

**EVALUACIÓN DE LA FACTIBILIDAD DE LA APLICACIÓN DE MEZCLAS EN FRÍO PARA  
SUPERFICIES DE RODAMIENTO EN COSTA RICA**

Informe Final

Preparado por  
**Unidad de Investigación (UI)**

**Ing. Mónica Jiménez Acuña**

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) 25 11 49 65  
E-mail: [mjimenez@lanamme.ucr.ac.cr](mailto:mjimenez@lanamme.ucr.ac.cr)

**Ing. Denia Sibaja Obando**

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) 25 11 49 94  
E-mail: [dsibaja@lanamme.ucr.ac.cr](mailto:dsibaja@lanamme.ucr.ac.cr)

**Doris Molina Zamora**

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) 25 11 49 94  
E-mail: [asistenteui@lanamme.ucr.ac.cr](mailto:asistenteui@lanamme.ucr.ac.cr)

San José, Costa Rica

Noviembre 2008

## ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE TABLAS .....	5
ÍNDICE DE FIGURAS .....	6
CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN .....	7
1.1 Justificación e importancia .....	7
1.2 Objetivo general .....	8
1.3 Objetivos específicos.....	8
CAPÍTULO 2 MEZCLAS EN FRÍO.....	10
2.1 Definición.....	10
2.2 Clasificación según el método de mezclado .....	10
2.3 Clasificación según el tipo de curva granulométrica.....	11
2.4 Mezclas en frío para mantenimiento .....	12
CAPÍTULO 3 ENSAYOS DE LABORATORIO PARA LOS COMPONENTES DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS EN FRÍO .....	16
3.1 Ensayos para emulsiones asfálticas .....	16
3.1.1 Muestreo de emulsiones .....	18
3.1.2 Viscosidad Saybolt Furol .....	19
3.1.3 Estabilidad de almacenamiento .....	20
3.1.4 Demulsibilidad .....	20
3.1.5 Recubrimiento y resistencia al agua .....	20
3.1.6 Mezclado de la emulsión asfáltica.....	21
3.1.7 Ensayo del tamiz .....	21
3.1.8 Destilación del residuo y aceite .....	21
3.1.9 Ensayos al residuo de asfalto .....	22
3.2 Ensayos para los asfaltos rebajados .....	22
a) Asfalto rebajado de curado rápido RC .....	23
b) Asfalto rebajado de curado medio MC.....	23
c) Asfalto rebajado de curado lento SC.....	23
3.3 Ensayos para los agregados .....	26
3.3.1. Muestreo y cuarteo de agregados .....	27
3.3.2. Granulometría .....	28
3.3.3. Índice de plasticidad .....	28
3.3.4. Peso unitario.....	29
3.3.5. Caras fracturadas.....	29
3.3.6. Equivalente de arena .....	30
3.3.7. Abrasión de Los Ángeles .....	30
3.3.8. Durabilidad por acción de sulfatos .....	31
3.3.9. Índice de durabilidad .....	31
3.3.10. Carbonatos solubles .....	31
3.3.11. Partículas friables.....	31
CAPITULO 4 ENSAYOS PARA LAS MEZCLAS EN FRÍO .....	32
4.1 Muestreo de mezclas en frío .....	36
4.2 Recubrimiento de las partículas .....	36

4.3	Procedimiento para el diseño de mezcla Marshall con emulsión asfáltica .....	38
4.4	Porcentaje de vacíos de aire .....	42
4.5	Estabilidad y flujo Marshall a 22.2 °C .....	43
4.6	Procedimiento para el diseño de mezcla Marshall con asfaltos rebajados.....	48
4.7	Procedimiento para el diseño de mezcla Hveem para mezclas con emulsión asfáltica 54	
4.8	Procedimiento para el diseño de mezcla Hveem para mezclas con asfalto rebajado	58
4.9	Módulo resiliente a 23 °C .....	59
CAPÍTULO 5 ESPECIFICACIONES DE CALIDAD .....		61
5.1.	Emulsión asfáltica .....	61
5.2.	Asfalto rebajado.....	62
5.3.	Agregado .....	64
5.4.	Agua .....	66
5.5.	Relleno mineral .....	66
5.6.	Mezclas en frío .....	67
CAPÍTULO 6 EQUIPOS Y PROCEDIMIENTOS PARA LA CONSTRUCCIÓN .....		69
6.1.	Equipo para mezcla producida en sitio.....	69
6.1.1.	Equipo para mezclado .....	69
a)	Mezcladoras rotatorias .....	69
b)	Moto niveladora.....	72
c)	Plantas móviles .....	72
d)	Distribuidor de agua .....	74
e)	Distribuidor de asfalto.....	74
6.1.2.	Equipo para la colocación .....	75
a)	Moto niveladora.....	75
b)	Colocadores especializados (spreaders) .....	76
6.1.3.	Equipo para la compactación .....	76
a)	Compactador de llantas de hule (neumáticos).....	76
b)	Compactadores de rodillo metálico .....	77
c)	Compactadores vibratorios.....	78
6.1.4.	Otros equipos.....	79
6.2.	Requerimientos generales para la construcción de mezclas en frío preparadas en sitio 80	
6.2.1.	Preparación de la superficie de rodadura .....	80
6.2.2.	Preparación de camellones .....	82
6.2.3.	Consideraciones generales sobre los materiales componentes .....	84
a)	Agregado mineral .....	84
b)	Ligante asfáltico.....	85
6.2.4.	Determinación de la tasa de aplicación del asfalto .....	87
6.2.5.	Mezclado.....	89
6.2.6.	Aireación .....	91
6.2.7.	Colocación y compactación.....	92
6.3.	Equipo para mezclado en planta.....	94
6.3.1.	Plantas estacionarias.....	94
6.3.2.	Camiones transportadores:.....	96
6.3.3.	Moto niveladoras .....	96
6.3.4.	Pavimentadoras .....	96
6.3.5.	Equipo para extender la mezcla .....	97

6.3.6.	Equipo para extender la mezcla .....	97
6.4.	Requerimientos para la construcción de mezclas en frío preparadas en planta .....	98
6.4.1.	Preparación de la mezcla.....	98
6.4.2.	Aireación de la mezcla preparada en planta.....	99
6.4.3.	Colocación y compactación.....	99
6.5.	Reparación de baches.....	100
6.5.1.	Colocar y compactar (throw-and-roll) .....	102
6.5.2.	Semi-permanente .....	104
6.5.3.	Inyección a presión .....	105
6.6.	Clima .....	106
6.7.	Control de tránsito .....	106
CAPÍTULO 7 CARACTERÍSTICAS DE LOS PROYECTOS EN LOS CUALES ESTA TÉCNICA SE HA APLICADO EN OTROS PAÍSES .....		108
7.1.	Colombia.....	109
a)	Pavimentación de la Vía Quibdo-Yuto, Departamento del Chocó-Colombia	110
7.2.	Suecia.....	114
7.3.	India .....	115
CAPÍTULO 8 FACTIBILIDAD DE LA CONSTRUCCIÓN DE MEZCLAS EN FRÍO EN COSTA RICA		117
8.1	Implementación .....	117
8.2	Producción de asfalto rebajado y/o emulsión asfáltica .....	117
8.3	Producción de agregados.....	118
8.4	Maquinaria y equipos.....	118
8.5	Costos.....	119
CAPÍTULO 9 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....		120
9.1	Conclusiones .....	120
9.2	Recomendaciones .....	121
CAPÍTULO 10 REFERENCIAS .....		123

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Guía para el uso de productos derivados del asfalto en mezclas en frío.....	11
Tabla 2. Resumen de métodos de ensayo que se realizan en emulsiones catiónicas. ....	17
Tabla 3. Resumen de métodos de ensayo que se realizan en emulsiones asfálticas en general. ....	18
Tabla 4. Resumen de métodos de ensayo que se realizan en asfaltos rebajados de curado rápido RC.....	24
Tabla 5. Resumen de métodos de ensayo que se realizan en asfaltos rebajados de curado medio MC.....	25
Tabla 6. Resumen de métodos de ensayo que se realizan en asfaltos rebajados de curado lento SC. ....	25
Tabla 7. Métodos de ensayo para los agregados que se utilizan para mezclas en frío.....	27
Tabla 8. Métodos de ensayo para las mezclas en frío. ....	32
Tabla 9. Selección del contenido de emulsión asfáltica. ....	54
Tabla 10. Resumen de especificaciones para emulsiones aniónicas, utilizadas en la construcción de mezclas en frío.....	61
Tabla 11. Resumen de especificaciones para emulsiones catiónicas, utilizadas en la construcción de mezclas en frío.....	62
Tabla 12. Especificaciones mínimas y máximas para el asfalto rebajado de curado medio para construcción de mezclas en frío.....	63
Tabla 13. Especificaciones mínimas y máximas para el asfalto rebajado de curado lento para construcción de mezclas en frío.....	63
Tabla 14. Resumen de especificaciones para los agregados finos y gruesos, utilizados en la construcción de mezclas asfálticas en frío.....	64
Tabla 15. Resumen de especificaciones granulométricas para en la construcción de mezclas asfálticas en frío de graduación densa. ....	65
Tabla 16. Resumen de especificaciones granulométricas para en la construcción de mezclas asfálticas en frío de graduación abierta. ....	65
Tabla 17. Resumen de especificaciones granulométricas para en la construcción de mezclas asfálticas en frío de arena-emulsión.....	66
Tabla 18. Resumen de especificaciones granulométricas para los rellenos minerales para ser utilizados en mezclas en frío. ....	66
Tabla 19. Requerimientos para mezcla asfáltica con granulometría densa .....	67
Tabla 20. Requerimientos para mezcla asfáltica con granulometría densa .....	67
Tabla 21. Requerimientos para mezcla asfáltica con granulometría densa .....	67
Tabla 22. Requerimientos para mezcla asfáltica con granulometría densa .....	68
Tabla 23. Temperaturas típicas para la fabricación de mezclas en frío. ....	85
Tabla 24. Toneladas anuales de mezcla asfáltica en frío utilizada en Europa y en otros lugares .....	109

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Mezcla en frío tipo apilamiento de uso inmediato.....	14
Figura 2: Mezcla en frío de uso inmediato de marca registrada. ....	15
Figura 3: Ejemplos de contenedores para el muestreo de emulsión asfáltica. ....	19
Figura 4: Equipo de ensayo para viscosidad Saybolt Furol. ....	20
Figura 5: Definición gráfico de cara fracturada. ....	30
Figura 6: Gráficos del comportamiento típico de la mezcla en frío diseñada por Marshall.....	46
Figura 7: Ejemplo de la relación de temperatura-viscosidad para un asfalto rebajado de cura media. ....	50
Figura 8: Ejemplo de la composición para un asfalto rebajado de cura media.....	51
Figura 9: Gráficos del comportamiento típico de la mezcla en frío con asfalto rebajado diseñada por Marshall.....	53
Figura 10: Esquema experimental para mezclas de granulometría densa y emulsión asfáltica. ....	56
Figura 11: Esquema experimental para mezclas de granulometría densa y emulsión asfáltica (cont). ....	57
Figura 12: Disposición del espécimen para ensayo de módulo resiliente.....	60
Figura 13: Porcentaje mínimo de vacíos en el agregado mineral.....	68
Figura 14: Mezcladoras rotatorias.....	69
Figura 15: Máquinas de perfilado.....	71
Figura 16: Equipo de reciclado en frío en sitio. ....	71
Figura 17: Equipo moto niveladora para mezclado con cuchilla. ....	72
Figura 18: Equipo planta móvil equipada con tolva. ....	73
Figura 19: Distribuidor de agua. ....	74
Figura 20: Distribuidor de asfalto.....	75
Figura 21: Colocadores especializados. ....	76
Figura 22: Compactadores de llanta de hule. ....	77
Figura 23: Compactadores de rodillo metálico. ....	78
Figura 24: Compactadores de rodillo metálico de tres llantas. ....	78
Figura 25: Equipos para bacheo. ....	79
Figura 26: Aplicación de la capa de imprimación. ....	81
Figura 27: Barrido de la superficie. ....	81
Figura 28: Camellón de agregado antes del mezclado. ....	82
Figura 29: Estándar de camellón.....	83
Figura 30: Mezcla colocada en el carril en camellón.....	91
Figura 31: Compactación.....	93
Figura 32: Planta de bache de mezcla en frío. ....	95
Figura 33: Planta continua de mezcla en frío. ....	95
Figura 34: Distintos tipos de camiones transportadores.....	96
Figura 35: Equipo para extendido de la mezcla. ....	97
Figura 36: Mezcla en frío siendo cargada al camión transportador. ....	99
Figura 37: Formación de los huecos. ....	101
Figura 38: Técnica colocar y compactar. ....	103
Figura 39: Técnica semipermanente. ....	105
Figura 40: Técnica de inyección a presión.....	106
Figura 41: Proyecto de la Vía Quibdo-Yuto.....	114
Figura 42: Proyecto de la ruta Hössjö – Överboda.....	115
Figura 43: Proyecto de la ruta Dantaur- Khajuwala (Rajastán) en abril, 2007.....	116
Figura 44: Proyecto de la ruta Jammu- Srinagar (NH-1A) en setiembre, 2007.....	116

# **CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN**

## **1.1 Justificación e importancia**

Las mezclas asfálticas en frío se vuelven atractivas como una alternativa en contraposición con el uso de las mezclas asfálticas en caliente, debido a la creciente necesidad de encontrar soluciones que representen una economía en las inversiones, y que al mismo tiempo permitan un desarrollo sostenible. Es por esta razón que se considera importante que en nuestro país se inicie la revisión y estudio de las ventajas de la aplicación de esta tecnología pues hay experiencia de la aplicación de estas mezclas en nuestro país.

Las presiones por la conservación del medio ambiente a nivel mundial, hacen que las mezclas en frío representen una alternativa viable, pues la producción de estas mezclas implica un ahorro en el consumo de energía así como una reducción en la generación de vapores tóxicos y polvo.

Como ventaja que presenta este tipo de mezclas está su versatilidad, pues permite utilizar una gran variedad de agregados y tipos de emulsiones, además pueden ser utilizadas en condiciones ambientales diversas, ya que uno de los requerimientos es cumplir con una temperatura ambiente mayor de 10 °C, condición térmica que se puede cumplir en la mayoría de las zonas del país.

Se han observado buenos resultados al emplear este tipo de mezclas en las distintas capas que conforman la estructura del pavimento, como la subbase, base o capa de rodadura. Cuando se trata de capas de rodamiento, las mezclas en frío de graduación densa se utilizan típicamente para tránsitos medios y livianos, pero las de graduación abierta se han utilizado con éxito para tránsitos pesados.

Para la reparación de los tipos de deterioro como roturas de la superficie, que penetran hasta la base o por debajo de ella, se podrán utilizar las mezclas en frío seleccionando, la que más se adecúe a la medida de la rotura, de acuerdo a sus características granulométricas y textura superficial.

Debido a estas razones es importante profundizar en el conocimiento de esta tecnología, en sus posibles usos y especificaciones para poder aplicarla correctamente en nuestro medio. También es necesario realizar una revisión de los ensayos de laboratorio que se utilizan para el diseño y caracterización de desempeño de estas mezclas, tanto para los componentes como para la combinación de los mismos.

Luego, de la conceptualización y diseño de esta alternativa, es necesario hacer hincapié en los procesos constructivos que produzcan un desempeño adecuado de esta tecnología. Se tienen dos opciones para la fabricación de este tipo de mezclas: mezcladas en planta o mezcladas en el sitio de pavimentación, por lo tanto es necesario estudiar ambas para identificar las ventajas de cada una y la factibilidad de su aplicación en nuestro país.

La decisión del uso de estas mezclas, dependerá de las consideraciones como: la comparación técnica-económica, la magnitud y lugar de emplazamiento de la obra, el tránsito, las condiciones climáticas predominantes, entre otras. La finalidad de esta investigación será brindar las bases para que esta alternativa de pavimentación influya de manera positiva en el desarrollo de nuestro país.

## **1.2 Objetivo general**

Proveer el soporte técnico relacionado con los conceptos teóricos y prácticos, de la utilización de las mezclas asfálticas en frío, para la implementación de esta alternativa de pavimentación en Costa Rica.

## **1.3 Objetivos específicos**

- Definir el concepto de mezclas en frío y las diferentes formas de clasificarlas.
- Indagar sobre los procedimientos de ensayo de laboratorio utilizados para diseñar y determinar el desempeño de estas mezclas y las características de sus componentes.
- Revisar y sintetizar las especificaciones de calidad para los agregados, emulsión asfáltica, asfaltos rebajados y para la mezcla que forman parte de los requisitos para el uso de estas mezclas.
- Presentar información acerca de los equipos y procesos adecuados para la construcción de las mezclas en frío.

- Investigar las características de nuestros materiales y la posibilidad de que sean utilizados en la producción de mezclas asfálticas en frío.
- Revisar y resumir las características de los proyectos en los cuales esta técnica se ha aplicado en otros países.
- Comparar económicamente, de manera teórica (hay que revisar los casos en los que se ha aplicado), esta opción de pavimentación y bacheo, con las técnicas actuales aplicadas en nuestro país, con la selección de distintas rutas donde se ha aplicado bacheo con mezcla en caliente para evaluar el estado de los mismos y realizar una comparación de costos reales con los casos en los que se ha aplicado mezclas en frío.

