0,38	0,55	0,38	-	0,44	0,08
	F	0,19	0,17	0,48	0,29	-	0,28	0,14
	Total	1,50	1,30	1,82	1,32	-	1,48	0,24
Designación 3B	C	1,23	1,02	0,90	0,84	1,68	1,13	0,34
	D	0,87	0,78	0,80	0,67	0,91	0,81	0,09
	E	0,43	0,38	0,55	0,38	0,63	0,47	0,11
	Total	2,53	2,18	2,25	1,89	3,22	2,41	0,51
Asfalto corregido (L/m²)								
Designación 3A	D (30 %)	0,45	0,39	0,55	0,39	-	0,45	0,07
	E (40 %)	0,60	0,52	0,73	0,53	-	0,59	0,10
	F (30%)	0,45	0,39	0,55	0,39	-	0,45	0,07
	Total (100 %)	1,50	1,30	1,82	1,32	-	1,48	0,24
Designación 3B	C (30 %)	0,76	0,65	0,68	0,57	0,97	0,72	0,15
	D (40 %)	1,01	0,87	0,90	0,76	1,29	0,97	0,20
	E (30 %)	0,76	0,65	0,68	0,57	0,97	0,72	0,15
	Total (100 %)	2,53	2,18	2,25	1,89	3,22	2,41	0,51

⁽¹⁾ El método del ASTM no aplica para el tratamiento con designación 3A

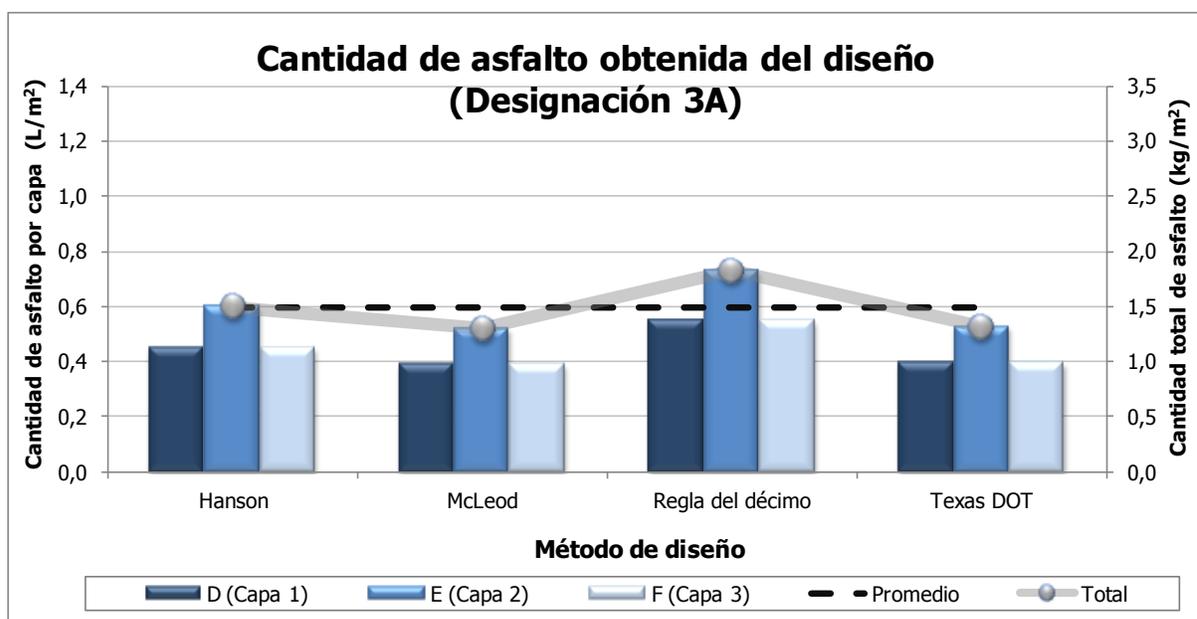


Figura 3-6. Cantidad de asfalto final obtenida del diseño para el TS designación 3^a

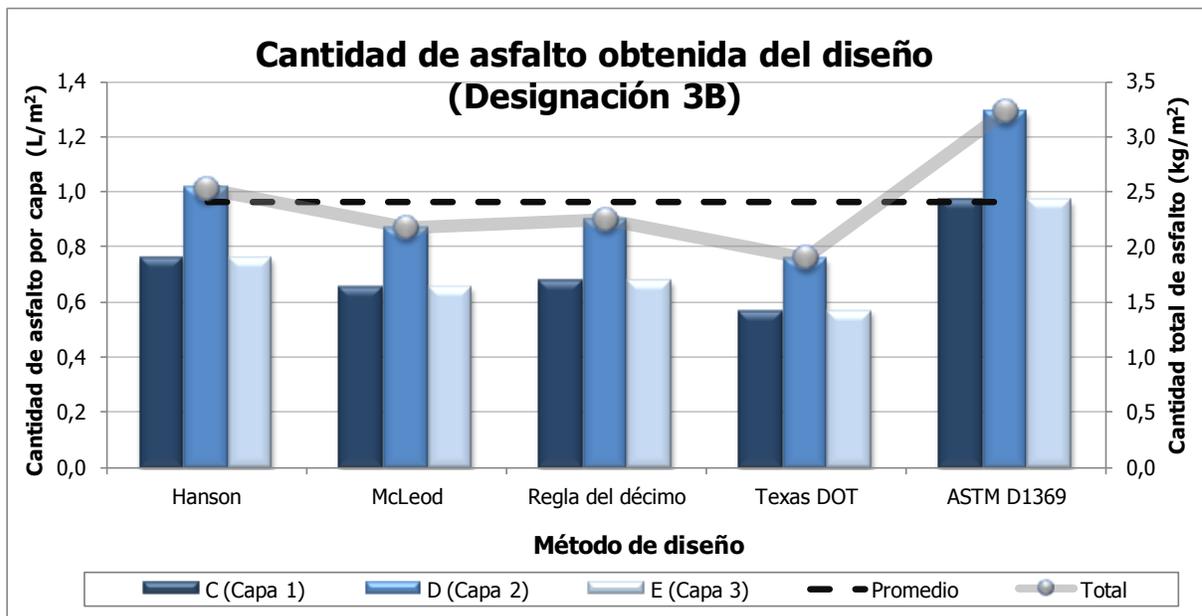


Figura 3-7. Cantidad de asfalto final obtenida del diseño para el TS designación 3B

Cuadro 3-16. Cantidades de emulsión asfáltica

Emulsión asfáltica		Método de diseño					Promedio	Desviación Estándar
		Hanson	McLeod	Regla del décimo	Texas DOT	ASTM D1369 ⁽¹⁾		
Emulsión asfáltica obtenida (L/m²)								
Designación 3A	D	1,45	1,25	1,33	0,82	-	1,22	0,27
	E	0,72	0,64	0,91	0,48	-	0,69	0,18
	F	0,32	0,28	0,79	0,36	-	0,44	0,24
	Total	2,49	2,16	3,04	1,67	-	2,34	0,58
Designación 3B	C	2,05	1,69	1,51	1,06	2,80	1,82	0,65
	D	1,45	1,29	1,33	0,85	1,52	1,29	0,26
	E	0,72	0,64	0,91	0,48	1,05	0,76	0,23
	Total	4,22	3,63	3,75	2,39	5,37	3,87	1,07
Emulsión asfáltica corregida (L/m²)								
Designación 3A	D (30 %)	0,75	0,65	0,91	0,50	-	0,70	0,17
	E (40 %)	1,00	0,87	1,22	0,67	-	0,94	0,23
	F (30%)	0,75	0,65	0,91	0,50	-	0,70	0,17
	Total (100 %)	2,49	2,16	3,04	1,67	-	2,34	0,58
Designación 3B	C (30 %)	1,27	1,09	1,13	0,72	1,61	1,16	0,32
	D (40 %)	1,69	1,45	1,50	0,96	2,15	1,55	0,43
	E (30 %)	1,27	1,09	1,13	0,72	1,61	1,16	0,32
	Total (100 %)	4,22	3,63	3,75	2,39	5,37	3,87	1,07

⁽¹⁾ El método del ASTM no aplica para el tratamiento con designación 3A

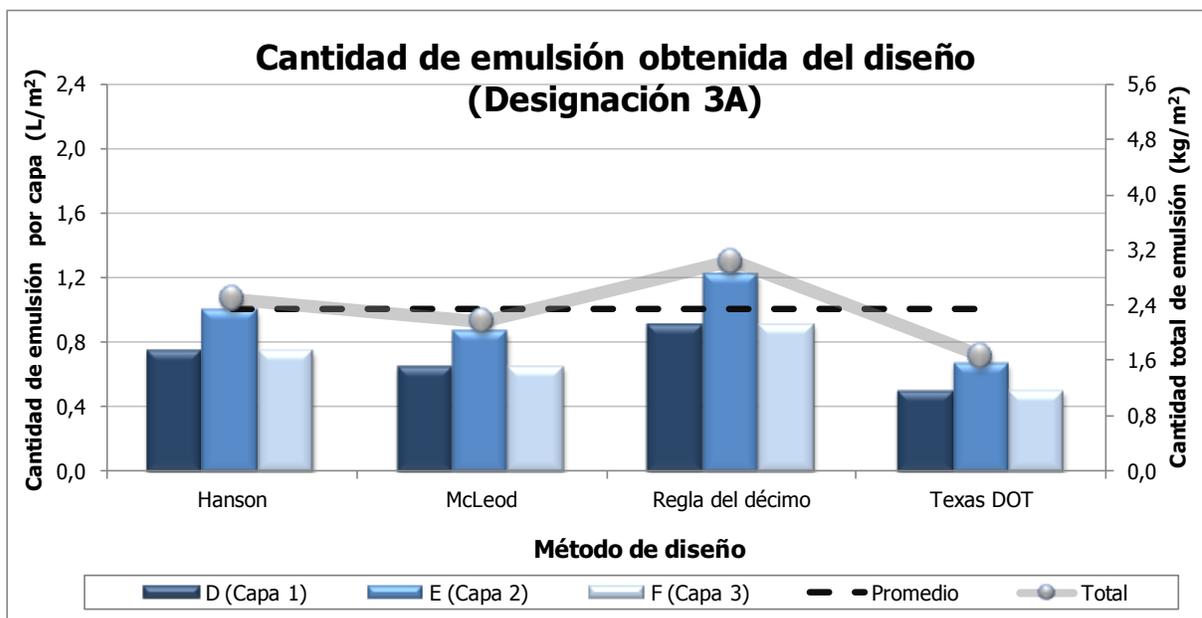


Figura 3-8. Cantidad de emulsión final obtenida del diseño para el TS designación 3A

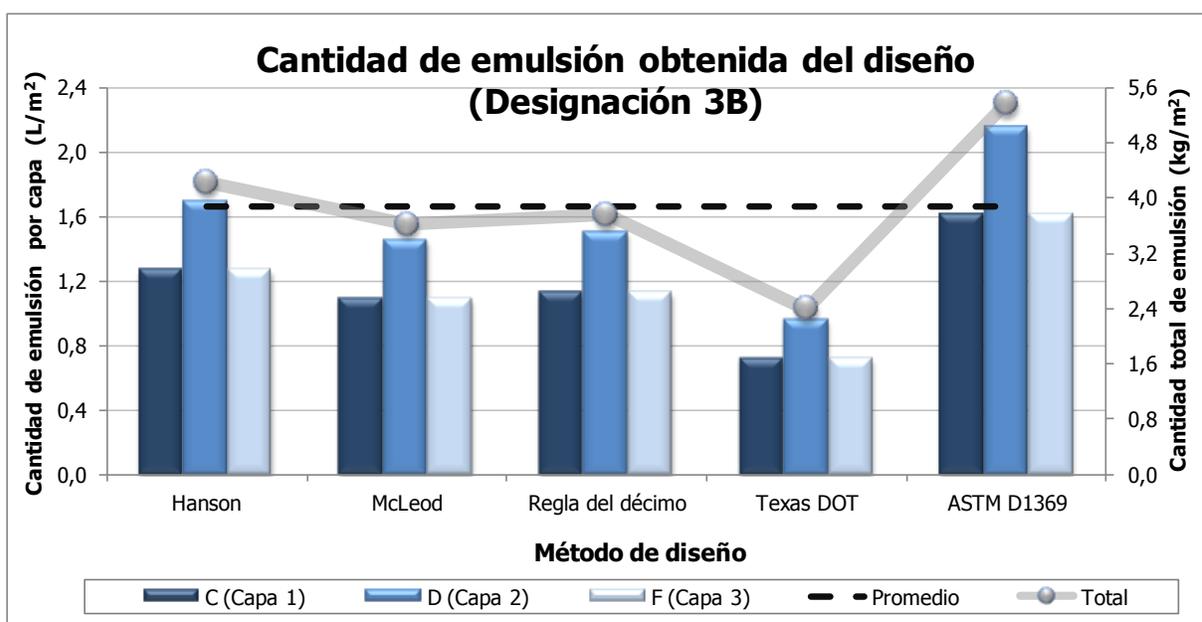


Figura 3-9. Cantidad de emulsión final obtenida del diseño para el TS designación 3B

De la Figura 3-6 y la Figura 3-7 se observa que, a pesar de que el método de Texas DOT considera mayor cantidad de vacíos, la cantidad de asfalto es similar a la obtenida por los métodos de Hanson y McLeod.

El método de McLeod da como resultado cantidades menores de asfalto que el método de Hanson, esto se debe a la corrección hecha por McLeod a la ecuación, basándose en observaciones realizadas, que disminuye la cantidad de vacíos finales y por ende la cantidad de ligante obtenida.

Del método de Linckenhayl o regla del décimo, que utiliza únicamente el tamaño del agregado para obtener las dosificaciones de ligante, se observa que para la granulometría más fina (designación 3A) obtiene valores mayores de ligante en comparación con los otros métodos. Mientras para la granulometría más gruesa (designación 3B), el método de Hanson y McLeod presentan valores superiores de ligante que el obtenido por la regla del décimo. Esto evidencia que los métodos presentan distinta sensibilidad a la variación en la granulometría.

El método del ASTM (para el caso del TS con designación 3B) aporta valores de dosificaciones de asfalto mayores que las demás metodologías, estos valores se encuentran por encima del promedio obtenido para todas las metodologías en estudio.

Como se puede observar en la Figura 3-8 y la Figura 3-9, la corrección realizada para obtener la cantidad de emulsión en la metodología Texas DOT, dio como resultado cantidades de emulsión significativamente menores en comparación con la tendencia observada en las cantidades de asfalto obtenidas. La metodología de Texas DOT, es la única metodología en estudio que presenta una manera distinta de calcular la cantidad de emulsión a partir de la cantidad de ligante obtenida del diseño.

3.2.6.3 Comparación con el CR-2010

Con los resultados obtenidos de las distintas metodologías de diseño evaluadas, es posible realizar una comparación de los resultados con las especificaciones nacionales establecidas en el CR-2010. Para realizar dicha comparación se emplea el Cuadro 2-10 que se refiere a las cantidades aproximadas de materiales para tratamientos superficiales triples según el CR-2010.

En la Figura 3-10 se muestran los resultados obtenidos para la dosis de agregado por capa en el TS de designación 3A (primera capa con tamaño máximo de 9,5 mm). La capa 1 y 3 poseen resultados promedio menores que los rangos establecidos por el CR-2010, mientras que la capa 2 muestra resultados promedio que se encuentran dentro de los rangos de la especificación.

Si se analiza cada metodología por separado, se puede notar que para las capas 1 y 3 todas las metodologías, se encuentran por debajo de los rangos del CR-2010. En la Figura 3-11 se muestra esta tendencia y se observa que, en términos de cantidad total de agregado, ninguna metodología queda ubicada dentro del rango de la especificación. Los métodos de Hanson y McLeod son los que se ubican más cerca del rango establecido por el CR-2010, con valores cercanos al límite mínimo fijado en la especificación.

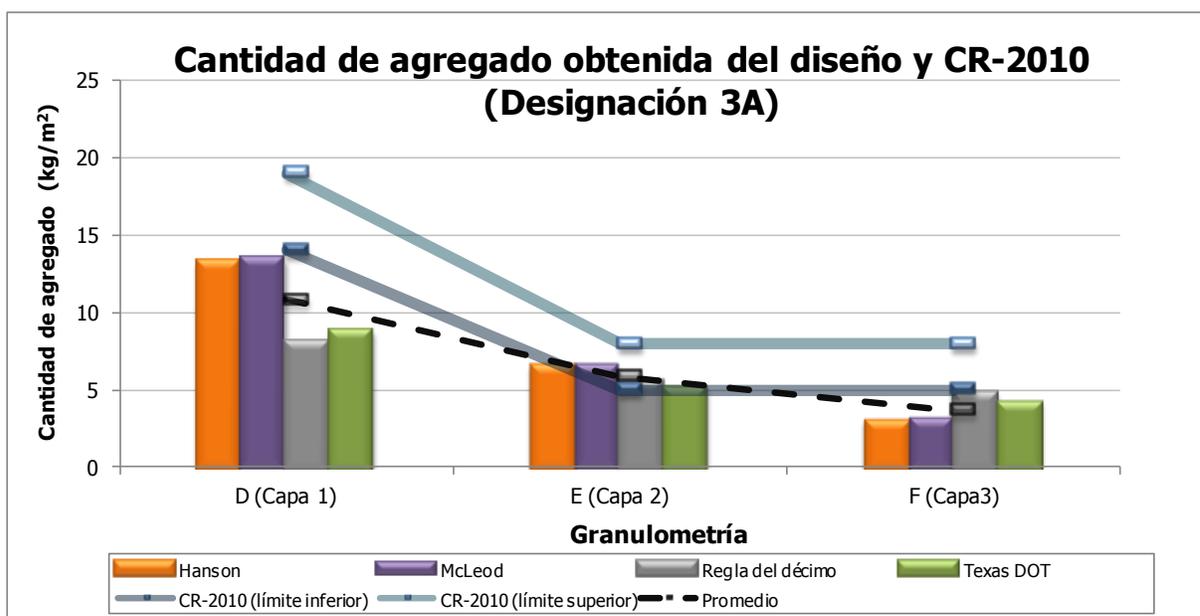


Figura 3-10. Comparación entre la cantidad de agregado obtenida del diseño y la recomendada por el CR-2010, designación 3A

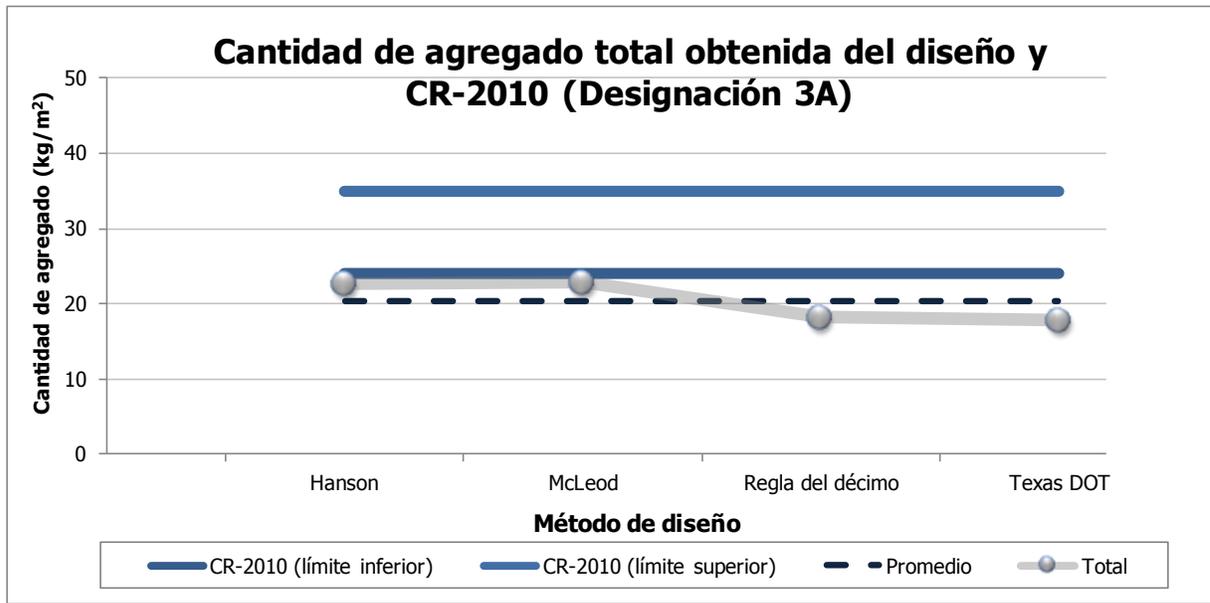


Figura 3-11. Comparación entre la cantidad total de agregado obtenida del diseño y la recomendada por el CR-2010, designación 3A

En cuanto al tratamiento superficial con la designación 3B (primera capa con tamaño máximo de 12,5 mm), en la Figura 3-12 se muestra la cantidad de agregado obtenida por cada capa y la especificación del CR-2010. De la figura se puede observar que para la primera capa, la cantidad obtenida por el método del ASTM sobrepasa el rango establecido, mientras que las metodologías de Texas DOT y regla del décimo se encuentran por debajo de dicho rango.

De la Figura 3-12, se observa que para la segunda capa del tratamiento con designación 3B, las metodologías de Hanson y McLeod sobrepasan en rango establecido por la especificación nacional, mientras que en la tercera capa, todos los métodos se encuentran dentro del rango, a excepción del método de Texas DOT.

En términos de la cantidad total de agregado obtenida por las metodologías de diseño en estudio para el TS de designación 3B, se obtiene que el promedio de estas se encuentra dentro del rango establecido por el CR-2010, como se muestra en la Figura 3-13. Sin embargo, al igual que en los resultados de la designación 3A, el método de Texas DOT y la regla del décimo se encuentra por debajo de la especificación. En el caso del TS de la designación 3B, los métodos del ASTM, Hanson y McLeod se ubican dentro del rango del CR-2010.

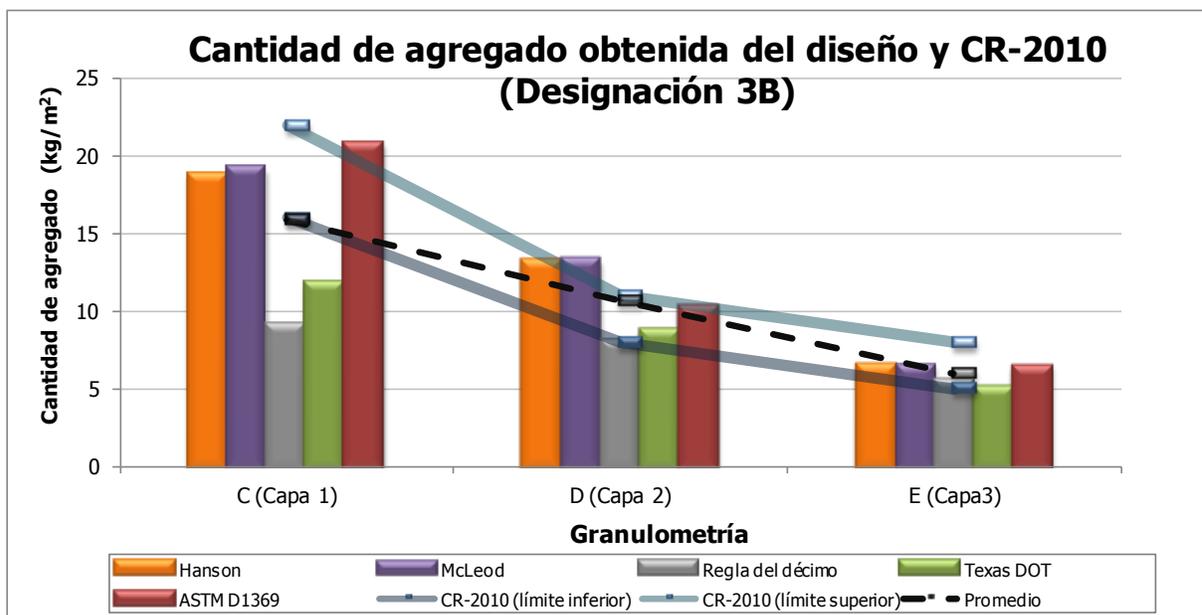


Figura 3-12. Comparación entre la cantidad de agregado obtenida del diseño y la recomendada por el CR-2010, designación 3B

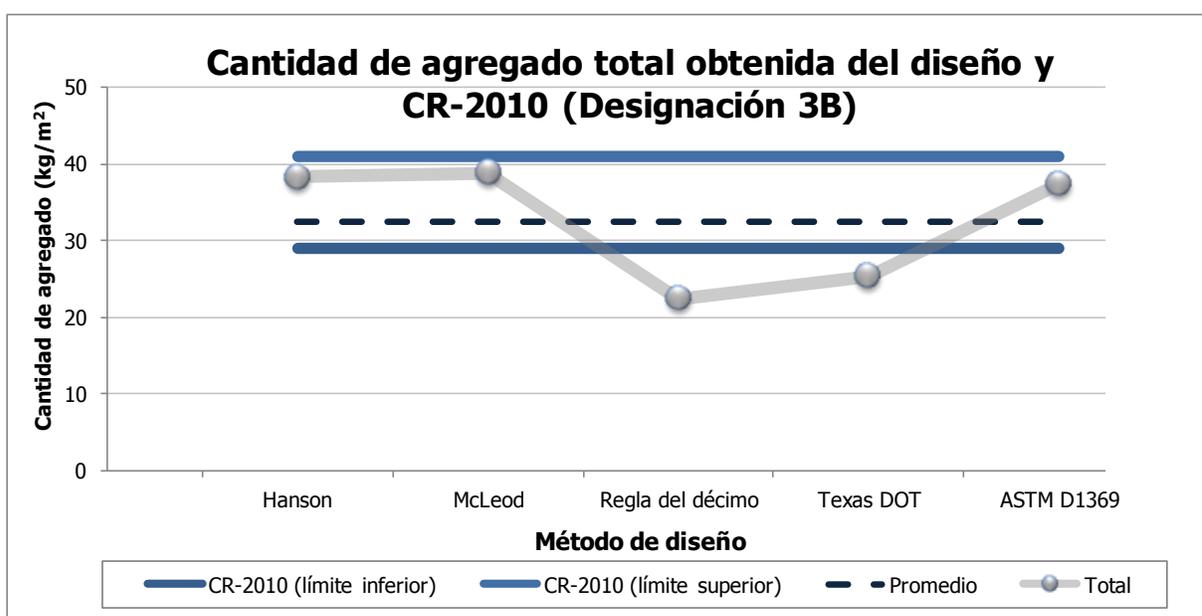


Figura 3-13. Comparación entre la cantidad total de agregado obtenida del diseño y la recomendada por el CR-2010, designación 3B

En cuanto a las cantidades de asfalto, para el TS con designación 3A se obtiene que únicamente la regla del décimo se encuentra dentro de los rangos establecidos por el CR-2010, como se muestra en la Figura 3-14.

En términos de cantidad de asfalto total en la designación 3A, según la Figura 3-15, se observa que las metodologías muestran una tendencia hacia el límite inferior de la especificación nacional.

Para el tratamiento superficial con designación 3B, de la Figura 3-16 se observa que las cantidades de asfalto obtenidas por capa para cada metodología, se ubican dentro de la especificación nacional, excepto para la capa 2 del método de Texas DOT.

La cantidad total de asfalto obtenida por cada metodología para el TS de la designación 3B, se encuentra dentro del rango del CR-2010, como se muestra en la Figura 3-17. Este comportamiento se diferencia de la tendencia observada para el TS de designación 3A, que posee tamaño máximo nominal menor, donde las cantidades de ligante promedio obtenida de las metodologías teóricas presentaron una disposición hacia el límite inferior de la especificación.

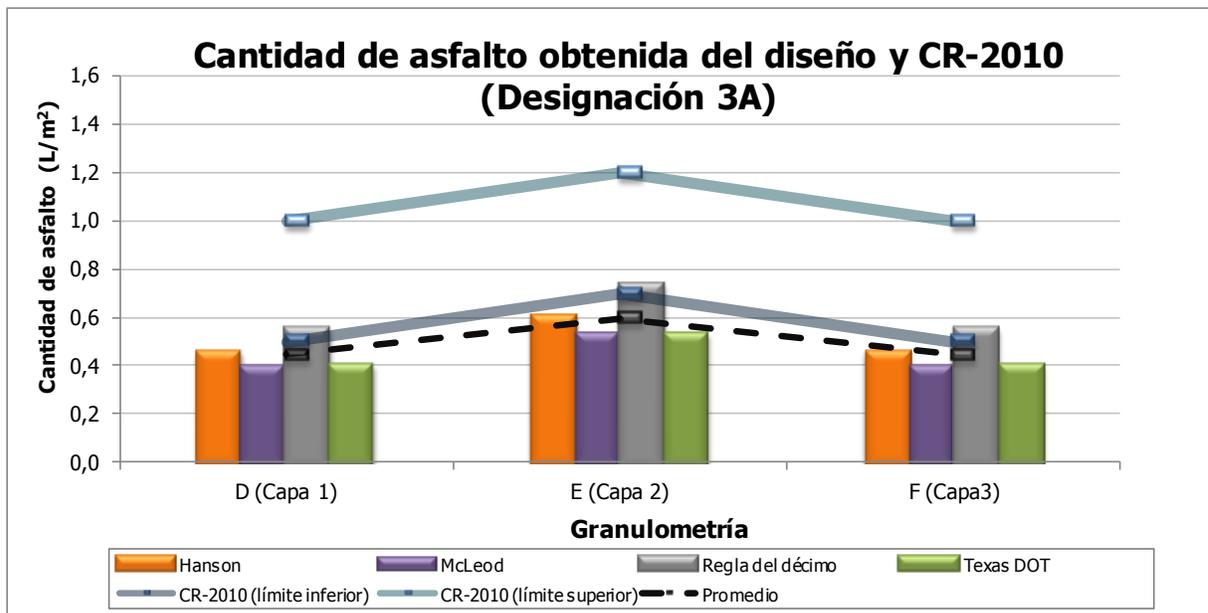


Figura 3-14. Comparación entre la cantidad de asfalto obtenida del diseño y la recomendada por el CR-2010, designación 3A

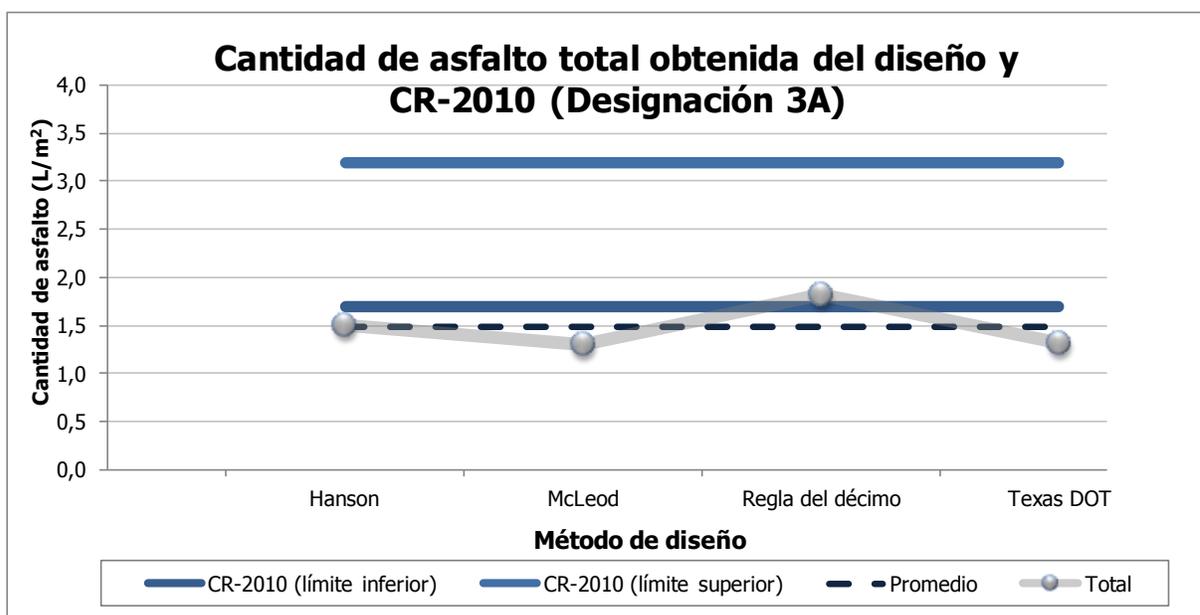


Figura 3-15. Comparación entre la cantidad total de asfalto obtenida del diseño y la recomendada por el CR-2010, designación 3A

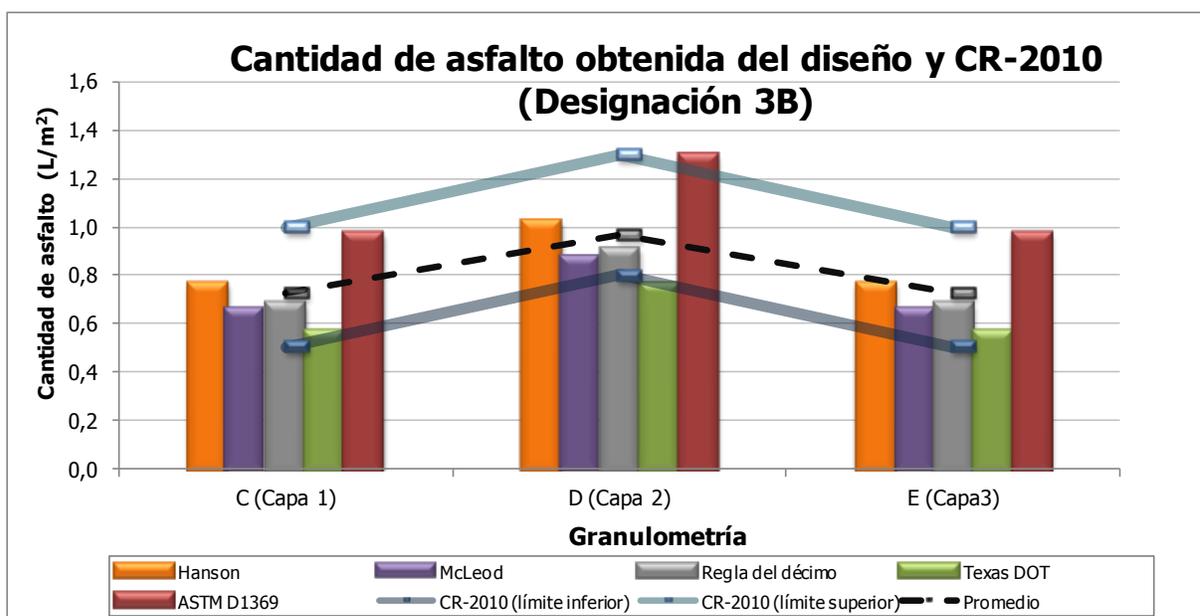


Figura 3-16. Comparación entre la cantidad de asfalto obtenida del diseño y la recomendada por el CR-2010, designación 3B

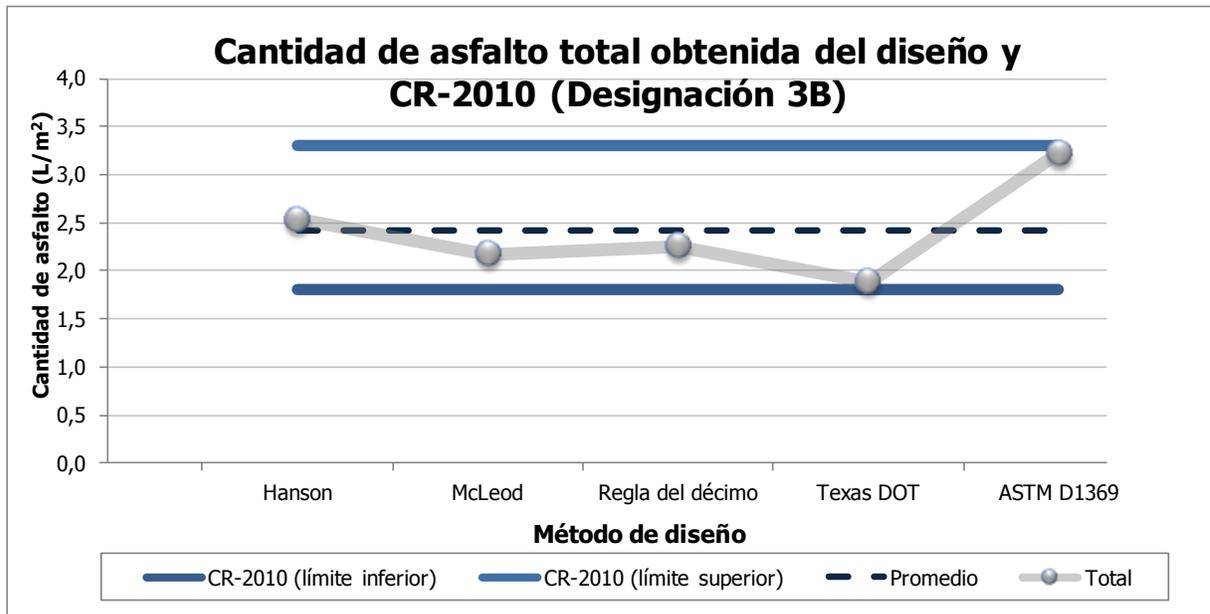


Figura 3-17. Comparación entre la cantidad total de asfalto obtenida del diseño y la recomendada por el CR-2010, designación 3B

Capítulo 4. Métodos de ensayo

Para poder evaluar el desempeño de las muestras de tratamiento superficial en laboratorio, fue necesaria la implementación de metodologías de ensayo que permitieran discriminar el comportamiento del tratamiento superficial de manera comparativa. Para esto se realizó una adaptación a ensayos empleados en sellos de lechada asfáltica, para medir el exceso de asfalto se utiliza el ensayo de rueda cargada (ISSA TB 109), mientras que para medir la pérdida se emplea el ensayo de pista húmeda (ISSA TB 100).

4.1 Preparación de las muestras

Para acondicionar los especímenes de forma que puedan ser ensayadas adecuadamente, se utilizaron moldes distintos para cada ensayo a realizar. Para el ensayo de exceso de asfalto se emplearon moldes rectangulares, como los mostrados en la Figura 4-1, conformados por una placa y un marco de acero que son unidos mediante silicón frío antes de realizar la muestra, con el fin de que no haya un deslizamiento y pueda causar pérdida de emulsión.

Los marcos de acero utilizados en la preparación de las muestras del ensayo de exceso de asfalto, poseen dos alturas diferentes, que dependen de la designación de TS-3 que corresponda, las dimensiones del molde se presentan en la Figura 4-2. El área en la que se colocó el TS, en las muestras del ensayo de pérdida es de $0,0191 \text{ m}^2$.

