



Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales

Informe: EIC-Lanamme-INF-1175-2022

Propuesta

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



Preparado por:

**Unidad de Investigación en Infraestructura y Transporte
Programa de Infraestructura del Transporte (PITRA)**

Documento generado con base en el Art. 6, inciso b) 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

Octubre, 2022



EIC-Lanamme-INF-1175-2022

Página 2 de 59

1. Informe: EIC-Lanamme-INF-1175-2022	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 06 de octubre de 2022
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	
7. Resumen <i>La mezcla asfáltica en frío (MAF) es una mezcla de agregado, con o sin relleno mineral activo y asfalto emulsificado o rebajado, cuya producción, colocación y compactación es a temperatura ambiente. Se ha aplicado como superficie de ruedo en caminos de bajo a mediano volumen de tráfico, estabilización de materiales granulares, reciclado en frío para rehabilitación de pavimentos y para el mantenimiento de caminos mediante bacheo. En comparación con las mezclas asfálticas en caliente, tienen un menor costo, consumen menos energía, producen menos gases contaminantes y su aplicación es más sencilla.</i> <i>En Costa Rica la implementación y oferta de emulsiones de rompimiento lento (CSS-1h) ha permitido el uso de nuevas técnicas de aplicación en frío para la construcción y preservación de pavimentos. Como resultado de esto y debido a la existencia de grandes apilamientos de pavimento asfáltico recuperado (material con un alto valor de reciclaje) en los planteles del Ministerio de Obras Públicas y Transportes (MOPT), la Administración ha mostrado un interés especial en uso de estos materiales para mezclas en frío, de forma eficiente, con menor impacto ambiental y reducción de costos, para atender un problema específico relacionado inicialmente con el bacheo de pavimentos deteriorados.</i> <i>La siguiente propuesta de investigación tiene como objetivo valorar el uso de mezclas en frío con emulsión asfáltica y material recuperado de pavimentos asfálticos (PAR/RAP) para bacheo y capas de ruedo para caminos de bajo a mediano tráfico mediante el diseño de mezcla y evaluación del desempeño en el</i>	



EIC-Lanamme-INF-1175-2022

Página 3 de 59

laboratorio y a escala real. Los productos generados ayudarán a la Administración a aplicar de forma adecuada esta técnica, representando una solución para mejorar el estado de las carreteras, beneficiando la seguridad, economía, y confort del usuario, con un menor impacto en el medio ambiente.

8. Palabras clave Mezclas en frío, emulsión asfáltica, PAR/RAP	9. Nivel de seguridad: No aplica	10. Núm. de páginas 59
11. Elaborado:		
Ing. Juan Carlos Múnera Miranda Fecha: 06/10/2022	 Fecha: / /	 Fecha: / /
12. Revisado por:	13. Revisión Legal:	14. Aprobado por:
Ing. Fabián Elizondo Arrieta, MBA Fecha: 06/10/2022	 Fecha: / /	Ing. Ana Luisa Elizondo Salas, M. Sc Fecha: 06/10/2022



EIC-Lanamme-INF-1175-2022

Página 4 de 59

ÍNDICE DE CONTENIDO

RESUMEN EJECUTIVO	6
INTRODUCCIÓN	7
OBJETIVO GENERAL	9
OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	9
JUSTIFICACIÓN	9
ALCANCE Y LIMITACIONES.....	10
ALCANCE.....	10
LIMITACIONES.....	10
ANTECEDENTES	11
MARCO TEÓRICO.....	12
MÉTODOS DE DISEÑO DE MEZCLA.....	13
MÉTODO DEL INSTITUTO DEL ASFALTO MS-14.....	14
MÉTODO DEL INSTITUTO DEL ASFALTO MS-19.....	15
MÉTODO AASHTO PP 86.....	16
EMULSIONES ASFÁLTICAS PARA MEZCLAS EN FRÍO	17
ESPECIFICACIONES TÉCNICAS NACIONALES	18
ENSAYOS PARA MEDIR LA RESPUESTA MECÁNICA DEL MATERIAL	20
EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO	22
FACTORES QUE AFECTAN EL DESEMPEÑO.....	24
TIPO, GRADUACIÓN Y CARACTERÍSTICAS DEL AGREGADO	24
TIPO DE EMULSIÓN ASFÁLTICA.....	25
RELLENOS MINERALES Y ADITIVOS.....	26
CONTENIDO DE FLUIDOS	27
TIPO Y NIVEL DE COMPACTACIÓN.....	28
CONTENIDO DE VACÍOS.....	30
EFECTO DEL TIEMPO Y TEMPERATURA DE CURADO	32



EIC-Lanamme-INF-1175-2022

Página 5 de 59

METODOLOGÍA PROPUESTA.....	33
FASE 1: MUESTREO, CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES Y DISEÑO DE MEZCLA	33
<i>MUESTREO DE MATERIALES</i>	33
<i>CARACTERIZACIÓN DE LOS AGREGADOS</i>	35
<i>CARACTERIZACIÓN DE LA EMULSIÓN CSS-1H</i>	35
<i>DISEÑO DE MEZCLA</i>	36
FASE 2: EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO Y RESPUESTA DEL MATERIAL EN EL LABORATORIO ..	41
FASE 3: EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO A ESCALA REAL	43
RESULTADOS / PRODUCTOS ESPERADOS	45
CONFORMACIÓN DEL EQUIPO DE TRABAJO	47
CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES	48
METAS Y ENTREGABLES	50
RECURSOS REQUERIDOS	50
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	51

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ensayos para medir la respuesta estructural de MAF	21
Figura 2. Ensayos de desempeño en MAF	23
Figura 3. Metodología propuesta	34

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.....	17
Tabla 4. Emulsiones asfálticas para mezclas en frío.....	17



EIC-Lanamme-INF-1175-2022

Página 6 de 59

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
Tabla 8. Resumen de tipos de compactación para MAF	30
Tabla 9. Rango de contenido de vacíos para MAF	31
Tabla 10. Resumen de regímenes de curado recomendados para MAF.....	33
Tabla 11. Características de compactación	38
Tabla 12. Características de curado y acondicionamiento de especímenes de diseño	39
Tabla 13. Condiciones de ensayos de tiempo de curado y compactabilidad.....	41
Tabla 14. Condiciones de ensayos de desempeño.....	42
Tabla 15. Condiciones de ensayo de módulo dinámico	43
Tabla 16. Actividad para evaluar y frecuencia.....	44
Tabla 17. Participantes del equipo investigador	47
Tabla 18. Participantes del equipo investigador (LanammeUCR-MOPT)	47
Tabla 19. Actividades para el cumplimiento de los objetivos planteados en el proyecto ..	48
Tabla 20. Cronograma de la investigación	49
Tabla 21. Costo de personal para el desarrollo del proyecto.....	50
Tabla 22. Costo de ensayos para el desarrollo del proyecto	50

RESUMEN EJECUTIVO

La mezcla asfáltica en frío (MAF) es una mezcla de agregado, con o sin relleno mineral activo y asfalto emulsificado o rebajado, cuya producción, colocación y compactación es a



EIC-Lanamme-INF-1175-2022

Página 7 de 59

temperatura ambiente. Se ha aplicado como superficie de ruedo en caminos de bajo a mediano volumen de tráfico, estabilización de materiales granulares, reciclado en frío para rehabilitación de pavimentos y para el mantenimiento de caminos mediante bacheo. En comparación con las mezclas asfálticas en caliente, tienen un menor costo, consumen menos energía, producen menos gases contaminantes y su aplicación es más sencilla.

En Costa Rica la implementación y oferta de emulsiones de rompimiento lento (CSS-1h) ha permitido el uso de nuevas técnicas de aplicación en frío para la construcción y preservación de pavimentos. Como resultado de esto y debido a la existencia de grandes apilamientos de pavimento asfáltico recuperado (material con un alto valor de reciclaje) en los planteles del Ministerio de Obras Públicas y Transportes (MOPT), la Administración ha mostrado un interés especial en uso de estos materiales para mezclas en frío, de forma eficiente, con menor impacto ambiental y reducción de costos, para atender un problema específico relacionado inicialmente con el bacheo de pavimentos deteriorados.

La siguiente propuesta de investigación tiene como objetivo valorar el uso de mezclas en frío con emulsión asfáltica y material recuperado de pavimentos asfálticos (PAR/RAP) para bacheo y 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 generados ayudarán a la Administración a aplicar de forma adecuada esta técnica, representando una solución para mejorar el estado de las carreteras, beneficiando la seguridad, economía, y confort del usuario, con un menor impacto en el medio ambiente.

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



EIC-Lanamme-INF-1175-2022

Página 8 de 59

rehabilitación de pavimentos y en labores de mantenimiento como bacheo. Las bajas temperaturas de producción y aplicación traen una serie de beneficios en comparación con las mezclas asfálticas en caliente, como menor emisión de gases de efecto invernadero, disminución en el consumo de energía, equipos de construcción sencillos, resultando en menores costos. 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 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 presente propuesta de investigación tiene como objetivo valorar el uso de mezcla en frío con emulsión asfáltica y PAR/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



EIC-Lanamme-INF-1175-2022

Página 9 de 59

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.

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 del desempeño en el laboratorio y a escala real.

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.

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



EIC-Lanamme-INF-1175-2022

Página 10 de 59

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.

ALCANCE Y LIMITACIONES

Alcance

La investigación tiene como alcance el diseño y evaluación del desempeño en el laboratorio y a escala natural de mezclas en frío con emulsión asfáltica de rompimiento lento (CSS-1h) y material recuperado de pavimentos asfálticos para su uso para bacheo o construcción de capas de ruedo en caminos de bajo a mediano tráfico.

Limitaciones



EIC-Lanamme-INF-1175-2022

Página 11 de 59

Se consideran dos fuentes de PAR/RAP: sin procesar (sólo cribado para eliminar sobretamaño) y procesado (quebrado para disgregar sobretamaños del perfilado y cribado).

Se utilizará emulsión de rompimiento lento producida por RECOPE. Para etapas posteriores al proyecto se evaluará el efecto de una emulsión de rompimiento lento modificada con polímero en las propiedades de la mezcla.

La evaluación del desempeño considera los deterioros: daño por humedad, ahuellamiento y fatiga.

El desempeño del material dependerá no sólo de su diseño sino también de las condiciones en sitio como procedimientos constructivos, drenajes, estructura existente, el tráfico, entre otros factores.

ANTECEDENTES

La Dirección de Obras Públicas del MOPT mediante el oficio DVOP-2022-59 externa 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



EIC-Lanamme-INF-1175-2022

Página 12 de 59

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).

