



UNIVERSIDAD DE
COSTA RICA

LanammeUCR

Laboratorio Nacional de
Materiales y Modelos Estructurales

Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales

Informe: EIC-Lanamme-INF-1150-2022

Revisión bibliográfica

Mezcla asfáltica en frío con emulsión y pavimento asfáltico reciclado
(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

Setiembre, 2022



EIC-Lanamme-INF-1150-2022

Página 2 de 68

1. Informe: EIC-Lanamme-INF-1150-2021	2. Copia No. 1
3. Título y subtítulo: Mezcla asfáltica en frío con emulsión y pavimento asfáltico reciclado (PAR/RAP)	4. Fecha del Informe 09 de setiembre 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 reciclado (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 investigación tiene como objetivo realizar una revisión bibliográfica para comprender el diseño y evaluación del desempeño en el laboratorio de mezclas asfálticas en frío con emulsión asfáltica y pavimento</i>	



EIC-Lanamme-INF-1150-2022

Página 3 de 68

<i>asfáltico reciclado, para utilizarse como material para bacheo y construcción de capas para superficie de ruedo en caminos de bajo a mediano volumen de tráfico. Esto servirá de insumo para una propuesta de investigación cuyos productos 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.</i>		
8. Palabras clave Mezclas en frío, emulsión asfáltica, RAP	9. Nivel de seguridad: Documento interno de la Unidad de investigación en Infraestructura del Transporte UIIT PITRA	10. Núm. de páginas 68
11. Elaborado:		
Ing. Juan Carlos Múnera Miranda Fecha: 09/09/2022	 Fecha: / /	 Fecha: / /
12. Revisado por: Ing. Fabián Elizondo Arrieta, MBA. Fecha: 09/09/2022	13. Revisión Legal: Fecha: / /	14. Aprobado por: Ing. Ana Luisa Elizondo Salas, MSc. Fecha: 09/09/2022



EIC-Lanamme-INF-1150-2022

Página 4 de 68

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN EJECUTIVO	7
INTRODUCCIÓN	8
OBJETIVO GENERAL	9
OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	9
JUSTIFICACIÓN	10
ANTECEDENTES	11
MARCO TEÓRICO.....	13
MEZCLAS EN FRIO	13
MÉTODOS DE DISEÑO DE MEZCLA.....	15
<i>MÉTODO DEL INSTITUTO DEL ASFALTO MS-14.....</i>	<i>16</i>
<i>MÉTODO DEL INSTITUTO DEL ASFALTO MS-19.....</i>	<i>20</i>
<i>MÉTODO SUPERPAVE Y ASTM D7229.....</i>	<i>23</i>
<i>MÉTODO AASHTO PP 86.....</i>	<i>24</i>
EMULSIONES ASFÁLTICAS PARA MEZCLAS EN FRÍO	27
ESPECIFICACIONES TÉCNICAS NACIONALES	29
ENSAYOS PARA MEDIR LA RESPUESTA DEL MATERIAL	31
EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO	32
FACTORES QUE AFECTAN EL DESEMPEÑO DE LAS MAF	34
<i>TIPO, GRADUACIÓN Y CARACTERÍSTICAS DEL AGREGADO</i>	<i>34</i>
<i>USO DE RAP COMO AGREGADO</i>	<i>35</i>
<i>TIPO DE EMULSIÓN ASFÁLTICA</i>	<i>39</i>
<i>RELLENOS MINERALES Y ADITIVOS.....</i>	<i>42</i>
<i>EFFECTO DEL TIEMPO Y TEMPERATURA DE CURADO</i>	<i>45</i>
<i>CONTENIDO DE FLUIDOS</i>	<i>48</i>
<i>TIPO Y NIVEL DE COMPACTACIÓN</i>	<i>49</i>
<i>CONTENIDO DE VACÍOS.....</i>	<i>52</i>



EIC-Lanamme-INF-1150-2022

Página 5 de 68

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	54
CONCLUSIONES	54
RECOMENDACIONES	57
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	59

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Consumo de energía y emisiones de GEI	15
Figura 2. Procedimiento de diseño MS-14	17
Figura 3. Procedimiento de diseño AASHTO PP 86-20	24
Figura 4. Ensayos para medir la respuesta estructural de MAF: a) AASHTO TP 31, b) ASTM D7369 y c) AASHTO T 342.....	32
Figura 5. 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	33
Figura 6. Variabilidad de las diferentes propiedades de mezclas de RAP y FAM-RAP.	37
Figura 7. Ensayos de resistencia a tensión indirecta con emulsión sin y con polímero	40
Figura 8. Correlación entre la resistencia retenida y el ensayo de desnudamiento	41
Figura 9. Influencia de las emulsiones modificadas en la vida a fatiga.....	41
Figura 10. Estabilidad Marshall de MAF con diferentes aditivos	44
Figura 11. Resistencia a tensión indirecta de MAF con diferentes aditivos	44
Figura 12. Deformación permanente de MAF con diferentes aditivos	45
Figura 13. Módulo de rigidez de MAF a diferentes condiciones de curado.....	46



EIC-Lanamme-INF-1150-2022

Página 6 de 68

Figura 14. Influencia de la compactación en la rigidez de MAF..... 51

Figura 15. Composición volumétrica de las MAF y su evolución en el tiempo..... 52

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Granulometrías del MS-14 para MAF..... 18

Tabla 2. Criterios de diseño de mezcla MS-14..... 20

Tabla 3. Granulometrías del MS-19 para MAF..... 21

Tabla 4. Criterios de diseño de mezcla MS-19..... 23

Tabla 5. Requisitos de graduación AASHTO MP 31-2..... 25

Tabla 6. Criterios de diseño de mezcla AASHTO PP86-20..... 27

Tabla 7. Emulsiones asfálticas para mezclas en frío..... 28

Tabla 8. Granulometrías del CR 2020 para MAF 30

Tabla 9. Requisitos de calidad del CR 2020 para MAF 30

Tabla 10. Requisitos del CR 2020 para el diseño de mezcla de MAF 31

Tabla 11. Resumen de regímenes de curado recomendados para MAF..... 47

Tabla 12. Equivalencia entre compactación Marshall y giratoria 50

Tabla 13. Resumen de tipos de compactación para MAF 51

Tabla 14. Rango de contenido de vacíos para MAF 53



EIC-Lanamme-INF-1150-2022

Página 7 de 68

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 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 reciclado (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 investigación tiene como objetivo realizar una revisión bibliográfica para comprender el diseño y evaluación del desempeño en el laboratorio de mezclas asfálticas en frío con emulsión asfáltica y pavimento asfáltico reciclado, para utilizarse como material para bacheo y construcción de capas para superficie de ruedo en caminos de bajo a mediano volumen de tráfico. Esto servirá de insumo para una propuesta de investigación cuyos productos 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.



EIC-Lanamme-INF-1150-2022

Página 8 de 68

INTRODUCCIÓN

La MAF es una combinación de agregados (vírgenes y/o reciclados), emulsión asfáltica o asfalto rebajado (cada vez más en desuso por implicaciones medioambientales) y relleno mineral activo (de requerirse) cuya producción y aplicación es a temperatura ambiente. Se ha utilizado en capas de ruedo para caminos de bajo a mediano tráfico, estabilización de materiales granulares, reciclado en frío de carpetas asfálticas deterioradas para la rehabilitación de pavimentos y en labores de mantenimiento como bacheo. Las bajas temperaturas de producción y aplicación traen una serie de beneficios 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 reciclados (pavimento asfáltico reciclado, 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 (MOPT) ha mostrado un interés especial en realizar labores específicas de mantenimiento mediante bacheo con mezclas asfálticas en frío con emulsión asfáltica y con material reciclado de pavimentos asfálticos, del cual poseen grandes



EIC-Lanamme-INF-1150-2022

Página 9 de 68

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 investigación tiene como objetivo generar una revisión bibliográfica para comprender el diseño en el laboratorio de mezclas asfálticas en frío con emulsión asfáltica, incorporando material reciclado de carpetas asfálticas, como agregado, para utilizarse en el bacheo de rutas deterioradas y como material para capas de superficie de ruedo en caminos de bajo a mediano volumen de tráfico. La información recabada será de insumo para una propuesta de investigación cuyos 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

Comprender, mediante una revisión bibliográfica, el diseño y evaluación del desempeño en el laboratorio de mezclas asfálticas en frío, con emulsión asfáltica y material reciclado de pavimentos asfálticos, para bacheo y superficie de ruedo en caminos de bajo a mediano tráfico.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Explicar qué son y en qué se utilizan las mezclas en frío para entender las ventajas y desventajas de la aplicación de esta tecnología.
2. Revisar las especificaciones nacionales e internacionales para su aplicación y aseguramiento de la calidad.
3. Exponer las principales metodologías de diseño de mezcla en el laboratorio describiendo los procedimientos de mezclado, compactación, curado, medición de



EIC-Lanamme-INF-1150-2022

Página 10 de 68

propiedades volumétricas y mecánicas, y evaluación de desempeño, entre otros aspectos.

4. Estudiar los diferentes factores que pueden afectar las propiedades y el desempeño de las MAF.

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 reciclado y emulsión asfáltica de rompimiento lento, para valorar su diseño, fabricación y colocación como material para bacheo. La DOP cuenta, como uno de sus principales recursos materiales, con acopios de una considerable cantidad de material reciclado de carpetas asfálticas o perfilado, localizados en diferentes planteles del MOPT de la gran área metropolitana (GAM) principalmente. La DOP pretende aprovechar este material como agregado en mezclas en frío para bacheo, fundamentándose en la Ley N° 9828 (2020) “Uso de materiales reutilizables en pavimentos y obras de infraestructura vial”, la cual señala que “Todo proyecto de construcción, reconstrucción, conservación, mantenimiento y rehabilitación que ejecute el Estado y las municipalidades en las vías nacionales y cantonales, respectivamente, mínimo el cincuenta por ciento (50 %) del volumen total de los materiales que se requieran para la construcción de estos pavimentos y obras de infraestructura vial deberán contener algún porcentaje de materiales reutilizables” (Ley N° 9828, 2020).

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 reciclados, como el RAP, a modo de agregado para mezclas en frío (MOPT, 2022). Adicionalmente, el CR 2020, para el diseño de mezcla, hace referencia al manual del Instituto del Asfalto (MS-14) el cual tampoco considera el RAP como material para el diseño de mezcla (Asphalt Institute, 1997).



EIC-Lanamme-INF-1150-2022

Página 11 de 68

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 RAP para bacheo y construcción de capas de superficie de ruedo, y así anticipar un desempeño adecuado en el campo.