## CAPÍTULO 2 MEZCLAS EN FRÍO

### 2.1 Definición

La mezcla asfáltica en frío es una mezcla de agregado mineral con o sin relleno mineral con asfalto emulsionado o rebajado, todo el proceso se lleva a cabo a temperatura ambiente.

En general, las mezclas en frío se clasifican dependiendo del ligante que se utilice, la manera de mezclado, por granulometría, si se utiliza material reciclado y finalmente, por periodo de almacenamiento. Estas clasificaciones se describen brevemente a continuación.

La **mezcla asfáltica en frío con emulsión** es producida con asfalto que ha sido emulsionado en agua antes de mezclarlo con el agregado. En este estado de emulsión el asfalto es menos viscoso y la mezcla es más fácil de trabajar y compactar. La emulsión romperá luego de que suficiente agua se haya evaporado y la mezcla en frío comienza a tener una buena resistencia.

Se utiliza comúnmente como material para bacheo en rutas de bajo tránsito.

La **mezcla con asfalto rebajado** es producida con asfalto que ha sido disuelto en keroseno u otra fracción más liviana del petróleo antes de mezclarlo con el agregado. Luego de que la mezcla es colocada la fracción volátil se evapora. Debido a que esto resulta en contaminación del aire, el uso de asfaltos rebajados es ilegal en los Estados Unidos desde los años 70. Aunque son muy utilizados en Europa y el resto del mundo, especialmente para el reciclado de pavimentos ya oxidados.

### 2.2 Clasificación según el método de mezclado

Las mezclas en frío se clasifican según el método de mezclado, en dos tipos: **mezclado en planta** y **mezclado en el sitio** de pavimentación.

Las **mezclas en frío mezcladas en planta** se producen en plantas estacionarias que permiten un control más estricto desde la producción de los materiales hasta el proporcionamiento durante el mezclado. La colocación y la compactación se hacen con los equipos convencionales de pavimentación.

Las **mezclas en frío mezcladas en el sitio**, se producen en el lugar de pavimentación por medio de plantas móviles, niveladoras, o equipo especial de mezclado en sitio.

En la **Tabla 1** se muestra un resumen de la recomendación de uso de las emulsiones asfálticas y asfaltos rebajados para la fabricación de los distintos tipos de mezclas en frío.

**Tabla 1.** Guía para el uso de productos derivados del asfalto en mezclas en frío<sup>1</sup>.

Tipo de Construcción			Asfaltos emulsificados								Asfaltos rebajados								
			Aniónicos				Catiónicos				Curado Medio			Curado lento					
			MS - 2	HFMS - 2	MS - 2h	HFMS - 2h	HFMS - 2 S	SS - 1	SS - 1 h	CMS - 2	CMS - 2h	CSS - 1	CSS - 1 h	70	250	800	3000	250	800
Mezcla Fría de planta para capas	Base y Superficies	Agregados con granulometrías abiertas	x	x					x	x									
		Agregados bien graduados				x	x	x			x	x		x	x	x	x	x	x
	Parcheo uso inmediato						x	x			x	x		x	x			x	
	Parcheo apilamiento													x	x			x	x
Mezclado en sitio	Base y Superficies	Agregados con granulometrías abiertas	x	x					x	x					x	x		x	x
		Agregados bien graduados				x	x	x			x	x		x	x		x	x	
		Arena				x	x	x			x	x	x	x	x				
		Suelos arenosos				x	x	x			x	x		x	x				
	Parcheo uso inmediato					x	x	x			x	x		x	x			x	

<sup>1</sup> Tabla tomada de MS-14 Manual de Mezclas Asfálticas en Frío.

### 2.3 Clasificación según el tipo de curva granulométrica

También, se pueden clasificar dependiendo del tipo de curva granulométrica de los agregados, es decir, agregado de **graduación abierta** o de **graduación densa**.

También, existen **mezclas en frío con material recuperado** del pavimento que ha sido removido de su sitio original y reducido a tamaño de partícula con los procedimientos adecuados, puede ser usado para la fabricación de mezclas asfálticas mezcladas y

colocadas en frío. Al material de reciclado se le puede añadir más agregado, relleno mineral o asfalto.

## 2.4 Mezclas en frío para mantenimiento

El mayor uso de mezclas en frío es en el mantenimiento, que consisten en tres tipos: “de uso inmediato”, que en muchos casos han sido patentizadas como productos previamente preparados, “de apilamiento”, cuyo uso está previsto para el largo plazo (más de 6 meses) y “de apilamiento utilizando RAP” (Reclaimed Asphalt Pavement) las cuales utilizan material recuperado en frío.

- *Mezclas en frío “de apilamiento”*: Durante los meses de invierno, las mezclas para mantenimiento son almacenadas en apilamientos, estas mezclas pueden ser producidas al final del verano, transportadas y almacenadas en lugares alejados para su uso posterior. Estas mezclas pueden ser usadas luego de periodos de almacenamiento de más de 6 meses, y se mantienen trabajables sin tener que ser calentadas. Un cascarón delgado se forma en la superficie del apilamiento, pero debajo de este, la mezcla mantiene sus características.

La producción de las mezclas para apilar es una operación relativamente simple, el equipo básico requerido para producir grandes cantidades incluye un tambor mezclador y un sistema para la adecuada dosificación de los agregados y la emulsión. El control de la dosificación se realiza por peso.

La mezcla debe ser almacenada en un área limpia para evitar su contaminación. No se debe almacenar en un área baja donde el agua se pueda introducir dentro de la mezcla, por esta razón es recomendado almacenarla en un área cubierta que provea una mejor protección y ayude a mantener la trabajabilidad.

La consistencia adecuada de esta mezcla depende considerablemente de la formulación de la emulsión asfáltica. La trabajabilidad proviene del uso de solventes en la emulsión. La duración y la trabajabilidad de las mezclas de apilamiento a bajas temperaturas son directamente proporcionales a la cantidad de solvente en la emulsión. El uso de solventes en los materiales asfálticos está disminuyendo por razones

ambientales, sin embargo, las emulsiones asfálticas tienen menos contenido de solventes comparadas con los asfaltos rebajados requeridos para las mezclas de apilamiento.

- *Mezclas en frío “**de apilamiento**” utilizando RAP:* muchos proyectos de sobrecapas de mezcla asfáltica incluyen trabajos de fresado que pueden producir grandes cantidades de RAP. Son numerosas las aplicaciones del RAP, y una de ellas es el uso de ese material para producir mezclas de mantenimiento.

Es recomendado que, cuando sea posible, el fresado en frío sea utilizado para remover las capas de mezcla asfáltica, lo cual produce pequeñas piezas que evita el uso de los quebradores.

El manejo de los apilamientos es muy importante, se debe seleccionar un lugar adecuado para el material de RAP, donde este pueda ser procesado y almacenado, además es importante separarlo dependiendo de la fuente para producir apilamientos más uniformes.

La emulsión asfáltica se agrega al RAP utilizando una planta de mezclado. Se han desarrollado formulaciones especiales para las emulsiones que se utilizarían para las mezclas de mantenimiento con RAP, pues se necesita el ablandamiento del asfalto envejecido del RAP. Los contenidos de emulsión típicos para estas mezclas están en un rango de 1 a 2.5% por peso seco de RAP. Se debe realizar un diseño de mezcla para determinar el contenido de emulsión y las proporciones de RAP.

Estas mezclas son usadas con éxito tanto en espesores delgados y de mayor espesor para bacheo y también se pueden usar para la reparación de huecos aislados. En lugares donde los agregados gruesos y quebrados no están disponibles o son difíciles de conseguir, el uso del RAP es recomendado para la fabricación de mezclas de mantenimiento.

- *Mezclas en frío “**de uso inmediato**”:* las emulsiones asfálticas pueden ser utilizadas muy efectivamente para la preparación de mezclas para mantenimiento de uso inmediato. La mezcla emulsión-agregado puede ser producida en un tambor mezclador y transportada al sitio donde van a ser utilizadas. A pesar de que se recomienda utilizar

mezcladoras de planta, se pueden producir mezclas de calidad aceptable, utilizando un distribuidor de asfalto y mezclando con una moto-niveladora o con una mezcladora de espas. Para obtener un buen recubrimiento y buena adhesión no es necesario calentar los agregados, si se utiliza la emulsión adecuada.

Las emulsiones asfálticas recomendadas son: CMS-2, CMS-2h y HFMS-2s. Se pueden utilizar otros tipos de emulsiones si la experiencia demuestra que se pueden obtener resultados satisfactorios. Los agregados deben cumplir con las especificaciones de calidad establecidas para las mezclas en frío en general. La granulometría de estas mezclas es la que se muestra más adelante.

Las emulsiones asfálticas contienen pequeñas cantidades de solventes, que generalmente producen el mejor resultado para las mezclas en frío, utilizadas para bacheo. La mezcla se rigidiza cuando el solvente se evapora. A la hora de dosificar el agua dentro de la mezcla se debe tomar en cuenta, el tiempo con el que se dispone para abrir el tránsito nuevamente (Ver Figura 1).



**Figura 1:** Mezcla en frío tipo apilamiento de uso inmediato.

Finalmente, se tienen *las mezclas en frío para bacheo (cold patching)*, que pueden ser fabricadas en mezcladoras pequeñas o también vienen empacadas bajo una marca registrada.

Estas mezclas se utilizan para bacheo de emergencia, cuya duración es corta solo para evitar que el daño se extienda a las capas subyacentes o el hueco se haga más grande.

Luego se somete a un tratamiento más duradero. Se aplican en climas secos y también en clima húmedos lo cual las hace muy versátiles. (Ver Figura 2)



**Figura 2:** Mezcla en frío de uso inmediato de marca registrada.

Esto se puede realizar con una cuadrilla que va hueco por hueco o también se puede utilizar equipo especializado de mezclado e inyección.

## **CAPÍTULO 3 ENSAYOS DE LABORATORIO PARA LOS COMPONENTES DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS EN FRÍO**

Los métodos de ensayo para la caracterización y el control de calidad para los componentes de las mezclas en frío están establecidos en las normas internacionales AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials) y ASTM (American Society for Testing and Materials).

### **3.1 Ensayos para emulsiones asfálticas**

Los ensayos de laboratorio se realizan para medir ya sea el desempeño u otras características de composición, consistencia y estabilidad del material. El propósito de los ensayos es proveer datos para establecer los requisitos de especificación, también para controlar la calidad y uniformidad del producto durante la fabricación y uso, finalmente para predecir y controlar el manejo, almacenaje y las propiedades de desempeño en campo de las emulsiones. Las emulsiones asfálticas se clasifican en catiónicas y aniónicas. Los ensayos están diseñados para medir distintas propiedades a las emulsiones y a los residuos de la emulsión (asfalto residual).

#### **a) Emulsiones catiónicas**

Para las emulsiones catiónicas los requisitos de ensayo se establecen en las normas AASHTO M 208 y ASTM D 2397. En la Tabla 2 se presenta un resumen de los métodos de ensayo para las emulsiones **catiónicas**.

#### **b) Emulsiones aniónicas**

Para las emulsiones **aniónicas** o en general, los requisitos de ensayo se establecen en las normas AASHTO M 140 y ASTM D 977. En la Tabla 3 se presenta un resumen de los métodos de ensayo para las emulsiones asfálticas en general.

En el método de ensayo AASHTO T 59 también se mencionan otras prueba para las emulsiones, contenido de agua (secciones 4-10), identificación del aceite destilado por

medio de micro-destilación (secciones 16-20), asentamiento (secciones 45-50), recubrimiento (secciones 64-67), miscibilidad en agua (secciones 68-70), congelamiento (secciones 71-73) que en nuestro caso no aplica pues no se presentan temperaturas tan bajas en el país, ensayo de identificación para emulsiones catiónicas de rompimiento rápido (secciones 97-105), identificación de emulsiones catiónicas de rompimiento lento (secciones 106-112), método de campo para recubrimiento (secciones 113-118), recubrimiento para la fórmula de trabajo (secciones 119-125) y el peso por galón de emulsión (secciones 126-132).

**Tabla 2.** Resumen de métodos de ensayo que se realizan en emulsiones catiónicas.

<b>TIPO DE ENSAYO</b>	<b>DESIGNACIÓN AASHTO</b>	<b>DESIGNACIÓN ASTM</b>
<b><i>En la emulsión</i></b>		
Selección y uso	R 5	D 3628
Muestreo	T 40	D 140
Viscosidad Saybolt Furol a 25 °C y 50 °C	T 59 (34-38) <sup>1</sup>	D 244 (34-38) <sup>1</sup>
Porcentaje de estabilidad de almacenamiento en 24 h	T 59 (82-88) <sup>1</sup>	D 244 (82-88) <sup>1</sup>
Porcentaje de demulsibilidad en 35 ml de dioctil sulfosucinato de sodio al 0.8%	T 59 (39-44) <sup>1</sup>	D 244 (39-44) <sup>1</sup>
Recubrimiento y resistencia al agua en: Agregado seco, antes y después de lavado Agregado húmedo, antes y después de lavado	M 280 T 59 (74-81) <sup>1</sup>	D 2397 D 244 (74-81) <sup>1</sup>
Porcentaje de mezclado del cementante asfáltico	M 280 T 59 (51-57) <sup>1</sup>	D 2397 D 244 (51-57) <sup>1</sup>
Porcentaje retenido en el tamiz	T 59 (58-63) <sup>1</sup>	D 244 (58-63) <sup>1</sup>
Tipo de carga eléctrica de la emulsión	T 59 (28-33) <sup>1</sup>	D 244 (28-33) <sup>1</sup>
Destilación Porcentaje de aceite destilado Porcentaje de residuo	T 59 (11-15) <sup>1</sup> T 59 (21-27) <sup>1</sup>	D 244 (11-15) <sup>1</sup> D 244 (21-27) <sup>1</sup>
<b><i>En el residuo de la destilación (asfalto residual)</i></b>		
Penetración a 25 °C	T 49	D 5
Ductilidad a 25 °C	T 51	D 113
Porcentaje de solubilidad en tricloroetileno	T 44	D 2042

<sup>1</sup> Los números indicados en los paréntesis indican las secciones que aplican dentro del método de ensayo.

**Tabla 3.** Resumen de métodos de ensayo que se realizan en emulsiones asfálticas en general.

TIPO DE ENSAYO	AASHTO	ASTM
<b>En la emulsión</b>		
Selección y uso	R 5	D 3628
Muestreo	T 40	D 140
Viscosidad Saybolt Furol a 25 °C y 50 °C	T 59 (34-38) <sup>1</sup>	D 244 (34-38) <sup>1</sup>
Porcentaje de estabilidad de almacenamiento en 24 h	T 59 (82-88) <sup>1</sup>	D 244 (82-88) <sup>1</sup>
% demulsibilidad en 35 ml de cloruro de calcio al 0.02 de Normalidad	T 59 (39-44) <sup>1</sup>	D 244 (39-44) <sup>1</sup>
Recubrimiento y resistencia al agua en: Agregado seco, antes y después de lavado Agregado húmedo, antes y después de lavado	M 280 T 59 (74-81) <sup>1</sup>	D 2397 D 244 (74-81) <sup>1</sup>
Porcentaje de mezclado del cementante asfáltico	M 280 T 59 (51-57) <sup>1</sup>	D 2397 D 244 (51-57) <sup>1</sup>
Porcentaje retenido en el tamiz	T 59 (58-63) <sup>1</sup>	D 244 (58-63) <sup>1</sup>
Destilación Porcentaje de aceite destilado Porcentaje de residuo	T 59 (11-15) <sup>1</sup> T 59 (21-27) <sup>1</sup>	D 244 (11-15) <sup>1</sup> D 244 (21-27) <sup>1</sup>
<b>En el residuo de la destilación</b>		
Penetración a 25 °C	T 49	D 5
Ductilidad a 25 °C	T 51	D 113
Porcentaje de solubilidad en tricloroetileno	T 44	D 2042
Flotamiento a 60 °C	T 50	D 139

<sup>1</sup> Los números indicados en los paréntesis indican las secciones que aplican dentro del método de ensayo.

Es importante aclarar que no todos los ensayos se tienen que realizar siempre, sino la combinación de ensayos depende del tipo de emulsión, por ejemplo el ensayo de flotamiento se realiza en emulsiones Tipo HFRS-2, HFMS-1, HFMS-2, HFMS-2h y HFMS-2s.

Esta sección es para ilustrar acerca de todas las posibles características que se pueden medir a las emulsiones asfálticas en general.

A continuación se describen los métodos de ensayo que se mencionan en la Tabla 2 y la Tabla 3.

### 3.1.1 Muestreo de emulsiones

El propósito es obtener muestras representativas para poder caracterizarlas y que den a conocer las condiciones reales y la naturaleza de la emulsión asfáltica. El procedimiento

estándar para el muestreo se describe en los métodos AASHTO T 40 o ASTM D 140 "Práctica estándar para el muestreo de materiales bituminosos".