MARCO TEÓRICO

Las mezclas asfálticas en frío son una mezcla de agregados sin calentar, relleno mineral activo (de requerirse) y emulsión asfáltica o asfalto rebajado (cada vez más en desuso por consideraciones ambientales), 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. Las mezclas en planta se producen en plantas estacionarias que permiten tener un mejor control del proceso de producción desde el proporcionamiento hasta el mezclado de los materiales. La colocación y compactación se pueden ejecutar con equipos convencionales de pavimentación o inclusive con equipos básicos para trabajos más pequeños. Las mezclas en sitio se producen en el propio sitio de pavimentación por medio de plantas móviles, motoniveladoras, o equipos de especiales de mezclado en sitio (Asphalt Institute, 1997; Jiménez et al. , 2009). 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 materiales locales o recuperados (PAR/RAP). No se requiere de gran cantidad de equipos para la construcción (Asphalt Institute, 1997). Los costos de construcción son de 5 % a 6 % más bajos con respecto a la mezcla asfáltica en caliente (MAC) (Hindustan Coals LTD, 2011). A ser una técnica que no requiere de calor puede consumir hasta un 80 % menos de energía que las MAC (Chappat & Bilal, 2003),



EIC-Lanamme-INF-1175-2022

Página 13 de 59

- **Ambiental.** Al no requerir calentamiento los agregados y al 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 todas estas 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). En las mezclas asfálticas, las fallas por humedad se pueden clasificar en fallas por cohesión o adhesión. En el caso de las MAF se ha encontrado que son más propensas al daño por humedad por deficiencia de adhesión (Packham, 2005; Horgnies et al., 2011; Moraes et al., 2011). Por la baja estabilidad inicial debido al proceso de curado, y el menor envejecimiento del asfalto, producto de las bajas temperaturas de mezclado, estas mezclas son más susceptibles al ahuellamiento (Sebaaly et al., 2004; Niazi & Jalili, 2009; Rubio et al., 2012; Guo et al., 2014). Las MAF requieren de suficiente tiempo de curado (días) para ganar resistencia. Esto coloca a las MAF en desventaja con respecto a las MAC y las MAT donde el camino puede ser abierto al tráfico después de 24 horas de su colocación (Jain & Singh , 2021).

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 describen los principales métodos disponibles.



EIC-Lanamme-INF-1175-2022

Página 14 de 59

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
--------	-------



EIC-Lanamme-INF-1175-2022

Página 15 de 59

Estabilidad a 22,2 °C (AASHTO T245 modificado)	2224 N mín.
Pérdida de estabilidad (saturación e inmersión en agua a 25 °C por 1 hora)	50 % máx.
Porcentaje de recubrimiento	50 % mín.

Fuente: Asphalt Institute (1997)

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
---------------	--------------



EIC-Lanamme-INF-1175-2022

Página 16 de 59

Estabilidad a 25 °C, (AASHTO T245 modificado)	2224 N mín.
Porcentaje de recubrimiento (adherencia)	85 % mín. (superficie de rueda) 50 % mín. (base)

Fuente: 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 sometándolo a una temperatura de 60 °C por 48 horas.

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 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



EIC-Lanamme-INF-1175-2022

Página 17 de 59

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 curada
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 mínimo	Prevenir comportamiento rígido
<i>Estabilidad Marshall</i>		
Estabilidad Marshall, grupo seco, AASHTO T245 modificado	5560 N mín.	Estabilidad curada
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 mínimo	Prevenir comportamiento rígido

Fuente: AASHTO (2021b)

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). Las normas, para selección de emulsiones asfálticas según tipo de aplicación, ASTM D3628 (2021) y AASHTO R5 (2017) coinciden en las emulsiones asfálticas recomendadas por el MS-14 para MAF.

Tabla 4. Emulsiones asfálticas para mezclas en frío



EIC-Lanamme-INF-1175-2022

Página 18 de 59

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 ruedo</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 ruedo</i>										
Graduación abierta	X	X					X	X		
Graduación densa				X	X	X			X	X
Bacheo, uso inmediato				X	X	X			X	X
Reciclado en frío	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X

Fuente: Asphalt Institute (1997)

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 ruedo en caminos de bajo a mediano tráfico y en el bacheo menor de superficies existentes.

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



EIC-Lanamme-INF-1175-2022

Página 19 de 59

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.

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

Fuente: MOPT (2022)

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.

Tabla 6. Requisitos de calidad para agregados del CR 2020 para MAF



EIC-Lanamme-INF-1175-2022

Página 20 de 59

Ensayo	Especificación
Agregado grueso	
Pérdida por abrasión (AASHTO T96)	40 % máx.
Caras fracturadas (ASTM D5821)	65 % mín.
Índice de durabilidad (AASHTO T210)	35 % mín.
Partículas friables (AASHTO T112)	1 % máx.
Agregado fino	
Índice de durabilidad (AASHTO T210)	35 % mín.
Equivalente de arena (AASHTO T176)	35% mín.

Fuente: MOPT (2022)

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 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 cara (mazo Marshall)	50
Estabilidad Marshall sin acondicionar (AASHTO T245 modificado)	2224 N, mín.
Estabilidad retenida (saturación e inmersión en agua a 22,2 °C por 1 hora)	50 %, mín.

Fuente: MOPT (2022)

Ensayos para medir la respuesta mecánica del material



EIC-Lanamme-INF-1175-2022

Página 21 de 59

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), en la Figura 1 se muestran los ensayos. 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.

La fuente de PAR/RAP en MAF influye fuertemente en el módulo resiliente (Soohyok et al., 2018). El uso de agregado de corrección para MAF con RAP puede aumentar sustancialmente el módulo resiliente de la mezcla, pero cada fuente de RAP tiende a presentar un porcentaje óptimo de agregado de corrección que producirá la máxima rigidez (Arámbula-Mercado et al. , 2018).

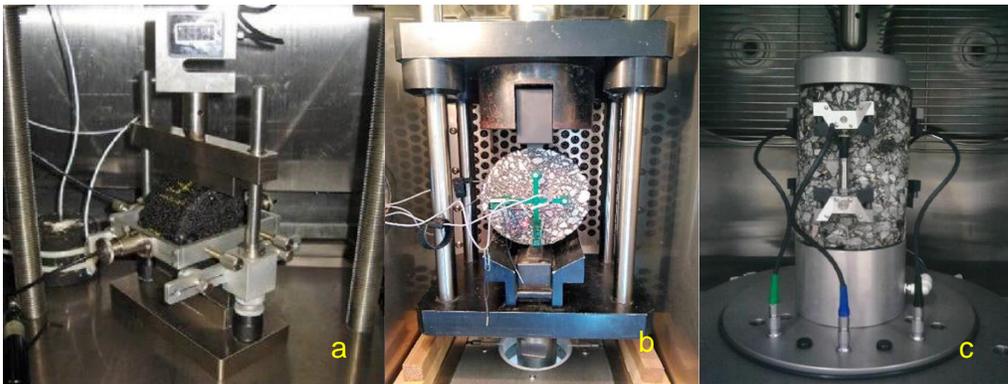


Figura 1. Ensayos para medir la respuesta estructural de MAF: a) AASHTO TP 31, b) ASTM D7369 y c) AASHTO T 342

Las mezclas en frío con RAP son significativamente menos sensibles a la temperatura que las mezclas asfálticas en caliente de graduación densa convencional (Arámbula-Mercado et al. , 2018; Carvajal, 2018; Soohyok et al., 2018). Los aditivos como el cemento o la cal reducen aún más la sensibilidad a la temperatura y aumentan ligeramente los módulos a



EIC-Lanamme-INF-1175-2022

Página 22 de 59

temperaturas más altas (Diefenderfer et al., 2016). Gu et al. (2019) determinó que las MAF con RAP generalmente presentan un módulo dinámico más bajo que las MAC en todo el rango de frecuencias. El módulo dinámico de las MAF aumenta con el aumento del tiempo de curado (Lin et al., 2017).

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) por el 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) (Figura 2):

- **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.

Sin embargo, han existido diferencias en las condiciones en que se han realizado los ensayos, por ejemplo, características de compactación, curado y temperaturas de ensayo, condiciones que inciden de manera considerable en la respuesta del material. Rezare (2017) usó tres variaciones a la hora de ejecutar el ensayo de rueda Hamburgo para evaluar MAF: sin agua a temperatura ambiente, con agua a 25 °C y a 50 °C. Babagoli (2016) realiza también ensayos de rueda de Hamburgo en MAF en agua a 60 °C y Flow number a 50°C.



EIC-Lanamme-INF-1175-2022

Página 23 de 59

Saidi (2019) realizó ensayos de susceptibilidad al agrietamiento mediante el ensayo de viga semicircular en MAF para evaluar el efecto del nivel de compactación y las condiciones de curado, para lo cual varió la cantidad de giros en el compactador giratorio (30 y 70) y temperaturas de curado (60 °C y 10 °C).



Figura 2. Ensayos de desempeño en MAF: a) viga a fatiga, b) Ideal-CT, c) viga semicircular, d) rueda de Hamburgo, e) APA, f) Flow number, g) desprendimiento, h) Cántaro e i) cohesión



EIC-Lanamme-INF-1175-2022

Página 24 de 59

Factores que afectan el desempeño

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). A continuación, se describen los factores más importantes que afectan el desempeño de las MAF.

Tipo, graduación y características del agregado

El tipo de agregado (natural/recuperado), el origen (piedra caliza, granito, etc.), la calidad (pobre o para pavimentación) y la granulometría del agregado influyen significativamente en el desempeño de la mezcla asfáltica. La cantidad de recubrimiento que se logra durante el mezclado y la adhesión agregado-asfalto dependerá de la textura de la superficie y de la carga eléctrica de la superficie del agregado, y de su granulometría. Los agregados calcáreos (con carga positiva) van a ser más afines a las emulsiones aniónicas y los agregados silíceos (con carga negativa) a las emulsiones catiónicas por atracción de cargas eléctricas (Ling et al., 2013; Ling et al. , 2016). La mejor graduación de agregados es comúnmente la graduación que produce la máxima densidad, crea mayor contacto agregado-agregado, y reduce cantidad de espacios vacíos entre las partículas de agregado. Los agregados angulares de buena calidad (roca o grava trituradas) generalmente brindan una mayor estabilidad, mientras que los agregados redondeados tienden a aumentar la trabajabilidad de la mezcla, pero con una pérdida significativa de estabilidad (Piratheepan, 2011).

Los materiales del pavimento asfáltico existentes comúnmente se eliminan durante las operaciones de repavimentación, rehabilitación o reconstrucción. Una vez retirado y procesado, el material del pavimento se convierte en RAP, el cual contiene asfalto y agregados (FHWA, 2011). La utilización del RAP reduce el costo total de construcción,



EIC-Lanamme-INF-1175-2022

Página 25 de 59

disminuye la explotación de fuentes naturales de agregado y dependiendo del grado de oxidación, puede aportar al contenido de asfalto de la mezcla. Una MAF con un 60 % RAP puede llegar a tener un desempeño mecánico superior a una MAF convencional con agregados vírgenes (Arimilli et al., 2015). Al Jumaili (2016) reportó una mayor estabilidad y menor susceptibilidad al daño por humedad en el caso de MAF con altos contenidos de RAP (75 % - 90 %) en relación con MAF convencional. Las MAF con RAP moderadamente envejecido (asfalto residual con una penetración de 20) resultan en mezclas con mayor vida a fatiga, que MAF con RAP severamente envejecido (asfalto residual con una penetración de 5) que tienen una mejor resistencia a la deformación permanente (Ojum & Thom, 2017). Las MAF con RAP, con asfalto rejuvenecido, reportan una mayor vida a la fatiga, mejor flexibilidad y una gran resistencia a niveles extremadamente altos de tráfico en relación con MAF con RAP con asfalto sin rejuvenecer (Tahri, 2021).