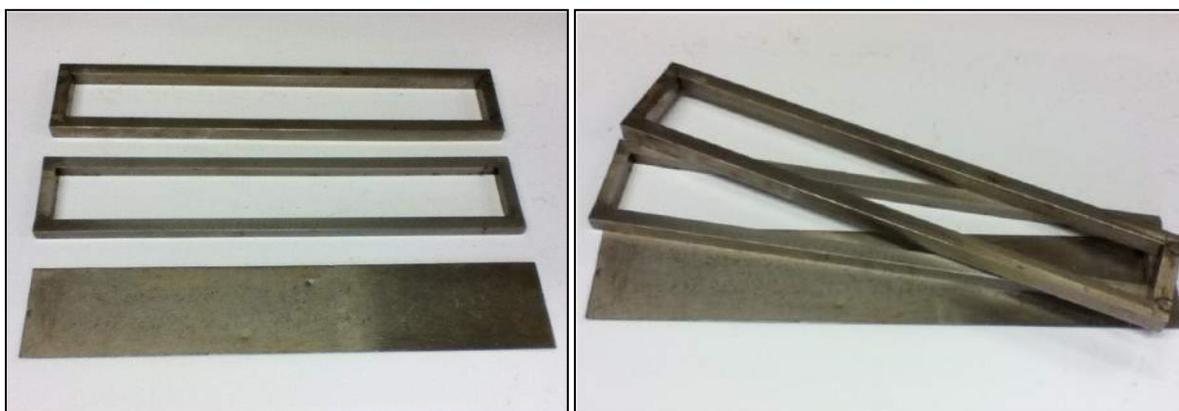


Figura 4-1. Moldes para el ensayo de exceso de asfalto

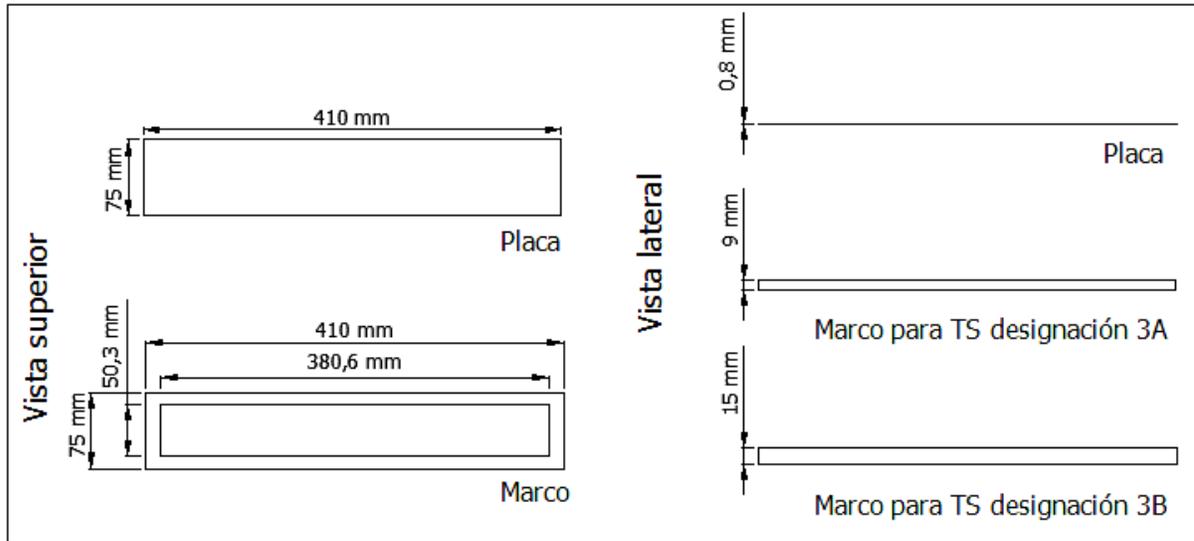


Figura 4-2. Dimensiones de los moldes para el ensayo de exceso de asfalto

Para el ensayo de pérdida se utilizan moldes circulares de acero, como los mostrados en la Figura 4-3. Se tiene un plato al que se le colocan anillos con alturas diferentes dependiendo de la designación de TS-3 utilizada. Para este ensayo, el área en la que se colocó el TS es de $0,0612 \text{ m}^2$, las dimensiones del plato y del anillo se muestran en la Figura 4-4.



Figura 4-3. Moldes para el ensayo de pérdida

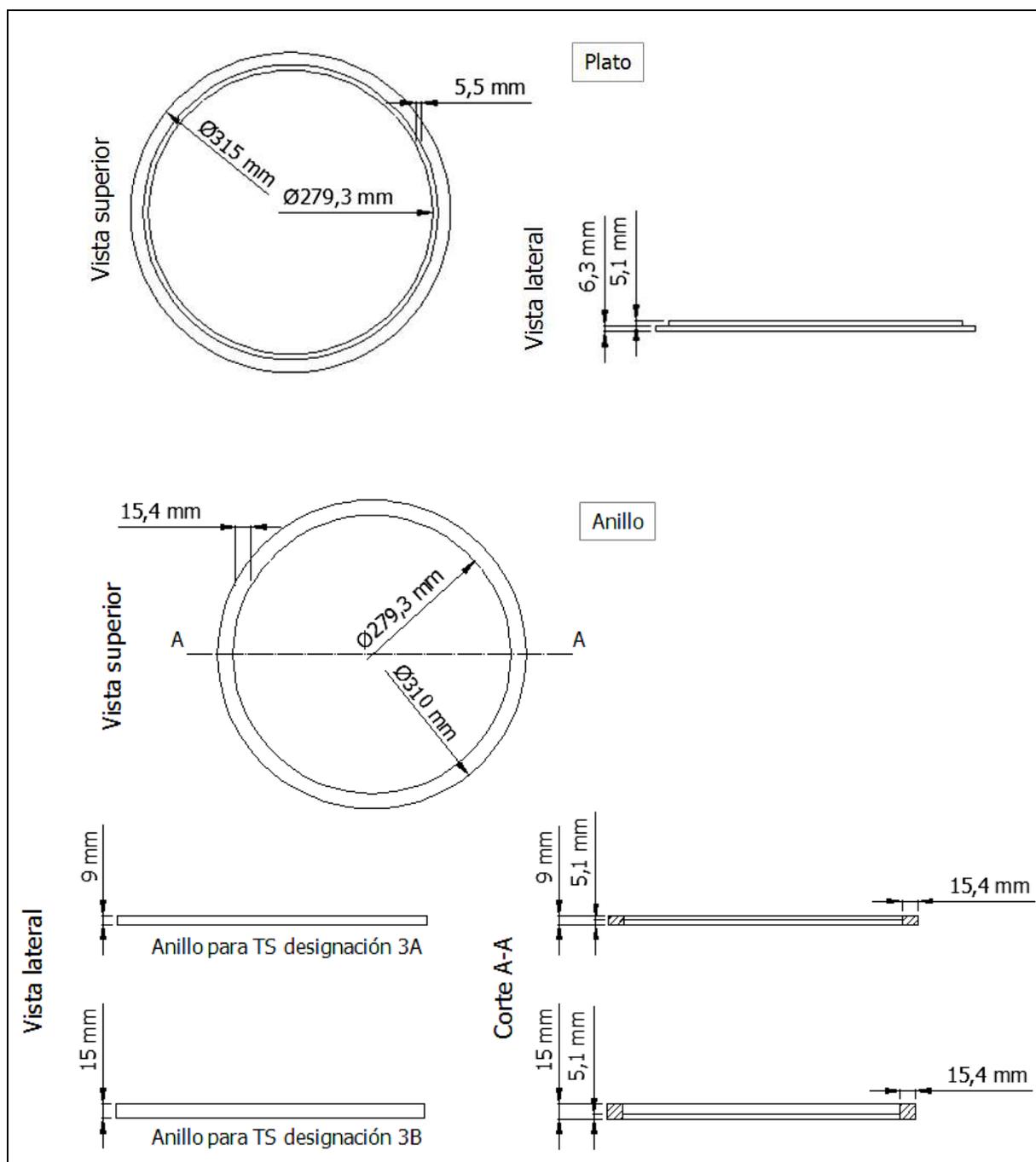


Figura 4-4. Dimensiones de los moldes para el ensayo de pérdida

El procedimiento seguido para la preparación de las muestras de tratamiento superficial está basado en el proceso constructivo utilizado en el campo, para poder realizar especímenes que representen al tratamiento de manera cercana a lo que se presenta en los proyectos. Para esto se definieron cuatro procesos, que se repiten para cada capa:

1. Rociado de la emulsión.
2. Colocación del agregado.
3. Compactación.
4. Curado.

En el proceso de rociado se emplea una pistola pulverizadora para poder distribuir la emulsión asfáltica de manera uniforme sobre la superficie del molde utilizado. Con el fin de contabilizar la emulsión esparcida, la muestra es colocada sobre una balanza durante este proceso. Para evitar que caiga emulsión sobre el molde y se contabilice una cantidad incorrecta en la balanza, se utiliza un molde temporal de cartón con la forma del área deseada. La emulsión es esparcida a temperatura ambiente.

La colocación del agregado se realiza de manera manual para el agregado grueso, y mediante un recipiente rectangular como en el mostrado en la Figura 4-5 para el agregado fino, para poder distribuirlo de manera uniforme. El procedimiento se ejecuta inmediatamente después de la colocación de la emulsión. La cantidad de agregado se determinó mediante la realización de una serie de muestras en ensayos preliminares, con las que se obtuvo la cantidad de material necesaria para cubrir adecuadamente el área efectiva del molde para cada capa del tratamiento, en un procedimiento similar al empleado en la prueba del tablero.

Posteriormente se realiza la compactación mediante el compactador de rodillo y utilizando hule de 10 mm de espesor para evitar que el agregado se quiebre. Este hule es colocado debajo del compactador y además se coloca un molde del mismo hule con la forma del área efectiva, el molde de hule se ubica sobre los especímenes para asegurar que la compactación se realice homogéneamente y que la altura de los moldes de los especímenes no afecte la compactación del material que se encuentra en el borde, en la Figura 4-5 se describe este proceso.

La compactación es realizada a una presión de 138 kPa (20 psi) durante dos ciclos de dos pasadas cada uno, esta presión se determinó mediante ensayos preliminares en los que se observó que es la mínima presión, bajo las condiciones en las que se realizan estos especímenes, a la que el material es acomodado adecuadamente sin presentar agregado quebrado.

Después de la compactación, la muestra es colocada en un horno a 40 °C durante 45 min para curar la capa que se está preparando. Posterior a este tiempo, la emulsión ha roto y el agregado ha perdido toda humedad absorbida de la emulsión. Luego de este proceso, la muestra se deja enfriar y todo material no adherido se retira mediante una brocha y se contabiliza, el procedimiento se repite hasta conformar las tres capas del tratamiento.

La muestra de tratamiento superficial con las tres capas colocadas es dejada en el horno a 60 °C durante 14 horas para que pierda totalmente el agua de la emulsión y se cure de manera adecuada.

Finalmente se realiza una compactación final que pretende simular la compactación realizada por el tránsito vehicular, esta compactación se hace de la misma manera que se compacta cada capa, excepto que se efectúan tres ciclos en vez de dos. En la Figura 4-5 se ilustra el procedimiento de fabricación de las muestras.

4.2 Ensayo de medición de pérdida

La medición de la pérdida se realiza mediante un procedimiento similar al de la norma ISSA TB 100, con algunas modificaciones necesarias para adaptar el ensayo utilizado en sellos de lechada asfáltica a tratamientos superficiales.

El equipo utilizado en el ensayo es el siguiente:

- Mezcladora mecánica tipo planetaria, equipada con una cabeza abrasiva de 2,27 kg, plato de montaje con agarraderas rápidas y una bandeja plana de metal.
- Manguera reforzada con hule y con una superficie doble de cuerda capaz de resistir una presión de 2,533 MPa.
- Baño de agua con una temperatura constante controlada a 25 °C ± 1°C.
- Horno a 60 °C ± 3 °C.
- Balanza, capaz de pesar 5000 g en un rango de ± 1,0 g.



Figura 4-5. Proceso de fabricación de las muestras

El procedimiento de ensayo seguido se describe a continuación:

1. Se pesa el espécimen después de la preparación descrita anteriormente, el peso obtenido corresponde al peso inicial seco (P_{is}).
2. La muestra es colocada en un baño con agua a 25 °C durante 60 minutos.
3. Se retira el espécimen del baño y se seca de manera uniforme con un paño de tela, se toma el peso inicial húmedo (P_{ih}).
4. La muestra es colocada en una bandeja con 331 mm de diámetro. Se sujeta la bandeja y el molde de la muestra por medio de los sujetadores a la mezcladora tipo planetaria.
5. Se cubre completamente la muestra con agua a 25 °C y se asegura la cabeza de la manguera de abrasión sobre el eje de la mezcladora.
6. Se descende el sujetador con la manguera hasta que esta gire libremente sobre la superficie del espécimen y se apuntala para darle soporte al ensamblaje durante el ensayo.
7. Se deja girar la manguera sobre la muestra durante 2 minutos, como se muestra en la Figura 4-6.
8. Se quita la muestra de la bandeja y se lava cuidadosamente para quitar los materiales sueltos.
9. El espécimen es secado de manera uniforme con un paño de tela mediante un procedimiento similar al realizado en el paso 3. Se toma el peso de la muestra después de 2 minutos de ensayo (P_{2h}).
10. Se repiten los pasos 4 a 9 para 5 min, 8 min y 10 min de ensayo (correspondientes al paso 7) y se anotan los pesos: P_{5h} , P_{8h} y P_{10h} respectivamente.
11. Se seca la muestra a masa constante en un horno a 60 °C y se anota el peso final seco (P_{fs}).



Figura 4-6. Procedimiento del ensayo de pérdida

Con los datos obtenidos del ensayo se obtienen los siguientes resultados:

- Porcentaje de material perdido en 2 minutos de ensayo (en peso húmedo):

$$PPe_{2h} = \frac{P_{2h} - P_{ih}}{P_{ih}} \cdot 100 \quad \text{Ecuación 4-1}$$

- Porcentaje de material perdido en 5 minutos de ensayo (en peso húmedo):

$$PPe_{5h} = \frac{P_{5h} - P_{ih}}{P_{ih}} \cdot 100 \quad \text{Ecuación 4-2}$$

- Porcentaje de material perdido en 8 minutos de ensayo (en peso húmedo):

$$PPe_{8h} = \frac{P_{8h} - P_{ih}}{P_{ih}} \cdot 100 \quad \text{Ecuación 4-3}$$

- Porcentaje de material perdido en 10 minutos de ensayo (en peso húmedo):

$$PPe_{10h} = \frac{P_{10h} - P_{ih}}{P_{ih}} \cdot 100 \quad \text{Ecuación 4-4}$$

- Gramos de material perdidos en 10 minutos de ensayo (en peso seco):

$$Pe = P_{10s} - P_{is} \quad \text{Ecuación 4-5}$$

- Porcentaje de material perdido en 10 minutos de ensayo (en peso seco):

$$PPe = \frac{P_{10s} - P_{is}}{P_{is}} \cdot 100 \quad \text{Ecuación 4-6}$$

- Pérdida de material por unidad de área:

$$Pa = \frac{Pe}{A_e} \quad \text{Ecuación 4-7}$$

Donde A_e corresponde al área efectiva en la que el hule tiene contacto sobre la muestra y tiene un valor de $0,0366 \text{ m}^2$ correspondiente al área de un círculo de 108 mm de radio. Esta área se determinó mediante medición directa utilizando un cartón y marcando la trayectoria recorrida por el hule mientras se realiza el ensayo, en la Figura 4-7 se muestra el material utilizado para realizar la medición.



Figura 4-7. Determinación del área efectiva en el ensayo de pérdida

4.3 Ensayo de medición del exceso de asfalto

Para la medición del exceso de asfalto se utiliza un procedimiento similar al utilizado para medir el exceso de asfalto en sellos de lechada asfáltica descrito por la norma ISSA TB 109, además se incorpora el análisis de imágenes digitales que fue aplicado a muestras de tratamiento superficial en el Ensayo MMLS3 propuesto por la Universidad del Estado de Carolina del Norte.

El equipo necesario para realizar el ensayo es:

- Máquina de ensayo de rueda cargada conformada por: estructura de acero de canal ajustable, motor de propela de $\frac{1}{3}$ HP, 1750 RPM, eje horizontal reductor de doble salida 40:1, contador de revoluciones, brazos conectados de transmisión ajustable, canal de acero, marco de arena, caja de pesas, pesas y rueda con diámetro exterior de 80 mm, ancho de 24,6 mm y conformada por hule suave.
- Pie de rey.

- Arena Ottawa.
- Cámara fotográfica.
- Horno a $60\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 3\text{ }^{\circ}\text{C}$.
- Balanza, capaz de pesar 5000 g en un rango de $\pm 1,0\text{ g}$.

EL procedimiento seguido para realizar el ensayo se describe a continuación:

1. Se pesa el espécimen después de la preparación descrita anteriormente, el peso obtenido corresponde al peso inicial (P_i).
2. Se miden cinco puntos ubicados en el centro transversalmente y separados equidistantes longitudinalmente, como se muestra en Figura 4-8. En los puntos se mide la profundidad desde la parte superior del molde hasta el tratamiento superficial y se anotan como d_{i1} , d_{i2} , d_{i3} , d_{i4} y d_{i5} .

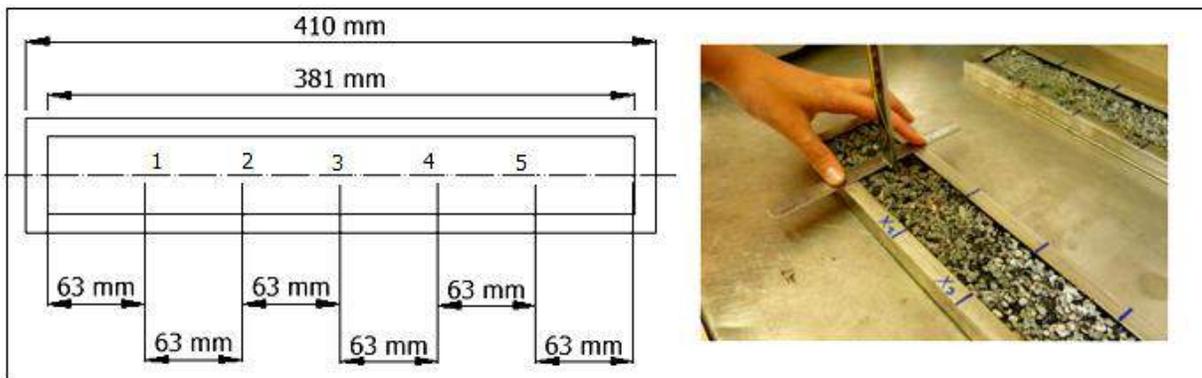


Figura 4-8. Medición de la deformación en la muestra de exceso de asfalto

3. La muestra se lleva a un lugar con luz artificial donde se le toma una fotografía desde una distancia perpendicular a la muestra.
4. El marco de arena se coloca sobre el espécimen y ambos son colocados sobre el plato de montaje firmemente contra los sujetadores.
5. Se inspecciona la rueda y se limpia con acetona. La rueda se coloca sobre la muestra y la caja de pesas se carga con pesas de 56,7 kg de carga total.
6. Se coloca el contador en cero y se enciende el interruptor que inicia la compactación a una tasa de 44 ciclos por minuto, durante el proceso se agrega agua a la muestra para evitar que se adhiera material a la rueda.

7. Después de 1000 ciclos la maquina se detiene, se descarga y la muestra se lava para quitar partículas sueltas y se seca a masa constante a 60 °C, el peso seco (P_s) se anota.
8. De nuevo se mide la profundidad desde la parte superior del molde hasta el tratamiento superficial en los cinco puntos especificados en el paso 2 y se anotan como d_{f1} , d_{f2} , d_{f3} , d_{f4} y d_{f5} .
9. La muestra se lleva nuevamente a un lugar con luz artificial y se le toma otra fotografía.
10. El marco de arena se coloca sobre el espécimen y ambos son colocados de nuevo sobre el plato de montaje firmemente contra los sujetadores.
11. Se esparce uniformemente 100 g de arena Ottawa a 60 °C sobre el espécimen, como se muestra en la Figura 4-9, la llanta se carga inmediatamente y se completan 100 ciclos.
12. La muestra se remueve, se retira toda la arena suelta utilizando una brocha y se pesa (peso final P_f).

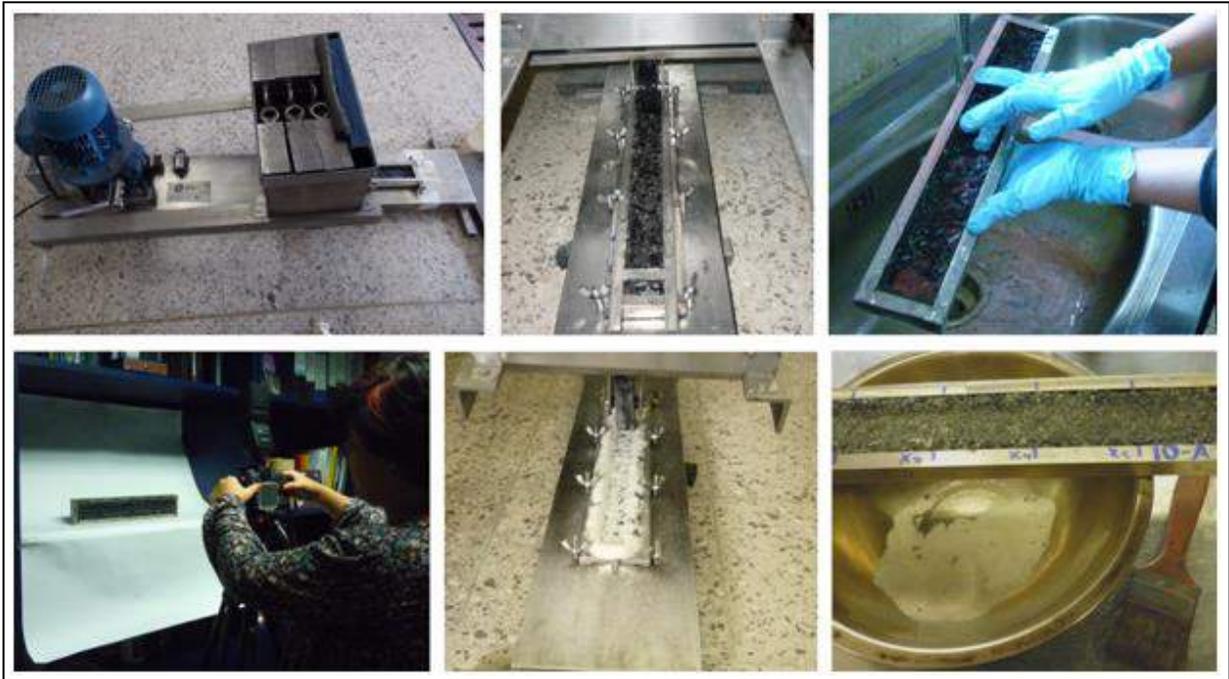


Figura 4-9. Procedimiento del ensayo de exceso de asfalto

Con los datos obtenidos del ensayo se obtienen los siguientes resultados:

- Deformación promedio del espécimen

$$Def = \frac{(d_{i1}-d_{f1})+(d_{i2}-d_{f2})+(d_{i3}-d_{f3})+(d_{i4}-d_{f4})+(d_{i5}-d_{f5})}{5} \quad \text{Ecuación 4-8}$$

- Gramos de arena Ottawa adherida

$$Ad = P_f - P_s \quad \text{Ecuación 4-9}$$

- Arena Ottawa adherida por unidad de área

$$Ada = \frac{Ad}{A_{muestra}} \quad \text{Ecuación 4-10}$$

Donde $A_{muestra}$ corresponde al área total de la muestra de TS que tiene un valor de 0,0191 m².

Con las imágenes obtenidas se realizó un análisis utilizando el programa ArcGIS, en el Apéndice 2 se describen brevemente algunos conceptos básicos del procesamiento de imágenes digitales que fueron utilizados en dicho análisis.

Existen dos tipos principales de clasificación de imágenes por color. El primero corresponde a la clasificación supervisada, en la que el analista identifica las clases requeridas a través de la selección de los grupos de píxeles perteneciente a cada clase (muestra supervisada), el programa de análisis se encarga de localizar los demás píxeles pertenecientes a las clases con base en reglas estadísticas preestablecidas. El segundo tipo es la clasificación no supervisada en la que el programa identifica las clases susceptibles a la separación con base en una serie de reglas estadísticas, sin la participación del analista.

Para realizar el procesamiento de las imágenes digitales de las muestras de tratamiento superficial se utiliza la clasificación supervisada, para estoinicialmente se tomaron las imágenes del espécimen ensayado y las tres bandas que la conforman (rojo, verde y azul) y se recortaron para tomar en cuenta únicamente el área de la huella generada por la rueda del ensayo de rueda cargada, que representa el área de estudio ($A_{estudio}$), en la Figura 4-10 se puede observar un ejemplo de esta área.

Mediante una muestra supervisada se definieron subclases para cada imagen de manera que se pudieran distinguir adecuadamente el área de espécimen que presenta una condición de asfalto expuesto crítico, no crítico o área sin asfalto expuesto, estas categorías son definidas como las clases finales. La condición de área con asfalto expuesto crítico representa la categoría donde el asfalto es visualmente cercano a un estado de exudación, esta condición no se presenta en todos los especímenes.

La muestra supervisada se realizó mediante una inspección visual con la que se pudo determinar cuáles áreas de la imagen correspondían efectivamente a cada clase definida. En la muestra supervisada fue necesario dividir en la mayor cantidad de subclases posibles, esto para lograr una mejor discriminación de cada área por parte del programa.

Posteriormente se efectuó una clasificación supervisada, donde se obtuvieron las distintas áreas pertenecientes a cada subclase determinada por la muestra supervisada. Por último se realizó una clasificación final, en la que se unieron las subclases definidas anteriormente de manera que se obtuviera una separación entre las áreas definidas como asfalto expuesto no crítico, asfalto expuesto crítico y área sin asfalto expuesto, con lo que fue posible obtener un porcentaje para cada tipo de área. En las Ecuaciones 4-11a 4-14 se muestra como se obtiene el porcentaje de asfalto expuesto y el porcentaje de asfalto expuesto crítico. La Figura 4-10 se muestra el procedimiento descrito anteriormente.

$$PA_{\text{asfalto expuesto}} = \frac{A_{\text{asfalto expuesto}}}{A_{\text{estudio}}} \cdot 100 \quad \text{Ecuación 4-11}$$

$$PA_{\text{asfalto expuesto crítico}} = \frac{A_{\text{asfalto expuesto crítico}}}{A_{\text{estudio}}} \cdot 100 \quad \text{Ecuación 4-12}$$

Donde,

$$A_{\text{estudio}} = A_{\text{sin asfalto expuesto}} + A_{\text{asfalto expuesto}} \quad \text{Ecuación 4-13}$$

$$A_{\text{asfalto expuesto}} = A_{\text{asfalto expuesto no crítico}} + A_{\text{asfalto expuesto crítico}} \quad \text{Ecuación 4-14}$$

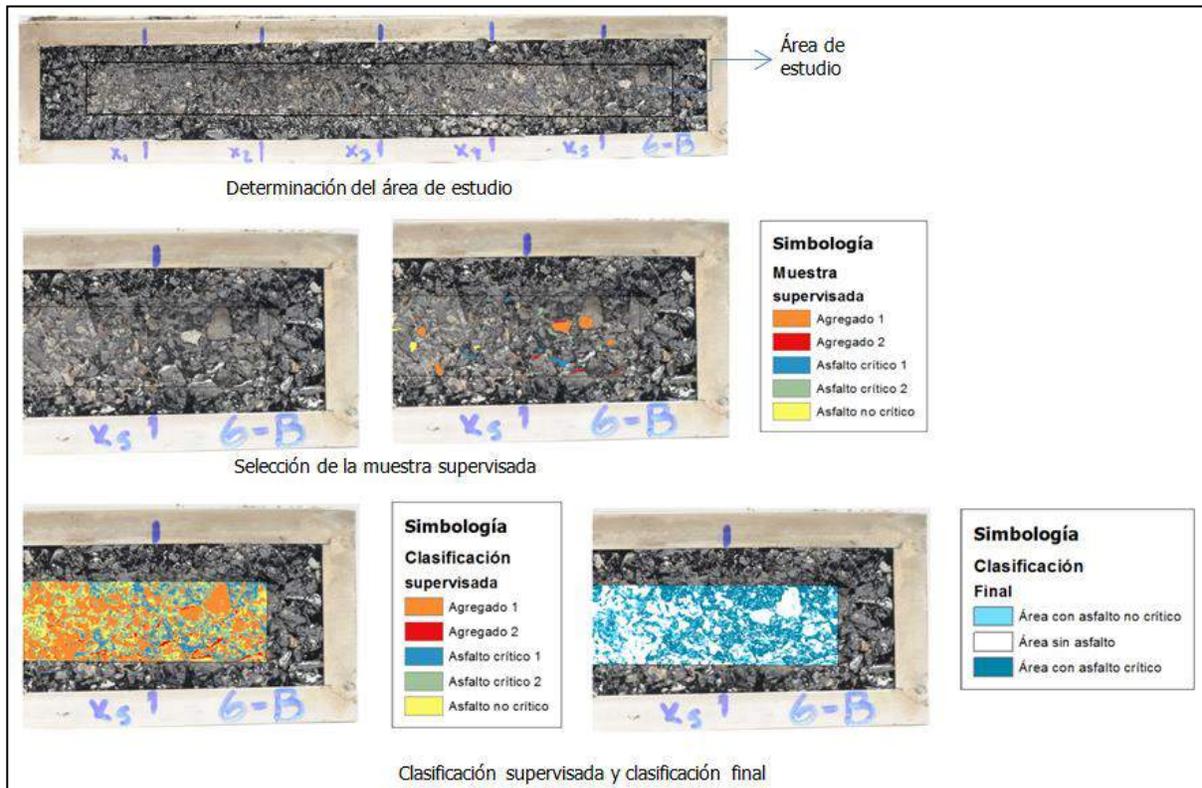


Figura 4-10. Procedimiento utilizado en el análisis de imágenes digitales

Capítulo 5. Evaluación del desempeño

La evaluación del desempeño de las muestras de tratamiento superficial se realizó utilizando las metodologías de ensayo descritas en el Capítulo 4. Para el tratamientos superficial con designación 3A (tamaño máximo nominal de la primera capa de 9,5 mm), en el ensayo de exceso de asfalto se evaluaron diez muestras con emulsión tipo CRS-1 y tres muestras con emulsión modificada (CRS-P), la diferencia entre cada muestra está en el contenido de asfalto. Por otro lado, en el ensayo de pérdida se evaluaron cinco muestras con emulsión CRS-1 y tres con emulsión modificada. En el Cuadro 5-1 se detalla la cantidad de muestras realizadas y el número de muestra de cada espécimen de tratamiento superficial con designación 3A.

Cuadro 5-1. Muestras realizada para cada ensayo, designación 3A

Tipo de asfalto	CRS-1										CRS-P		
Ensayo de exceso de asfalto													
Número de muestra	1-A	2-A	3-A	4-A	5-A	6-A	7-A	8-A	9-A	10-A	1-C	2-C	3-C
Ensayo de pérdida													
Número de muestra	1-A	2-A	3-A	4-A	5-A						1-C	2-C	4-C

Para el tratamiento superficial con designación 3B (tamaño máximo nominal de la primera capa de 12,5 mm), elaborado con emulsión convencional, se evaluaron ocho especímenes en el ensayo de exceso de asfalto y siete en el ensayo de pérdida. Mientras que, para las muestras del TS con designación 3B elaboradas con emulsión modificada con polímero, se evaluaron tres especímenes para cada uno de los ensayos realizados. En el Cuadro 5-3 se muestra en detalle la cantidad de especímenes realizados y el número de muestra de cada uno para el tratamiento superficial con designación 3B.

Cuadro 5-2. Muestras realizada para cada ensayo, designación 3B

Tipo de asfalto	CRS-1								CRS-P			
Ensayo de exceso de asfalto												
Número de muestra	1-B	2-B	3-B	4-B	5-B	6-B	7-B	8-B	1-D	2-D	3-D	
Ensayo de pérdida												
Número de muestra	1-B	2-B	3-B	4-B	5-B	6-B	7-B			1-D	2-D	4-D

En cada espécimen analizado se utilizó una cantidad constante de agregado por capa, la cantidad utilizada se detalla en el Cuadro 5-3, y se realizaron variaciones en la cantidad de asfalto, según se muestra en el Cuadro 5-4. Para cada muestra se utilizó una distribución de asfalto total de aproximadamente 30 %, 40 % y 30 % en la primera, segunda y tercera capa, respectivamente.

Cuadro 5-3. Cantidad de agregado utilizado en las muestras de laboratorio

Ensayo	Designación 3A			Designación 3B				
	Número de muestra	Agregado D (kg/m ²)	Agregado E (kg/m ²)	Agregado F (kg/m ²)	Número de muestra	Agregado C (kg/m ²)	Agregado D (kg/m ²)	Agregado E (kg/m ²)
Exceso de asfalto	1-A	9,17	3,50	2,25	1-B	11,46	7,86	4,27
	2-A	9,10	3,78	2,20	2-B	11,23	7,83	4,82
	3-A	9,13	3,30	2,13	3-B	11,55	7,49	4,18
	4-A	9,16	4,02	2,90	4-B	11,36	7,86	4,59
	5-A	9,16	3,88	2,41	5-B	11,57	7,86	4,78
	6-A	9,16	4,10	2,40	6-B	11,57	7,86	4,48
	7-A	9,16	4,04	2,50	7-B	11,57	7,86	4,47
	8-A	9,16	3,59	2,49	8-B	11,57	7,86	4,61
	9-A	9,16	3,85	2,58	1-D	11,57	7,86	4,61
	10-A	9,16	4,15	2,39	2-D	11,57	7,86	5,41
	1-C	9,16	3,77	2,44	3-D	11,57	7,86	5,03
	2-C	9,16	3,61	2,84				
	3-C	9,16	3,55	2,30				
Pérdida	1-A	9,23	3,50	2,25	1-B	11,21	7,80	3,83
	2-A	9,16	3,78	2,20	2-B	11,29	7,80	4,98
	3-A	9,16	3,27	2,27	3-B	11,28	7,84	3,98
	4-A	9,15	4,04	2,69	4-B	11,32	7,84	4,56
	5-A	9,16	3,88	2,43	5-B	11,58	7,84	4,57
	1-C	9,16	3,38	2,03	6-B	11,58	7,84	4,99
	2-C	9,16	3,98	2,45	7-B	11,58	7,84	4,57
	4-C	9,15	3,44	2,40	1-D	11,56	7,86	4,63
					2-D	11,58	7,86	5,08
					4-D	11,57	7,84	4,65
Promedio	9,16	3,73	2,41		11,48	7,83	4,62	
Suma		15,30				23,93		

Cuadro 5-4. Cantidad de asfalto utilizado en las muestras de laboratorio

Ensayo	Designación 3A					Designación 3B				
	Número de muestra	Asfalto capa D (kg/m ²)	Asfalto capa E (kg/m ²)	Asfalto capa F (kg/m ²)	Asfalto total (kg/m ²)	Número de muestra	Asfalto capa C (kg/m ²)	Asfalto capa D (kg/m ²)	Asfalto capa E (kg/m ²)	Asfalto total (kg/m ²)
Exceso de asfalto	1-A	0,54	0,75	0,63	1,92	1-B	0,54	0,82	0,55	1,92
	2-A	0,69	0,82	0,69	2,20	2-B	0,70	0,95	0,70	2,35
	3-A	0,85	0,96	0,85	2,66	3-B	0,83	1,17	0,84	2,84
	4-A	1,13	1,26	1,14	3,52	4-B	1,14	1,44	1,16	3,74
	5-A	0,24	0,36	0,25	0,85	5-B	1,45	1,73	1,44	4,62
	6-A	1,30	1,43	1,30	4,03	6-B	1,74	2,04	1,74	5,53
	7-A	1,44	1,60	1,44	4,48	7-B	2,04	2,34	2,04	6,42
	8-A	0,39	0,52	0,37	1,27	8-B	1,59	1,88	1,59	5,06
	9-A	0,99	1,11	0,98	3,08	1-D	1,14	1,44	1,14	3,72
	10-A	0,69	0,81	0,69	2,20	2-D	1,45	1,74	1,44	4,63
	1-C	0,54	0,67	0,54	1,75	3-D	1,59	1,89	1,59	5,07
	2-C	1,14	1,26	1,14	3,54					
	3-C	0,99	1,11	0,99	3,09					
Pérdida	1-A	0,54	0,69	0,55	1,78	1-B	0,53	0,84	0,55	1,92
	2-A	0,69	0,80	0,69	2,18	2-B	0,69	0,95	0,71	2,34
	3-A	0,86	0,95	0,84	2,66	3-B	0,85	1,14	0,84	2,82
	4-A	1,15	1,26	1,14	3,54	4-B	1,17	1,44	1,17	3,78
	5-A	0,24	0,36	0,25	0,84	5-B	1,44	1,73	1,44	4,61
	1-C	0,54	0,66	0,54	1,74	6-B	1,73	2,04	1,74	5,51
	2-C	1,15	1,26	1,14	3,55	7-B	2,04	2,33	2,04	6,41
	4-C	0,25	0,36	0,24	0,85	1-D	1,14	1,44	1,14	3,72
						2-D	1,44	1,74	1,43	4,61
						4-D	0,84	1,14	0,84	2,82

5.1 Resultado obtenidos de los ensayos utilizando emulsión convencional

5.1.1 Ensayo de pérdida

Los resultado obtenidos en el ensayo de pérdida y la cantidad de asfalto utilizada en cada muestra se detallan en el Cuadro 5-5. Mediante el ensayo de pérdida se obtuvo una disminución en el material desprendido con forme se aumentó la cantidad de asfalto, el gráfico mostrado en la Figura 5-1 detalla dicha disminución.

El tratamiento superficial con designación 3B, que presenta una granulometría más gruesa que la designación 3A, presentó mayor pérdida de material para la misma cantidad de asfalto, lo que concuerda con los resultados esperados ya que, al tener partículas más grandes, es necesaria mayor cantidad de asfalto para lograr una adherencia adecuada que impida la pérdida o desprendimiento de material.

Cuadro 5-5. Resultados y características de las muestras utilizadas en el ensayo pérdida, CRS-1

Tipo de asfalto	Designación	Número de muestra	Asfalto Capa 1 (L/m ²)	Asfalto Capa 2 (L/m ²)	Asfalto Capa 3 (L/m ²)	Asfalto total (L/m ²)	Pérdida (g)	Pérdida (kg/m ²)	Pérdida (%)
CRS-1	3A	1-A	0,54	0,69	0,55	1,78	69,10	1,89	6,84%
		2-A	0,69	0,80	0,69	2,18	70,90	1,94	7,22%
		3-A	0,86	0,95	0,84	2,66	57,30	1,57	5,43%
		4-A	1,15	1,26	1,14	3,54	37,70	1,03	3,28%
		5-A	0,24	0,36	0,25	0,84	215,50	5,89	22,82%
	3B	1-B	0,53	0,84	0,55	1,92	554,30	15,14	37,67%
		2-B	0,69	0,95	0,71	2,34	464,50	12,69	26,45%
		3-B	0,85	1,14	0,84	2,82	356,60	9,74	22,56%
		4-B	1,17	1,44	1,17	3,78	205,70	5,62	12,32%
		5-B	1,44	1,73	1,44	4,61	144,10	3,94	7,96%
		6-B	1,73	2,04	1,74	5,51	101,30	2,77	5,31%
		7-B	2,04	2,33	2,04	6,41	25,30	0,69	1,34%

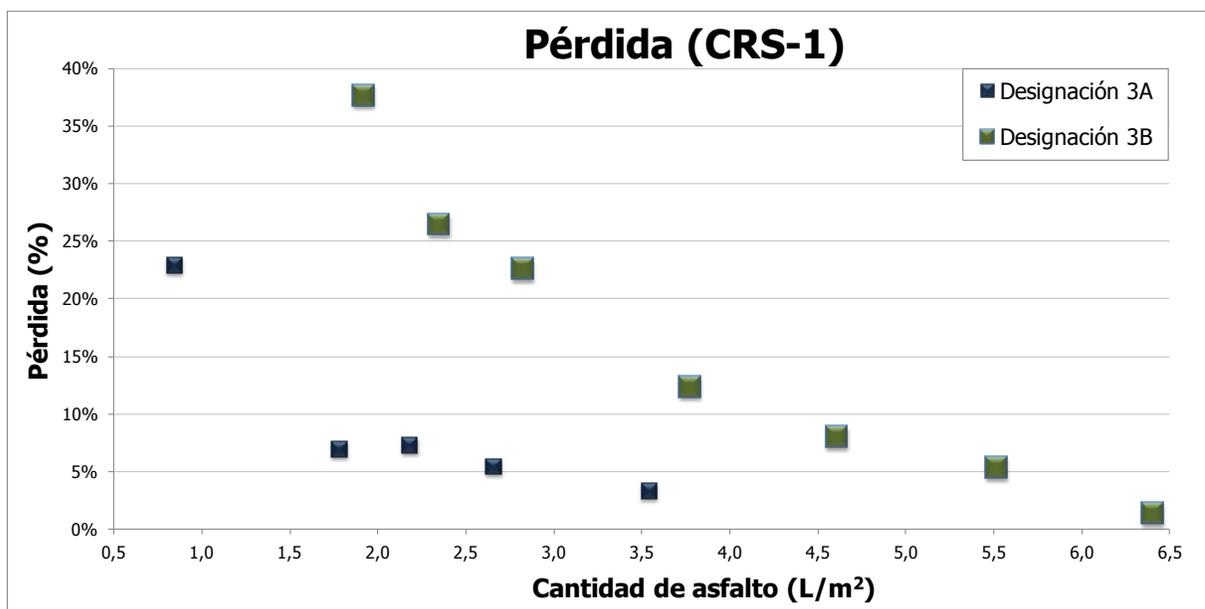


Figura 5-1. Pérdida de material contra cantidad total de asfalto, emulsión convencional

Los resultados del ensayo de pérdida, para ambos tratamientos superficiales evaluados, presentan un cambio notorio de pendiente al aumentar la cantidad total de asfalto, como se observa en la Figura 5-2. Para cantidades bajas de asfalto, la pérdida muestra una mayor disminución que en cantidades altas.