El propósito de la investigación es generar el marco teórico necesario para establecer una metodología de diseño de mezcla y evaluación del desempeño en el laboratorio para mezclas en frío con emulsión asfáltica y material reciclado de pavimentos. Además de definir las especificaciones o requisitos de aceptación de las propiedades de la mezcla que permitan evaluar el desempeño que tendrá el material en el campo. La información recabada servirá de insumo para una propuesta de investigación para el diseño y evaluación del desempeño de mezclas en frío con emulsión asfáltica y RAP para bacheo o capas de superficie de ruedo de caminos de bajo a mediano tráfico. 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.

ANTECEDENTES

La DOP mediante el oficio DVOP-2022-59, externa que, debido a la falta de recursos para contratos para conservación de la Red Vial Nacional, los ha obligado a 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 reciclado 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



EIC-Lanamme-INF-1150-2022

Página 12 de 68

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

El Laboratorio de Materiales de MOPT realizó una serie de ensayos de laboratorio para evaluar las características físicas y mecánicas de las MAF con emulsión asfáltica de rompimiento lento y material reciclado de pavimentos proveniente del Plantel de Colima, en Tibás, esto con el fin determinar si cumplía con especificaciones mínimas para ser utilizado como material para bacheo. Las graduaciones del perfilado tendieron a cumplir con una graduación D3 para MAF según la Tabla 703-12 del CR 2020. Se observó que el perfilado por sí solo no aportaba suficiente cohesión siendo imprescindible la incorporación de emulsión asfáltica para cumplir con los criterios de resistencia y daño por humedad. Los especímenes que fueron compactados con 75 golpes por cara y con 2,5% de asfalto residual cumplieron con las especificaciones mínimas de estabilidad y flujo Marshall para mezclas en frío. Se observó una variabilidad importante entre resultados (MOPT, 2022).

Gómez (2021) estudió el uso del material asfáltico reciclado en mezclas en frío para bases estabilizadas en rutas nacionales de la zona norte de Costa Rica. Analizó dos materiales de perfilado realizando granulometrías sin y con extracción, contenido de asfalto mediante tres métodos (reflujo, centrifuga e ignición), índice de plasticidad, índice de soporte California (CBR) y un diseño de mezcla mediante estabilidad y flujo Marshall. El material de perfilado provenía de los Planteles del MOPT de San Ramón, Alajuela y Colima en San José. También investigó las intervenciones que se han realizado en algunas rutas de la



EIC-Lanamme-INF-1150-2022

Página 13 de 68

zona norte, comparando su estado actual con respecto al estado inicial, y los diferentes métodos constructivos que se utilizaron. Se cumplió con los requisitos mínimos de estabilidad Marshall y estabilidad retenida con rangos de emulsión asfáltica entre 2,0 % y 2,5 %. Se hace énfasis en la importancia de procesar el material de perfilado para facilitar su colocación en campo. El autor recomienda para las rutas de lastre colocar una capa de 10 cm de perfilado estabilizado con 2,0 % de emulsión asfáltica de rompimiento lento, seguido de un sello con material de secado y emulsión asfáltica de rompimiento rápido.

MARCO TEÓRICO

Mezclas en frío

Las mezclas asfálticas en frío son una mezcla de agregados sin calentar, relleno mineral activo (de requerirse) y emulsión asfáltica o asfalto rebajado (este último 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 y 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 reciclados (RAP). No



EIC-Lanamme-INF-1150-2022

Página 14 de 68

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), en Figura 1 se muestra el consumo de energía por etapa constructiva para MAC (Mezcla Asfáltica en Caliente), MAT (Mezcla Asfáltica Tibia), y MAF (Mezcla Asfáltica en Frío).

- **Ambiental.** Al no requerir calentamiento los agregados y utilizar emulsiones asfálticas, se produce una menor emisión de gases de efecto invernadero y de polvo. Las MAF generan hasta un 32 % menos de emisiones en comparación con las MAC (Chappat & Bilal, 2003). En la Figura 1 se muestra la cantidad de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) por etapa constructiva para MAC, MAT y MAF.
- **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 rurales y caminos de bajo 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). Las MAF son más susceptibles al daño por humedad. 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). Dado que se usa agua en la preparación de las mezclas en frío y los agregados tampoco se someten a calentamiento, la presencia de humedad impide que se desarrolle una buena adherencia entre el agregado y el asfalto residual, acelerando deterioros como



EIC-Lanamme-INF-1150-2022

Página 15 de 68

daño por humedad/desnudamiento, ahuellamiento, agrietamiento por fatiga, y otros. 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 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).

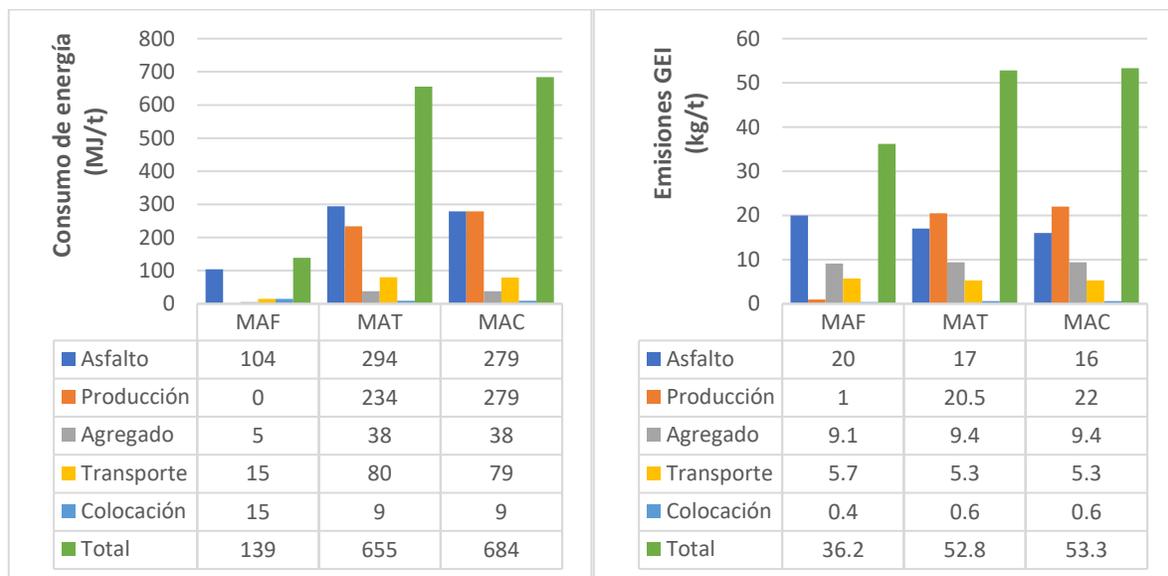


Figura 1. Consumo de energía y emisiones de GEI

Fuente: Chappat & Bilal (2003)

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



EIC-Lanamme-INF-1150-2022

Página 16 de 68

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.

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 (para propósitos del diseño de mezcla, el MS-14 considera las capas de superficie de ruedo temporales como capas de base). 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 se recomienda 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 Figura 2 se resume el procedimiento de diseño.



EIC-Lanamme-INF-1150-2022

Página 17 de 68



Figura 2. Procedimiento de diseño MS-14

La selección y caracterización de agregados implica cumplir con alguna de las graduaciones y las especificaciones que se indican en Tabla 1. El MS-14 señala que para MAF las emulsiones asfálticas más adecuadas son las de rompimiento medio o lento, para granulometrías abiertas o densas, respectivamente. Las emulsiones asfálticas se caracterizan según las normas AASHTO M 140 (2020) o AASHTO M 208 (2018), dependiendo si son aniónicas o catiónicas.

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 se basa en criterios granulométricos (Ecuación 1):

$$P = (0,05 \cdot A + 0,1 \cdot B + 0,5 \cdot C) \cdot 0,7 \quad (1)$$

Donde, P es el porcentaje inicial de emulsión asfáltica sobre el peso seco de agregado, A es porcentaje retenido en el tamiz de 2,36 mm, B es porcentaje pasando en el tamiz de 2,36 mm y retenido en el tamiz de 75 μ m y C es el porcentaje pasando el tamiz de 75 μ m.



EIC-Lanamme-INF-1150-2022

Página 18 de 68

Tabla 1. Granulometrías del MS-14 para MAF

Tamiz	Porcentaje pasando (%)		
	Graduación 1	Graduación 2	Graduación 3
25 mm	100	-	
19 mm	90-100	100	
12,5 mm	-	90-100	100
9,5 mm	60-80	-	90-100
4,75 mm	35-65	45-70	60-80
2,36 mm	20-50	25-55	35-65
1,18 mm	-	-	-
600 µm	-	-	-
300 µm	3-20	5-20	6-25
150 µm	-	-	-
75 µm	2-8	2-9	2-10
Equivalente de arena (%)	35 mín.	35 mín.	35 mín.
Abrasión los Ángeles (%)	40 máx.	40 máx.	40 máx.

Fuente: Asphalt Institute (1997)

El ensayo de recubrimiento determina el contenido de agua de premezclado necesaria para cumplir con un recubrimiento mínimo del 50 % para capas de base. Es importante recalcar que, en MAF para capas de ruedo, el método Hveem exige un 75 % de recubrimiento. Con este ensayo se evalúa la capacidad de la emulsión asfáltica de recubrir el agregado, esta propiedad es dependiente del agua del premezclado. Para materiales con alto contenido de material pasando el tamiz de 75 µm, si no se cuenta con suficiente agua de premezclado, los finos de la mezcla tienden a aglomerarse con la emulsión asfáltica generando su rompimiento prematuro e insuficiente recubrimiento de los agregados.

La compactación de los especímenes de ensayo, para el contenido óptimo de fluidos totales y el contenido óptimo de asfalto residual, se efectúa con el mazo el Marshall a 50 golpes por cara. Después de la compactación, los especímenes se curan dentro del molde por 24



EIC-Lanamme-INF-1150-2022

Página 19 de 68

horas y luego otras 24 horas a 38°C, ya desmoldados. Después del curado se determinan las dimensiones y la gravedad específica.

Las propiedades y el desempeño de la mezcla están cercanamente relacionadas con la densidad de los especímenes compactados. Debido a esto, se determina el contenido óptimo de fluidos totales, el cual es un ensayo similar a la relación densidad-humedad en suelos, con la diferencia de que se agrega el contenido de emulsión inicial P y se usa el martillo Marshall en lugar el mazo Próctor.

Los parámetros volumétricos como el contenido de vacíos de aire, VMA, VFA, contenido de vacíos totales, contenido de vacíos de aire y el porcentaje de humedad absorbida, se calculan de forma aproximada mediante ecuaciones que consideran el contenido de asfalto residual, la gravedad específica y el contenido de humedad presente en los especímenes compactados, así como la gravedad específica de los agregados.