La variabilidad del RAP dificulta el control del contenido de asfalto, la graduación y los vacíos de aire en la producción de mezclas asfálticas en caliente o en frío, especialmente a porcentajes más altos de RAP (Solaimanian & Tahmoressi, 1996). Montañez et al. (2020) evaluó 6 fuentes de RAP y encontró una variabilidad significativa en la respuesta mecánica y el desempeño, principalmente en el porcentaje pasando en el tamiz de 75 μm , vida a fatiga, deformación permanente y daño por humedad. El uso de técnicas apropiadas para almacenar y procesar RAP puede ayudar a controlar la variabilidad de RAP. Estos incluyen la eliminación de la contaminación, la separación en apilamientos de RAP de diferentes fuentes, el procesamiento (trituration o fraccionamiento) de los apilamientos de RAP, reducción del contenido de humedad, y la caracterización del RAP procesado justo después de conformar el apilamiento (Zhou et al. , 2010).

Tipo de emulsión asfáltica

El fenómeno del recubrimiento y adherencia entre la emulsión asfáltica y los agregados está influenciado por las cargas eléctricas superficiales de ambos materiales. Se utilizan dos



EIC-Lanamme-INF-1175-2022

Página 26 de 59

tipos de emulsión asfáltica, según su carga eléctrica, para la producción de MAF: catiónica y aniónica, sin embargo, el uso de la última es muy inferior. Se han encontrado que las emulsiones catiónicas son compatibles con la mayoría de los agregados disponibles (Leech, 1994). Según la velocidad de rompimiento se han empleado emulsiones de rompimiento medio o lento dependiendo de las características granulométricas de los agregados. Las emulsiones de rompimiento medio (MS) están diseñadas para mezclarse con agregados gruesos (granulometrías abiertas), ya que no rompen de forma inmediata en contacto con el agregado, permitiendo a las mezclas permanecer trabajables durante un periodo corto de tiempo. Las emulsiones de rompimiento lento (SS) están diseñadas para una máxima estabilidad en el mezclado con los agregados, se utilizan con agregados con alto contenido de finos o granulometrías densas; estas emulsiones tienen baja viscosidad lo cual facilita el mezclado con los agregados de granulometría densa (Asphalt Institute, 1997).

La modificación con polímeros mejora las propiedades del asfalto en las emulsiones asfálticas, y esto se refleja en el desempeño de las MAF, en términos de una mayor cohesión, rigidez, resistencia al daño por humedad, resistencia al agrietamiento a bajas temperaturas y resistencia a deformación permanente a altas temperaturas (James, 2006; Ling et al. , 2016; Jiang et al., 2018; Jain & Singh , 2021).

Rellenos minerales y aditivos

Los rellenos minerales y aditivos pueden desempeñar un papel muy importante sobre las características mecánicas de las MAF con referencia a la susceptibilidad daño por humedad, la resistencia a la deformación permanente y al agrietamiento y la rigidez. Algunos de estos aditivos se utilizan como reemplazo del relleno mineral en la mezcla, como el cemento y la cal (Talaat & Hassan, 2016). A parte del cemento y la cal, diferentes materiales de desecho como cenizas volantes, polvo de caliza, polvo de granito, polvo de hornos de cemento, escoria de alto horno, entre otros, se han utilizado para mejorar las



EIC-Lanamme-INF-1175-2022

Página 27 de 59

propiedades de las MAF (Dash et al., 2015b). El cemento es uno de los aditivos más utilizados por la eficacia en la mejora del desempeño mecánico de las MAF. El mecanismo de hidratación del cemento con el agua de premezclado y la emulsión asfáltica es el principal responsable de la resistencia última. Cuando se agrega cemento a la mezcla se dan dos efectos, primero se da una remoción de parte del agua evaporable (agua de mezclado y de la emulsión asfáltica) de la mezcla para la hidratación del cemento, y segundo un cambio en el pH de la emulsión asfáltica que provoca su rompimiento. Las partículas de cemento poseen una alta superficie específica y carga negativa que ayudan a acelerar el rompimiento de la emulsión. El mecanismo de hidratación del cemento acelera el desarrollo de resistencia de las MAF (García, 2013). MAF con 1 % de cemento Portland han tenido aumentos en la estabilidad entre un 250 % a 300 % en comparación con MAF sin cemento (Head, 1974). La adición de cemento puede estimular la adhesión entre el agregado y la emulsión asfáltica que finalmente mejora el desempeño mecánico de la mezcla (Thanaya et al., 2009; Niazi & Jalili, 2009; Nageim et al., 2012). Shanbara (2021) encontró que el uso de cemento o cal en MAF resulta en un mayor módulo resiliente a la tensión indirecta ITSM (curado inicial y completo), mejor resistencia al daño por humedad, y menor deformación permanente a altas temperaturas. La relación asfalto residual/cemento se recomienda que sea como mínimo 3 para prevenir un comportamiento frágil que reduzca la flexibilidad de la mezcla y la vida a fatiga (Kavussi & Modarres, 2010; AASHTO, 2021b).

Contenido de fluidos

El contenido de agua juega un papel importante en el desempeño de MAF, ya que mejora el recubrimiento de emulsión asfáltica en la superficie del agregado y la trabajabilidad de la mezcla. Sin embargo, la adición excesiva de agua para el premezclado puede afectar negativamente ya que inhibe la compactación y da como resultado un desempeño deficiente durante la vida temprana de las mezclas compactadas. Nassar (2016) investigó



EIC-Lanamme-INF-1175-2022

Página 28 de 59

el efecto de la interacción del contenido de emulsión asfáltica, el agua de premezclado y el tiempo de curado sobre las propiedades mecánicas y volumétricas de la MAF. Se observó que el agua de premezclado era un parámetro importante para determinar los vacíos de aire. La proporción de emulsión asfáltica y el agua de premezclado con el mismo contenido de fluidos totales influyó en la resistencia/rigidez de MAF. La proporción óptima de emulsión asfáltica y agua de premezclado no estuvo significativamente influenciada por la temperatura de curado. Sin embargo, la rigidez de MAF depende mucho más del contenido de asfalto residual que del contenido de agua durante el proceso de mezclado (Gómez et al., 2015). El efecto lubricante sobre los agregados debido al recubrimiento de emulsión asfáltica aumenta la trabajabilidad de la mezcla, lo que permite una mayor tasa de densificación (Dash et al., 2022). El contenido de fluidos totales de la MAF está comprendido por la humedad de los agregados, el agua de premezclado y la emulsión asfáltica. La máxima densidad seca y su respectivo contenido óptimo de fluidos totales (COFT) se determina mediante ensayos de relación densidad-humedad (Wirtgen, 2004). Sin embargo, el contenido óptimo de fluidos totales podría ser difícil de identificar en MAF con 100 % RAP de graduación gruesa con deficiencia de finos. En estos casos algunas investigaciones han usado un rango de contenidos de humedad de mezclado entre 1,5 % y 4,5 % (NCHRP, 2021).

Tipo y nivel de compactación

El método y el nivel de compactación tienen una gran influencia en las propiedades y el desempeño de las mezclas asfálticas. La compactación Marshall, con un nivel de compactación de diseño de 50 golpes por cara, es el método convencional para la elaboración de especímenes compactados de MAF en el laboratorio (Asphalt Institute, 1997; Jain & Singh, 2021; Deb & Singh, 2022; Dash et al., 2022). El nivel de compactación Marshall por impacto dependerá de las cargas de tráfico anticipadas en el diseño, para un tráfico leve ($ESAL < 10^4$), 35 golpes por cara, para un nivel de tráfico medio ($10^4 < ESAL < 10^6$), 50 golpes por cara y para un nivel de tráfico alto ($ESAL > 10^6$), 75 golpes por cara (Asphalt



EIC-Lanamme-INF-1175-2022

Página 29 de 59

Institute, 2014). Por su parte, el compactador giratorio Superpave (SGC, por sus siglas en inglés) produce una acción de amasado sobre la muestra que simula mejor la compactación de campo (Jain & Singh, 2021). Un excesivo nivel de compactación (Marshall o giratorio) da como resultado la degradación de los agregados y el sangrado de la emulsión asfáltica en la mezcla compactada (Dash & Panda, 2018). El compactador giratorio al tener un movimiento de amasado puede compactar mezclas sueltas en una condición ligeramente saturada, no obstante, el compactador por impacto Marshall requiere mezclas sueltas menos saturadas para evitar el rebote del martillo (Thanaya, 2007). En general, la compactación de MAF debe llevarse a cabo cuando la mezcla suelta no está demasiado saturada o seca. A diferencia de la compactación Marshall, no se especifica un número de giros de diseño estándar para la compactación giratoria con MAF. La compactación giratoria con el concepto de punto de entramamiento es un método adecuado para la compactación MAF (Hemsley, 2002). En este método, muestras con diferentes contenidos de asfalto residual se compactan primero con 200 giros en moldes perforados, lo que representa la máxima densidad posible después del tráfico. Luego se examina la relación entre la altura del espécimen y el número de giros para determinar el punto de entramamiento. El punto de entramamiento es el número de giros en los cuales no hay un cambio significativo en la altura del espécimen después de tres giros consecutivos. El punto de entramamiento es un criterio para identificar mezclas fáciles o difíciles de compactar. Una mezcla con menos de 30 giros se considera como blanda, una mezcla con más de 70 giros se considera como difícil de compactar en campo. Las mezclas difíciles de compactar requerirán ajuste en el contenido de humedad o el tipo y cantidad de emulsión asfáltica, o inclusive en la granulometría. El punto de entramamiento para algunas MAF se ha alcanzado entre 40 y 75 giros (Dash et al., 2022). Una cantidad excesiva de líquidos en MAF no favorece la compactación y evita que las mezclas obtengan un contenido de vacíos aceptable, lo que reduce su resistencia. Serfass et al. (2004) determinó que el módulo de rigidez aumenta con el porcentaje de compactación. El tipo y nivel de compactación para mezclas en frío



EIC-Lanamme-INF-1175-2022

Página 30 de 59

varía de acuerdo con cada metodología de diseño o autor, en la Tabla 8 se resumen varios tipos y niveles de compactación utilizados.