Es preferible obtener las muestras en el punto de producción, manufactura o almacenamiento. Si esto no es posible entonces, se tiene que muestrear en el punto de envío antes de la entrega del material. Los contenedores deben ser recipientes metálicos con tapa de sello por presión, o botellas de abertura ancha hechas de plástico, de tapa de rosca. El tamaño debe corresponder con la cantidad requerida de muestra, pero generalmente se utilizan contenedores de 4 litros (1 galón). (Ver Figura 3)



**Figura 3:** Ejemplos de contenedores para el muestreo de emulsión asfáltica.

Es importante tener presente que, luego de llenar, sellar y limpiar los contenedores de las muestras, los mismos se deben identificar, no utilizar la tapa. Las muestras se deben enviar al laboratorio el mismo día que fueron tomadas.

Cada muestra debe identificarse con la siguiente información como mínimo:

- Fabricante, sitio de despacho, número de boleta de despacho.
- Fecha de muestreo.
- Nombre del técnico de muestreo.
- Clasificación de la emulsión.
- Otra información importante que sea necesaria.

### **3.1.2 Viscosidad Saybolt Furol**

La viscosidad es la resistencia al flujo de los fluidos y es una propiedad que afecta su utilización. La viscosidad se mide con el viscosímetro de Saybolt Furol, el resultado de ensayo se reporta en segundos. Además el ensayo se realiza a dos temperaturas: 25 °C y 50 °C. El

método estándar está descrito en AASHTO T 59 o ASTM D 244 “Métodos de ensayo estándares para emulsiones asfálticas”. (Ver Figura 4)



**Figura 4:** Equipo de ensayo para viscosidad Saybolt Furol.

### **3.1.3 Estabilidad de almacenamiento**

El ensayo indica la habilidad de la emulsión para mantenerse como una dispersión uniforme durante el almacenaje. Se detecta la tendencia de los glóbulos a asentarse en un periodo de tiempo de 24 horas. Se coloca un volumen establecido de emulsión en una probeta y se deja reposar, luego se toman muestras de la parte superior e inferior de la probeta. Se calcula el porcentaje de la diferencia del residuo de la parte superior e inferior. También se puede realizar el ensayo para un periodo de tiempo de 5 días. El ensayo se describe en el método AASHTO T 59 o ASTM D 244 “Métodos de ensayo estándares para emulsiones asfálticas”.

### **3.1.4 Demulsibilidad**

El ensayo indica la tasa relativa a la cual los glóbulos coloidales de asfalto en la emulsión romperán cuando se esparce en película delgada alrededor de los agregados o suelo. Así se determina si romperá rápido (RS, rapid setting) o de manera lenta (MS, medium setting). Esto se logra utilizando una disolución de dioctil sulfosucinato de sodio para emulsiones catiónicas o una disolución de cloruro de calcio para emulsiones aniónicas.

### **3.1.5 Recubrimiento y resistencia al agua**

Este ensayo tiene tres propósitos, pues determina la habilidad de la emulsión a:

- Recubrir el agregado totalmente,
- Resistir la acción de mezclado mientras se mantiene como una película en el agregado, y
- Resistir la acción de lavado con agua luego de que termina el mezclado.

Este ensayo se usa principalmente en emulsiones de rompimiento medio y para determinar un adecuado mezclado con agregados de tipo calcáreo, no se realiza en emulsiones de rompimiento rápido o lento. Se trata de un ensayo de inspección visual de recubrimiento luego de los tratamientos: mezclado con agregado seco, antes y después del lavado y agregado húmedo, antes y después del lavado.

### **3.1.6 Mezclado de la emulsión asfáltica**

Es un ensayo de mezclado para identificar o clasificar emulsiones de rompimiento lento. Una muestra de emulsión es mezclada con cemento Pórtland Tipo III y la mezcla es lavada en un tamiz de 1.40 mm (Nº14), se indica la habilidad de la emulsión para mezclarse con materiales de una mayor área superficial sin romperse.

### **3.1.7 Ensayo del tamiz**

Este ensayo también es una medida de calidad y estabilidad de la emulsión. Una muestra de emulsión se hace pasar a través de un tamiz de 850  $\mu\text{m}$  (Nº20) y se mide la cantidad de partículas de asfalto u otros materiales retenidos en el tamiz. Por ejemplo, una cantidad excesiva de partículas puede indicar problemas en el manejo y aplicación de la emulsión.

### **3.1.8 Destilación del residuo y aceite**

La destilación se utiliza para separar el agua del asfalto. Si el asfalto contiene aceite, este se separará junto con el agua. Se pueden medir las proporciones relativas de ligante asfáltico, agua y aceite. Como el asfalto se recupera se le pueden hacer ensayos adicionales al residuo para determinar las propiedades físicas del asfalto obtenido.

La destilación se realiza aumentando la temperatura hasta llegar a 260 °C la cual debe mantenerse durante 15 minutos, es importante mencionar que la emulsión casi nunca se

trabaja a esta temperatura por lo que es recomendable cambiar la temperatura y el tiempo del ensayo, pues se pueden afectar las propiedades físicas del residuo de asfalto envejeciéndolo.

### **3.1.9 Ensayos al residuo de asfalto**

Al residuo de asfalto se le realizan varias pruebas que también se le realizan al asfalto original, como el ensayo de gravedad específica AASHTO T 288 o ASTM D 70, que es un dato que se utiliza para realizar correcciones a las medidas volumétricas a distintas temperaturas.

Otro ensayo es la medición de la penetración AASHTO T 49 o ASTM D 5, que es una medida de la dureza del residuo de asfalto a 25 °C, en la muestra del residuo se introduce una aguja con un peso estándar de 100 g durante 5 segundos. La penetración es la distancia que la aguja penetró en la muestra.

El ensayo de ductilidad AASHTO T 51 o ASTM D 113, mide la habilidad del asfalto a ser estirado hasta un hilo muy delgado. Se moldea una probeta y en un baño se lleva a la temperatura de ensayo, luego se estira a una velocidad constante, la elongación a la cual se corta el hilo es la ductilidad.

La solubilidad en tricloroetileno AASHTO T 49 o ASTM D 2042, es un ensayo que mide la porción bituminosa del residuo de asfalto. La parte soluble es la porción de ligante asfáltico mientras que la parte insoluble representa los contaminantes inorgánicos. El ensayo consiste en disolver el residuo, y las partes soluble e insoluble se separan por medio de filtración.

Finalmente, el ensayo de flotabilidad AASHTO T 50 o ASTM D 139 se realiza para determinar la resistencia al flujo del residuo a altas temperaturas. Se mide el tiempo que dura el tapón de asfalto dentro del molde en romperse cuando el agua del baño pasa a través de él.

### **3.2 Ensayos para los asfaltos rebajados**

Los ensayos de laboratorio se realizan para medir ya sea el desempeño u otras características de composición, consistencia y estabilidad del material. El propósito de los ensayos es proveer datos para establecer los requisitos de especificación, también para

controlar la calidad y uniformidad del producto durante la fabricación y uso, finalmente para predecir y controlar el manejo, almacenaje y las propiedades de desempeño en campo de los asfaltos rebajados. Los asfaltos rebajados se clasifican por tipo de curado que está directamente relacionado con el tipo y cantidad de solvente. Los ensayos están diseñados para medir distintas propiedades al asfalto rebajado y residuos del mismo (asfalto residual).

#### **a) Asfalto rebajado de curado rápido RC**

Para los asfaltos rebajados de curado rápido RC, los requisitos de ensayo se establecen en las normas AASHTO M 81 y/o ASTM D 2028. En la Tabla 4 se presenta un resumen de los métodos de ensayo para los **asfaltos rebajados RC**.

#### **b) Asfalto rebajado de curado medio MC**

Para los asfaltos rebajados de curado rápido RC, los requisitos de ensayo se establecen en las normas AASHTO M 82 y/o ASTM D 2027. En la Tabla 5 se presenta un resumen de los métodos de ensayo para los **asfaltos rebajados MC**.

#### **c) Asfalto rebajado de curado lento SC**

Para los asfaltos rebajados de curado rápido RC, los requisitos de ensayo se establecen la norma ASTM D 2026. En la se presenta un resumen de los métodos de ensayo para los **asfaltos rebajados SC**.

**Tabla 4:** Resumen de métodos de ensayo que se realizan en asfaltos rebajados de **curado rápido RC.**

TIPO DE ENSAYO	DESIGNACIÓN AASHTO	DESIGNACIÓN ASTM
<b>En el asfalto rebajado</b>		
Muestreo	T 40	D 140
Viscosidad cinemática a 60 °C <sup>1</sup>	T 201	D 2170
Punto de inflamación Tag copa abierta	T 79	D 3143
Destilación a 360 °C Porcentaje por volumen a 190 °C Porcentaje por volumen a 225 °C Porcentaje por volumen a 260 °C Porcentaje por volumen a 315 °C Porcentaje de residuo	T 78	D 402
Porcentaje de agua por destilación	T 55	D 95
Ensayo de la mancha <sup>2</sup> Nafta estándar Solvente xileno de nafta Solvente xileno de heptano	T 102	
<b>En el residuo de la destilación (asfalto residual)</b>		
Viscosidad absoluta a 60 °C <sup>3</sup>	T 202	D 2171
Ductilidad a 25 °C	T 51	D 113
Porcentaje de solubilidad en tricloroetileno	T 44	D 2042

<sup>1</sup> Se puede hacer como método alternativo la viscosidad Saybolt-Furol a distintas temperaturas dependiendo del grado del asfalto rebajado.

<sup>2</sup> El uso del ensayo de la mancha es opcional.

<sup>3</sup> También se puede realizar el ensayo de penetración a 25 °C

**Tabla 5.** Resumen de métodos de ensayo que se realizan en asfaltos rebajados de curado medio MC.

TIPO DE ENSAYO	DESIGNACIÓN AASHTO	DESIGNACIÓN ASTM
<b>En el asfalto rebajado</b>		
Muestreo	T 40	D 140
Viscosidad cinemática a 60 °C <sup>1</sup>	T 201	D 2170
Punto de inflamación Tag copa abierta	T 79	D 3143
Destilación a 360 °C Porcentaje por volumen a 225 °C Porcentaje por volumen a 260 °C Porcentaje por volumen a 315 °C Porcentaje de residuo	T 78	D 402
Porcentaje de agua por destilación	T 55	D 95
Ensayo de la mancha <sup>2</sup> Nafta estándar Solvente xileno de nafta Solvente xileno de heptano	T 102	
<b>En el residuo de la destilación (asfalto residual)</b>		
Viscosidad absoluta a 60 °C <sup>3</sup>	T 202	D 2171
Ductilidad a 25 °C	T 51	D 113
Porcentaje de solubilidad en tricloroetileno	T 44	D 2042

<sup>1</sup> Se puede hacer como método alternativo la viscosidad Saybolt-Furol a distintas temperaturas dependiendo del grado del asfalto rebajado.

<sup>2</sup> El uso del ensayo de la mancha es opcional.

<sup>3</sup> También se puede realizar el ensayo de penetración a 25 °C

**Tabla 6.** Resumen de métodos de ensayo que se realizan en asfaltos rebajados de curado lento SC.

TIPO DE ENSAYO	DESIGNACIÓN AASHTO	DESIGNACIÓN ASTM
<b>En el asfalto rebajado</b>		
Muestreo	T 40	D 140
Viscosidad cinemática a 60 °C <sup>1</sup>	T 201	D 2170
Punto de inflamación Cleveland copa abierta	T 48	D 92
Destilación a 360 °C	T 78	D 402
Porcentaje de agua por destilación	T 55	D 95
<b>En el residuo de la destilación (asfalto residual)</b>		
Viscosidad cinemática a 60 °C	T 202	D 2171
Ductilidad a 25 °C	T 51	D 113
Porcentaje de solubilidad en tricloroetileno	T 44	D 2042

### 3.3 Ensayos para los agregados

Una gran variedad de agregados y combinaciones de suelo-agregado, desde roca quebrada bien graduada hasta arenas limosas, se pueden mezclar en frío con emulsiones o asfaltos rebajados de manera satisfactoria. Los factores más importantes que se deben de tomar en cuenta para establecer los controles necesarios y asegurar resultados exitosos, son la forma de las partículas de agregado, tipo y cantidad de finos y las diferencias en las gravedades específicas de los agregados minerales.

Para las mezclas en frío, hay disponibles una gran variedad de rocas quebradas, escoria o gravas. También hay muchas localidades donde es más económico quebrar los agregados provenientes de cortes o quebradores cercanos. Usualmente, el material que contiene de 0 a 10% de finos que pasa el tamiz 75  $\mu\text{m}$  (Nº200) y con un tamaño máximo de 50 mm (2 in) o dos tercios del espesor más grueso, cualquiera de los dos tamaños que sea más pequeño, son excelentes para la construcción de bases. Generalmente, la producción entera del quebrador que esté debajo del tamaño máximo especificado se puede utilizar en la estructura del pavimento asfáltico, esto permite la mayor economía.

En las áreas en las cuales los agregados que cumplan las especificaciones de calidad escasean, es posible utilizar materiales de menor calidad siempre y cuando la experiencia, la investigación o los ensayos demuestren que son satisfactorios y que su uso es adecuado. Hay que tener presente que para graduaciones finas, se pueden presentar problemas de mezclado, aireación y compactación.

El agregado debe de cumplir las especificaciones de resistencia a la abrasión, tamaño, forma, plasticidad, limpieza de finos y durabilidad. Con respecto a la durabilidad es recomendable utilizar un ensayo que pueda determinar la susceptibilidad del agregado a ser degradable pues esta característica influye directamente en la susceptibilidad al daño por humedad de las mezclas asfálticas en general.

La limpieza del agregado es muy importante. Si las partículas están llenas de polvo, o cubiertas con arcilla o limo, la emulsión no tendrá una buena adherencia con los agregados.

Hay algunos tipos de agregado que son difíciles de recubrir con el asfalto. Generalmente, estos agregados son hidrofílicos (más afines al agua que al asfalto) y debido a que los agregados no están totalmente secos, rechazan el asfalto. Prolongar el tiempo de mezclado con la intención de recubrir el agregado es inútil, pues lo que se puede producir más bien es la pérdida de volátiles y una mezcla pobre. Es por esta razón, que es importante, tomar en cuenta la carga eléctrica para escoger la emulsión adecuada, ya sea catiónica o aniónica. Cuando se utilizan emulsiones aniónicas o asfaltos rebajados, el recubrimiento se puede mejorar con el uso de cal hidratada o aditivos antidesnudantes. En todo caso, es requerido realizar las pruebas en laboratorio para determinar cuál combinación es la más adecuada.

En la Tabla 7 se resumen los ensayos que se pueden realizar a los agregados que se utilicen para producir mezclas en frío.

**Tabla 7.** Métodos de ensayo para los agregados que se utilizan para mezclas en frío.

<b>TIPO DE ENSAYO</b>	<b>DESIGNACIÓN AASHTO</b>	<b>DESIGNACIÓN ASTM</b>
<b>Agregado</b>		
Muestreo	T 2	D 75
Cuarteo a tamaño de ensayo	T 248	C 702
Granulometría	T 27 T 11	C 136 C 117
Índice de plasticidad	T 90	D 4318
Partículas friables	T 112	C 142
Peso unitario	T 19	C 29
Caras fracturadas	-	D 5821
Equivalente de arena	T 176	C 2419
Abrasión de los Ángeles	T 96	C 131
Carbonatos solubles	-	D 3042
Durabilidad en sulfatos	T 104	C 88
Índice de durabilidad	T 210	D 3744

### **3.3.1. Muestreo y cuarteo de agregados**

El propósito del muestreo es obtener muestras representativas para poder caracterizarlas y que muestren las condiciones reales y la naturaleza de los agregados gruesos y finos. El procedimiento estándar para el muestreo se describe en los métodos AASHTO T 2 o ASTM D 75 "Práctica estándar para el muestreo de agregados".

El tamaño debe corresponder con la cantidad requerida de muestra, pero generalmente se muestrea más cantidad que la requerida. Se puede realizar el muestreo en el punto de producción, en el flujo de caída a las bandas o tolvas, en la banda transportadora, en los apilamientos o camiones de transporte, finalmente en el sitio de colocación del proyecto.

En cuanto al cuarteo este es un procedimiento para reducir la muestra grande en submuestras, ya sea del agregado fino y grueso, para la realización de varios ensayos y así asegurar la representatividad del lote. El procedimiento de ensayo estándar se describe en los métodos AASHTO T 248 o ASTM C 702 "Reducción de las muestras de agregado a tamaño de ensayo".

### **3.3.2. Granulometría**

El ensayo de granulometría se realiza para determinar la distribución de tamaños de las partículas gruesas y finas por medio del tamizado. Los resultados se utilizan para determinar el cumplimiento de la distribución de tamaños con las especificaciones de las distintas aplicaciones que tienen los agregados. Además este ensayo provee los datos necesarios para el control de la producción de las distintas aplicaciones que contienen agregados, por ejemplo, mezcla asfáltica en caliente, mezclas asfálticas en frío, entre otros.

Adicionalmente, los datos pueden ser útiles para desarrollar modelos para predecir características físicas de los materiales. El procedimiento se describe en los métodos AASHTO T 27 o ASTM C 136. Es importante destacar que para determinar el material más fino que 75  $\mu\text{m}$  (N° 200) el procedimiento por tamizado no es tan exacto, por lo que se debe utilizar el método de tamizado por lavado descrito en los métodos AASHTO T 11 o ASTM C 117 para encontrar de manera más exacta el contenido del material fino.