El punto en el que las dos pendientes identificadas se intersecan se definió como la mínima cantidad de asfalto necesaria para obtener una pérdida aceptable en los ensayos realizados, ya que a partir de este punto la pérdida disminuye a menor razón que en el área con menor cantidad de asfalto, es decir que al aumentar la cantidad de asfalto se obtiene poca variación

en la pérdida. Dicho punto (mostrado en la Figura 5-2) corresponde a 1,7 L/m² de asfalto total y 8% de pérdida para la granulometría más fina y 3,0 L/m² de asfalto total y 15% de pérdida para la granulometría más gruesa.

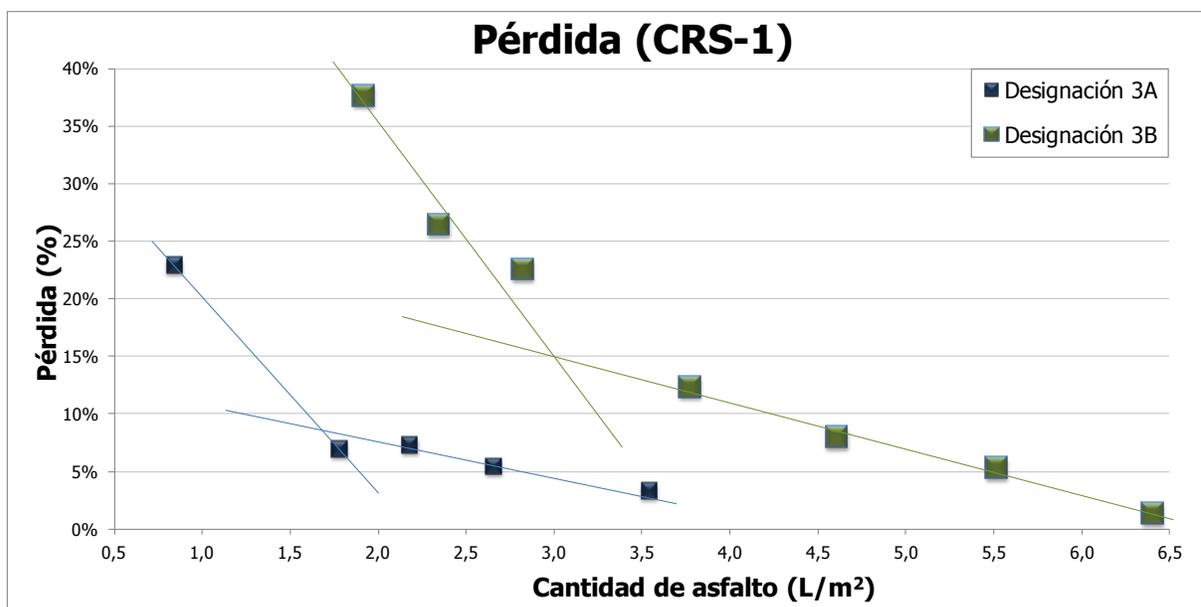


Figura 5-2. Pérdida de material contra cantidad total de asfalto, identificación de pendientes

Durante el ensayo de pérdida se aproximó el desprendimiento presentado mediante mediciones a los dos, cinco, ocho y diez minutos de ensayo, con el fin de observar la variación de la pérdida en el tiempo de ensayo. Los resultados obtenidos se muestran en la Figura 5-3 para el TS con designación 3A y en la Figura 5-4 para el TS con designación 3B.

De las mediciones de pérdida a lo largo del ensayo, se obtuvo que la mayoría de las muestras presentaron una mayor pérdida en los primeros cinco minutos, a los ocho minutos la cantidad de material desprendido disminuyó y para los diez minutos se acerca a una cantidad de material desprendido acumulado aproximadamente constante, a excepción de las muestras con menor cantidad de asfalto, que presenta una pérdida excesiva de material debido a que la cantidad de asfalto no es suficiente para cubrir adecuadamente el agregado y evitar que se presente el desprendimiento.

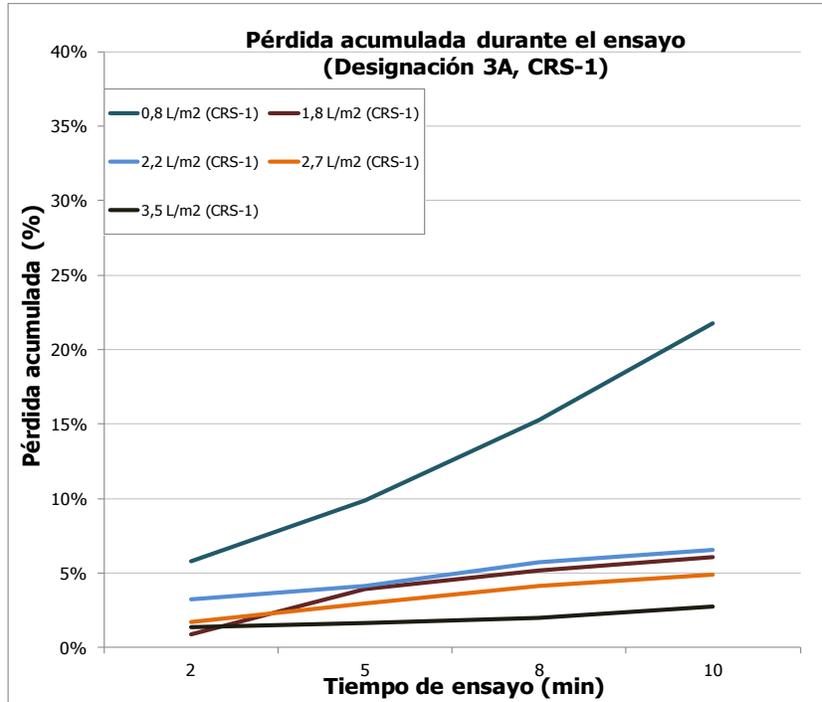


Figura 5-3. Pérdida de material acumulada durante el ensayo para las distintas dosificaciones de asfalto, en peso húmedo (TS 3A, CRS-1)

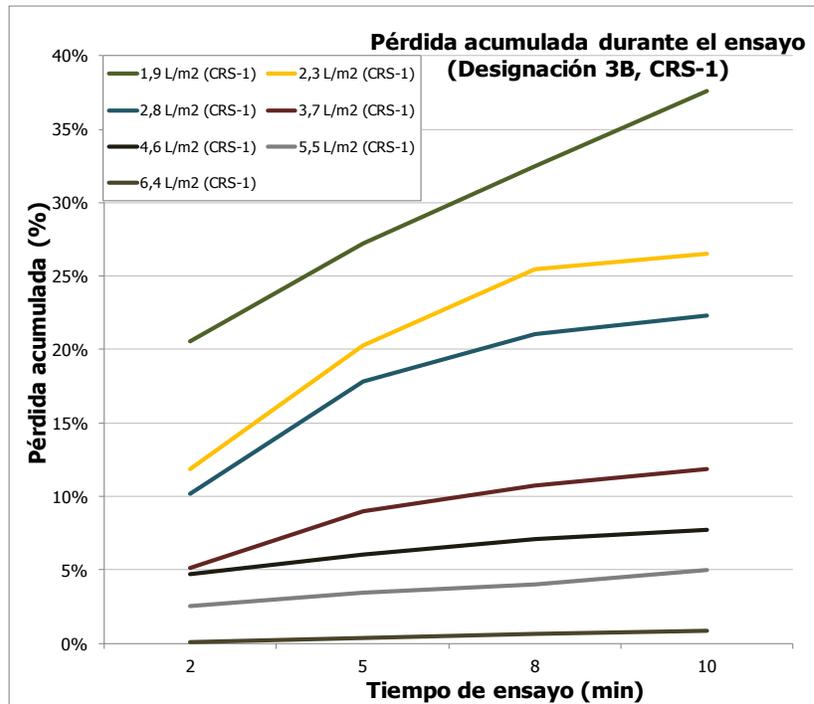


Figura 5-4. Pérdida de material acumulada durante el ensayo para las distintas dosificaciones de asfalto, en peso húmedo (TS 3B, CRS-1)

5.1.2 Ensayo de exceso de asfalto

En el ensayo de exceso de asfalto se mantuvieron constantes algunas cantidades de asfalto utilizadas en el ensayo de pérdida para poder comparar ambos resultados. En el Cuadro 5-6 se detallan las cantidades de asfalto utilizadas para cada espécimen según número de muestra y los resultados obtenidos en la medición de arena Ottawa adherida, porcentaje de área con asfalto expuesto y con asfalto expuesto crítico (ver sección 4.3), además de la deformación promedio de la muestra luego de ser ensayada con el equipo de rueda cargada.

Cuadro 5-6. Resultados y características de las muestras del ensayo de exceso de asfalto, CRS-1

Tipo de asfalto	Designación	Número de muestra	Asfalto Capa 1 (L/m ²)	Asfalto Capa 2 (L/m ²)	Asfalto Capa 3 (L/m ²)	Asfalto total (L/m ²)	Arena adherida (g)	Arena adherida (kg/m ²)	Asfalto expuesto (%)	Asfalto expuesto crítico (%)	Deformación (mm)
CRS-1	3A	1-A	0,54	0,75	0,63	1,92	9,60	0,50	-	-	-
		2-A	0,69	0,82	0,69	2,20	10,10	0,53	-	-	-
		3-A	0,85	0,96	0,85	2,66	11,00	0,58	-	-	-
		4-A	1,13	1,26	1,14	3,52	7,70	0,40	-	-	1,62
		5-A	0,24	0,36	0,25	0,85	17,50	0,92	-	-	2,95
		6-A	1,30	1,43	1,30	4,03	5,00	0,26	80,11%	80,11%	3,39
		7-A	1,44	1,60	1,44	4,48	9,00	0,47	85,38%	85,38%	4,57
		8-A	0,39	0,52	0,37	1,27	14,60	0,76	7,50%	0,00%	2,10
		9-A	0,99	1,11	0,98	3,08	7,10	0,37	40,03%	0,00%	2,13
	10-A	0,69	0,81	0,69	2,20	11,10	0,58	17,12%	0,00%	4,40	
	3B	1-B	0,54	0,82	0,55	1,92	21,40	1,12	-	-	5,17
		2-B	0,70	0,95	0,70	2,35	26,30	1,38	-	-	6,21
		3-B	0,83	1,17	0,84	2,84	20,60	1,08	-	-	3,67
		4-B	1,14	1,44	1,16	3,74	19,50	1,02	-	-	4,64
		5-B	1,45	1,73	1,44	4,62	10,70	0,56	31,11%	0,00%	4,77
		6-B	1,74	2,04	1,74	5,53	8,30	0,43	59,07%	40,70%	4,54
		7-B	2,04	2,34	2,04	6,42	7,60	0,40	67,30%	67,30%	5,03
		8-B	1,59	1,88	1,59	5,06	6,70	0,35	41,26%	0,00%	1,60
-		No se realizó									

Mediante la aplicación de arena Ottawa a la muestra ensayada en el equipo de rueda cargada, se esperaba que se presentara una adherencia en el área del espécimen que mostrara exudación, con lo que aumentaría la cantidad de arena adherida al aumentar la cantidad de asfalto. Sin embargo, el ensayo mostró variaciones de cantidad de arena adherida que siguen una tendencia descendente al aumentar la cantidad de asfalto, como se muestra en la Figura 5-5, por lo que no concuerda con los resultados esperados.

La tendencia presentada en las muestras ensayadas con arena Ottawa se debe a que al aumentar la cantidad de asfalto, el tratamiento superficial presenta menos vacíos, como se muestra en la Figura 5-6 donde se comparan dos especímenes ensayados, el de la izquierda (número de muestra 4-A con 3,52 L/m² de asfalto total) tiene mayor cantidad de asfalto que el de la derecha (número de muestra 5-A con 0,85 L/m² de asfalto total). De la Figura 5-6 se observa que hay mayor cantidad de arena en la muestra con menor dosificación de asfalto,

ya que la arena se introduce entre los vacíos, esta puede ser una de las razones por las que no se pudo obtener los resultados esperados, además se puede distinguir de la figura que cierta cantidad de arena queda adherida en los extremos del molde, lo cual pudo afectar también los resultados.

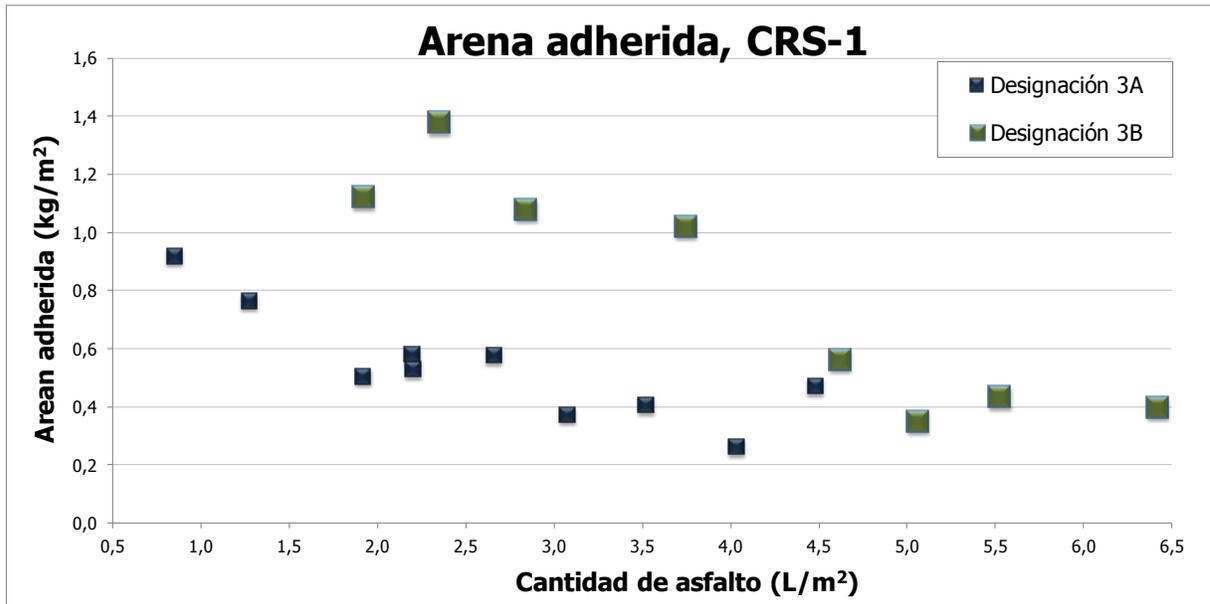


Figura 5-5. Cantidad de arena adherida por unidad de área contra cantidad total de asfalto, CRS-1

Debido a que los resultados de la cantidad de arena adherida no logran discriminar el comportamiento de las muestras al aumentar la cantidad de asfalto de la manera en la que se esperaba, se propone un procesamiento de imágenes digitales de la muestra luego de ser sometida a mil ciclos de carga en el equipo de la rueda cargada. El análisis se efectúa con el fin de cuantificar la presencia de exudación en la muestra, que fue definida como el área cubierta con asfalto expuesto en condición crítica.

La muestra ensayada exhibe la condición de asfalto expuesto cuando el agregado se encuentra cubierto por asfalto a causa del proceso de fabricación de la muestra, donde el asfalto cubre cierta área de agregado y depende de la cantidad de asfalto que se utilice. El estado de asfalto expuesto crítico se da cuando el asfalto se acumula en la superficie de la muestra, es una condición similar a la exudación.

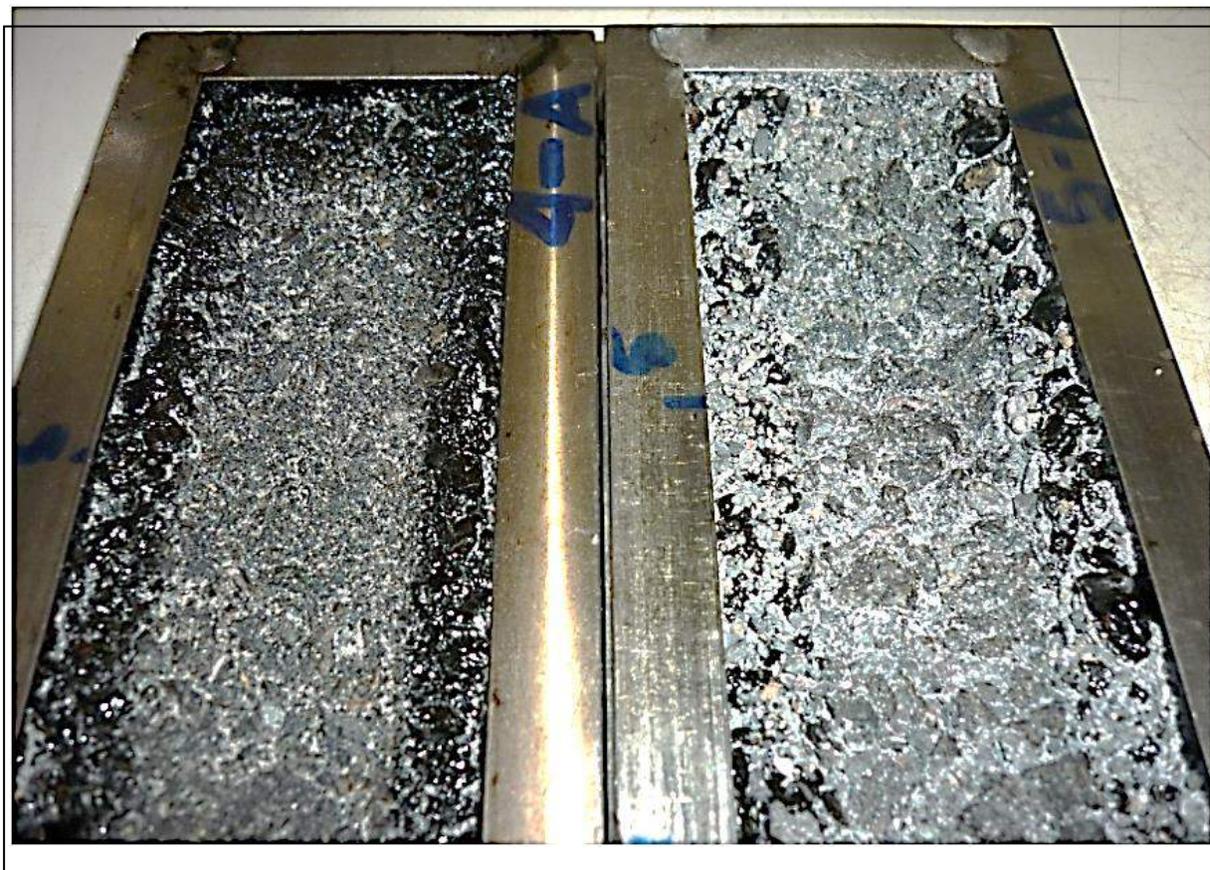


Figura 5-6.Comparación entre muestras del ensayo de exceso de asfalto, designación 3A

En la Figura 5-7 se muestra uno de los especímenes analizados, la primera imagen presenta la muestra antes de ser sometida a mil ciclos de carga en el ensayo de la rueda cargada. La segunda, tercera y cuarta imagen muestran el espécimen luego del ensayo, la tercera demarca en color blanco el área de estudio de la muestra que no posee condición de asfalto expuesto, mientras que la cuarta demarca en color celeste el área con asfalto expuesto en condición no crítica y en azul el área con asfalto expuesto en condición crítica. En el sector derecho se muestra un acercamiento del área demarcada por el rectángulo rojo. En el Apéndice 3 se muestran las imágenes de todas los especímenes analizados, se presentan de manera similar a como se presenta en la Figura 5-7.

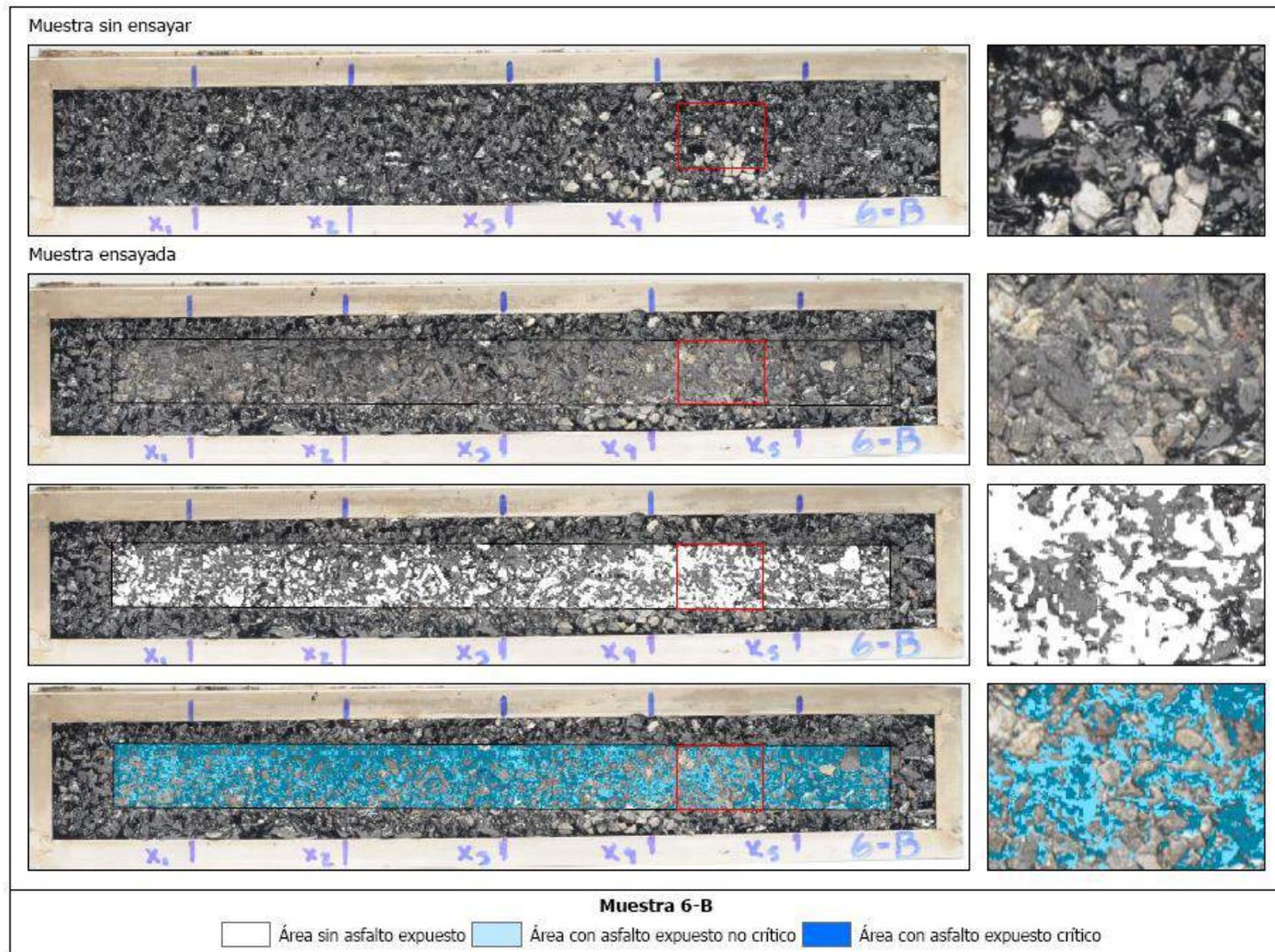


Figura 5-7. Muestra analizada mediante procesamiento de imágenes digitales

Mediante el procesamiento de las imágenes digitales de las muestras del ensayo de exceso de asfalto, se obtuvo que a partir de aproximadamente un 40% de área con asfalto expuesto, las muestras presentan la condición de asfalto expuesto crítico, definida como un estado cercano a la exudación. Esto sucede en ambas granulometrías estudiadas y se puede apreciar en la Figura 5-8 para el tratamiento con designación 3A y en la Figura 5-9 para el tratamiento de designación 3B.

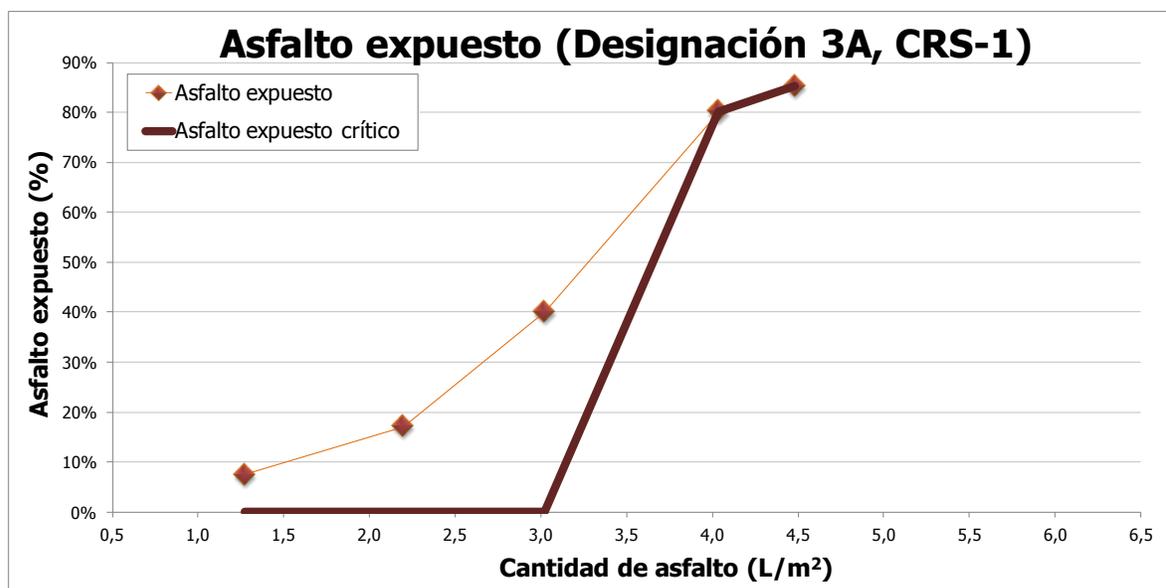


Figura 5-8. Asfalto expuesto contra cantidad total de asfalto, emulsión convencional (designación 3A)

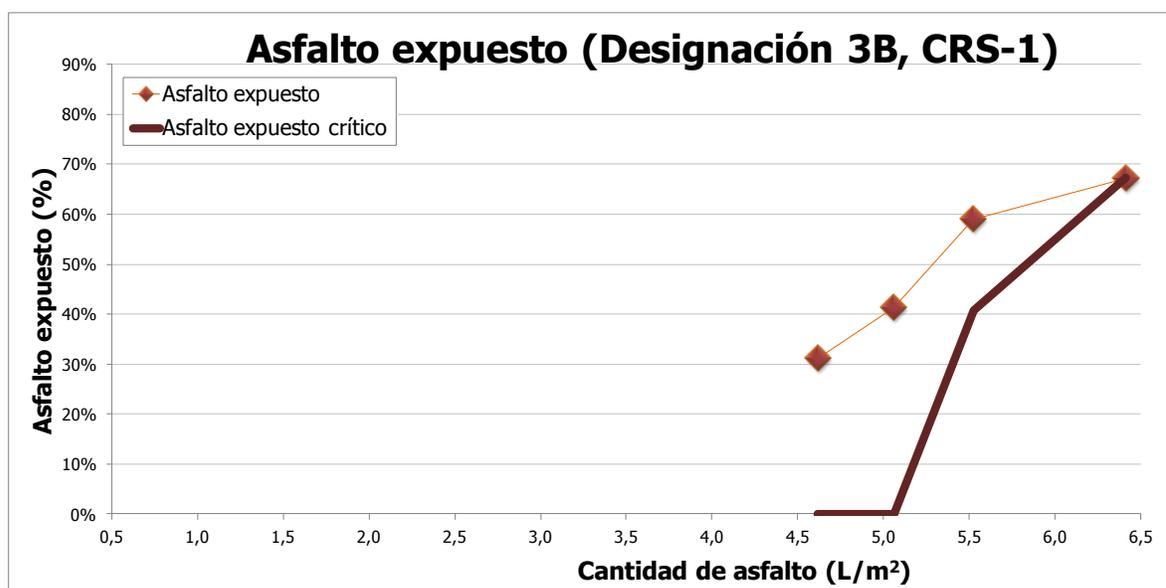


Figura 5-9. Asfalto expuesto contra cantidad total de asfalto, emulsión convencional (designación 3B)

En el ensayo de exceso de asfalto, se tomaron mediciones de la deformación de la muestra luego de ser ensayada. Los resultados no muestran una tendencia coherente, se espera que al aumentar la cantidad de asfalto en la muestra, aumente la deformación, luego de la aplicación de la carga. Sin embargo, como se aprecia en la Figura 5-10 y en la Figura 5-11, no se muestran resultados coherentes como se esperaba.

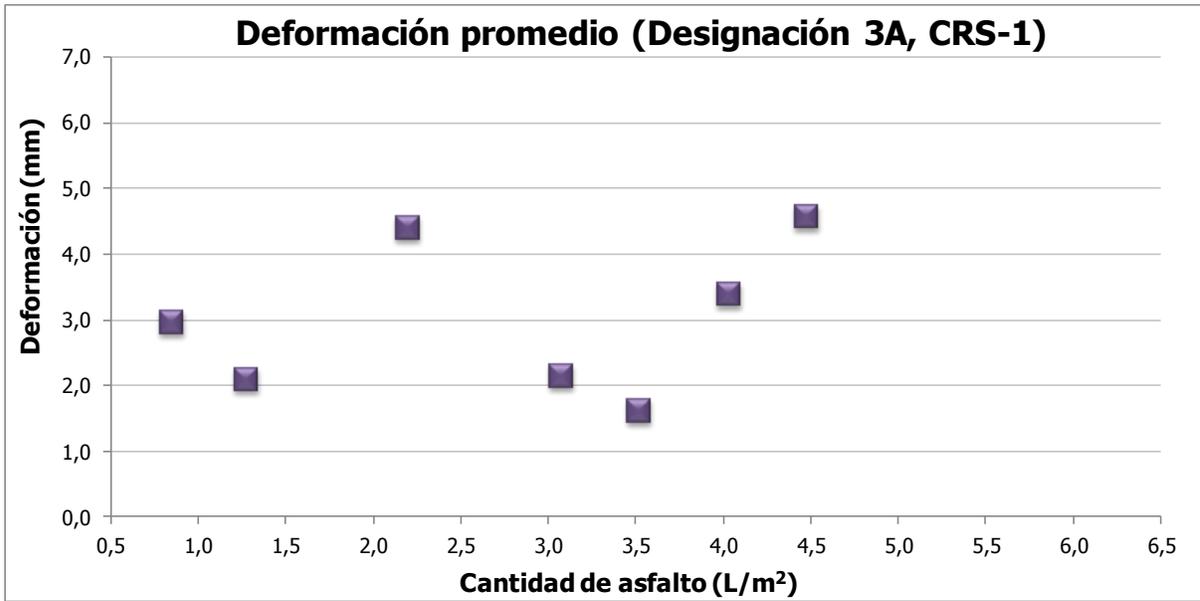


Figura 5-10. Deformación promedio, emulsión convencional (designación 3A)

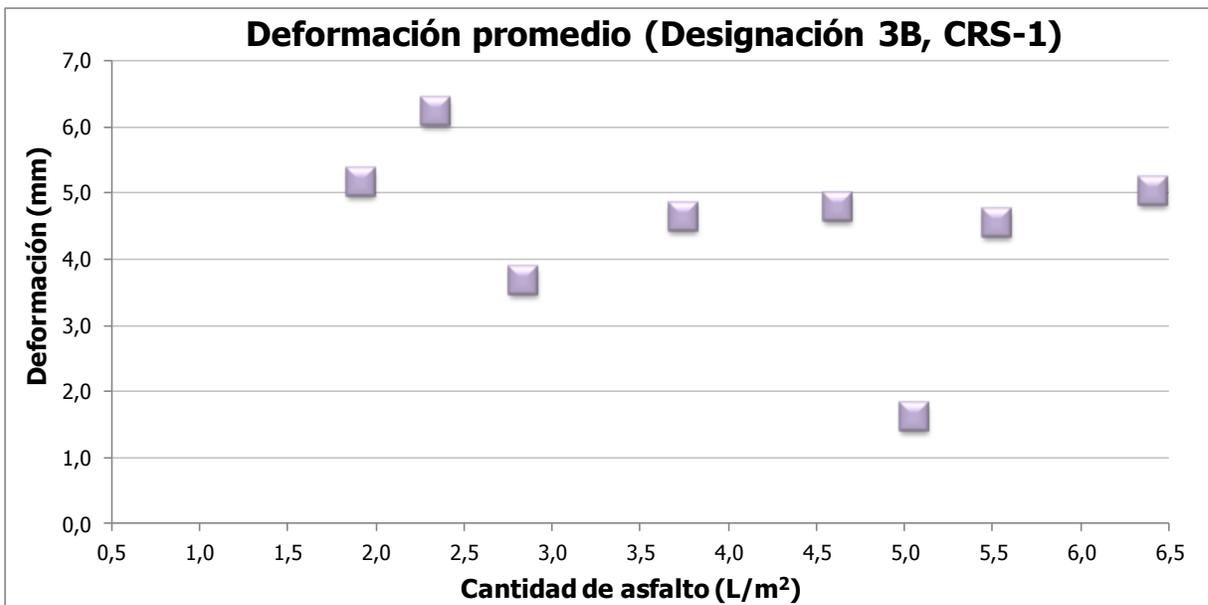


Figura 5-11. Deformación promedio, emulsión convencional (designación 3B)

5.1.3 Comparación entre resultados de pérdida y exceso de asfalto

Con los resultados obtenidos para pérdida y deformación, se puede definir un área que abarca un rango de cantidades totales de asfalto, donde según lo obtenido en el laboratorio para las muestras ensayadas, se tiene un desempeño aceptable del tratamiento superficial.

El área que constituye la zona con desempeño aceptable está definida a partir del cambio de pendiente observado en los resultados de pérdida, correspondiente a la intersección de las dos pendientes definidas en la Figura 5-2. Esta zona abarca hasta la cantidad de asfalto total donde se presenta un 40% de área con asfalto expuesto, que como se observó en la Figura 5-8 y en la Figura 5-9, es cuando se empieza a presentar la condición de asfalto expuesto crítico, definida como presencia de exudación.

En la Figura 5-12 se presenta la zona con desempeño aceptable para el TS con designación 3A, definida de 1,7 L/m² a 3,0 L/m² de asfalto total, distribuidos en 30%, 40 % y 30 % en la primera, segunda y tercera capa del tratamiento, respectivamente. De igual manera, en la Figura 5-13 se muestra la zona con desempeño aceptable para el tratamiento superficial con designación 3B, definida aproximadamente de 3,0L/m² a 5,0L/m² de asfalto total.

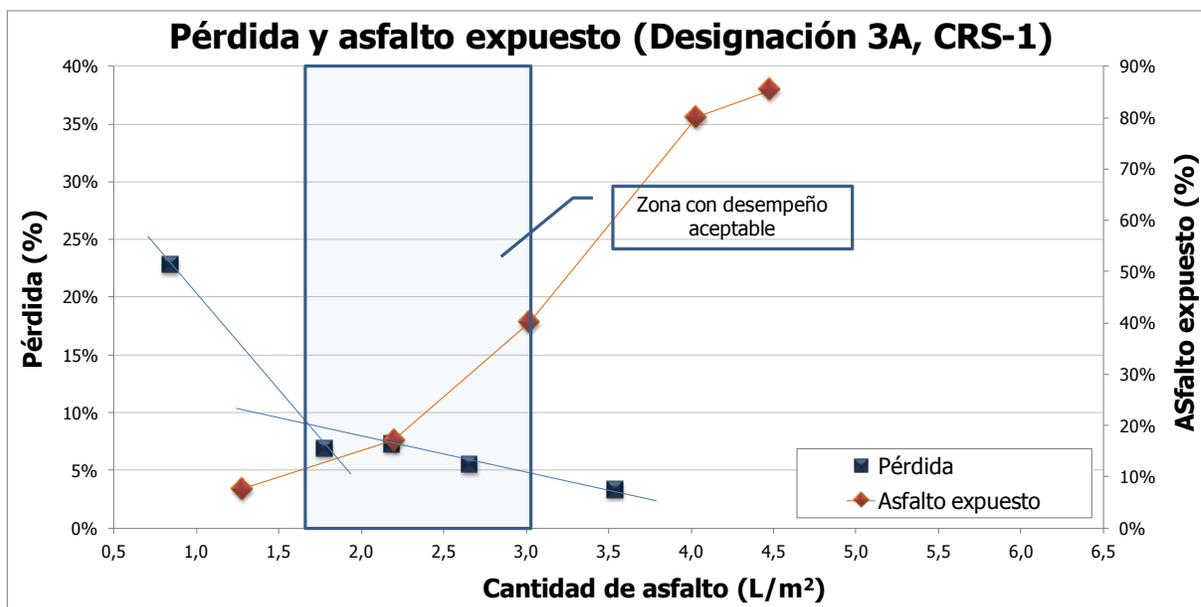


Figura 5-12. Pérdida y asfalto expuesto contra cantidad total de asfalto, emulsión convencional (designación 3A)

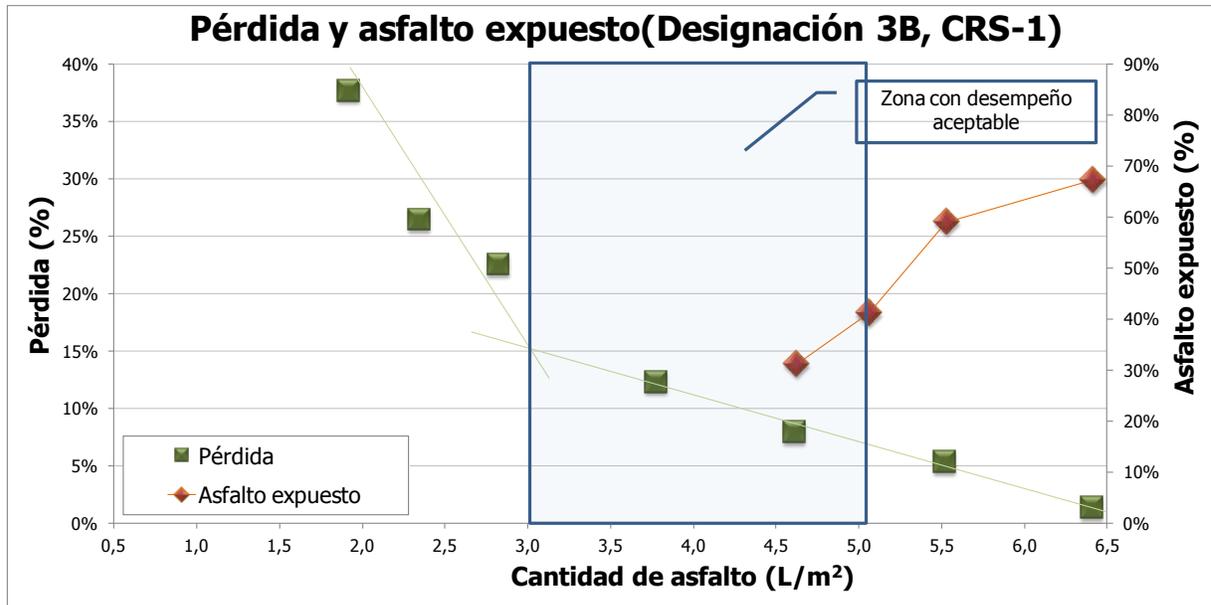


Figura 5-13. Pérdida y asfalto expuesto contra cantidad total de asfalto, emulsión convencional (designación 3B)

5.2 Comparación con el CR-2010

Las cantidades de agregado utilizadas por capa se presentan en la Figura 5-14 para el tratamiento superficial con designación 3A y en la Figura 5-15 para el TS 3B. En ambos casos se observa que las cantidades de agregado empleadas son menores a las cantidades sugeridas por el CR-2010. Esto se puede deber a que el material del país presenta un menor peso específico, en comparación con los agregados de países donde se generan estas especificaciones.