Tabla 8. Resumen de tipos de compactación para MAF

Autor	Tipo de compactación	Nivel de compactación	Presión vertical	Angulo interno de giro
Asphalt Institute (1997)	Marshall	50 golpes/cara		
Asphalt Institute (2008)	Marshall	50 golpes/cara		
AASHTO (2021)	Marshall	75 golpes/cara		
Asphalt academy (2009)	Marshall	75 golpes/cara		
ASTM (2013)	Giratoria	33 giros	600 kPa	1,16 °
AASHTO (2021)	Giratoria	30 giros	600 kPa	1,16 °
Flores et al. (2020)	Giratoria	200 giros	600 kPa	0,82 °
Orosa et al. (2020)	Giratoria	150/200 giros	600 kPa	0,82 °
Thanaya (2002)	Giratoria	120/80 giros	240 kPa	2 °
Ling et al. (2018)	Giratoria	100 giros	600 kPa	1,16 °

Contenido de vacíos

Las mezclas en frío se asocian con altos contenidos de vacíos de aire y baja estabilidad, lo cual las hace más susceptibles al daño por humedad y a la deformación permanente (Jain & Singh, 2021; Deb & Singh, 2022; Dash et al., 2022). El contenido de vacíos de aire en las MAF depende principalmente del contenido de asfalto residual, el contenido de agua (aportado por el agregado y la emulsión asfáltica), la granulometría, y el tipo y energía de compactación (Asphalt Institute, 2014; Lin & Xiao, 2020). En MAF, el agua atrapada entre los agregados crea vacíos de aire, y la composición volumétrica va variando durante del curado por la evaporación del agua. Como resultado directo de la humedad residual dentro de la mezcla, el análisis volumétrico tradicional empleado para MAC no se puede aplicar directamente y debe modificarse para las MAF. Debido a esto, los métodos de diseño de mezcla en su mayoría no proveen una guía para el análisis volumétrico detallado considerando la presencia de humedad en la mezcla (Ling & Bahia, 2018). Para el cálculo



EIC-Lanamme-INF-1175-2022

Página 31 de 59

preciso del contenido de vacíos se debe considerar el contenido de humedad en los especímenes de ensayo y realizar ensayos de gravedad máxima teórica en la mezcla suelta y libre de humedad (Asphalt Institute, 2008). El cálculo de los parámetros volumétricos como VBA (volumen de asfalto absorbido), VBE (volumen de asfalto efectivo), VMA (vacíos de agregado mineral) y VFA (vacíos llenos de asfalto) implica el uso de ecuaciones que consideran el AVBA (volumen asumido de asfalto absorbido) que depende de la presencia de humedad en la mezcla (Ling & Bahia, 2018). De forma aproximada, se puede calcular la volumetría considerando la gravedad específica de los agregados, el contenido de asfalto residual, el contenido de humedad de los especímenes y la gravedad específica de los especímenes compactados (Asphalt Institute, 1997). Contrario a las MAC, no existe un criterio ampliamente aceptado para el rango de vacíos de aire para las MAF. Se ha reportado que las mezclas en frío recién colocadas en sitio pueden tener un contenido de vacíos entre 15 % y 25 %, el cual va disminuyendo durante su vida media de servicio hasta 10 % y 15 %. En la Tabla 9 se muestran rangos de vacíos de aire reportados en la literatura.

Tabla 9. Rango de contenido de vacíos para MAF

Autor	Rango de vacíos de aire
Niazi & Jalili (2009)	9 % - 14 %
Piratheepan (2011)	9 % - 11 %
Valentin et al. (2016)	10 % - 20 %
Carvajal (2018)	12 % - 14 %
Ling & Bahia (2018)	10 % - 15 %
Xiao et al. (2018)	10 % - 15 %
Saidi (2019)	6 % - 17 %
Flores et al. (2020)	10 % -15 %
Lin & Xiao (2020)	7 % - 14 %



EIC-Lanamme-INF-1175-2022

Página 32 de 59

Efecto del tiempo y temperatura de curado

Las MAC alcanza su máxima resistencia dentro de las 24 horas posteriores a la construcción, mientras que las MAF requiere tiempo adicional para alcanzarla. El tiempo requerido por la MAF para alcanzar su máxima resistencia se denomina tiempo de curado (Jain & Singh , 2021). El curado es el proceso mediante el cual las MAF compactadas disipan agua a través de la evaporación, repulsión de carga entre partículas o trayectorias de flujo inducidas por la presión de poro y desarrollan resistencia a tensión y rigidez (Jenkins, 2000). El proceso de curado depende en gran medida de las condiciones climáticas in situ. El clima cálido y seco acelera el proceso de curado, mientras que el clima húmedo y frío lo ralentiza. Dado que el proceso de curado es una función de disipación y extracción de agua, los ciclos de secado y humedecido también afectan la duración del curado. Los principales factores que afectan el proceso de curado y su duración en las MAF son (Jain & Singh , 2021): absorción de los agregados, composición mineral de los agregados, tipo de emulsión asfáltica, cantidad de agua presente en la mezcla después de la compactación, tipo de mezcla (bien graduada, abierta, discontinua), contenido de vacíos en la mezcla, tipo y energía de compactación, carga y volumen de tráfico, y las condiciones climáticas in situ.

La resistencia a la tensión de la MAF aumenta considerablemente al aumentar la temperatura de curado de 23 °C a 60 °C (Roberts et al. , 1984). Bocci et al. (2011) y Doyle et al. (2013) encontraron un incremento significativo del desempeño de MAF a medida que aumenta el tiempo de curado y la temperatura de curado (un curado de 14 días a 20 °C equivale a 7 días a 40 °C). El curado completo puede tardar entre dos meses y dos años en el campo (Santucci, 1977; Leech, 1994; Thanaya et al. , 2007). Las MAF requieren un curado acelerado antes de los ensayos de laboratorio debido a su baja resistencia inicial para simular el desempeño del material a mediano y largo plazo in situ (Jenkins, 2000). Se han investigado una gran variedad de regímenes de curado en el laboratorio para las MAF, en la Tabla 10 se presenta un resumen de algunos. Se observa que la temperatura de



EIC-Lanamme-INF-1175-2022

Página 33 de 59

curado en el horno varía de 20 °C a 60 °C, y los tiempos de curado desde 1 día hasta 21 días. Sin embargo, se debe considerar para el curado en el laboratorio la temperatura promedio del pavimento para cada clima local en particular.

Tabla 10. Resumen de regímenes de curado recomendados para MAF

Autor	Acondicionamiento en horno		Equivalente in situ
	Temperatura (°C)	Tiempo (días)	
Kekwick (2005)	60	1,3,7	1 año
Maccarrone (1994)	60	3	1
Kishore et al. (2008)	60	2	28 días
Asphalt Institute (2008)	60	2	-
Thanaya et al. (2009)	40	18-21	-
Jenkins (2000)	40	3	30 días
Asphalt academy (2009)	40	3	6 meses
Asphalt Institute (1997)	38	1	1 semana

METODOLOGÍA PROPUESTA

En la Figura 3 se muestra un esquema con las diferentes etapas del proyecto. Seguidamente se explica detalladamente cada una de las fases.

Fase 1: Muestreo, caracterización de materiales y diseño de mezcla

Muestreo de materiales

Se propone muestrear los siguientes materiales: material recuperado de pavimentos asfálticos (RAP) sin procesar y emulsión catiónica de rompimiento lento (CSS-1h) de uso general. Ambos materiales se muestrearán en el Plantel del MOPT en Colima, Tibás. Adicionalmente, como fuente de agregado se utilizará un RAP procesado que se encuentra almacenado en el LanammeUCR y cuyo número de muestra es M-636-21. Se requerirá adquirir cemento de uso general. Posterior al muestreo se procederá a caracterizar los materiales.



EIC-Lanamme-INF-1175-2022

Página 34 de 59

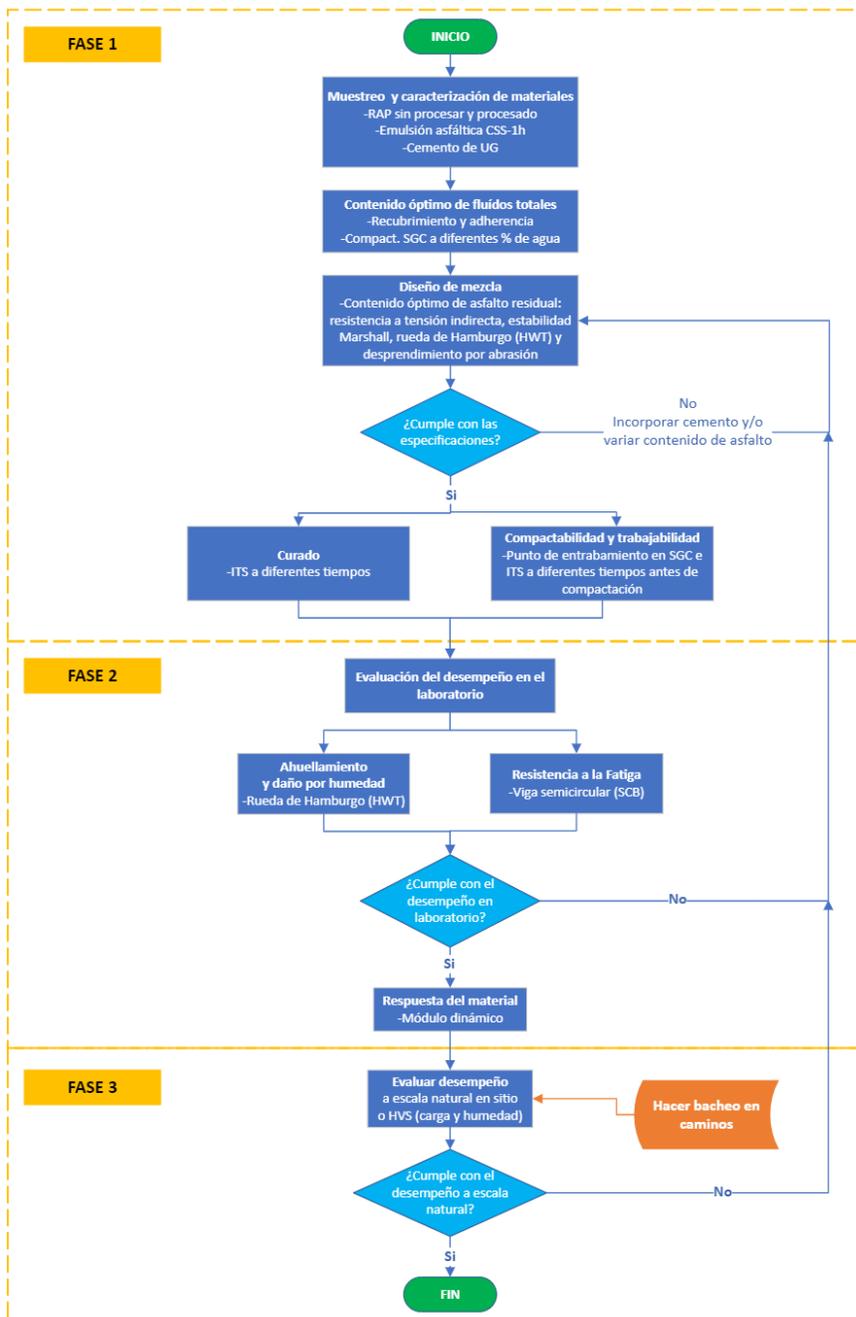


Figura 3. Metodología propuesta



EIC-Lanamme-INF-1175-2022

Página 35 de 59

Caracterización de los agregados

La caracterización del RAP (sin procesar y procesado) comprende los ensayos indicados en 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 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 agregado extraído indica que se requiere de un agregado de corrección, se muestreará un agregado que permita cumplir con los criterios granulométricos y cumpla con requisitos de calidad de la sección 703.09 del CR 2020.