### **3.3.3. Índice de plasticidad**

El ensayo se utiliza para determinar el límite líquido, el límite plástico y con estos dos datos calcular el Índice de plasticidad para los suelos y la porción fina de los agregados. La muestra se procesa para eliminar cualquier material retenido en el tamiz de 425  $\mu\text{m}$  (N° 40).

El límite líquido se determina por medio de la realización de pruebas en las que una parte de la muestra se extiende en una taza de latón, dividida en dos por una herramienta de ranurado, y luego se permite que la muestra fluya por los golpes causados al dejar caer en repetidas ocasiones la copa con un dispositivo mecánico. El Método A, límite líquido "multipunto", grafica el resultado de tres o más pruebas que se realizan en un rango de contenido de agua y a partir los datos graficados se determina el límite líquido. El Método B, límite líquido de un punto, utiliza los datos de dos pruebas para un solo contenido de agua multiplicado por un factor de corrección para determinar el límite líquido.

El límite plástico está determinado por la presión ejercida con un movimiento de rodillo sobre una pequeña porción de suelo plástico de 3.2 mm (1/8 in) de diámetro hasta que su contenido de agua se reduce a tal punto en el que el hilo se desmorona y ya no puede ser comprimido o enrollado. El contenido de agua del suelo en este punto se reporta como el límite plástico. El índice plasticidad se calcula como la diferencia entre el límite líquido y el límite plástico.

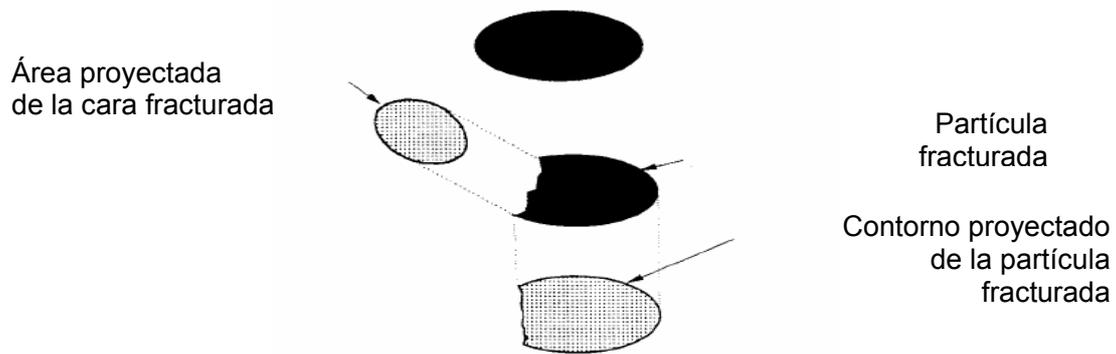
#### **3.3.4. Peso unitario**

Este ensayo determina la densidad bruta del agregado en condición suelta o compactada y se calculan los vacíos entre las partículas finas, gruesas o dentro de la combinación. El tamaño nominal máximo es de 125 mm. Este dato se utiliza para seleccionar las proporciones para las mezclas en frío. Se utilizan contenedores estandarizados de volumen conocido y se llena con el agregado ya sea suelta o compactado con una cantidad estándar de golpes. Una vez que esto se ha realizado, se procede a pesar. Se calcula la relación de la masa entre el volumen. El método se describe con detalle en los métodos AASHTO T 19 o ASTM C 29.

#### **3.3.5. Caras fracturadas**

El ensayo se utiliza para determinar el porcentaje en peso de agregado de más de 4.75 mm con una o más caras fracturadas, que para las mezclas asfálticas en frío es de gran importancia pues entre más caras fracturadas tenga el agregado mayor será la estabilidad de las mezclas y además proveen una mayor resistencia a la fricción y textura al pavimento.

Se considera una cara fracturada si la superficie proyectada de la cara fracturada es mayor al 25% del área del contorno proyectado de la partícula (Ver Figura 5). Así se asegura de descartar partículas redondeadas con pequeñas muescas como partículas quebradas. El procedimiento de ensayo está descrito en la norma ASTM D 5821.



**Figura 5:** Definición gráfico de cara fracturada.  
Figura adaptada de ASTM D 582.

### 3.3.6. Equivalente de arena

El ensayo sirve para determinar el contenido de arcilla presente en la fracción de agregado fino (material que pasa el tamiz de 4.75 mm (Nº4)). El material fino se agita en una solución floculante lo que provoca que las partículas de arcilla se separen y se suspendan por encima del material granular. Después de un periodo de reposo que permite la sedimentación, se miden la altura de arcilla suspendida y la altura de arena sedimentada, el equivalente de arena es el porcentaje del cociente de las lecturas anteriores. El método de ensayo se describe en las normas AASHTO T 176 o ASTM C 2419.

### 3.3.7. Abrasión de Los Ángeles

Este ensayo estima la resistencia del agregado grueso a la abrasión y degradación mecánica durante la manipulación, construcción y servicio de los agregados. Se realiza sometiendo al agregado grueso, usualmente mayor de 2.36 mm a impacto y triturado por medio de las esferas de acero. El resultado del ensayo es el porcentaje de pérdida, esto es, el porcentaje en peso del material grueso degradado durante el ensayo como resultado de la acción mecánica. El método se describe en las normas AASHTO T 96 o ASTM C 131.

### **3.3.8. Durabilidad por acción de sulfatos**

Las normas de ensayo son AASHTO T 104 o ASTM C 88. Este método calcula la resistencia del agregado al deterioro por la acción de los agentes climáticos, durante la vida útil. La durabilidad es el porcentaje de pérdida del material en una mezcla de agregados que son sometidos al ataque de sulfato de sodio o sulfato de magnesio, el proceso consiste en sumergir los agregados en la solución y luego secarlos para repetir la inmersión, esto es un ciclo que tiene que repetirse 5 veces. Los agregados se van quebrando por la acción de las sales que ejercen fuerzas de expansión internas dentro de los poros del agregado. Al final se calcula el porcentaje de pérdida con respecto a la masa inicial.

### **3.3.9. Índice de durabilidad**

Las normas de ensayo son AASHTO T 210 o ASTM D 3744. El ensayo establece la resistencia del agregado para generar finos cuando se agitan en presencia de agua. Se le realiza el ensayo a la fracción gruesa así como a la fracción fina. Se mide la cantidad de material que se sedimenta y con este dato se calcula el índice de durabilidad. Para una combinación de agregados el valor que se reporta es el valor más bajo obtenido ya sea de la fracción gruesa o de la fracción fina.

### **3.3.10. Carbonatos solubles**

Este ensayo se realiza para determinar las características de pulimento de los agregados que pueden causar la pérdida de fricción en el pavimento. La norma de ensayo es ASTM D 3042. Al agregado se somete a una sumersión en ácido clorhídrico para diluir los carbonatos.

### **3.3.11. Partículas friables**

En la norma ASTM C 142 se detalla el procedimiento de ensayo, que consiste en sumergir en agua destilada la muestra de agregado durante un periodo de 24 horas, después de las cuales se realiza con la mano una presión de las partículas para determinar si hay presencia de materiales débiles.

## CAPITULO 4 ENSAYOS PARA LAS MEZCLAS EN FRÍO

Los ensayos que se realizan directamente a las mezclas en frío tienen el propósito de establecer el diseño de mezcla antes de la aplicación del material para poder seleccionar los materiales apropiados y obtener una mezcla donde los agregados y la emulsión o asfalto rebajado sean compatibles. Los métodos están descritos en el Manual de mezclas en frío del Instituto del Asfalto MS-14 en los Apéndices A, B, C, D, E, F, G y H.

A continuación se presenta la Tabla 8 donde se resumen los métodos que se deben de aplicar en el laboratorio para establecer el diseño de mezcla.

**Tabla 8.** Métodos de ensayo para las mezclas en frío.

TIPO DE ENSAYO	DESIGNACIÓN Instituto Asfalto	DESIGNACIÓN AASHTO	DESIGNACIÓN ASTM
<b>Mezclas en frío</b>			
Muestreo	MS-14 Apéndice D	T 168	D 979
Especificación para mezclas en frío colocadas en frío	MS-14 Apéndice A, B y C	-	D 4215
Procedimiento para el diseño de mezcla Marshall <sup>1</sup>	MS-14 Apéndice G Apéndice H	-	-
Porcentaje de vacíos de aire	-	T 269	D 3203
Estabilidad y flujo Marshall a 22.2 °C	MS-14 Apéndice F.10	T 245	D 6926 D 6927
Procedimiento para el diseño de mezcla Hveem <sup>1</sup>	MS-14 Apéndice E Apéndice F	T 246	D 1560
Estabilidad Hveem Rt a 23 °C	MS-14 Apéndice E.08	-	-
Estabilidad Hveem S a 60 °C	MS-14 Apéndice E.08	-	-
Valor de cohesión C a 23 °C	MS-14 Apéndice E.08	-	-
Valor de cohesión C a 60 °C	MS-14 Apéndice E.08	-	-
Centrifugado equivalente de Keroseno (C.K.E.)	MS-14 Apéndice E.05	-	-
Recubrimiento de las partículas	MS-14 Apéndice F.07	-	-
Módulo resiliente a 23 °C	MS-14 Apéndice E.07	-	-

<sup>1</sup> Este procedimiento es distinto para mezclas preparadas con emulsión o preparadas con asfaltos rebajados. Tradicionalmente los métodos de diseño de mezcla se han referido a los siguientes puntos:

- a) Selección del grado correcto de emulsión y contenido de agua de pre-humedecido para alcanzar un buen recubrimiento.
- b) Determinación del contenido total de fluidos/agua para una compactación óptima.
- c) Determinación del contenido óptimo de ligante para las propiedades especificadas y que cumpla con la resistencia retenida al daño por humedad.

Los métodos de diseño de mezclas de reciclado en frío pueden incluir los pasos para la selección del rejuvenecedor para alcanzar la viscosidad adecuada para el ligante emulsionado.

Los pasos en el diseño tradicional de mezclas en frío son los siguientes:

1. Un contenido inicial de ligante asfáltico es calculado a partir de la granulometría del agregado, o utilizando el ensayo de centrifugado del equivalente de keroseno, también se pueden realizar pequeñas muestras de mezclado a mano para seleccionar el grado correcto de emulsión y el nivel de agua de prehumedecido para alcanzar el máximo de recubrimiento.

2. El contenido de fluidos óptimo se determina. Se utiliza un método similar al utilizado para la estabilización de suelos, es decir, se compactan los especímenes en un rango de contenidos de agua ya sea utilizando el compactador Marshall, Hveem u otros compactadores adecuados en los cuales se pueda determinar la máxima densidad. De acuerdo a otros criterios, también se preparan especímenes Marshall con distintos contenidos de agua y se mide la Estabilidad y de acuerdo con estos datos se determina el contenido de agua óptimo.

En otros métodos, se puede contar como fluido la emulsión o también solo se toma en cuenta el contenido de agua de la emulsión.

La aireación se puede necesitar en el laboratorio para reducir al nivel del contenido de humedad óptimo a partir del nivel de humedad presente en el agregado o añadido como

agua de prehumedecido. Este proceso de secado puede que requiera de un secado con calentamiento de la mezcla suelta antes de la compactación de los especímenes.

En los métodos más simplificados, el contenido de fluidos total óptimo (agua más la emulsión añadida) se asume, por ejemplo, 4.5 % para reciclado y un 8 %  $\pm$  0.5 % de emulsión para estabilizar mezclas de base.

3. El contenido de asfalto óptimo se determina para las propiedades físicas determinadas. Una vez que el contenido óptimo de fluidos es determinado, se preparan los especímenes con distintos contenidos de asfalto para los distintos ensayos de desempeño, mientras se mantiene el contenido de fluidos constante.

Los especímenes se pueden compactar con el mazo Marshall, con el compactador de amasado, por acción doble del pistón con carga estática (compresión uniaxial) o una combinación de uno o más métodos. Por ejemplo, en el método de Dybalski, los especímenes se preparan con el mazo Marshall y con el compactador de California de la mezcla recién mezclada, luego se les realiza un curado en el molde de 48 horas a 60 °C, se recompactan con el método de acción doble del pistón a la misma temperatura 60 °C.

Un método desarrollado en Canadá, el recompactado se realiza con el martillo Marshall. La idea es que los especímenes recompactados representan al material después de que ha pasado el tránsito y contiene los vacíos de aire similares a los encontrados en los núcleos extraídos del campo.

El mismo curado parcial de 48 horas en el molde ha sido utilizado en el método de McConahaughy (sin el paso de recompactación) para proveer a los especímenes con una resistencia temprana, es decir, la que representa el estado inmediatamente después de la compactación en el sitio.

Se han utilizado otros métodos de curado para alcanzar las propiedades "finales" para los ensayos de desempeño, por ejemplo, 3 días a 50 °C o 2 días a 60 °C, entre otros. También se ha utilizado desecación con vacío a temperatura ambiente para alcanzar el curado.

Los ensayos de desempeño que se han utilizado son la Estabilidad Marshall o la Estabilidad Hveem medidos a temperatura ambiente.

4. En algunos procedimientos de ensayo se especifican los ensayos de susceptibilidad al daño por humedad.

Para las mezclas de granulometría abierta, el procedimiento para encontrar el óptimo de asfalto es a prueba y error, es decir, se agrega la mayor cantidad de asfalto a la mezcla sin que se presente escurrimiento. El método del Instituto del Asfalto es el más utilizado.

Los criterios de diseño son el recubrimiento, escurrimiento (run-off) y algunas veces se toma en cuenta el desprendimiento de la emulsión de las partículas (wash-off).

La selección del grado de emulsión para un recubrimiento óptimo se hace igual que las mezclas densas, por ejemplo de acuerdo con el método de ensayo ASTM D 244. Se utilizan pequeñas muestras mezcladas a mano para encontrar la formulación óptima y la cantidad de agua de prehumedecido. En la práctica, la meta ha sido evitar el uso del agua de prehumedecido o al menos no exceder el estado de "superficie saturada seca" para que la emulsión no se separe del agregado.

El escurrimiento (run-off) se determina colocando la mezcla sin compactar en una canasta de un tamiz estándar, se recoge lo que escurre y se determina el contenido de asfalto después del escurrimiento.

El desprendimiento de la emulsión (wash-off) se mide de manera similar con la diferencia que se utilizan especímenes compactados (todavía en el molde), el cual es lavado con agua fresca, el agua de lavado se recoge y luego se determina el contenido de asfalto remanente.

A continuación se presenta un resumen acerca de los métodos de ensayo para el diseño de las mezclas en frío.

#### **4.1 Muestreo de mezclas en frío**

Se describe el procedimiento para la toma de muestra de la mezcla, ya sea para el control o para verificación de la calidad del producto.

Se debe procurar que las muestras extraídas sean verdaderamente representativas del lote de producción, evitando la segregación o contaminación. La muestra se puede tomar a la salida del mezclador o en el camión de transporte.

La frecuencia es generalmente una muestra por jornada de trabajo.

#### **4.2 Recubrimiento de las partículas**

La capacidad de un asfalto emulsificado para cubrir un agregado suele ser sensible al contenido de agua del agregado de la pre-mezcla, especialmente para agregados que contienen un alto porcentaje de material pasando la malla de 75  $\mu\text{m}$  (Nº 200). El agua de premezclado cuando es insuficiente afecta la unión del asfalto con los finos, dando como resultado un recubrimiento inadecuado.

El ensayo es un procedimiento para determinar el porcentaje de agua que se debe añadir en la mezcla para conseguir un recubrimiento de partículas de un mínimo de 50% para mezclas de base y de 75% para mezclas utilizadas para superficies de ruedo. El procedimiento consiste en añadir agua a partir de un 3% por peso de mezcla, observar y *determinar visualmente* el porcentaje de recubrimiento del área total. Posteriormente se va incrementando el agua en un 1% hasta alcanzar el porcentaje de recubrimiento deseado.

Para conseguir un buen recubrimiento del asfalto sobre los agregados, generalmente se necesita la adición de agua a la mezcla, esto puede realizarse mezclando el agua y los agregados durante un cierto tiempo, después añadir la emulsión y de nuevo mezclar; o mezclando los tres componentes hasta que se tenga una mezcla uniformemente coloreada.

Se recomienda que la adición de agua sea anterior a la inclusión de la emulsión y que el mezclado sea alrededor de dos minutos. Se considera aceptable el recubrimiento cuando el total de la fracción fina queda totalmente recubierta y el agregado grueso queda recubierto en los porcentajes mencionados al inicio de este apartado.

Los asfaltos emulsificados que no pasan la prueba de cubrimiento no se deben considerar para su uso.

Dentro del contenido de agua hay que tomar en cuenta el contenido de humedad en una muestra de agregado secado al aire. El agua debe ser añadida en un rocío suave y el agregado debe mezclarse hasta que el agua se disperse completamente.

Para seleccionar el porcentaje inicial de agua hay que tomar en cuenta los siguientes criterios: para emulsiones asfálticas de rompimiento medio (HFMS, CMS y otras que contienen solventes) en el ensayo inicial se puede mezclar sin añadir agua (en condiciones de seco al aire); para emulsiones asfálticas de rompimiento lento (SS y CSS) frecuentemente se requiere un contenido de agua más alto para producir mezclas satisfactorias, se debe comenzar la prueba de recubrimiento con cerca de 3% de agua añadida. Con los agregados que contienen arcilla, el agregado debe colocarse en un contenedor sellado por un mínimo de 15 horas antes de agregar el asfalto emulsificado.