La estabilidad Marshall modificada para determinar el contenido óptimo de asfalto residual implica dividir cada grupo de especímenes con un contenido de asfalto residual (5 contenidos de asfalto residual) en dos subgrupos: sin y con acondicionamiento. En el acondicionamiento los especímenes se someten a 1 hora de saturación en bomba de vacío a 100 mmHg y luego a 1 hora de inmersión en agua a 22,2 °C. Ambos subgrupos se fallan en el equipo de estabilidad y flujo Marshall a una temperatura de 22,2 °C. El contenido óptimo de asfalto residual es aquel que provea la máxima estabilidad acondicionada, pero se ajusta para abajo o para arriba dependiendo de la absorción de humedad, porcentaje de estabilidad retenida, contenido de vacíos totales y el recubrimiento de los agregados. En la Tabla 2 se muestran los criterios del diseño de mezcla.



EIC-Lanamme-INF-1150-2022

Página 20 de 68

Tabla 2. Criterios de diseño de mezcla MS-14

Ensayo	Valor
Estabilidad a 22,2 °C, AASHTO T 245	2224 N mín.
Porcentaje de pérdida de estabilidad después de saturación e inmersión	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 de 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. La selección y caracterización de agregados involucra el cumplimiento con



EIC-Lanamme-INF-1150-2022

Página 21 de 68

alguna de las graduaciones y las especificaciones que se indican en Tabla 3. Las graduaciones con numeraciones de la 1 hasta 5 son densas y la 6 es abierta. El MS-19 tiene las mismas consideraciones y especificaciones del MS-14 para las emulsiones asfálticas para MAF.

Tabla 3. Granulometrías del MS-19 para MAF

Tamiz	Porcentaje pasando (%)					
	1	2	3	4	5	6
50 mm	100					
37,5 mm	90-100	100				
25 mm	-	90-100	100	-		
19 mm	60-80	-	90-100	100		
12,5 mm	-	60-80	-	90-100	100	
9,5 mm	-	-	60-80	-	90-100	100
4,75 mm	20-55	25-60	35-65	45-70	60-80	30-50
2,36 mm	10-40	15-45	20-50	25-55	35-65	5-15
1,18 mm	-	-	-	-	-	-
600 µm	-	-	-	-	-	-
300 µm	6-16	3-18	3-20	5-20	6-25	-
150 µm	-	-	-	-	-	-
75 µm	0-5	1-7	2-8	2-9	2-10	0-2
Equivalente de arena (%)	35 mín.	35 mín.	35 mín.	35 mín.	35 mín.	-
Abrasión los Ángeles (%)	40 máx.	40 máx.	40 máx.	40 máx.	40 máx.	40 máx.
Caras fracturadas (%)	65 mín.	65 mín.	65 mín.	65 mín.	65 mín.	65 mín.

Fuente: Asphalt Institute (2008)

Previo a iniciar con los ensayos de diseño se calcula un contenido inicial de emulsión asfáltica que se toma como referencia para los ensayos de diseño. La ecuación se basa en criterios granulométricos (Ecuación 2 y 3):

$$P = \frac{(0,06 \cdot B + 0,01 \cdot (100 - B)) \cdot 100}{A}$$

Mezclas para base
(2)



EIC-Lanamme-INF-1150-2022

Página 22 de 68

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

Mezclas para capa de ruedo
(3)

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.

El ensayo de recubrimiento y adherencia (desnudamiento) se realiza en la mezcla suelta con el contenido de agua de premezclado y de emulsión asfáltica inicial que cumpla con un recubrimiento óptimo. Esta mezcla se cura a 60 °C por 24 horas, y luego se somete a 3 minutos de inmersión en agua en ebullición para posteriormente evaluar de forma visual el recubrimiento remanente. El ensayo de adherencia, aunque sencillo es importante para evaluar la susceptibilidad al daño por humedad de la mezcla con respecto a la adherencia entre el agregado y el asfalto residual.

El procedimiento de compactación y curado señala que los especímenes de diseño se mezclan con el agua de premezclado y con al menos tres contenidos de emulsión diferentes (el contenido inicial de emulsión ± 1 %), luego se compactan con el compactador Marshall aplicando 50 golpes por cara. El curado se realiza con el espécimen dentro del molde de compactación sometiéndolo a una temperatura de 60 °C por 48 horas. Después del curado se miden las dimensiones y se determina la volumetría. A menudo, la volumetría no se evalúa porque normalmente se calculan aproximadamente debido a la presencia de humedad en los especímenes compactados. Si se desean valores más exactos de la volumetría, se debe tomar en cuenta la humedad de los especímenes compactados y se requerirá determinar la gravedad máxima teórica mediante una muestra seca y suelta. La forma más sencilla y utilizada de determinar la volumetría es calcular la densidad bruta del espécimen compactado dividiendo la masa al aire entre el volumen calculado con las dimensiones. Posterior a la volumetría, los especímenes se fallan con el ensayo de estabilidad y flujo Marshall a 25 °C.



EIC-Lanamme-INF-1150-2022

Página 23 de 68

El contenido óptimo de asfalto residual es aquel que cumpla con la estabilidad Marshall y el recubrimiento mínimo. En la Tabla 4 se muestran los criterios de aceptación para el diseño de mezcla.

Tabla 4. Criterios de diseño de mezcla MS-19

Ensayo	Valor
Estabilidad a 25 °C, AASHTO T 245	2224 N mín.
Porcentaje de recubrimiento (adherencia)	85 % mín. (superficie de ruedo) 50 % mín. (base)

Fuente: Asphalt Institute (2008)

Método Superpave y ASTM D7229

A pesar de que el método de diseño de mezcla del Instituto del Asfalto sigue siendo el más utilizado para MAF, es un método empírico y los resultados obtenidos no se pueden correlacionar con los resultados de campo (Dybalski, 1983). La tendencia es cada vez más migrar de los métodos de diseño de mezcla empíricos hacia procedimientos de diseño que simulen mejor las condiciones de campo, como el método de diseño Superpave desarrollado por SHRP. El método de diseño Superpave utiliza el compactador giratorio Superpave (SGC por sus siglas en inglés) para compactar las muestras de MAC, este compactador simula mejor los mecanismos de compactación de campo. La posibilidad de utilizar el SGC para compactar MAF es un tema de investigación que sigue en constante desarrollo. La norma ASTM D 7229 (2013) dispone de guías para el recubrimiento y compactación muestras de MAF. Las muestras se preparan de acuerdo con el procedimiento de diseño del MS-19, y se compactan con el SGC. Esta norma específica que el SGC debe aplicar una presión vertical de 600 kPa y un ángulo de giro de 1,16 °. Además, recomienda compactar los especímenes de 150 mm diámetro con 33 giros \pm 5 giros, y curarlos a una temperatura de 30 °C por 20 horas antes de hacer la determinación de la gravedad específica. El procedimiento de diseño no indica criterios de aceptación en



EIC-Lanamme-INF-1150-2022

Página 24 de 68

cuanto el recubrimiento y tampoco establece un procedimiento para determinar el contenido óptimo de asfalto residual.

Método AASHTO PP 86

El método para diseño de mezcla AASHTO PP 86-20 (2021), junto con las especificaciones para materiales AASHTO MP 31-17 (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 superior desempeño 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 Figura 3 se resume el procedimiento de diseño.

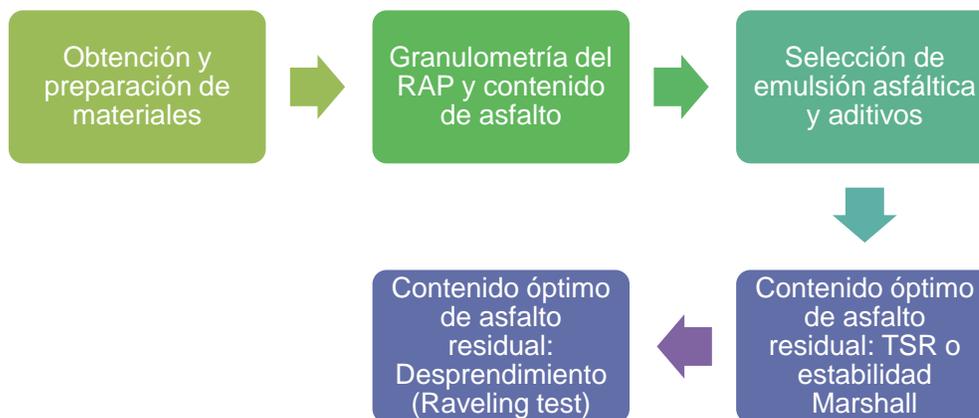


Figura 3. Procedimiento de diseño AASHTO PP 86-20

El material de RAP se puede obtener del pavimento que se pretende reciclar mediante núcleos o el perfilado en sitio, y también de apilamientos. El RAP proveniente de núcleos



EIC-Lanamme-INF-1150-2022

Página 25 de 68

se procesa tratando de reproducir las granulometrías de campo o ajustándolo a dos de las bandas granulométricas indicadas en la Tabla 5, y así obtener un rango aceptable de contenidos de emulsión asfáltica para el proyecto. El RAP se caracteriza realizando ensayos de contenido de asfalto y granulometría del material sin y con extracción.

Tabla 5. Requisitos de graduación AASHTO MP 31-2

Tamiz	Porcentaje pasando (%)		
	Fina	Media	Gruesa
31,5 mm	100	100	100
25 mm	100	100	85-100
19 mm	95-100	85-96	75-92
4,75 mm	65-75	40-65	30-45
0,600 mm	15-35	4-14	1-7

Fuente: AASHTO (2021b)

El RAP extraído debe cumplir con los requisitos para una mezcla de base estabilizada con asfalto (espumado o emulsión asfáltica). Se debe considerar un agregado de corrección que cumpla con los requisitos si el porcentaje pasando el tamiz de 4,75 mm del agregado extraído es mayor al 65 %, o el contenido del asfalto del RAP es mayor al 5,5 %. Además, durante el diseño los resultados de las propiedades de la mezcla podrían indicar la necesidad de un agregado correctivo, por ejemplo, cuando el contenido de vacíos, la resistencia seca o resistencia retenida presentan valores que no cumplen con los requisitos mínimos.

El procedimiento de diseño indica que las emulsiones catiónicas que se utilicen pueden ser CSS-1 o CSS-1h, de acuerdo con las especificaciones AASHTO M 208. En el caso de emulsiones aniónicas se permite utilizar HFMS-2, HFMS-2h o HFMS-2s de acuerdo con las especificaciones AASHTO M 140. Con respecto al uso de rellenos minerales activos se permite adicionar cemento o cal hidratada siempre y cuando se aplique con una relación



EIC-Lanamme-INF-1150-2022

Página 26 de 68

asfalto /cal-cemento menor a 3 para prevenir un comportamiento rígido en la mezcla, propenso al agrietamiento por fatiga.

