



UNIVERSIDAD DE
COSTA RICA

LanammeUCR

Laboratorio Nacional de
Materiales y Modelos Estructurales

Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales

Informe: EIC-Lanamme-INF-1410-2023

Informe de avance

Diseño y evaluación del desempeño de mezclas en frío con emulsión
asfáltica y pavimento asfáltico recuperado (PAR/RAP)



Preparado por la:

Unidad de Investigación en Infraestructura y Transporte

Programa de Infraestructura del Transporte (PITRA)

Documento generado con base en el Art. 6, inciso i) de la Ley 8114 y lo señalado en el
Capít.7, Art. 68 Reglamento al Art. 6 de la precitada ley, publicado mediante decreto
DE-37016-MOPT.

San José, Costa Rica

Mayo, 2024

Código Postal 11501-2060, Universidad de Costa Rica | Tel: (506) 2511-2500

direccion.lanamme@ucr.ac.cr | www.lanamme.ucr.ac.cr

1. Informe EIC-Lanamme-INF-1410-2023	2. Copia No. 1
3. Título y subtítulo Diseño y evaluación del desempeño de mezclas en frío con emulsión asfáltica y pavimento asfáltico recuperado (PAR/RAP)	4. Fecha del Informe 17 de mayo del 2024
5. Organización y dirección Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales, Universidad de Costa Rica, Ciudad Universitaria Rodrigo Facio, San Pedro de Montes de Oca, Costa Rica. Tel: (506) 2511-2500	
6. Notas complementarias La mezcla asfáltica en frío (MAF) es una mezcla de agregado y emulsión asfáltica cuya producción y aplicación es a temperatura ambiente. En comparación con la mezcla asfáltica en caliente, la MAF requiere de un menor consumo de energía, genera menos emisiones de gases contaminantes y se puede aplicar con equipos sencillos. Por las razones antes mencionadas, la MAF es un material económico y sostenible con el ambiente. La MAF se usa como superficie de rueda en carreteras de bajo a mediano tránsito y para el mantenimiento mediante el bacheo. En Costa Rica, el Ministerio de Obras Públicas y Transportes ha mostrado un interés especial en producir mezcla asfáltica en frío para el mantenimiento de carreteras, aprovechando como agregado el pavimento asfáltico recuperado que se tiene acumulado en grandes apilamientos en sus planteles, y el cual desean darle un uso más eficiente, sostenible con el ambiente y que represente un ahorro en costos. La siguiente investigación tiene como objetivo valorar el uso de mezclas en frío con emulsión asfáltica y material recuperado de pavimentos asfálticos para bacheo y capas de rueda en caminos de bajo a mediano tráfico. El informe incluye la caracterización de dos fuentes de RAP y de la emulsión de rompimiento lento, así como el diseño de mezcla considerando propiedades como el recubrimiento y adherencia, relación densidad-humedad, evaluación de la necesidad de incorporar un relleno mineral activo, contenido óptimo de asfalto residual mediante ensayos de resistencia a la tensión indirecta, susceptibilidad a la deformación permanente mediante Rueda de Hamburgo, desprendimiento y una	

evaluación del desempeño de bacheos de prueba. Se determinó una dosificación óptima preliminar para las mezclas en frío desarrolladas. Las mezclas mostraron un adecuado desempeño ante el daño por humedad, la deformación permanente y el desprendimiento. De igual forma, los bacheos de prueba no han presentado deterioros severos luego de varios meses de haber sido colocados (8 meses).

8. Palabras clave

Mezclas en frío, emulsión asfáltica, pavimento asfáltico recuperado (RAP), bacheo.

9. Nivel de seguridad:

No aplica

10. Núm. de páginas

70

11. Elaborado:

**Ing. Juan Carlos Múnera
Miranda, M. Sc**

Fecha: 17/05/2024

Fecha: / /

Fecha: / /

12. Revisado por:

**Ing. Fabián Elizondo Arrieta,
MBA**

Fecha: 17/05/2024

13. Revisión Legal:

Fecha: / /

14. Aprobado por:

**Ing. Ana Luisa Elizondo
Salas, M. Sc**

Fecha: 17/05/2024

Índice de contenido

1. Resumen	8
2. Introducción	9
3. Objetivo general.....	10
3.1. Objetivos específicos.....	10
4. Justificación	10
5. Antecedentes	11
6. Marco teórico	12
6.1. Métodos de diseño de mezcla	13
6.1.1. Método del Instituto del asfalto MS-14	13
6.1.2. Método del Instituto del asfalto MS-19	14
6.1.3. Método AASHTO PP 86.....	15
6.2. Emulsiones asfálticas para mezclas en frío	17
6.3. Especificaciones técnicas nacionales	18
6.4. Ensayos para medir la respuesta mecánica del material	20
6.5. Evaluación del desempeño.....	20
6.6. Factores que afectan el desempeño de las mezclas en frío	21
7. Metodología	21
7.1. Muestreo de materiales	23
7.2. Caracterización de materiales	25
7.3. Diseño de mezcla.....	27
7.3.1. Recubrimiento y adherencia.....	28
7.3.2. Proceso de fabricación, curado y volumetría de especímenes de ensayo.....	28
7.3.3. Contenido de óptimo de fluidos totales.....	30
7.3.4. Evaluación de la necesidad de relleno mineral activo	31
7.3.5. Contenido óptimo de asfalto residual	32
7.4. Bacheo de prueba en Ciudad de la Investigación	34
8. Resultados y análisis	37
8.1. Levantamiento 3D con dron de apilamientos	37

8.2. Caracterización de materiales	38
8.2.1. RAP	38
8.2.2. Emulsión asfáltica	41
8.3. Recubrimiento y adherencia	43
8.4. Contenido óptimo de fluidos totales	44
8.5. Requerimiento de relleno mineral activo	46
8.6. Diseño de mezcla	48
8.6.1. Resistencia retenida a tensión indirecta	48
8.6.2. Rueda de Hamburgo	52
8.6.3. Desprendimiento (raveling test)	56
8.7. Bacheo de prueba en la Ciudad de la Investigación	61
9. Conclusiones	63
10. Recomendaciones	66
11. Referencias	66

Índice de figuras

Figura 1 Metodología propuesta	22
Figura 2 RAP sin procesar	23
Figura 3 RAP procesado	24
Figura 4 Proceso de fabricación y volumetría de especímenes de ensayo	29
Figura 5 Saturación y falla a tensión indirecta	32
Figura 6 Ensayo de rueda Hamburgo y desprendimiento	33
Figura 7 Elaboración de mezcla en frío para bacheo	35
Figura 8 Procedimiento de bacheo de emergencia	36
Figura 9 Estimación de volumen de apilamientos de perfilado	37
Figura 10 Granulometría de ambas fuentes de RAP	40
Figura 11 Granulometría de ambas fuentes de RAP extrayendo el asfalto	40
Figura 12 Recubrimiento y adherencia	44
Figura 13 Contenido óptimo de fluidos totales	46

Figura 14 Requerimiento de relleno mineral activo para la mezcla con RAP procesado	47
Figura 15 Requerimiento de relleno mineral activo para la mezcla con RAP sin procesar	48
Figura 16 Resistencia a la tensión indirecta para la mezcla con RAP procesado	50
Figura 17 Resistencia a la tensión indirecta para la mezcla con RAP sin procesar	51
Figura 18 Curvas de deformación según el contenido de asfalto residual mezcla con RAP procesado	53
Figura 19 Curvas de deformación según el contenido de asfalto residual para el RAP sin procesar	54
Figura 20 Deformación máxima con respecto al contenido de asfalto residual para el RAP procesado	55
Figura 21 Deformación máxima con respecto al contenido de asfalto residual para el RAP sin procesar	55
Figura 22 Desprendimiento según el contenido de asfalto y tiempo de curado mezcla RAP procesado	57
Figura 23 Desprendimiento según el contenido de asfalto y tiempo de curado mezcla RAP sin procesar	58
Figura 24 Determinación del contenido óptimo de asfalto residual mezcla con RAP procesado	59
Figura 25 Determinación del contenido óptimo de asfalto residual mezcla con RAP sin procesar	60

Índice de tablas

Tabla 1 Criterios de diseño de mezcla MS-14	14
Tabla 2 Criterios de diseño de mezcla MS-19	15
Tabla 3 Criterios de diseño de mezcla AASHTO PP86-20	16
Tabla 4 Emulsiones asfálticas para mezclas en frío	17
Tabla 5 Granulometrías del CR 2020 para MAF	19
Tabla 6 Requisitos de calidad para agregados del CR 2020 para MAF	19
Tabla 7 Requisitos del CR 2020 para el diseño de mezcla de MAF	20

EIC-Lanamme-INF-1410-2023

Página 7 de 70

Tabla 8. Muestras de materiales	25
Tabla 9 Características de compactación, curado y acondicionamiento de especímenes de ensayo	30
Tabla 10 Volumen estimado de apilamientos de perfilado	37
Tabla 11 Caracterización del RAP	39
Tabla 12 Actividad del asfalto en el RAP.....	41
Tabla 13 Caracterización de la emulsión de rompimiento lento.....	42
Tabla 14 Recubrimiento y adherencia.....	43
Tabla 15 Contenido óptimo de fluidos totales.....	45
Tabla 16 Requerimiento de relleno mineral activo.....	47
Tabla 17 Resultados de resistencia a la tensión indirecta	49
Tabla 18 Resultados de rueda de Hamburgo.....	53
Tabla 19 Resultados de ensayo de desprendimiento	57
Tabla 20 Dosificación óptima según diseño de mezcla	60
Tabla 21 Bacheos de prueba en la Ciudad de la Investigación	62

1. RESUMEN

La mezcla asfáltica en frío (MAF) es una mezcla de agregado y emulsión asfáltica cuya producción y aplicación es a temperatura ambiente. En comparación con la mezcla asfáltica en caliente, la MAF requiere de un menor consumo de energía, genera menos emisiones de gases contaminantes y se puede aplicar con equipos sencillos. Por las razones antes mencionadas, la MAF es un material económico y sostenible con el ambiente. La MAF se usa como superficie de ruedo en carreteras de bajo a mediano tránsito y para el mantenimiento mediante el bacheo. En Costa Rica, el Ministerio de Obras Públicas y Transportes ha mostrado un interés especial en producir mezcla asfáltica en frío para el mantenimiento de carreteras, aprovechando como agregado el pavimento asfáltico recuperado que tiene acumulado en grandes apilamientos en sus planteles, y el cual desean darle un uso más eficiente, sostenible con el ambiente y que represente un ahorro en costos.

De ahí que, la siguiente investigación tiene como objetivo valorar el uso de mezclas en frío con emulsión asfáltica y material recuperado de pavimentos asfálticos para bacheo y capas de ruedo en caminos de bajo a mediano tráfico.

El informe incluye la caracterización de dos fuentes de RAP y de la emulsión asfáltica de rompimiento lento, así como el diseño de mezcla considerando propiedades como el recubrimiento y adherencia, relación densidad-humedad, evaluación de la necesidad de incorporar un relleno mineral activo, contenido óptimo de asfalto residual mediante ensayos de resistencia a la tensión indirecta, susceptibilidad a la deformación permanente mediante Rueda de Hamburgo, desprendimiento y una evaluación del desempeño de bacheos de prueba. Se determinó una dosificación óptima preliminar para las mezclas en frío desarrolladas. Las mezclas mostraron un adecuado desempeño ante el daño por humedad, la deformación permanente y el desprendimiento. De igual forma, los bacheos de prueba no han presentado deterioros severos luego de varios meses de haber sido colocados (8 meses).

2. INTRODUCCIÓN

La MAF es una combinación de agregados (vírgenes y/o recuperados), emulsión asfáltica o asfalto rebajado (cada vez más en desuso por implicaciones ambientales) y relleno mineral activo (de requerirse) cuya producción y aplicación es a temperatura ambiente. Se ha utilizado en capas de ruedo para caminos de bajo a mediano tráfico, estabilización de materiales granulares, reciclado en frío de carpetas asfálticas deterioradas para la rehabilitación de pavimentos y en labores de mantenimiento como bacheo. Las bajas temperaturas de producción y aplicación traen una serie de beneficios económicos y ambientales en comparación con las mezclas asfálticas en caliente, como menor emisión de gases de efecto invernadero, disminución en el consumo de energía y equipos de aplicación sencillos. Además, se pueden producir en planta o en sitio, con agregados vírgenes o recuperados de pavimentos asfálticos deteriorados (pavimento asfáltico recuperado, RAP, por sus siglas en inglés), y con diferentes tipos de emulsiones asfálticas que satisfagan los requerimientos de cada material y condiciones ambientales.

Entre las limitaciones de la aplicación de las MAF están, el tiempo requerido para el curado de la emulsión, relacionado con bajas resistencias iniciales y periodos más prolongados para la apertura al tránsito. La presencia de agua en las MAF hace que se requieran cuidados especiales para garantizar una buena afinidad entre el agregado y el asfalto, para que, de esta manera la mezcla presente una adecuada durabilidad y resistencia al daño por humedad; además, la composición granulométrica de los agregados en algunas MAF se relaciona con mayores contenidos de vacíos, menor trabajabilidad (dificultad de compactación) y susceptibilidad al ahuellamiento.

En Costa Rica, la oferta de emulsiones asfálticas de rompimiento lento (CSS-1h) ha promovido la implementación de técnicas de aplicación en frío para la construcción y preservación de pavimentos. Adicionalmente, la División de Obras Públicas del Ministerio de Obras Públicas y Transporte ha mostrado un interés especial en realizar labores específicas de mantenimiento mediante bacheo con mezclas asfálticas en frío con emulsión asfáltica y PAR/RAP, del cual

poseen grandes apilamientos en sus planteles, y pretenden darle un uso más eficiente, amigable con el medio ambiente y que resulte en un ahorro en costos.

De esta forma, la investigación tiene como objetivo valorar el uso de mezcla en frío con emulsión asfáltica y RAP para el bacheo y construcción de capas de ruedo para caminos de bajo a mediano tráfico por medio del diseño de mezcla y la evaluación del desempeño en el laboratorio y a escala real. Los productos servirán como herramienta a la Administración para aplicar procedimientos de diseño y evaluación que permitan optimizar y valorar el desempeño de esta técnica respecto a otras, como el uso de mezcla asfáltica en caliente, representando una solución que permita mejorar el estado de las carreteras en beneficio de los usuarios y el medioambiente, mejorando la seguridad, economía y confort.

3. OBJETIVO GENERAL

Valorar el uso de mezclas en frío con emulsión asfáltica y material recuperado de pavimentos asfálticos (PAR/RAP) para bacheo y capas de ruedo, mediante el diseño y evaluación de su desempeño tanto en el laboratorio como a escala real.

3.1. Objetivos específicos

1. Diseñar las mezclas en frío en el laboratorio evaluando propiedades físicas y mecánicas para comprobar el cumplimiento de criterios mínimos de calidad.
2. Evaluar el desempeño de las mezclas diseñadas mediante ensayos que consideren las condiciones de aplicación y los principales deterioros esperados.
3. Verificar el desempeño en condiciones reales de servicio a escala natural mediante tramos de prueba.

4. JUSTIFICACIÓN

La División de Obras Públicas (DOP) del Ministerio de Obras Públicas y Transportes (MOPT) ha mostrado un interés especial en realizar labores de mantenimiento con mezclas en frío, a base de material asfáltico recuperado y emulsión asfáltica de rompimiento lento, para valorar su diseño, fabricación y colocación como material para bacheo. La Dirección de Obras Públicas

del MOPT cuenta, como uno de sus principales recursos materiales, con acopios de una considerable cantidad de material recuperado de pavimentos asfálticos o perfilado, localizados en diferentes planteles del MOPT de la gran área metropolitana (GAM) principalmente.

Actualmente, el Manual de Especificaciones Generales para la Construcción de Carreteras, Caminos y Puentes (CR 2020) en su Sección 407 “Mezclas en Frío con Emulsiones Asfálticas” no considera aún el uso de materiales recuperados, como el PAR/RAP, a modo de agregado para mezclas en frío (MOPT, 2022).

En este contexto es indispensable contar con una metodología de diseño de mezcla en el laboratorio y especificaciones técnicas que permitan evaluar las mezclas en frío con PAR/RAP para bacheo y construcción de capas de ruedo, y así anticipar un desempeño adecuado en el campo.

El propósito de la investigación es valorar la implementación de mezclas en frío con emulsión asfáltica y PAR/RAP para su uso en bacheo o capas de ruedo para caminos de bajo a mediano tráfico, mediante el diseño de mezcla y evaluación del desempeño en el laboratorio y a escala real. Los productos que se generen con la investigación proporcionarán herramientas para que la Administración pueda implementar este tipo de mezclas reconociendo su ámbito de aplicación y expectativas de desempeño, así como la optimización en la formulación para lograr el mejor comportamiento y valorar su costo-beneficio.

5. ANTECEDENTES

La Dirección de Obras Públicas del MOPT, mediante el oficio DVOP-2022-59, externa al LanammeUCR que, debido a la falta de recursos para contratos para conservación de la Red Vial Nacional, han tenido la necesidad de ejecutar algunas labores de mantenimiento mediante bacheos de emergencia en la Red Vial Nacional Pavimentada con mezclas asfálticas no convencionales. Señalan que cuentan con acopios de una considerable cantidad de material recuperado de carpetas asfálticas o perfilado localizados en diferentes planteles del MOPT en la GAM principalmente. Enfatizan que tienen un interés especial en utilizar este material fundamentándose en la Ley 9828 “Uso de materiales reutilizables en pavimentos y obras de

infraestructura vial”, la cual señala que en los proyectos de construcción, reconstrucción, conservación, mantenimiento y rehabilitación que ejecute el Estado y las municipalidades en las vías nacionales y cantonales, respetivamente, se deberá utilizar un porcentaje de materiales reutilizables del volumen total de los materiales que se requieran para la construcción de pavimentos y de obras de infraestructura vial. Adicionalmente mencionan que han estado trabajando en el diseño de mezcla en laboratorio con el material de perfilado y emulsión asfáltica con el objetivo de encontrar una solución adecuada para atender las necesidades de bacheo de emergencia de la Red Vial Asfaltada, utilizando material de perfilado y diferentes agregados granulares con los que cuenta la Administración (Gómez, 2021; DVOP, 2022; MOPT, 2022).