Luego se añade la cantidad de asfalto emulsificado (porcentaje por peso seco del agregado) como se determina en la sección 4.3.1 de este documento. La emulsión debe añadirse en un rocío suave para minimizar la tendencia del asfalto a apelmazarse con el agregado fino. Un minuto de mezclado es suficiente. Si se usa mezclado manual, debe ser suficientemente riguroso para dispersar el asfalto en toda la mezcla.

Finalmente se calcula el contenido de agua libre del agregado en la mezcla por combinación del contenido de humedad del agregado secado al aire más el porcentaje de agua añadida.

Las mezclas que presentan una apariencia muy líquida o se segregan se consideran inaceptables.

Para emulsiones asfálticas de rompimiento medio (HFMS, CMS y otras que contienen solventes), se usa suficiente agua de pre-mezcla para dar una dispersión óptima del asfalto emulsificado. En algunos casos, la excesiva agua de pre-mezcla puede causar que el asfalto se separe del agregado. Las mezclas de emulsiones asfálticas de rompimiento lento

(SS y CSS) generalmente exhiben un incremento en el cubrimiento cuando se incrementa el contenido de agua de la pre-mezcla. Cuando hay suficiente agua disponible para una dispersión óptima de asfalto, un incremento adicional de agua no mejora el cubrimiento. Este resultado será el mínimo contenido de agua de pre-mezcla requerida para el mezclado.

### **4.3 Procedimiento para el diseño de mezcla Marshall con emulsión asfáltica**

Este método de diseño de mezclas en frío de asfalto emulsificado-agregado para pavimentar está basado en investigaciones dirigidas en la Universidad de Illinois usando un método modificado Marshall de diseño de mezcla y se incluye un ensayo de durabilidad por humedad. El método de ensayo recomendado es aplicable a mezclas de capa base para pavimentos de bajo volumen que contienen asfalto emulsificado y agregados minerales con graduación densa, de tamaño máximo de 25 mm (1 pulgada) o menos. Este diseño se recomienda para mezclas preparadas en sitio o mezclas preparadas en planta a temperatura ambiente.

El objetivo del diseño es proporcionar una cantidad adecuada de asfalto residual para estabilizar económicamente a los materiales granulares:

- (1) Dar la resistencia requerida o estabilidad para resistir la aplicación de cargas repetitivas (compresión y flexión) sin deformación permanente excesiva o agrietamiento por fatiga.
- (2) Hacer la mezcla suficientemente resistente a los efectos de humedad.

#### **4.3.1. Cantidad aproximada de asfalto emulsificado**

La cantidad de asfalto emulsificado se estima por los ensayos de mezclas con agregados de graduación densa usando el ensayo del Equivalente de la Centrífuga de Keroseno (C.K.E.).

Si el equipo de C.K.E. no está disponible, una aproximación del contenido de asfalto emulsificado para los ensayos de las mezclas se puede hacer:

$$P = (0.05A + 0.1B + 0.5C) \times 0.7$$

Donde:

P = Porcentaje por peso de asfalto emulsificado, basado en el peso seco del agregado\*.

A = Porcentaje del agregado retenido en la malla de 2.36mm (N° 8)\*.

B = Porcentaje de agregado pasando la malla de 2.36mm (N° 8) y retenido en la malla de 75  $\mu\text{m}$  (N° 200)\*.

C = Porcentaje de agregado pasando la malla de 75  $\mu\text{m}$  (N° 200)\*.

\*Expresado como un número entero.

#### **4.3.2. Contenido óptimo de agua en compactación.**

Las propiedades de la mezcla están estrechamente relacionadas con la densidad de los especímenes compactados. Por lo tanto, es necesario optimizar el contenido de agua en la compactación para maximizar las propiedades deseadas de la mezcla. Esto debe hacerse para cada combinación de asfalto emulsificado, tipo y grado, tipo de agregado considerado para cada proyecto.

El procedimiento del diseño de mezcla utiliza especímenes estándar Marshall en la evaluación de las propiedades de la mezcla compactada. Para obtener resultados más confiables, hay que triplicar los especímenes que son preparados para cada contenido de agua en compactación.

Se prepararan tres especímenes para cada contenido de agua para la compactación que va a ser evaluado. Generalmente, se incrementa tres veces el contenido de agua en 1 % para definir la estabilidad (densidad)/contenido de agua en la curva de compactación. Se prepara el agregado, recombinando cada tamaño de fracción del agregado para producir una masa total de agregado de 1.2 kg para cada pastilla. Se determina la temperatura del agregado que tiene que ser ajustada a  $22.2 \pm 1.7$  °C ( $72 \pm 3$  °F) antes de mezclar.

Se requieren cuatro cálculos para cada combinación de agregado y asfalto. Ellos son la masa del agregado, asfalto emulsificado, agua de pre-mezcla añadida y agua perdida por la compactación. Estas son las fórmulas:

$$\text{Masa del agregado añadido seco al aire} = \frac{a}{100 - b} \times 100$$

$$\text{Masa de asfalto emulsificado} = \frac{a \times c}{d}$$

$$\text{Masa de agua de pre -mezcla añadida} = a \times \left( f - b - \frac{e \times c}{d} \right) / 100$$

$$\text{Masa de agua perdida por compactación} = a \times \left( \frac{f - g}{100} \right)$$

Donde

a = masa de agregado seco

b = porcentaje de contenido de agua del agregado seco al aire

c = contenido de asfalto residual deseado, porcentaje de peso seco del agregado

d = porcentaje de asfalto residual en la emulsión

e = porcentaje de agua en la emulsión = 100-d

f = porcentaje de contenido de agua de pre-mezcla en la mezcla (masa de agregado seco)

g = porcentaje de contenido de agua en compactación (masa de agregado seco)

A continuación se presenta un pequeño ejemplo de cálculo, se tienen los siguientes datos:

Masa de agregado seco = a = 1200g

Porcentaje de contenido de agua del agregado seco al aire = b = 0.5 %

Contenido de asfalto residual deseado = c = 4%

Porcentaje de asfalto residual en la emulsión = d = 65%

Porcentaje de agua en la emulsión = e = 35%

Porcentaje de contenido de agua de pre-mezcla en la mezcla = f = 5%

Porcentaje de contenido de agua en compactación = g = 3.5%

Se sustituyen los datos dados en las fórmulas:

$$\text{Masa del agregado añadido seco al aire} = \frac{1200}{100 - 0.5} \times 100 = 1206 \text{ g}$$

$$\text{Masa de asfalto emulsificado} = \frac{1200 \times 4}{65} = 74 \text{ g}$$

$$\text{Masa de agua de pre -mezcla añadida} = 1200 \times \left( 5 - 0.5 - \frac{35 \times 4}{65} \right) / 100 = 28 \text{ g}$$

$$\text{Masa de agua perdida por compactación} = 1200 \times \left( \frac{5 - 3.5}{100} \right) = 18 \text{ g}$$

Se coloca el agregado seco al aire en el mezclador mecánico y se le añade la cantidad total de agua libre que necesita ser añadida, para lograr el agua óptima de pre-mezcla como se determinó en el ensayo de cubrimiento. (Sección 4.2). La temperatura del agua tiene que ser  $22.2 \pm 1.7$  °C ( $72 \pm 3$  °F). Se agrega el asfalto emulsificado al agregado humedecido por aspersión, mientras el material se está mezclando, asegurándose que la cantidad de asfalto emulsificado requerida no se esté excediendo. La mezcla se tiene que airear para reducir el contenido de agua para obtener la densidad máxima. Si el contenido de agua deseado en compactación difiere del contenido de agua óptimo de mezcla, se requiere aireación. La mezcla ahora está lista para la compactación.

#### **4.3.3. Compactación de especímenes**

Los especímenes se compactan de la misma manera que los especímenes Marshall de mezcla asfáltica en caliente y se aplican 50 golpes con el martillo de compactación por cara. Los especímenes una vez compactados se curan en el molde por un día a temperatura ambiente, con los moldes colocados verticalmente para que se produzca igual ventilación en ambos extremos, después de este periodo se desmoldan. Después de la extrusión, la gravedad específica aparente de los especímenes se determina con el método de gravedad específica bruta y densidad de mezclas bituminosas compactadas usando especímenes saturados superficie-seca (ASTM D 2726)

Una vez que se tienen los resultados, se hace un gráfico de la densidad seca en función del contenido de fluidos en la compactación. El contenido de fluidos resultante en la densidad más alta es el óptimo para compactación.

#### 4.3.4. Variación del contenido de asfalto residual

En la determinación del contenido óptimo de asfalto residual para una combinación de un agregado en particular y asfalto emulsificado, se preparan una serie de especímenes de prueba sobre un rango de contenido de asfalto residual, usando el contenido de agua óptimo previamente establecido para mezcla y compactación.

Las mezclas de prueba son preparadas en incrementos de 1 % del contenido de asfalto residual con dos incrementos en ambos lados del contenido de asfalto determinado con la fórmula.

Se prepararan seis especímenes para cada contenido de asfalto residual. Se mezclan y se compactan como se describió anteriormente. Los especímenes se curan en el molde por un día a temperatura ambiente, se desmoldan y luego se curan por un día fuera del molde en un horno a 38 °C (100 °F).

#### 4.4 Porcentaje de vacíos de aire

Se determina la gravedad específica de los especímenes utilizando los métodos ASTM D 2726, "Gravedad específica bruta y densidad de mezclas bituminosas compactadas usando especímenes saturados superficie-seca" o ASTM D 1188, "Gravedad específica bruta y densidad de mezclas bituminosas compactadas usando especímenes recubiertos con parafina." El que aplique dependiendo del porcentaje de agua absorbida.

Se calcula la gravedad específica bruta de acuerdo con cada método mencionado anteriormente

$$\text{Gravedad específica bruta} \Rightarrow G = \frac{D}{F - E}$$

$$\text{Gravedad específica seca bruta} \Rightarrow G_d = G \times \frac{(100 + A)}{(100 + A + K)}$$

$$\text{Densidad seca (kg/m}^2\text{)} \Rightarrow 1000 \times G_d$$

$$\text{Contenido de agua en ensayo (\%)} \Rightarrow K = \frac{\text{masa de agua}}{\text{masa mezcla seca}} \times (100 + A)$$

$$\text{Vacíos totales (\%)} \Rightarrow V = \left[ \left( \frac{100 + A + K}{G} - \frac{100}{c} - \frac{A}{B} \right) + \left( \frac{100 + A + K}{G} \right) \right] \times 100$$

$$\text{Vacíos de aire (\%)} \Rightarrow V_a = V - \left[ \left( \frac{K \times 100}{L} \right) + \left( \frac{100 + A + K}{G} \right) \right]$$

Donde

D = masa del espécimen en aire, g;

E = masa del espécimen en agua, g;

F = masa del espécimen en condición saturada superficie seca (SSD), g;

A = asfalto residual como porcentaje de masa de agregado seco;

B = gravedad específica del asfalto;

C = gravedad específica aparente del agregado;

L = gravedad específica del agua

#### 4.5 Estabilidad y flujo Marshall a 22.2 °C

Después de determinar la gravedad específica bruta en seis especímenes curados, se ensayan tres de ellos para estabilidad y flujo.

La temperatura de ensayo de las muelas se tiene que mantener entre 21.1 y 23.3 °C (70 y 74 °F) usando un baño de agua cuando se requiera. Aplicar la carga de prueba al espécimen a una tasa constante de deformación de 50.8 mm (2 pulgadas) por minuto hasta que se obtenga la falla. El número total de Newtons (lb) requeridos para producir la falla del espécimen a 22.2 ± 1.1 °C (72 ± 2° F) será registrado con los valores (S) de estabilidad Marshall corregidos por el volumen del espécimen. Anotar y registrar también el valor de flujo indicado en unidades de 0.25 mm (0.01 pulgadas).

Luego de la falla se colocan los especímenes fallados en recipientes y se meten al horno a  $93 \pm 6 \text{ }^\circ\text{C}$  ( $200 \pm 10 \text{ }^\circ\text{F}$ ) por 24 horas. La masa del agua se corrige al restar la masa de agua absorbida durante la determinación de la gravedad específica aparente. La masa de agua absorbida puede determinarse restando la masa del espécimen seco de la masa del espécimen saturado superficie seca. De los datos obtenidos arriba, se determina la cantidad de humedad absorbida en el ensayo.

#### **4.5.1. Prueba de estabilidad y flujo en especímenes saturados**

Después de ensayar tres de los seis especímenes curados para cada contenido de asfalto residual, los tres especímenes restantes se someten a saturación al vacío e inmersión.

Una vez saturados con un procedimiento parecido al expuesto en la norma para la resistencia a la tensión diametral retenida, se remoja el espécimen en agua por una hora.

Después los especímenes son ensayados en estabilidad Marshall modificada y luego se determina la humedad absorbida como se indicó anteriormente.

#### **4.5.2. Interpretación de los datos de ensayo**

Se promedian los valores de flujo y los valores convertidos de estabilidad para todos los especímenes de un contenido de asfalto dado. Los valores que son obviamente erróneos no deben incluirse en el promedio.

Luego se prepara un gráfico separado para los factores:

⇒ Estabilidad seca y húmeda versus contenido de asfalto residual

⇒ Porcentaje de pérdida de estabilidad, calculada como

$$\frac{(\text{Estabilidad seca} - \text{Estabilidad húmeda})}{\text{Estabilidad seca}} \times 100$$

versus el contenido de asfalto residual.

- ⇒ Densidad seca aparente (corregida por humedad) versus contenido de asfalto residual.
- ⇒ Porcentaje de humedad absorbida versus contenido de asfalto residual.
- ⇒ Porcentaje total de vacíos (aire más humedad) versus contenido de asfalto residual.

En cada gráfico, conectar los datos con una curva suave que provea la mejor forma para todos los valores.

En la Figura 6 se muestra un ejemplo del comportamiento típico de una mezcla asfáltica en frío.

Se han encontrado variaciones considerables en las curvas de las propiedades ensayadas como las que se han mostrado anteriormente, entre los tipos de agregados y granulometrías.

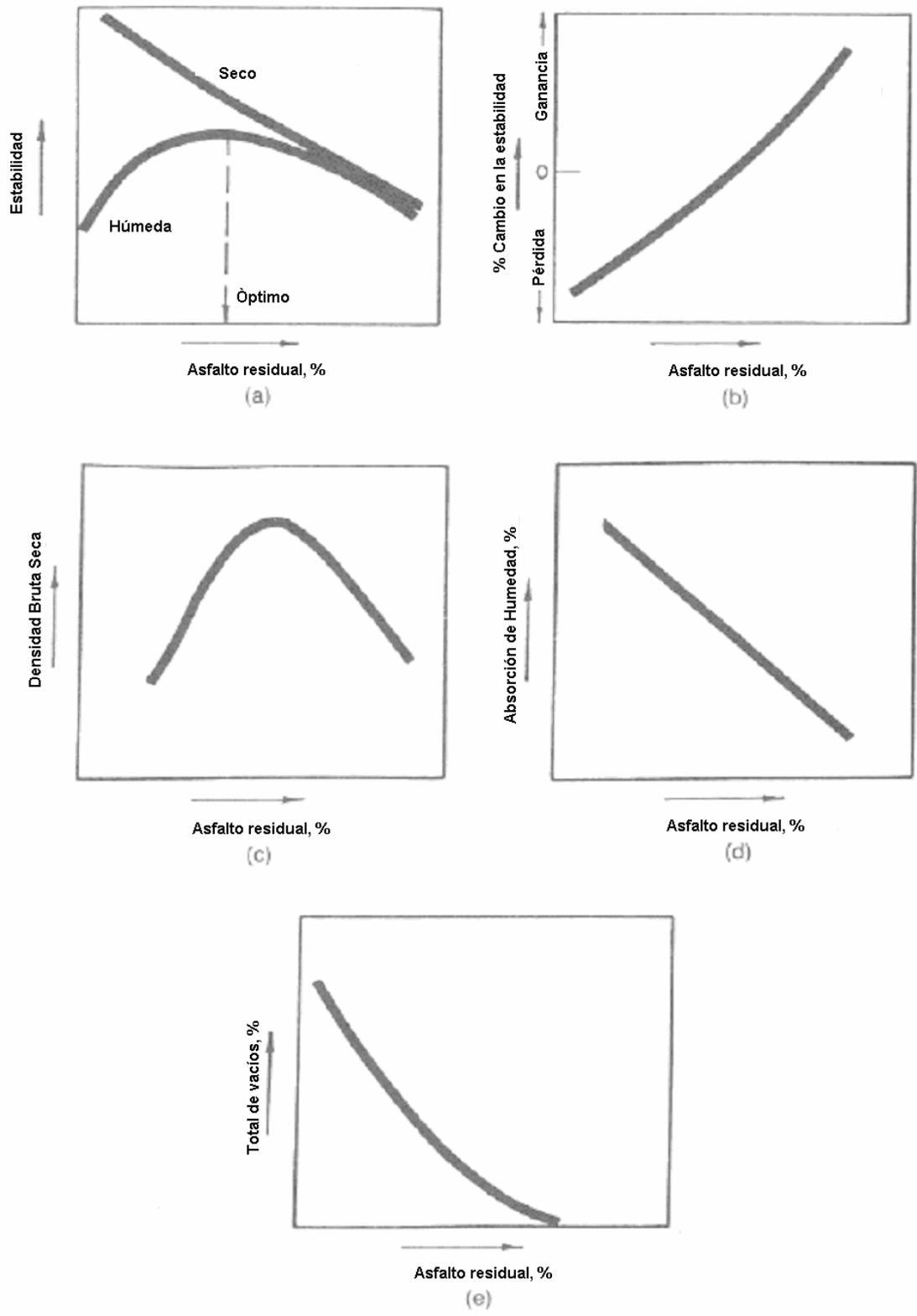
Las tendencias generales son que la estabilidad húmeda generalmente mostrará un pico en un contenido de asfalto residual mientras que en la estabilidad seca generalmente mostrará una curva continuamente decreciente con los incrementos en el contenido de asfalto residual. Algunas mezclas pueden mostrar un incremento continuo en la estabilidad húmeda sobre el rango del contenido de asfalto evaluado, lo cual indica que el aumento del contenido de asfalto adicional es beneficioso sobre la estabilidad húmeda.