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

Para la determinación del contenido óptimo de asfalto residual, cada grupo de especímenes compactados (6 especímenes por grupo, al menos 3 contenidos de asfalto residual) se divide en dos subgrupos: sin y con acondicionamiento. El acondicionamiento implica saturación en bomba de vacío a una presión entre 13 kPa y 67 kPa hasta alcanzar un porcentaje de saturación entre 55 % y 75 %. Seguidamente, para el ensayo de tensión indirecta, se sumergen los especímenes en agua a 25 °C por 24 horas. En el caso del ensayo de estabilidad Marshall, los especímenes se sumergen por 23 horas a 25 °C y luego una hora a 40°C. Después del periodo de inmersión en agua se fallan los especímenes. Los especímenes sin acondicionar se llevan a una temperatura de 25 °C por 2 horas antes de la falla a tensión indirecta, o a 40 °C por 2 horas antes de la falla a estabilidad Marshall.

El ensayo de desprendimiento (ASTM, 2022) simula la abrasión por tráfico en etapas tempranas del curado cuando la mezcla es más susceptible al desprendimiento (Figura 4g).



EIC-Lanamme-INF-1150-2022

Página 27 de 68

El curado del ensayo es por 4 horas a 25 °C y luego se somete a abrasión con el equipo por 15 minutos. Se calcula el porcentaje de pérdida por abrasión.

En la Tabla 6 se muestran los criterios de aceptación para el diseño de mezcla.

Tabla 6. 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 T 283 modificado	310 kPa mín.	Resistencia curada
Resistencia retenida, AASHTO T 283 modificado	70,0% mín.	Resistencia al daño inducido por humedad
Ensayo de desprendimiento para mezclas en frío (raveling test), ASTM D 7196	7,0% máx. pérdida	Resistencia al desprendimiento
Relación de asfalto residual/cemento	3,0:1,0 mínimo	Prevenir comportamiento rígido
<i>Estabilidad Marshall</i>		
Estabilidad Marshall, grupo seco, AASHTO T 245 modificado	5560 N mín.	Estabilidad curada
Estabilidad retenida	70,0% mín.	Resistencia al daño inducido por humedad
Ensayo de desprendimiento para mezclas en frío (raveling test), ASTM D 7196	7,0% mín. pérdida	Resistencia al desprendimiento
Relación de asfalto residual/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 7). Las normas, para selección de emulsiones



EIC-Lanamme-INF-1150-2022

Página 28 de 68

asfálticas según tipo de aplicación, ASTM D 3628 (2021) y AASHTO R5 (2017) coinciden en las emulsiones asfálticas recomendadas por el MS-14 para MAF.

Tabla 7. Emulsiones asfálticas para mezclas en frío

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



EIC-Lanamme-INF-1150-2022

Página 29 de 68

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. Para mezclas en frío para bacheo por inyección se permite el uso de emulsión de rompimiento rápido. Se avala la incorporación de relleno mineral activo como cemento o cal hidratada (de 1 % a 2 % por peso de agregado seco) para mejorar la resistencia temprana y reducir la susceptibilidad al daño por humedad.

Define como procedimiento de diseño de mezcla lo descrito en los manuales del Instituto del Asfalto el MS-14, Apéndice F y MS-19, Capítulo 7 (Asphalt Institute, 1997; Asphalt Institute, 2008).

Establece granulometrías para mezclas densas o abiertas basadas en las granulometrías recomendadas por el MS-14 y el MS-19 (Tabla 8). También exige una serie de requisitos de calidad para los agregados para una adecuada durabilidad y resistencia al corte (Tabla 9). Es importante resaltar que aún en esta especificación no se considera el uso de materiales reciclados, como el RAP, como agregado. Por lo tanto, no existen requisitos para este tipo de materiales.



EIC-Lanamme-INF-1150-2022

Página 30 de 68

Tabla 8. 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	-
600 µm	-	-	-	-	-	-	-	-
300 µm	6-16	3-18	3-20	5-20	6-25	-	-	-
150 µm	-	-	-	-	-	-	-	-
75 µm	0-5	1-7	2-8	2-9	2-10	0-2	0-2	0-2

Fuente: MOPT (2022)

Tabla 9. Requisitos de calidad del CR 2020 para MAF

Ensayo	Especificación
Agregado grueso	
Pérdida por abrasión (AASHTO T 96)	40 % máx.
Caras fracturadas (ASTM D 5821)	65 % mín.
Índice de durabilidad (AASHTO T 210)	35 % mín.
Partículas friables (AASHTO T 112)	1 % máx.
Agregado fino	
Índice de durabilidad (AASHTO T 210)	35 % mín.
Equivalente de arena (AASHTO T 176)	35% mín.

Fuente: MOPT (2022)

Los criterios de aceptación para el diseño de mezcla fueron obtenidos de los manuales MS-14 y MS-19 (Tabla 10). Se exige cumplir con criterios de estabilidad, resistencia al daño por



EIC-Lanamme-INF-1150-2022

Página 31 de 68

humedad, recubrimiento y adherencia, drenaje (en el caso de las mezclas abiertas) y trabajabilidad.

Tabla 10. 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 sin acondicionar	2224 N, mín.
Estabilidad retenida	50 %, mín.
Drenaje de residuo asfáltico al contenido óptimo	10 g
Trabajabilidad en la mezcla asfáltica	Satisfactoria

Fuente: MOPT (2022)

El criterio de estabilidad retenida indicado en la Tabla 10 se recomienda para capas intermedias como bases (Asphalt Institute, 1997). Para capas de ruedo, al estar expuestas al 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.

Ensayos para medir la respuesta del material

En el diseño de pavimentos, la estimación de la respuesta estructural de capas de mezcla en frío, ante las cargas de tráfico y las condiciones ambientales, se ha realizado a partir de ensayos de laboratorio como: módulo resiliente a tensión indirecta con las normas de ensayo AASHTO TP-31 (1996) o ASTM D 7369 (2020) y el módulo dinámico con la norma de ensayo AASHTO T 342 (2022), en la Figura 4 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 RAP en MAF con material reciclado 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



EIC-Lanamme-INF-1150-2022

Página 32 de 68

tiende a presentar un porcentaje óptimo de agregado de corrección que producirá la máxima rigidez (Arámbula-Mercado et al. , 2018).

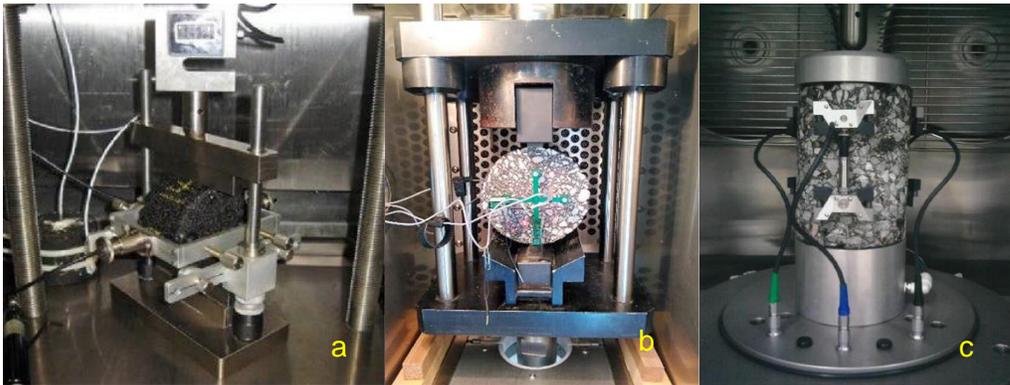


Figura 4. Ensayos para medir la respuesta estructural de MAF: a) AASHTO TP 31, b) ASTM D7369 y c) AASHTO T 342

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 temperaturas más cálidas (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. Sin embargo, en el rango de alta frecuencia (o baja temperatura), las MAF en frío mostraron módulos dinámicos comparables con las MAC. Por otro lado, 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



EIC-Lanamme-INF-1150-2022

Página 33 de 68

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 por el proceso de curado (Munyagi, 2006; Rezaei et al., 2017).



Figura 5. 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

Las mezclas en frío han sido sujetas a la evaluación del desempeño para diferentes tipos de deterioro como (NCHRP, 2017; NCHRP, 2021) (Figura 5):

- **Ahuellamiento/daño por humedad:** Rueda de Hamburgo (AASHTO T324), APA (AASHTO T340) y Flow Number (AASHTO T378), entre otros.



EIC-Lanamme-INF-1150-2022

Página 34 de 68

- **Fatiga:** fisuramiento a fatiga en viga a flexotracción (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. 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. 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).

Factores que afectan el desempeño de las MAF

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

Los agregados constituyen aproximadamente el 95 % de la mezcla y forman el esqueleto de la mezcla asfáltica la cual desempeña un rol importante en la capacidad de carga de cualquier capa del pavimento. El tipo (natural/reciclado), el origen (piedra caliza, granito, etc.), la calidad (pobre o para pavimentación) y la granulometría del agregado influyen



EIC-Lanamme-INF-1150-2022

Página 35 de 68

significativamente en el desempeño de la mezcla asfáltica. La propiedad de adhesión entre el agregado y el ligante asfáltico está básicamente influenciada tanto por la composición química como por la morfología de la superficie. 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. Los agregados calcáreos, como la piedra caliza, tienen una carga superficial positiva neta, mientras que los agregados silíceos, como el granito o el basalto, tienen una carga superficial negativa neta (Ling et al., 2013). Los agregados calcáreos van a ser más afines a las emulsiones aniónicas (con carga negativa) y los agregados silíceos a las emulsiones catiónicas (con carga positiva) por la compatibilidad de cargas eléctricas (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. Se ha observado que, aunque la estabilidad Marshall de las mezclas en frío de graduación densa es superior a las mezclas de graduación discontinua, estas últimas muestran un mejor desempeño en resistencia a la tensión indirecta y creep estático (Dash et al., 2015b).

No se recomienda el uso de agregados redondeados sin triturar debido a posibles problemas de desprendimiento, durabilidad y estabilidad. 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).