Estudios anteriores indican que la especificación nacional presenta dosificaciones de agregado y emulsión mayores a las aplicadas en proyectos en distintas zonas del país, como es el caso de la investigación realizada por Perera en 1987, donde se realiza una comparación de algunos proyectos con las especificaciones nacionales de los años 1972 y 1977.

Entre los factores que pudieron afectar la baja cantidad de agregado por capa, en comparación con el CR-2010, se encuentra el proceso de fabricación de las muestras. Al utilizar una pistola pulverizadora, fue necesario retirar todo el material no adherido de la capa anterior, para evitar que la presión de aire de la pistola lanzara las partículas fuera de la

muestra y por ende variara el peso inicial de la muestra y se contabilizara una cantidad errónea de emulsión, ya que esta se obtuvo por diferencia de peso.

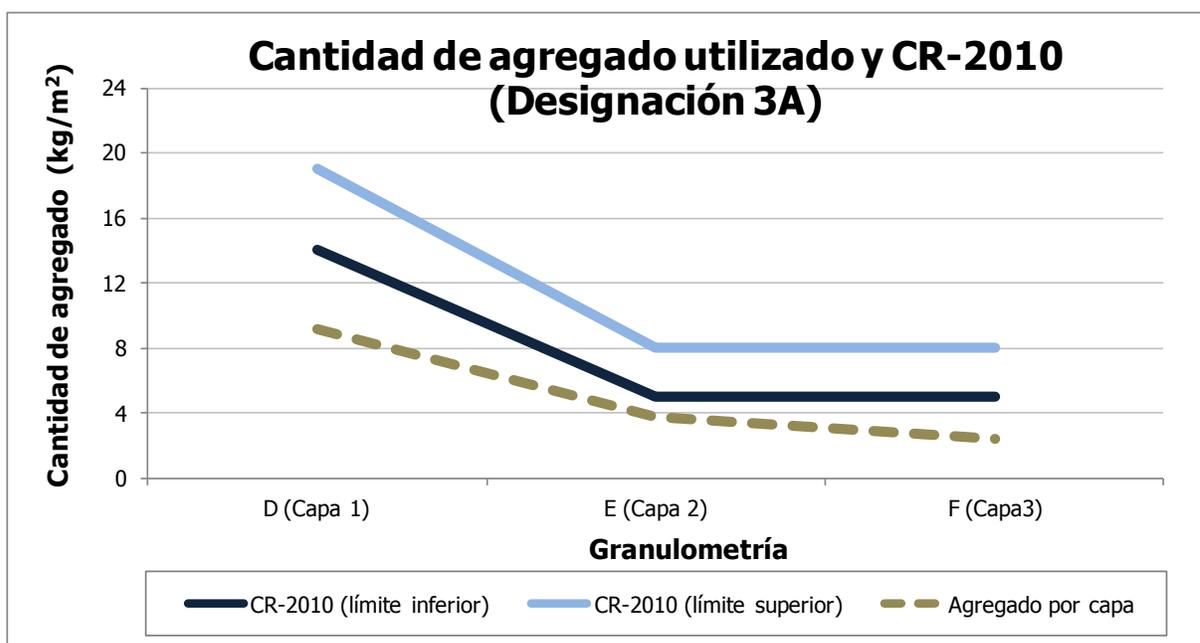


Figura 5-14. Cantidad de agregado utilizado en las muestras y recomendada por CR-2010 (TS 3A)

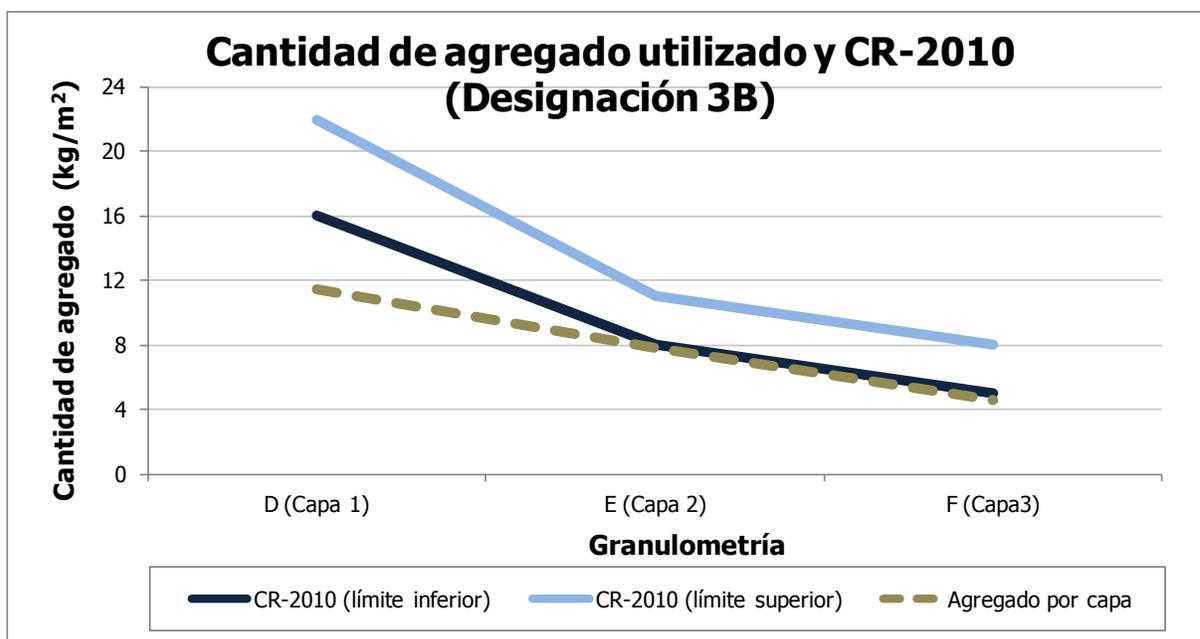


Figura 5-15. Cantidad de agregado utilizado en las muestras y recomendada por CR-2010 (TS 3B)

Al comparar la zona con desempeño aceptable obtenida en el laboratorio para las muestras ensayadas con la especificación nacional, se observa que en el TS con designación 3A presenta dicha zona dentro del rango establecido por el CR-2010, como se observa en la Figura 5-16.

Para el tratamiento superficial con designación 3B, la zona de desempeño aceptable se encuentra ubicada en un rango con cantidades mayores que las especificadas. Un factor relevante que pudo afectar en este caso en particular es que el tamaño medio de la segunda capa (granulometría D) no disminuye a la mitad con respecto a la primera capa (granulometría C), como se indica en el Cuadro 3-13, esto implica que se requiera mayor cantidad de asfalto para evitar la pérdida o desprendimiento del agregado.

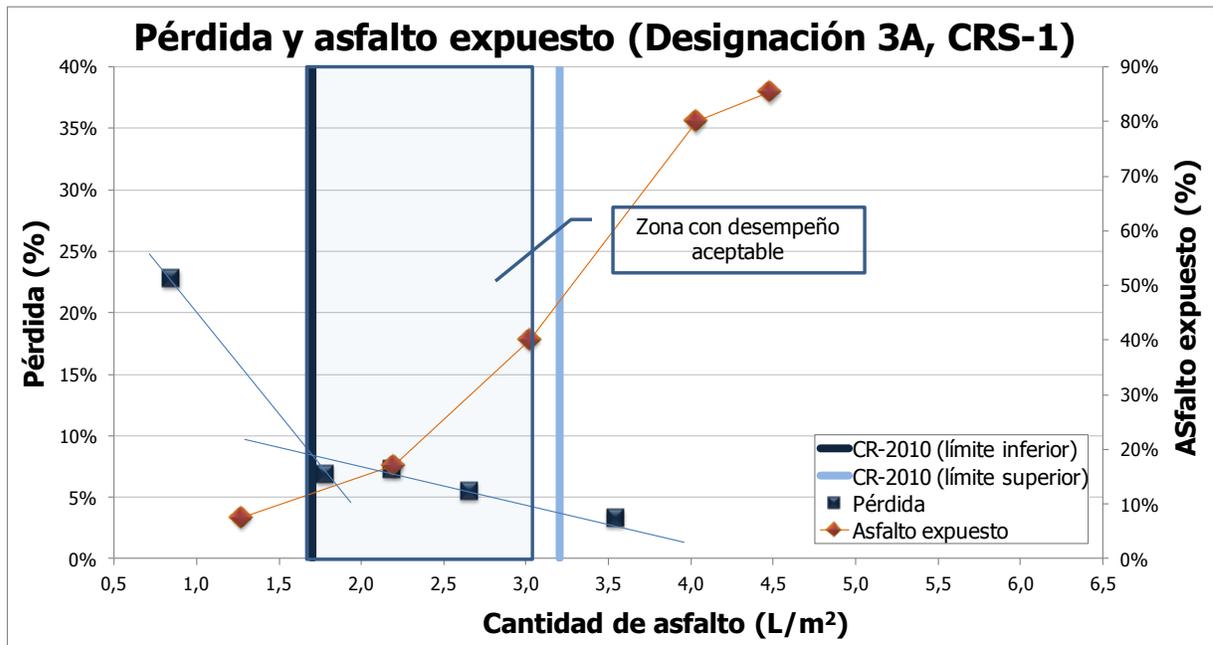


Figura 5-16. Comparación de la pérdida y el asfalto expuesto con el CR-2010, emulsión convencional (designación 3A)

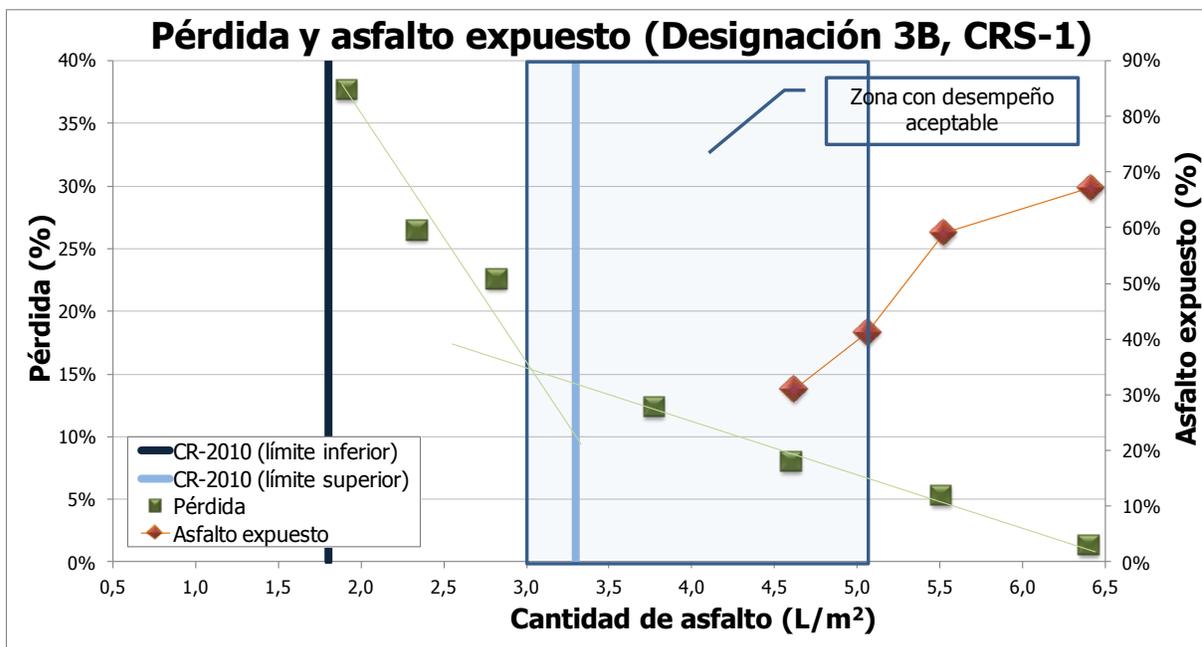


Figura 5-17. Comparación de la pérdida y el asfalto expuesto con el CR-2010, emulsión convencional (designación 3B)

5.3 Comparación con las metodologías de diseño

La cantidad de agregado por capa utilizado en las muestras de laboratorio, se compara con las metodologías de diseño teóricas evaluadas en el Capítulo 3. En la Figura 5-18 se realiza la comparación para el tratamiento superficial con la granulometría más fina (TS 3A), mientras que en la Figura 5-19 se compara para la granulometría más gruesa (TS 3B). En ambos tratamientos se observa que la cantidad de agregado es menor que la indicada por las metodologías teóricas.

Las metodologías que mejor aproximan las dosificaciones de agregado son la regla del décimo y el método de Texas DOT, como se muestra en la Figura 5-20 y en la Figura 5-21, donde se comparan las cantidades totales de agregado. Los métodos de Hanson, McLeod y ASTM (en el caso del TS 3B) presentan cantidades de agregado superiores a las utilizadas.

La mayor diferencia entre las metodologías y la cantidad de agregado utilizada, se da en la primera capa de ambas designaciones, mientras que para la tercera capa, que corresponde a una granulometría más fina los valores tienden a acercarse entre sí.

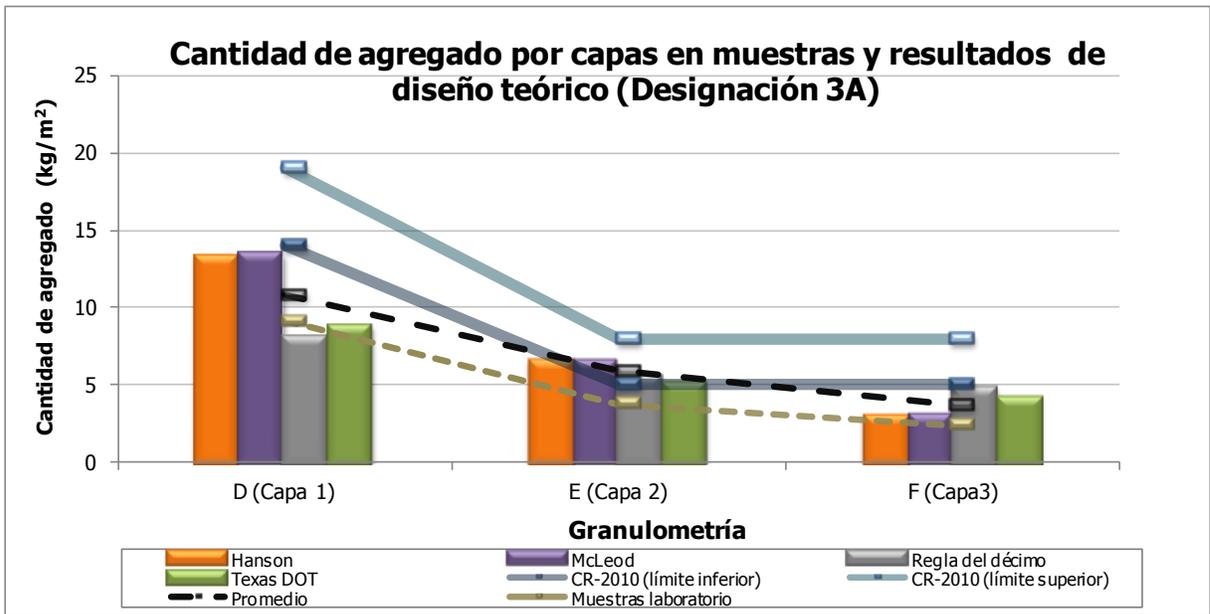


Figura 5-18. Comparación de la cantidad de agregado por capas de las muestras de laboratorio con los resultados de las metodologías de diseño (designación 3A)

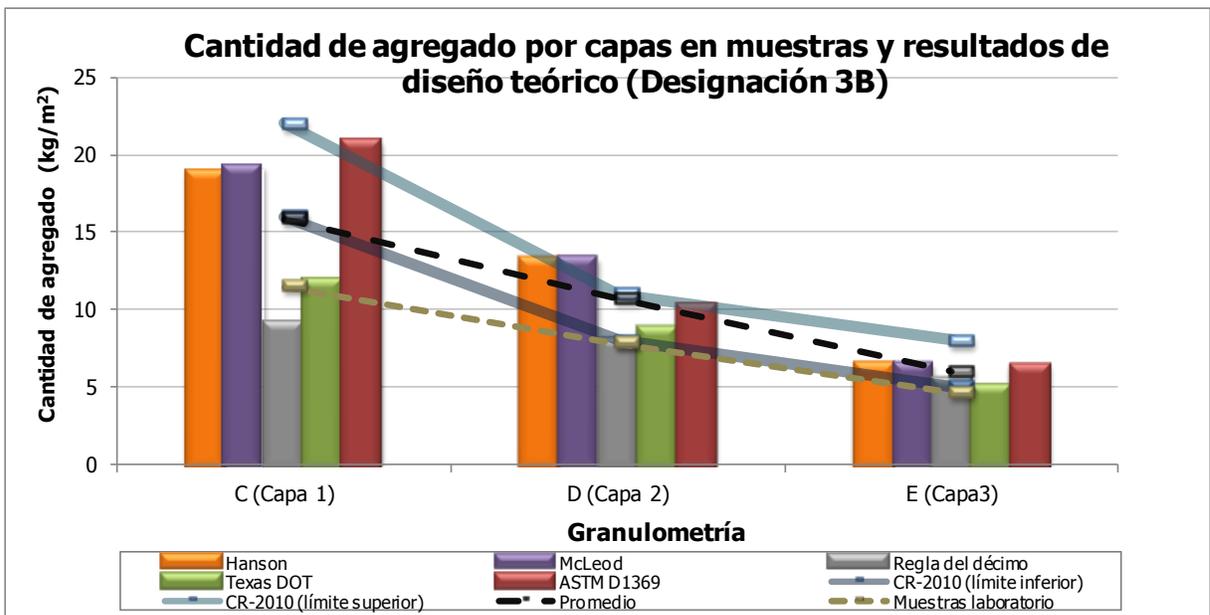


Figura 5-19. Comparación de la cantidad de agregado por capas de las muestras de laboratorio con los resultados de las metodologías de diseño (designación 3B)

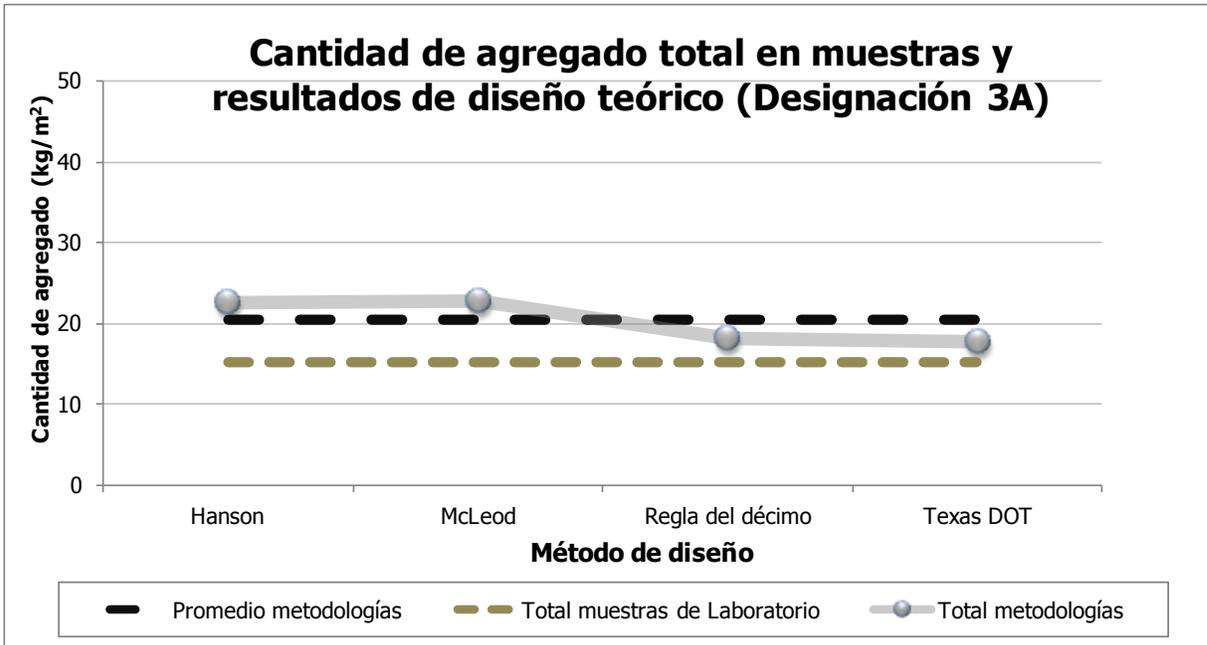


Figura 5-20. Comparación de la cantidad de agregado total de las muestras de laboratorio con los resultados de las metodologías de diseño (designación 3A)

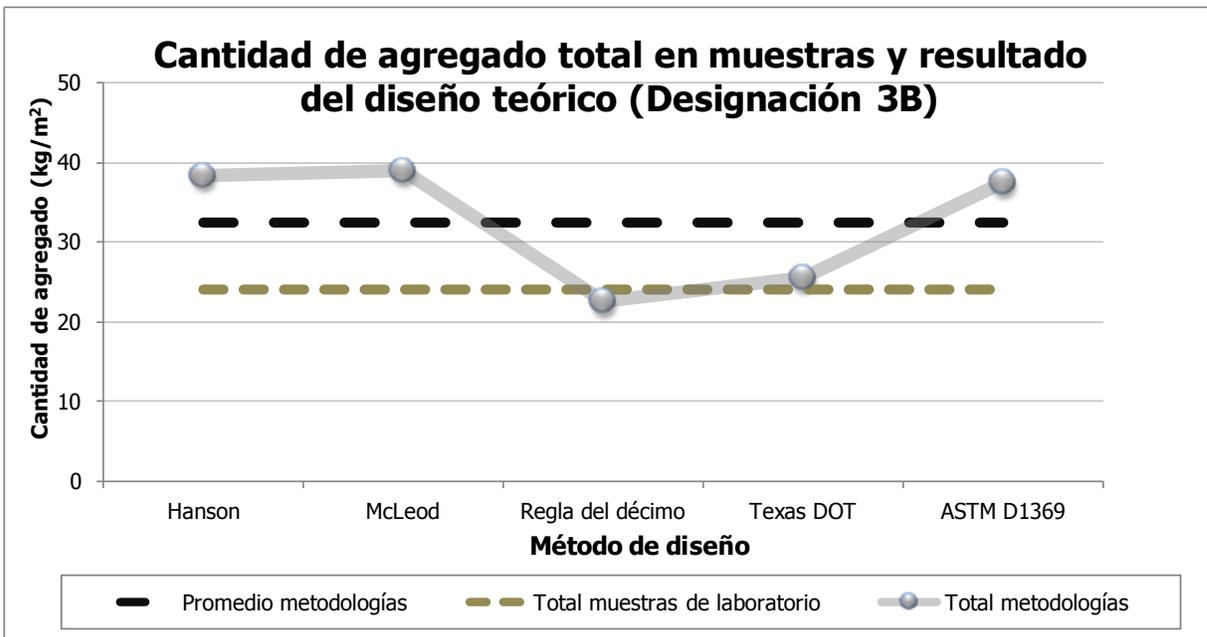


Figura 5-21. Comparación de la cantidad de agregado total de las muestras de laboratorio con los resultados de las metodologías de diseño (designación 3B)

Al comparar las distintas metodologías de diseño teóricas con la zona de desempeño aceptable para el TS con designación 3A, se obtuvo que solamente la regla del décimo se encuentra dentro de dicha zona, como se aprecia en la Figura 5-22. Se obtiene además que el promedio de las metodologías teóricas se encuentra fuera en la zona de desempeño aceptable, en un valor más bajo de dosificación de asfalto.

El tratamiento superficial con designación 3B, presenta la zona de desempeño aceptable en un rango de valores totales de asfalto mayor que el promedio de las metodologías teóricas aplicadas, como se muestra en la Figura 5-23. Solamente el método del ASTM está dentro de la zona de desempeño aceptable en el caso de la granulometría más gruesa.

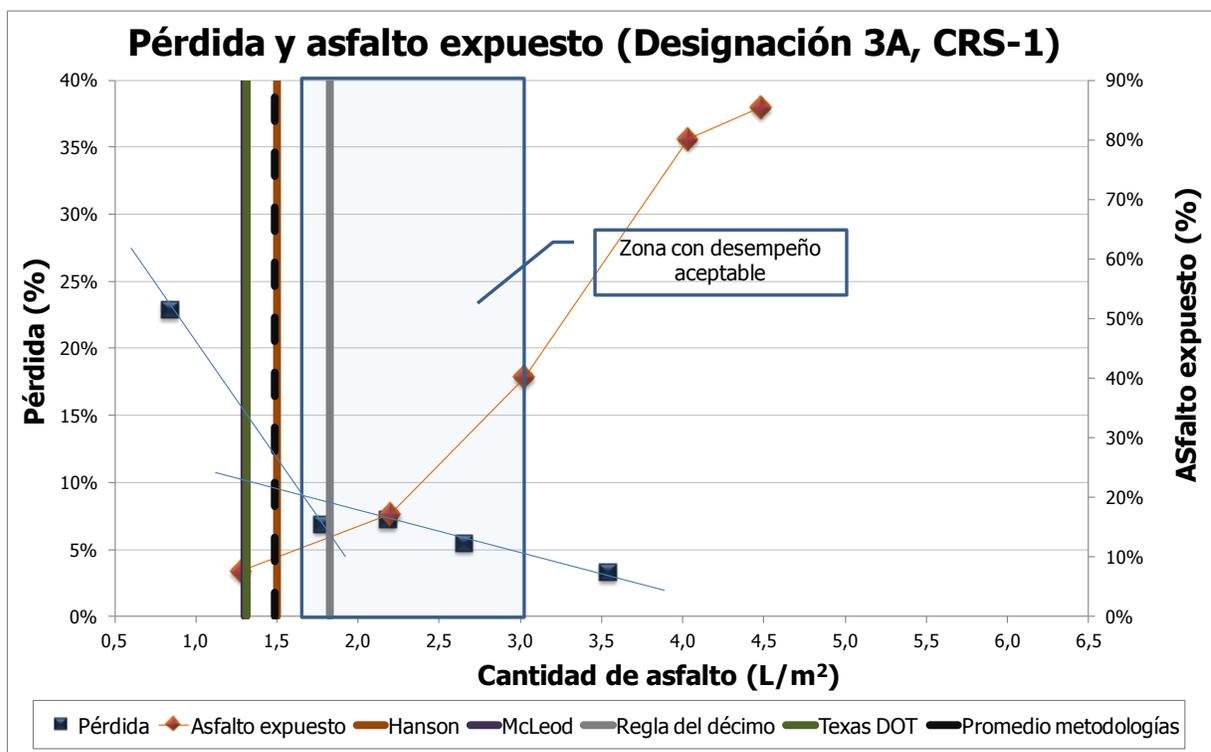


Figura 5-22. Comparación de la pérdida y el asfalto expuesto con los resultados de las metodologías de diseño (designación 3A)

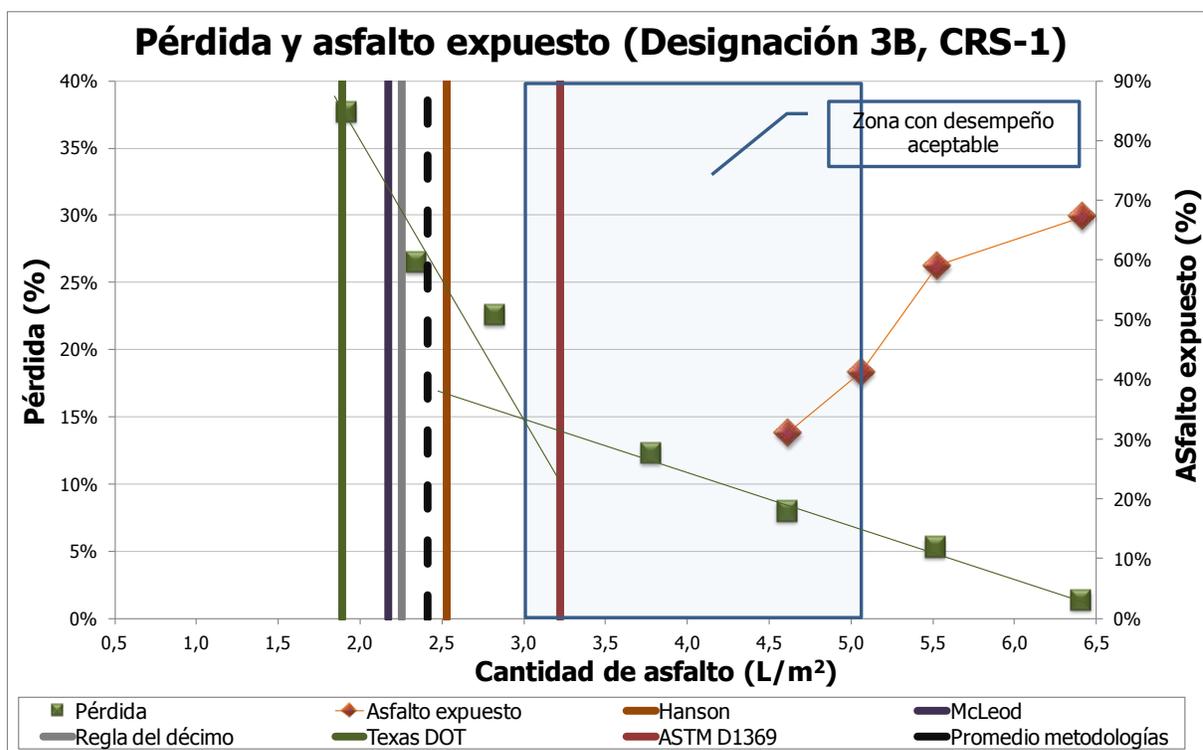


Figura 5-23. Comparación de la pérdida y el asfalto expuesto con los resultados de las metodologías de diseño (designación 3B)

5.4 Resultados obtenidos de los ensayos utilizando emulsión modificada

5.4.1 Ensayo de pérdida

Con el objetivo de cuantificar el efecto de utilizar emulsión modificada en el desempeño de los tratamientos superficiales, se realizaron ensayos en algunas muestras para comparar los resultados obtenidos al utilizar emulsión convencional. En el Cuadro 5-7 se muestran la cantidad de asfalto utilizado en cada espécimen así como el número de muestra y los resultados del ensayo de pérdida.

Cuadro 5-7. Resultados y características de las muestras del ensayo pérdida, emulsión modificada

Tipo de asfalto	Designación	Número de muestra	Asfalto Capa 1 (L/m ²)	Asfalto Capa 2 (L/m ²)	Asfalto Capa 3 (L/m ²)	Asfalto total (L/m ²)	Pérdida (g)	Pérdida (kg/m ²)	Pérdida (%)
CRS-P	3A	1-C	0,54	0,66	0,54	1,74	76,10	2,08	7,25%
		2-C	1,15	1,26	1,14	3,55	24,40	0,67	2,09%
		4-C	0,25	0,36	0,24	0,85	171,60	4,69	17,93%
	3B	1-D	1,14	1,44	1,14	3,72	98,30	2,69	5,81%
		2-D	1,44	1,74	1,43	4,61	96,80	2,64	5,13%
		4-D	0,84	1,14	0,84	2,82	350,30	9,57	21,28%

Los resultados obtenidos para la pérdida, en los especímenes de emulsión asfáltica modificada con el polímero SBR, mostraron una tendencia a disminuir conforme se aumentó la cantidad de asfalto, al igual que sucedió con la emulsión convencional.

Al comparar los resultados de ambas emulsiones, como se muestra en la Figura 5-24, se observa que a pesar de que las muestras de CRS-P disminuyeron la cantidad de material desprendido, no se presentó una diferencia significativa. La disminución de la pérdida en las muestras de emulsión modificada, para ambas granulometrías, no permite considerar una disminución de la cantidad de asfalto que permita mantener el mismo desempeño que en una muestra con emulsión convencional.

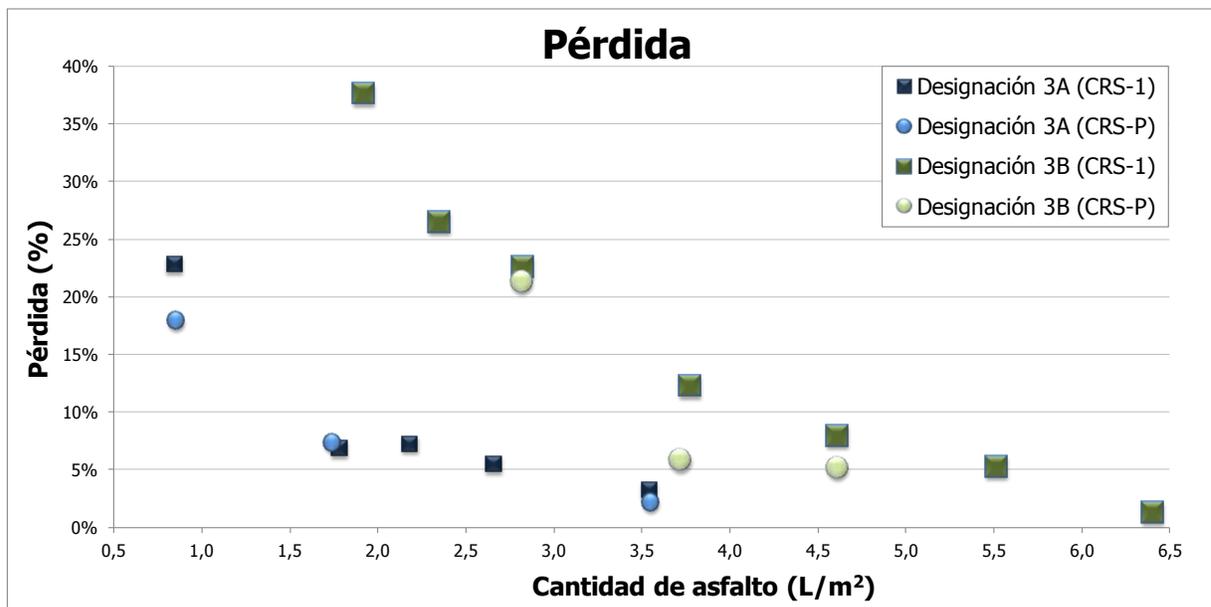


Figura 5-24. Pérdida de material contra cantidad total de asfalto, emulsión convencional y modificada

En la Figura 5-25 y en la Figura 5-26 se compara la pérdida de material a lo largo del ensayo para las muestras con emulsión convencional y modificada, se aprecia cómo la mayoría de las muestras con asfalto modificado presentaron mayor pérdida que las de asfalto convencional a lo largo del desarrollo del ensayo. Sin embargo, esta pérdida no es significativa como se observó de la Figura 5-24.

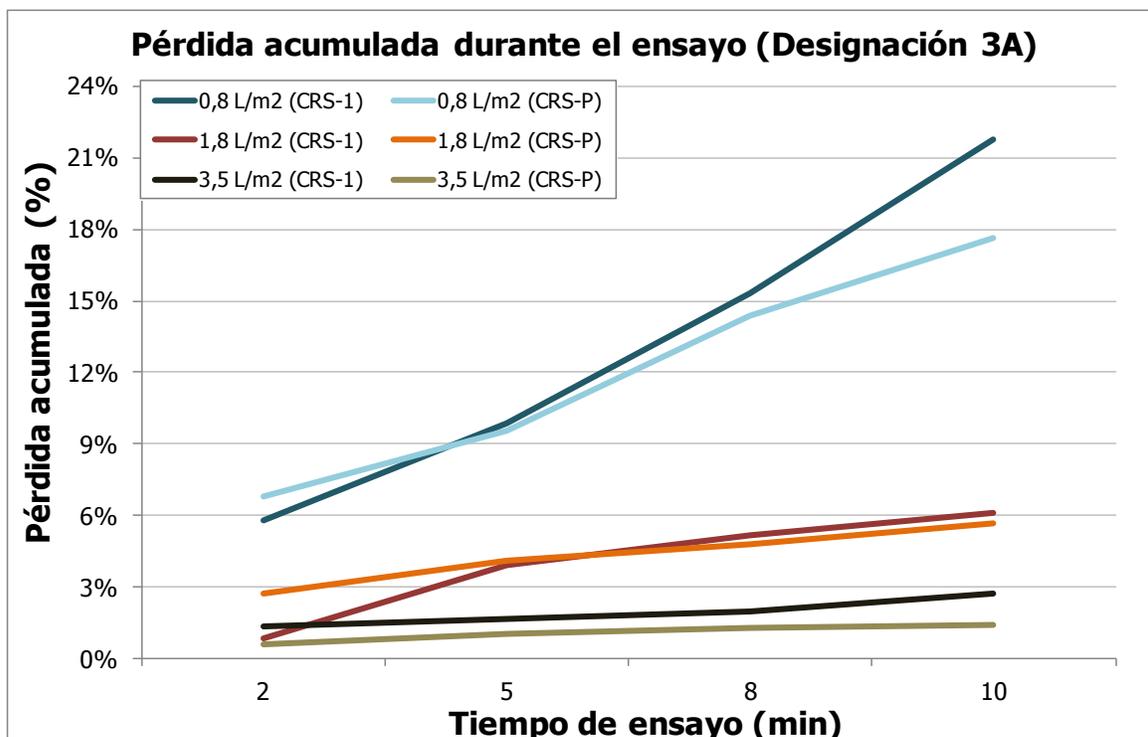


Figura 5-25. Pérdida acumulada durante el ensayo, en peso húmedo (TS 3A, CRS-1 y CRS-P)

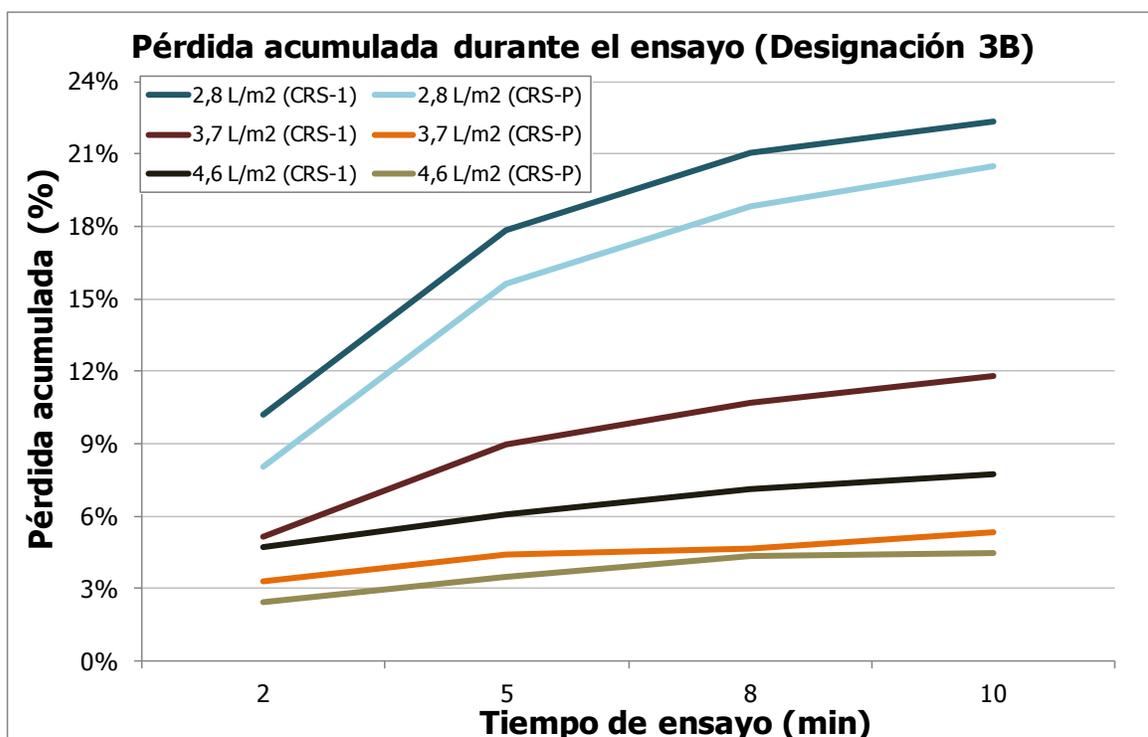


Figura 5-26. Pérdida acumulada durante el ensayo, en peso húmedo (TS 3B, CRS-1 y CRS-P)

5.4.2 Ensayo de exceso de asfalto

Se realizaron muestras de tratamiento con emulsión modificada para el ensayo de exceso de asfalto, esto con el fin de comparar el comportamiento que presentan con las muestras realizadas con asfalto convencional. En el Cuadro 5-8 se presenta la cantidad de asfalto utilizada en cada espécimen, así como el número de muestra, la cantidad de arena adherida, el porcentaje de área con asfalto expuesto y asfalto expuesto crítico y la deformación promedio de cada una de las muestras ensayadas.