6. MARCO TEÓRICO

Las mezclas asfálticas en frío son una mezcla de agregados sin calentar, relleno mineral activo (de requerirse) y emulsión asfáltica, cuyo mezclado y compactación es a temperatura ambiente. Según el método de mezclado, hay dos tipos de mezclas en frío: mezcla en planta y mezcla en sitio (Asphalt Institute, 1997). La colocación y compactación se pueden ejecutar con equipos convencionales de pavimentación o inclusive con equipos básicos para trabajos más pequeños. Se han aplicado como superficie de ruedo en caminos de bajo a mediano tránsito, en la estabilización de bases granulares, en proyectos de rehabilitación con el reciclado en frío de pavimentos deteriorados y en actividades de mantenimiento de caminos como el bacheo. Entre sus principales ventajas están:

- **Económica.** La MAF tienen rendimientos altos de producción con baja inversión en equipos. Adicionalmente se pueden utilizar RAP como agregado. No se requiere de gran cantidad de equipos para la construcción (Asphalt Institute, 1997). A ser una técnica que no requiere de calor puede consumir hasta un 80 % menos de energía que las MAC (Chappat & Bilal, 2003)
- **Ambiental.** Al no requerir calentamiento de los agregados y utilizar emulsiones asfálticas, se produce una menor emisión de gases de efecto invernadero y de polvo.

Las MAF generan hasta un 32 % menos de emisiones en comparación con las MAC (Chappat & Bilal, 2003)

- **Versatilidad.** Se pueden aplicar con gran variedad de agregados y tipos de emulsiones asfálticas, y en diversas condiciones ambientales

A pesar de las ventajas ambientales y económicas que tienen las MAF, su uso se ha limitado principalmente para la construcción de caminos de bajo a mediano volumen de tráfico debido a problemas asociados con su estabilidad y durabilidad (Jain & Singh , 2021). Algunas otras limitantes son la dificultad de compactación, alto contenido de vacíos, resistencia inicial baja y tiempo prolongado de curado para alcanzar una adecuada resistencia (Dash et al., 2022).

6.1. Métodos de diseño de mezcla

Actualmente no existe un método de diseño para MAF universalmente aceptado. Los métodos disponibles que se utilizan regularmente en la práctica fueron derivados empíricamente de la experiencia con los materiales y en el campo. Muchas de las agencias de transportes han desarrollado sus propios métodos de diseño basados en su propia experiencia con las MAF. A continuación, se indican los principales métodos disponibles.

6.1.1. Método del Instituto del asfalto MS-14

El procedimiento de diseño de mezcla más antiguo y que aún es ampliamente utilizado corresponde al Manual de Mezclas Asfálticas en Frío del Instituto del Asfalto, conocido MS-14 (Asphalt Institute, 1997). El MS-14 tiene dos métodos de diseño para mezclas en frío con emulsión asfáltica y asfalto rebajado: el método Hveem y Marshall modificado. En particular para las emulsiones asfálticas, el método Hveem aplica para el diseño de mezclas en frío para capas de base y capas de superficie de ruedo temporal con bajo volumen de tráfico. Sin embargo, el MS-14 recomienda, para superficies de ruedo permanentes de mezcla en frío con emulsión asfáltica con granulometrías densas o abiertas, colocar un tratamiento o sello superficial para que sean más durables. El método de diseño Marshall modificado se basa en la investigación realizada por la Universidad de Illinois utilizando el método Marshall para el diseño de mezcla y la evaluación de la susceptibilidad ante el daño por humedad (Darter et al.,

1978). El método y los criterios de ensayo recomendados son aplicables a mezclas para capa de base para pavimentos de bajo volumen de tráfico que contienen emulsión asfáltica y agregados minerales con graduaciones densas con tamaños máximos de 25 mm o menores. Este método de diseño aplica para mezclas producidas en sitio o en planta preparadas a temperatura ambiente. El método Marshall incluye selección y caracterización de agregados y emulsión asfáltica, ensayo de recubrimiento, determinación del contenido óptimo de fluidos totales para compactación y la determinación del contenido óptimo de asfalto residual mediante ensayos de estabilidad Marshall modificada. En la Tabla 1 se muestran los criterios del diseño de mezcla.

La compactación de los especímenes de ensayo es con el mazo el Marshall a 50 golpes por cara. Después de la compactación, los especímenes se curan dentro del molde por 24 horas a temperatura ambiente y luego otras 24 horas a 38°C, ya desmoldados.

Tabla 1

Criterios de diseño de mezcla MS-14

Ensayo	Valor
Estabilidad a 22,2 °C (AASHTO T245 modificado)	2 224 N, mín.
Pérdida de estabilidad (saturación e inmersión en agua a 25 °C por 1 hora)	50 %, máx.
Porcentaje de recubrimiento	50 %, mín.

Nota. Tomado de Asphalt Institute (1997)

6.1.2. Método del Instituto del asfalto MS-19

El procedimiento del Manual Básico de Emulsiones Asfálticas, conocido como MS-19 (Asphalt Institute, 2008), es publicado posterior al MS-14, en él se describe un procedimiento similar al MS-14 para el diseño de mezcla, pero omitiendo la determinación del contenido óptimo de fluidos totales y la saturación de los especímenes Marshall para determinar la estabilidad retenida, con lo cual se evaluaba la susceptibilidad al daño por humedad con su efecto en la estabilidad. El MS-19 describe dos métodos de diseño para MAF con emulsión asfáltica, dependiendo si es una graduación densa o abierta. El método y los criterios de ensayo

recomendados para graduaciones densas son aplicables a mezclas para capa de base o superficie de ruedo para pavimentos de bajo a moderado volumen de tráfico que contienen emulsión asfáltica y agregados minerales con tamaños máximos de 25 mm o menos. Las MAF densas normalmente requieren de un sello superficial (como tratamientos superficiales) para impermeabilizar y proveer de una superficie de ruedo más durable. Este método de diseño se recomienda para mezclas producidas en sitio o en planta preparadas a temperatura ambiente. El procedimiento de diseño incluye la selección y caracterización de agregados y emulsión asfáltica, evaluación de recubrimiento y adherencia (desnudamiento por daño por humedad), y la determinación del contenido óptimo de asfalto residual mediante ensayos de estabilidad Marshall modificada. En la Tabla 2 se muestran los criterios de aceptación para el diseño de mezcla.

Tabla 2

Criterios de diseño de mezcla MS-19

Ensayo	Valor
Estabilidad a 25 °C, (AASHTO T245 modificado)	2 224 N, mín.
Porcentaje de recubrimiento (adherencia)	85 %, mín. (superficie de ruedo) 50 %, mín. (base)

Nota. Tomado de Asphalt Institute (2008)

Las características de compactación son las mismas que el MS-14, sin embargo, el curado se realiza con el espécimen dentro del molde de compactación sometiénolo a una temperatura de 60 °C por 48 horas.

6.1.3. Método AASHTO PP 86

El método para diseño de mezcla AASHTO PP86-20 (2021), junto con las especificaciones para materiales AASHTO MP31-17 (2021), está enfocado para mezclas en frío de proyectos de rehabilitación de pavimentos, en los cuales se recicla la carpeta asfáltica deteriorada y se estabiliza con emulsión asfáltica para obtener una capa de base de desempeño superior sobre la cual se coloca un sello asfáltico o una capa de MAC. El procedimiento incluye: obtención de muestras en el pavimento existente, determinación del contenido de asfalto del RAP,

granulometría del agregado sin y con extracción del asfalto, selección de la emulsión asfáltica, aditivos y agregado de corrección granulométrica de ser necesario, determinación del contenido de óptimo de asfalto con ensayos de tensión indirecta o estabilidad Marshall modificada y ensayo de desprendimiento para medir durabilidad (AASHTO, 2021; AASHTO, 2021b). En la Tabla 3 se muestran los criterios de aceptación para el diseño de mezcla.

El tipo de compactación y el tamaño de los especímenes dependerá del ensayo que se utilice para determinar el contenido óptimo de asfalto residual. Si se selecciona el ensayo de tensión indirecta, se compactan especímenes de 150 mm de diámetro en el compactador giratorio Superpave con 30 giros, aplicando 600 kPa de presión vertical y un ángulo de giro de 1,16 °. Si se escoge estabilidad Marshall, se compactan especímenes de 100 mm de diámetro en el compactador Marshall con 75 golpes por cara (el tamaño máximo de la mezcla debe ser de 25 mm). El curado de los especímenes compactados se hace una temperatura de 60 °C por un periodo de 16 a 48 horas hasta peso constante.

Tabla 3

Criterios de diseño de mezcla AASHTO PP86-20

Método de diseño	Criterio	Propiedad
<i>Resistencia a la tensión indirecta</i>		
Resistencia a la tensión indirecta, grupo seco, AASHTO T283 modificado	310 kPa, mín.	Resistencia sin acondicionamiento
Resistencia a la tensión indirecta, grupo húmedo, AASHTO T283 modificado	217 kPa, mín.	Resistencia con acondicionamiento
Resistencia retenida, AASHTO T283 modificado (saturación e inmersión en agua a 25 °C por 24 horas)	70,0 %, mín.	Resistencia al daño por humedad
Ensayo de desprendimiento (raveling test), ASTM D7196	7,0 %, máx. pérdida	Resistencia al desprendimiento
Relación de asfalto/cemento	3,0:1,0, mín.	Prevenir comportamiento rígido
<i>Estabilidad Marshall</i>		
Estabilidad Marshall, grupo seco, AASHTO T245 modificado	5 560 N, mín.	Estabilidad sin acondicionamiento

Método de diseño	Criterio	Propiedad
Estabilidad retenida (saturación e inmersión en agua a 25 °C por 24 horas)	70,0 %, mín.	Resistencia al daño inducido por humedad
Ensayo de desprendimiento (raveling test), ASTM D7196	7,0 %, mín. pérdida	Resistencia al desprendimiento
Relación de asfalto/cemento	3,0:1,0, mín.	Prevenir comportamiento rígido

Nota. Tomado de AASHTO (2021b)

6.2. Emulsiones asfálticas para mezclas en frío

El MS-14 señala los tipos de emulsiones asfálticas más adecuadas para las diferentes aplicaciones con mezclas en frío (Tabla 4).

Tabla 4

Emulsiones asfálticas para mezclas en frío

Tipo de construcción	Emulsión asfáltica									
	Aniónicas (AASHTO M 140)					Catiónicas (AASHTO M 208)				
	MS-2	HFMS-2	MS-2h	HFMS-2s	SS-1	SS-1h	CMS-2	CMS-2h	CSS-1	CSS-1h
Mezclado en planta										
<i>Para base o superficie de rudo</i>										
Graduación abierta	X	X					X	X		
Graduación densa				X	X	X			X	X
Bacheo, uso inmediato					X	X			X	X
Mezclado en sitio (camino)										
<i>Para base o superficie de rudo</i>										
Graduación abierta	X	X					X	X		
Graduación densa				X	X	X			X	X

Tipo de construcción	Emulsión asfáltica									
	Aniónicas (AASHTO M 140)					Catiónicas (AASHTO M 208)				
	MS-2	HFMS-2	MS-2h	HFMS-2s	SS-1	SS-1h	CMS-2	CMS-2h	CSS-1	CSS-1h
Bacheo, uso inmediato				X	X	X			X	X
Reciclado en frío	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X

Nota. Tomado de Asphalt Institute (1997)

6.3. Especificaciones técnicas nacionales

El Manual de Especificaciones Generales para la Construcción de Carreteras, Caminos y Puentes (CR 2020), en la Sección 407 “Mezclas en Frío con Emulsiones Asfálticas” señala las especificaciones para la construcción de mezclas asfálticas en frío de graduación densa o abierta con emulsión asfáltica para uso como capa de rueda en caminos de bajo a mediano tráfico y en el bacheo.

La sección 407.03 dispone que las emulsiones asfálticas para MAF deberán ser de rompimiento lento para granulometrías densas y de rompimiento medio para granulometrías abiertas, catiónicas o aniónicas según la afinidad con el agregado. Se avala la incorporación de relleno mineral activo como cemento o cal hidratada (de 1 % a 2 % por peso de agregado seco) para mejorar la resistencia temprana y reducir la susceptibilidad al daño por humedad.

Define como procedimiento de diseño de mezcla lo descrito en los manuales del Instituto del Asfalto el MS-14, Apéndice F y MS-19, Capítulo 7 (Asphalt Institute, 1997; Asphalt Institute, 2008). Establece granulometrías para mezclas densas o abiertas basadas en las granulometrías recomendadas por el MS-14 y el MS-19 (Tabla 5). También exige una serie de requisitos de calidad para los agregados para una adecuada durabilidad y resistencia al corte (Tabla 6). Es importante resaltar que aún en esta especificación no se considera el uso de materiales recuperados, como el RAP, como agregado. Por lo tanto, no existen requisitos para este tipo de materiales.

Los criterios de aceptación para el diseño de mezcla fueron obtenidos de los manuales MS-14 y MS-19 (Tabla 7). Se exige cumplir con criterios de estabilidad, resistencia al daño por humedad, recubrimiento y adherencia, drenaje (en el caso de las mezclas abiertas) y trabajabilidad. El criterio de estabilidad retenida indicado en la Tabla 7 se recomienda para capas intermedias como bases (Asphalt Institute, 1997). Para capas de ruedo, al estar expuestas directamente a la lluvia, se aplican criterios de resistencia retenida mayores al 70 %, que por las condiciones lluviosas de Costa Rica es lo más apropiado.

Tabla 5

Granulometrías del CR 2020 para MAF

Tamiz	Granulometría densa					Granulometría abierta		
	D1	D2	D3	D4	D5	A1	A2	A3
50 mm	100							
37,5 mm	90-100	100						
25 mm	-	90-100	100	-		100		
19 mm	60-80	-	90-100	100		90-100		
12,5 mm	-	60-80	-	90-100	100	-	100	
9,5 mm	-	-	60-80	-	90-100	20-55	85-100	100
4,75 mm	20-55	25-60	35-65	45-70	60-80	0-10	-	30-50
2,36 mm	10-40	15-45	20-50	25-55	35-65	0-5	-	5-15
1,18 mm	-	-	-	-	-	-	0-5	-
300 µm	6-16	3-18	3-20	5-20	6-25	-	-	-
75 µm	0-5	1-7	2-8	2-9	2-10	0-2	0-2	0-2

Nota. Tomado de MOPT (2022)

Tabla 6

Requisitos de calidad para agregados del CR 2020 para MAF

Ensayo	Especificación
Agregado grueso	
Pérdida por abrasión (AASHTO T96)	40 %, máx.
Caras fracturadas (ASTM D5821)	65 %, mín.
Índice de durabilidad (agregado grueso y fino) (AASHTO T210)	35 %, mín.
Partículas friables (AASHTO T112)	1 %, máx.

Ensayo	Especificación
Equivalente de arena (agregado fino) (AASHTO T176)	35 %, mín.

Nota. Tomado de MOPT (2022)

Tabla 7

Requisitos del CR 2020 para el diseño de mezcla de MAF

Ensayo	Especificación
Recubrimiento del agregado	85 %, mín.
Adherencia	85 %, mín.
Número de golpes por cara (mazo Marshall)	50
Estabilidad Marshall sin acondicionar (AASHTO T245 modificado)	2 224 N, mín.
Estabilidad retenida (saturación e inmersión en agua a 22,2 °C por 1 hora)	50 %, mín.

Nota. Tomado de MOPT (2022)

6.4. Ensayos para medir la respuesta mecánica del material

En el diseño de pavimentos, la estimación de la respuesta estructural de capas de mezcla en frío, ante las cargas de tráfico y las condiciones ambientales, se ha realizado a partir de ensayos de laboratorio como: módulo resiliente a tensión indirecta con las normas de ensayo AASHTO TP-31 (1996) o ASTM D7369 (2020) y el módulo dinámico con la norma de ensayo AASHTO T342 (2022). Estos ensayos se realizan a diferentes temperaturas y frecuencias de carga, sin embargo, el ensayo para el módulo dinámico provee una caracterización más completa de estas variables.

6.5. Evaluación del desempeño

Aunque la estabilidad Marshall y la resistencia a la tensión indirecta son un buen indicador de la resistencia de la mezcla asfáltica, no representa el desempeño en términos de daño por humedad, ahuellamiento, agrietamiento por fatiga, y otros. En particular, las MAF son más propensas a fallar por daño por humedad y ahuellamiento, en comparación con las MAC y las MAT (mezclas asfálticas tibias), debido al proceso de curado (Munyagi, 2006; Rezaei et al.,

2017). Las mezclas en frío han sido sujetas a la evaluación del desempeño para diferentes tipos de deterioro como (NCHRP, 2017; NCHRP, 2021):

- **Ahuellamiento/daño por humedad:** Rueda de Hamburgo (AASHTO T324), APA (AASHTO T340) y Flow Number (AASHTO T378), resistencia retenida a la tensión indirecta (AASHTO T283), entre otros.
- **Fatiga:** fisuramiento a fatiga en viga a flexo-tracción (AASHTO T321), Ideal-CT (ASTM D8225) y viga semicircular (ASTM D8044), entre otros.
- **Durabilidad:** ensayo de desprendimiento (ASTM D7196), Cántabro (AASHTO TP 108), cohesión (ASTM D3910), entre otros.