Uso de RAP como agregado

A nivel mundial el uso de RAP en proyectos de construcción y rehabilitación ha venido en aumento, demostrado ser una estrategia importante para ayudar a compensar el aumento de los costos de las materias primas y mejorar la sostenibilidad de las infraestructuras de transporte. Los materiales del pavimento asfáltico existentes comúnmente se eliminan



EIC-Lanamme-INF-1150-2022

Página 36 de 68

durante las operaciones de repavimentación, rehabilitación o reconstrucción. Una vez retirado y procesado, el material del pavimento se convierte en RAP (pavimento asfáltico recuperado), el cual contiene asfalto y agregados (FHWA, 2011). La utilización del RAP en MAF reduce el costo total de construcción y disminuye el uso de agregados de fuentes naturales. Una MAF con un 60 % RAP puede llegar a tener desempeño mecánico superior a una MAF convencional con agregados vírgenes (Arimilli et al., 2015). Al Jumaili (2016) reporta 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. Thanaya et al. (2014) encontró que una MAF con 72 % de RAP y sin adición de cemento, es capaz de cumplir con requisitos volumétricos y de estabilidad. Las MAF con RAP moderadamente envejecido (asfalto residual con Pen 20) resultan en mezclas con mayor rigidez y vida a fatiga, que MAF con RAP severamente envejecido (asfalto residual con Pen 5) con mejor resistencia a la deformación permanente (Ojum & Thom, 2017).

En la producción de MAF con RAP, se pueden incorporar agentes rejuvenecedores, los cuales reconstituyen las propiedades químicas y físicas del asfalto envejecido. 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, especialmente a porcentajes más altos de RAP (Solaimanian & Tahmoressi, 1996). Montañez et al. (2020) evaluó seis fuentes de RAP y encontró una variabilidad significativa en la respuesta mecánica y el desempeño del RAP y FAM-RAP (FAM, por sus siglas en inglés, significa matriz de agregado fino) (Figura 6), principalmente en el porcentaje pasando el de 75 μ m, vida a fatiga, deformación permanente y daño por humedad.



EIC-Lanamme-INF-1150-2022

Página 37 de 68

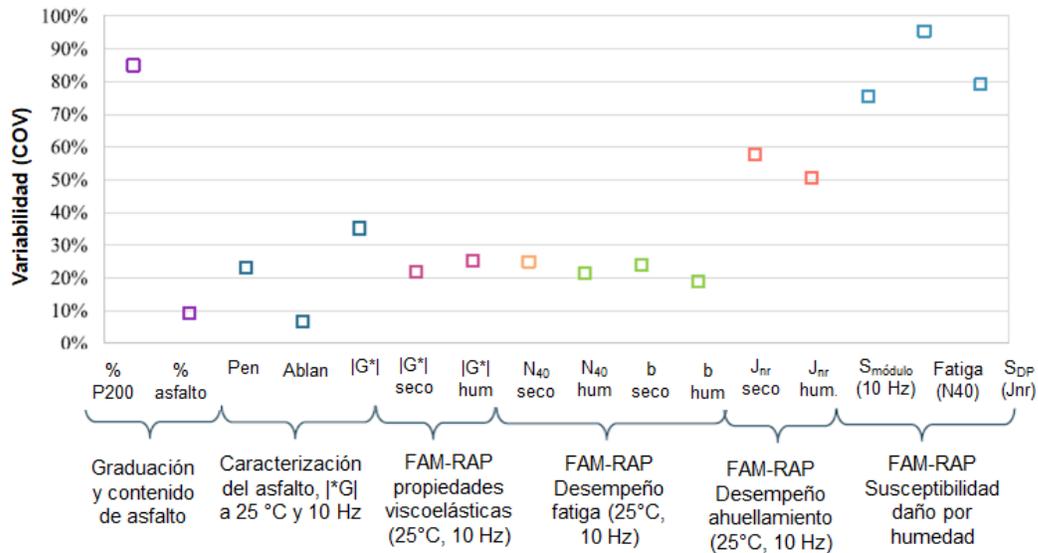


Figura 6. Variabilidad de las diferentes propiedades de mezclas de RAP y FAM-RAP.
Fuente. Montañez et al. (2020)

El uso de técnicas apropiadas para almacenar y procesar RAP puede ayudar a controlar la variabilidad de RAP. A continuación, se describen algunas buenas prácticas para tener un mejor control de la variabilidad del RAP (Zhou et al. , 2010):

- **Eliminar la contaminación.** El primer paso para controlar la calidad del RAP es eliminar la contaminación. La contaminación se da con restos de geosintéticos (telas, rejillas), captaluces y escombros (tierra, vegetación, concreto, etc.).
- **Separar los apilamientos de RAP de diferentes fuentes.** Como se indicó anteriormente, pueden existir diferencias en las propiedades del RAP que afecten el desempeño de la mezcla dependiendo de la fuente de donde provenga. De ahí que la separación de los apilamientos de RAP de diferentes fuentes es importante.
- **Mezclar los apilamientos de RAP antes de procesar.** Esto es fundamental cuando se tiene RAP de diferentes fuentes, al mezclar y homogenizar se obtiene un RAP más uniforme. Cuando se extrae el RAP, es esencial excavar aleatoriamente



EIC-Lanamme-INF-1150-2022

Página 38 de 68

en la pila de RAP desde diferentes ubicaciones para que el RAP que se alimenta a la trituradora o la máquina fraccionadora se mezcle adecuadamente.

- **Procesar los apilamientos (triturar o fraccionar).** La práctica común para el procesamiento de RAP es triturar el RAP hasta un tamaño máximo, en la mayoría de los casos, de 12,5 mm (1/2 in.) o 9,5 mm (3/8 in.). A diferencia de la trituración, el fraccionamiento del RAP es simplemente cribar el RAP en dos o más tamaños. El RAP fraccionado a menudo se divide en fracciones gruesas (retenido en el tamiz de 9,5 mm o 12,5 mm) y finas (pasando el tamiz de 9,5 mm o 12,5 mm). El fraccionamiento de RAP puede proporcionar a los diseñadores más flexibilidad para elegir diferentes porcentajes de RAP grueso y fino con agregados vírgenes para cumplir con los requisitos volumétricos y granulométricos.
- **Evitar la sobre trituración.** La trituración excesiva puede generar muchos finos (material pasando el tamiz de 75 μ m). Algunas plantas están configuradas para cribar primero, direccionando sólo el sobretamaño a la trituradora, lo cual genera menos finos.
- **Reducir el contenido de humedad.** El RAP tiende a acumular humedad, para controlar esto se recomienda tener los apilamientos cubiertos con lonas o bajo techo.

Caracterizar el RAP procesado e identificar los apilamientos. Una buena práctica es caracterizar e identificar el RAP procesado justo después de que se conforma el apilamiento en su ubicación final. Se debe obtener y analizar un mínimo de cinco muestras de RAP recolectadas de cada apilamiento de RAP antes de hacer un diseño de mezcla. Es importante registrar tanto los valores promedio como las desviaciones estándar asociadas del contenido de asfalto RAP y la granulometría.



EIC-Lanamme-INF-1150-2022

Página 39 de 68

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 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). Por la velocidad de rompimiento en MAF 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), debido a que este grado de emulsiones no rompe de forma inmediata en contacto con el agregado, permitiendo a las mezclas permanecer trabajables durante un periodo corto de tiempo. Las emulsiones rompimiento medio de alta flotabilidad (HF) están concebidas para un mayor recubrimiento y retención de agregados a condiciones de temperaturas extremas, y se pueden aplicar con agregados de granulometría abierta y densa. 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). En la emulsión modificada con látex de estireno-butadieno-estireno (SBS), se encontró que el comportamiento ácido del látex SBS es beneficioso para mejorar la adhesión entre el ligante asfáltico y los agregados



EIC-Lanamme-INF-1150-2022

Página 40 de 68

(Cai et al., 2010). La adición de látex SBS en el asfalto da como resultado una mejor dispersión y un sistema coloidal más estable, sin embargo, su emulsificación es más difícil (Cai et al., 2010). La emulsión asfáltica modificada con látex SBS (premezclada) ha mostrado mejores propiedades contra ahuellamiento y fatiga en relación con la emulsión asfáltica modificada (postmezclada) con látex de estireno-butadieno-caucho (SBR) (Carpani, 2021). La emulsión asfáltica modificada con látex mejora significativamente los valores resistencia retenida a la tensión indirecta (TSR) de MAF en relación con la emulsión asfáltica sin modificar (Figura 6). Se encontró que este aumento en el TSR era 2 veces y 3,5 veces mayor en el caso de los agregados de piedra caliza y granito, respectivamente, por lo tanto, la emulsión de asfalto modificada con látex mejora la resistencia contra la susceptibilidad al daño por humedad de las MAF (Ling et al. , 2016). También se halló una correlación entre el TSR y porcentaje de recubrimiento del ensayo de adherencia (desnudamiento) con agua hirviendo (Figura 8). Donde para cumplir con un TSR mínimo de 75%, el porcentaje de recubrimiento debería ser mayor al 89 %. Las MAF utilizando emulsiones asfálticas modificadas con polímero han presentado una mayor vida a fatiga que MAF con emulsiones sin modificar (Sebaaly et al. , 2018) (Figura 9).

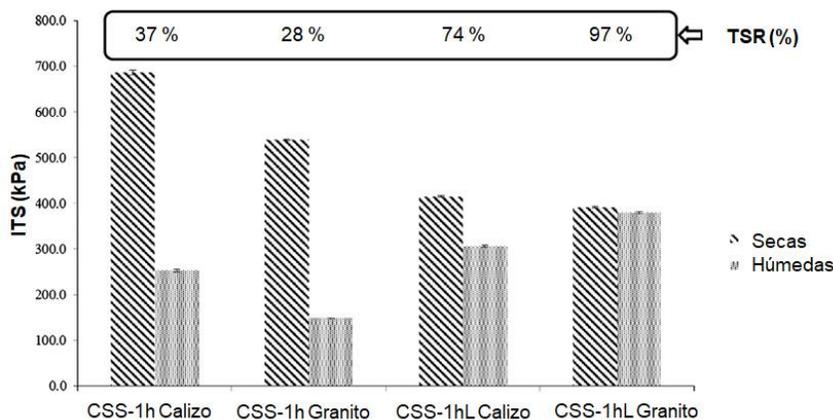


Figura 7. Ensayos de resistencia a tensión indirecta con emulsión sin y con polímero

Fuente: Ling et al. (2016)



EIC-Lanamme-INF-1150-2022

Página 41 de 68

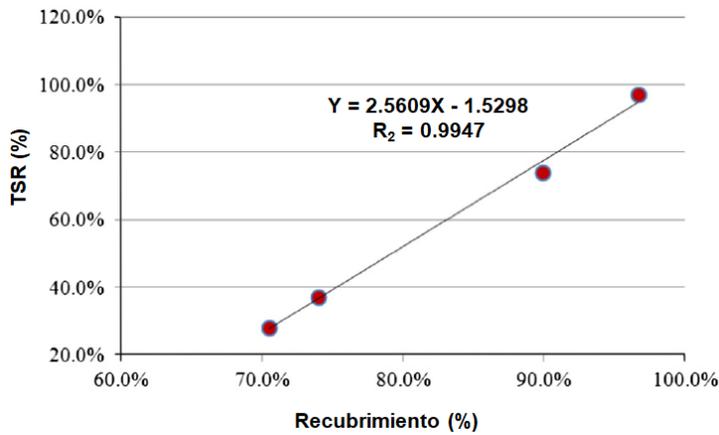


Figura 8. Correlación entre la resistencia retenida y el ensayo de desnudamiento

Fuente: Ling et al. (2016)