Cuadro 5-8. Resultados y características de las muestras utilizadas en el ensayo de exceso de asfalto, emulsión modificada

Tipo de asfalto	Designación	Número de muestra	Asfalto Capa 1 (L/m ²)	Asfalto Capa 2 (L/m ²)	Asfalto Capa 3 (L/m ²)	Asfalto total (L/m ²)	Arena adherida (g)	Arena adherida (kg/m ²)	Asfalto expuesto (%)	Asfalto expuesto crítico (%)	Deformación (mm)
CRS-P	3A	1-C	0,54	0,67	0,54	1,75	10,50	0,55	12,77%	0,00%	2,46
		2-C	1,14	1,26	1,14	3,54	7,10	0,37	39,81%	0,00%	0,37
		3-C	0,99	1,11	0,99	3,09	8,60	0,45	37,06%	0,00%	2,23
	3B	1-D	1,14	1,44	1,14	3,72	14,30	0,75	12,26%	0,00%	1,55
		2-D	1,45	1,74	1,44	4,63	10,00	0,52	27,39%	0,00%	3,69
		3-D	1,59	1,89	1,59	5,07	7,90	0,41	35,57%	0,00%	2,72

La cantidad de arena adherida en las muestras de laboratorio realizadas con asfalto modificado, al igual que las muestras realizadas con asfalto convencional, disminuye con forme aumenta la cantidad de asfalto, contrario al resultado esperado. Además, no se encontró alguna relación que discrimine el comportamiento entre las muestras con distinto tipo de emulsión, como se puede apreciar en la Figura 5-27.

Las muestras con emulsión modificada a las que se les realizó el análisis por medio del procesamiento de imágenes digitales, presentaron un comportamiento similar al de las muestras con emulsión convencional, la comparación se muestra en la Figura 5-28 y en la Figura 5-29. A pesar de que los especímenes con asfalto modificado presentaron una menor área con asfalto expuesto que las muestras con asfalto convencional, la diferencia entre ellas no es significativa.

Ninguna de las muestras con CRS-P ensayadas presentó la condición de asfalto expuesto crítico, a pesar de que para el TS con designación 3A se ensayó una muestra fuera de la zona definida con desempeño adecuado, como se señala en la Figura 5-28. Para esta muestra, según el análisis realizado para el tratamiento con emulsión convencional, se esperaba que

se presentara la condición de asfalto expuesto crítico, debido a la cantidad de asfalto utilizada.

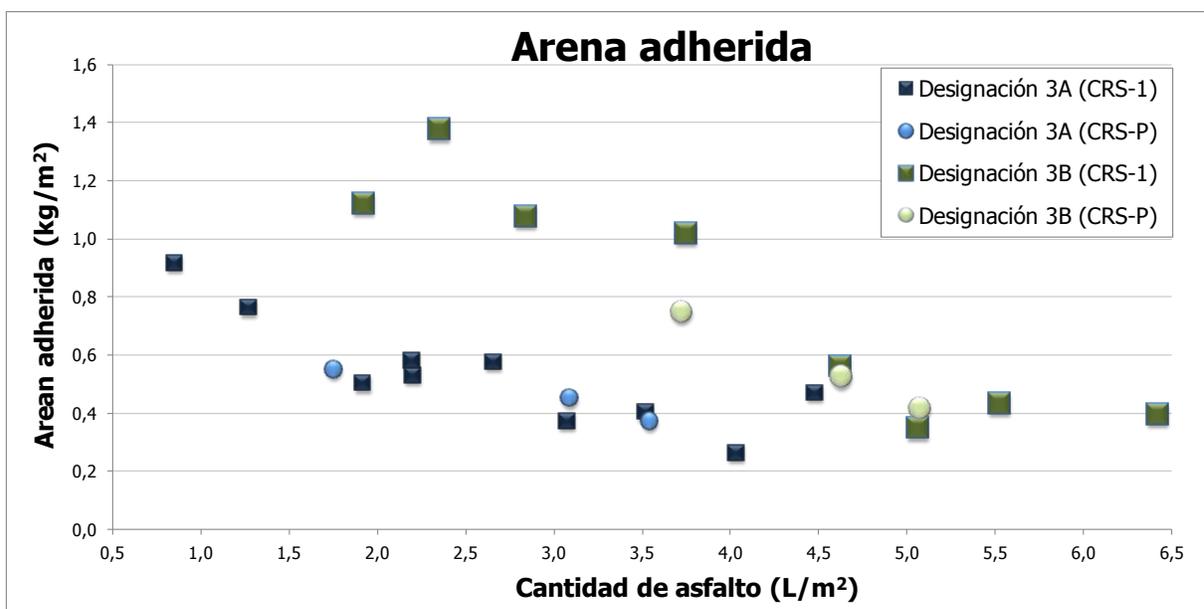


Figura 5-27. Cantidad de arena adherida por unidad de área contra cantidad total de asfalto, emulsión convencional y modificada

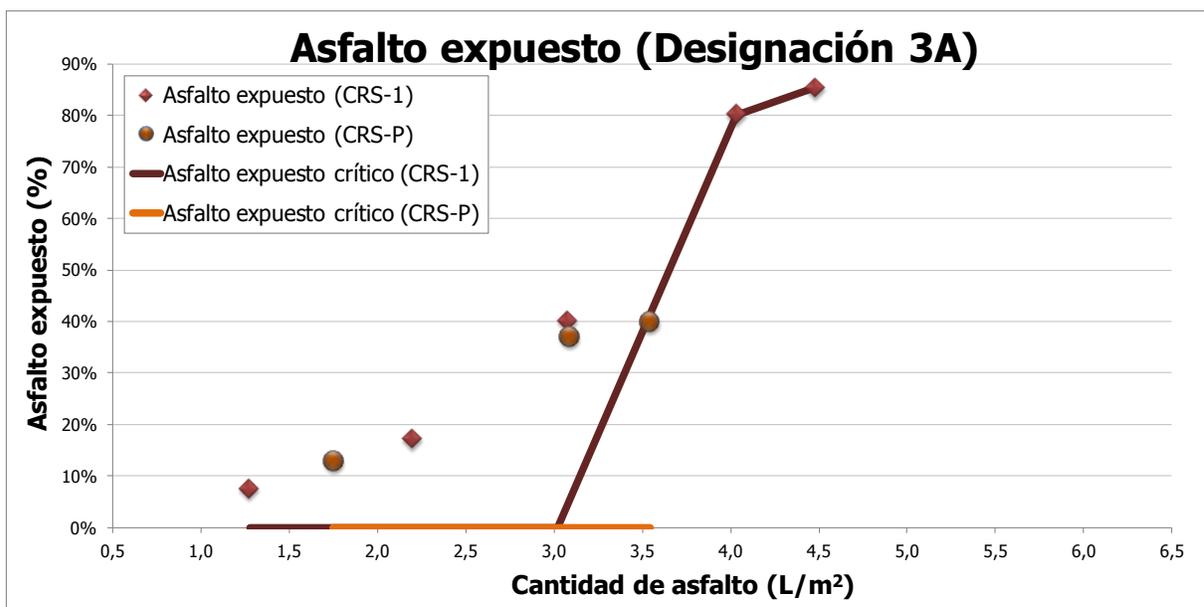


Figura 5-28. Asfalto expuesto contra cantidad total de asfalto, emulsión convencional y modificada (designación 3A)

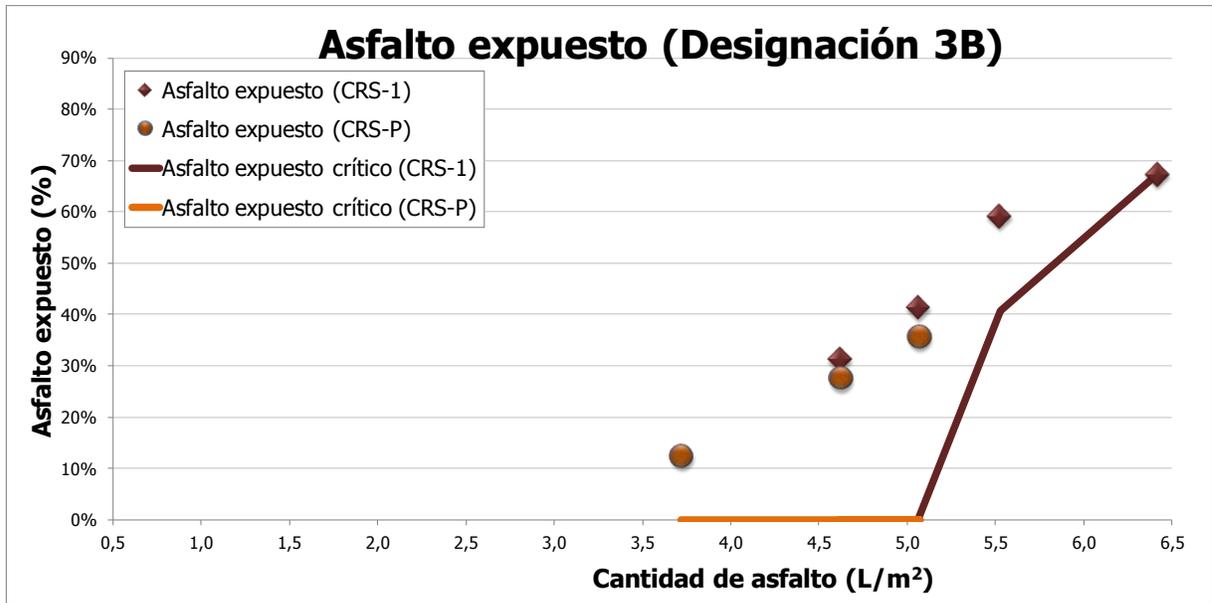


Figura 5-29. Asfalto expuesto contra cantidad total de asfalto, emulsión convencional y modificada (designación 3B)

Se midió la deformación de las muestras ensayadas en las que se utilizó asfalto modificado, en la Figura 5-30 y en la Figura 5-31 se presenta la comparación con las muestras en las que se utilizó asfalto convencional. Los mediciones, al igual que como se observó en las muestras con CRS-1, no mostraron ninguna tendencia.

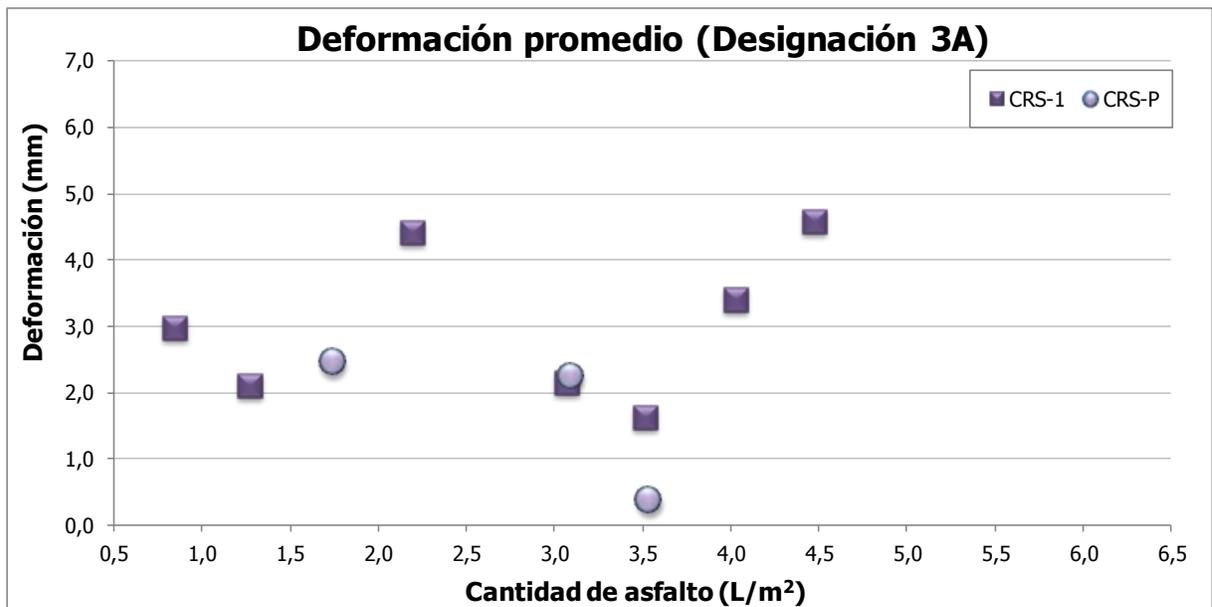


Figura 5-30. Deformación promedio, emulsión convencional y modificada (designación 3A)

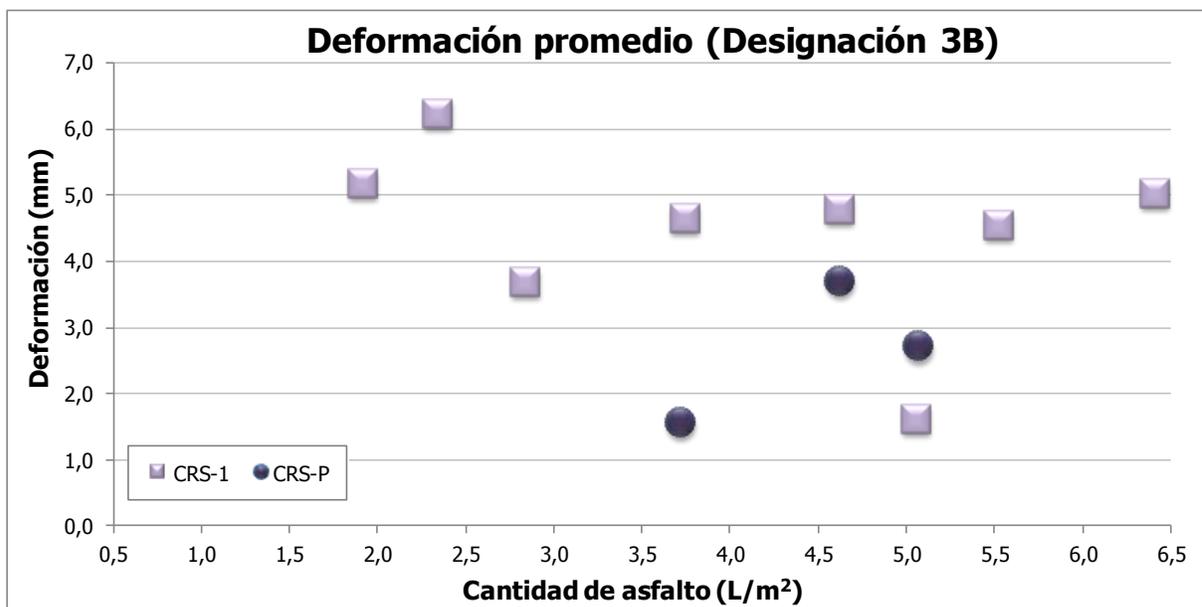


Figura 5-31. Deformación promedio, emulsión convencional y modificada (designación 3B)

Capítulo 6. Conclusiones y recomendaciones

6.1 Conclusiones

Mediante este proyecto se propone una metodología para evaluar el desempeño de tratamientos superficiales en laboratorio, a través de la evaluación de la pérdida y el exceso de asfalto, que son métodos utilizados en el diseño de sellos de lechada asfáltica. Se pudo determinar que el ensayo de pérdida implementado, logró discriminar entre especímenes con distinta variación de cantidad de asfalto. Mientras que para el ensayo de exceso de asfalto, la medición de la adhesión de arena y de la deformación no proporcionó resultados concluyentes, sin embargo, a través del procesamiento de imágenes digitales sí se logró distinguir entre muestras con distintas cantidades de asfalto.

6.1.1 Caracterización de materiales

- El agregado utilizado en este proyecto posee una alta cubricidad, lo que favorece el desempeño de los tratamientos superficiales.
- Las granulometrías para los tratamientos superficiales, especificadas en el CR-2010, son difíciles de encontrar en los apilamientos comunes, por lo que se debe procesar el material para cumplir con los requerimientos de la especificación.

6.1.2 Metodologías teóricas de diseño

- Los métodos de Texas DOT y regla del décimo proporcionaron una menor cantidad de agregado y de asfalto, en comparación con las demás metodologías teóricas estudiadas. Por otro lado, la metodología de ASTM obtuvo mayores cantidades de asfalto y de agregado, en el tratamiento con designación 3B.
- La metodología del instituto del asfalto (McLeod) y el método de Hanson proporcionan resultados muy similares en cuanto a la cantidad de agregado, mientras que la de McLeod obtiene cantidades de asfalto menores que el método de Hanson.
- Las metodologías de Hanson y McLeod presentan resultados con mayor variación al utilizar distintas granulometrías, en comparación con la regla del décimo. Es decir, estas metodologías son más sensibles a los cambios de granulometría que la regla del décimo.

- La cantidad de vacíos finales y la altura final del tratamiento, son consideraciones importantes que influyen directamente en los resultados obtenidos de cada método teórico.
- La dosificación de agregado obtenida de las distintas metodologías de diseño, para el caso del tratamiento con designación 3A, se encuentran por debajo de los rangos establecidos por el CR-2010.
- Para el TS con designación 3B, las metodologías de diseño proporcionaron cantidades de agregado cercanas a los valores especificados por el CR-2010. La regla del décimo y el método de Texas DOT presentaron cantidades menores, mientras que Hanson, McLeod y ASTM obtuvieron cantidades de agregado dentro del rango especificado.
- De las cantidades de asfalto obtenidas por las distintas metodologías para el TS con designación 3A, solamente la regla del décimo se encuentra dentro del rango de la especificación nacional, las otras metodologías aportan valores inferiores.
- La aplicación de las metodologías al TS con designación 3B, proporcionó resultados de cantidad de asfalto dentro del rango especificado por el CR-2010.

6.1.3 Métodos de ensayo

- El ensayo de pérdida implementado, logró discriminar entre muestras con distinta cantidad de asfalto y con distinta granulometría.
- La duración del ensayo de pérdida abarca el periodo en el que se da la mayor pérdida o desprendimiento de material, de acuerdo con pruebas experimentales. Según las mediciones tomadas, posterior al tiempo de ensayo se obtienen cantidades bajas de pérdida.
- La medición de la adhesión de arena no aporta resultados congruentes con lo esperado. Al aumentar la cantidad de asfalto se espera una mayor cantidad de arena adherida, sin embargo, se obtuvo por el contrario una disminución. Lo anterior debido a que la arena se introduce en los vacíos del tratamiento superficial, que disminuyen al aumentar la cantidad de asfalto.
- Mediante el procesamiento de imágenes digitales se logró obtener valores congruentes, que presentaron una tendencia a aumentar el área de asfalto expuesto y asfalto expuesto crítico, al aumentar la cantidad de asfalto en la muestra.

- Las mediciones de la deformación de la muestra, en el ensayo de exceso de asfalto, no mostraron ninguna tendencia razonable.

6.1.4 Evaluación del desempeño en laboratorio

- Mediante el ensayo de pérdida se logró identificar un cambio de pendiente en una misma serie de datos, en la que la cantidad de material desprendido disminuye en al aumentar la cantidad de asfalto. La intersección de estas pendientes se propone como la mínima cantidad de asfalto para la que se obtiene una pérdida de material aceptable, la cual debe de ser verificada con base en la experiencia.
- A través del procesamiento de imágenes digitales, se logró identificar el valor de la cantidad de asfalto de la muestra a partir del cual se empieza a presentar exudación, correspondiente al 40 % del área con asfalto expuesto. Este valor es identificado como la máxima cantidad de asfalto para la que se obtienen un desempeño aceptable.
- Con la mínima y máxima cantidad de asfalto necesaria para obtener un desempeño aceptable de la muestra, obtenidas del ensayo de pérdida y del procesamiento de las imágenes digitales, se identificó una zona de desempeño aceptable, compuesta por este rango de dosificaciones de asfalto.
- La zona de desempeño aceptable del TS con designación 3A, se encuentra dentro del rango de dosificaciones de asfalto especificada por el CR-2010.
- La zona de desempeño aceptable del TS con designación 3B, se encuentra desplazada hacia la derecha (mayor cantidad de asfalto), en comparación con el rango especificado por el CR-2010.
- La cantidad de agregado utilizado en las muestras de laboratorio, son menores al rango de cantidades de agregado de la especificación nacional.
- Las metodologías que mejor aproximan la cantidad de agregado con la dosificación utilizada en las muestras de laboratorio son el método de Texas DOT y la regla del décimo.
- Para la granulometría con designación 3A, únicamente la cantidad de asfalto aportada por regla del décimo se encuentra dentro de la zona definida con desempeño aceptable.

- Solamente la cantidad de asfalto obtenida con el método del ASTM se encuentra dentro de la zona con desempeño aceptable del tratamiento superficial con designación 3B.

6.1.5 Desempeño de muestras con emulsión modificada con polímero

- Las muestras evaluadas en el ensayo de pérdida, que utilizaron emulsión modificada con el polímero SBR, no mostraron una disminución significativa en la cantidad de material desprendido.
- Al igual que en las muestras de asfalto convencional, la medición de arena adherida en los especímenes con asfalto modificado no presenta la tendencia ascendente que se esperaba, por lo que no permite discriminar entre muestras al variar la cantidad de asfalto utilizado.
- El procesamiento de imágenes digitales, no aportó diferencias significativas en el área de la muestra que presenta la condición de asfalto expuesto de los especímenes con asfalto modificado, en comparación con la muestra que utilizaron asfalto convencional. Aunque pareciera que permite menores dosificaciones antes de darse exudación.
- La medición de la deformación de las muestras con asfalto modificado, no presenta resultados que sigan alguna tendencia definida, al igual que en las muestras con asfalto convencional.

6.2 Recomendaciones

- Se requiere realizar ensayos con mayor cantidad de especímenes evaluados, para tener una muestra estadística significativa y verificar la precisión y exactitud de los resultados.
- Se recomienda realizar evaluaciones con material de tamaño máximo nominal de 19,5 mm, es decir, tratamientos con designación 3C (según lo establece el CR-2010), debido a que en el país existen gran cantidad de proyecto en los que utilizan estas graduaciones.
- Verificar las granulometrías establecidas en el CR-2010 para tratamientos superficiales con las granulometrías de los apilamientos comunes.

- Es necesario evaluar el efecto de la disminución del tamaño medio en la segunda capa del tratamiento superficial con designación 3B, para valorar si la variación en el rango de cantidades de asfalto que aportan un desempeño adecuado se ajusta al rango establecido en el CR-2010.
- Evaluar el desempeño con las metodologías implementadas para las granulometrías establecidas en el CR-77.
- Es recomendable evaluar la sensibilidad de las distintas metodologías teóricas de diseño, a variaciones en los escenarios tales como utilizar TS-1 o TS-2.
- Para futuras investigaciones, se recomienda realizar modificaciones a la medición de la adherencia de arena, que permitan obtener resultados que presenten una tendencia racional. Para esto se sugiere:
 - Aislar el área de la huella generada por la rueda cargada, para evitar que la arena se distribuya en toda el área de la muestra y que partículas de arena se queden en el extremo del molde.
 - Calentar la muestra antes de colocarle la arena, para ayudar a que la arena se adhiera más fácilmente al área exudada de la muestra.
 - Realizar una distribución inicial de arena en la muestra, para saturar los vacíos y no contabilizar esta cantidad de arena como arena adherida.
- En proyectos próximos en los que se utilice emulsión asfáltica catiónica de rompimiento rápido, se recomienda realizar mediciones del pH de la emulsión, que está relacionado con la estabilidad, con el fin de llevar un control de este parámetro durante la realización del proyecto.
- Se recomienda realizar calibraciones en campo, para verificar la correlación del comportamiento presentado en el laboratorio con el comportamiento en el campo.

Referencias Bibliográficas

- American Society for Testing and Materials (ASTM). *Standard Test Method for Sweep Test of Bituminous Emulsion Surface Treatment Specimens* ASTM D 7000. Estados Unidos: ASTM.
- American Society for Testing and Materials (ASTM). *Specific Gravity and Absorption of Fine Aggregate* ASTM C 128. Estados Unidos: ASTM.
- American Society for Testing and Materials (ASTM). *Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Coarse Aggregate* ASTM C 127. Estados Unidos: ASTM.
- American Society for Testing and Materials (ASTM). *Standard Practice for Quantities of Materials for Bituminous Surface Treatments* ASTM D 1369-84. Estados Unidos: ASTM.
- American Society for Testing and Materials (ASTM). *Unit Weight and Voids in Aggregate* ASTM C 29. Estados Unidos: ASTM.
- Akszo Nobel Surface Chemistry. *Productos y aplicaciones*.
- Aktas, B., Gurer, C. & Karasahin, M. (2011). *Determining of Precoated Aggregate Performance on Chip Seals Using Vialit Test*. Estambul, Turquía.
- Avendaño, J., Bracho, C. & Mercado, R. (2008). *Emulsiones asfálticas, usos-rompimiento*. Universidad de los Andes, Mérida, Venezuela.
- Correa, C. *Procesamiento de imágenes para la identificación de uva y follaje usando técnicas de clasificación no supervisadas*. Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, España.
- Deneuvillers, C., Joly, A. & Serfass, J. (1998). *Techniques et méthodologie d'étude pour l'amélioration des enduits superficiels*. RGRA No. 765 setiembre 1998. Altos de Sena, Francia.
- Ensayos ligantes asfálticos*. Extraído el 8 de octubre de 2012 desde: http://www.lanamme.ucr.ac.cr/index.php?option=com_content&view=article&id=329&Itemid=366

- Esqueda, J. & Palafox, L. (2005). *Procesamiento de imágenes*. Universidad Autónoma de Baja California, Baja California, México.
- Jiménez, M., Molina, D. & Sibaja, D. (2008). *Evaluación de la factibilidad en la aplicación de sellos de lechada asfáltica "SlurrySeals" en Costa Rica*. Reporte de investigación, Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales, Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica.
- Instituto del asfalto (1979). *Asphalt surface treatments and asphalt penetration Macadam*.
- Lee, J. (2007). *Performance Based Evaluation of Asphalt Surface Treatment Using Third Scale Model Mobile Loading Simulator*. Proyecto de graduación para optar por el grado de doctorado en Ingeniería Civil, North Carolina State University, Carolina del Norte, Estados Unidos de Norteamérica.
- Lee, J. & Kim, R. (2007). *Understanding the Effects of Aggregate and Emulsion Application Rates on Performance of Asphalt Surface Treatments*. Transportation Research Board.
- Leiva, F. (2005). *Diseño, construcción y control de calidad en la aplicación de tratamientos superficiales*. Reporte de investigación, Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales, Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica.
- Lerma, J. *Fotogrametría moderna: analítica y digital*. Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, España.
- Ministerio de Obras Públicas y Transportes (MOPT). *Manual de especificaciones generales para la construcción de carreteras, caminos y puentes (CR-2010)*. Costa Rica: MOPT.
- Modelos de color*. Extraído el 2 de agosto de 2012 desde: <http://aprende.colorotate.org/color-models.html>
- National Cooperative Highway Research Program (NCHRP). (2005). *Chip Seal Best Practices*. Washington, D.C.: NCHRP.
- National Cooperative Highway Research Program (NCHRP). (2011). *Manual for Emulsion-Based Chip Seal for Pavement Preservation*. Washington, D.C.: NCHRP.

- Perera, V. (1987). *Metodología de diseño de los tratamientos superficiales*. 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.
- Pérez, J. (2007). *Clasificación de imágenes multiespectrales*. Universidad de Buenos Aires, Buenos Aires, Argentina.
- Pintor, F. (1985). *Las emulsiones asfálticas en la construcción de tratamientos superficiales en Costa Rica*. 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.
- Reglamento Técnico Centroamericano. *Productos de Petróleo. Asfaltos. Especificaciones. SayboltViscosimeter Bath*. Extraído el 8 de octubre de 2012 desde: <http://www.humboldtmg.com/c-5-p-348-id-5.html>
- Sittenfeld, M. (1979). *Usos y abusos de los tratamientos superficiales en Costa Rica*. 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.
- Wood, T., Janisch, D. & Gaillard, F. (2006). *Minnesota Seal Coat Handbook*. Minnesota: Minnesota Department of Transportation.

Apéndices

b

Apéndice 1. Ejemplo de cálculo de las metodologías de diseño

Se realiza un ejemplo de cálculo para cada metodología de diseño tomando en cuenta la granulometría C, correspondiente a la primera capa del tratamiento superficial con designación 3B, que presenta las características mostradas en el Cuadro a-1 y en el Cuadro a-2.

Cuadro a-1. Distribución granulométrica, granulometría C

No. de tamiz	Abertura (mm)	Porcentaje pasando
3/4"	19,00	100,00%
1/2"	12,50	99,58%
3/8"	9,50	18,15%
No. 4	4,75	0,23%
No. 200	0,075	0,20%

Cuadro a-2. Características del agregado, granulometría C

Parámetros de diseño		Designación 3B Granulometría C
Agregado	Gravedad específica bruta seca (Gbs)	2,67
	Peso unitario suelto (kg/m ³)	1440
	Vacíos en el agregado suelto (%)	46,0%
	Índice de Lajas (%)	0%
	Absorción de agua (%)	1,7%
	Absorción de asfalto (%)	< 1,5%
Emulsión	Porcentaje de asfalto residual (%)	60%
	Condición superficial	Liso
Otros	Condición climática	Clima tropical
	Estación climática de construcción	Verano
	Volumen de tránsito (veh/día)	500 - 1000

A partir de la distribución granulométrica se pueden determinar los siguientes parámetros:

- Tamaño máximo (D): 12,5 mm
- Tamaño mínimo (d): 4,75 mm
- Tamaño promedio (Δ):

$$\Delta = \frac{D + d}{2} = \frac{12,5 + 4,75}{2} = 8,63 \text{ mm}$$

- Tamaño medio (Tm): 10,6 mm (tomado de la Figura a-1)
- Índice de lajas (FI): 6 % (tomado de la Figura a-2)

d

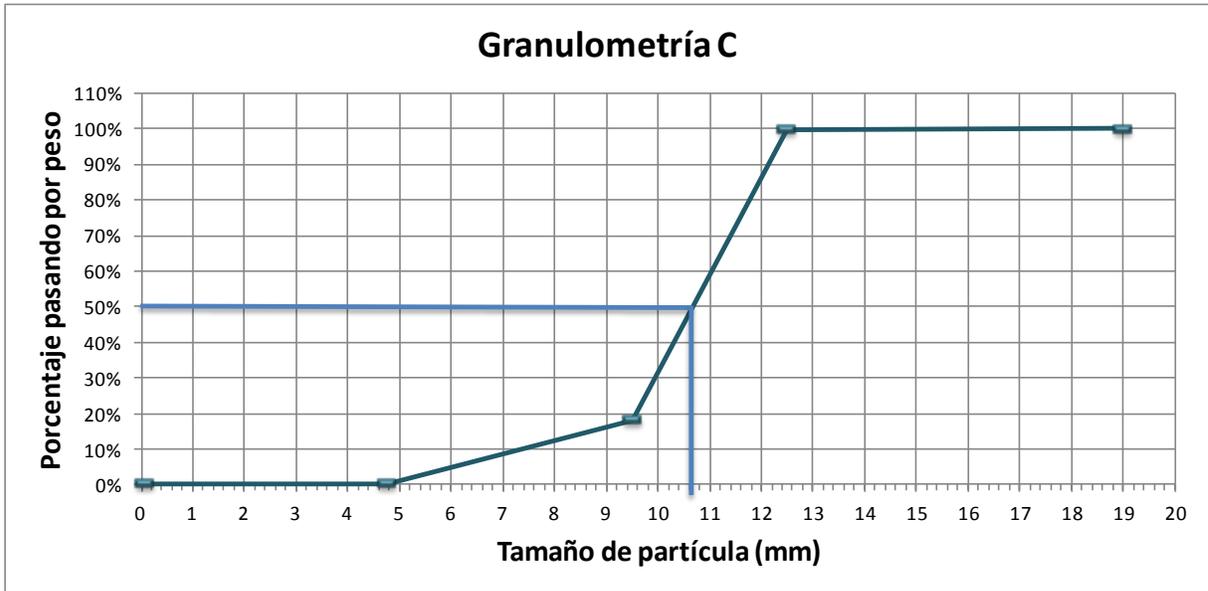


Figura a-1. Granulometría C, determinación del tamaño medio del agregado

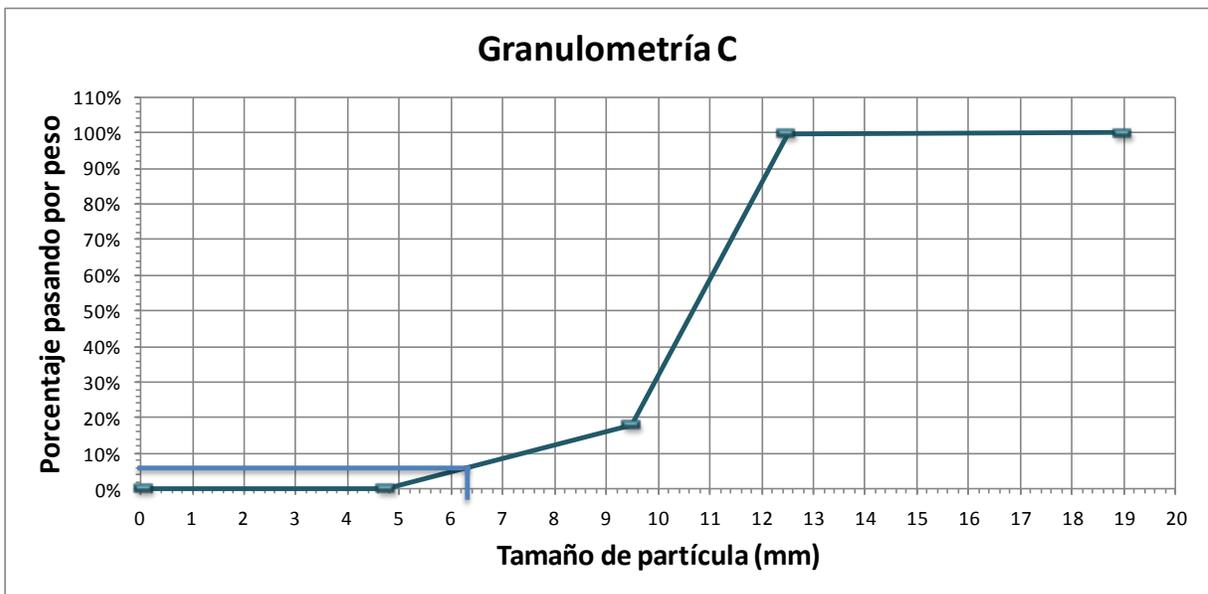


Figura a-2. Granulometría C, determinación del índice de las

Con los datos obtenidos es posible calcular la dimensión mínima promedio (H):

$$H = \frac{T_m}{1,139285 + 0,011506(FI)} = \frac{10,6 \text{ mm}}{1,139285 + 0,011506(6\%)} = 8,77 \text{ mm}$$

Ahora se obtienen los factores de corrección:

- Factor de corrección por condición climática (C): 0,9 debido al clima tropical.
- Factor de corrección por desperdicio de agregado (E): no aplica debido a que es un tratamiento superficial múltiple.
- Factor de corrección por carga vehicular (T): 0,7 tomado del Cuadro a-3.
- Factor de corrección por textura superficial (P): 0,0 tomado del Cuadro a-4.
- Factor de corrección por absorción de asfalto (A): 0,0 debido a que la absorción del agregado es menor que 1,5 %.
- Factor de corrección por estación climática (K): 0,4 debido a que se asumió que el tratamiento se construye en verano.

Cuadro a-3. Factor de tráfico

Tráfico vehicular por día	< 100	100 - 500	500 - 1000	1000 - 2000	> 2000
Factor de tráfico ⁽¹⁾	0,85	0,75	0,70	0,65	0,60

⁽¹⁾ Expresa en forma decimal el porcentaje de vacíos que deben de ser llenados con asfalto.

Nota: Estos factores no toman en cuenta la absorción de la superficie o del agregado.

Fuente: Instituto del Asfalto, 1979.

Cuadro a-4. Factor de corrección por textura

Textura de pavimento existente	Factor de corrección por textura (L/m ²)
Negra, asfalto exudado	-0,04 a -0,27
Lisa, no porosa	0
Ligeramente porosa y oxidada	0,14
Ligeramente porosa, oxidada y picada	0,27
Gravemente porosa, oxidada y picada	0,40

Fuente: Instituto del Asfalto, 1979.

Método de Hanson

Cantidad de agregado:

$$Q = 0,80 \cdot G \cdot H \cdot E = 0,80 \cdot 2,67 \cdot 8,77 \text{ mm} = 18,74 \text{ kg/m}^2$$

Cantidad de asfalto:

$$L = 0,20 \cdot H \cdot T + P = 0,20 \cdot 8,77 \text{ mm} \cdot 0,70 + 0,0 = 1,23 \text{ L/m}^2$$

Cantidad de emulsión asfáltica:

f

$$\text{Emulsión} = \frac{L}{\% \text{ Asfalto residual}} = \frac{1,23 \text{ L/m}^2}{0,60} = 2,05 \text{ L/m}^2$$

Método de McLeod

Cantidad de agregado:

$$Q = (1 - 0,4 \cdot V) \cdot H \cdot G \cdot E = (1 - 0,4 \cdot 0,46) \cdot 8,77 \text{ mm} \cdot 2,67 = 19,11 \text{ kg/m}^2$$

Cantidad de asfalto:

$$L = C \cdot (0,4 \cdot H \cdot T \cdot V + P + A) = 0,9 \cdot (0,4 \cdot 8,77 \text{ mm} \cdot 0,70 \cdot 0,46 + 0,0 + 0,0) = 1,02$$

Cantidad de emulsión asfáltica:

$$\text{Emulsión} = \frac{L}{\% \text{ Asfalto residual}} = \frac{1,02 \text{ L/m}^2}{0,60} = 1,69 \text{ L/m}^2$$

Método de Linckenheyl (regla del décimo)

Para obtener la cantidad de agregado, debido a que el tamaño promedio ($\Delta = 8,63 \text{ mm}$) es menor que 10 mm, se utiliza la siguiente ecuación:

$$Q = 3 + 0,70 \cdot \Delta = 3 + 0,70 \cdot 8,63 \text{ mm} = 9,04 \text{ kg/m}^2$$

Cantidad de asfalto:

$$L = 0,10 \cdot Q = 0,10 \cdot 9,04 \text{ kg/m}^2 = 0,90 \text{ L/m}^2$$

Cantidad de emulsión asfáltica:

$$\text{Emulsión} = \frac{L}{\% \text{ Asfalto residual}} = \frac{0,90 \text{ L/m}^2}{0,60} = 1,51 \text{ L/m}^2$$

Método de Kearby modificado (Texas DOT)

Cantidad de agregado:

$$Q = k = 11,70 \text{ kg/m}^2$$

Cantidad de asfalto:

$$d = 1000 \cdot \frac{k}{W} = 1000 \cdot \frac{11,70 \text{ kg/m}^2}{1440 \text{ kg/m}^3} = 8,13 \text{ mm}$$

$e = 32 \%$ tomado de la Figura a-3.

$$E = d \cdot e = 8,13 \text{ mm} \cdot 0,32 = 2,6 \text{ mm}$$

$$L = E \cdot V \cdot T + P = 2,6 \text{ mm} \cdot 0,46 \cdot 0,70 + 0,0 = 0,84 \text{ L/m}^2$$

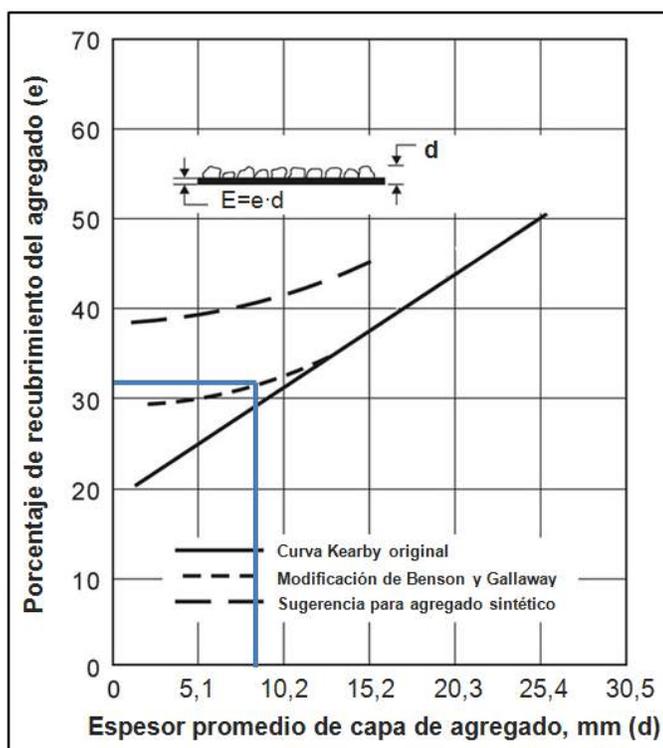


Figura a-3. Relación entre el porcentaje de recubrimiento y el espesor promedio de capa de agregado

Fuente: NCHRP, 2011.