6.6. Factores que afectan el desempeño de las mezclas en frío

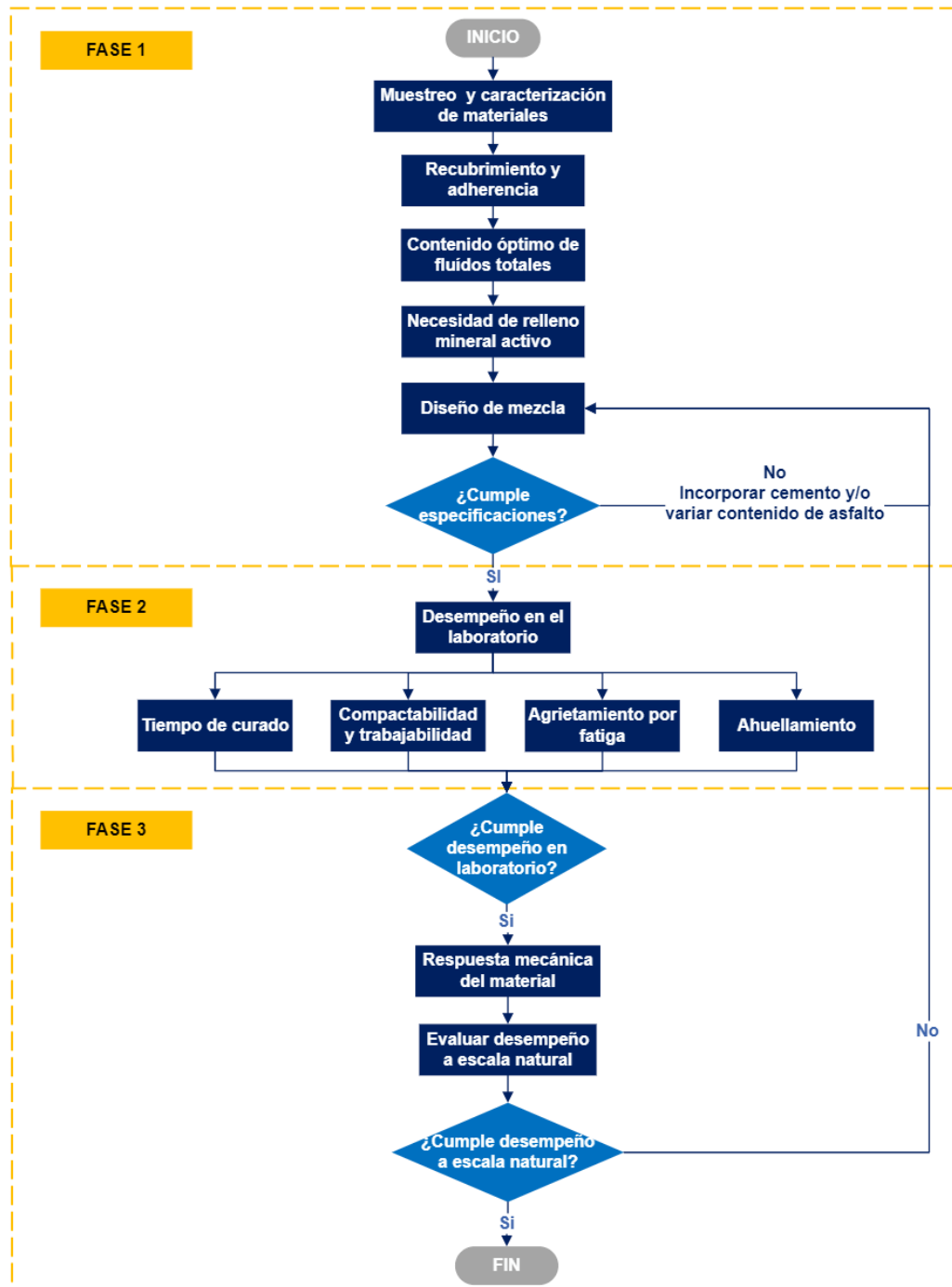
El desempeño de las mezclas en frío se ve afectado por una serie de factores como: el tipo y graduación del agregado, tipos de rellenos minerales y aditivos, uso de fibras, tipo de emulsión asfáltica, contenido de fluidos, características de compactación, contenido de vacíos, tiempo y temperatura de curado, entre otros (Jain & Singh, 2021; Deb & Singh, 2022; Dash et al., 2022).

7. METODOLOGÍA

En la Figura 1 se muestra el esquema experimental con las fases que comprenden del proyecto de investigación. A continuación, se explican detalladamente los ensayos de la Fase 1 finalizados y los ensayos de la fase II que se han realizado a la fecha y que se contemplan en el presente informe.

Figura 1

Metodología propuesta



7.1. Muestreo de materiales

Se muestrearon dos materiales de RAP de diferentes fuentes. El primero proviene del Plantel del MOPT de Colima, en Santo Domingo de Heredia, su ubicación en coordenadas geográficas es latitud $9,969933^\circ$ y longitud $-84,084262^\circ$. Por la falta de disponibilidad de equipos de procesado, el RAP no fue sometido a un proceso de disgregación, únicamente se cribó por una malla de 37,5 mm (1 1/2" in) para eliminar los sobretamaños (Figura 2). Este material durante la investigación se conocerá como "*RAP sin procesar*", esto en concordancia con NAPA (2015), que define el RAP procesado como aquel que ha sido sometido a un proceso de disgregación y cribado.

Figura 2

RAP sin procesar



Adicionalmente, se realizó un levantamiento en 3D con dron para cuantificar el volumen de RAP almacenado en el Plantel de Colima y estimar la cantidad de mezcla en frío que se podría producir para intervención de rutas.

Se utilizó RAP procesado que tenía disponible el LanammeUCR. El RAP fue sometido a un proceso de disgregación de los cúmulos del perfilado y a su vez se cribó para obtener un tamaño máximo de 19 mm (3/4 in) (Figura 3). El RAP procesado se almacena en apilamientos bajo techo en la planta. Este material durante la investigación se conocerá como “RAP procesado”.

Figura 3

RAP procesado



Por su parte, se realizaron 3 muestreos de emulsión asfáltica catiónica de rompimiento lento (CSS-1h) en el Plantel de Recope, en el Alto de Ochomogo, Cartago, su ubicación en coordenadas geográficas es latitud 9,895658° y longitud -83,941248°. También se utilizó cemento hidráulico de uso general para mejorar la estabilidad y la resistencia al daño por humedad de la mezcla. En la Tabla 8 se indica el detalle de cada muestra de material.

Tabla 8. *Muestras de materiales*

Material	Número de muestra	Fecha muestreo	Lugar de muestreo	Descripción
Perfilado (RAP)	M-1874-2022	16/11/2022	Planta del MOPT, Colima de Tibás	40 sacos con perfilado cribado
Perfilado (RAP)	M-1708-2022	23/4/2021	-	3 estañones con material de RAP procesado
Cemento	M-0085-2023	18/01/2023	-	1 saco con cemento HOLCIM UG
Emulsión asfáltica	M-1005-2023	23/06/2023	Tanque 175, Planta de emulsión de RECOPE, El Alto de Ochomogo	15 galones con emulsión asfáltica de rompimiento lento CSS-1h
Emulsión asfáltica	M-0808-2023	18/5/2023	Tanque 172, Planta de emulsión de RECOPE, El Alto de Ochomogo	12 galones con emulsión asfáltica de rompimiento lento CSS-1h
Emulsión asfáltica	M-0091-2023	19/01/2023	Tanque: 173, Planta de emulsión de RECOPE, El Alto de Ochomogo	10 galones con emulsión asfáltica de rompimiento lento CSS-1h

7.2. Caracterización de materiales

La caracterización del RAP (sin y con procesamiento) comprendió los siguientes ensayos de acuerdo con la sección 703.09 del CR 2020 y la norma AASHTO PP86:

- Granulometría (ASTM C136 / ASTM C117). La temperatura de secado a masa constante es a 40 °C para no afectar el RAP.

- Granulometría de agregado extraído (ASTM D5444).
- Contenido de asfalto por extracción (ASTM D2172).
- Contenido de agua (AASHTO T110).
- Recuperación del ligante asfáltico (ASTM D5404).
- Penetración del residuo asfáltico (ASTM D5).
- Reología del residuo asfáltico (ASTM D7175).
- Comprobación del nivel de actividad del RAP (Sabita, 2020).
- Abrasión de los Ángeles (ASTM C131).
- Gravedad específica y absorción de agregado grueso y fino (ASTM C127 / C128).
- Índice de durabilidad de agregado grueso y fino (ASTM D3744).
- Arcilla y partículas friables (AASHTO T112).
- Caras fracturadas en los agregados (ASTM D5821).
- Equivalente de arena (AASHTO T176)

Si la granulometría del RAP, sin o con extracción del asfalto, no cumplía con los criterios granulométricos y los requisitos de calidad de la sección 703.09 del CR 2020 se procedería a muestrear un agregado de corrección.

La caracterización de la emulsión CSS-1h comprendió los siguientes ensayos indicados por el Reglamento Técnico Centroamericano RTCA 75.01.22 (2004):

- Viscosidad Saybolt Furol a 25 °C (ASTM D7496).
- Estabilidad al almacenamiento, 24 h (ASTM D6930).
- Prueba de carga eléctrica de partículas (ASTM D7402).
- Prueba de malla N° 20 (ASTM D6933).
- Residuo asfáltico y aceite destilado (ASTM D6997).
- Penetración, 25°C, 100 g, 5 s (ASTM D5).
- Ductilidad, 25°C, 5 cm/min (ASTM D113).
- Solubilidad en tricloroetileno (ASTM D2042).
- Tamaño y distribución de partículas por difracción láser.

7.3. Diseño de mezcla

El diseño comprendió dos mezclas asfálticas en frío: una con RAP sin procesar y otra con RAP procesado. El diseño de mezcla se basó en los procedimientos y especificaciones de las guías y normas de ensayo MS-14, MS-19, AASHTO PP86 y AASHTO MP33.

El RAP seco al aire se separó por fracciones para conformar los baches y garantizar la uniformidad de la granulometría original, según la granulometría, de la siguiente manera:

- Pasando el tamiz de 25,0 mm, retenido en el tamiz de 19,0 mm
- Pasando el tamiz de 19,0 mm, retenido en el tamiz de 12,5 mm
- Pasando el tamiz de 12,5 mm, retenido en el tamiz de 9,5 mm
- Pasando el tamiz de 9,5 mm, retenido en el tamiz de 4,75 mm
- Pasando el tamiz de 4,75 mm

El material retenido en el tamiz más grueso de las fracciones se sustituyó con material pasando este tamiz. Para RAP procesado, por su granulometría, se manejaron las fracciones a partir del material pasando el tamiz de 19,0 mm.

Previo a iniciar con los ensayos, mediante la Ecuación 1 se calculó el contenido inicial de emulsión asfáltica para tomarlo como referencia para los ensayos de diseño. La Ecuación 1 es aplicable para superficies de rudo y se basa en variables granulométricas (Asphalt Institute, 2008).

$$P = \frac{(0,07 \cdot B + 0,03 \cdot (100 - B)) \cdot 100}{A} \quad (1)$$

Donde, P es el porcentaje inicial de emulsión asfáltica, sobre el peso seco de agregado, A es porcentaje del residuo asfáltico de la destilación de la emulsión y B es porcentaje pasando el tamiz de 4,75 mm.

7.3.1. Recubrimiento y adherencia

Se realizaron ensayos de recubrimiento y adherencia para evaluar la capacidad de recubrimiento y compatibilidad de la emulsión asfáltica con el agregado. Se prepararon baches de 1000 g los cuales se mezclaron utilizando el contenido inicial de emulsión y variando el contenido de agua. El mezclado se realizó a mano por 60 s máximo o hasta que se viera homogénea la mezcla. A su vez, las mezclas se curaron a 40 °C por 24 horas y luego se inspeccionaron visualmente para estimar el porcentaje de recubrimiento. De acuerdo con los porcentajes de recubrimiento obtenidos para cada contenido de agua, se calculó el contenido de agua de premezclado con el cual se obtiene un recubrimiento mínimo de 85 % recomendado para superficies de ruedo. Después de medir el recubrimiento, se tomó 100 g de la mezcla y se sometió a 3 minutos de inmersión en agua hirviendo a 100 °C aproximadamente. Se retiró el agua, se colocó la mezcla en papel absorbente y se dejó secar. Posteriormente se inspeccionó visualmente el porcentaje de recubrimiento remanente para medir el desnudamiento debido al daño por humedad.

7.3.2. Proceso de fabricación, curado y volumetría de especímenes de ensayo

En la fabricación de los especímenes de ensayo compactados para los diferentes ensayos, el mezclado se hizo de forma manual, mezclando primero el agregado con el cemento, de requerirse, seguidamente el agua, y por último la emulsión asfáltica. El mezclado de cada componente de la mezcla se realizó por 60 s máximo o hasta que se viera homogénea la mezcla. Después del mezclado y previo a la compactación, la mezcla se sometió a un curado de 2 horas a temperatura ambiente en bandejas con tapa para simular el tiempo y las condiciones de transporte previo a la colocación y compactación en campo. El curado de precompactación permitió un mejor control sobre el exceso de fluidos durante la compactación, el cual provoca segregación y expulsión de la emulsión por exceso de presión de poro. La compactación se llevó a cabo mediante el compactador giratorio Superpave en la modalidad por giros o por altura dependiendo del ensayo; se aplicó una presión vertical de 600 kPa y un ángulo interno 1,16°. Posterior a la compactación, los especímenes de ensayo se curaron en horno a 40 °C por 72 horas. Terminado el proceso de curado, los especímenes de ensayo se

EIC-Lanamme-INF-1410-2023

Página 29 de 70

dejaron enfriar a temperatura ambiente. Se midió la masa y las dimensiones de los especímenes de ensayo para calcular la densidad bruta seca. También, se determinó la gravedad específica según la norma de ensayo AASHTO T 166. En la Figura 4 se muestra el proceso de fabricación y volumetría de los especímenes de ensayo.

Para determinar el contenido de vacíos de los especímenes compactados, se realizó la gravedad máxima teórica, según la norma de ensayo AASHTO T 209, en la mezcla suelta curada previamente (en las mismas condiciones que los especímenes compactados).

Figura 4

Proceso de fabricación y volumetría de especímenes de ensayo



7.3.3. Contenido de óptimo de fluidos totales

Se realizaron ensayos de densidad-humedad con el compactador giratorio Superpave de acuerdo con las características de tamaño de espécimen, tipo de compactación y curado indicadas en la Tabla 9. El contenido de emulsión inicial se mantuvo constante mientras se variaba el contenido de humedad. Se fabricaron 3 especímenes de ensayo por cada contenido de agua. Se determinó el contenido óptimo de fluidos totales con el cual se obtiene la máxima densidad seca. Para establecer los contenidos de agua, se evaluó visualmente que la mezcla no estuviera con exceso o falta de fluidos. Al trabajar con RAP, el contenido óptimo de fluidos totales puede ser difícil de identificar por la deficiencia de finos en la graduación. En estos casos se ha usado un rango de contenidos de humedad de mezclado entre 1,5 % y 4,5 % por peso de agregado.

Tabla 9

Características de compactación, curado y acondicionamiento de especímenes de ensayo

Ensayo	Tamaño espécimen	Tipo de compactación	Curado	Acondicionamiento	Cantidad de especímenes
Relación densidad-humedad	150 mm de diámetro y 95 ± 5 mm de altura	Giratoria, 30 giros, 600 kPa presión vertical, 1,16° de ángulo interno	Precompactación: 2 horas a temperatura ambiente, en bandejas con tapa. Poscompactación: 72 h a 40 ± 1 °C	-	3
Resistencia a tensión indirecta (AASHTO T283 mod.)	150 mm de diámetro y 95 ± 5 mm de altura			Saturación entre 55 % y 75 % con vacío entre 13 kPa a 67 kPa de presión absoluta, más inmersión en agua a 25 ± 1 °C por 24 ± 1 h	6
Rueda de Hamburgo (AASHTO T324)	150 mm de diámetro y 62 mm ± 2			45 min. a temperatura de ensayo	4

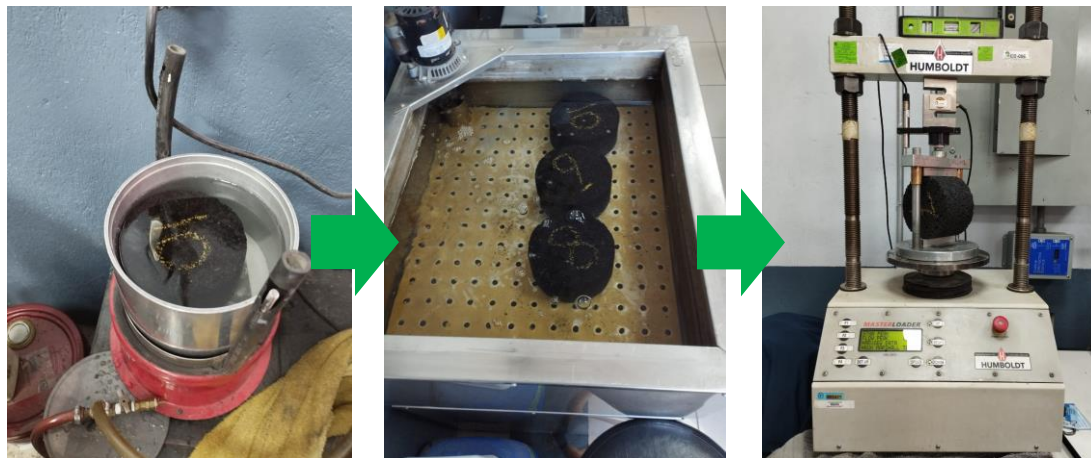
Ensayo	Tamaño espécimen	Tipo de compactación	Curado	Acondicionamiento	Cantidad de especímenes
	mm de altura				
Desprendimiento (ASTM D7196)	150 mm de diámetro y 70 mm $\pm$ 5 mm de altura		Precompactación: 2 horas a temperatura ambiente, en bandejas con tapa. Poscompactación: 2 h y 4 h a temperatura ambiente	-	4
Gravedad máxima teórica (AASHTO T209)	2500 g, mezcla suelta	-	72 h a 40 $\pm$ 1 °C	-	2

7.3.4. Evaluación de la necesidad de relleno mineral activo

Con la finalidad de evaluar la necesidad de incorporar relleno mineral activo para mejorar la resistencia y la susceptibilidad al daño por humedad, se efectuaron ensayos de resistencia a la tensión indirecta sin y con uno por ciento de cemento hidráulico. Se elaboraron 6 especímenes de ensayo para cada tratamiento. La mitad de los especímenes se acondicionaron aplicando un vacío entre 130 mbar a 670 mbar de presión absoluta hasta llegar a un porcentaje de saturación entre 55 % y 75 %. Una vez saturados los especímenes, se sumergieron en un baño maría con agua a 25 °C $\pm$ 1 °C por 24 h $\pm$ 1 h. La falla de los especímenes sin y con acondicionamiento se realizó de acuerdo con la norma de ensayo AASHTO T 283 (modificada). Posterior a la falla, los especímenes se secaron en horno a 110 °C $\pm$ 5 °C para determinar la masa final seca y corregir el peso seco de la volumetría. Las características de compactación, curado y acondicionamiento de los especímenes de ensayo se resumen en la Tabla 9. En la Figura 5 se muestra el proceso de saturación y falla de los especímenes.