Caracterización de la emulsión CSS-1h

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

- Viscosidad Saybolt Furol a 25 °C (ASTM D7496).



EIC-Lanamme-INF-1175-2022

Página 36 de 59

- 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.

Diseño de mezcla

Se realizarán dos diseños de mezcla: uno con RAP sin procesar y otro con RAP procesado. El diseño de mezcla se basa en los procedimientos y especificaciones de las guías y normas de ensayo MS-14, MS-19, AASHTO PP86 y AASHTO MP33.

El RAP deberá estar seco al aire y se separará por fracciones, para conformar los baches de acuerdo con la granulometría, de la siguiente manera:

- Pasando el tamiz de 37,5 mm, retenido en el tamiz de 25,0 mm.
- 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.

Previo a iniciar con los ensayos de diseño se calcula un contenido inicial de emulsión asfáltica que se toma como referencia para los posteriores ensayos de diseño. La Ecuación 1, para superficie de ruedo, se basa en criterios granulométricos (Asphalt Institute, 2008):

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



EIC-Lanamme-INF-1175-2022

Página 37 de 59

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.

Recubrimiento y adherencia

Se realizan ensayos de recubrimiento y adherencia para evaluar preliminarmente la capacidad de recubrimiento y compatibilidad de la emulsión asfáltica con el agregado de trabajo. Se preparan baches de 1000 g los cuales se mezclan variando el contenido de agua y utilizando el contenido inicial de emulsión. El mezclado a mano es por 60 s máximo o hasta que se vea homogénea la mezcla. Las mezclas se curan a 40 °C por 24 horas y luego se inspecciona visualmente el porcentaje de recubrimiento. Se determina el contenido de agua de premezclado para el recubrimiento óptimo. Se elabora una mezcla con el contenido de agua de premezclado y emulsión asfáltica, se cura y se realiza el ensayo de adherencia cuarteando 100 g de mezcla y sometiéndola a 3 minutos de inmersión en agua hirviendo a 100 °C aproximadamente. Se retira el agua, se coloca la mezcla en papel absorbente y se deja secar. Posteriormente se inspecciona visualmente el porcentaje de recubrimiento remanente.

Contenido de óptimo de fluidos totales

Para determinar el contenido óptimo de fluidos totales se realizan ensayos de densidad-humedad con el compactador giratorio Superpave. El contenido de emulsión inicial se mantiene constante mientras se varía el contenido de humedad. Se determina el contenido de humedad y fluidos totales con el cual se obtiene la máxima densidad seca. Los baches se conforman para obtener especímenes de ensayo de 150 mm de diámetro y 95 mm \pm 5 mm de altura. El mezclado se hará de forma manual o mecánica, mezclando el agua o la emulsión asfáltica por máximo 60 s. La mezcla no debe estar demasiado saturada o seca para la compactación. Al trabajar con RAP el contenido óptimo de fluidos totales podría ser difícil de identificar por la deficiencia de finos en la graduación. En estos casos se ha usado



EIC-Lanamme-INF-1175-2022

Página 38 de 59

un rango de contenidos de humedad de mezclado entre 1,5 % y 4,5 % por peso de agregado.

Las características de compactación de los especímenes de ensayo (diseño o desempeño) se muestran en la Tabla 11.

Tabla 11. Características de compactación

Tipo de compactación	Nivel de compactación	Presión vertical	Angulo interno de giro
Giratoria	30 giros	600 kPa	1,16 °
Marshall	50 golpes/cara	-	-

Contenido óptimo de asfalto residual

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

- Resistencia a la tensión indirecta (AASHTO T283 modificado).
- Estabilidad y flujo Marshall (AASHTO T245 modificado).
- Rueda de Hamburgo (AASHTO T324).
- Gravedad máxima teórica de la mezcla suelta (AASHTO T209).
- Gravedad específica de los especímenes compactados (AASHTO T166)
- Desprendimiento por abrasión (raveling test) (ASTM D7196).

En la Tabla 12 se indican las características de curado y acondicionamiento para cada ensayo. Las mezclas se preparan en incrementos de 1 % de asfalto residual, con dos incrementos para arriba y para abajo del contenido inicial de asfalto residual calculado según la granulometría.



EIC-Lanamme-INF-1175-2022

Página 39 de 59

Tabla 12. Características de curado y acondicionamiento de especímenes de diseño

Ensayo	Tamaño de espécimen	Curado	Acondicionamiento	Cantidad de especímenes por contenido de asfalto
Tensión indirecta (AASHTO T283 modificado)	150 mm de diámetro y 95 ± 5 mm de altura		Saturación con vacío entre 13 kPa a 67 kPa de presión absoluta, más inmersión en agua a 25 ± 1 °C por 24 ± 1 h	6
Estabilidad y flujo Marshall (AASHTO T245 modificado)	100 mm de diámetro y 63 mm ± 5 mm	1 día a temperatura ambiente, más 72 h a 40 ± 1 °C		6
Rueda de Hamburgo (AASHTO T324)	150 mm de diámetro y 62 mm ± 2 mm de altura		-	4
Gravedad máxima teórica (AASHTO T209)	2500 g, suelta		-	2
Desprendimiento (ASTM D7196)	150 mm de diámetro y 70 mm ± 5 mm de altura	4 h ± 5 min. A 25 ± 1 °C	-	3

Los especímenes de resistencia a la tensión indirecta, rueda de Hamburgo y desprendimiento se compactan con el compactador giratorio Superpave y los especímenes de estabilidad y flujo Marshall con el compactador Marshall, según las características indicadas en la Tabla 11. Se mezclan especímenes adicionales para la gravedad máxima teórica.

Después del periodo de curado se realiza la gravedad específica de los especímenes compactados y la gravedad máxima teórica de la mezcla suelta de acuerdo con las normas



EIC-Lanamme-INF-1175-2022

Página 40 de 59

de ensayo AASHTO T166 y AASHTO T209 respectivamente. Se calcula el contenido de vacíos de los especímenes compactados de acuerdo con la norma de ensayo AASHTO T 269. El contenido de vacíos objetivo deberá estar entre 10 % y 15 %.

Para los ensayos de tensión indirecta y estabilidad y flujo Marshall la cantidad total de especímenes se divide en dos subgrupos (sin y con acondicionamiento) de tres especímenes cada uno de modo que el promedio del contenido de vacíos de aire de los dos subconjuntos sea aproximadamente igual.

El ensayo de Rueda de Hamburgo se realizará a una temperatura de 40 °C, con el objetivo de observar el punto de inflexión de la deformación relacionado con el daño por humedad y completar las 20 000 pasadas.

El contenido óptimo de asfalto residual será aquel que cumpla con los criterios en las Tabla 1 y 3. Si la mezcla no cumpliera con los criterios de diseño con respecto al daño por humedad se incorporará relleno mineral activo como cemento hidráulico hasta una relación asfalto/relleno menor a 3 para prevenir un comportamiento rígido en la mezcla propenso al agrietamiento por fatiga.

Curado y compactabilidad

Una vez definido el contenido óptimo de asfalto residual se realizan pruebas para medir el efecto del tiempo de curado en el desarrollo de la resistencia a tensión indirecta y la pérdida de humedad, como una medida del tiempo requerido para la apertura al tráfico. Los especímenes compactados se cubrirán con una lámina plástica, dejando expuesta únicamente la cara superior, tratando de simular condiciones de reales de construcción, donde la evaporación y pérdida de agua ocurrirá en su gran mayoría en la superficie de la capa colocada. Para el control de la pérdida de humedad se tomará el peso del espécimen después de la compactación y antes de la falla para cada tiempo de curado.



EIC-Lanamme-INF-1175-2022

Página 41 de 59

Se medirá el efecto del periodo de tiempo entre el mezclado y la compactación en la compactabilidad de la mezcla por medio de la determinación del punto de entramamiento con el compactador giratorio Superpave y la resistencia a la tensión indirecta a diferentes tiempos de demora antes de la compactación. Los especímenes de resistencia a la tensión indirecta se compactan y curan de acuerdo con las condiciones de la Tabla 11 y 12. Esta etapa dentro del esquema es de suma importancia pues permitirá valorar y establecer cuidados a tener en cuenta a la hora de colocar una mezcla asfáltica en las condiciones críticas que podrían inclusive restringir el uso de las MAF a ciertas condiciones que optimicen sus propiedades.

En la Tabla 13 se detallan las condiciones de los ensayos de tiempo de curado y compactabilidad de la mezcla.

Tabla 13. Condiciones de ensayos de tiempo de curado y compactabilidad

Ensayo	Tamaño de espécimen	Temperatura de ensayo	Tiempo	Cantidad de especímenes
Tiempo de curado	95 ± 5 mm	Ambiente	1, 4, 24, 72 y 168 horas	3 por cada tiempo
Compactabilidad	95 mm	30 °C	1, 30, 60, 120 y 240 minutos	3 por cada tiempo

Fase 2: Evaluación del desempeño y respuesta del material en el laboratorio

La evaluación del desempeño en el laboratorio comprende los siguientes ensayos:

- Ahuellamiento y susceptibilidad al daño por humedad mediante el ensayo de Rueda de Hamburgo (AASHTO T324).
- Resistencia al agrietamiento mediante viga semicircular a temperaturas intermedias (ASTM D8044).



EIC-Lanamme-INF-1175-2022

Página 42 de 59

Los especímenes se elaboran con el contenido óptimo de asfalto residual y en las condiciones de compactación y curado descritas en las Tablas 11 y 12.

El criterio de falla para Rueda de Hamburgo es una profundidad de ahuellamiento máxima de 12,5 mm a las 20 000 pasadas (NCHRP, 2021). Para viga semicircular se recomienda un valor en la tasa de liberación de energía crítica de deformación (J_c) entre 0,5 kJ/m² y 0,6 kJ/m² para garantizar una adecuada resistencia al agrietamiento. Altos valores de J_c son deseables para mezclas resistentes al agrietamiento (ASTM, 2016). En la Tabla 14 se indican las condiciones las características de los ensayos de desempeño.

Tabla 14. Condiciones de ensayos de desempeño

Ensayo	Tamaño de espécimen	Acond.	Temperatura de ensayo	Carga y velocidad	Cantidad de especímenes
Rueda de Hamburgo (AASHTO T324)	150 mm de diámetro y 62 ± 2 mm de altura	45 min temperatura de ensayo	40 ± 1 °C (en agua)	703 ± 4,5 N a 52 ± 2 pasadas/min	4
Viga semicircular (ASTM D8044)	150 mm de diámetro y 57 mm de altura	120 ± 0,5 h a 85 ± 3 °C	25 ± 0,3 °C	0,5 mm/min	12

Al terminar los ensayos de desempeño se realiza el ensayo de módulo dinámico de acuerdo con la norma de ensayo AASHTO T342 para medir la respuesta del material en un rango de frecuencias de carga y temperaturas para así generar la curva maestra, insumo necesario para el diseño de pavimentos. En la Tabla 15 se resumen las condiciones del ensayo de módulo dinámico. Los especímenes se elaboran con el contenido óptimo de asfalto residual y en las condiciones de compactación y curado descritas en las Tablas 11 y 12.