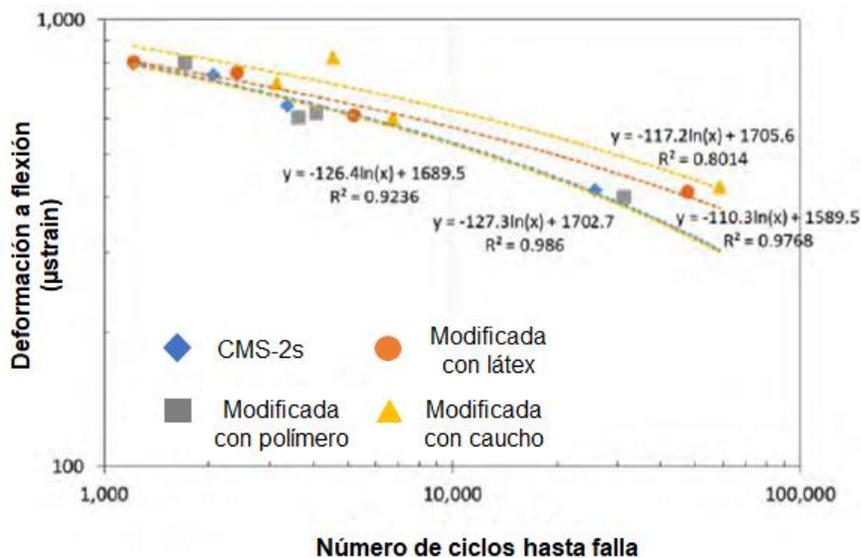


Figura 9. Influencia de las emulsiones modificadas en la vida a fatiga

Fuente: Sebaaly et al. (2018)



EIC-Lanamme-INF-1150-2022

Página 42 de 68

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, ceniza de cáscara de arroz, desecho de industria azucarera, desecho de hoja de palma, cenizas de polvo de combustible, cenizas de lodo de papel, cenizas volantes de biomasa, humo de sílice, diferentes comerciales como NanoTac® y Zycosil®, se han utilizado para evaluar las propiedades de las MAF modificadas (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 en el agua de premezclado y la emulsión bituminosa es el principal responsable de la resistencia última de las MAF. 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 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). Thanaya (2009) reporta que la incorporación de 1 % a 2 % de cemento (cemento de fraguado rápido) mejora el desempeño mecánico y acelera la ganancia resistencia inicial significativamente. La adición de cemento puede estimular la adhesión entre el agregado y la emulsión asfáltica que



EIC-Lanamme-INF-1150-2022

Página 43 de 68

finalmente mejora el desempeño mecánico de la mezcla (Thanaya et al., 2009; Niazi & Jalili, 2009; Nageim et al., 2012). La MAF con cemento presenta una resistencia mejorada y menor susceptibilidad a la temperatura, al daño por humedad, fluencia y fenómenos de deformación permanente. La adición de un 2 % de cemento por masa de agregados en una MAF puede acelerar el tiempo de curado, dando como resultado mejores valores de estabilidad Marshall (secas y húmedas), mayor resistencia retenida la tensión indirecta (TSR), mayor módulo resiliente y mejor resistencia al ahuellamiento (Figura 10, 11 y 12) (Niazi & Jalili, 2009; Pundhir et al., 2010; Arshad et al., 2018).

Shanbara (2021) encontró que el uso de cemento o cal en MAF resulta en un mejor módulo resiliente a la tensión indirecta ITSM (curado inicial y completo), mayor resistencia al daño por humedad, aumento de vida a fatiga y menor deformación permanente a altas temperaturas; también evidenció que la MAF con cemento o cal puede llegar a desarrollar un módulo de resiliente de 4 a 23 veces mayor, respectivamente, después de 2 días de curado, en comparación con una MAF sin relleno mineral activo, lo que indica la potencial hidratación del cemento durante la absorción de agua. La relación asfalto residual/cemento no se recomienda que exceda a 3 para prevenir un comportamiento frágil que reduzca la flexibilidad de la mezcla y la vida a fatiga (Kavussi & Modarres, 2010; AASHTO, 2021b). Las MAF con cemento muestran una menor vida a fatiga en comparación con las MAC, este comportamiento mecánico puede estar relacionado con la presencia del cemento y un menor contenido de emulsión asfáltica, haciendo a las MAF con cemento menos resistentes a repetición de carga (Bocci et al., 2011).



EIC-Lanamme-INF-1150-2022

Página 44 de 68

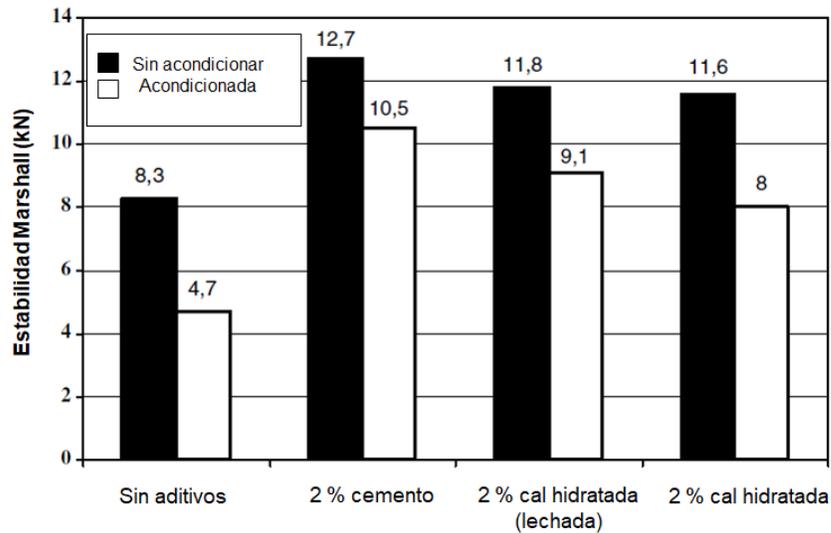


Figura 10. Estabilidad Marshall de MAF con diferentes aditivos

Fuente: Niazi & Jalili (2009)

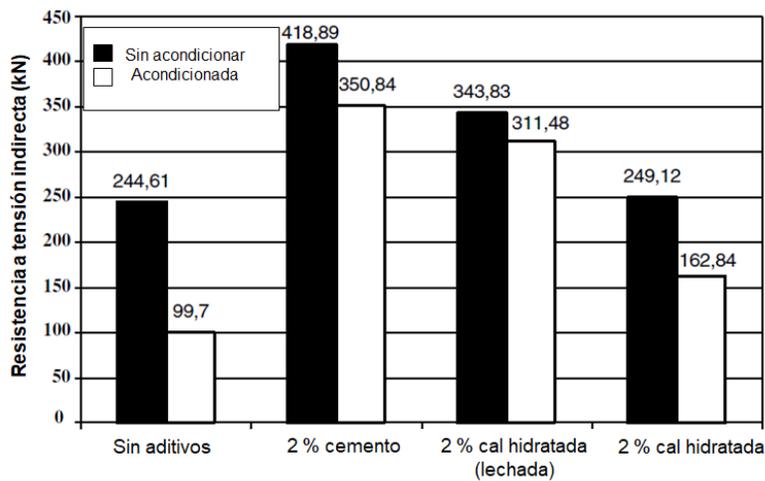


Figura 11. Resistencia a tensión indirecta de MAF con diferentes aditivos

Fuente: Niazi & Jalili (2009)



EIC-Lanamme-INF-1150-2022

Página 45 de 68

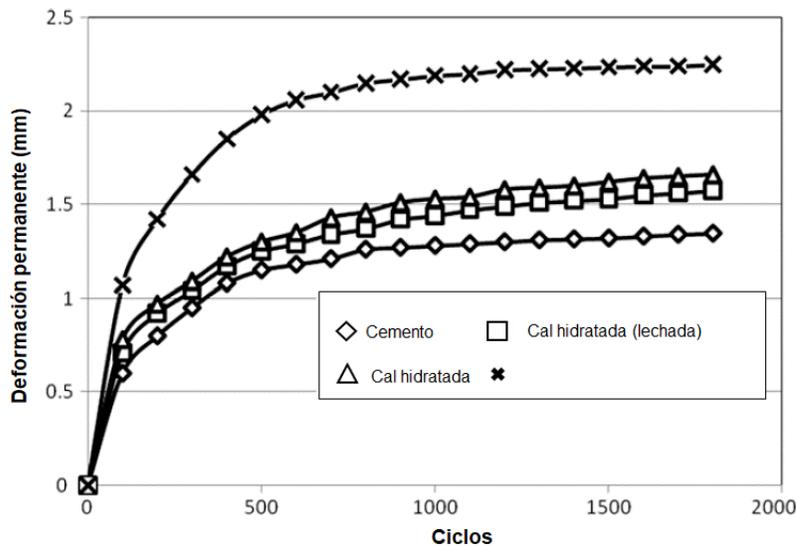


Figura 12. Deformación permanente de MAF con diferentes aditivos

Fuente: Niazi & Jalili (2009)

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 alcanzar su máxima resistencia. 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



EIC-Lanamme-INF-1150-2022

Página 46 de 68

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) y contenido de vacíos en la mezcla, así como, 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). Se ha demostrado que las MAF con cemento y sin cemento requieren de un tiempo de curado adecuado para desarrollar las propiedades mecánicas requeridas, como la resistencia y la rigidez, como se puede apreciar en la Figura 13.