Figura 5

Saturación y falla a tensión indirecta



7.3.5. Contenido óptimo de asfalto residual

Para determinar el contenido óptimo de asfalto residual se realizaron inicialmente los siguientes ensayos:

- Resistencia a la tensión indirecta (AASHTO T283 modificado)
- Rueda de Hamburgo (AASHTO T324)
- Desprendimiento (raveling test) (ASTM D7196)

Las mezclas se prepararon en incrementos de 1 % de asfalto residual, con un incremento para arriba y dos para abajo con respecto al contenido inicial de asfalto residual calculado con la Ecuación 1. Las características de compactación, curado y acondicionamiento de los especímenes de ensayo se resumen en la Tabla 9.

Para los ensayos de resistencia a la tensión indirecta se elaboraron 6 especímenes de ensayo para cada contenido de asfalto residual. La mitad de los especímenes se acondicionaron aplicando un vacío entre 130 mbar a 670 mbar de presión absoluta hasta llegar a un porcentaje de saturación entre 55 % y 75 %. Seguidamente, se sumergieron en un baño maría con agua a $25\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ por $24\text{ h} \pm 1\text{ h}$. La falla de los especímenes sin y con acondicionamiento se realizó

según con la norma de ensayo AASHTO T 283 (modificada). Después de la falla, los especímenes se secaron en horno a $110\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ para determinar la masa final seca y corregir el peso seco de la volumetría.

El ensayo de Rueda de Hamburgo se realizó a una temperatura de $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Figura 6). La temperatura de $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ se seleccionó dado que a esta temperatura se acondicionan los especímenes de resistencia a la tensión indirecta. Para evaluar una condición más crítica de temperatura-humedad, en la cual ocurriera el ablandamiento del asfalto y se favoreciera el daño por humedad, se realizaron ensayos a $40\text{ }^{\circ}\text{C}$. Los especímenes se compactaron por altura tomando como referencia la densidad bruta seca obtenida en los ensayos de resistencia a la tensión indirecta para cada contenido de asfalto residual, los cuales se compactaron con una baja energía de compactación, aplicando 30 giros, tratando de simular las condiciones de compactación de un proceso de bacheo donde podría no estar disponible un equipo adecuado para compactar. El ensayo se ejecutó hasta alcanzar las 20 000 pasadas o los 20 mm de deformación, lo primero que ocurriera.

Figura 6

Ensayos rueda de Hamburgo y desprendimiento



El ensayo de desprendimiento se realizó a temperatura ambiente a 2 y 4 horas de curado (Figura 6). Los especímenes se compactaron por altura tomando como referencia la densidad bruta seca obtenida en los ensayos de resistencia a la tensión indirecta para cada contenido de asfalto residual.

El contenido óptimo de asfalto residual es aquel que cumple con los criterios en las Tabla 2 y 3, con respecto al recubrimiento, los parámetros del ensayo de resistencia a tensión indirecta y desprendimiento. En el caso de la Rueda de Hamburgo, el requisito de deformación permanente y daño por humedad se estableció en 6 mm sin presentar punto de inflexión por desnudamiento antes de los 20 000 ciclos de acuerdo con la Tabla 402-04 del CR-2020.

7.4. Bacheo de prueba en Ciudad de la Investigación UCR

Se fabricó mezcla en frío con emulsión de rompimiento lento y el RAP sin procesar para bachear tres huecos ubicados en la Ciudad de la Investigación, sede Rodrigo Facio, San Pedro de Montes de Oca. Los huecos tenían un diámetro de 50 cm y una profundidad de 10 cm aproximadamente. Las actividades de bacheo se llevaron a cabo el 27 de junio del 2023. Se aplicó una dosificación de 7,7 % de emulsión asfáltica (contenido inicial de emulsión asfáltica determinado con los parámetros granulométricos) y 1,0 % de cemento. El mezclado se llevó a cabo en una batidora de concreto con una capacidad de 1 saco de cemento. Para el mezclado, primero se pesaron los componentes de la mezcla, seguidamente, se introdujo a la batidora el RAP, luego el cemento, después el agua, y por último la emulsión. La mezcla se mezcló hasta que se viera homogénea. La mezcla preparada se almacenó en cubetas con tapa para su traslado al sitio del bacheo. En Figura 7 se muestra el proceso de elaboración de la mezcla en frío en batidora.

Figura 7

Elaboración de mezcla en frío para bacheo



Se implementó el siguiente procedimiento de bacheo de emergencia (Asphalt Institute, 2009; MOPT, 2015; PITRA, 2015):

1. Se removió y limpió cualquier resto de agua, residuos o material suelto que contuviera el bache.
2. Se aplicó un riego de liga con emulsión de rompimiento rápido a 60°C en toda el área, tanto en las paredes como en el fondo del bache.
3. Se esperó a que la emulsión del riego de liga rompiera, y posteriormente, se colocó la mezcla asfáltica en frío, y se compactó con plancha vibratoria mediante un patrón de compactación de afuera hacia adentro del bache hasta dejar a ras del nivel de la superficie circundante.
4. Se colocó material de secado para ayudar al curado y evitar el desprendimiento de la mezcla por el paso de las llantas. Se permitió que la mezcla recién compactada curara por al menos 2 horas antes de abrir al tránsito. En la Figura 8 se muestra el procedimiento bacheo.

Figura 8

Procedimiento de bacheo de emergencia



Los bacheos se realizaron las siguientes ubicaciones:

- Frente al LanammeUCR. Coordenadas: latitud: 9,935223°, longitud: -84,045596°
- Frente al CIL. Coordenadas: latitud: 9,938079°, longitud: -84,041683°
- Frente edificio de Ciencias Sociales: latitud: 9,938118°, longitud: -84,042180°

En la composición vehicular de esta zona predominan buses y automóviles livianos. Los buses en particular, dependiendo de la hora en el día, pasan a su máxima capacidad de pasajeros.

8. RESULTADOS Y ANÁLISIS

8.1. Levantamiento 3D con dron de apilamientos

El levantamiento 3D con dron permitió estimar el volumen del perfilado almacenado en el Plantel del MOPT de Colima de Santa Domingo de Heredia. Como se puede observar en la Tabla 10, el volumen total estimado es de 39 509 m³. Si se supone un valor de \$ 20 por cada metro cúbico de agregado, el perfilado almacenado representa un ahorro en material pétreo de \$ 790 180 aproximadamente. Por otra parte, se podrían construir casi 110 km de un carril de 3,6 m de ancho con un espesor de superficie de rueda de mezcla asfáltica en frío de 10 cm para mejorar el estado de serviciabilidad de rutas de lastre. En la Figura 9, se muestran imágenes tomadas con el dron.

Tabla 10

Volumen estimado de apilamientos de perfilado

Apilamiento	Volumen (m ³)	Peso (ton)	Valor (\$)	Km de carril
1	6 578	13 156	131 560	18,3
2	24 312	48 624	486 240	67,3
3	8 619	17 238	172 380	23,9
Total	39 509	79 018	790 180	109,5

Nota. Tomado de LanammeUCR (2022a)

Figura 9

Estimación de volumen de apilamientos de perfilado



Nota. Tomado de LanammeUCR (2022a)

8.2. Caracterización de materiales

8.2.1. RAP

De acuerdo con los resultados mostrados en la Tabla 11, los materiales de perfilado analizados cumplen con los requerimientos para mezclas en frío de la sección 703.09 del CR 2020. Es esperable que el RAP, que es un producto de la pulverización de una carpeta asfáltica que fue construida a partir de una mezcla asfáltica con agregados de calidad, cumpla con parámetros como equivalente de arena, caras fracturadas, grumos de arcilla y partículas friables. Por otra parte, el RAP contiene aglomerados de asfalto con partículas de agregado que podrían disgregarse ante ensayos como la pérdida por abrasión y durabilidad, dando la aparente impresión de un desgaste del agregado, pero aún con esa limitante el RAP cumplió con los requisitos de estos ensayos. A pesar de que las especificaciones de la sección 703.09 del CR 2020 son para agregados convencionales, los resultados demuestran que el pavimento asfáltico recuperado de las fuentes analizadas puede ser un material competente para su uso en la construcción de carreteras.

Las gravedades específicas de ambas fuentes de RAP son similares (Tabla 11), sin embargo, el RAP procesado presentó mayor porcentaje de absorción. El proceso de disgregación podría remover parte del recubrimiento asfáltico que tiene el RAP aumentando así la absorción. A pesar de esto, ambas fuentes de RAP tienen porcentajes de absorción bajos si se comparan con agregados convencionales que carecen de una cobertura asfáltica que selle los poros permeables. Una menor absorción también implica mayor asfalto efectivo, por lo tanto, las mezclas en frío con RAP podrían requerir menos asfalto para cumplir con los criterios de diseño y ser más económicas.

Tabla 11

Caracterización del RAP

Ensayo	Norma	RAP (procesado) M-1708-22	RAP (sin procesar) M-1874-22	Especificación sección 703.09 CR 2020
Pérdida por abrasión (%)	AASHTO T96	24,0	24,0	40 máx.
Caras fracturadas (%)	ASTM D5821	100,0	100,0	65 mín.
Grumos de arcilla y partículas friables (%)	AASHTO T112	0,7	1,0	1 máx.
Equivalente de arena (%)	AASHTO T176	91,0	87,0	35 mín.
Índice de durabilidad (%)				
-Agregado grueso	AASHTO T210	76,0	87,0	35 mín.
-Agregado fino		69,0	66,0	
Gravedad específica bruta seca				
-Agregado grueso	AASHTO T85	2,42	2,44	-
-Agregado fino	AASHTO T 84	2,26	2,27	
-Agregado combinado		2,33	2,37	
Absorción				
-Agregado grueso	AASHTO T85	2,6	1,5	-
-Agregado fino	AASHTO T 84	3,8	1,9	
-Agregado combinado		3,2	1,6	

Nota. Tomado de LanammeUCR (2022b; 2022c)

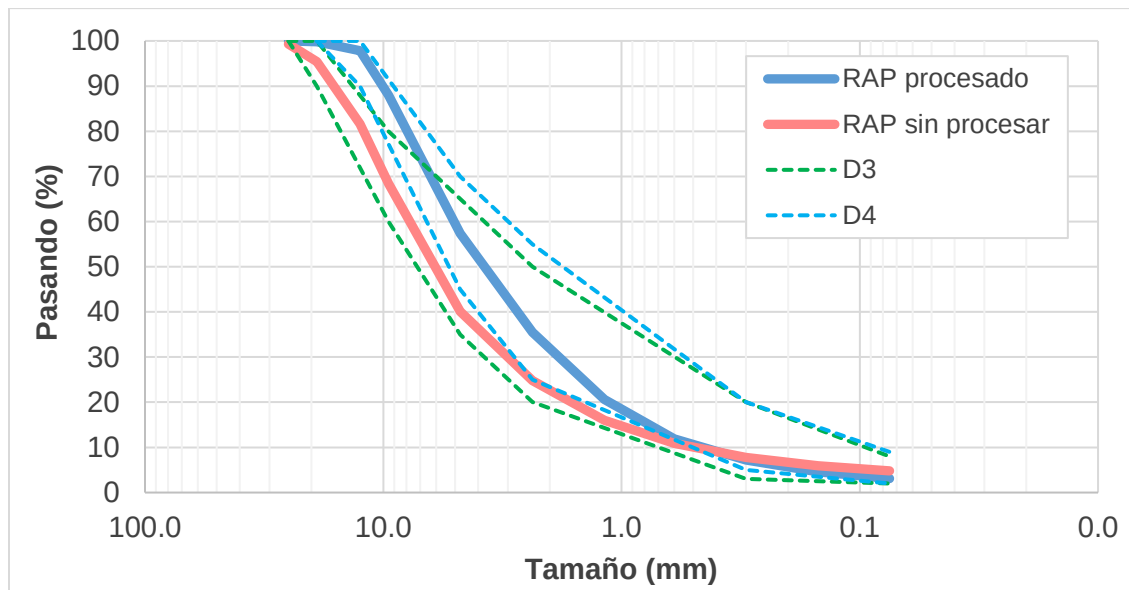
Según la Figura 10, la granulometría del perfilado procesado y sin procesar cumplen con las graduaciones densas D3 y D4 de la sección 703.09 del CR 2020, respectivamente. Por otra parte, de acuerdo con la Figura 11, la granulometría con la extracción del asfalto del perfilado procesado y sin procesar cumple con las graduaciones densas D4 y D5 de la sección 703.09 del CR 2020, respectivamente. Al extraer el asfalto, la graduación del agregado recuperado tiende a ser más fina. Sin bien el material de RAP está dentro de las especificaciones granulométricas, las graduaciones tienden hacia lado grueso de las bandas, lo cual implica la posible necesidad de incorporar un agregado de aporte para centrar las granulometrías. El RAP generalmente presenta deficiencias de tamaños debido al proceso de perfilado y puede requerir de un material de aporte como agregado triturado o polvo de piedra para mejorar la curva granulométrica.

EIC-Lanamme-INF-1410-2023

Página 40 de 70

Figura 10

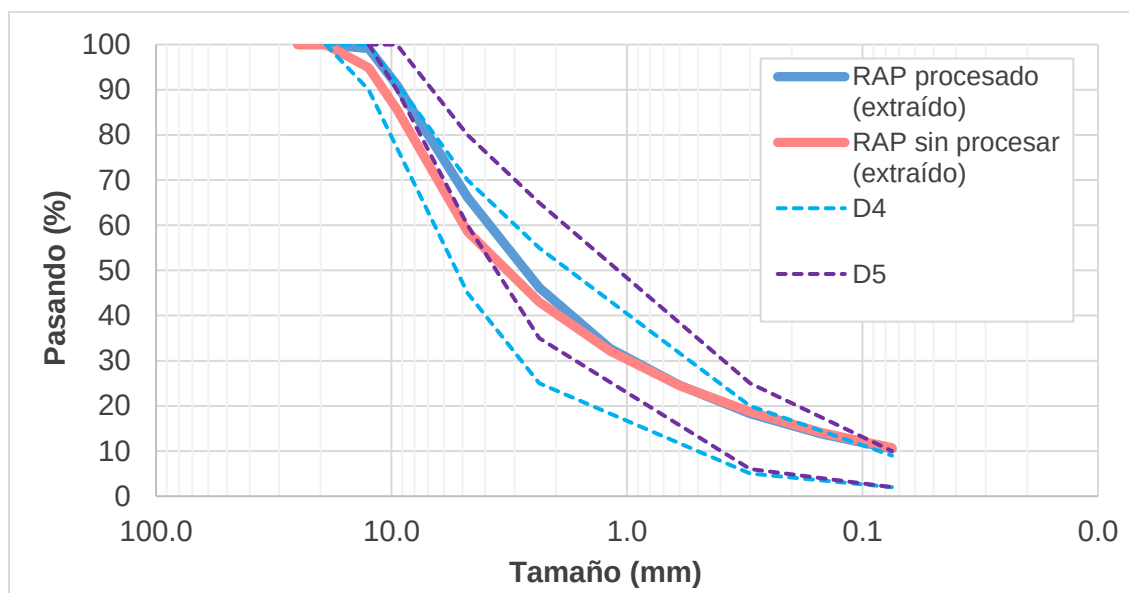
Granulometría de ambas fuentes de RAP



Nota. Elaboración propia a partir de LanammeUCR (2022b; 2022c)

Figura 11

Granulometría de ambas fuentes de RAP extrayendo el asfalto



Nota. Elaboración propia a partir de LanammeUCR (2023d; 2023e)

A la hora de usar el RAP como agregado para producir mezclas asfálticas en frío, es importante conocer si el asfalto en el RAP está activo o inactivo. Se dice que el asfalto está activo si aporta cohesión entre partículas como en las mezclas asfálticas o inactivo si tiene propiedades granulares como los agregados. Por lo tanto, la actividad del asfalto afectará las propiedades finales de las mezclas en frío que se produzcan. La actividad del asfalto en el RAP se relaciona directamente con el grado de oxidación del asfalto, entre más oxidado esté, habrá menos cohesión entre las partículas. En la Tabla 12, se muestran los resultados de los ensayos para evaluar la actividad del asfalto en el RAP. De acuerdo con las especificaciones de Wirtgen (2012), el asfalto, de ambas fuentes de RAP, se clasifica como inactivo. Los resultados de penetración y la temperatura superior determinada con el reómetro de corte dinámico indican que el asfalto, a elevadas temperaturas de servicio, presenta una rigidez alta, lo cual implica menor susceptibilidad al ahuellamiento. Sin embargo, esto también significa propensión al agrietamiento por fatiga y debe ser considerado en la evaluación del desempeño.