EIC-Lanamme-INF-1175-2022

Página 43 de 59

Tabla 15. Condiciones de ensayo de módulo dinámico

Ensayo	Tamaño de espécimen	Acond.	Temperatura de ensayo	Frecuencia de carga	Cantidad de especímenes
Módulo dinámico (AASHTO T342)	102 ± 2 mm de diámetro y 150 ± 2,5 mm de altura (núcleo de espécimen de 150 mm, SGC)	-	4,4, 21,1, 37,8 y 54 °C	0,1, 0,5, 1,0, 5, 10 y 25 Hz	3

Fase 3: Evaluación del desempeño a escala real

Partiendo de la necesidad del MOPT de implementar las mezclas en frío con RAP se propone realizar dos tipos de bacheo superficial con la mezcla asfáltica en frío diseñada: de emergencia y formal. Ambos a nivel superficial, es decir en sitios donde no estén afectadas las capas subyacentes a la carpeta asfáltica. Los bacheos se realizarán en los sitios recomendados por el personal de MOPT y se evaluará:

- Almacenamiento de materiales.
- Producción en planta.
- Transporte, tiempo entre la fabricación y la compactación, preparación de superficie, colocación y compactación en sitio.
- Verificación de propiedades de la mezcla en el laboratorio (Resistencia a la tensión indirecta, AASHTO T283 modificado)
- Desempeño en el tiempo para registrar deterioros como: desprendimiento de agregados o parte de la mezcla, ahuellamiento, agrietamiento, exudación, calidad de ruedo, rugosidad superficial, tiempo de duración en buenas condiciones, condiciones climáticas (temperatura, humedad relativa, presencia de lluvias), etc.

En la Tabla 16 se indica la frecuencia de cada actividad.



EIC-Lanamme-INF-1175-2022

Página 44 de 59

Tabla 16. Actividad para evaluar y frecuencia

Actividad	Frecuencia
Almacenamiento de materiales	1
Producción en planta	1
Colocación de dispositivos de prevención y control del tránsito	2
Transporte, preparación de superficie, colocación y compactación en sitio	2
Verificación de propiedades de la mezcla	1
Desempeño en el tiempo	1 vez a la semana el primer mes de colocado, y después una vez al mes por 4 meses.

El bacheo de emergencia será de tipo “vaciar y compactar” y comprenderá los siguientes pasos (Asphalt Institute, 2009):

1. Retirar los residuos y el agua del bache con una escoba de cerdas duras.
2. Vaciar el material en el bache de manera que, después de compactarse, quede una corona de 3 a 6 mm.
3. Compactar el material con pisón o los neumáticos del camión.
4. Abrir al tráfico tan pronto como esté despejado de obreros y equipos.

El bacheo formal se hará sin y con sello asfáltico, y tendrá el siguiente procedimiento (Asphalt Institute, 2009; MOPT, 2015; PITRA, 2015):

1. Identificar y marcar la zona dañada. Es necesario que la zona marcada cubra al menos 30 cm más del pavimento sano, separada de la zona deteriorada.
2. Cortar a lo largo del perímetro marcado con una sierra con punta diamante para eliminar todo el pavimento deteriorado.



EIC-Lanamme-INF-1175-2022

Página 45 de 59

3. Remover cualquier resto de agua o residuos que contenga el bache.
4. Aplicar 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.
5. Después de que la emulsión asfáltica rompa, colocar la mezcla asfáltica en frío, y compactar con rodillo vibratorio o compactador de plancha vibratorio, dependiendo del tamaño del bache, hasta dejar a ras del nivel de la superficie circundante.
6. Permitir que la mezcla cure por un periodo de una hora.
7. **Sello asfáltico.** Colocar un riego de emulsión asfáltica de rompimiento rápido junto con una aplicación de agregado fino (material de secado). Dejar curar por una hora.
8. Abrir al tráfico tan pronto como esté despejado de obreros y equipos.

Las mismas actividades para el bacheo se realizarán en una pista de ensayo a escala natural en el Simulador de Vehículos Pesados (HVS por sus siglas en inglés). Se removerá una franja de la carpeta asfáltica de un tramo experimental ya ensayado y se realizará un bacheo formal (sin y con sello asfáltico) con la mezcla asfáltica en frío diseñada. El tiempo simulará condiciones representativas en sitio y será en función de los resultados obtenidos en la Fase 1. Se aplicará un número de ejes equivalentes con cargas de 40 kN hasta llegar a un criterio de falla de 16 mm de deformación. Los ensayos de realizarán en condición seca y húmeda. La condición húmeda consistirá en aplicar un riego de agua sobre la superficie para simular el efecto de la lluvia. Se aplicará un mínimo de 20 000 ejes equivalentes.

RESULTADOS / PRODUCTOS ESPERADOS

X	Artículo científico en revista indexada		Libro
	Artículo científico en revista indexada		Capítulo de libro
X	Artículo de divulgación	X	Especificaciones técnicas
	Ponencias en congresos		Hardware



EIC-Lanamme-INF-1175-2022

Página 46 de 59

Conferencias o seminarios	Software
Patentes	Trabajos o proyectos de graduación
Diseño de cursos	X Nuevas metodologías
Formación de la comunidad científica	X Informe a la Administración

Generación de nuevo conocimiento: Científico y/o Académico

Resultado/Producto esperado	Indicador	Beneficiario
Metodología de diseño para mezclas en frío con pavimento asfáltico recuperado	Metodología establecida	Entidades públicas y privadas del sector transporte que desarrollen diseños de pavimentos

Impacto a nivel nacional en la comunidad científica

Resultado/Producto esperado	Indicador	Beneficiario
Generación de al menos un artículo científico	Artículo	Comunidad científica

Beneficios sociales y/o culturales

Resultado/Producto esperado	Indicador	Beneficiario
Mejorar la calidad de vida de los usuarios al tener caminos más durables y en mejores condiciones. Sostenibilidad al utilizar materiales amigables con el ambiente. Eficiencia en la inversión de recursos públicos. Técnica puede generar la participación de microempresas de mantenimiento. Atención a una necesidad específica de la Administración. Fortaleciendo el vínculo MOPT - LanammeUCR - RECOPE	Mejora en la infraestructura vial	Costarricenses

Fortalecimiento de vínculos de apoyo y reconocimiento de la Universidad de Costa Rica con el sector externo



EIC-Lanamme-INF-1175-2022

Página 47 de 59

Resultado/Producto esperado	Indicador	Beneficiario
Transferencia de tecnología y divulgación	Artículo, cursos, talleres	Público relacionado con la temática

CONFORMACIÓN DEL EQUIPO DE TRABAJO

En la Tabla 17 se detalla la conformación del equipo de trabajo para el proyecto de investigación.

Tabla 17. Participantes del equipo investigador

Investigador/Colaborador	Grado académico	Estado en régimen	Función en el proyecto	Dedicación semanal (horas)	Meses
Ing. Juan Carlos Múnera Miranda	Licenciatura	Interino	Investigador principal	20	10
Ing. Fabián Elizondo Arrieta	Maestría	Interino	Investigador asociado	4	10
Ing. Andrea Ulloa Calderón	Maestría	Interino	Investigador asociado	4	10

Tabla 18. Participantes del equipo investigador (investigación en conjunto LanammeUCR-MOPT)

Investigador/Colaborador	Grado académico	Función en el proyecto	Dedicación semanal (horas)	Meses
Ing. Hugo Chaves Gutiérrez	Licenciatura	Investigador asociado	4	17



EIC-Lanamme-INF-1175-2022

Página 48 de 59

CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES

A continuación, se muestran las actividades detalladas de acuerdo con el esquema experimental propuesto y organizadas de manera tal que se cumpla con cada uno de los objetivos específicos planteados (Tabla 19).

Tabla 19. Actividades para el cumplimiento de los objetivos planteados en el proyecto

Objetivo específico 1: Diseñar las mezclas en frío en el laboratorio evaluando propiedades físicas y mecánicas para comprobar el cumplimiento de criterios mínimos de calidad.		
Actividades	Resultados esperados y/o entregables	Duración estimada de la actividad (meses)
-Muestreo de materiales.	Informes de laboratorio	1
-Caracterización de materiales	Informes de laboratorio	1
-Diseño de mezcla	Informes de laboratorio	5
-Generar reporte de avance	Reporte de avance	1
Objetivo específico 2: Evaluar el desempeño de las mezclas diseñadas mediante ensayos que consideren las condiciones de aplicación y los principales deterioros esperados.		
Actividades	Resultados esperados y entregables	Duración estimada de la actividad (meses)
-Evaluación del desempeño	Informes de laboratorio	2
-Evaluación de la respuesta mecánica	Informes de laboratorio	2
-Generar reporte de avance	Reporte de avance	1
Objetivo específico 3: Verificar el desempeño en condiciones reales de servicio a escala natural mediante tramos de prueba.		
Actividades	Resultados esperados y entregables	Duración estimada de la actividad (meses)
-Bacheo en sitio		4
-Bacheo en tramo de prueba HVS		1
-Generar informe final	Informe final	1
Duración total estimada del proyecto:		19 meses