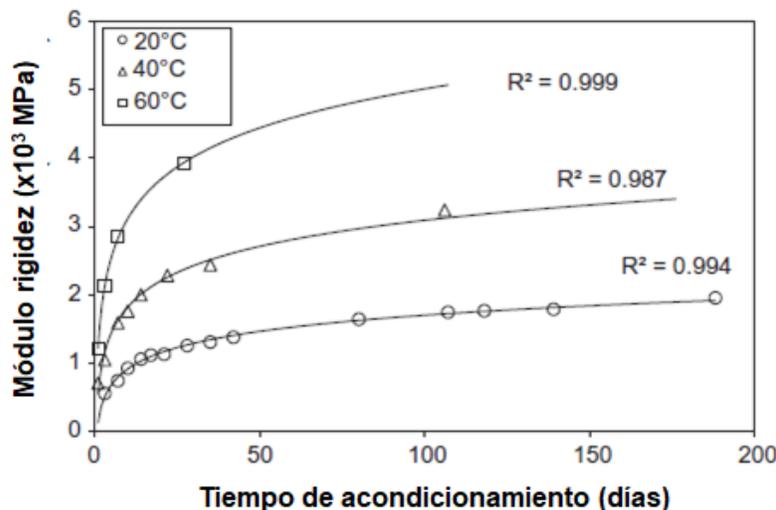


Figura 13. Módulo de rigidez de MAF a diferentes condiciones de curado

Fuente: Doyle et al. (2013)



EIC-Lanamme-INF-1150-2022

Página 47 de 68

Se requiere un curado acelerado para los materiales de MAF 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). La rigidez a largo plazo del material no se logrará hasta que se haya producido una reducción sustancial del contenido de humedad. La principal dificultad que involucra el ensayo de MAF es reconciliar un ensayo de corta duración con la necesidad de simular las condiciones ambientales en el campo. Se han investigado gran variedad de regímenes de acondicionamiento en laboratorio para el curado acelerado de MAF. En la Tabla 11 se presenta un resumen de los regímenes de acondicionamiento utilizados y recomendados para las MAF. Se observa que la temperatura de 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 acondicionamiento en el laboratorio la temperatura promedio del pavimento para cada clima local en particular.

Tabla 11. 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
Sabita (1999)	60	2	
Kishore et al (2008)	60	2	28 días
Yan et al. (2010)	60	2	
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
Brown and Needham (2000)	20	100 + 1 @ 60°C	1 año



EIC-Lanamme-INF-1150-2022

Página 48 de 68

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 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).



EIC-Lanamme-INF-1150-2022

Página 49 de 68

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 para las mezclas asfálticas 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 Institute, 2014). Se ha observado que, en algunas mezclas en frío, un aumento en el nivel de compactación Marshall de 50 a 75 golpes por cara puede resultar en un aumento marginal en el valor de la Estabilidad Marshall, asociado con una leve disminución en el contenido de vacíos de aire debido a un mejor acomodamiento de las partículas de agregado (Dash et al., 2022). 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 que el martillo de impacto Marshall, debido a esto, los Estados Unidos y países europeos utilizan compactadores giratorios en lugar de martillos por impacto (Jain & Singh, 2021). Un mayor 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. Thanaya (2007) estableció una equivalencia entre el método de compactación Marshall y Giratorio para MAF (Tabla 12).



EIC-Lanamme-INF-1150-2022

Página 50 de 68

Tabla 12. Equivalencia entre compactación Marshall y giratoria

Nivel de compactación	Compactación Marshall	Compactación giratoria
Medio	50 golpes por cara	80 giros
Alto	75 golpes por cara	120 giros

Fuente: Thanaya (2007)

A diferencia de la compactación Marshall, no se especifica un número de giros de diseño estándar para la compactación giratoria para 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 la relación entre el módulo de rigidez y la compactación de las MAF, como se muestra en la Figura 14. El tipo y nivel de compactación para mezclas en frío varía de acuerdo con cada metodología, en la Tabla 13 se resumen varios tipos y niveles de compactación utilizados.



EIC-Lanamme-INF-1150-2022

Página 51 de 68

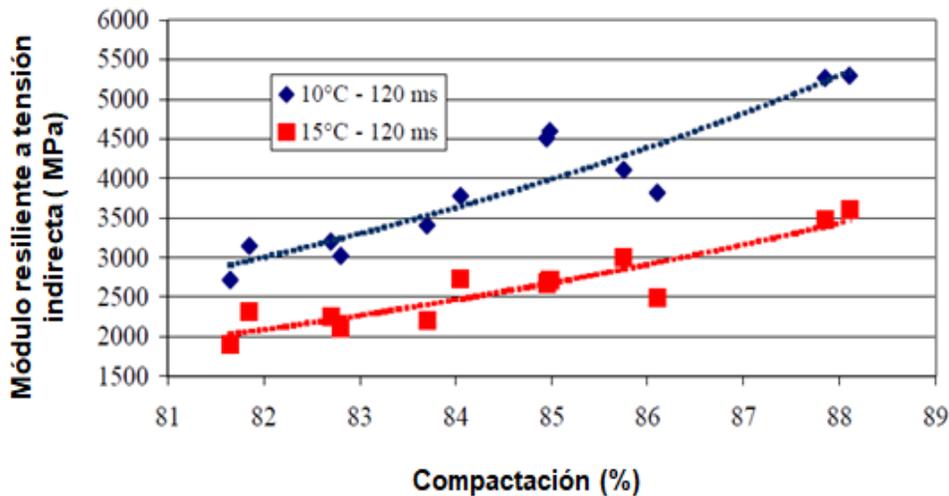


Figura 14. Influencia de la compactación en la rigidez de MAF

Fuente: Serfass et al. (2004)

Tabla 13. 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 °



EIC-Lanamme-INF-1150-2022

Página 52 de 68

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 mezclas en frío 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 las mezclas en frío, el agua atrapada entre los agregados crea vacíos de aire y la composición volumétrica va variando durante del curado por la evaporación del agua (Figura 15).

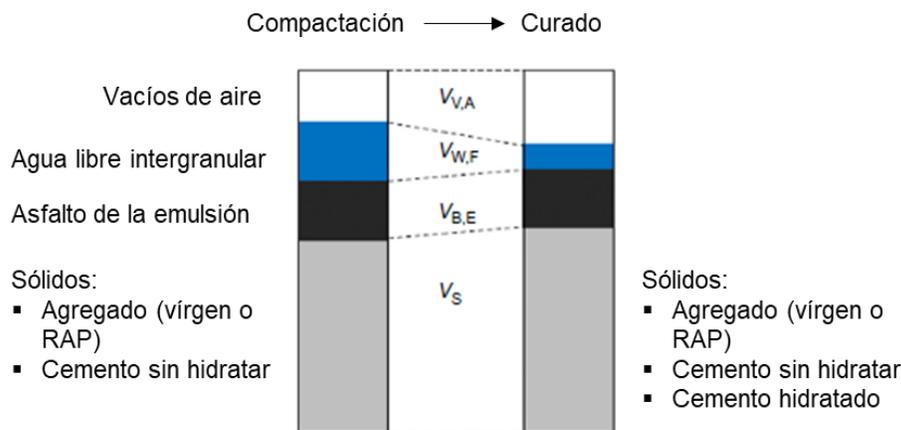


Figura 15. Composición volumétrica de las MAF y su evolución en el tiempo

Fuente: Lin & Xiao (2020)

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 preciso del contenido de vacíos se debe



EIC-Lanamme-INF-1150-2022

Página 53 de 68

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 con 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 14 se muestran rangos de vacíos de aire reportados en la literatura.

Tabla 14. Rango de contenido de vacíos para MAF

Autor	Rango de vacíos de aire
Niazi & Jalili (2009)	9 % - 14 %
Piratheepan (2011)	9 % - 11 %
MORTH (2013)	3 % - 5 %
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-1150-2022

Página 54 de 68

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones

1. La MAF es un material que se caracteriza por ser versátil, económico y ambientalmente amigable, dado que utiliza emulsiones asfálticas; su proceso de producción y aplicación en el campo se hace a temperatura ambiente. Se pueden emplear como superficie de ruedo en caminos de bajo a mediano tránsito, en la estabilización de materiales granulares, en el reciclado en frío de proyectos de rehabilitación y en labores de mantenimiento como bacheo. Sin embargo, se debe considerar que estas mezclas para ganar resistencia se deben curar (disipar humedad) por un periodo de tiempo prolongado si se compara con una MAC. En etapas tempranas del curado, la mezcla es más susceptible a deteriorarse por su baja resistencia y alto contenido de vacíos. La presencia de humedad impide que se desarrolle una buena adherencia agregado-asfalto, acelerando deterioros como ahuellamiento, agrietamiento por fatiga, desnudamiento y otros. Por lo tanto, la estabilidad y la durabilidad de la mezcla en función del tiempo son aspectos que se deben considerar en el diseño de mezcla para asegurar un adecuado desempeño en el campo.
2. No existe un procedimiento de diseño de mezcla universalmente aceptado, sin embargo, el procedimiento del MS-14 sigue siendo muy utilizado. El procedimiento del MS-19 complementa al MS-14 en cuanto el ensayo de adherencia que es esencial para medir el grado de adherencia asfalto-agregado y la susceptibilidad al daño por humedad. Los cuatro métodos de diseño de mezcla descritos tienen procedimientos de compactación y curado diferentes. Los manuales de diseño MS-14 y el MS-19 implementa la compactación con Mazo Marshall. Los métodos de diseño de AASHTO PP-86 y ASTM D 7229 incorporan el uso del compactador giratorio Superpave por simular mejor las condiciones de compactación en campo. El método AASHTO PP-86 es específico para MAF con materiales reciclados (RAP)



EIC-Lanamme-INF-1150-2022

Página 55 de 68

de carpetas asfálticas deterioradas para ser utilizado para capas de base, y describe el procesamiento y caracterización del RAP. A diferencia del MS-14 y MS-19 tiene dos procedimientos para determinar el contenido de asfalto residual óptimo, estabilidad Marshall y resistencia a la tensión indirecta.

3. La estabilidad retenida del 50%, según el MS-14, podría ser insuficiente para garantizar un adecuado desempeño ante el daño por humedad para las condiciones de Costa Rica. El AASHTO MP 31-17 exige mínimo un 70%. El AASHTO MP 31-17 es más exigente en cuanto la estabilidad seca, un 40% más alta. También esta misma especificación exige cumplir con un criterio de durabilidad por medio del ensayo de desprendimiento (raveling test), el cual es importante para considerar la susceptibilidad al desprendimiento de material en etapas tempranas del curado. Se indica no sobrepasar de una relación asfalto residual/cemento de 3 para prevenir un comportamiento rígido de material que sea más propenso al agrietamiento por fatiga.
4. Según los manuales de diseño y las especificaciones técnicas para MAF, las emulsiones asfálticas más adecuadas para granulometrías densas son las emulsiones de rompimiento lento y para granulometría abierta, las emulsiones de rompimiento medio. El tipo de carga de la emulsión (aniónica o catiónica) deberá depender de la compatibilidad con el agregado. Las emulsiones modificadas con polímero han demostrado tener un desempeño mejor en cuanto deformación permanente, fatiga y daño por humedad.
5. Las especificaciones técnicas nacionales se pueden complementar con especificaciones internacionales para mejorar la calidad del material y tener un mejor desempeño en el campo. Incorporando criterios de resistencia retenida más altos y ensayos de desempeño, para evaluar durabilidad y deformación permanente, que son los principales modos de falla.