Tabla 12*Actividad del asfalto en el RAP*

Ensayo	Norma	RAP (procesado) M-1708-22	RAP (sin procesar) M-1874-22	Especificación Wirtgen 2012
Contenido de asfalto (%)	AASHTO T164	4,3	4,9	5 máx.
Resistencia a tensión indirecta (kPa)	AASHTO T283 (modificado)	14	62	100 máx.
Penetración (asfalto residual) (mm)	ASTM D5	5,1	5,0	10 máx.
Temperatura superior calculada (°C)	AASHTO T315	102,6	97,7	-
Temperatura superior normalizada (°C)	AASHTO T315	82	82	-

Nota. Tomado de LanammeUCR (2023d; 2023e; 2023f) (2023g)

8.2.2. Emulsión asfáltica

Para realizar los ensayos de diseño se han requerido varios muestreos de emulsión de rompimiento lento (CSS-1h) en la planta de RECOPE del Alto de Ochomogo. En la Tabla 13, se

aprecian los resultados de la caracterización de las emulsiones. La viscosidad Saybolt Furol en promedio no cumple con la especificación, no obstante, al estar cercana al límite inferior, la baja viscosidad ayuda al trabajabilidad y recubrimiento de la emulsión con los agregados. La estabilidad a 24 horas promedio esta próxima al máximo permitido, lo cual involucra tiempos de almacenamiento en campo no muy extensos y homogenización de la emulsión con mayor frecuencia. Este resultado concuerda con el tamaño de partícula promedio observado, ya que tamaños de partícula grandes se asocian con mayor inestabilidad al almacenamiento

Tabla 13*Caracterización de la emulsión de rompimiento lento*

Ensayo	Norma	Muestra de emulsión				Especificación sección 702.03 CR 2020*
		0091-23	0808-23	1005-23	Promedio	
Emulsión						
Viscosidad Saybolt Furol a 25 °C (sSF)	INTE C451	18,3	17,5	21,4	19,1	20 -100
Estabilidad al almacenamiento 24 h (%)	INTE C445	1,2	0,6	0,5	0,8	1,0 máx.
Retenido en malla 20 (%)	INTE C446	0,0129	0,0097	0,0044	0,009	0,10 máx.
Asfalto residual por destilación (%)	INTE C449	59,6	59,4	60,2	59,7	57 mín.
Residuo asfáltico						
Ductilidad a 25 °C (cm)	INTE C341	60,7	-	54,6	57,7	40 mín.
Penetración a 25 °C (1/10 cm)	INTE C339	52,4	59,7	56,6	56,2	40 - 90
Solubilidad en tricloroetileno (%)	INTE C329	99,6	99,2	99,1	99,3	97,5 mín.
Tamaño de partícula promedio (µm)	-	7,233	5,282	7,233	6,583	-
Span (µm)	-	2,130	2,675	2,130	2,312	-

Nota. Tomado de LanammeUCR (2023h; 2023i; 2023j)

8.3. Recubrimiento y adherencia

Las características de recubrimiento y adherencia que presenta la emulsión de rompimiento lento con ambas fuentes de RAP se detallan en la Tabla 14. Para alcanzar el 85 % de recubrimiento, recomendado para superficies de ruedo, se requiere incorporar agua hasta un 3,7 % para el RAP procesado y 3,1 % para el RAP sin procesar. Las dos muestras de RAP mostraron un recubrimiento remanente del 80 % después del ensayo de adherencia o desnudamiento. Esto denota un comportamiento favorable ante el daño por humedad, que se podría deber a la cobertura de asfalto que tiene el RAP originalmente, más la capa de asfalto que provee la emulsión asfáltica en la mezcla. En la Figura 12, se observan fotografías de las muestras del ensayo de recubrimiento y adherencia. Un adecuado recubrimiento y compatibilidad del asfalto residual de la emulsión con el agregado ayuda a generar mayor adhesión agregado-asfalto y cohesión entre las partículas de la mezcla. Bajo estas condiciones, la mezcla en frío presenta una mayor resistencia al daño por humedad.

Tabla 14

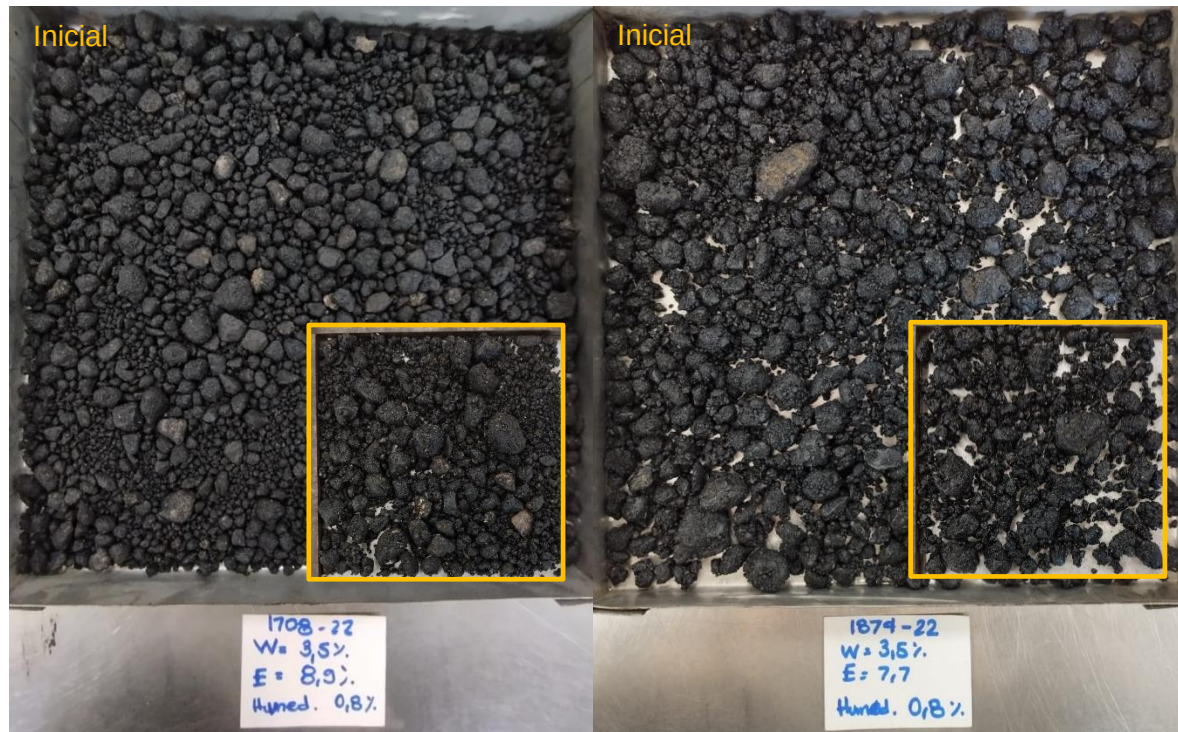
Recubrimiento y adherencia

Muestra	Contenido de asfalto residual	Contenido de emulsión	Contenido de agua	Recubrimiento inicial (mezclado)	Recubrimiento final (adherencia)
	%	%	%	%	%
RAP procesado (M-1708-22)	5,3	8,9	2,5	70	64
	5,3	8,9	3,5	84	78
	5,3	8,9	4,5	94	89
	5,3	8,9	3,7	85	80
RAP sin procesar (M-1874-22)	4,6	7,7	1,5	61	58
	4,6	7,7	2,5	77	71
	4,6	7,7	3,5	89	84
	4,6	7,7	3,1	85	80

Nota. Tomado de LanammeUCR (2023k; 2023l)

Figura 12

Recubrimiento y adherencia



Nota. Se muestran fotos de las muestras de RAP indicando el recubrimiento inicial y el recubrimiento final despues del ensayo de desnudamiento

8.4. Contenido óptimo de fluidos totales

Con una tasa fija de emulsión asfáltica, se realizaron ensayos de relación densidad-humedad con el compactador giratorio para determinar el contenido óptimo de fluidos totales con el que se alcanza la máxima densidad. En la Tabla 15, se distinguen los resultados de la densidad con respecto al contenido de fluidos totales, que corresponde a la sumatoria del agua adicionada, la humedad natural del material, el agua en la emulsión y el asfalto residual. En la Figura 13, se observa gráficamente la variación de la densidad bruta seca según el contenido de fluidos totales. Para la mezcla con RAP sin procesar, se dio un comportamiento semejante al que sucede con los materiales granulares o suelos donde la densidad aumenta conforme aumenta la humedad hasta un punto máximo donde empieza a decrecer. Se determinó que el contenido

óptimo de fluidos totales para el RAP sin procesar es 11,7 %, si no se considera el asfalto residual, esto corresponde a un contenido óptimo de agua total de 7,1 %. Por su parte, la mezcla con RAP procesado no mostró este comportamiento y se optó por seleccionar un contenido óptimo de fluidos totales en el cual la mezcla se viera bien recubierta, lubricada y sin exceso de fluidos. Se estimó que el contenido óptimo de fluidos totales para la mezcla con RAP procesado es 12,9 %; si no se considera el asfalto residual, esto corresponde a un contenido óptimo de agua total de 7,6 %. Para realizar mezclas con otros contenidos de asfalto residual se debe mantener constante el contenido óptimo de agua total determinado (Asphalt Institute, 1997). Si para realizar mezclas con otros contenidos de asfalto residual se opta por mantener constante el contenido de fluidos totales, en lugar del contenido óptimo de agua total, las mezclas podrían presentar exceso de fluidos.

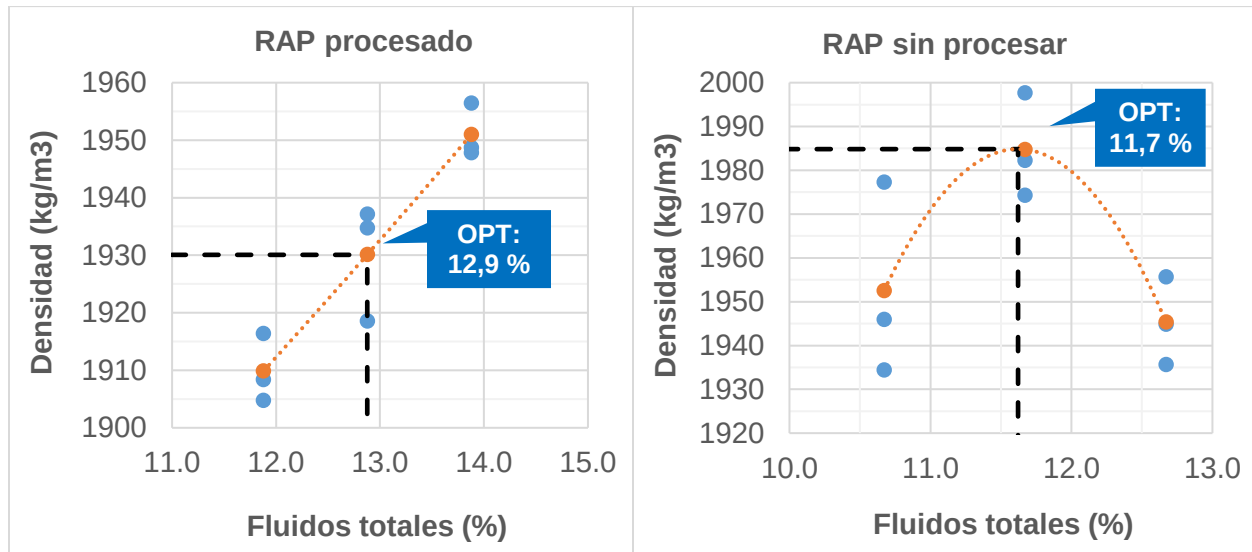
Tabla 15*Contenido óptimo de fluidos totales*

Muestra	Asfalto residual	Emulsión	Agua	Fluidos totales	Densidad
	%	%	%	%	kg/m ³
RAP	5,3	8,9	3,0	11,9	1909,9
procesado (M-1708-22)	5,3	8,9	4,0	12,9	1930,1
	5,3	8,9	5,0	13,9	1951,0
RAP	4,6	7,7	3,0	10,7	1952,6
sin procesar (M-1874-22)	4,6	7,7	4,0	11,7	1984,7
	4,6	7,7	5,0	12,7	1945,4

Nota. Tomado de LanammeUCR (2023m; 2023n)

Figura 13

Contenido óptimo de fluidos totales



Nota. OPT se refiere al contenido óptimo.

8.5. Requerimiento de relleno mineral activo

Se determinó si se requería incorporar cemento como relleno mineral activo para mejorar la adherencia y resistencia mediante ensayos de resistencia a la tensión indirecta sin y con acondicionamiento para evaluar el daño por humedad. En la Tabla 16 se indican las dosificaciones empleadas y las densidades y resistencias obtenidas. Como se observa en la Figura 14 y 15, para ambas mezclas con RAP hay una resistencia retenida mayor al 70 % en ausencia o presencia del 1 % de cemento. Este resultado concuerda con lo obtenido en los ensayos de recubrimiento y adherencia, donde la doble capa de asfalto, capa original de asfalto del RAP y asfalto provisto por la emulsión, brinda a la mezcla una protección contra el daño por humedad. No obstante, para las dos mezclas con RAP se requiere agregar cemento para cumplir con el criterio de resistencia a tensión indirecta sin acondicionamiento. La incorporación de 1 % de cemento aumentó la resistencia a la tensión indirecta sin acondicionamiento de la mezcla con RAP procesado y sin procesar hasta un 67,7 % y 52,2 %, respectivamente. A su vez, la incorporación de 1 % de cemento incrementó la resistencia a la tensión indirecta con

acondicionamiento de la mezcla con RAP procesado y sin procesar hasta un 45,2 % y 58,0 %, respectivamente.

Tabla 16

Requerimiento de relleno mineral activo

Muestra	Asfalto residual %	Emulsión %	Cemento %	Vacíos de aire kg/m ³	ITS sin acond kPa	ITS con acond kPa	TSR %
RAP procesado	5,3	8,9	0,0	16,0	194,2	175,2	90,2
M-1708-22	5,3	8,9	1,0	14,9	325,6	254,3	78,1
RAP sin procesar	4,6	7,7	0,0	14,2	210,4	192,7	91,6
M-1874-22	4,6	7,7	1,0	13,9	320,3	304,5	95,1

Nota. Tomado de LanammeUCR (2023o; 2023p). ITS es la resistencia a la tensión indirecta y TSR es la resistencia retenida a la tensión indirecta.

Figura 14

Requerimiento de relleno mineral activo para la mezcla con RAP procesado

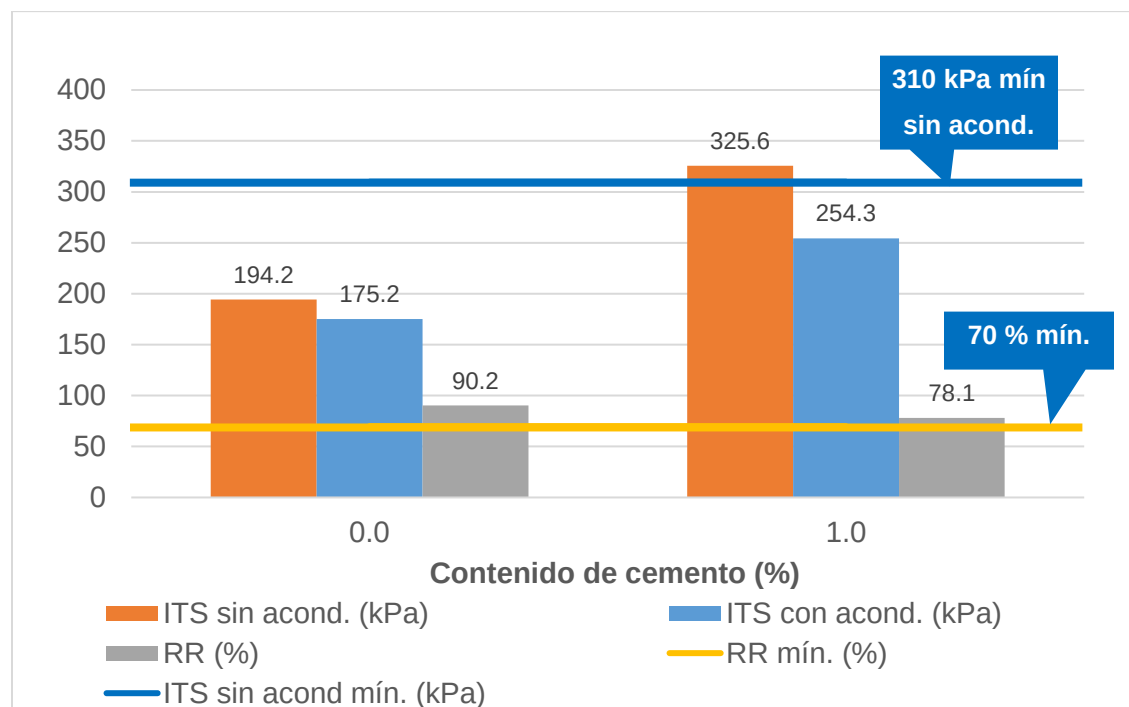
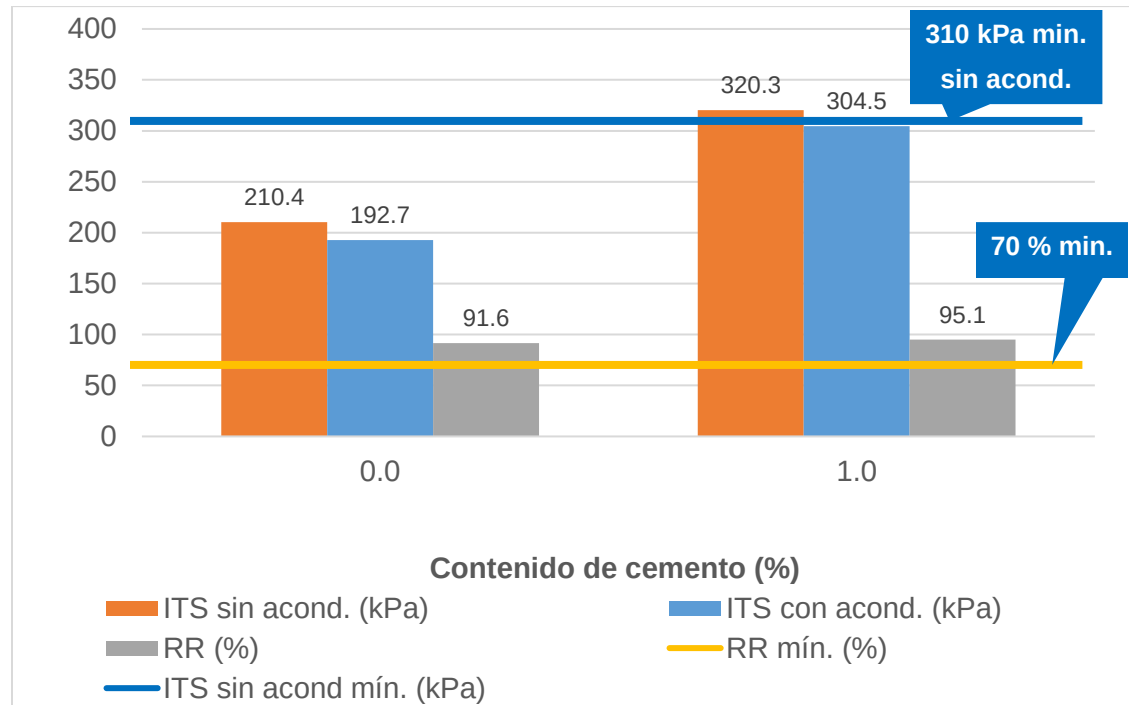


Figura 15

Requerimiento de relleno mineral activo para la mezcla con RAP sin procesar



8.6. Diseño de mezcla

8.6.1. Resistencia retenida a tensión indirecta

En la Tabla 17 se muestran los resultados de la resistencia retenida a tensión indirecta para las dos mezclas con RAP. A su vez, en las Figuras 11 y 12 se observa, de forma gráfica, el comportamiento de las variables analizadas con respecto al contenido de asfalto residual. El contenido de vacíos de aire para las mezclas en frío recién colocadas en sitio puede oscilar entre 15 % y 25 % y disminuye durante el servicio entre 10 % y 15 %, por lo tanto, los contenidos de vacíos obtenidos están dentro de lo esperable para las mezclas en frío. La mezcla con RAP procesado muestra un contenido de vacíos de aire menor al 15 % a partir 5,1 % de asfalto residual y, por su parte, la mezcla con RAP sin procesar a partir de 4,0 % de asfalto residual. El alto contenido de vacíos que se presentan ambas mezclas facilita su interconexión lo cual permite que el agua penetre fácilmente a través de la mezcla y cause un

mayor daño por humedad a través de la presión de los poros. Por esta razón, se recomienda que la mezcla en frío que se utiliza como superficie de rudo se impermeabilice a través de sello un asfáltico para dar una mayor durabilidad. La mezcla con RAP procesado tiene una granulometría más fina (Figura 5) y un porcentaje de absorción mayor (Tabla 11) que la mezcla con RAP sin procesar, lo cual implica que consumirá más asfalto para un mismo contenido de vacíos.