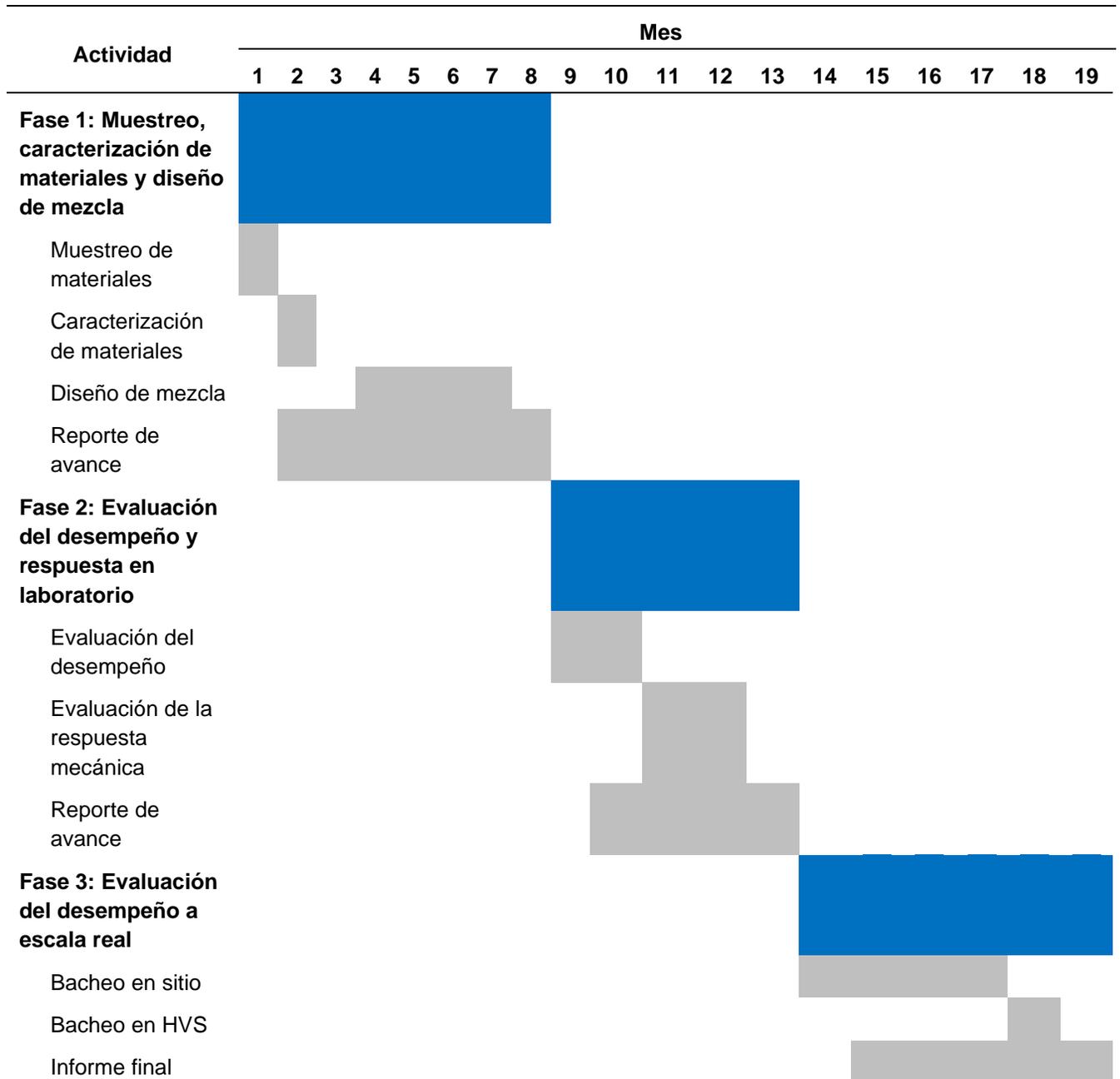
En la Tabla 20 se muestra el cronograma propuesto del proyecto. Algunas actividades se pueden realizar en paralelo con otras.



EIC-Lanamme-INF-1175-2022

Página 49 de 59

Tabla 20. Cronograma de la investigación





EIC-Lanamme-INF-1175-2022

Página 50 de 59

METAS Y ENTREGABLES

Se deberá entregar un informe parcial al finalizar cada año, de acuerdo con lo establecido en el cronograma de trabajo y un informe final al cumplirse el plazo de ejecución del proyecto.

Revisión de la normativa sección correspondiente del CR 2020 y guía con el resumen del procedimiento de diseño y resultados obtenidos y especificaciones.

RECURSOS REQUERIDOS

En la Tabla 21 se observa el costo de personal para el desarrollo del proyecto.

Tabla 21. Costo de personal para el desarrollo del proyecto

Investigador	Cantidad de horas (h)	Costo unitario (¢/hora)	Costo (¢)
Ing. Juan Carlos Múnera Miranda	816	¢ 25 000	¢ 20 400 000
Ing. Fabián Elizondo Arrieta	272	¢ 25 000	¢ 6 800 000
Ing. Ellen Rodríguez Castro	272	¢ 25 000	¢ 6 800 000
Total			¢ 34 000 000

En la Tabla 22 se muestra la cantidad y precio de los ensayos requeridos.

Tabla 22. Costo de ensayos para el desarrollo del proyecto

Material	Ensayo	Norma	Cantidad	Costo unitario (¢)	Costo (¢)
RAP	Granulometría	ASTM C136/117	2	51 000	102 000
	Abrasión de los Ángeles	ASTM C 31	2	72 500	145 000
	Equivalente de arena	AASHTO T 76	2	34 500	69 000
	Gravedad específica grueso y fino	ASTM C127/128	2	94 500	189 000
	Índice de durabilidad grueso y fino	ASTM D3744	2	113 000	226 000
	Arcilla y partículas friables	AASHTO T112	2	23 000	46 000



EIC-Lanamme-INF-1175-2022

Página 51 de 59

Material	Ensayo	Norma	Cantidad	Costo unitario (¢)	Costo (¢)
	Caras fracturadas	ASTM D5821	2	22 000	44 000
	Granulometría, agregado extraído	ASTM D5444	2	64 500	129 000
	Contenido de asfalto por extracción	ASTM D2172	2	101 500	203 000
	Contenido de agua	AASHTO T110	2	55 000	110 000
	Penetración del residuo asfáltico	ASTM D5	2	41 000	82 000
	Reología del residuo asfáltico	ASTM D7175	2	152 500	305 000
	Recuperación del ligante asfáltico	ASTM D5404	2	19 500	39 000
	Resistencia a tensión indirecta	AASHTO T283	2	23 000	46 000
Emulsión asfáltica	Viscosidad Saybolt a 25 °C	ASTM D7496	2	75 000	150 000
	Estabilidad al almacenamiento	ASTM D6930	2	43 500	87 000
	Carga de partícula	ASTM D7402	2	32 500	65 000
	Ensayo de malla N °20	ASTM D6933	2	52 500	105 000
	Residuo asfáltico y aceite destilado	ASTM D6997	2	78 500	157 000
	Penetración a 25 °C, 100 g, 5 s	ASTM D5	2	41 000	82 000
	Ductilidad, 25°C, 5 cm/min	ASTM D113	2	52 500	105 000
	Solubilidad en tricloroetileno	ASTM D2042	2	55 500	111 000
	Tamaño y distribución de partículas por difracción láser	-	2	44 500	89 000
	Mezcla asfáltica	Recubrimiento y adherencia	MS-19	6	26 000
Contenido óptimo de fluidos totales		Wirtgen (2004)	2	19 000	38 000
Estabilidad y flujo Marshall mod.		AASHTO T245	10	49 000	490 000
Resistencia a tensión indirecta mod.		AASHTO T283	20	23 000	460 000
Rueda de Hamburgo		AASHTO T324	22	539 000	6 468 000
Desprendimiento por abrasión		ASTM D7196	10	181 000	1 810 000
Gravedad máxima teórica		AASHTO T209	10	29 000	290 000
Punto de entramamiento		ASTM D7229	6	36 500	219 000
Viga semicircular		ASTM D8044	2	1 065 000	2 130 000
Módulo dinámico		AASHTO T342	2	758 500	1 517 000
Ensayo acelerado de pavimentos a escala real (HVS)			1	960 000	960 000
Total			137		17 224 000

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AASHTO. (2017). *Standard practice for selection and use of emulsified asphalts AASHTO R5*. Washington, D.C.: American Association of State Highway and Transportation Officials.



EIC-Lanamme-INF-1175-2022

Página 52 de 59

- AASHTO. (1996). *Standard test method for determining the resilient modulus of bituminous mixtures by indirect tension (AASHTO TP31)*. 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.
- Al Jumaili, M. (2016). Sustainability of cold recycled mixture with high reclaimed asphalt pavement percentages. *Trends in transport engineering and applications, III(3)*. doi:10.3759/ttea.v3i3.2859
- Arámbula-Mercado et al. (2018). *High reclaimed asphalt pavement (RAP) asphalt mixes for low volume roads. Final Report BE194*. College Station, Texas: Texas A&M Transportation Institute.
- Arimilli et al. (2015). Optimization of recycled asphalt pavement in cold emulsified mixtures by mechanistic characterization. *Journal of Materials in Civil Engineering*. doi:10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001412
- Asphalt Academy. (2009). *Technical guideline: Bitumen stabilised materials. A guideline for the design and construction of bitumen emulsion and foamed stabilised materials*. Pretoria, Sudáfrica: Asphalt Academy.
- 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. (2009). *MS-16 Asphalt in Pavement Preservation and Maintenance*. Lexington, Kentucky: Asphalt Institute.



EIC-Lanamme-INF-1175-2022

Página 53 de 59

- Asphalt Institute. (2014). *Asphalt mix design method (MS-2)*. Lexington, Kentucky: Asphalt Institute.
- ASTM. (2013). *Standard test method for preparation and determination of bulk specific gravity of dense-graded cold mix asphalt (CMA) specimens by means of superpave gyratory compactor ASTM D7229-08 (2013)*. West Conshohocken, Pennsylvania: ASTM Internacional.
- ASTM. (2016). *Standard test method for evaluation of asphalt mixture cracking resistance using the semi-circular bend test (SCB) at intermediate temperatures (ASTM D 8044)*. West Conshohocken, Pennsylvania: ASTM International.
- 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.
- ASTM. (2021). *Standard Practice for selection and use of emulsified asphalts ASTM D3628-15*. West Conshohocken, Pennsylvania: ASTM Internacional.
- Babagoli et al. (2016). Laboratory evaluation of rutting performance of cold recycling asphalt mixtures containing SBS modified asphalt emulsion. *Petroleum Science and Technology*. doi:10.1080/10916466.2015.1135168
- Bocci et al. (2011). A study on the mechanical behaviour of cement-bitumen treated materials. *Construction and Building Materials*, 25(2), 773-778. doi:10.1016/j.conbuildmat.2010.07.007
- Carvajal, M. (2018). *Evaluation of cracking behavior of cold in-place recycling asphalt mixtures [Tesis de maestría]*. Reno, Nevada: University of Nevada.
- Chappat, J., & Bilal, J. (2003). *The environmental road of the future: life cycle analysis, energy consumption and greenhouse gas emissions*. Obtenido de 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, S., & Panda, M. (2018). Influence of mix parameters on design of cold bituminous mix. *Construction and Building Materials*, 191, 376-385. doi:10.1016/j.conbuildmat.2018.10.002



EIC-Lanamme-INF-1175-2022

Página 54 de 59

- Dash et al. (2015b). Effect of aggregate gradation on cold bituminous mix performance. (A. International, Ed.) *Advances in Civil Engineering Materials*, 155-174. doi:10.1520/ACEM20140047
- Dash et al. (2022). Design and performance of cold mix asphalt – A review. *Construction and Building Materials*, 315. doi:10.1016/j.conbuildmat.2021.125687
- Deb, P., & Singh, K. (2022). Mix design, durability and strength enhancement of cold mix asphalt: a state-of-the-art review. *Innovative Infrastructure Solutions*. doi:10.1007/s41062-021-00600-2
- Diefenderfer et al. (2016). Dynamic modulus of recycled pavement mixtures. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 19-26. doi:10.3141/2575-03
- Doyle et al. (2013). Developing maturity methods for the assessment of cold-mix bituminous materials. *Construction and Building Materials*, 524-529. doi:10.1016/j.conbuildmat.2012.09.008
- DVOP. (2022). Oficio DVOP-2022-59. San José, Costa Rica: División de Obras Públicas del MOPT.
- FHWA. (2011). *Reclaimed asphalt pavement in asphalt mixtures: state of the practice FHWA-HRt-11-021*. McLean, Virginia: Federal Highway Administration.
- Flores et al. (2020). Cold asphalt mix with emulsion and 100% rap: compaction energy and influence of emulsion and cement content. *Construction and Building Materials*, 250. doi:10.1016/j.conbuildmat.2020.118804
- García, A. (2013). Influence of cement content and environmental humidity on asphalt emulsion and cement composites performance. *Materials and Structures*, 46, 1275-1289. doi:10.1617/s11527-012-9971-6
- Gómez et al. . (2015). Stiffness of cold asphalt mixtures with recycled aggregates from construction and demolition waste. *Construction Building Materials*, 168-178. doi:10.1016/j.conbuildmat.
- 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.