Modificado por: Autora, 2012.

Cantidad de emulsión asfáltica:

$$\begin{aligned} L_{emulsión} &= L + K \cdot \left(\frac{L}{\%Asfalto residual} - L \right) = 0,84 \text{ L/m}^2 + 0,4 \cdot \left(\frac{0,84 \text{ L/m}^2}{0,60} - 0,84 \text{ L/m}^2 \right) \\ &= 1,06 \text{ L/m}^2 \end{aligned}$$

h

Metodología ASTM

Para obtener la cantidad de agregado, se obtiene primero la tasa de aplicación típica del Cuadro a-5:

$$\text{Tasa de aplicación típica} = 0,012 \text{ m}^3/\text{m}^2$$

Cuadro a-5. Cantidades de materiales para tratamientos superficiales bituminosos

Tratamiento superficial		Agregado		Material Bituminoso
Tipo	Aplicación	Tamaño máximo nominal (mm)	Tasa de aplicación típica (m ³ /m ²)	Tasa de aplicación típica (L/m ²) ⁽¹⁾
Simple	Primera capa	25,0 a 12,5	0,017	1,90
		19,0 a 9,5	0,012	1,68
		12,5 a 4,75	0,008	1,04
		9,5 a 2,36	0,006	0,86
Doble	Primera capa	25,0 a 12,5	0,017	1,90
	Segunda capa	2,5 a 4,75	0,008	1,18
Doble	Primera capa	10,0 a 9,5	0,012	1,68
	Segunda capa	9,5 a 2,36	0,006	0,91
Triple	Primera capa	25,0 a 12,5	0,017	1,90
	Segunda capa	12,5 a 4,75	0,008	1,18
	Tercera capa	4,75 a 1,18	0,004	0,63
Triple	Primera capa	19,0 a 9,5	0,012	1,68
	Segunda capa	9,5 a 2,36	0,006	0,91
	Tercera capa	4,75 a 1,18	0,004	0,63

Nota 1. Los valores son diseños típicos y no necesariamente obtenibles para la precisión indicada.

⁽¹⁾ La experiencia ha demostrado que estas cantidades deben de ser incrementadas ligeramente (de 5 % a 10 %) cuando el material bituminoso a utilizar fue manufacturado para aplicaciones con poco o sin calor.

Fuente: ASTM, 2006.

Ahora, del Cuadro a-6 se interpola la cantidad de agregado en kg/m³ con base en el peso unitario suelto, que en este caso es 1440kg/m³ y según la tasa de aplicación

Para 0,0113m³/m²:

$$\frac{1423,9 \text{ kg/m}^3 - 1483,2 \text{ kg/m}^3}{19,26 \text{ kg/m}^2 - 20,07 \text{ kg/m}^2} = \frac{1423,9 \text{ kg/m}^3 - 1440,0 \text{ kg/m}^3}{19,26 \text{ kg/m}^2 - x}$$

$$\Rightarrow x = 19,48 \text{ kg/m}^2$$

Para 0,0127 m³/m²:

$$\frac{1423,9 \text{ kg/m}^3 - 1483,2 \text{ kg/m}^3}{21,70 \text{ kg/m}^2 - 22,51 \text{ kg/m}^2} = \frac{1423,9 \text{ kg/m}^3 - 1440,0 \text{ kg/m}^3}{21,70 \text{ kg/m}^2 - x}$$

$$\Rightarrow x = 21,92 \text{ kg/m}^2$$

Por último, en este caso es necesario extrapolar los valores obtenidos anteriormente para obtener el valor correspondiente a la tasa de aplicación de $0,012 \text{ m}^3/\text{m}^2$:

$$\frac{0,0113 \text{ m}^3/\text{m}^2 - 0,0127 \text{ m}^3/\text{m}^2}{19,48 \text{ kg}/\text{m}^2 - 21,92 \text{ kg}/\text{m}^2} = \frac{0,0113 \text{ m}^3/\text{m}^2 - 0,012 \text{ m}^3/\text{m}^2}{19,48 \text{ kg}/\text{m}^2 - Q}$$

$$\Rightarrow Q = 20,7 \text{ kg}/\text{m}^2$$

Cuadro a-6. Tabla de conversiones aproximadas de peso unitario suelto a kilogramos por metro cuadrado

Peso unitario suelto (kg/m^3)	Cantidad de agregado en kg/m^2 según la tasa de aplicación en m^3/m^2								
	$0,0028 \text{ m}^3$	$0,0042 \text{ m}^3$	$0,0057 \text{ m}^3$	$0,0071 \text{ m}^3$	$0,0085 \text{ m}^3$	$0,0099 \text{ m}^3$	$0,0113 \text{ m}^3$	$0,0127 \text{ m}^3$	$0,0142 \text{ m}^3$
1067,9	3,53	5,42	7,32	9,22	10,85	12,75	14,38	16,27	18,17
1127,2	3,89	5,70	7,59	9,49	11,39	13,29	15,19	17,09	18,99
1186,5	4,07	5,97	8,14	10,04	11,93	14,10	16,00	18,17	20,07
1245,9	4,34	6,24	8,41	10,58	12,48	14,65	16,82	18,99	21,16
1305,2	4,34	6,51	8,95	11,12	13,29	15,46	17,63	19,80	22,24
1364,5	4,61	7,05	9,22	11,66	13,83	16,27	18,44	20,89	23,06
1423,9	4,88	7,32	9,76	11,93	14,38	16,82	19,26	21,70	24,14
1483,2	5,15	7,59	10,04	12,48	15,19	17,63	20,07	22,51	25,23
1542,5	5,15	7,87	10,58	13,02	15,73	18,17	20,89	23,60	26,04
1601,8	5,42	8,14	10,85	13,56	16,27	18,99	21,70	24,41	27,12
1661,2	5,70	8,41	11,12	14,10	16,82	19,80	22,51	25,23	28,21
1720,5	5,70	8,68	11,66	14,65	17,36	20,34	23,33	26,31	29,02
1779,8	5,97	8,95	11,93	15,19	17,90	21,16	24,14	27,12	29,84

Fuente: ASTM, 2006.

La cantidad de asfalto se obtiene tomado del Cuadro a-5:

$$L = 1,68 \text{ L}/\text{m}^2$$

Cantidad de emulsión asfáltica:

$$\text{Emulsión} = \frac{L}{\% \text{ Asfalto residual}} = \frac{1,68 \text{ L}/\text{m}^2}{0,60} = 2,80 \text{ L}/\text{m}^2$$

j

Apéndice 2.Generalidades del análisis de imágenes digitales

Una imagen digital es la representación en dos dimensiones de una imagen utilizando dígitos binarios (bits). Existen dos tipos de imágenes digitales: vectoriales e imágenes ráster, mapa de bits o imagen matricial.

Una imagen vectorial es representada con trazos geométricos independientes controlados por cálculos y formulas matemáticas, mientras que una imagen matricial está compuesta por píxeles (*pictureelements*) que corresponden a la menor unidad que conforma la imagen. Cada píxel posee una intensidad luminosa definida que depende del número de bits, si n es el número de bits, entonces se poseen 2^n intensidades luminosas o escala de grises. Las imágenes digitales por lo general utilizan 8 bits por lo que se poseen 256 intensidades que varía de 0, correspondiente a negro, a 255 que correspondiente a blanco.

Las imágenes digitales a color, obtenidas mediante cámaras digitales convencionales, son representados por el modelo de color RGB (*Red, Green, Blue*) correspondiente a los tres colores primarios: rojo, verde y azul, cada componente del modelo de color se puede representar en un espacio de color como se muestra en la Figura b-1. En este modelo, los píxeles poseen tres intensidades independientes que pertenecen a cada color primario, combinando distintas intensidades de estos tres colores se obtienen todos los colores visibles, correspondientes a las longitudes de onda perceptibles por el ojo humano, que varía de 400 nm a 700 nm, aproximadamente.

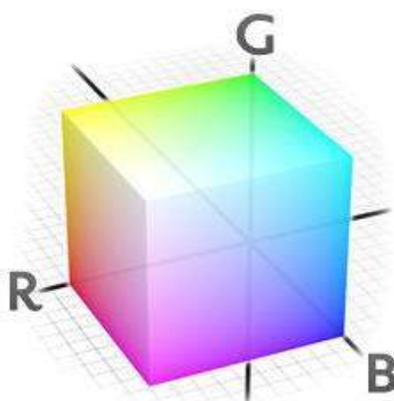


Figura b-1. Espacio de color RGB

Fuente: <http://aprende.colorotate.org>

I

Debido a que la imagen digital a color obtenida por una cámara digital, es representada por el modelo RGB, para cada imagen se poseen tres bandas o capas: rojo, verde y azul (ver Figura b-2). Para cada banda se posee un histograma que representa el número de píxeles en función de los niveles de intensidad, como se muestra en la Figura b-3.

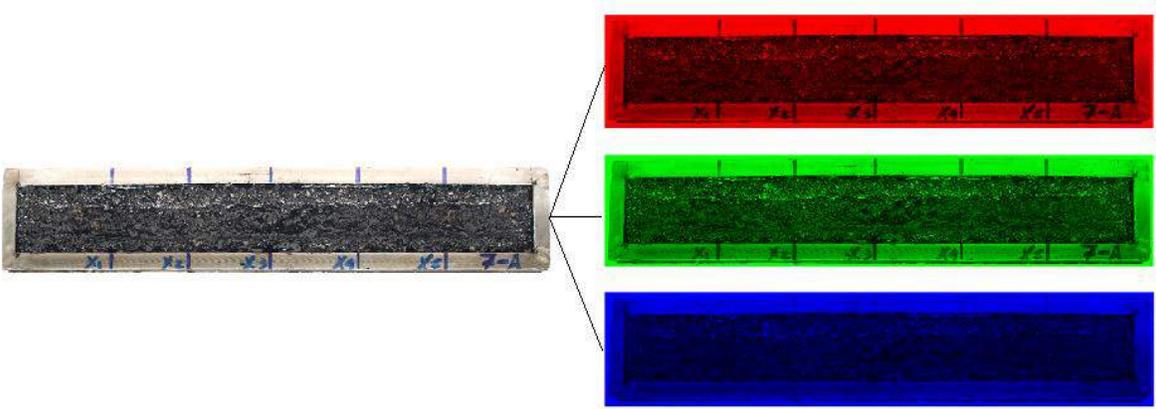


Figura b-2. Bandas que componen la imagen

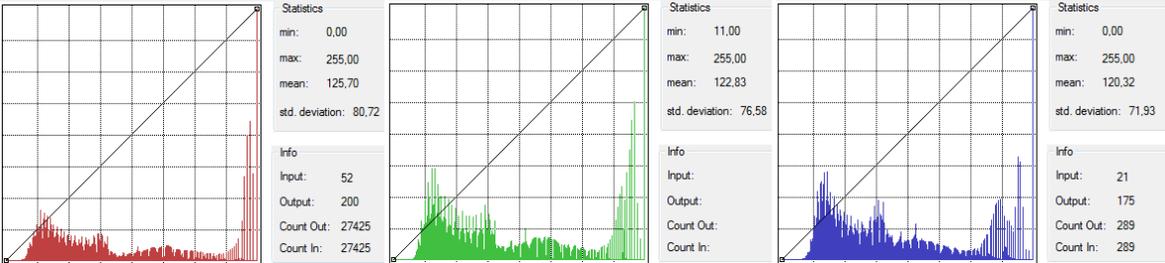


Figura b-3. Histogramas de números de píxeles contra intensidad

Clasificación de imágenes

La clasificación de imágenes consiste en asociar a cada píxel un rótulo o tema describiendo la composición del píxel, como por ejemplo: roca, agua o bosque, que permita expresar el valor numérico del píxel en términos de un tipo de objeto o cobertura.

Una imagen posee información tanto de la intensidad del color presente, es decir valor numérico del píxel, como del arreglo espacial de los mismos como textura y forma. Las clasificaciones utilizadas actualmente no toman en cuenta los aspectos de textura y forma, solamente se basan en agrupaciones de valores de intensidad espectral. Existen esencialmente dos tipos de clasificación de imágenes por color:

1. Clasificación supervisada: el analista identifica las clases requeridas a través de la selección de grupos de los píxeles perteneciente a cada clase, el software se encarga de localizar todos los demás píxeles a que pertenecen a esas clases, con la base en reglas estadísticas preestablecidas.
2. Clasificación no supervisada: el software identifica las clases susceptible a la separación, sin la participación del analista, siguiendo una serie de reglas estadísticas y distribuyendo los píxeles de las imágenes para esas clases.

Las clases obtenidas en el proceso pueden mezclar diferentes tipos de materiales o pueden no corresponder a la realidad, por lo que se hace necesaria la verificación de la clasificación con base en los datos reales.

n

Apéndice 3. Imágenes analizadas

Tratamiento superficial con designación 3A

En el Cuadro c-1 se presentan las características de cada espécimen analizado mediante el procesamiento de imágenes digitales para el tratamiento con designación 3A, cada uno posee un número de muestra distinto y difieren en la cantidad de asfalto total utilizada.

En la Figura c-1 y Figura c-2, se muestran los datos obtenidos del procesamiento de las imágenes en gráficos de porcentaje de asfalto expuesto contra cantidad de asfalto. La Figura c-1 corresponde a las muestras con asfalto convencional, mientras que la Figura c-2 muestra una comparación entre las muestras con asfalto convencional y con asfalto modificado con polímero.

Se adjuntan las imágenes de cada una de las muestras analizadas para el tratamiento con designación 3A. En las figuras se muestran cuatro vistas del espécimen, la primera imagen presenta la muestra antes de ser sometida a mil ciclos de carga en el ensayo de la rueda cargada. La segunda, tercera y cuarta imagen muestran el espécimen luego del ensayo, la tercera demarca en color blanco el área de estudio de la muestra que no posee condición de asfalto expuesto, mientras que la cuarta demarca en color celeste el área con asfalto expuesto en condición no crítica y en azul el área con asfalto expuesto en condición crítica. A la derecha de las figuras se muestra un acercamiento del área demarcada por el rectángulo rojo.

Cuadro c-1. Muestras analizadas por procesamiento de imágenes digitales, designación TS 3A

Tipo de emulsión	Designación 3A			Asfalto expuesto crítico (%)
	Número de muestra	Asfalto total (kg/m ²)	Asfalto expuesto (%)	
CRS-1	6-A	4,03	80,11%	80,11%
	7-A	4,48	85,38%	85,38%
	8-A	1,27	7,50%	0,00%
	9-A	3,08	40,03%	0,00%
	10-A	2,20	17,12%	0,00%
CRS-P	1-C	1,75	12,77%	0,00%
	2-C	3,54	39,81%	0,00%
	3-C	3,09	37,06%	0,00%

p

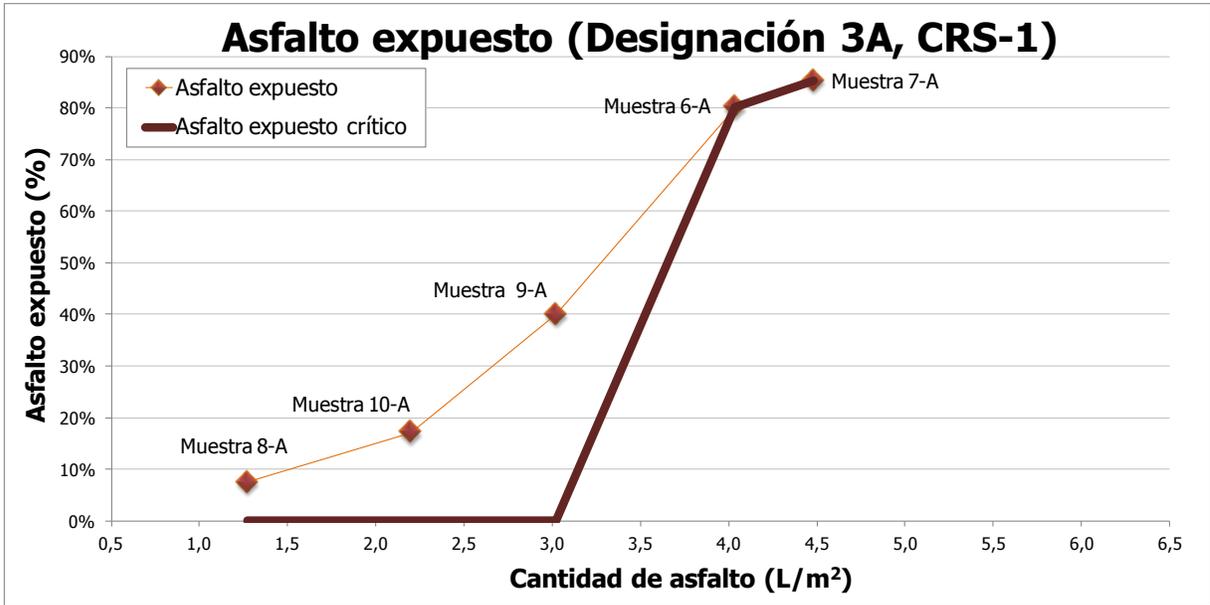


Figura c-1. Cantidad de asfalto contra porcentaje de área con asfalto expuesto, designación 3A (CRS-1)

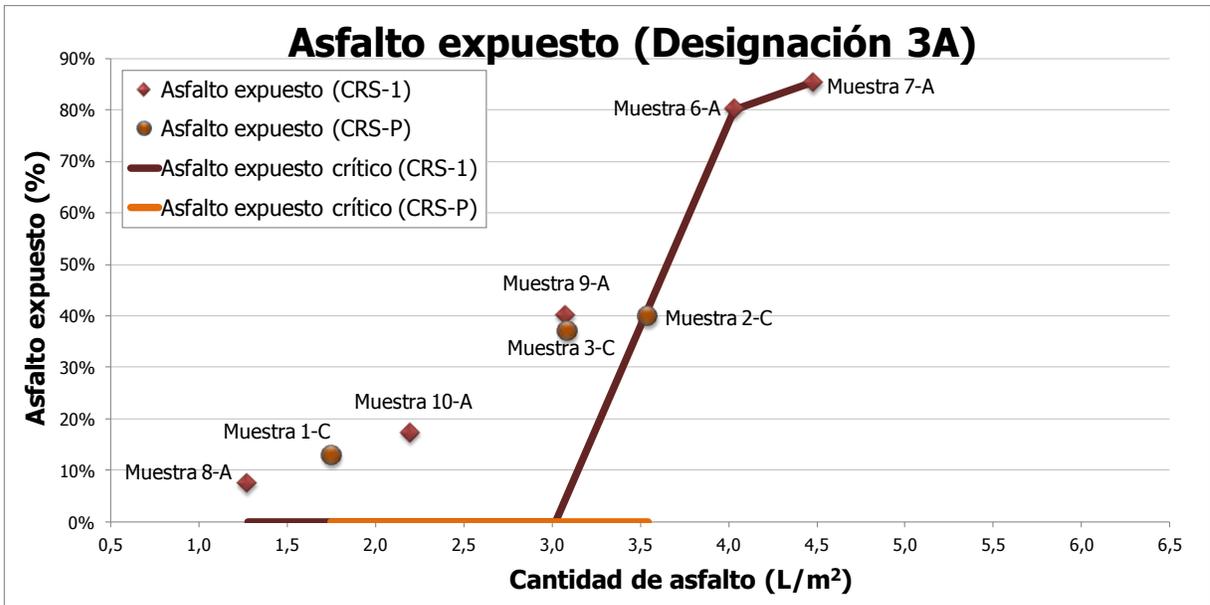


Figura c-2. Cantidad de asfalto contra porcentaje de área con asfalto expuesto, designación 3A (CRS-1 y CRS-P)

Tratamiento superficial con designación 3B

En el Cuadro c-2 se presentan las características de cada espécimen analizado mediante el procesamiento de imágenes digitales para el tratamiento con designación 3B, cada uno posee un número de muestra distinto y difieren en la cantidad de asfalto total utilizada.

En la Figura c-1 y Figura c-2, se muestran los datos obtenidos del procesamiento de las imágenes en gráficos de porcentaje de asfalto expuesto contra cantidad de asfalto. La Figura c-1 corresponde a las muestras con asfalto convencional, mientras que la Figura c-2 muestra una comparación entre las muestras con asfalto convencional y con asfalto modificado con polímero.

Se adjuntan las imágenes de cada una de las muestras analizadas para el tratamiento con designación 3B. En las figuras se muestran cuatro vistas del espécimen, la primera imagen presenta la muestra antes de ser sometida a los mil ciclos de carga en el ensayo de la rueda cargada. La segunda, tercera y cuarta imagen muestran el espécimen luego del ensayo, la tercera demarca en color blanco el área de estudio de la muestra que no posee condición de asfalto expuesto, mientras que la cuarta demarca en color celeste el área con asfalto expuesto en condición no crítica y en azul el área con asfalto expuesto en condición crítica. A la derecha de las figuras se muestra un acercamiento del área demarcada por el rectángulo rojo.

Cuadro c-2. Muestras analizadas por procesamiento de imágenes digitales, designación TS 3B

Tipo de emulsión	Designación 3B			Asfalto expuesto crítico (%)
	Número de muestra	Asfalto total (kg/m ²)	Asfalto expuesto (%)	
CRS-1	5-B	4,62	31,11%	0,00%
	6-B	5,53	59,07%	40,70%
	7-B	6,42	67,30%	67,30%
	8-B	5,06	41,26%	0,00%
CRS-P	1-D	3,72	12,26%	0,00%
	2-D	4,63	27,39%	0,00%
	3-D	5,07	35,57%	0,00%

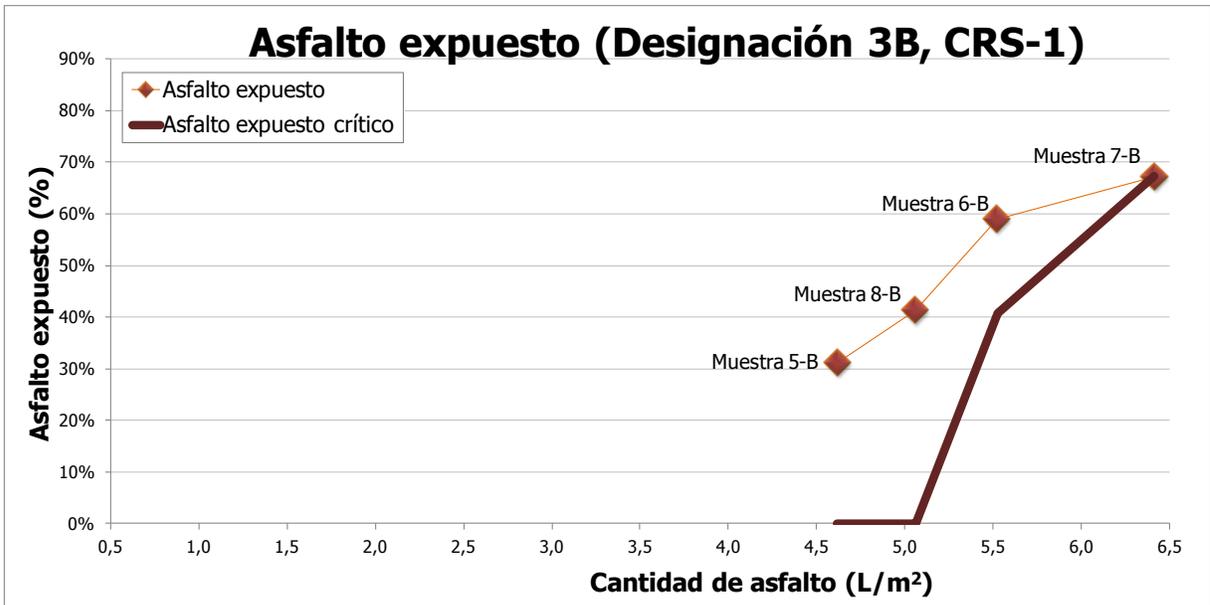


Figura c-3. Cantidad de asfalto contra porcentaje de área con asfalto expuesto, designación 3B (CRS-1)

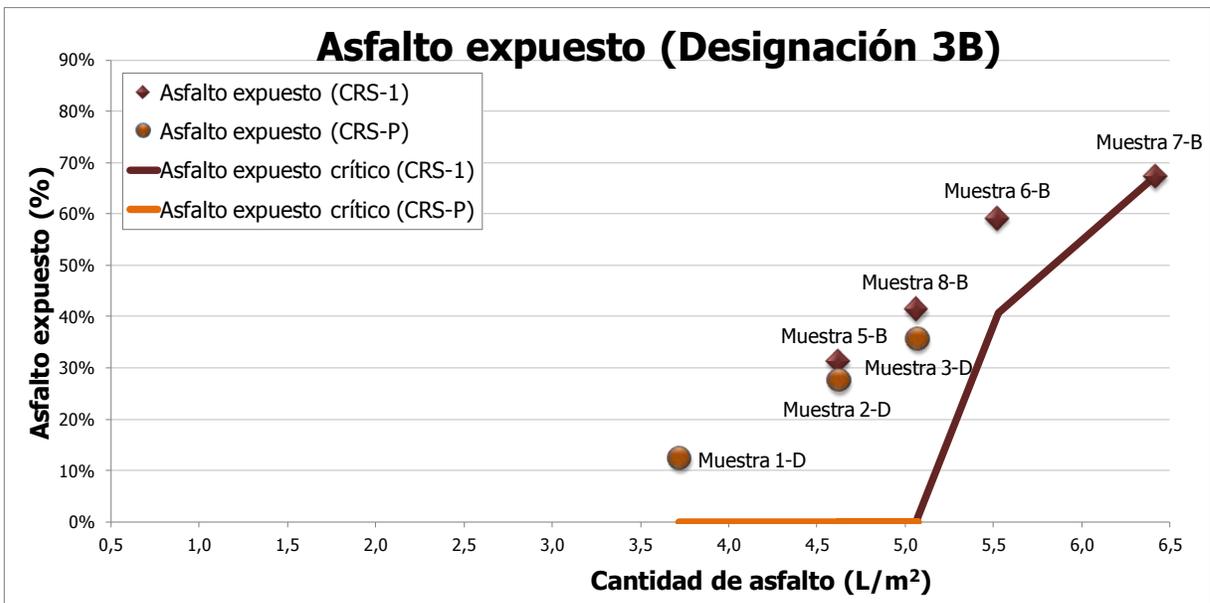
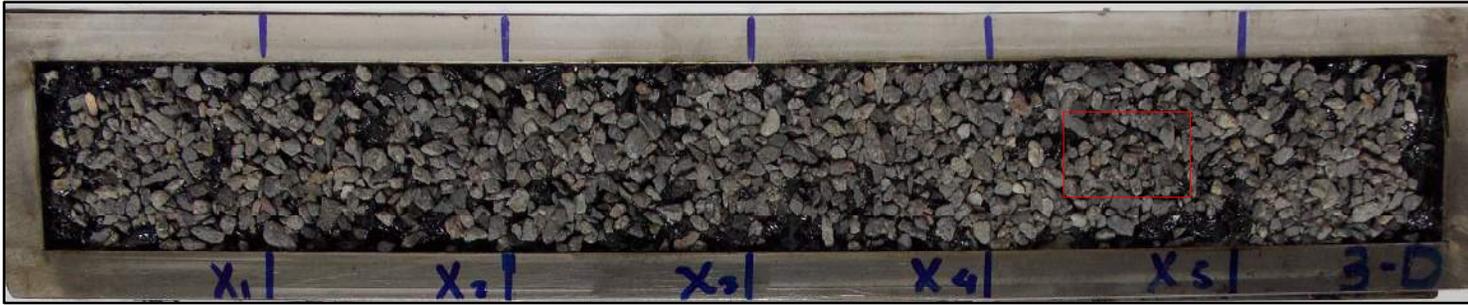
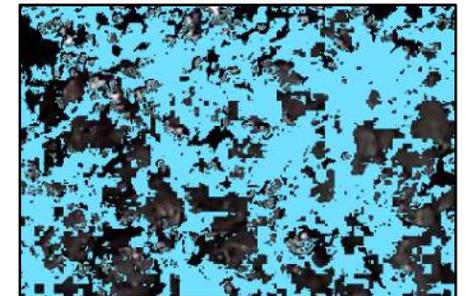
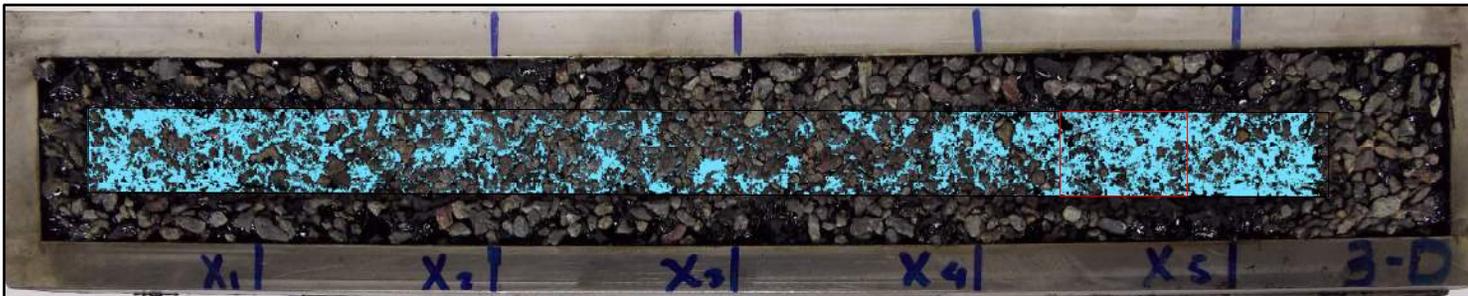
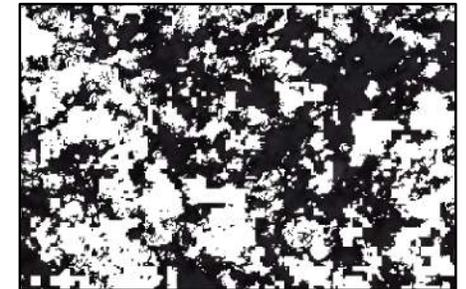
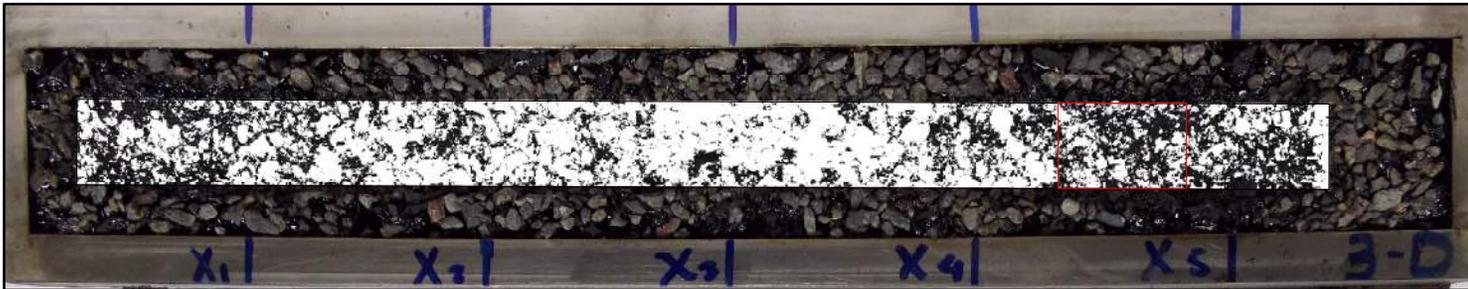
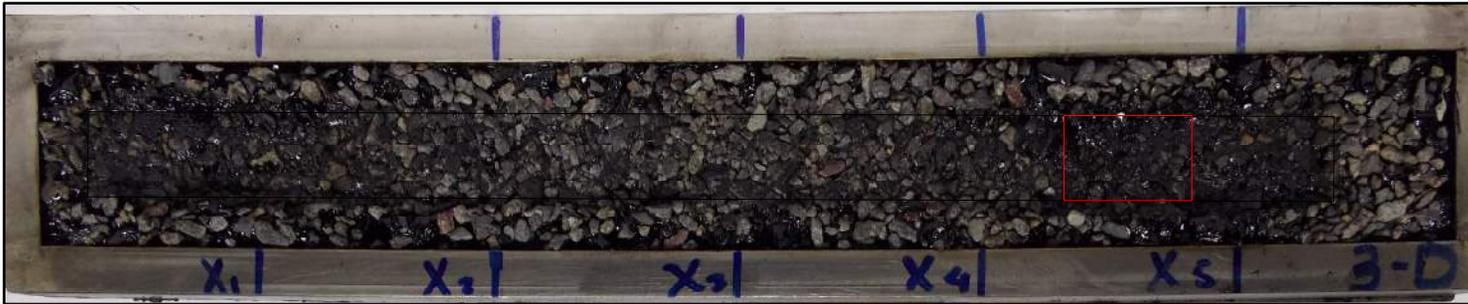


Figura c-4. Cantidad de asfalto contra porcentaje de área con asfalto expuesto, designación 3B (CRS-1 y CRS-P)

Muestra sin ensayar



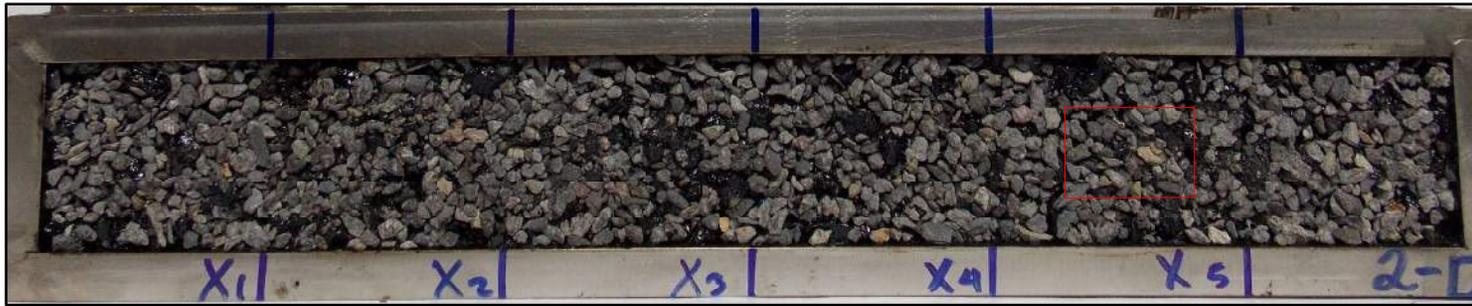
Muestra ensayada



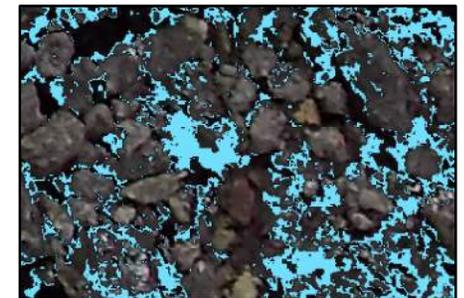
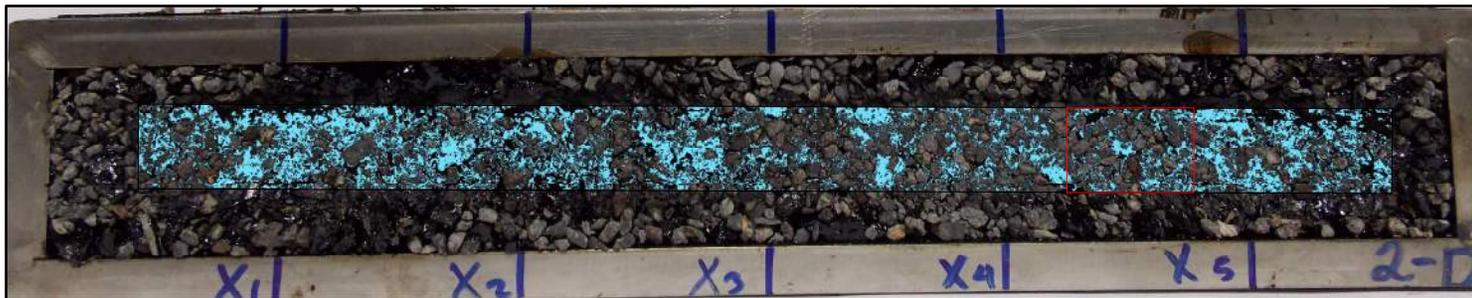
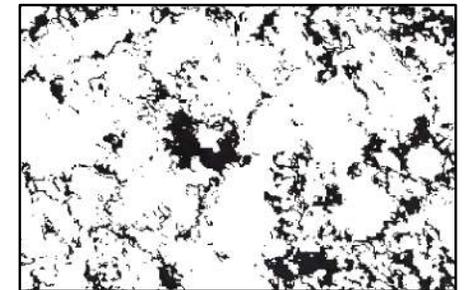
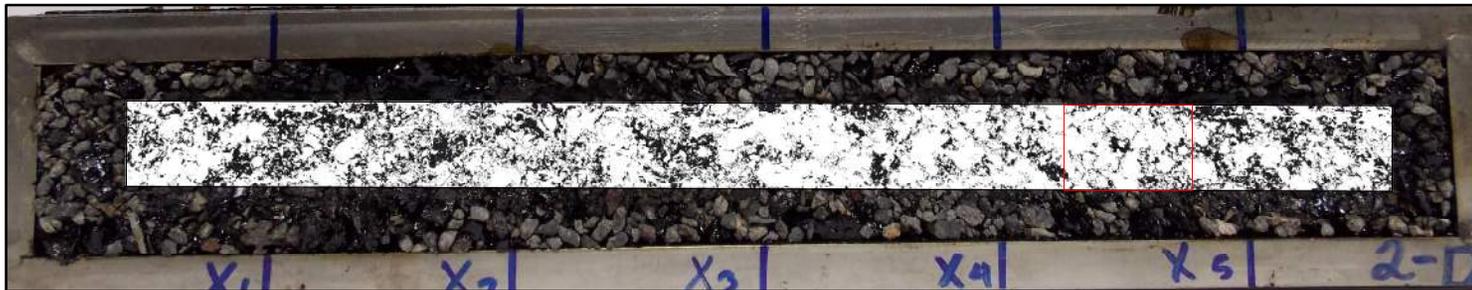
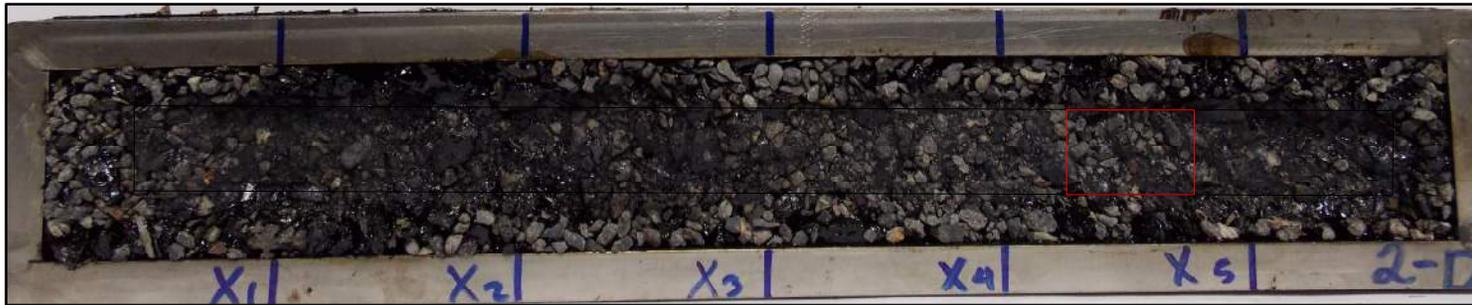
Muestra 3-D