Tabla 17*Resultados de resistencia a la tensión indirecta*

Muestra	Asfalto residual	Emulsión	Cemento	Vacíos de aire	ITS sin acond	ITS con acond	TSR
	%	%	%	%	kPa	kPa	%
RAP procesado M-1708-22	3,3	5,5	1,0	18,9	231,4	205,7	88,9
	4,3	7,2	1,0	16,7	318,7	208,9	86,5
	5,3	8,9	1,0	14,7	325,6	254,3	78,1
	6,3	10,6	1,0	13,0	236,3	227,4	96,2
RAP sin procesar M-1874-22	2,6	4,4	1,0	18,4	296,6	255,1	86,0
	3,6	6,0	1,0	16,0	292,4	259,2	88,6
	4,6	7,7	1,0	13,6	320,3	304,5	95,1
	5,6	9,4	1,0	12,5	293,8	265,8	90,5

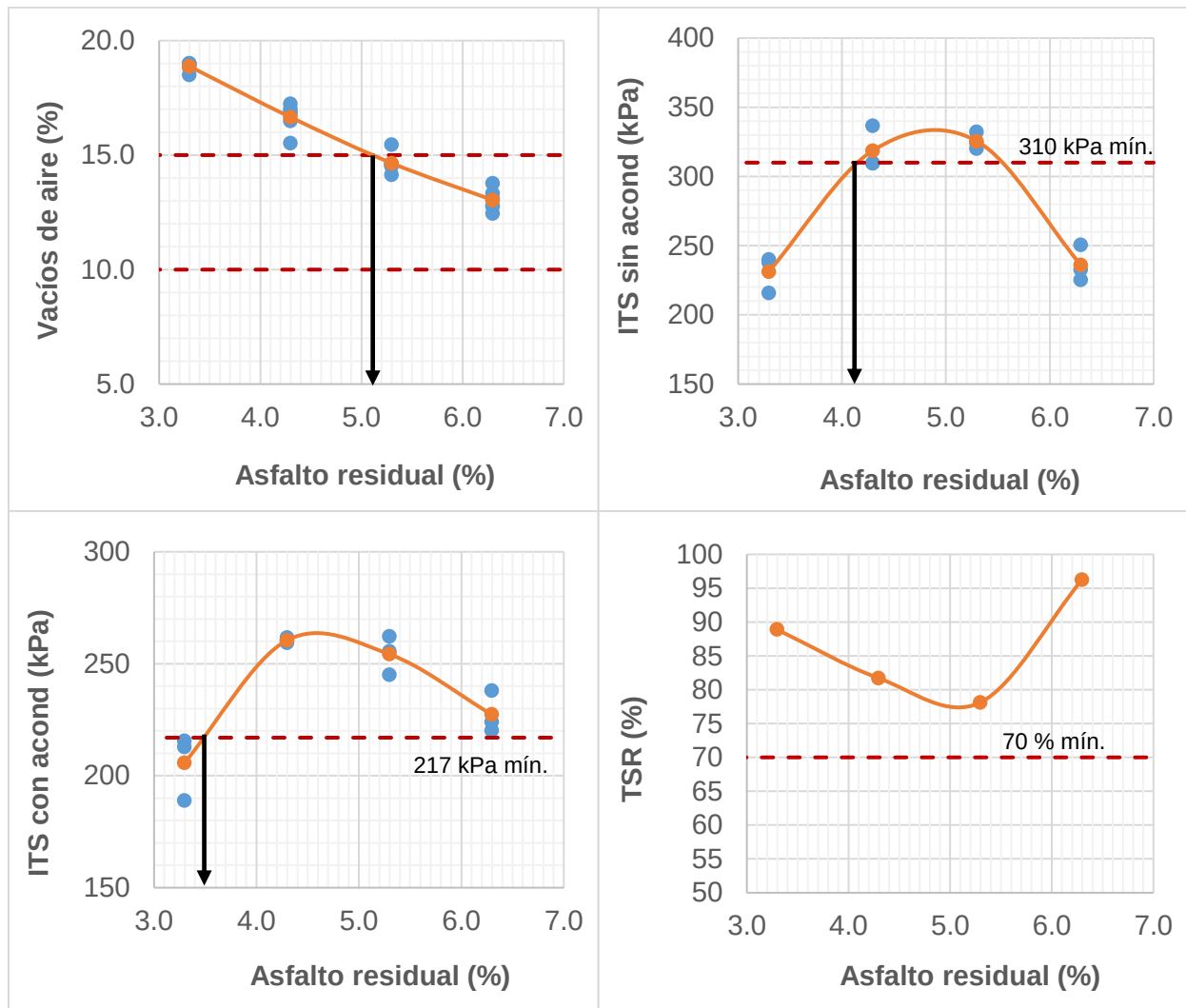
Nota. Tomado de LanammeUCR (2023q; 2023r). ITS es la resistencia a la tensión indirecta y TSR es la resistencia retenida a la tensión indirecta.

En las muestras de RAP se apreció que la resistencia a tensión indirecta sin y con acondicionamiento aumentaba a medida que incrementaba el contenido de asfalto hasta un punto máximo y después tendía a decrecer. También, se dio que las resistencias a tensión indirecta con acondicionamiento y la resistencia retenida mostraron un comportamiento favorable ante el daño por humedad, lo cual concuerda con los resultados obtenidos en las pruebas de desnudamiento. El recubrimiento de asfalto que posee el RAP por naturaleza contribuye a una mayor resistencia al daño por humedad. Ambas mezclas requieren de 4,1 % de asfalto residual para cumplir con el criterio de resistencia a la tensión indirecta sin acondicionamiento. Considerando la variabilidad de los materiales en campo y los procesos constructivos, un aumento del contenido de cemento hasta máximo 1,5 % podría aumentar la

resistencia a la tensión indirecta para tener un margen un poco más amplio para cumplir con los criterios de resistencia, sin comprometer la flexibilidad de la mezcla, ya que no se excedería la relación asfalto/cemento de 3.

Figura 16

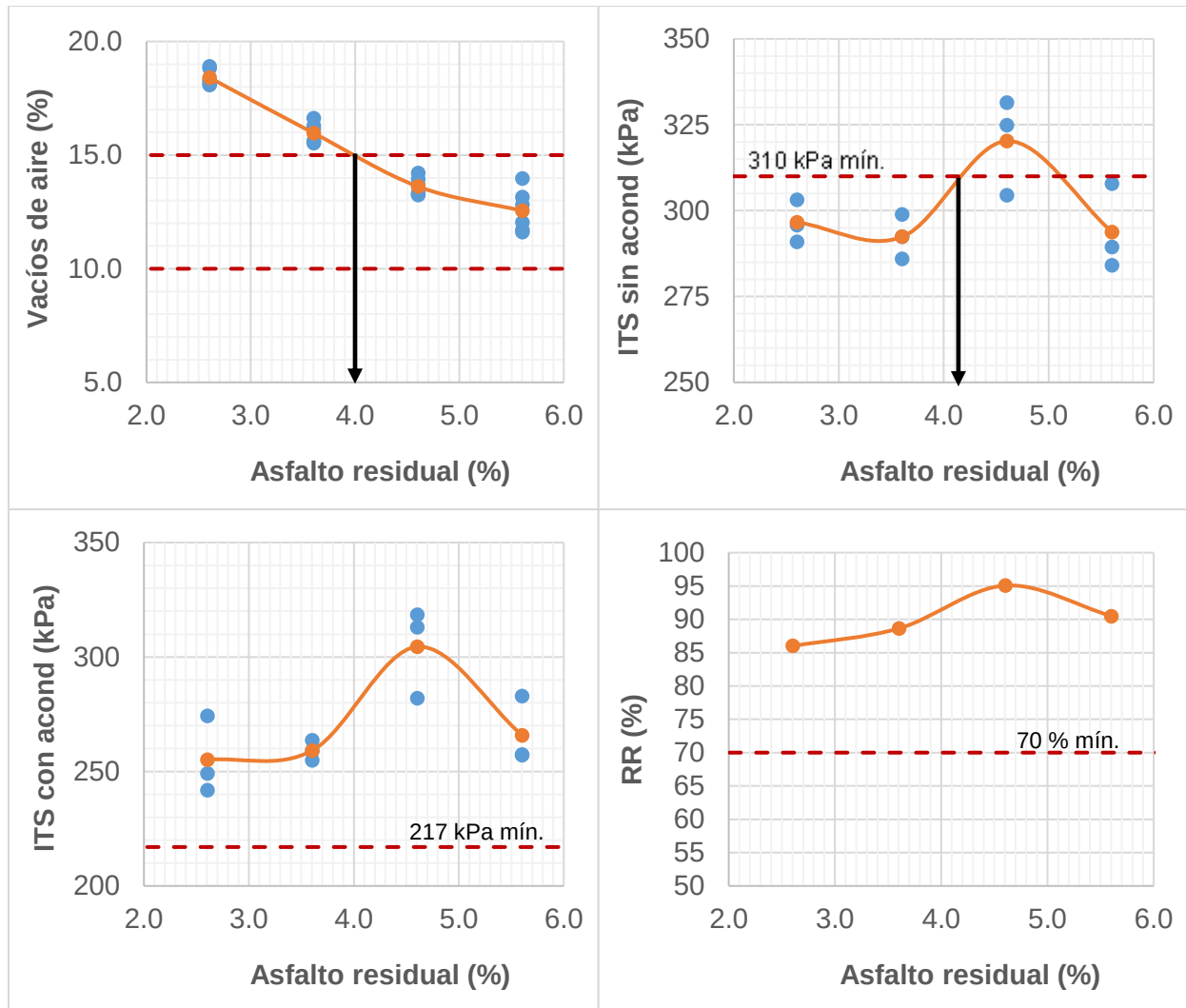
Resistencia a la tensión indirecta para la mezcla con RAP procesado



Nota. La línea color naranja corresponde al promedio de los datos; la línea punteada color negro corresponde a la desviación estándar de los datos. ITS es la resistencia a la tensión indirecta y TSR es la resistencia retenida a la tensión indirecta.

Figura 17

Resistencia a la tensión indirecta para la mezcla con RAP sin procesar



Nota. La línea color naranja corresponde al promedio de los datos; la línea punteada color negro corresponde a la desviación estándar de los datos. ITS es la resistencia a la tensión indirecta y TSR es la resistencia retenida a la tensión indirecta.

Se debe de tomar en cuenta que la energía de compactación en la fabricación de estos especímenes se definió en 30 giros (CGS), lo cual es comparativamente menor a la utilizada en especímenes de mezcla asfáltica en caliente. Para mezclas a utilizar en bacheo, esta energía es la recomendada, sin embargo, debe tomarse en cuenta que para capas de ruedo en pavimentos de medio y bajo volumen de tránsito donde los procesos constructivos pudieran utilizar equipos más tecnificados (pavimentadora y compactadoras de mayor capacidad) la energía de compactación podría ser necesario aumentarla, mejorando sus resultados y el cumplimiento con especificaciones.

Si la mezcla en frío se va a utilizar como superficie de ruedo o para bacheo, dada la exposición a la humedad, se recomienda usar un criterio de resistencia retenida del 75 %, como se aplica para mezclas asfálticas en caliente.

8.6.2. Rueda de Hamburgo

En la Tabla 18 se muestra las dosificaciones y deformaciones máximas alcanzadas en el equipo de Rueda de Hamburgo para las mezclas con RAP procesado y sin procesar. El ahuellamiento máximo alcanzado, a una temperatura de 25 °C, no fue significativo en ambas muestras de RAP (Tabla 18). De acuerdo con la Figura 18 y 19, a una temperatura de ensayo de 25 °C se da una densificación inicial del espécimen de ensayo atribuido a la fase de postcompactación, la cual podría reducirse si se utilizan energías de compactación mayores cuando la mezcla estaría siendo utilizada como capa de ruedo y luego se desarrolla la fase de creep, pero a una tasa baja de deformación, sin observarse la fase de desnudamiento. Por su parte, a una temperatura de 40 °C, en las dos muestras de RAP ocurre la fase de postcompactación, pero la fase de creep se da a una tasa de deformación más alta debido al aumento de temperatura. Se dio una deformación plástica más acelerada, similar a lo que sucede con el desnudamiento, para los contenidos de asfalto residual más altos, es decir, 6,3 % para el RAP procesado y 5,6 % para el RAP sin procesar. El exceso de asfalto provoca lubricación entre partículas, lo que disminuye su resistencia al corte. Los resultados son congruentes con los obtenidos en los ensayos de resistencia a la tensión indirecta, donde se observó una disminución de la estabilidad a altos contenidos de asfalto residual.

Tabla 18

Resultados de rueda de Hamburgo

Muestra	Asfalto residual	Emulsión	Cemento	Vacíos de aire	Ahuellamiento máximo a 25 °C	Ahuellamiento máximo a 40 °C
	%	%	%	%	mm	mm
RAP	3,3	5,5	1,0	19,4		-3,51
procesado	4,3	7,2	1,0	16,8		-4,29
M-1708-	5,3	8,9	1,0	13,9	-1,09	-6,77
22	6,3	10,6	1,0	12,6		-17,19
RAP sin	2,6	4,4	1,0	18,4		-3,13
procesar	3,6	6,0	1,0	15,9		-4,64
M-1874-	4,6	7,7	1,0	13,4	-1,10	-5,52
22	5,6	9,4	1,0	11,7		-8,00

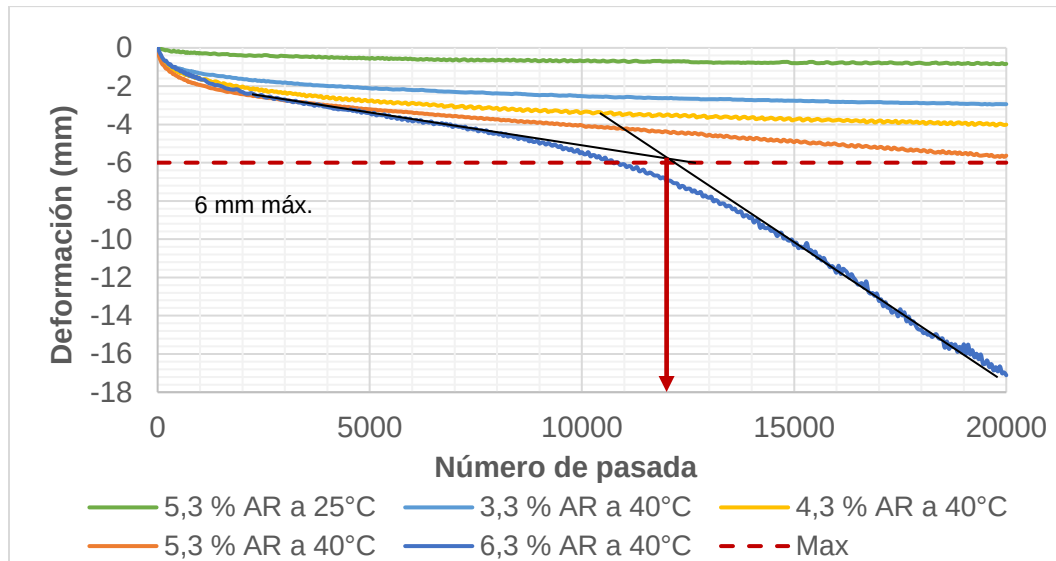
Nota. Tomado de LanammeUCR (2023s; 2023t; 2023u; Informe de ensayo EIC-Lanamme-INF-1561-2023, 2023v)

Adicionalmente, hay que considerar la menor energía de compactación que se empleó para fabricar los especímenes de ensayo con el fin de simular las condiciones normales de compactación en sitio para trabajos de bacheo. La deformación postcompactación disminuye aplicando una mayor energía durante la compactación, logrando un incremento en la densidad y estabilidad de la mezcla. Por lo tanto, el desempeño ante la deformación permanente de las mezclas en frío elaboradas con las dos fuentes de RAP aún podría ser superior a lo obtenido.

De acuerdo con las granulometrías, ambas fuentes de perfilado cumplen con los criterios granulométricos, sin embargo, las graduaciones tienden hacia lado grueso de las bandas, lo cual sugiere la posibilidad de incorporar un agregado de aporte bien triturado con una granulometría más fina que permita centrar las graduaciones. De esta forma, se obtendrá una graduación más densa que genere una reducción en el contenido de vacíos en la mezcla y aumente el contacto partícula-partícula, lo cual aumenta la resistencia al cortante y, por lo tanto, la resistencia a la deformación permanente.