EIC-Lanamme-INF-1175-2022

Página 55 de 59

- Gu et al. (2019). Structural performance and sustainability assessment of cold central-plant and in-place recycled asphalt pavements: A case study. *Journal of Cleaner Production*, 1513-1523. doi:10.1016/j.jclepro.2018.10.222
- Guo et al. (2014). Multiscale test research on interfacial adhesion property of cold mix asphalt. *Construction and Building Materials*, 769-776. doi:10.1016/j.conbuildmat.2014.06.031
- Head, R. (1974). An informal report of cold mix research using emulsified asphalt as a binder. *Association of asphalt paving technologists (AAPT) conference* (pág. 110). Washington D.C.: Transportation Research Board.
- Hemsley, M. (2002). Cold mix design. *AEMA Annual Conference*. Bermuda: AEMA.
- Hindustan Coals LTD. (2011). *Hot mix vs cold mix: economic comparison. Technical Note: TKS01/2011*. Mumbai: HINDUSTAN COLAS LTD.
- Horgnies et al. (2011). Influence of the interfacial composition in the adhesion between aggregates and bitumen: investigations by EDX, XPS and peel tests. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 238-247. doi:10.1016/j.ijadhadh.2011.01.005
- Jain, S., & Singh, B. (2021). Cold mix asphalt: An overview. *Journal of Cleaner Production*, 280. doi:10.1016/j.jclepro.2020.124378
- James, A. (2006). *Asphalt emulsion Technology. Overview of asphalt emulsion* (Vols. E-C102). Washington, DC: Transportation Research Board.
- Jenkins, K. (2000). *Mix design considerations for cold and half-warm bituminous mixes with emphasis of foamed bitumen [Tesis de doctorado]*. Stellenbosch: Stellenbosch Univers. Obtenido de <https://scholar.sun.ac.za/handle/10019.1/51831>
- Jiang et al. (2018). Improving the high-temperature performance of cold recycled mixtures by polymer-modified asphalt emulsion. *International Journal of Pavement Engineering*. doi:10.1080/10298436.2018.1435882
- Jiménez et al. (2009). Mezclas asfálticas en frío en Costa Rica, conceptos, ensayos y especificaciones. *Infraestructura Vial*, 21, 18-29.
- Kavussi, A., & Modarres, A. (2010). Laboratory fatigue models for recycled mixes with bitumen emulsion and cement. *Construction and Building Materials*, 24(10), 1920-1927. doi:10.1016/j.conbuildmat.2010.04.009



EIC-Lanamme-INF-1175-2022

Página 56 de 59

- Kekwick, S. (2005). Best practice. Bitumen emulsion and foamed bitumen materials laboratory processing. *24th Southern African transport conference*. South Africa: SATC.
- Kishore, C. (2008). Investigation of cold-in-place recycled mixes in India. *International Journal of Pavement Engineering*, 9(4), 265-274. doi:10.1080/10298430701551201
- Leech, D. (1994). *Cold bituminous materials for use in the structural layers of roads*. Berkshire, Reino Unido: Transport Research Laboratory.
- Lin et al. (2017). Dynamic characteristics of 100% cold recycled asphalt mixture using asphalt emulsion and cement. *Journal of Cleaner Production*, 337-344. doi:10.1016/j.jclepro.2017.04.065
- Lin, J., & Xiao, Y. (2020). Microstructure and performance characteristics of cold recycled asphalt mixtures. *Eco-Efficient Pavement Construction Materials*, 51-76. doi:10.1016/B978-0-12-818981-8.00004-7
- Ling et al. (2016). Measuring moisture susceptibility of cold mix asphalt with a modified boiling test based on digital imaging. *Construction and Building Materials*, 391-399. doi:10.1016/j.conbuildmat.2015.12.093
- Ling et al. (2013). Measuring the influence of aggregate coating on the workability and moisture susceptibility of cold-mix asphalt. *Journal of the Transportation Research Board*, 46-52. doi:10.3141/2372-06
- Ling, C., & Bahia, H. (2018). Development of a volumetric mix design protocol for dense-graded cold mix asphalt. *Journal of Transportation Engineering*. doi:10.1061/JPEODX.0000071
- Maccarrone, S. (1994). Cold asphalt systems as an alternative to hot mix. *9th AAPA international Asphalt conference*. Australia: AAPA.
- Montañez et al. (2020). Variability of the mechanical properties of reclaimed asphalt pavement (RAP) obtained from different sources. *Construction and Building Materials*, 230. doi:10.1016/j.conbuildmat.2019.116968
- MOPT. (2015). *Manual de especificaciones generales para la conservación de caminos, carreteras y puentes (MCV-2015)*. San José: Ministerio de Obras Públicas y Transportes.



EIC-Lanamme-INF-1175-2022

Página 57 de 59

- 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.
- Moraes et al. (2011). Measuring the effect of moisture on asphalt-aggregate bond with the bitumen bond strength test. *Journal of the Transportation Research Board*, 2209, 70-81. doi:10.3141/2209-09
- Munyagi, A. (2006). *Evaluation of cold asphalt patching mixes [Tesis de maestría]*. Stellenbosch: University of Stellenbosch.
- Nageim et al. (2012). A comparative study for improving the mechanical properties of cold bituminous emulsion mixtures with cement and waste materials. *Construction and Building Materials*, 36, 743-748. doi:10.1016/j.conbuildmat.2012.06.032
- Nassar et al. (2016). Optimizing the mix design of cold bitumen emulsion mixtures using response surface methodology. *Construction and Building Materials*, 104, 216-229. doi:10.1016/j.conbuildmat.2015.12.073
- 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.
- Niazi, Y., & Jalili, M. (2009). Effect of Portland cement and lime additives on properties of cold in-place recycled mixtures with asphalt emulsion. *Construction and Building Materials*, 1338-1343. doi:10.1016/j.conbuildmat.2008.07.020
- Ojum, C., & Thom, N. (2017). Effect of binder in recycled asphalt on cold-mix pavements. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, 170, 205-210. doi:10.1680/jcoma.16.00038
- Orosa et al. . (2020). Assessment of two laboratory design methods for CIR mixtures with bitumen emulsion based on static and gyratory compaction. *Construction and Building Materials*, 265. doi:10.1016/j.conbuildmat.2020.120667



EIC-Lanamme-INF-1175-2022

Página 58 de 59

- Packham, D. (2005). *Handbook of adhesion*. Sussex, Inglaterra: John Wiley & Sons Ltd.
- Piratheepan, M. (2011). *Designing cold mix asphalt (CMA) and cold in place recycling (CIR) using superpave gyratory compactor [tesis de maestría]*. Reno, Nevada: University of Reno Nevada.
- 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*. doi:10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002042
- Roberts et al. . (1984). Evaluation of recycled mixtures using foamed asphalt. *Transportation Research Board(968)*, 78-85.
- Rubio et al. (2012). Warm mix asphalt: an overview. *Journal of Cleaner Production*, 76-84. doi:10.1016/j.jclepro.2011.11.053
- Sabita. (2020). *Technical guideline: bitumen stabilised materials*. Cape Town: Southern African Bitumen Association (Sabita).
- Saidi, A. (2019). *Laboratory evaluation of cold in place recycling asphalt mixtures using a balanced mix design approach [Tesis de maestría]*. Nueva Jersey: Rowan University. Obtenido de Rowan University.
- Santucci, L. (1977). Thickness design procedure for asphalt and emulsified asphalt mixes. *The 4th international conference on structural design of asphalt pavements* (págs. 424-56). Michigan, Estados Unidos: Transportation Research board.
- Sebaaly et al. (2004). Performance of cold in place recycling in Nevada. *Journal of the Transportation Research Board*, 162-169. doi:10.3141/1896-16
- Serfass et al. (2004). Influence of curing on cold mix mechanical performance. *Materials and Structures*, 37, 365-368. doi:10.1007/BF02481685
- Shanbara et al. (2021). Studying the mechanical properties of improved cold emulsified asphalt mixtures containing cement and lime. *Materials Science and Engineering*. doi:10.1088/1757-899X/1090/1/012006
- Solaimanian, M., & Tahmoressi, M. (1996). Variability Analysis of hot-mix asphalt concrete containing high percentage of reclaimed asphalt pavement. *Journal of the Transportation Research Board*, 1543, 89-96.



EIC-Lanamme-INF-1175-2022

Página 59 de 59

- Soohyok et al. (2018). *Methods of rehabilitating pavements with moisture damaged asphalt layers: Technical report. Research report FHWA/TX-18/0-0626-R1*. College Station, Texas: Texas A&M Transportation Institute.
- Tahri, O. (2021). *Evaluation of effectiveness of rejuvenator for 100% reclaimed asphalt pavement cold Mix [tesis de doctorado]*. Alabama: University of South Alabama.
- Talaat, A., & Hassan, A. (2016). Investigating the effects of cement and cement kiln dust as a filler on the mechanical properties of cold bituminous emulsion mixtures. *International Journal of Civil Engineering and Technology*, 7, 441-453. Obtenido de <https://researchonline.ljmu.ac.uk/id/eprint/12977/>
- Thanaya et al. . (2007). Review and recommendation of cold asphalt emulsion mixtures (CAEMs) design. *Civil Engineering Dimension*, 49-56.
- Thanaya et al. (2009). A laboratory study on cold-mix, cold-lay emulsion mixtures. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, 47-55. doi:10.1680/tran.2009.162.1.47
- Thanaya, N. (2002). Improving the performance of cold bituminous emulsion mixtures. *Proceedings of the Fourth European Symposium, Bitmat4* (pág. 237). Nottingham, Reino Unido: CRC Press.
- Thanaya, N. (2007). Review and recommendation of cold asphalt emulsion mixtures (CAEMs) design. *Civil Engineering Dimensions*, 9(1), 49-56.
- Valentin et al. (2016). Stiffness characterization of cold recycled mixtures. *6th Transport Research Arena* (págs. 758-767). Warsaw: Transportation Research Procedia.
- Wirtgen. (2004). *Manual de reciclado en frío*. Windhagen: Wirtgen GmbH.
- Xiao et al. (2018). A literature review on cold recycling technology of asphalt pavement. *Construction and Building Materials*, 579-604. doi:10.1016/j.conbuildmat.2018.06.006
- Zhou et al. . (2010). *RAP stockpile management and processing in Texas: state of the practice and proposed guidelines FHWA/TX-10/0-6092-1*. Austin, Texas: Texas Transportation Institute .