El porcentaje perdido de estabilidad generalmente decrece cuando el contenido de asfalto residual aumenta.

La densidad aparente seca usualmente hace un pico en un contenido de asfalto residual en particular.

El porcentaje de humedad absorbida durante los ensayos húmedos decrece con el incremento del contenido de asfalto residual.

Porcentaje total de vacíos (aire más humedad) decrece cuando el contenido de asfalto residual se incrementa.



**Figura 6:** Gráficos del comportamiento típico de la mezcla en frío diseñada por Marshall  
 Figura adaptada del MS-14 del Instituto del Asfalto.

### 4.5.3. Determinación del contenido óptimo de asfalto

La mezcla debe proporcionar una estabilidad adecuada cuando se ensaya en condición húmeda para proveer una resistencia adecuada a la carga de tránsito durante la estación lluviosa.

El porcentaje de pérdida de estabilidad de la mezcla cuando se ensaya en “húmedo” con respecto a cuando se ensaya en “seco” no debe ser excesivo. Una pérdida alta es un indicativo de que la mezcla tiene una alta susceptibilidad a la humedad y puede causar desintegración.

El total de vacíos dentro de la mezcla debe estar dentro del rango aceptable para prevenir cualquier exceso de deformación permanente y absorción de humedad (para un contenido alto de vacíos), o exudación del asfalto residual de la mezcla (para bajo contenido de vacíos).

La absorción de humedad en la mezcla no debe ser excesiva, así se minimiza el potencial de desnudamiento o debilitamiento de la adherencia entre el asfalto residual y el agregado. El asfalto residual debe proveer un adecuado recubrimiento del agregado y debe ser resistente al desnudamiento o abrasión.

El contenido óptimo de asfalto residual se escoge para que provea la máxima estabilidad húmeda, pero está ajustado al alza o a la baja dependiendo de la absorción de humedad, porcentaje de pérdida de estabilidad, total de vacíos, y recubrimiento de agregados. El criterio de diseño para cada uno de esos valores está dado en la Tabla 21. Si el contenido de asfalto residual en el pico de la curva de estabilidad húmeda provee una adecuada absorción de humedad, porcentaje de pérdida de estabilidad, total de vacíos y recubrimiento del agregado, éste se selecciona como el contenido óptimo de asfalto.

Si no hay picos en el contenido de asfalto residual versus la estabilidad húmeda o son desarrolladas otras propiedades, el contenido óptimo de emulsión debe establecerse basado en las mejores combinaciones de las propiedades tales como la estabilidad Marshall de ambos especímenes curados y sumergidos, el porcentaje de pérdida de estabilidad y

densidad seca, con una atención particular en los efectos del agua sobre las propiedades del espécimen.

#### **4.6 Procedimiento para el diseño de mezcla Marshall con asfaltos rebajados**

Este método de diseño para mezclas de asfalto rebajado está basado en el método Marshall de Diseño de Mezclas como se describe en el MS-2 del Instituto del Asfalto. El método y criterio de ensayo recomendado es aplicable a mezclas de mantenimiento con asfaltos rebajados que contienen los grados de cura media (MC) y cura lenta (SC) y agregados minerales con tamaños máximos de 25 mm (1 in) o menos.

El procedimiento para el Método Marshall comienza con la preparación de los especímenes de prueba. Preliminarmente a esta operación se requiere que:

1. Los materiales propuestos para el uso se encuentren dentro de las especificaciones para el proyecto;
2. Se hayan hecho combinaciones de agregado para cumplir con los requisitos de granulometría de las especificaciones del proyecto; y
3. Se determinen la gravedad específica aparente de todos los agregados utilizados en la combinación y la gravedad específica del ligante asfáltico para su uso en los análisis de densidad y vacíos.

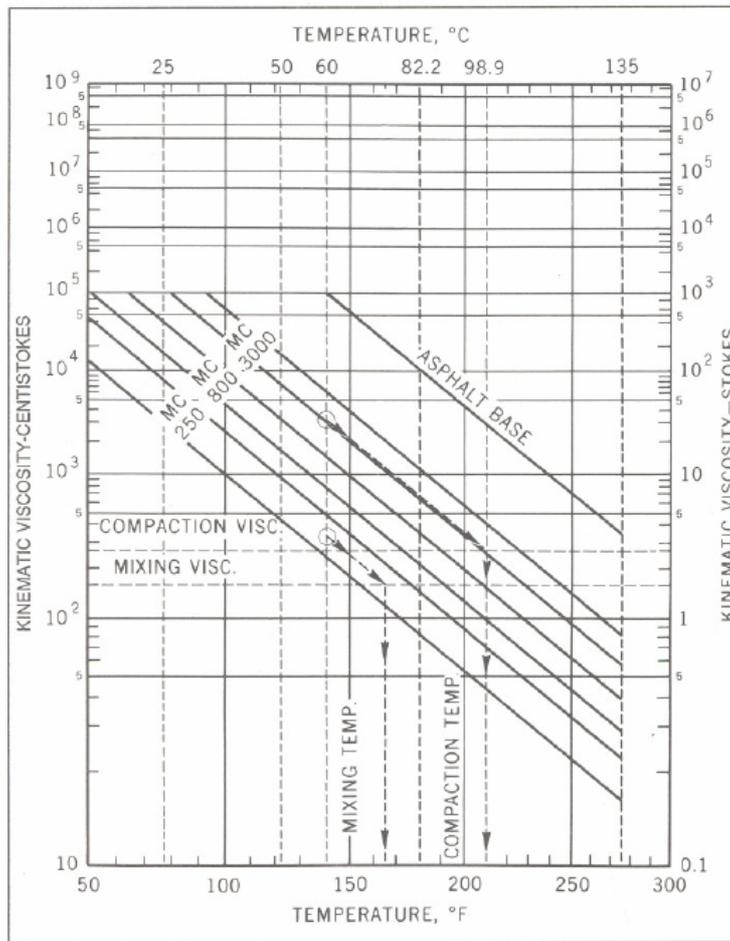
El método Marshall utiliza especímenes de prueba estándar de 64 mm (2 ½ pulgadas) de altura y 102 mm (4 pulgadas) de diámetro. Estos son preparados utilizando un procedimiento específico para calentar, mezclar y compactar las mezclas de agregado-asfalto. Las dos principales características del método de ensayo Marshall de diseño de mezcla son el análisis densidad-vacíos y ensayo de estabilidad-flujo de los especímenes de ensayo compactados.

La estabilidad del espécimen de prueba es la máxima carga resistida en Newtons (lb) que el espécimen de prueba estándar desarrolla a 25 °C (77°F). El valor de flujo es el movimiento total o deformación, en unidades de 0.25 mm (0.01 pulgadas) que ocurre en el espécimen desde que no tiene carga hasta la máxima carga durante el ensayo de estabilidad.

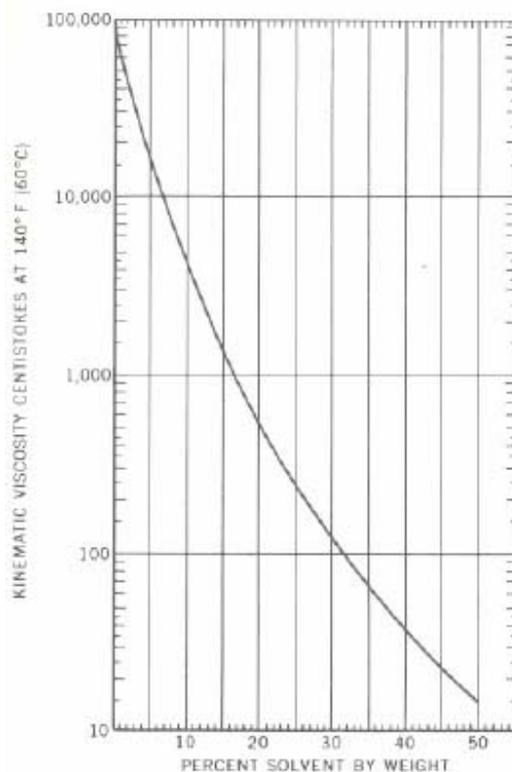
El procedimiento de diseño consiste en estos pasos:

- (a) Se selecciona el agregado que se encuentre dentro de los requerimientos de las especificaciones del proyecto.
- (b) Se selecciona el tipo y grado de asfalto rebajado acuerdo con el tipo de agregado, el equipo de mezclado y colocación y las condiciones de clima.
- (c) Se determina la temperatura de mezclado y compactación, la temperatura a la cual el asfalto rebajado debe calentarse para producir una viscosidad de  $170 \pm 20$  centistokes se establece como la temperatura de mezclado. Este rango de temperaturas se obtiene de un gráfico que muestra la relación entre la viscosidad y la temperatura del asfalto rebajado (Figura 7).

La temperatura de compactación se determina para una viscosidad de  $280 \pm 30$  centistokes después de haber perdido el porcentaje deseado de disolvente, refiriéndose a un gráfico de composición para el tipo de asfalto rebajado se determina el porcentaje de disolvente por peso para la viscosidad a  $60 \text{ }^\circ\text{C}$  ( $140 \text{ }^\circ\text{F}$ ). Del mismo gráfico (Figura 8) de composición también se determina la viscosidad a  $60 \text{ }^\circ\text{C}$  ( $140^\circ\text{F}$ ) del mismo asfalto después de que ha perdido 50% de disolvente. (Para condiciones específicas, otros porcentajes de pérdida de disolvente pueden ser usados). Para mezclas de mantenimiento que van a ser almacenadas, se sugiere una pérdida de disolvente del 25 %.



**Figura 7:** Ejemplo de la relación de temperatura-viscosidad para un asfalto rebajado de cura media.  
 Figura adaptada del MS-14 del Instituto del Asfalto.



**Figura 8:** Ejemplo de la composición para un asfalto rebajado de cura media.

Figura adaptada del MS-14 del Instituto del Asfalto.

(d) Se preparan mezclas de prueba con varios contenidos de asfalto y se compactan como en el caso del concreto asfáltico en caliente, excepto que la temperatura de compactación está basada en la viscosidad del asfalto después de que ha sido curado a un porcentaje específico de pérdida de disolventes. Las pruebas deben ser programadas sobre la base de no más del 1% y preferiblemente incrementos del 0.5% de contenido de asfalto con al menos dos contenidos de asfalto por encima del óptimo y al menos dos contenidos de asfalto por debajo del óptimo. El primer contenido de asfalto óptimo por utilizar debe ser estimado.

El curado se lleva a cabo en un horno a la temperatura de compactación y es controlado por la verificación del peso a intervalos de 15 minutos inicialmente y menos de 10 minutos cuando el peso de la mezcla se esté aproximando a la pérdida de disolvente predeterminada.

Para la compactación se tiene que aplicar 75 golpes con el martillo Marshall.

(e) Los especímenes de prueba son analizados para contenido de vacíos, los vacíos en el agregado mineral y la estabilidad y flujo Marshall determinados a una temperatura de 25 °C (77 °F). Se tiene que determinar la gravedad específica máxima teórica y la gravedad específica bruta para poder calcular los vacíos de la mezcla compactada.

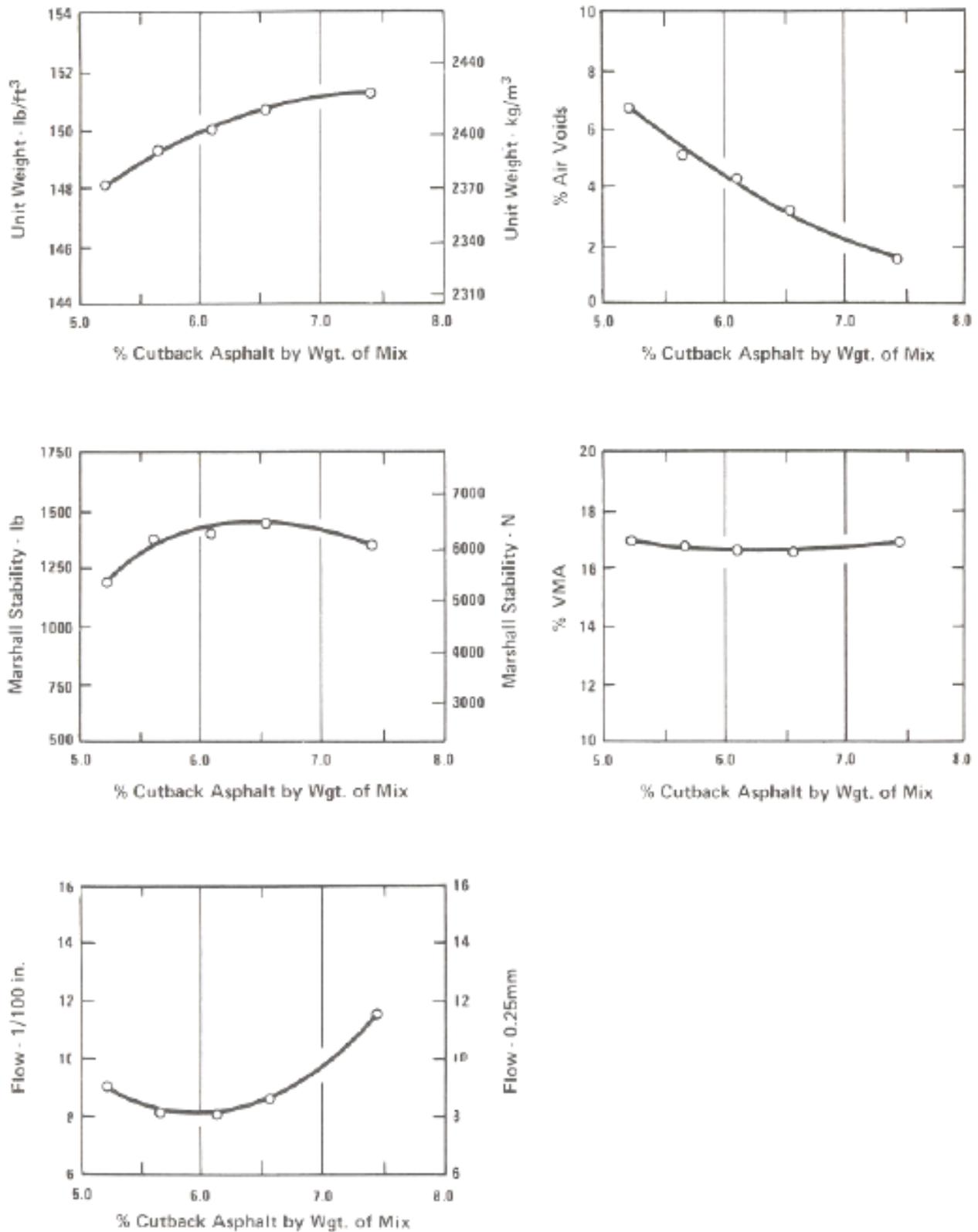
Se preparan gráficos separados para los siguientes parámetros (como se ilustra en la Figura 9):

- (1) Estabilidad vs contenido de asfalto
- (2) Flujo vs contenido de asfalto
- (3) Peso unitario del total de la mezcla vs contenido de asfalto
- (4) Porcentaje de vacíos de aire vs contenido de asfalto
- (5) Porcentaje de vacíos en el agregado mineral (VMA) vs contenido de asfalto

En cada gráfico se deben conectar los valores graficados con una curva suave que obtenga el mejor ajuste de todos los valores.

Para las mezclas de granulometría densa las tendencias que generalmente se notan son:

- El valor de estabilidad se incrementa cuando el contenido de asfalto aumenta a un máximo, después del cual, el valor de estabilidad decrece.
- El valor de flujo disminuye al valor mínimo cuando incrementa con el aumento del contenido de asfalto. En muchos casos, el valor mínimo ocurrirá al contenido más bajo de asfalto que el mínimo usado en los especímenes de prueba.
- La curva para peso unitario del total de la mezcla es similar a la curva de estabilidad, excepto que el peso unitario máximo normalmente (pero no siempre) ocurre en un punto ligeramente más alto de contenido de asfalto que la estabilidad máxima.
- El porcentaje de vacíos de aire disminuye cuando el contenido de asfalto se incrementa, en definitiva, acercándose a un contenido de vacíos mínimo.
- El porcentaje de vacíos en el agregado mineral (VMA) generalmente disminuye al valor mínimo entonces se incrementa con el aumento en el contenido de asfalto.