Figura 18

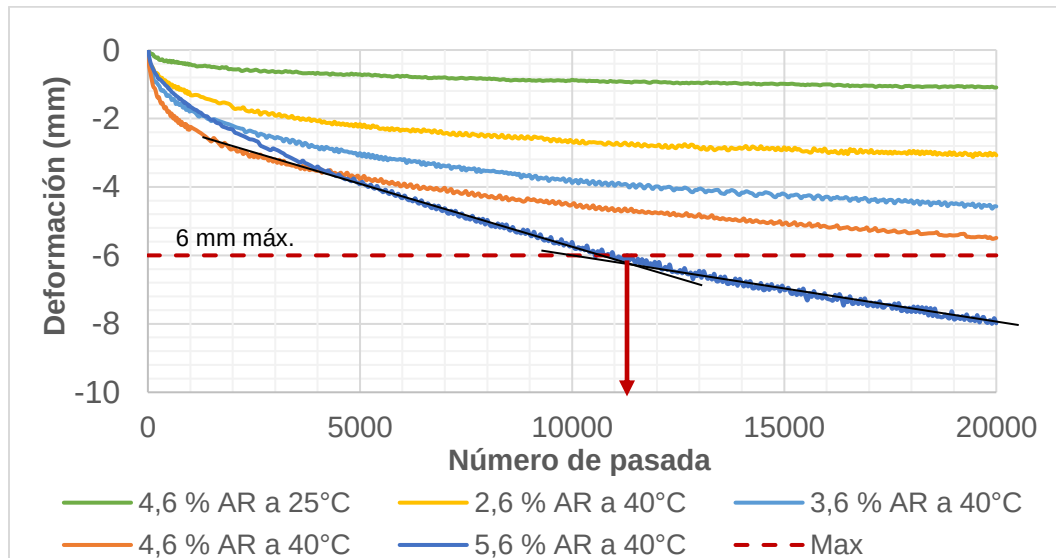
Curvas de deformación según el contenido de asfalto residual mezcla con RAP procesado



Nota. AR corresponde a la abreviatura de asfalto residual

Figura 19

Curvas de deformación según el contenido de asfalto residual para el RAP sin procesar

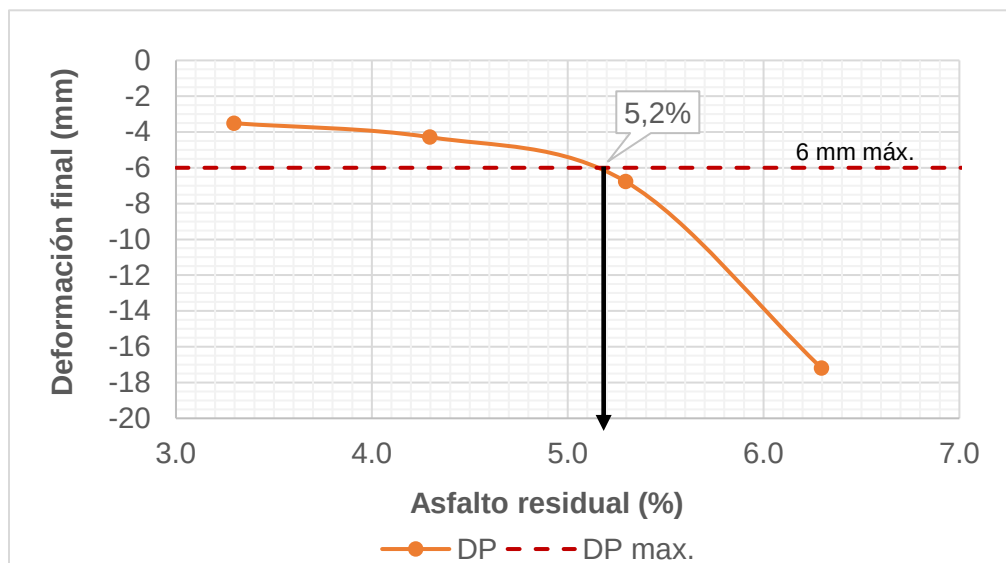


Nota. AR corresponde a la abreviatura de asfalto residual

Para mezclas asfálticas en caliente de alto desempeño, según la especificación del CR-2020, la deformación permanente y resistencia al daño por humedad en el equipo Rueda de Hamburgo debe ser menor o igual a 6 mm sin punto de inflexión antes de los 20 000 ciclos. De acuerdo con las Figuras 20 y 21, la mezcla con RAP procesado presenta, al final de los 20 000 ciclos de carga, una deformación mayor a los 6 mm a partir de contenidos de asfalto residual iguales o mayores a 5,2 %. Por su parte, las mezclas con RAP sin procesar exceden los 6 mm de deformación con contenidos de asfalto residual mayores o iguales a 4,8 %.

Figura 20

Deformación máxima con respecto al contenido de asfalto residual para el RAP procesado

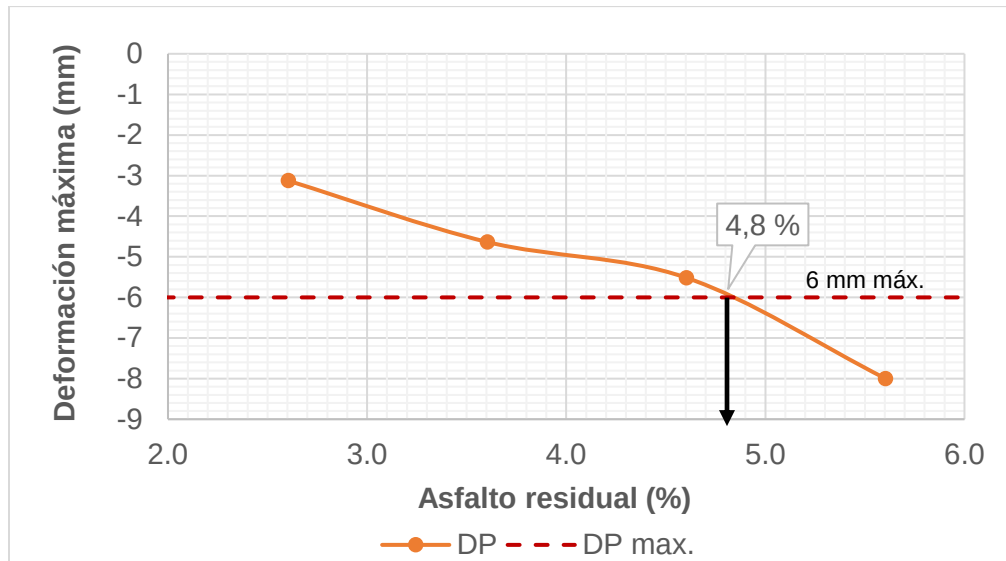


Nota. DP corresponde a la abreviatura de deformación permanente y DP máx. a la especificación

La mezcla asfáltica en frío podrá requerir más o menos asfalto residual para cumplir con los criterios de diseño dependiendo del grado de oxidación que tenga el asfalto del RAP. Sin embargo, de acuerdo con los resultados de ambas muestras de RAP, las mezclas en frío con RAP muestran susceptibilidad a la deformación permanente con contenidos de asfalto mayores al 4,5 % aproximadamente.

Figura 21

Deformación máxima con respecto al contenido de asfalto residual para el RAP sin procesar



Nota. DP corresponde a la abreviatura de deformación permanente y DP máx. a la especificación

8.6.3. Desprendimiento (raveling test)

En la Tabla 19 se muestra un resumen de las dosificaciones y resultados del ensayo de desprendimiento. Los ensayos se realizaron a temperatura y humedad relativa ambiente. Las condiciones ambientales determinan la velocidad de curado de la mezcla en frío, entre más alta sea temperatura y baja la humedad relativa, la mezcla requerirá menos tiempo de curado para tener la suficiente cohesión para resistir el desgaste producto del tráfico. De acuerdo con las Figuras 22 y 23, el desgaste producto de la abrasión tiende a disminuir con el aumento del contenido de asfalto residual y el tiempo de curado. La especificación de porcentaje máximo de desgaste que se empleó está definida para un tiempo de curado de 4 horas, sin embargo, se quiso ver si a 2 horas de curado se cumplía con la especificación también. Se observa que, para la mezcla con RAP procesado, a 2 horas de curado se da un desgaste menor o igual al 7 % a partir de contenidos de asfalto residual de 4,9 %. En el caso de la mezcla con RAP sin procesar, sucede el mismo comportamiento a partir de contenidos de asfalto de 3,6 %. Ambas mezclas mostraron contenidos de asfalto residual en los cuales a las 2 horas de curado tienen

la suficiente cohesión para resistir el desgaste provocado por el tráfico. Para un curado prolongado de 4 horas el desgaste tiende a ser mínimo para ambas mezclas en casi todos los contenidos de asfalto residual analizados, sólo se observó, para el contenido más bajo de asfalto en la mezcla con RAP sin procesar, un desprendimiento por arriba del 7 % a las 2 horas y 4 horas de curado.

Tabla 19

Resultados de ensayo de desprendimiento

Muestra	Asfalto	Emulsión asfáltica	Cemento	Curado	Temperatura	Humedad relativa	Desgaste
	%	%	%	h	°C	%	%
RAP procesado M-1708- 22	3,3	5,5	1,0	2	23,0	69,5	15,8
	3,3	5,5	1,0	4	24,0	59,5	4,8
	4,3	7,2	1,0	2	24,0	70,0	12,4
	4,3	7,2	1,0	4	24,0	69,5	3,6
	5,3	8,9	1,0	2	26,0	61,5	3,4
	5,3	8,9	1,0	4	25,5	59,0	2,3
	6,3	10,6	1,0	2	24,0	62,0	1,4
	6,3	10,6	1,0	4	24,0	62,0	0,8
RAP sin procesar M-1874- 22	2,6	4,4	1,0	2	24,0	64,0	24,8
	2,6	4,4	1,0	4	25,0	60,0	21,1
	3,6	6,0	1,0	2	24,5	62,5	6,0
	3,6	6,0	1,0	4	24,0	67,0	0,8
	4,6	7,7	1,0	2	23,5	51,5	1,2
	4,6	7,7	1,0	4	20,5	49,0	0,4
	5,6	9,4	1,0	2	21,0	51,5	0,4
	5,6	9,4	1,0	4	25,0	56,0	0,5

Nota. Tomado de LanammeUCR (2024)

La mezcla en frío requiere un contenido mínimo de asfalto que le permita cohesionar las partículas de agregado y ser resistente al desgaste producto del paso de las llantas de los vehículos. El curado de 4 horas se recomienda para el reciclado en frío o materiales granulares estabilizados con emulsión asfáltica debido al menor contenido de asfalto residual que presentan estas mezclas. Las mezclas en frío, por su mayor contenido de asfalto podrían

requerir un menor tiempo de curado. También se debe tomar en cuenta que la presencia del cemento favorece la disminución del tiempo de curado al desarrollar una mayor estabilidad en la mezcla, lo cual es crucial en edades tempranas de curado.

Figura 22

Desprendimiento según el contenido de asfalto y tiempo de curado mezcla RAP procesado

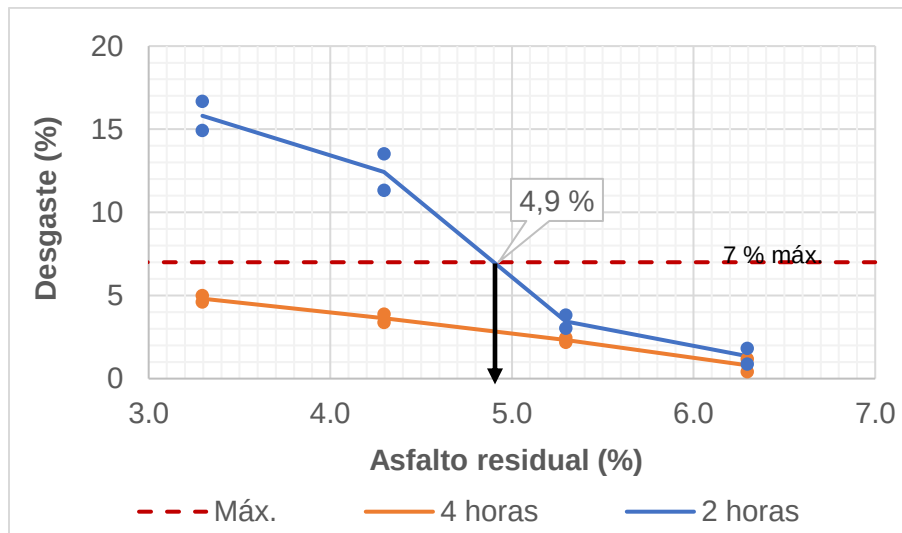
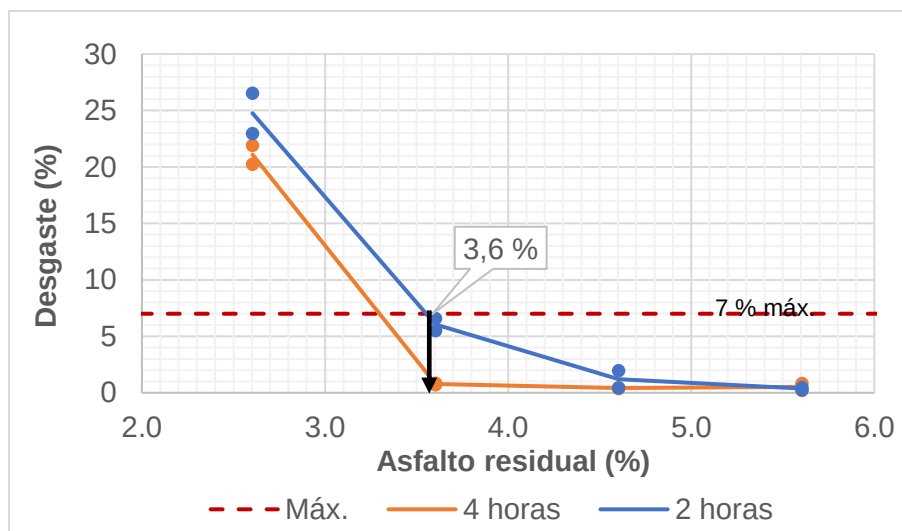


Figura 23

Desprendimiento según el contenido de asfalto y tiempo de curado mezcla RAP sin procesar



8.6.1. Contenido óptimo de asfalto residual

El contenido óptimo de asfalto residual, de acuerdo con los ensayos que se llevan realizados, se estimó de acuerdo con el punto medio del rango de valores que cumplían con los criterios de daño por humedad y ahuellamiento. Como se observa en las Figuras 24 y 25, las mezclas con RAP analizadas presentan contenidos de óptimos de asfalto residual similares, la mezcla con RAP procesado 4,6 % y la mezcla con RAP sin procesar 4,5 %. Se revisa el desprendimiento para el contenido óptimo de asfalto residual. A las 4 horas de curado, ambas mezclas cumplen con el desprendimiento máximo permitido. A las 2 horas de curado, solo la mezcla con RAP sin procesar cumple con el criterio de desprendimiento. En la Tabla 20, se indican las dosificaciones óptimas para cada mezcla con RAP analizada. La definición del contenido óptimo de asfalto residual se complementará con los ensayos de estabilidad y flujo Marshall modificado y susceptibilidad al agrietamiento para el siguiente informe de avance de acuerdo con el esquema experimental.

Figura 24

Determinación del contenido óptimo de asfalto residual mezcla con RAP procesado

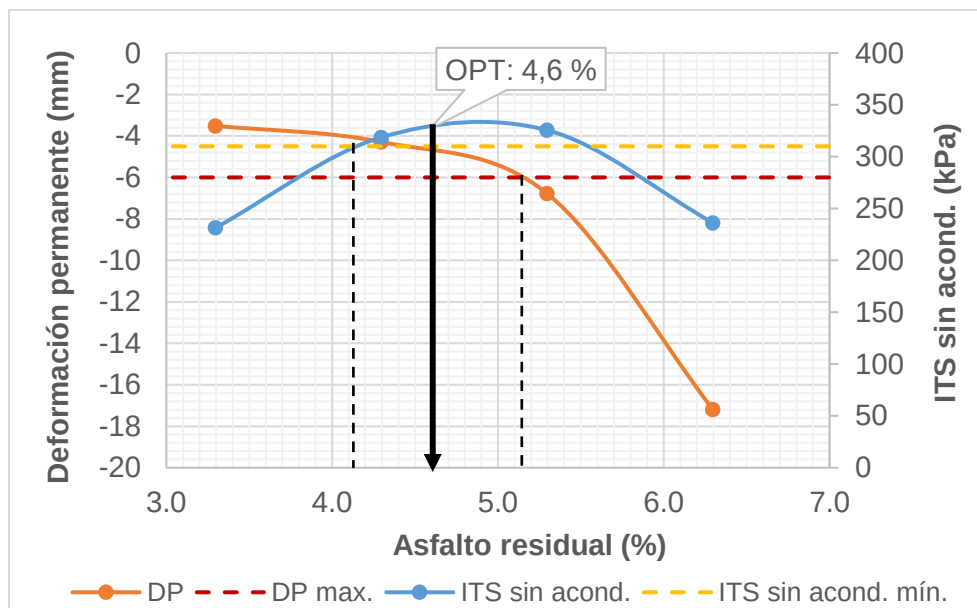


Figura 25

Determinación del contenido óptimo de asfalto residual mezcla con RAP sin procesar

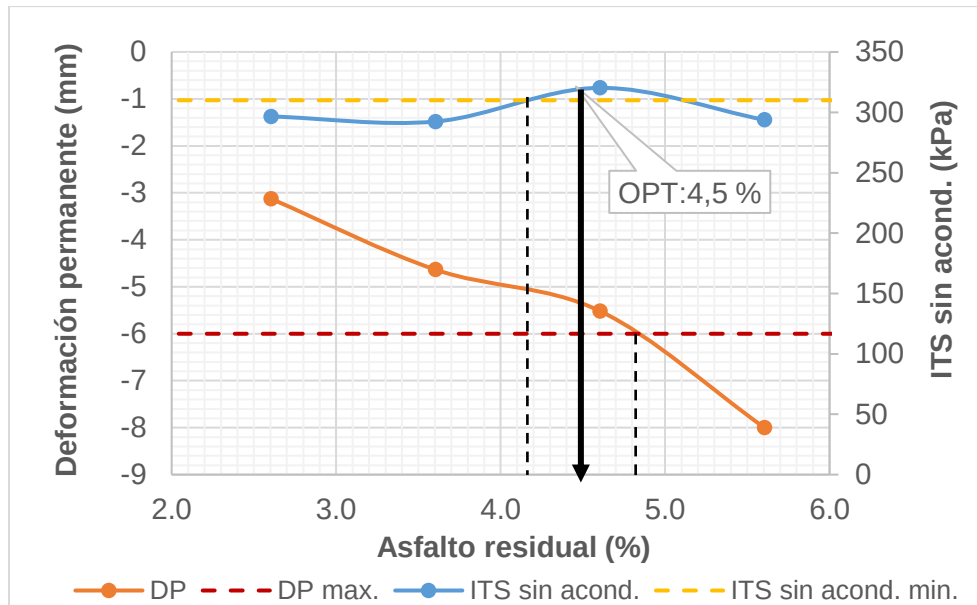


Tabla 20

Dosificación óptima según diseño de mezcla

Muestra	Densidad seca de mezcla kg/m ³	Cemento			Agua			Asfalto residual			Emulsión asfáltica		
		%	kg/m ³	sacos/m ²	%	kg/m ³	l/m ²	%	kg/m ³	l/m ²	%	kg/m ³	l/m ²
RAP procesado M-1708- 22	1956	1,0	19,6	0,031	4,5	87,7	7,0	4,6	90,0	7,2	7,7	151,0	11,9
RAP sin procesar M-1874- 22	1997	1,0	20,0	0,032	4,0	80,3	6,4	4,5	89,9	7,2	7,6	150,8	11,9

Nota. El contenido de emulsión asfáltica se calculó con base a un contenido de asfalto residual de 59,7 %. La dosificación de los materiales se estimó para un espesor de capa compactada de 8 cm. El contenido de agua ya considera el aporte de la emulsión asfáltica.