EIC-Lanamme-INF-1150-2022

Página 56 de 68

6. Para evaluar la respuesta estructural de las MAF se pueden implementar los ensayos convencionales para MAC como módulo resiliente a la tensión indirecta y módulo dinámico. Cabe resaltar que el ensayo de módulo dinámico realiza una caracterización de frecuencias de carga y temperaturas más completo que permite modelar el material de forma más precisa.
7. Se han implementado gran variedad de ensayos de desempeño de MAC para MAF, en los cuales se han evaluado fatiga, deformación permanente y durabilidad. Por el proceso de curado, las MAF son más propensas a fallar por daño por humedad y ahuellamiento. Las condiciones en que se han realizado los ensayos de desempeño han sido variadas en cuanto las características de compactación, curado y temperaturas de ensayo.
8. Una MAF con RAP puede llegar a tener desempeño mecánico superior a una MAF convencional con agregados vírgenes, y es capaz de cumplir con requisitos de estabilidad. La MAF con “RAP moderadamente envejecido” presentan una mayor rigidez y vida a fatiga que una MAF con “RAP severamente envejecido” (con mejor resistencia a la deformación permanente).
9. El RAP puede presentar una alta variabilidad lo cual dificulta el control del contenido de asfalto, la graduación y los vacíos de aire en la producción de mezclas asfálticas, especialmente a porcentajes más altos de RAP. La alta variabilidad se puede ver reflejada en un menor desempeño en el campo. Sin embargo, el uso de técnicas apropiadas para almacenar y procesar RAP puede ayudar a controlar la variabilidad.
10. La incorporación de relleno mineral activo en forma de cal hidratada o cemento disminuye el tiempo de curado, aumenta la resistencia en edades tempranas del curado, provee una menor susceptibilidad a la temperatura, mayor resistencia a la deformación permanente y mejora la resistencia al daño por humedad. La adición de cemento estimula la adhesión entre el agregado y asfalto que finalmente mejora el desempeño mecánico de la mezcla. No obstante, las MAF pueden presentar una



EIC-Lanamme-INF-1150-2022

Página 57 de 68

menor vida a fatiga en comparación con las MAC, sobre todo cuando predomina el contenido de cemento sobre el contenido de asfalto residual.

11. El contenido de agua juega un rol importante en el desempeño de MAF, ya que mejora el recubrimiento de la emulsión asfáltica sobre la superficie del agregado y la trabajabilidad de la mezcla. Sin embargo, la adición excesiva de agua puede afectar negativamente inhibiendo la compactación y aumentando los vacíos de aire, dando como resultado un desempeño deficiente durante la vida temprana de las mezclas compactadas. Un contenido óptimo de fluidos totales ayuda a una mayor densificación de la mezcla compactada, por tanto, un mejor desempeño.
12. La selección del procedimiento de compactación y curado influenciará el desempeño de las mezclas en el laboratorio. Un curado más prolongado o mayor temperatura favorecerá a una mayor disipación de humedad de la mezcla compactada consiguiéndose una mayor resistencia y rigidez. El tipo y grado de compactación también tendrá un efecto en las propiedades de la mezcla. Se debe evitar un grado de compactación muy alta ya que provocaría la degradación de los agregados y el sangrado excesivo de la emulsión asfáltica.
13. El contenido de vacíos de aire de las MAF es alto con respecto a las MAC, lo cual las hace más susceptibles al daño por humedad, al ahuellamiento, a presentar baja estabilidad y ser menos durables. El rango de vacíos de una MAF puede variar entre 10 % y 20 %.

Recomendaciones

1. Para la propuesta de investigación se recomienda el procedimiento de diseño de mezcla del MS-14 incorporando del MS-19 y el AASHTO PP-86 los siguientes aspectos:
 - Ensayo de adherencia (desnudamiento) para evaluar la compatibilidad entre la emulsión y el agregado.



EIC-Lanamme-INF-1150-2022

Página 58 de 68

- Curado de especímenes a 40 °C por 72 horas para ensayos de estabilidad o tensión indirecta.
 - Ensayo de tensión indirecta para evaluar el daño por humedad y determinar el contenido óptimo de asfalto.
 - Saturación en bomba de vacío de especímenes acondicionados a una presión entre 13 kPa y 67 kPa hasta alcanzar un porcentaje de saturación entre 55 % y 75 % y luego la inmersión en agua a 25 °C por 24 horas antes de la falla.
 - Resistencia o estabilidad retenida mínima del 75 % acorde a las condiciones lluviosas de Costa Rica.
 - Ensayos de desprendimiento (raveling test) para evaluar la durabilidad de la mezcla en etapas tempranas de curado, que es cuando el material es más susceptible al desprendimiento.
 - Compactación de especímenes para tensión indirecta con compactador giratorio Superpave con 30 giros, 600 kPa de presión vertical y un ángulo de giro de 1,16°.
2. Para reducir el tiempo de curado, aumentar la rigidez, e incrementar la resistencia al ahuellamiento y al daño por humedad se debe evaluar el efecto de la incorporación de relleno mineral activo (cal o cemento). Si se mejoran estas limitaciones que tienen las mezclas en frío es más factible su implementación. Es importante hacer esta evaluación ya que en el caso de que sea necesario la adición de relleno mineral activo debe existir un sustento técnico sobre su uso.
 3. Evaluar el desempeño ante el daño por humedad y el ahuellamiento con el ensayo de Rueda de Hamburgo, ya que el material, al no tener un desarrollo completo de su rigidez y adherencia durante de curado, es más susceptible a la humedad y a deformarse de forma acelerada.
 4. Se recomienda evaluar varias fuentes de material de perfilado de diferentes planteles del MOPT o dentro de un plantel para determinar cómo la variabilidad puede afectar las dosificaciones de diseño, las propiedades y el desempeño de la



EIC-Lanamme-INF-1150-2022

Página 59 de 68

mezcla. También es importante evaluar un material de RAP procesado, es decir, que haya pasado por un proceso de trituración de sobretamaños y posterior cribado, para tener un material de RAP más homogéneo. Este sería el material idóneo para ser utilizado en MAF. Con esto se podría hacer un análisis de cómo puede afectar el procesamiento del RAP las propiedades físicas y mecánicas de la mezcla y justificar así su implementación.

5. Se recomienda evaluar la emulsión de rompimiento lento que actualmente produce Recope para su uso con MAF con RAP, y a su vez una emulsión rompimiento lento modificada con polímero por los beneficios en cuanto desempeño que podría tener.
6. Evaluar cómo afecta el retraso de la compactación (tiempo entre el mezclado y la compactación) y el tiempo de curado las propiedades de la mezcla compactada (resistencia, rigidez, daño por humedad y ahuellamiento).
7. Valorar la compactabilidad y trabajabilidad de la mezcla mediante el ensayo de punto de entramamiento con el compactador giratorio.
8. Se recomienda establecer un requisito de vacíos para las MAF basado en revisión bibliográfica y en la experiencia que se genere con el proyecto de investigación, ya que es un parámetro fundamental para el adecuado desempeño de las MAF. Inicialmente se podría establecer un criterio de vacíos entre 10 % y 15 %.

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.

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



EIC-Lanamme-INF-1150-2022

Página 60 de 68

- AASHTO. (2018). *Standard specification for cationic emulsified asphalt M 208-18*. Washington, DC: American Association of State Highway and Transportation Officials.
- AASHTO. (2020). *Standard specification for emulsified asphalt (M 140-20)*. Washington, DC: 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
- Arshad et al. (2018). Performance evaluation of dense graded cold mix asphalt. *International Journal of Civil Engineering and Technology, 9(10)*, 549-557.
- 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.



EIC-Lanamme-INF-1150-2022

Página 61 de 68

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

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

Asphalt Institute. (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. (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.

ASTM. (21 de Junio de 2022). *Standard test method for raveling test of cold-mixed emulsified asphalt sample ASTM D 7196-18*. West Conshohocken, Pennsylvania: ASTM Internacional. Obtenido de Compass ASTM.

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

Brown, S., & Needham, D. (2000). study of cement modified bitumen emulsion mixtures. *Proceedings of the annual meeting of the association of Asphalt Paving Technologists*. AAPT.

Cai et al. (2010). Preparation of an SBS latex-modified bitumen emulsion and performance assessment. *Petroleum Science and Technology*, 987-996. doi:10.1080/10916460902939436



EIC-Lanamme-INF-1150-2022

Página 62 de 68

- Carpani, C. (2021). Rheological and performance characterisation of the bitumen recovered from different emulsions for cold mixtures. *Road Materials and Pavement Design*, 214-231. doi:10.1080/14680629.2021.1906735
- 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
- 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.



EIC-Lanamme-INF-1150-2022

Página 63 de 68

Dybalski, D. (1983). A comparison of properties of laboratory prepared cold mixed emulsified and hot mixed asphalt mixtures. *10th Annual Meeting of AEMA*. Palm Springs, California: AEMA.

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.

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



EIC-Lanamme-INF-1150-2022

Página 64 de 68

- 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
- 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.
- Ley N° 9828. (2020). *Uso de materiales reutilizables en pavimentos y obras de infraestructura vial*. San José, Costa Rica: Diario Oficial La Gaceta.
- 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



EIC-Lanamme-INF-1150-2022

Página 65 de 68

- 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. (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
- MORTH. (2013). *Bituminous cold mix: specifications for road and bridge works, sección 500*. New Delhi: Ministry of Road Transport and Highways.
- 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



EIC-Lanamme-INF-1150-2022

Página 66 de 68

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

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.

Pundhir et al. (2010). A cold mix design of semi dense bituminous concrete. *Indian Highways*, 38(3), 17-24.

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



EIC-Lanamme-INF-1150-2022

Página 67 de 68

- Sabita. (1999). *The design and use of emulsion treated bases. Sabita Manual 21*. Cape Town, Sudáfrica;: South African Bitumen Association.
- 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. . (2018). *Development of mix design and structural design procedures for cold in place recycling. Research Report No. P643-15-803*. Reno: Pavement Engineering and Science Program, Department of Civil and Environmental Engineering, University of Nevada.
- 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.
- 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/>



EIC-Lanamme-INF-1150-2022

Página 68 de 68

- 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 et al. (2014). Properties of cold asphalt emulsion mixtures (CAEMs) using materials from old road pavement milling. *Procedia Engineering*, 479-488. doi: 10.1016/j.proeng.2014.12.208
- 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). Evaluating and improving the performance of cold asphalt emulsion mixes. *Civil Engineering Dimension*, 9(2), 64-69.
- 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
- Yan et al. (2010). An experimental study on fatigue properties of emulsion and foam cold recycled mixes. *Construction and Building Materials*, 24(11), 2151-2156. doi:10.1016/j.conbuildmat.2010.04.044
- 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 .