**Figura 9:** Gráficos del comportamiento típico de la mezcla en frío con asfalto rebajado diseñada por Marshall

Figura adaptada del MS-14 del Instituto del Asfalto.

(f) El efecto del daño por humedad sobre la estabilidad y flujo se determina sometiendo un conjunto de especímenes de prueba a inmersión por un periodo de 4 días en agua a 25 °C (77 °F).

(g) El contenido óptimo de asfalto se escoge como el porcentaje de asfalto rebajado en el cual la mezcla pierde los disolventes según especificaciones, de manera que mejor satisfaga todos los criterios de diseño. Los valores de las especificaciones se detallan en el capítulo de especificaciones. Generalmente se selecciona el contenido óptimo de asfalto correspondiente al 4% de vacíos de aire.

#### 4.7 Procedimiento para el diseño de mezcla Hveem para mezclas con emulsión asfáltica

Este método de diseño cubre la selección, proporción y ensayo de agregados, aditivos y asfalto emulsificado, para mezclas de granulometría densa para la construcción de pavimentos. Los métodos de ensayo están basados en procedimientos desarrollados por el Departamento de Transporte de California y sus modificaciones, así como los procedimientos desarrollados por el Instituto del Asfalto.

El método de diseño está dividido en las siguientes etapas:

(1) Selección del agregado y el asfalto emulsificado: Los agregados usados para mezclas de asfalto emulsificado y las pautas para la selección del tipo de asfalto emulsificado se resumen en la Tabla 1 de este documento.

(2) Prueba de contenido de asfalto emulsificado: La prueba del equivalente de la centrífuga de keroseno (C.K.E.) se usa para determinar el contenido de asfalto emulsificado inicial. Los rangos del contenido de asfalto emulsificado para ensayos de mezclas se muestran en la Tabla 9.

**Tabla 9.** Selección del contenido de emulsión asfáltica.

<b>Tipo de agregado</b>	<b>Contenido aproximado de emulsión asfáltica, porcentaje por peso de agregado<sup>1</sup></b>
Granulometría densa fabricada	5.0 - 10.0
Arenas Arenas silíceas Material quebrado semiprocesado Material de tajo	4.5 – 8.0

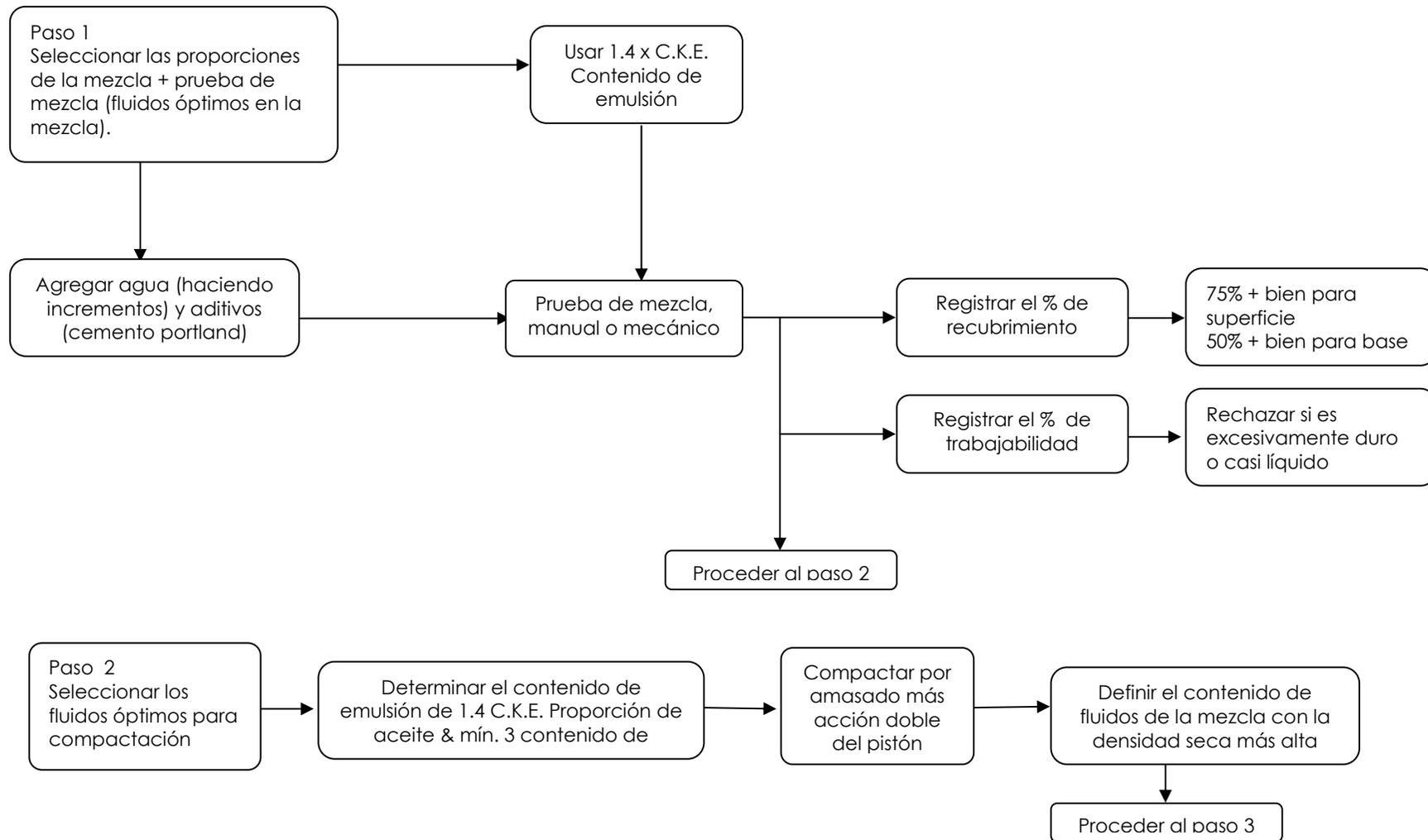
<sup>1</sup>Con agregado poroso el contenido de asfalto emulsificado debe incrementarse por un factor de aproximadamente 1.2. Agregado poroso es el que absorbe más del 2% de agua por peso seco cuando se le hace el ensayo por el método ASTM C 127.

- (3) Ensayo de mezcla (determinación de contenido óptimo de fluidos en la mezcla): El mezclado se puede realizar, ya sea de manera manual o con mezclador mecánico. Se hace para determinar el recubrimiento y la trabajabilidad de las mezclas de prueba. La cantidad de agua de mezcla se varía para optimizar esas propiedades a menos que las condiciones de trabajo, evidentemente prevengan este tipo de optimización. Los aditivos, si se usan, son premezclados con el agregado antes de realizar la prueba de mezcla.
- (4) Determinación del contenido óptimo de fluidos por compactación: La fabricación del espécimen de prueba se logra por medio de una compactación ligera de amasado seguido por un doble aplicación de la carga estática con el pistón.
- (5) Prueba de resistencia: La resistencia de las mezclas de asfalto emulsificado se mide por medio del módulo final a una temperatura de  $23 \pm 1.7$  °C ( $73 \pm 3$  °F) después de una cura total de tres días en el molde, más cuatro días de desecación con vacío<sup>1</sup>. Este dato es usado en conjunto con ciertas variables (tránsito, temperatura regional y condiciones de cura) y otras propiedades de la mezcla (porcentaje de volumen de asfaltos residuales y vacíos) para determinar el espesor del pavimento.
- (6) Ensayos de exposición a la humedad, estabilidad y cohesión: a las mezclas para base se les evalúa la resistencia antes y después de la saturación al vacío. Las mezclas para **base** se ensayan a  $23 \pm 2.8$  °C ( $73 \pm 5$  °F) para el valor de resistencia R y para el cohesiómetro, valor C. Las mezclas para **capas de ruedo** se ensayan a  $60 \pm 2.8$  °C ( $140 \pm 5$  °F) para valor S estabilómetro y valor C cohesiómetro.
- (7) Determinación del contenido óptimo de asfalto emulsificado: Con las especificaciones establecidas en la Tabla 19 se da un criterio de diseño para dos tipos de asfalto emulsificado de mezclas de granulometría densa.

A continuación se presenta en las Figura 10 y **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, un diagrama de resumen para el diseño de mezcla Hveem.

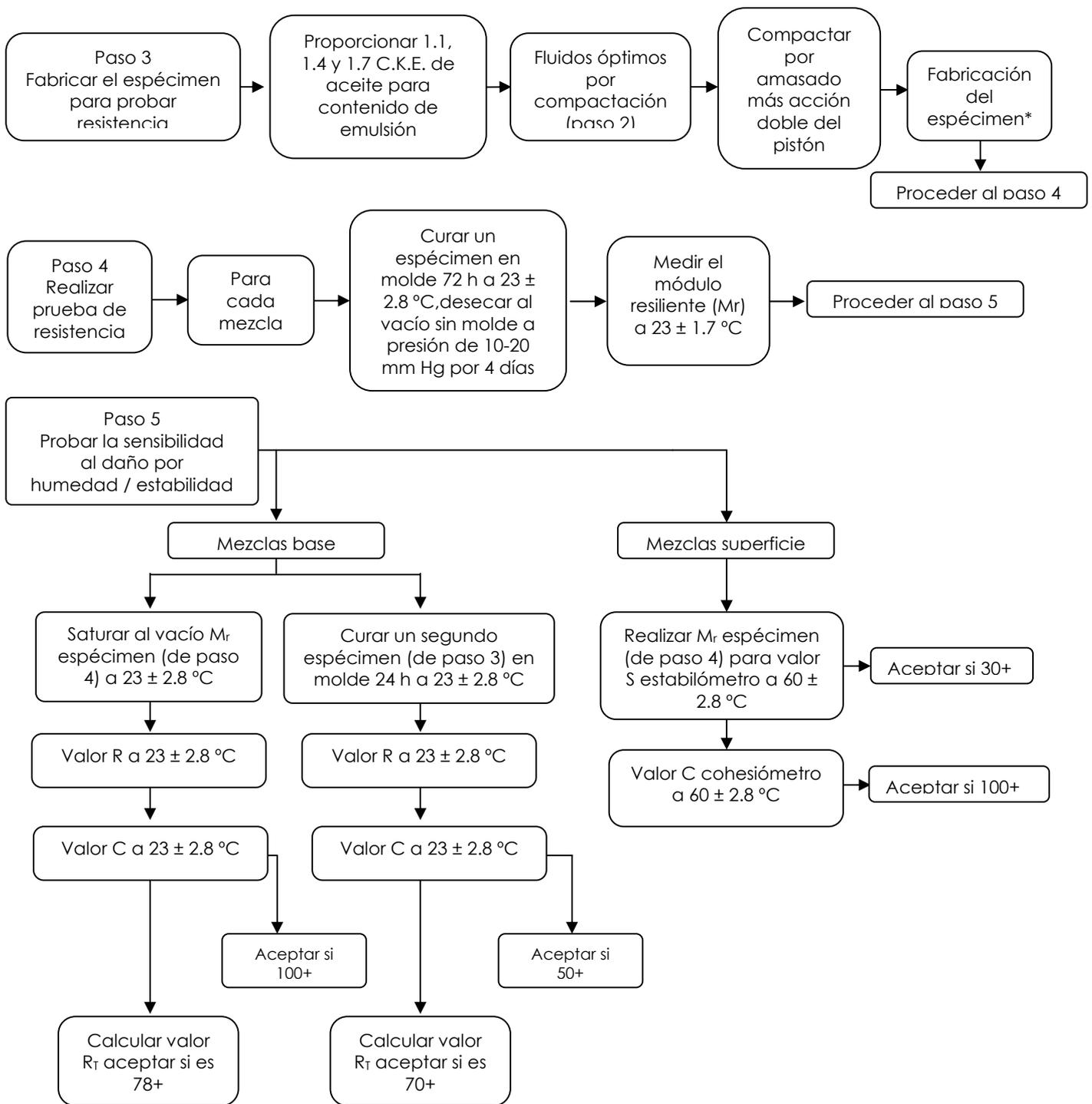
---

<sup>1</sup> Un procedimiento alternativo, que acorta el tiempo de cura, es curar por un día en el molde en un cuarto a temperatura ambiente seguido por un día fuera del molde en un horno a 37.8 °C (100 °F).



**Figura 10:** Esquema experimental para mezclas de granulometría densa y emulsión asfáltica.

Figura adaptada del MS-14 del Instituto del Asfalto.



**Figura 11:** Esquema experimental para mezclas de granulometría densa y emulsión asfáltica (cont).  
Figura adaptada del MS-14 del Instituto del Asfalto.

#### **4.8 Procedimiento para el diseño de mezcla Hveem para mezclas con asfalto rebajado**

El método es aplicable a mezclas que contengan asfalto rebajado de cura media (MC), cura lenta (SC) y agregados minerales con tamaños máximos que no excedan 25 mm (1 pulgada) de diámetro. Esto incluye mezclas preparadas en sitio y en planta. Las especificaciones para la granulometría del agregado, designan 25 mm (1 pulgada), 19 mm ( $\frac{3}{4}$  pulgada), 12.5 mm ( $\frac{1}{2}$  pulgada) y 4.75 mm (N<sup>o</sup>4) como tamaño máximo nominal, según la norma ASTM D 3515, los cuales son convenientes para mezclas con asfalto rebajado. Los agregados deben tener un valor equivalente de arena (ASTM D 2419) de mínimo 35, y los factores  $K_c$  y  $K_f$  obtenidos del ensayo del Equivalente de la Centrífuga de Keroseno no deben exceder 1.8.

El procedimiento para el método Hveem comienza con la preparación de los especímenes de prueba. Preliminarmente para esta etapa se requiere que:

- (a) Los materiales propuestos se encuentren dentro de las especificaciones del proyecto.
- (b) Se determinen las combinaciones que se encuentran en los requisitos de granulometría de las especificaciones del proyecto para los agregados; y
- (c) Un suministro abundante de agregados que esté seco y dimensionado en fracciones.

El método Hveem usa especímenes de prueba estándar de 63.5 mm (2  $\frac{1}{2}$  pulgadas) de altura por 101.6 mm (4 pulgadas) de diámetro. La principal característica del método Hveem de diseño de mezcla con asfalto rebajado, es el ensayo del equivalente de la centrífuga de keroseno sobre el agregado, para estimar los requerimientos de asfalto de la mezcla, seguido por la prueba del estabilómetro, una prueba del cohesiómetro, una prueba de hinchamiento y una prueba de susceptibilidad al daño por humedad. La prueba del estabilómetro utiliza un ensayo especial de tipo triaxial para medir la resistencia de la mezcla compactada al desplazamiento lateral bajo cargas verticales. La prueba del cohesiómetro mide la cohesividad o resistencia a tensión de la mezcla compactada. La prueba de hinchamiento mide la resistencia de la mezcla a la acción del agua. Los

especímenes de prueba se mantienen a 60 °C (140 °F) para ambos ensayos de estabilidad y cohesiómetro, pero la prueba de hinchamiento es realizada a temperatura ambiente.

Las proporciones de agregado y asfalto rebajado, planteadas para la construcción y que se encuentran dentro de los requerimientos del proyecto, se obtienen de los ensayos del diseño de mezcla. Los procedimientos de diseño incluyen estos pasos:

- (1) Las muestras de agregado son analizadas y preparadas.
- (2) El contenido estimado de asfalto rebajado se determina por el método del equivalente de la centrifuga de keroseno.
- (3) Las mezclas de asfalto rebajado se preparan para la prueba del estabilómetro y la prueba de hinchamiento y la prueba de susceptibilidad al daño por humedad.
- (4) El diseño de mezcla apropiado se determina en función del cumplimiento de las especificaciones de los ensayos de estabilidad, hinchamiento y susceptibilidad al daño por humedad.

#### **4.9 Módulo resiliente a 23 °C**

El valor del módulo resiliente determinado por este método, es una medida del módulo de elasticidad para mezclas asfálticas, que reconoce sus características no lineales. Los valores obtenidos de módulo resiliente pueden ser usados en los modelos de análisis estructural para calcular la respuesta de un pavimento ante las cargas de tránsito, además en los procedimientos de diseño de estructuras de pavimentos.

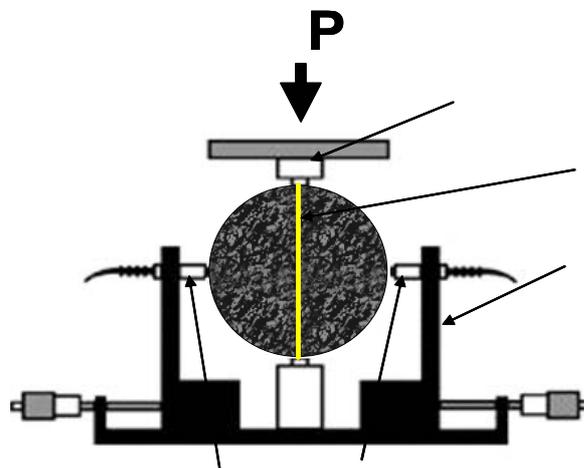
El equipo del ensayo debe ser una máquina que aplique la carga repetida en la parte superior, con retroalimentación de circuito cerrado, electro-hidráulica, con un generador capaz de aplicar un pulso de carga con forma haversiana sobre un rango de duraciones de carga, niveles de carga y periodos de reposo. El ensayo se debe realizar a 23 °C. Los niveles de esfuerzos que se deben aplicar al espécimen a cada temperatura, se determinan del ensayo de resistencia a la Tensión Indirecta.