8.7. Bacheo de prueba en la Ciudad de la Investigación UCR

Se hizo una valoración inicial del desempeño de la mezcla en frío con RAP y emulsión asfáltica de rompimiento lento como material para bacheos de emergencia. En la Figura 21, se aprecian los huecos antes de la intervención y sus respectivos bacheos después de 2 días de la colocación y a los tres meses y medio. A continuación, se describen los deterioros observados:

- Bacheo frente al Lanamme. No ha presentado desprendimiento, agrietamiento o deformación. Se mantiene en buen estado después de tres meses y medio de su colocación.
- Bacheo frente al CIL. A los 2 días presentaba agrietamiento y a los tres meses y medio, además se observó el inicio de un desprendimiento cerca de la junta y una depresión. El agrietamiento se puede deber a inestabilidad de las capas subyacentes creada por la presión del agua o saturación, ya que la zona alrededor presenta deformaciones. Adicionalmente, entorno al bache, hay presencia de agrietamiento de tipo cuero de lagarto que se pudo transferir al área bacheada. Al ser un bacheo de emergencia, no se removieron las partes agrietadas que estaban alrededor del bache, lo cual influye en la durabilidad del bacheo.
- Bacheo frente a Ciencias Sociales. No ha presentado agrietamiento o desprendimientos. No obstante, se observó una leve depresión poscompactación. Este tipo de deformación se puede originar por una compactación deficiente durante la colocación.

EIC-Lanamme-INF-1410-2023

Página 62 de 70

Tabla 21

Bacheos de prueba en la Ciudad de la Investigación

Fecha	Frente LanammeUCR	Frente al CIL	Frente Ciencias Sociales
Día 0 16/06/2023			
Día 2 30/06/2023			
Día 312 23/04/2024			

9. CONCLUSIONES

El presente informe comprendió la caracterización de los materiales componentes, un avance diseño de mezcla y según sus resultados, una dosificación óptima preliminar de los materiales; los resultados del avance de ensayos de desempeño realizados a la fecha y se presentó la evaluación del desempeño de los primeros bacheos de prueba, en condiciones reales de servicio, con la mezcla en frío desarrollada en el laboratorio. A continuación, se enumeran las principales conclusiones:

1. El volumen de material de perfilado almacenado en el Plantel de Colima representa un alto valor económico y al mismo tiempo, un ahorro importante en materiales, que se podría utilizar para conformar mezclas en frío para intervenir hasta 110 km de carril de rutas de bajo a mediano tráfico (3,6 m de ancho - 10 cm de espesor). Dado el contexto nacional, en el cual los recursos disponibles para la conservación de carreteras son cada vez más limitados, es de suma importancia implementar esta técnica económica y ambientalmente sostenible.
2. Sobre el diseño de la mezcla en frío:
 - a. La caracterización de las dos fuentes de RAP consideradas en la investigación indica que este tipo de materiales son aptos para cumplir con los requisitos de agregados para mezclas en frío según la sección 703.09 del CR 2020.
 - b. El asfalto que posee el RAP en las fuentes analizadas se considera como inactivo por su alto nivel de oxidación. Por lo tanto, el asfalto del RAP no aporta de forma significativa cohesión entre las partículas del agregado, lo cual se asemeja más a un comportamiento de tipo granular. A su vez, los resultados de penetración y la temperatura superior indicaron que el asfalto residual del RAP, a elevadas temperaturas de servicio, presenta alta rigidez y, en consecuencia, menor susceptibilidad al ahuellamiento. No obstante, una alta rigidez se asocia con mayor propensión al agrietamiento por fatiga, de ahí la importancia de

considerar este tipo de deterioro en la evaluación del desempeño en el laboratorio durante la fase de diseño.

- c. La caracterización de la emulsión asfáltica de rompimiento evidenció que la viscosidad Saybolt Furol tiende a no cumplir con la especificación, a pesar de ello, al estar cercana del límite inferior, la baja viscosidad favorece la trabajabilidad y recubrimiento de la emulsión con los agregados. Por otro lado, la estabilidad a 24 horas exhibió valores cercanos al máximo permitido, lo cual implica que el tiempo de almacenamiento en campo no debe ser muy extenso y que la emulsión requiere de homogenización con mayor frecuencia. En concordancia con lo anterior, los lotes de emulsión mostraron tamaños de partícula grandes ($> 5 \mu\text{m}$) que se asocian con baja viscosidad e inestabilidad de almacenamiento.
- d. El RAP requiere de un contenido mínimo de agua para el adecuado recubrimiento de la emulsión. El porcentaje de recubrimiento debe ser acorde a las condiciones de exposición de tráfico y clima, de ahí que, para superficies de ruedo, el requisito de recubrimiento es más alto que para bases granulares estabilizadas con emulsión. Las dos muestras de RAP denotaron un comportamiento favorable ante el daño por humedad, a consecuencia de la cobertura de asfalto que tiene el RAP originalmente, más la capa de asfalto que provee la emulsión asfáltica en la mezcla.
- e. Las mezclas en frío tienen un contenido óptimo de agua con el cual se obtiene la máxima densidad. El contenido óptimo de agua debe ser tal que la mezcla se vea bien recubierta, lubricada y sin de exceso de fluidos. El agua en exceso puede provocar segregación o el escurrimiento de la emulsión, lo cual afecta la durabilidad de la mezcla.
- f. El curado de precompactación simula las condiciones de transporte y el tiempo que se dura entre el mezclado y la compactación en campo. Además, permite disminuir el escurrimiento de la emulsión debido a la presión de poro que se

genera durante la compactación. De esta manera, evita la segregación de la mezcla y la expulsión de la emulsión que causa un mayor contenido de vacíos.

- g. Para ambas mezclas con RAP, se determinó la necesidad de incorporar uno por ciento de cemento, como relleno mineral activo, para cumplir con los criterios de resistencia a la tensión indirecta. El cemento aparte de aumentar la resistencia al daño por humedad favorece un curado rápido en el campo, por la ganancia temprana de estabilidad, lo que disminuye el tiempo de apertura al tránsito.
- h. El contenido de vacíos obtenido en las mezclas de diseño estuvo dentro de lo esperado para mezclas en frío, a pesar del nivel bajo de compactación que se implementó tratando de emular las características de compactación que se dan en las actividades de bacheo. Esto abre la posibilidad de mejorar aún más la durabilidad de la mezcla si mejora su densificación.
- i. Preliminarmente, la mezcla con RAP procesado requiere de un contenido óptimo de asfalto residual de 4,6 % y la mezcla con RAP sin procesar de 4,5 % para cumplir con los criterios de daño por humedad, ahuellamiento y desprendimiento. Sin embargo, la estimación del contenido óptimo de asfalto residual se complementará con los ensayos de Estabilidad y Flujo Marshall modificado y susceptibilidad al agrietamiento.

3. Sobre la evaluación del desempeño de la mezcla mediante ensayos:

- a. Los resultados de los ensayos de desnudamiento, resistencia a la tensión indirecta y rueda Hamburgo fueron consistentes al evidenciar que las mezclas en frío fabricadas con las dos fuentes de RAP tienen una menor susceptibilidad al daño por humedad al especificado en la normativa. El recubrimiento de asfalto propio del RAP favorece la adherencia con el asfalto residual de la emulsión.

4. Sobre la verificación del desempeño de la mezcla en condiciones reales:

- a. Los bacheos de prueba realizados en la Ciudad de la Investigación mostraron un desempeño adecuado en las condiciones de tráfico del sitio. Sin embargo, igual que con las mezclas en caliente, las capas adyacentes y el pavimento que rodea el hueco a intervenir deben estar en buenas condiciones para que no afecten la durabilidad del bacheo con mezcla asfáltica en frío. Adicionalmente, es importante aplicar una compactación apropiada para evitar la deformación y eventual agrietamiento de la mezcla en frío colocada.

10. RECOMENDACIONES

Con base a los resultados obtenidos y la experiencia generada en este primer avance de la investigación, se recomienda lo siguiente:

1. Continuar con el diseño de mezcla (fase de desempeño) como se tiene contemplado en el esquema experimental, para tener un criterio más amplio para la selección del contenido óptimo de los componentes de la mezcla. Una vez definida la dosificación óptima proseguir con los ensayos de desempeño en el laboratorio.
2. Realizar el ensayo de rueda de Hamburgo a 50 °C con la dosificación óptima para así determinar el desempeño a deformación permanente y al daño por humedad en las mismas condiciones que se ensayan las mezclas en caliente.
3. Valorar en etapas posterior el efecto de una mayor energía de compactación en las propiedades y desempeño a escala de laboratorio.
4. Ejecutar los tramos de prueba a escala natural (HVS y Campo) con el fin de validar los resultados obtenidos en la fase de ensayos de laboratorio, evaluar variables significativas del proceso de producción y colocación que influyen en el desempeño de la mezcla para generar acciones de mejora.

1. REFERENCIAS

AASHTO. (1996). *Standard test method for determining the resilient modulus of bituminous mixtures by indirect tensión (AASHTO TP 31)*. Washington, D. C.: American Association of State Highway and Transportation Officials.

AASHTO. (2021). *Standard practice for emulsified asphalt content of cold recycled mixture designs AASHTO PP86-20 (2021)*. Washington, D.C.: American Association of State Highway and Transportation Officials.

AASHTO. (2021b). *Standard specification for materials for cold recycled mixtures with emulsified asphalt AASHTO MP31-17 (2021)*. Washington, D.C.: American Association of State Highway and Transportation Officials.

AASHTO. (2022). *Determining Dynamic Modulus of Hot Mix Asphalt (HMA) (AASHTO T 342)*. Washington, D.C.: American Association of State Highway and Transportation Officials.

Asphalt Institute. (1997). *Asphalt cold mix manual (MS-14)*. Lexington, Kentucky: Asphalt Institute.

Asphalt Institute. (2008). *MS-19 Basic Asphalt Emulsion Manual*. Lexington, Kentucky: Asphalt Institute.

Asphalt Institute. (2008). *MS-19 Basic Asphalt Emulsion Manual*. Lexington, Kentucky: Asphalt Institute.

Asphalt Institute. (2009). *MS-16 Asphalt in Pavement Preservation and Maintenance*. Lexington, Kentucky: Asphalt Institute.

ASTM. (2020). *Standard Test method for determining the resilient modulus of asphalt mixtures by indirect tension test (ASTM D 7369)*. West Conshohocken, Pennsylvania: ASTM International.

Chappat, J., & Bilal, J. (2003). *The environmental road of the future: life cycle analysis, energy consumption and greenhouse gas emissions*.
http://www.colas.com/sites/default/files/publications/route-future-english_1.pdf

Darter et al. (1978). *Development of emulsified asphalt aggregate cold mix design procedure (Project IHR-505)*. Urbana, Illinois: Illinois Cooperative Highway Research Program. University of Illinois.

Dash et al. (2022). Design and performance of cold mix asphalt – A review. *Construction and Building Materials*, 315. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125687>

EIC-Lanamme-INF-1410-2023

Página 68 de 70

Deb, P., & Singh, K. (2022). Mix design, durability and strength enhancement of cold mix asphalt: a state-of-the-art review. *Innovative Infrastructure Solutions*. <https://doi.org/10.1007/s41062-021-00600-2>

DVOP. (2022). Oficio DVOP-2022-59. San José, Costa Rica: División de Obras Públicas del MOPT.

Gómez, D. (2021). *Utilización de material reciclado de asfalto en rutas nacionales de lastre de la Zona Norte [Tesis de Licenciatura]*. San José: Universidad Issac Newton.

Jain, S., & Singh, B. (2021). Cold mix asphalt: An overview. *Journal of Cleaner Production*, 280. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124378>

LanammeUCR. (2022a). *Informe de volúmenes obtenidos a través de algebra de mapas de modelos de elevación digital con fotogrametría de vehículos aéreos no tripulados*. Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales.

LanammeUCR. (2022b). *Informe de ensayo EIC-Lanamme-INF-1655-2022*. Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales.

LanammeUCR. (2022c). *Informe de ensayo EIC-Lanamme-INF-1746-2022*. Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales.

LanammeUCR. (2023d). *Informe de ensayo EIC-Lanamme-INF-0278-2023*. Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales.

LanammeUCR. (2023e). *Informe de ensayo EIC-Lanamme-INF-0279-2023*. Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales.

LanammeUCR. (2023f). *Informe de Ensayo EIC-Lanamme-INF-1220-2023*. Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales.

LanammeUCR. (2023g). *Informe de ensayo EIC-Lanamme-INF-1221-2023*. Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales.

LanammeUCR. (2023h). *Informe de ensayo EIC-Lanamme-INF-0121-2023*. Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales.

LanammeUCR. (2023i). *Informe de ensayo EIC-Lanamme-INF-0789-2023*. Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales.

EIC-Lanamme-INF-1410-2023

Página 69 de 70

LanammeUCR. (2023j). *Informe de ensayo EIC-Lanamme-INF-1144-2023*. Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales.

LanammeUCR. (2023k). *Informe de ensayo EIC-Lanamme-INF-0411-2023*. Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales.

LanammeUCR. (2023l). *Informe de ensayo EIC-Lanamme-INF-0412-2023*. Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales.

LanammeUCR. (2023m). *Informe de ensayo EIC-Lanamme-INF-0439-2023*. Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales.

LanammeUCR. (2023n). *Informe de ensayo EIC-Lanamme-INF-0440-2023*. Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales.

LanammeUCR. (2023o). *Informe de ensayo EIC-Lanamme-INF-0447-2023*. Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales.

LanammeUCR. (2023p). *Informe de ensayo EIC-Lanamme-INF-0448-2023*. Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales.

LanammeUCR. (2023q). *Informe de ensayo EIC-Lanamme-INF-0858-2023*. Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales.

LanammeUCR. (2023r). *Informe de ensayo EIC-Lanamme-INF-0859-2023*. Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales.

LanammeUCR. (2023s). *Informe de ensayo EIC-Lanamme-INF-1245-2023*. Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales.

LanammeUCR. (2023t). *Informe de ensayo EIC-Lanamme-INF-1246-2023*. Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales.

LanammeUCR. (2023u). *Informe de ensayo EIC-Lanamme-INF-1547-2023*. Laboratorio de Materiales y Modelos Estructurales.

LanammeUCR. (2023v). *Informe de ensayo EIC-Lanamme-INF-1561-2023*. Laboratorio de Materiales y Modelos Estructurales.

LanammeUCR. (2024). *Informe de ensayo EIC-Lanamme-INF-0158-2024*. Laboratorio de Materiales y Modelos Estructurales.

EIC-Lanamme-INF-1410-2023

Página 70 de 70

MOPT. (2015). *Manual de especificaciones generales para la conservación de caminos, carreteras y puentes (MCV-2015)*. San José: Ministerio de Obras Públicas y Transportes.

MOPT. (2022). *Manual de especificaciones generales para la construcción de carreteras, caminos y puentes*. San José: Ministerio de Obras Públicas y Transportes.

MOPT. (2022). *Reporte de ensayos a materiales granulares mejorados con emulsión asfáltica (MOPT-02-07-RPT-147,148,149,150,151,152,153,154,155-2022)*. San José, Costa Rica: Departamento de Laboratorio de Materiales.

Munyagi, A. (2006). *Evaluation of cold asphalt patching mixes [Tesis de maestría]*. Stellenbosch: University of Stellenbosch.

NAPA. (2015). *Best practices for RAP and RAS management*. National Asphalt Pavement Association.

NCHRP. (2017). *Properties of cold in-place recycled and full-depth reclamation asphalt concrete (NCHRP research report 863)*. Washington, D.C.: National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine.

NCHRP. (2021). *Practice and performance of cold in-place recycling and cold central plant recycling (NCHRP Synthesis 569)*. Washington, D.C.: National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine 2021.

PITRA. (2015). *Bacheo formal con mezcla asfáltica en caliente. Guía de inspectores*. San José: Program de Infraestructura del Transporte. LanammeUCR.

Rezaei et al. (2017). Investigation of rutting resistance and moisture damage. *Journal of Materials in Civil Engineering*. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0002042](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002042)

Sabita. (2020). *Technical guideline: bitumen stabilised materials*. Cape Town: Southern African Bitumen Association (Sabita).

Wirtgen. (2012). *Wirtgen cold recycling technology manual*. Wirtgen.