□ Área sin asfalto expuesto □ Área con asfalto expuesto no crítico □ Área con asfalto expuesto crítico

Muestra sin ensayar



Muestra ensayada



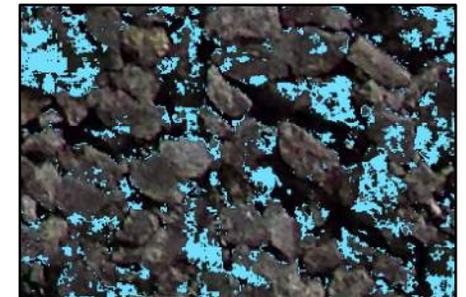
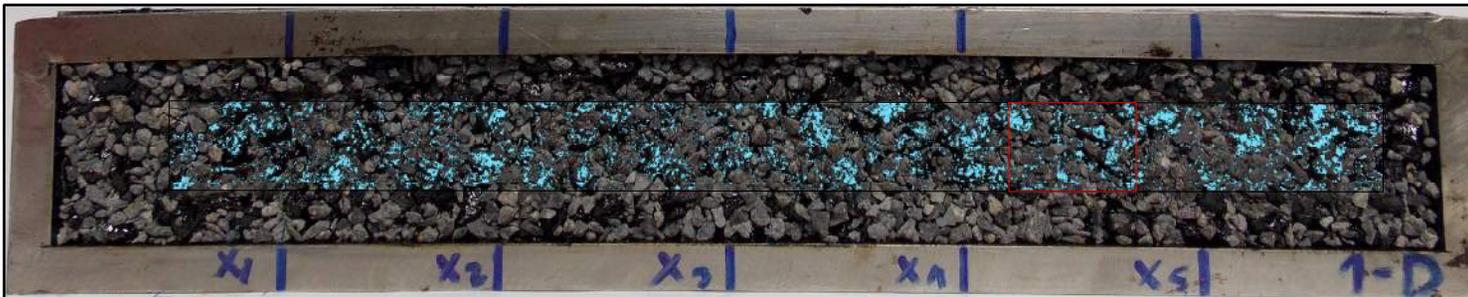
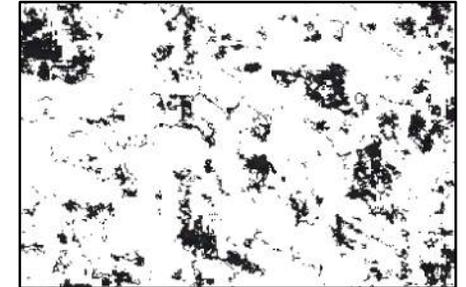
Muestra 2-D

□ Área sin asfalto expuesto □ Área con asfalto expuesto no crítico □ Área con asfalto expuesto crítico

Muestra sin ensayar



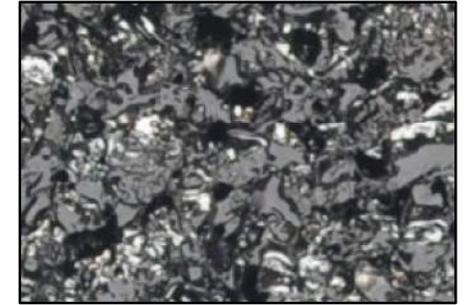
Muestra ensayada



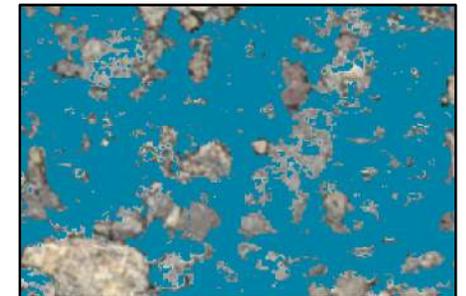
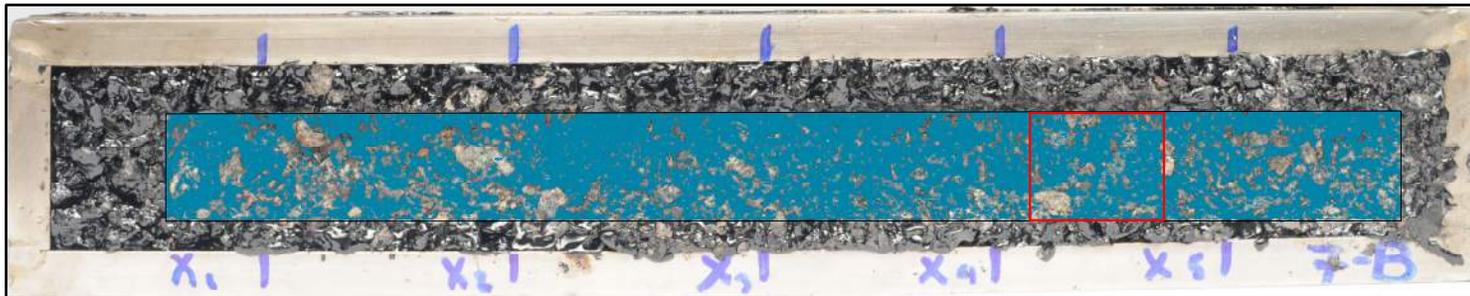
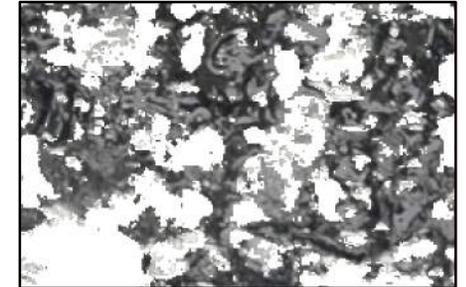
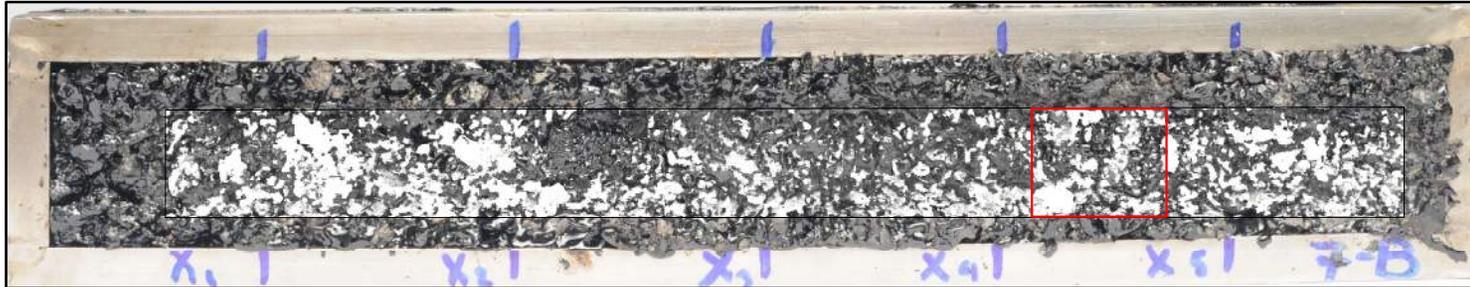
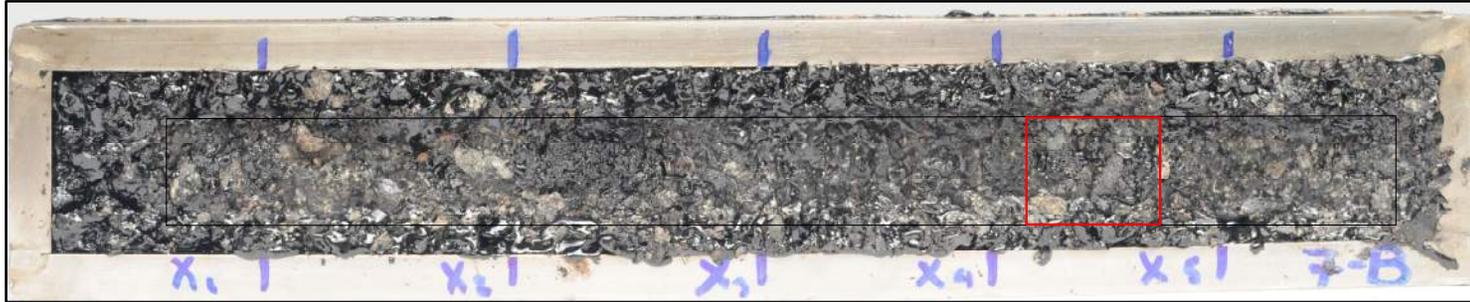
Muestra 1-D

□ Área sin asfalto expuesto □ Área con asfalto expuesto no crítico □ Área con asfalto expuesto crítico

Muestra sin ensayar



Muestra ensayada



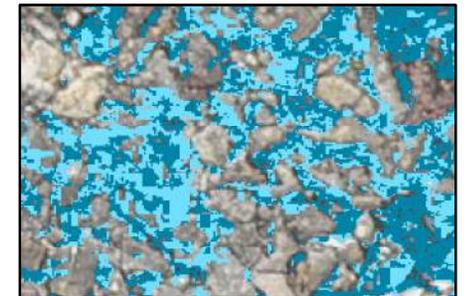
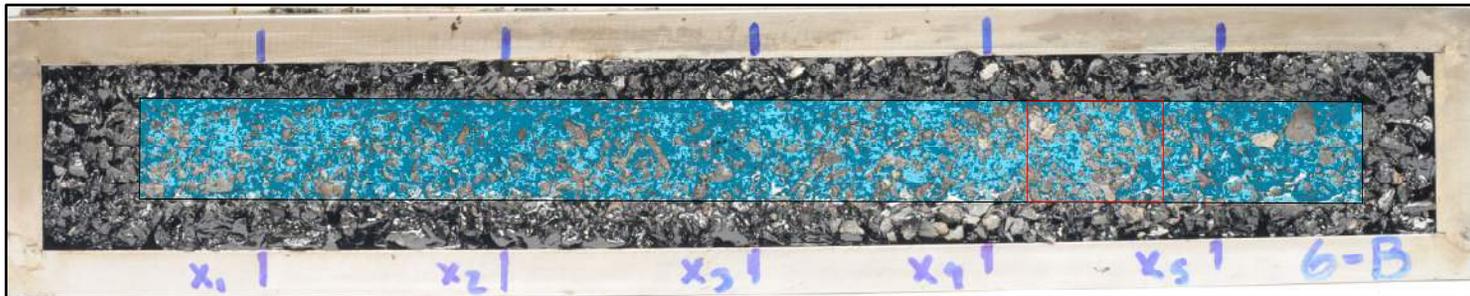
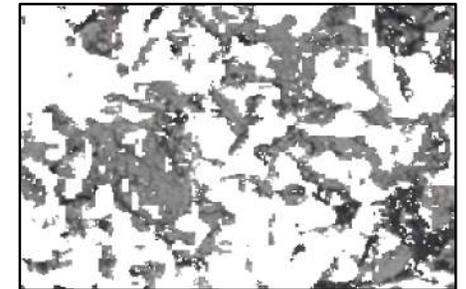
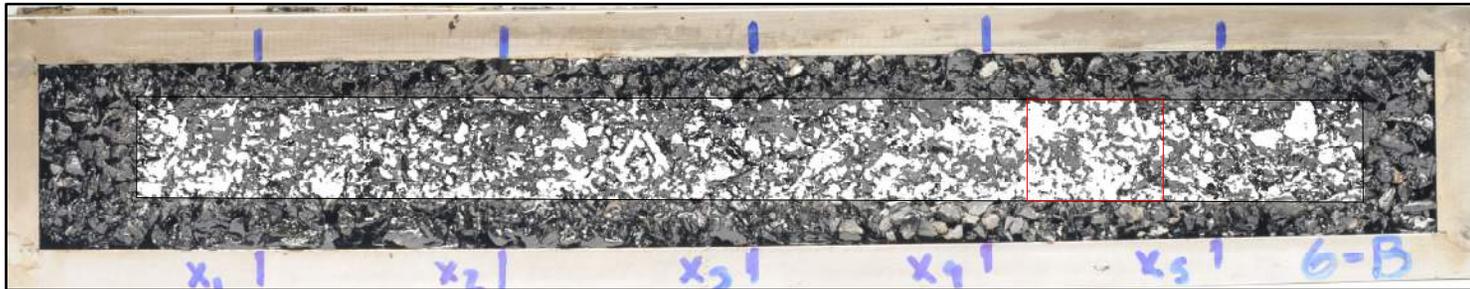
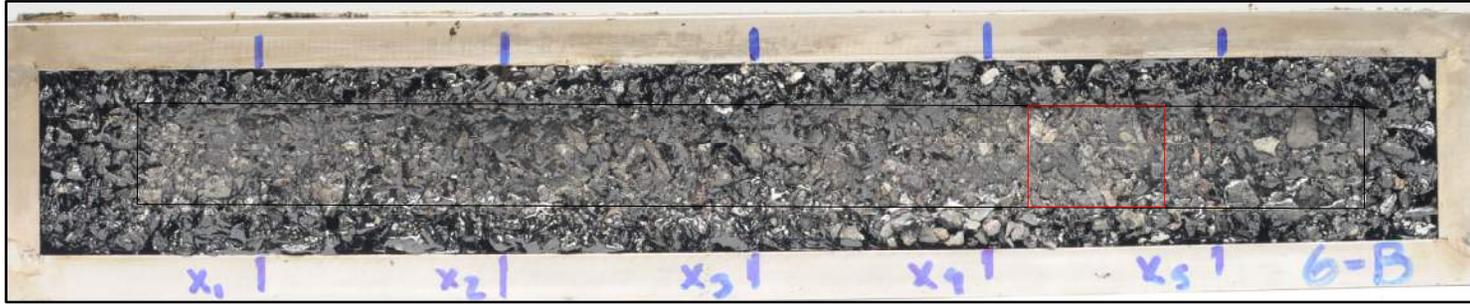
Muestra 7-B

□ Área sin asfalto expuesto □ Área con asfalto expuesto no crítico □ Área con asfalto expuesto crítico

Muestra sin ensayar



Muestra ensayada



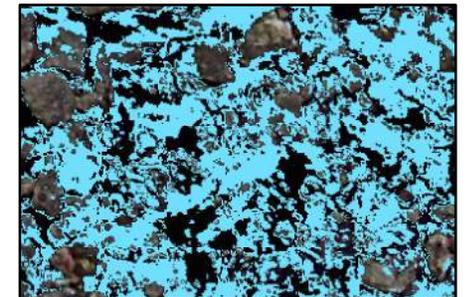
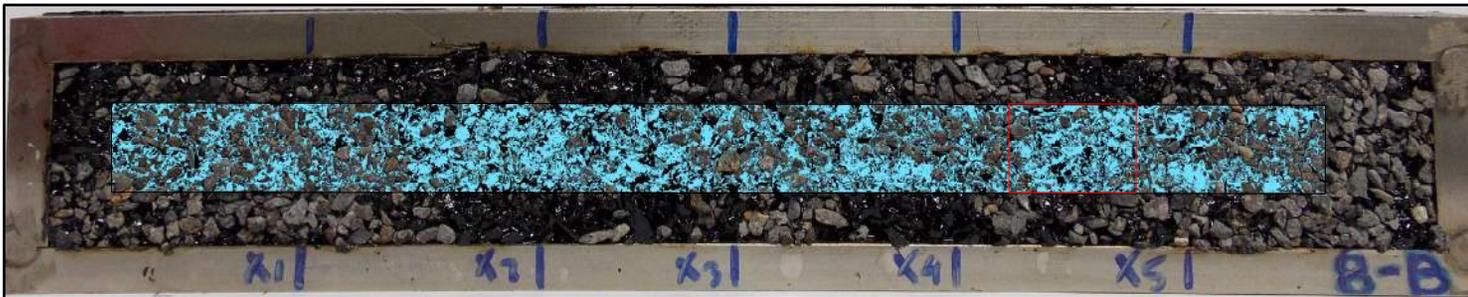
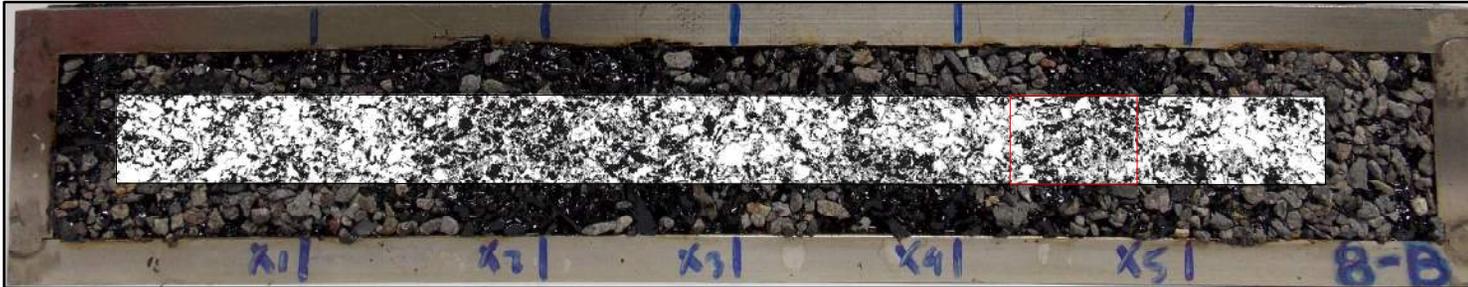
Muestra 6-B

□ Área sin asfalto expuesto □ Área con asfalto expuesto no crítico □ Área con asfalto expuesto crítico

Muestra sin ensayar



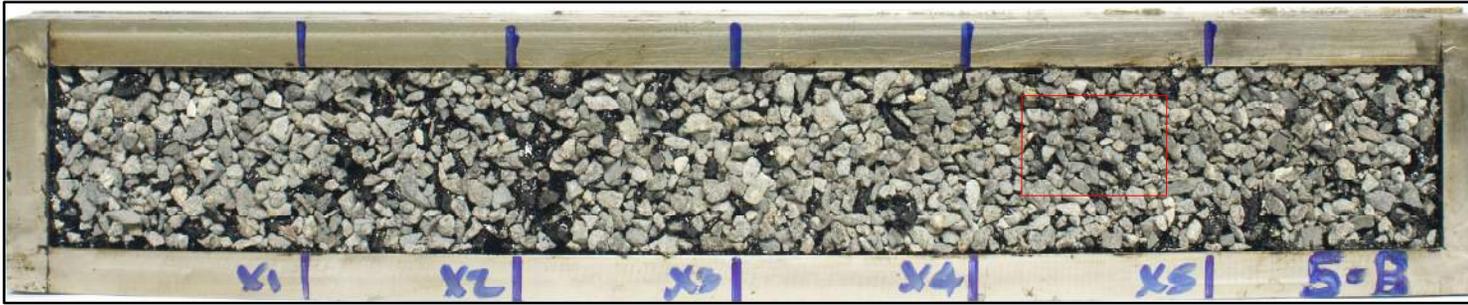
Muestra ensayada



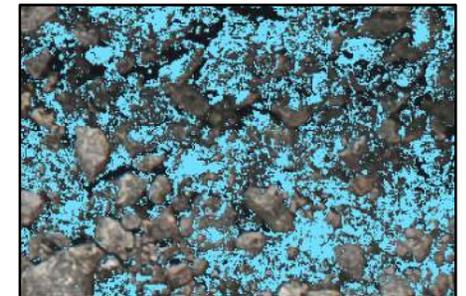
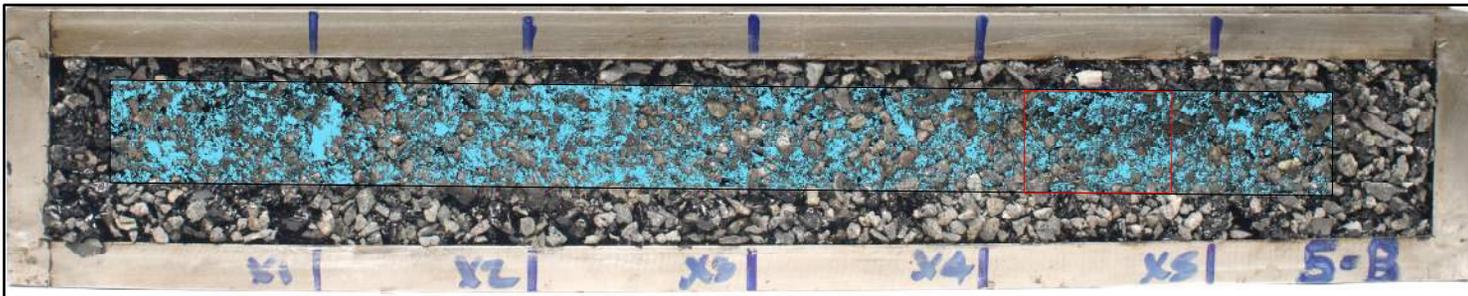
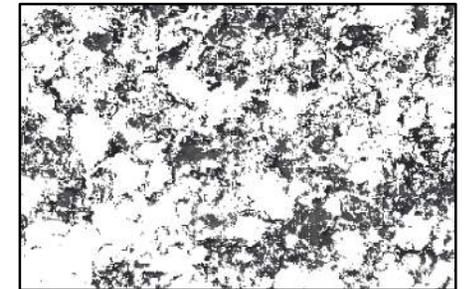
Muestra 8-B

□ Área sin asfalto expuesto □ Área con asfalto expuesto no crítico □ Área con asfalto expuesto crítico

Muestra sin ensayar



Muestra ensayada



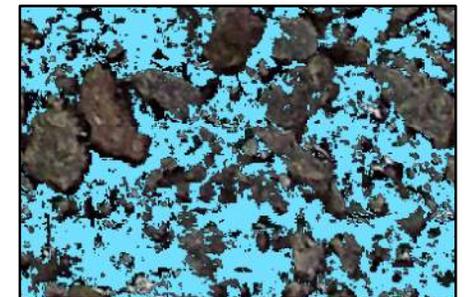
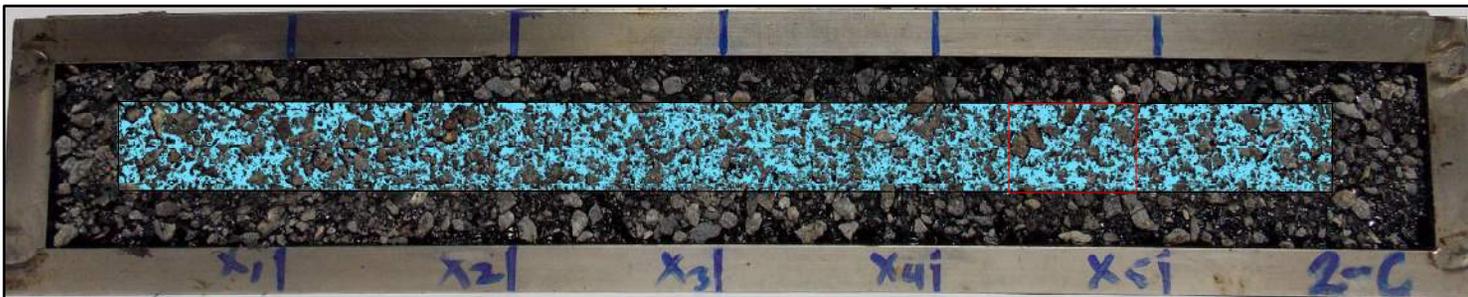
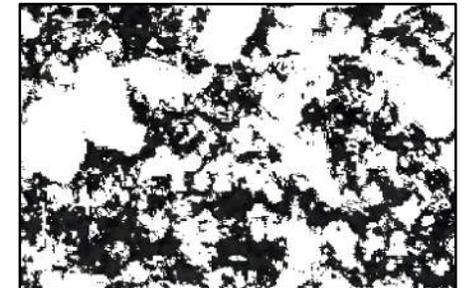
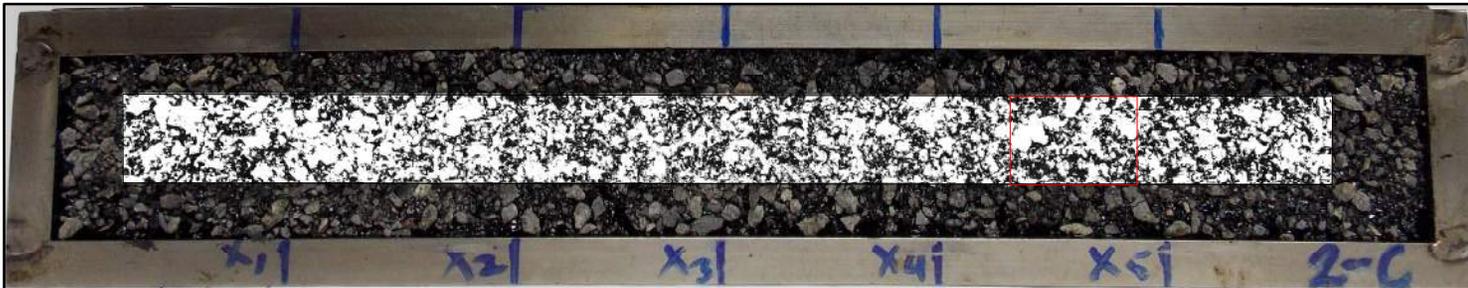
Muestra 5-B

□ Área sin asfalto expuesto □ Área con asfalto expuesto no crítico □ Área con asfalto expuesto crítico

Muestra sin ensayar



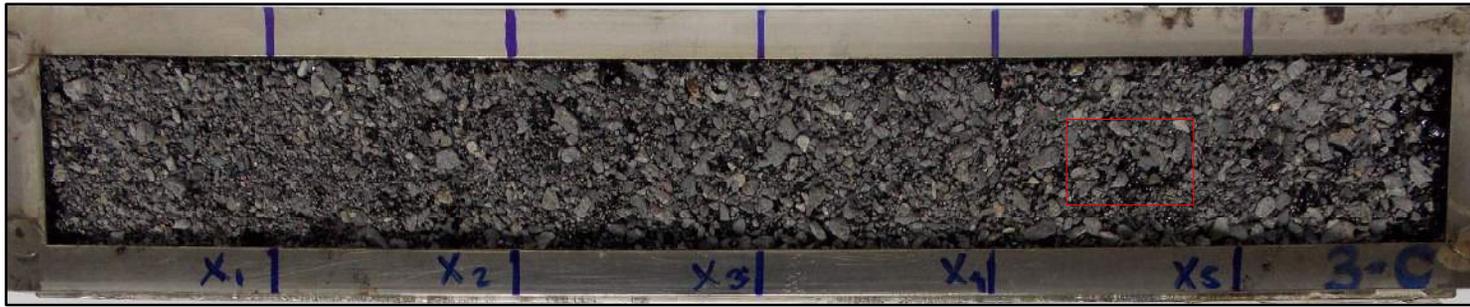
Muestra ensayada



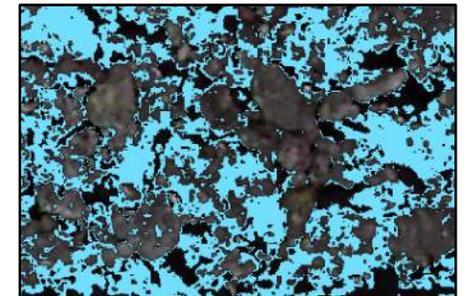
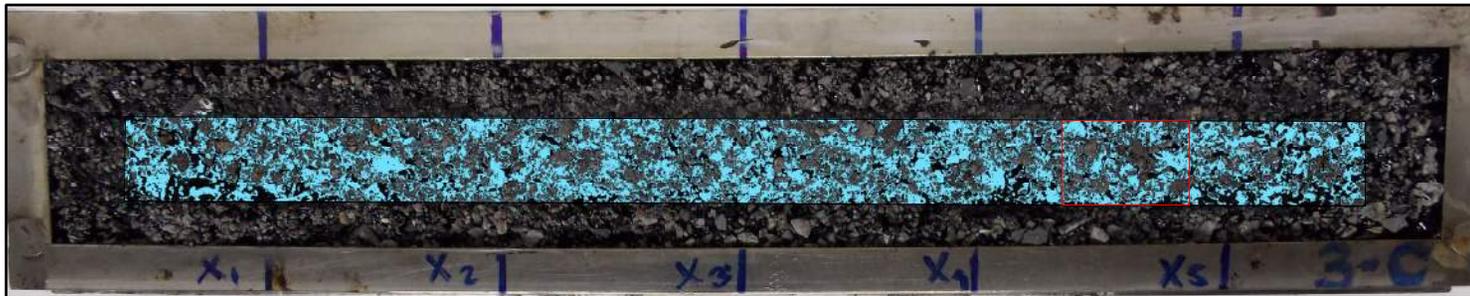
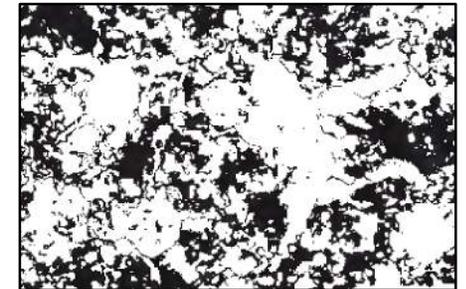
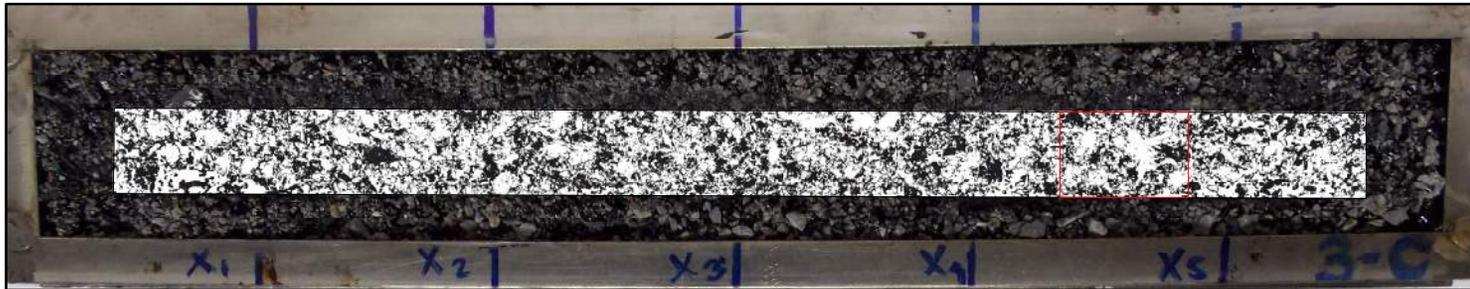
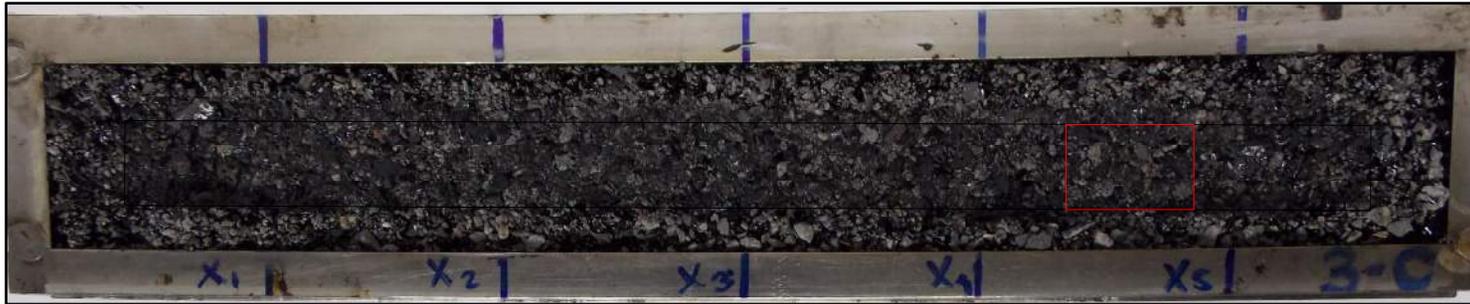
Muestra 2-C

□ Área sin asfalto expuesto □ Área con asfalto expuesto no crítico □ Área con asfalto expuesto crítico

Muestra sin ensayar



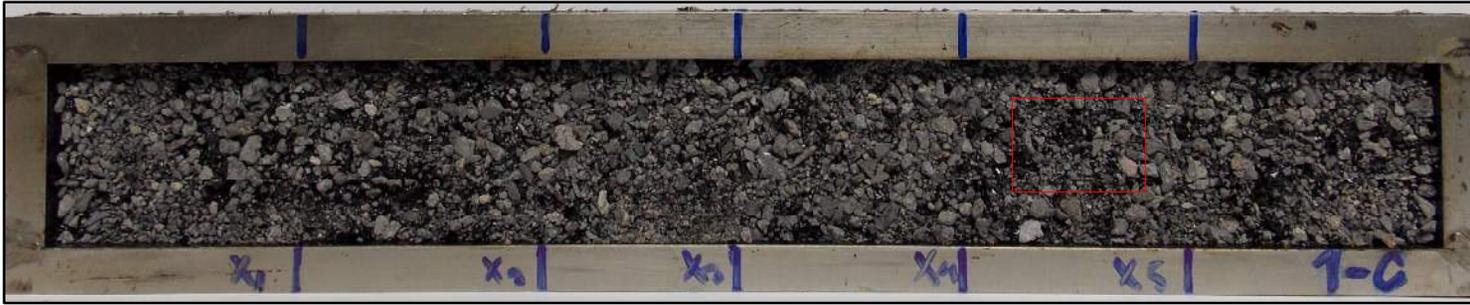
Muestra ensayada



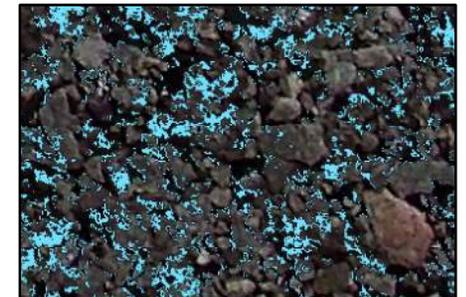
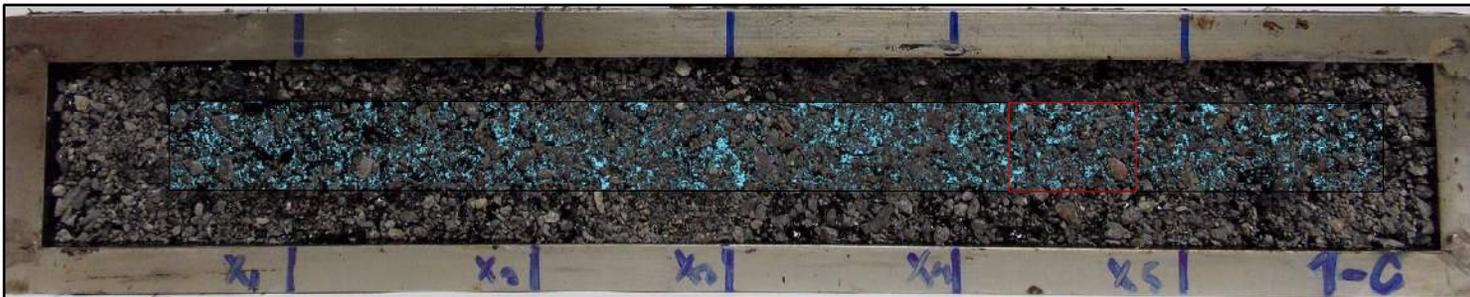
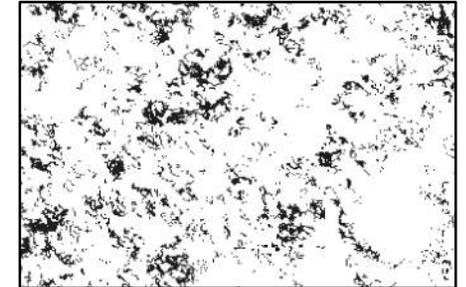
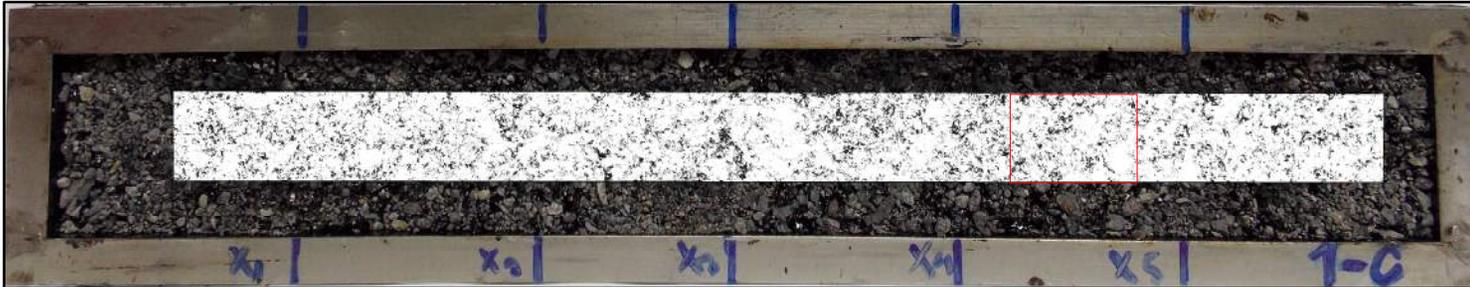
Muestra 3-C

□ Área sin asfalto expuesto □ Área con asfalto expuesto no crítico □ Área con asfalto expuesto crítico

Muestra sin ensayar



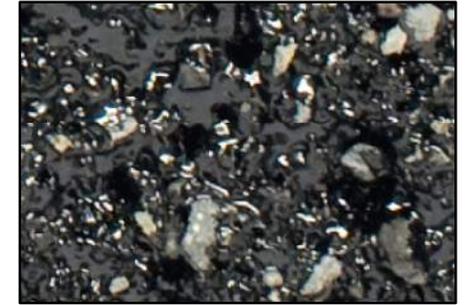
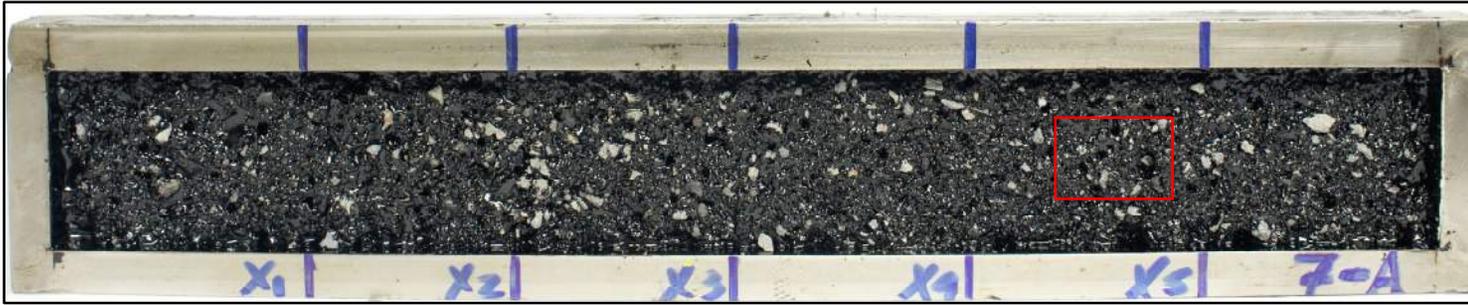
Muestra ensayada



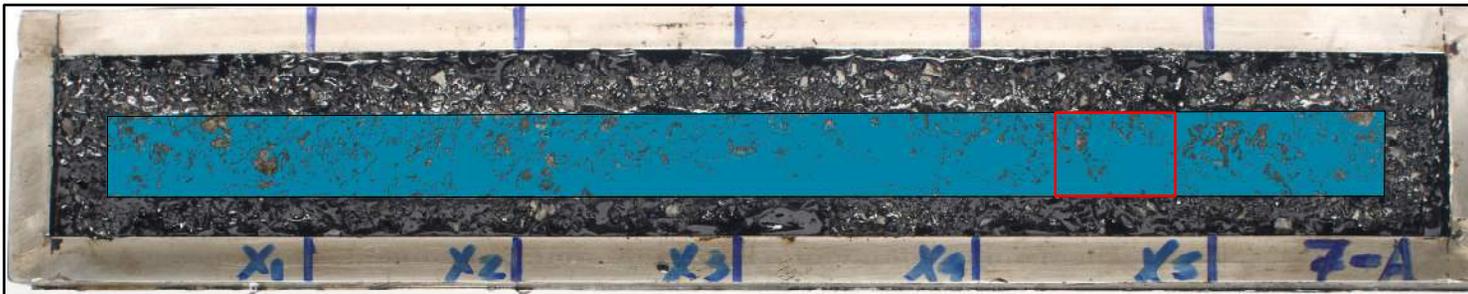
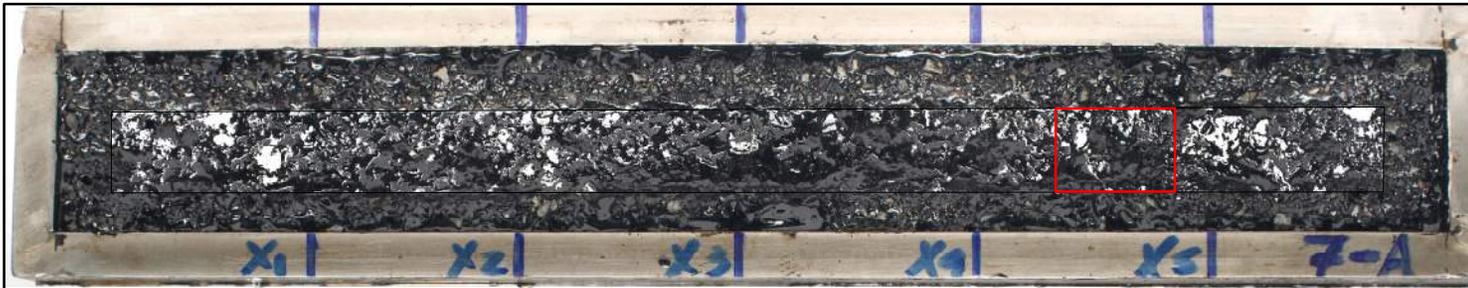
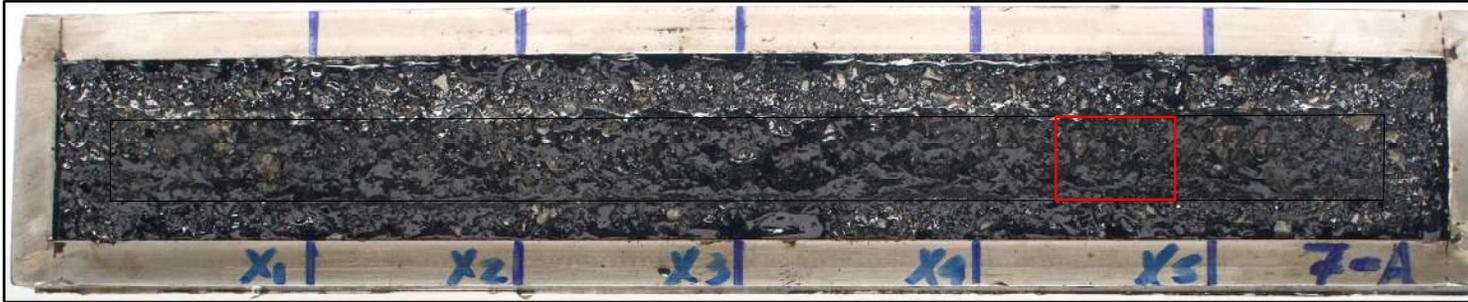
Muestra 1-C

□ Área sin asfalto expuesto □ Área con asfalto expuesto no crítico □ Área con asfalto expuesto crítico

Muestra sin ensayar



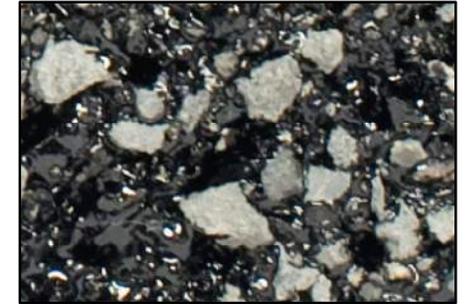
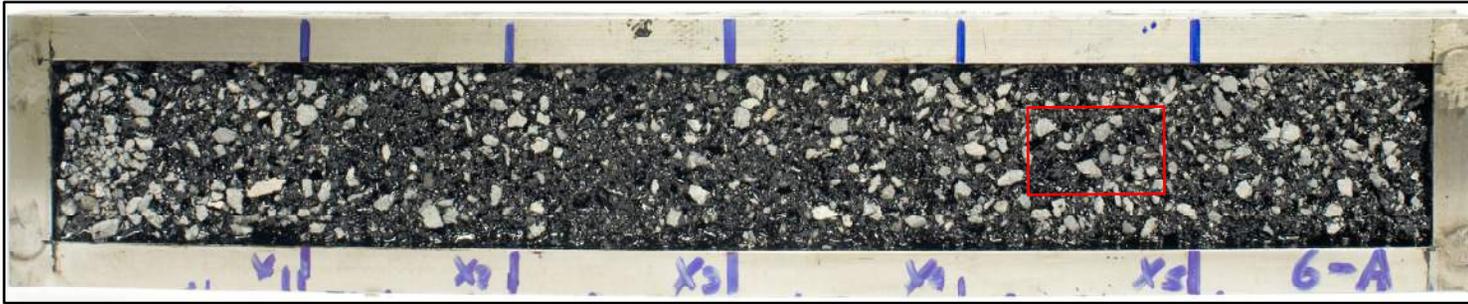
Muestra ensayada



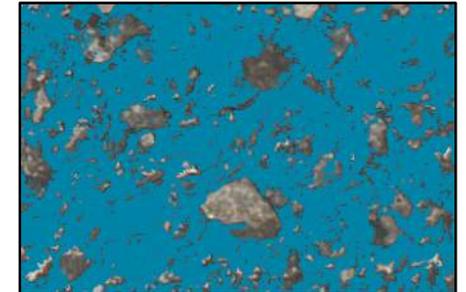
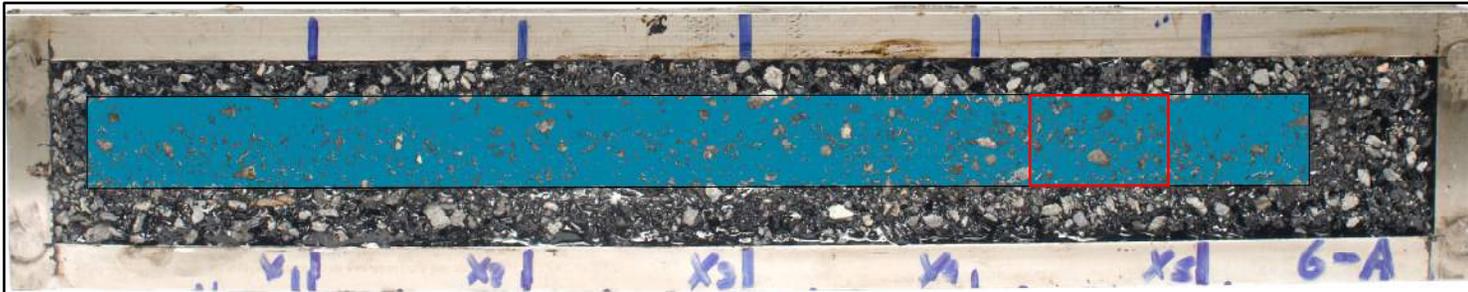
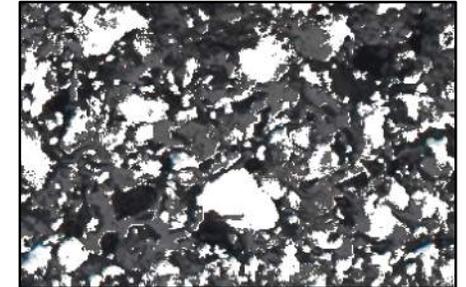
Muestra 7-A

□ Área sin asfalto expuesto □ Área con asfalto expuesto no crítico ■ Área con asfalto expuesto crítico

Muestra sin ensayar



Muestra ensayada



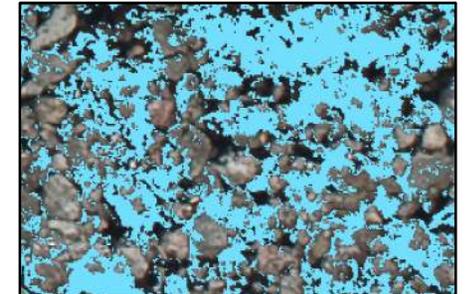
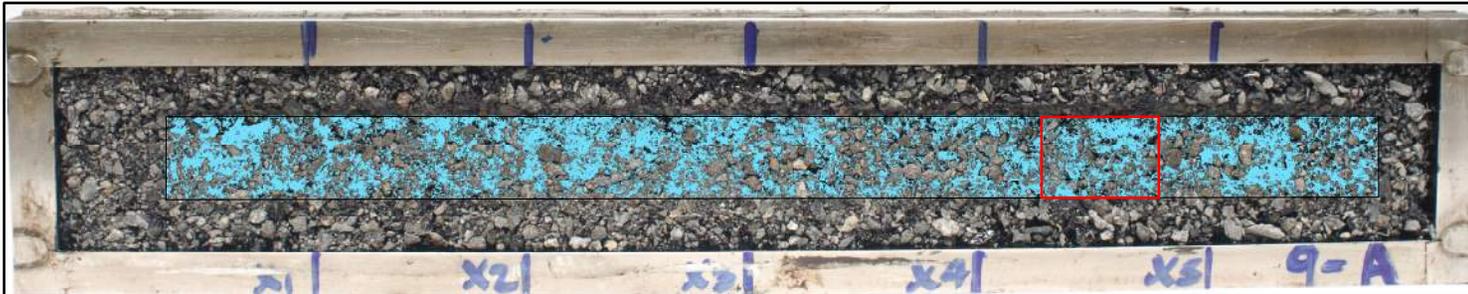
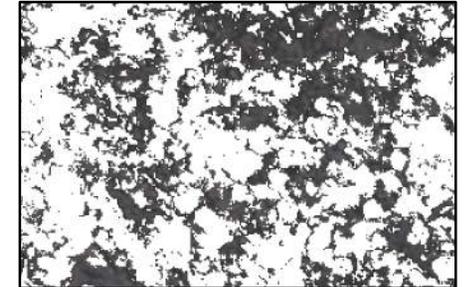
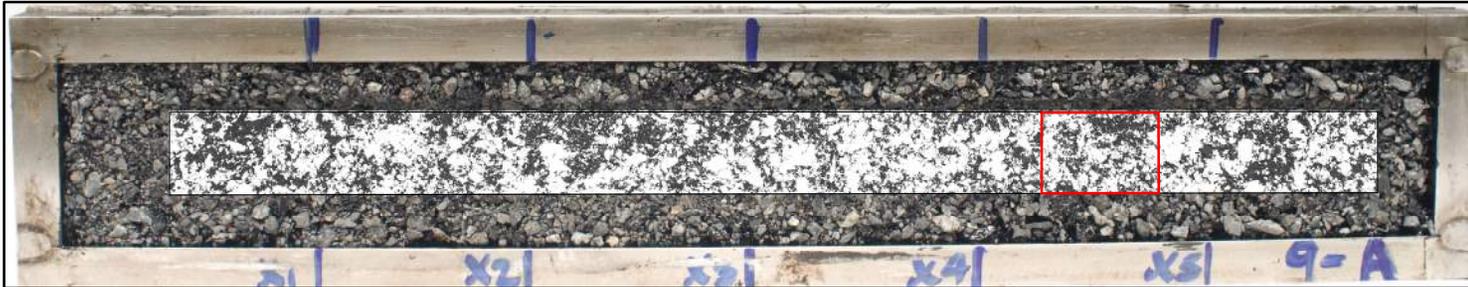
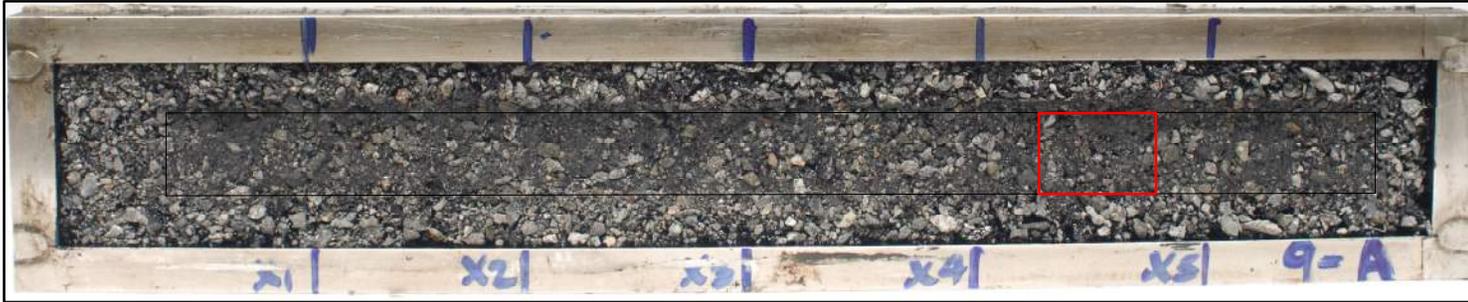
Muestra 6-A

 Área sin asfalto expuesto  Área con asfalto expuesto no crítico  Área con asfalto expuesto crítico

Muestra sin ensayar



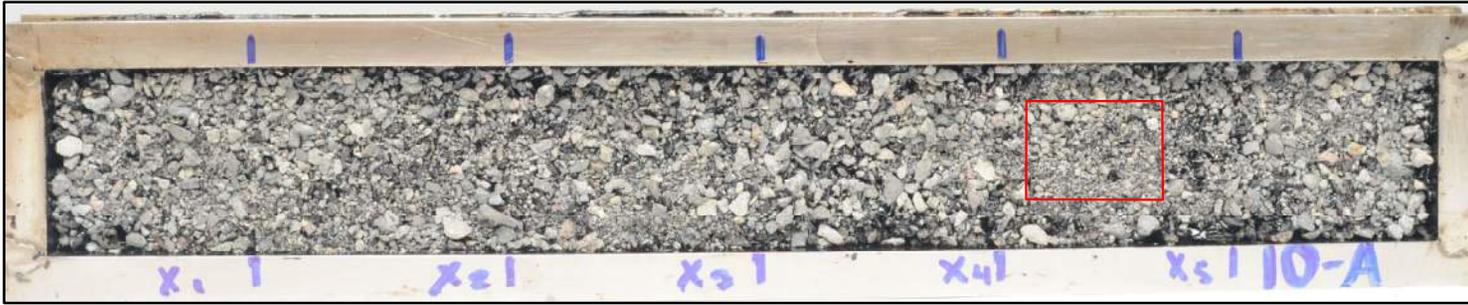
Muestra ensayada



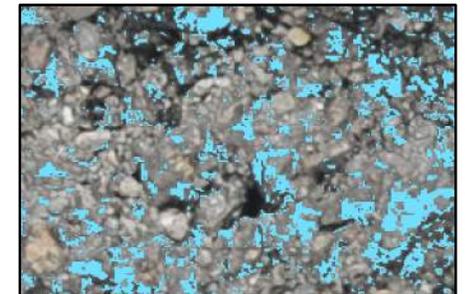
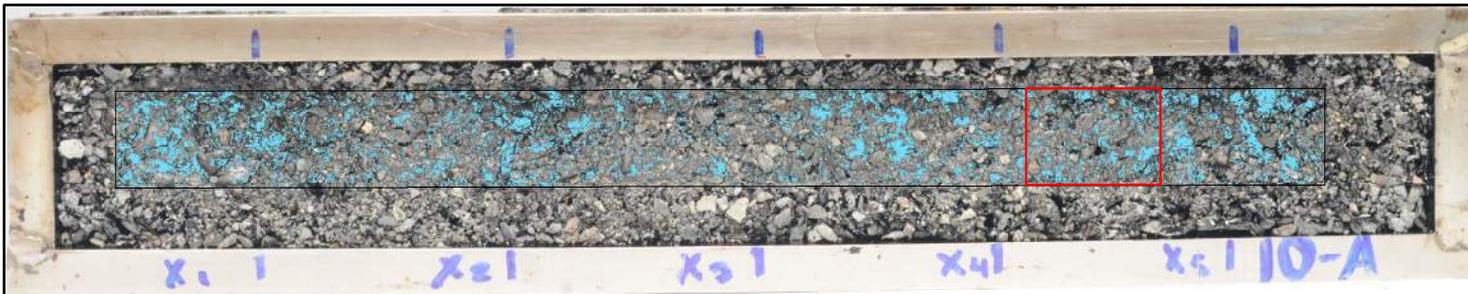
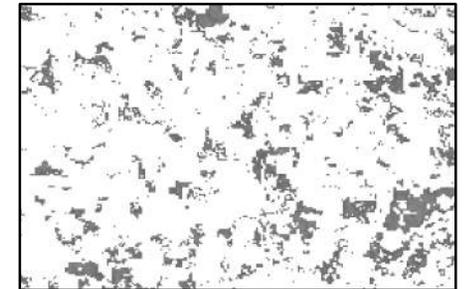
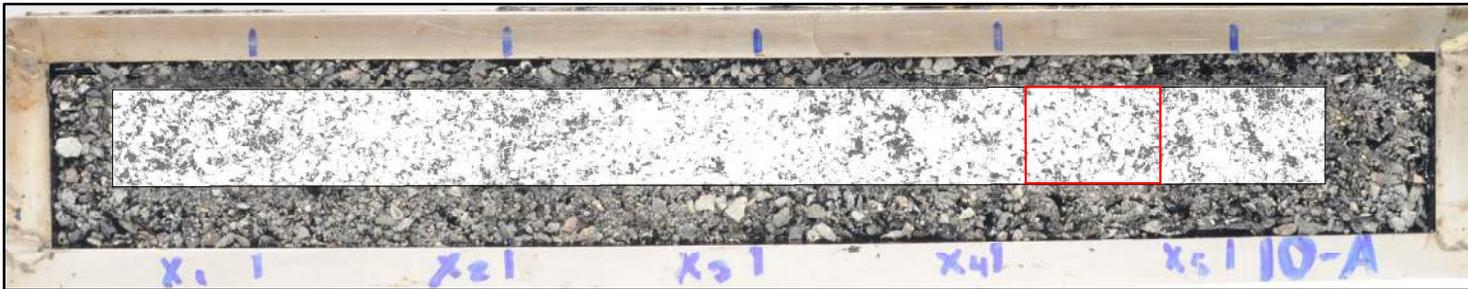
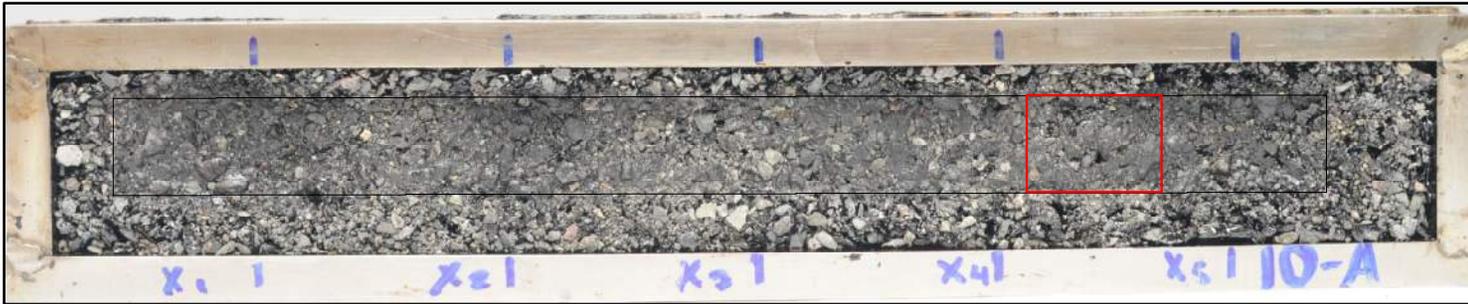
Muestra 9-A

□ Área sin asfalto expuesto □ Área con asfalto expuesto no crítico □ Área con asfalto expuesto crítico

Muestra sin ensayar



Muestra ensayada



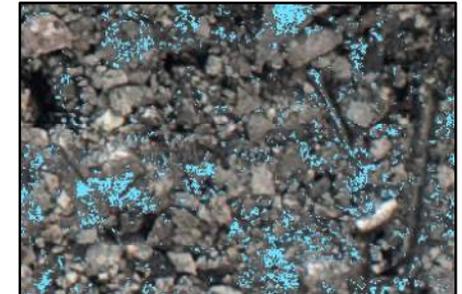
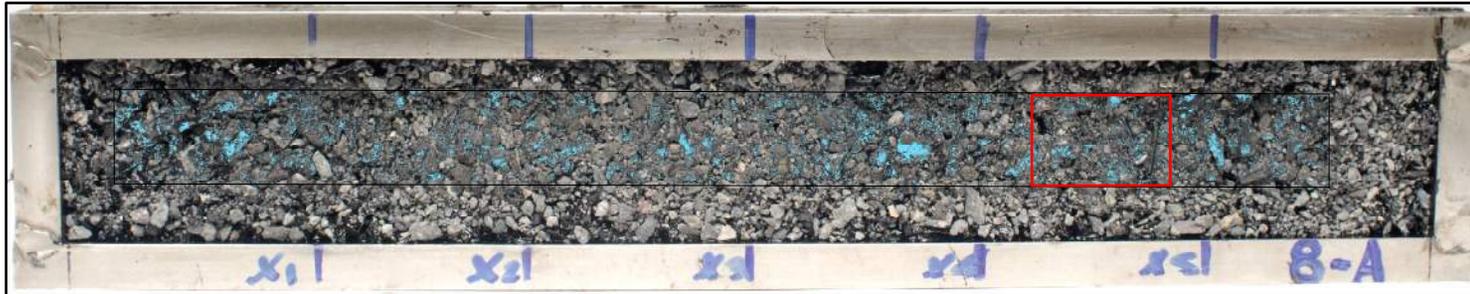
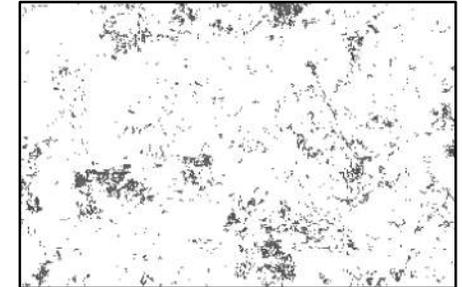
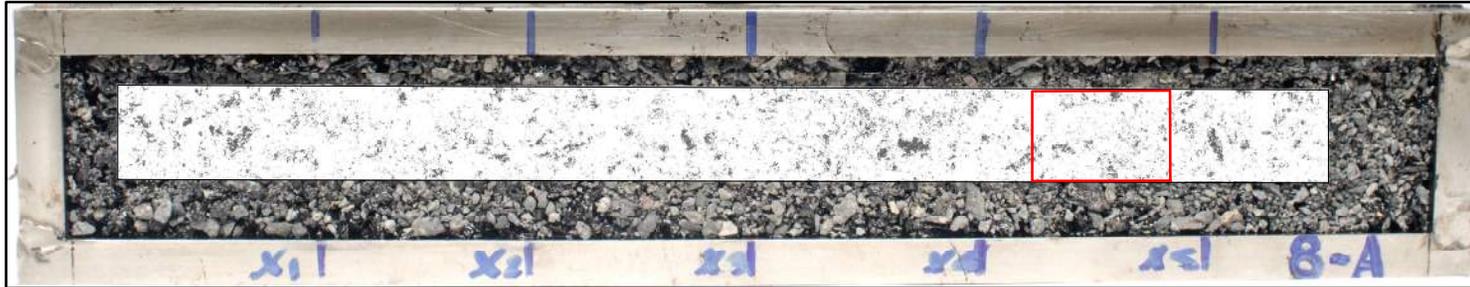
Muestra 10-A

□ Área sin asfalto expuesto □ Área con asfalto expuesto no crítico □ Área con asfalto expuesto crítico

Muestra sin ensayar



Muestra ensayada



Muestra 8-A

□ Área sin asfalto expuesto □ Área con asfalto expuesto no crítico □ Área con asfalto expuesto crítico

Anexos

B

Anexo 1. Ensayos de caracterización del agregado

D

Ensayos de caracterización del agregado

ASTM C29. Densidad bruta (peso unitario) y vacíos en agregados

Fecha: 27 de marzo de 2012

Prueba	Agregado envarillado Recipiente + Muestra (g)		Agregado suelto Recipiente + Muestra (g)	
	Granulometría C	Granulometría E	Granulometría C	Granulometría E
1	18780	5676,0	18480	5520,1
2	18980	5679,5	18480	5503,9
3	18940	5674,2	18440	5532,8

Prueba	Peso unitario envarillado (kg/m ³)		Peso unitario suelto (kg/m ³)	
	Granulometría C	Granulometría E	Granulometría C	Granulometría E
1	1472	1389	1441	1334
2	1493	1390	1441	1328
3	1489	1388	1437	1338

Prueba	Vacíos en el agregado envarillado (%)		Vacíos en el agregado suelto (%)	
	Granulometría C	Granulometría E	Granulometría C	Granulometría E
1	44,7%	47,3%	45,9%	49,4%
2	44,0%	47,3%	45,9%	49,6%
3	44,1%	47,3%	46,1%	49,2%

Recipiente	Código	PU-006	PU-007	PU-006	PU-007
	Volumen (m ³)	0,0096162	0,002835	0,0096162	0,002835
	Masa (g)	4621,4	1739,6	4621,4	1739,6

Resultados

		Granulometría C	Granulometría E
Peso unitario envarillado (kg/m ³)	Promedio	1485	1389
	Desv. Est.	11,01	0,95
Peso unitario suelto (kg/m ³)	Promedio	1440	1333
	Desv. Est.	2,40	5,11
Vacíos en el agregado envarillado (%)	Promedio	44,3%	47,3%
	Desv. Est.	0,41%	0,04%
Vacíos en el agregado suelto (%)	Promedio	46,0%	49,4%
	Desv. Est.	0,09%	0,19%

F

ASTM C127. Densidad, Densidad Relativa (Gravedad específica) y absorción de agregados gruesos

Fecha: 27 de marzo de 2012

		Ganulometría C	Ganulometría E	Cód. Equipo
Masa de Bandeja (g)=		359,3	202,4	BZ-009
Masa saturado superficie seca, sin bandeja (g)=	Psss	3018,8	2020,6	BZ-009
Masa sumergida de la muestra (g)=	Psumerg	1905,6	1271,6	BZ-004
Masa seca (g)=	Ps	2966,9	1974,7	

Resultados

		Ganulometría C	Ganulometría E
Densidad realtiva realtiva aparente	Gs	2,80	2,81
Densidad realtiva seca	Gbs	2,67	2,64
Densidad realtiva saturada superficie seca	Gbss	2,71	2,70
Densidad aparente	Ds (kg/m ³)	2789	2802
Densidad seca	Dbss (kg/m ³)	2659	2630
Densidad saturada superficie seca	Dbss (kg/m ³)	2705	2691
Absorción (%)		1,7%	2,3%

Anexo 2. Ficha técnica del emulsificante utilizado en las emulsiones

H

REDICOTE® EM44A

Aplicación Emulsificante líquido para emulsiones asfálticas catiónicas de ruptura media y rápida.
Emulsiones preparadas con ácido fosfórico, pueden ser usadas en sellos de lechada de ruptura rápida y en micro-pavimentos, o en mezclas en frío.

Ventajas

- *Nivel de bajo uso:* Por lo general 0.15% es suficiente para preparar emulsiones catiónicas de ruptura rápida que cumplan especificaciones.
- *Compatibilidad con ácido fosfórico:* Morteros de rompimiento rápido (quick-set slurries) y mezclas en frío pueden ser formulados con el mismo emulsificante.

Fórmula de Emulsión Típica

	CRS-2	COS-1P	mezclas en frío
Asfalto	65	60	60
Redicote EM44A	0.10 - 0.20	0.8 - 1.5	0.80- 1.20
Acido Clorhídrico*	0.10 - 0.15	0	0
Acido Fosfórico**	0	0.30 - 0.80	0.30 - 0.60
Jabón PH	2.0 - 4.0	2.0 - 3.0	2.0 - 3.0
Cloruro de Calcio	0 - 0.1	0	0
Sulfato de aluminio	0	0	0.5
Destilado de petróleo	0 - 2	0	0
Agua	hasta 100	hasta 100	hasta 100

*22°Baume o 35 peso %

**85 peso %

Propiedades Físicas

Apariencia a 25°C	líquido				
Punto de fluidez, °C	10 (50°F)				
Punto de inflamación, °C	>100 (>212°F)				
	20	30	40	50	°C
	68	86	104	122	°F
Viscosidad, mPa.s (cP)	1000	600	350	250	
Densidad, g/cc	0.87	0.86	0.85	0.85	
Densidad, lbs./gal	7.24	7.18	7.14	7.11	

Almacenaje y Manejo

Redicote EM44A puede ser almacenado en tanques de acero al carbón. El almacenaje a granel debe ser mantenido a 15-30°C (59-68°F).

Redicote EM44-A contiene aminas y puede causar severa irritación o quemaduras de piel y ojos. Lentes y guantes de protección deben ser

Redicote EM44-A

usados cuando se maneje este producto. Para mayor información consulte la hoja de información de seguridad del material.

**Presentación
(empaque)** Redicote EM44-A esta disponible en envíos a granel o en tambores de 55 galones de 385 lbs. (174kg) peso neto.

Toda la información referente a este producto y/o sugerencias para el manejo y uso aquí contenido son ofrecidas de buena fe y se cree son confiables. Akzo Nobel Surface Chemistry LLC, sin embargo no da ninguna garantía de la exactitud o suficiencia de esta información y/o sugerencias, de la comercialización del producto o conveniencia para cualquier propósito particular, o que cualquier uso sugerido no violará ninguna patente. Nada de lo contenido en esta información deberá ser interpretado como el otorgamiento o extensión de licencia alguna bajo cualquier patente. El comprador deberá determinar por sí mismo, por pruebas preliminares o de otra manera la conveniencia de este producto para sus propósitos. La información contenida reemplaza todos los boletines precedentes en el asunto-tema cubierto.

Anexo 3. Ficha técnica del polímero utilizado en la emulsión modificada

Anexo 4. Ensayos de caracterización de las emulsiones

R

Technical Information

April 2005

UPGRADE^â (BASF Asphalt Modifiers)

Butonal[®] NX 1138

Aqueous polymer dispersion for modifying cationic asphalt emulsions
and hot asphalt cement

Butonal[®] NX 1138

Nature

High solids, cold polymerized cationic styrene-butadiene dispersion.

Properties

Product specification	Solids content	%	63.0-65.0
	pH		4.1-4.5
	Brookfield viscosity RV spindle #3 at 20 rpm	mPa•s	250-2000
Other properties of the dispersion	Bound styrene	%	24
	Residual monomer	%	0.08 max.
	Specific gravity		0.94
	Antioxidant		none
	Glass transition temperature (DSC)	°C	-58
	Weight/volume	lb/gal kg/l	7.8 0.94

Applications

Features

Butonal NX 1138 is a specially formulated dispersion designed to produce a highly elastic binder when incorporated in a cationic emulsion or hot asphalt cement.

Fields of application

Butonal NX 1138 is used in the following applications to modify cationic asphalt emulsions:

- Chip Seals
- Microsurfacing
- Slurry Seals

Butonal NX 1138 is also used in the modification of hot asphalt cements.

Processing

Periodic mechanical stirring is required to maintain a homogeneous mixture. Some separation is possible due to the specific gravity and particle size distribution of these dispersions.

Generally, the preferred means of stirring is with a separate propeller type stirrer. This low-speed, low-shear mechanical stirrer can be located off-center, set at an angle, or side mounted near the bottom to prevent foaming or vortexing. Center stirring requires tank baffles. It is recommended that the material be agitated for 10-20 minutes every 24 hours when the material is being used in production.

Safety

General

The usual safety precautions when handling chemicals must be observed. These include the measures described in Federal, State and Local health and safety regulations, thorough ventilation of the workplace, good skin care and wearing of protective goggles.

Material Safety Data Sheet

All safety information is provided in the Material Safety Data Sheet for Butonal NX 1138.

Industrial Hygiene

Butonal NX 1138 does not exert any harmful effects provided it is used for the purpose for which it is intended and processed in accordance with current industrial practice. Butonal NX 1138 may contain technically unavoidable traces of volatile organic compounds. Observe appropriate workplace exposure limits when indicated in the Material Safety Data Sheet. Butonal NX 1138 may irritate the skin and mucous membranes on prolonged contact with the product.

Labelling

Butonal NX 1138 is not classified as a hazardous product under DOT or OSHA regulations or as a controlled product under WHIMS (Canada) regulations. It does not contain any hazardous components at levels which have implications for labelling under these regulations.

Storage

Butonal NX 1138 has a shelf life of six months provided it is stored in a cool place and is protected from freezing. Technical information regarding the storage of BASF polymer dispersion products is available on request.

In common with other dispersions, Butonal NX 1138 is sensitive to multivalent ions; for example, iron, copper, zinc, and aluminum. Contact of the product with these metal ions may affect the stability of the product. This applies not only to storage tanks, but also to pipelines, stirrers, product containers, etc.

Equipment

Tanks recommended for storage are stainless steel or fiberglass. Carbon steel tanks should be epoxy coated.

Filters and piping should be stainless steel. Basket-type filters of 40 mesh are recommended.

Pumps used to transfer latex have to be low shear types. Progressive cavity Moyno pumps and dual diaphragm air pumps are two recommended types. Gear pumps are to be avoided.

Important

The descriptions, designs, and data contained herein are presented for your guidance only. Because there are many factors under your control which may affect processing or application/use it is necessary for you to make appropriate tests to determine whether the product is suitable for your particular purpose prior to use. **NO WARRANTIES OF ANY KIND, EITHER EXPRESS OR IMPLIED, INCLUDING WARRANTIES OF MERCHANTABILITY OR FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE, ARE MADE REGARDING PRODUCTS DESCRIBED OR DESIGNS, OR INFORMATION SET FORTH, OR THAT THE PRODUCTS, DESIGNS, OR DATA MAY BE USED WITHOUT INFRINGING THE INTELLECTUAL PROPERTY RIGHTS OF OTHERS. IN NO CASE SHALL THE DESCRIPTIONS, DATA OR DESIGNS PROVIDED BE PRESUMED TO BE A PART OF OUR TERMS AND CONDITIONS OF SALE.** Further, you expressly understand and agree that the descriptions, designs, and data furnished by BASF hereunder are given gratis and BASF assumes no obligation or liability for same or results obtained from use thereof, all such being given to you and accepted by you at your risk.

BASF Corporation
Functional Polymers
Charlotte Technical Center
11501 Steele Creek Road
Charlotte, NC 28273
(800) 395-5152

Customer Service:
(800) 346-8590

BASF

Ensayos de caracterización de las emulsiones

Prueba de estabilidad en de almacenamiento 24 h (ASTM D 223, secciones 82-88)

	CRS-1		CRS-P	
Masa de Beaker superior	179,6183	0,0001	179,5581	0,0001
Masa de B + Muestra superior	229,5544	0,0001	231,5187	0,0001
Masa de Muestra superior	49,9361	0,0002	51,9606	0,0002
Masa de Beaker inferior	238,4406	0,0001	183,4682	0,0001
Masa de B + Muestra inferior	298,0299	0,0001	226,9269	0,0001
Masa de Muestra inferior	59,5893	0,0002	43,4587	0,0002
Masa de B + Muestra superior (dhorno)	209,1986	0,0001	210,6423	0,0001
Masa de muestra despues horno sup.	29,5803	0,0002	31,0842	0,0002
Masa de B + Muestra inferior (dhorno)	273,8688	0,0001	210,1255	0,0001
Masa de muestra despues horno inf.	35,4282	0,0002	26,6573	0,0002
% de residuo superior	59,236	0,001	59,823	0,001
% de residuo inferior	59,454	0,001	61,339	0,001
Estabilidad 24 h	0,218	0,001	1,517	0,001

Estabilidad a las 24 horas Promedio	0,22	1,52
-------------------------------------	-------------	-------------

Porcentaje de demulsibilidad en 35 mL de dioctil sulfosucinato de sodio al 0.8 % (ASTM 244, secciones 39-44), Temperatura 25 °C

	CRS-1		CRS-P	
Masa equipo + emulsión Asfáltica	431,300	0,001	435,000	0,001
Masa de emulsión utilizada	100,600	0,002	100,100	0,002
Masa de Beaker, agitador y malla	330,7000	0,001	334,9000	0,001
Masa del equipo con residuo	358,1000	0,001	376,1000	0,001
Masa de residuo	27,4000	0,002	41,2000	0,002
% de residuo	59,3		59,5	

Porcentaje Demulsibilidad	46,1703	69,3019
---------------------------	----------------	----------------

Tipo de carga eléctrica de la emulsión (ASTM D 244, secciones 28-33)

	CRS-1		CRS-P	
Voltaje aplicado	12	V	12	V
Corriente inicial	0,01	mA	0,01	mA
Corriente final	0,01	mA	0,01	mA
Electrodos	<i>Deposición</i>		<i>Deposición</i>	
Cátodo (Negativo)	1		1	
Ánodo (Positivo)	0		0	

Tipo	Catiónica	Catiónica
------	------------------	------------------

T

Porcentaje retenido en el tamiz Nº 20 (ASTM D 58-63)

	CRS-1			
	<i>No. 1</i>		<i>No. 2</i>	
Masa de emulsión utilizada	437,00	0,1	295,3	0,1
Masa de malla	186,4658	0,0001	189,943	0,000
Masa de malla con residuo	186,5002	0,0001	189,967	0,0001
Masa de residuo	0,0344	0,0002	0,024	0,0002
Porcentaje residuo	0,008	4,7568E-05	0,00822892	7,0514E-05

Promedio	0,008			
----------	--------------	--	--	--

	CRS-P			
	<i>No. 1</i>		<i>No. 2</i>	
Masa de emulsión utilizada	500,80	0,1	500,0	0,1
Masa de malla	162,3566	0,0001	184,388	0,000
Masa de malla con residuo	162,3599	0,0001	184,391	0,0001
Masa de residuo	0,0033	0,0002	0,004	0,0002
Porcentaje residuo	0,001	4,0068E-05	0,00076	4,0152E-05

Promedio	0,001			
----------	--------------	--	--	--

Destilación (ASTM D 244, secciones 11-15 y 21-27)

	CRS-1		CRS-P	
	Masa del cilindro	2346,2	0,1	2414,5
Masa cil. + emulsión	2547,9	0,1	2614,5	0,1
Masa de asfalto	201,7	0,2	200,0	0,2
Masa de ci. + residuo	2465,9	0,1	2533,4	0,1
Masa de residuo	119,7	0,2	118,9	0,2
% de residuo	59,3	0,2	59,5	0,2
Volumen destilado	78,0	0,5	79,0	0,5
% destilado	38,7	0,3	39,5	0,3

Promedio residuo	59,4	59,5
------------------	-------------	-------------

Volumen fase acuosa	77	78
Volumen fase organica	1	1
% Volumen destilado	38,7	39,5
% fase acuosa	38,17550818	39

% aceite	0,50	0,50
----------	-------------	-------------

Anexo 5. Prueba del tablero

Prueba del tablero

La prueba del tablero se realizó utilizando un área de 300x300 mm, para esto se empleó cartón con medidas de 300x300x30 mm, en el que se colocó agregado en una sola capa y se pesó para determinar el peso por unidad de área, en la Figura A-1 se muestra el procedimiento utilizado. Los resultados obtenidos se muestran en el Cuadro A-1.



Figura A-1. Procedimiento de la prueba del tablero

Cuadro A-1. Resultados obtenidos en la prueba del tablero

Granulometría	Peso tablero y agregado (g)	Peso agregado (g)	Agregado por unidad de área (kg/m ²)
C	1176,7	1053,1	11,70
D	902,8	779,2	8,66
E	578,0	454,4	5,05
F	492,9	369,3	4,10

Tablero	Peso (g)	Área m ²
	123,6	0,090