Específicamente se aplica un esfuerzo cíclico repetido de magnitud fija, de 0.1 segundos de duración y un ciclo de reposo de 0.9 segundos a un espécimen cilíndrico. Durante el ensayo,

el espécimen está sujeto a un esfuerzo dinámico cíclico (90 por ciento de la carga total) y un esfuerzo constante (10 por ciento de la carga total). La respuesta de las deformaciones horizontales y verticales instantáneas y totales del espécimen, se miden y se utilizan para el cálculo de ambos módulos resilientes: el instantáneo y el total ( $M_{ri}$  y el  $M_{rt}$ , respectivamente).

El módulo resiliente instantáneo, se calcula usando la deformación horizontal recuperable que ocurre durante la descarga en el ciclo de carga-descarga. El módulo resiliente total, se calcula usando la deformación total recuperable, es decir toma en cuenta la deformación recuperable al final de los ciclos y las deformaciones instantáneas recuperables de cada ciclo.

El ensayo de tensión indirecta de mezclas bituminosas de carga repetida en núcleos, se realiza a través de aplicaciones de cargas de compresión, a lo largo de un plano diametral vertical del núcleo, como se muestra en la Figura 12. Los valores de Poisson se calculan utilizando los datos de deformación vertical y horizontal recuperables. Luego, los valores de módulo se calculan utilizando el valor de Poisson calculado.



**Figura 12:** Disposición del espécimen para ensayo de módulo resiliente.

## CAPÍTULO 5 ESPECIFICACIONES DE CALIDAD

### 5.1. Emulsión asfáltica

**(a) Emulsión asfáltica aniónica.** Debe cumplir con lo establecido en la norma AASHTO M 140 o ASTM D 977. En la Tabla 10 se resumen las especificaciones para las emulsiones que se usan en mezclas en frío.

**Tabla 10.** Resumen de especificaciones para **emulsiones aniónicas**, utilizadas en la construcción de mezclas en frío.

TIPO DE ENSAYO	MS-2		MS-2h		HFMS-2		HFMS-2h		HFMS-2s		SS-1		SS-1h	
	mín	máx	mín	máx	Mín	máx	mín	máx	mín	máx	mín	Máx	Mín	máx
<b>En la emulsión</b>														
Viscosidad Saybolt Furol a 25 °C (seg)	100	-	100	-	100	-	100	-	50	-	20	100	20	100
Porcentaje de estabilidad de almacenamiento en 24 h (%)	-	1	-	1	-	1	-	1	-	1	-	1	-	1
Porcentaje de mezclado del cementante asfáltico (%)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2.0	-	2.0
Porcentaje retenido en el tamiz (%)	-	0.1	-	0.1	-	0.1	-	0.1	-	0.1	-	0.10	-	0.10
Destilación Porcentaje de residuo (%)	65	-	65	-	65	-	65	-	65	-	57	-	57	-
<b>En el residuo de la destilación</b>														
Penetración a 25 °C	100	200	40	90	100	200	40	90	200	-	100	200	40	90
Ductilidad a 25 °C (cm)	40	-	40	-	40	-	40	-	40	-	40	-	40	-
Porcentaje de solubilidad en tricloroetileno (%)	97.5	-	97.5	-	97.5	-	97.5	-	97.5	-	97.5	-	97.5	-
Flotamiento (s)	-	-	1200	-	-	-	1200	-	1200	-	-	-	-	-

NA: No aplica.

Tabla adaptada de AASHTO M 140 "Table 1: Requirements for emulsified asphalt"

**(b) Emulsión asfáltica catiónica.** Debe cumplir con lo establecido en la norma AASHTO M 208 o ASTM D 2397. Las especificaciones se muestran en la Tabla 11.

**Tabla 11.** Resumen de especificaciones para **emulsiones catiónicas**, utilizadas en la construcción de mezclas en frío.

TIPO DE ENSAYO	CMS-2		CMS-2h		CSS-1		CSS-1h	
	mín	máx	mín	Máx	mín	máx	mín	máx
<b>En la emulsión</b>								
Viscosidad Saybolt Furol a 25 °C (seg)	-	-	-	-	20	100	20	100
Porcentaje de estabilidad de almacenamiento en 24 h (%)	-	1	-	1	-	1	-	1
Ensayo de la carga de la partícula	Positiva			Positiva	Positiva		Positiva	
Porcentaje de mezclado del cementante asfáltico (%)	-	-	-	-	-	2.0	-	2.0
Porcentaje retenido en el tamiz (%)	-	0.10	-	0.10	-	0.10	-	0.10
Destilación Porcentaje de residuo (%)	65	-	65	-	57	-	57	-
<b>En el residuo de la destilación</b>								
Penetración a 25 °C	100	250	40	90	100	250	40	90
Ductilidad a 25 °C (cm)	40	-	40	-	40	-	40	-
Porcentaje de solubilidad en tricloroetileno (%)	97.5	-	97.5	-	97.5	-	97.5	-

NA: No aplica.

Tabla adaptada de AASHTO M 208 "Table 1 Requirements and typical applications for cationic emulsified asphalt"

## 5.2. Asfalto rebajado

Los tipos de asfaltos rebajados que pueden ser empleados para construcción de mezclas en frío son de curado medio: MC-70, MC-250, MC-800 y MC-3000 y de curado lento: SC-250, SC-800 y SC-3000 (Ver Tabla 1 del Capítulo 2).

A continuación se presentan las Tabla 12 y Tabla 13 donde se resumen las especificaciones de calidad que deben de cumplir los asfaltos rebajados.

**Tabla 12.** Especificaciones mínimas y máximas para el asfalto rebajado de **curado medio** para construcción de mezclas en frío.

TIPO DE ENSAYO	MC-70		MC-250		MC-800		MC-3000	
	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.
<b>En el asfalto rebajado</b>								
Viscosidad cinemática a 60 °C <sup>1</sup>	70	140	250	500	800	1600	3000	6000
Punto de inflamación Tag copa abierta	38	-	66	-	66	-	66	
Destilación a 360 °C								
Porcentaje por volumen a 225 °C	0	20	0	10	-	-	-	-
Porcentaje por volumen a 260 °C	20	60	15	55	0	35	0	15
Porcentaje por volumen a 315 °C	65	90	60	87	45	80	15	75
Porcentaje de residuo	55	-	67	-	75	-	80	-
Porcentaje de agua por destilación		0.2		0.2		0.2		0.2
Ensayo de la mancha <sup>2</sup>	negativo negativo negativo							
Nafta estándar								
Solvente xileno de nafta								
Solvente xileno de heptano								
<b>En el residuo de la destilación (asfalto residual)</b>								
Viscosidad absoluta a 60 °C <sup>3</sup>	30	120	30	120	30	120	30	120
Ductilidad a 25 °C	100	-	100	-	100	-	100	-
Porcentaje de solubilidad en tricloroetileno	99.0	-	99.0	-	99.0	-	99.0	-

**Tabla 13.** Especificaciones mínimas y máximas para el asfalto rebajado de **curado lento** para construcción de mezclas en frío.

TIPO DE ENSAYO	SC 250		MC-250		SC-800		SC-3000	
	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.
<b>En el asfalto rebajado</b>								
Viscosidad cinemática a 60 °C <sup>1</sup>	70	140	250	500	800	1600	3000	6000
Punto de inflamación Tag copa abierta	38	-	66	-	66	-	66	
Destilación a 360 °C								
Porcentaje por volumen a 225 °C	0	20	0	10	-	-	-	-
Porcentaje por volumen a 260 °C	20	60	15	55	0	35	0	15
Porcentaje por volumen a 315 °C	65	90	60	87	45	80	15	75
Porcentaje de residuo	55	-	67	-	75	-	80	-
Porcentaje de agua por destilación		0.2		0.2		0.2		0.2
Ensayo de la mancha <sup>2</sup>	negativo negativo negativo							
Nafta estándar								
Solvente xileno de nafta								
Solvente xileno de heptano								
<b>En el residuo de la destilación (asfalto residual)</b>								
Viscosidad absoluta a 60 °C <sup>3</sup>	30	120	30	120	30	120	30	120
Ductilidad a 25 °C	100	-	100	-	100	-	100	-
Porcentaje de solubilidad en tricloroetileno	99.0	-	99.0	-	99.0	-	99.0	-

<sup>1</sup> Se puede hacer como método alternativo la viscosidad Saybolt-Furol a distintas temperaturas dependiendo del grado del asfalto rebajado.

<sup>2</sup> El uso del ensayo de la mancha es opcional.

<sup>3</sup> También se puede realizar el ensayo de penetración a 25 °C.

### 5.3. Agregado

Con respecto a los agregados que se vayan a utilizar, para la fabricación de mezclas en frío es importante tener conocimiento del índice de plasticidad del material que pasa el tamiz de 75  $\mu\text{m}$  (N° 200), debe ser mínimo 65%.

Otro dato importante que se debe tomar en cuenta, es el resultado del ensayo de equivalente de arena, que en materiales que presentan un dato mayor a 35 se pueden estabilizar con asfalto exitosamente. La posibilidad de éxito con materiales que tienen un equivalente de arena entre 20-30 depende de la habilidad del asfalto para recubrir las partículas. Se ha encontrado que el proceso de mezclado no es satisfactorio cuando se utilizan materiales de grava con arcilla, con equivalentes de arena menores que 20, pues estas mezclas se convierten en materiales muy difíciles de mezclar, los finos se conglomeran y el asfalto se separa del agregado fino y falla en recubrir las partículas de agregado grueso.

En la Tabla 14 se resumen las especificaciones para los agregados que se deben cumplir para la fabricación de mezclas en frío.

**Tabla 14.** Resumen de especificaciones para los agregados finos y gruesos, utilizados en la construcción de mezclas asfálticas en frío.

TIPO DE ENSAYO	Especificación Sieca	Especificación Instituto Asfalto MS-19
<b>Agregado</b>		
Granulometría	Ver Tabla 15, Tabla 16 y Tabla 17	-
Índice de plasticidad	-	mínimo 65%
Equivalente de arena	mínimo 35%	mínimo 35% mínimo 30% (F)
Partículas friables	máximo 1%	-
Caras fracturadas	mínimo 75%	mínimo 65%
Carbonatos solubles, residuo insoluble	máximo 25%	-
Índice de durabilidad (grueso y fino)	mínimo 35%	-
Abrasión de los Ángeles	máximo 40%	máximo 40%
Durabilidad en sulfatos	máximo 12%	-

En las siguientes tablas se resumen las especificaciones granulométricas para la fabricación de mezclas en frío de graduación densa y abierta.

**Tabla 15.** Resumen de especificaciones granulométricas para en la construcción de mezclas asfálticas en frío de **graduación densa**.

Malla	Porcentaje por peso pasando la malla estándar					
	A <sup>1</sup>	B <sup>1</sup>	C <sup>1</sup>	D <sup>1</sup>	E <sup>1</sup>	F <sup>2</sup>
50 mm	100					-
37.5 mm	90 <sup>3</sup> – 100	100				100
25 mm	-	90 <sup>3</sup> – 100	100			80-90
19 mm	60 – 80	-	90 <sup>3</sup> – 100	100		-
12.5 mm	-	60 – 80	-	90 <sup>3</sup> – 100	100	-
9.5 mm	-	-	60 – 80	-	90 <sup>3</sup> – 100	-
4.75 mm	20 – 55	35 <sup>4</sup> – 60	35 – 65	45 – 70	60 – 80	25-85
2.36 mm	10 – 40	15 – 45	20 – 50	25 – 55	35 – 65	-
300 µm	2 – 16	3 – 18	3 – 20	5 – 20	6 – 25	-
75 µm	0 – 5	1 – 7	2 – 8	2 – 9	2 – 10	3-15

<sup>1</sup> Agregado con proceso de quebrado

<sup>2</sup> Agregado con proceso de semiquebrado, de tajo o de depósitos, esta granulometría no está especificada en el manual de la Sieca CA-2001

<sup>3</sup> En el manual de la Sieca CA-2001 este dato es 95

<sup>4</sup> En el manual de la Sieca CA-2001 este dato es 25

Las granulometrías C, D y E se especifican para la mezclas de mantenimiento tipo apilamiento.

Tomada de Manual del Instituto del Asfalto MS-19 Tabla 7.2

**Tabla 16.** Resumen de especificaciones granulométricas para en la construcción de mezclas asfálticas en frío de **graduación abierta**.

Malla	Porcentaje por peso pasando la malla estándar			
	A <sup>1</sup>	B <sup>1</sup>	C <sup>1</sup>	D <sup>2</sup>
37.5 mm	100	-	-	-
25 mm	95 – 100	100	-	-
19 mm	-	90 – 100	-	-
12.5 mm	25 – 65	-	100	-
9.5 mm	-	20 – 55	85 – 100	100
4.75 mm	0 – 10	0 – 10	-	30 – 50
2.36 mm	0 – 5	0 – 5	0 – 10	5 – 15
1.18 mm	-	-	0 – 5	-
75 µm	0 – 2	0 – 2	0 – 2	0 – 2

<sup>1</sup> Para base

<sup>2</sup> Para superficie de rudo

Tomada de Manual del Instituto del Asfalto MS-19 Tabla 7.3

**Tabla 17.** Resumen de especificaciones granulométricas para en la construcción de mezclas asfálticas en frío de **arena-emulsión**.

Malla	Porcentaje por peso pasando la malla estándar		
	Pobrementemente graduada	Bien graduada	Arenas limosas
12.5 mm	100	100	100
4.75 mm	75 – 100	75 – 100	75 – 100
2.36 mm	-	15 – 30	-
1.18 mm	-	-	15 – 65
75 mm	0 – 12	5 – 12	12 – 20

Tomada de Manual del Instituto del Asfalto MS-19 Tabla 7.4

#### 5.4. Agua

El agua que se debe utilizar para la fabricación de las mezclas en frío debe cumplir con los requerimientos de la especificación AASHTO M 157, es decir, debe estar libre de aceites, ácidos, álcalis, materias orgánicas y otras sustancias contaminantes. No debe ser agua salada y salobre. Se debe usar agua potable de calidad conocida, que esté de acuerdo con la norma AASHTO T 26, cuando la calidad del agua sea cuestionable, se debe cumplir con lo establecido en la Tabla 2 de la especificación AASHTO M 157.

#### 5.5. Relleno mineral

Debe estar de acuerdo con la especificación AASHTO M 17. El relleno debe consistir en una matriz de agregado mineral como polvo de roca, cenizas, cal hidratada, cemento hidráulico, cenizas volantes, limos finos u otros materiales adecuados. En el momento de su uso debe estar completamente seco para permitir que flote libremente y que no se aglomere. Debe tener, además, la granulometría que se muestra en la Tabla 18.

**Tabla 18.** Resumen de especificaciones granulométricas para los rellenos minerales para ser utilizados en mezclas en frío.

Tamiz	Porcentaje pasando
1.18 mm	100
600 µm	97 – 100
300 µm	95 – 100
75 µm	70 – 100

## 5.6. Mezclas en frío

Las especificaciones para mezclas en frío están más relacionadas con las especificaciones de los componentes que con el desempeño a largo plazo, no obstante en las Tabla 19, Tabla 20, Tabla 21 y Tabla 22 se muestran los requerimientos para las mezclas asfálticas con granulometría densa con emulsión asfáltica y asfalto rebajado para los dos métodos de diseño.

**Tabla 19.** Requerimientos para mezcla asfáltica con **granulometría densa** y emulsión asfáltica diseñadas con el **método Hveem**.

Propiedad a evaluar	Especificación
Valor S de Estabilidad a $60 \pm 3$ °C	30 mínimo
Valor C de Cohesión a $60 \pm 3$ °C	100 mínimo
Recubrimiento del agregado (%)	75 mínimo

Además de cumplir los requerimientos anteriores, la mezcla debe tener una buena trabajabilidad, no que quede muy rígida o fluida.

Fuente: Instituto del Asfalto, Manual Series No. 14 (MS-14).

**Tabla 20.** Requerimientos para mezcla asfáltica con **granulometría densa** y asfalto rebajado diseñadas con el **método Hveem**.

Propiedad a evaluar	Especificación
Valor S de Estabilidad	30 mínimo
Susceptibilidad al vapor de agua	20 mínimo
Hinchamiento	0.76 mm máximo

**Tabla 21.** Requerimientos para mezcla asfáltica con **granulometría densa** y emulsión asfáltica diseñadas con el **método Marshall**.

Propiedad a evaluar	Especificación
Estabilidad (kN) a $22 \pm 1$ °C	2.22 mínimo
Porcentaje de pérdida de Estabilidad <sup>1</sup>	50 máximo
Recubrimiento del agregado (%)	50 mínimo

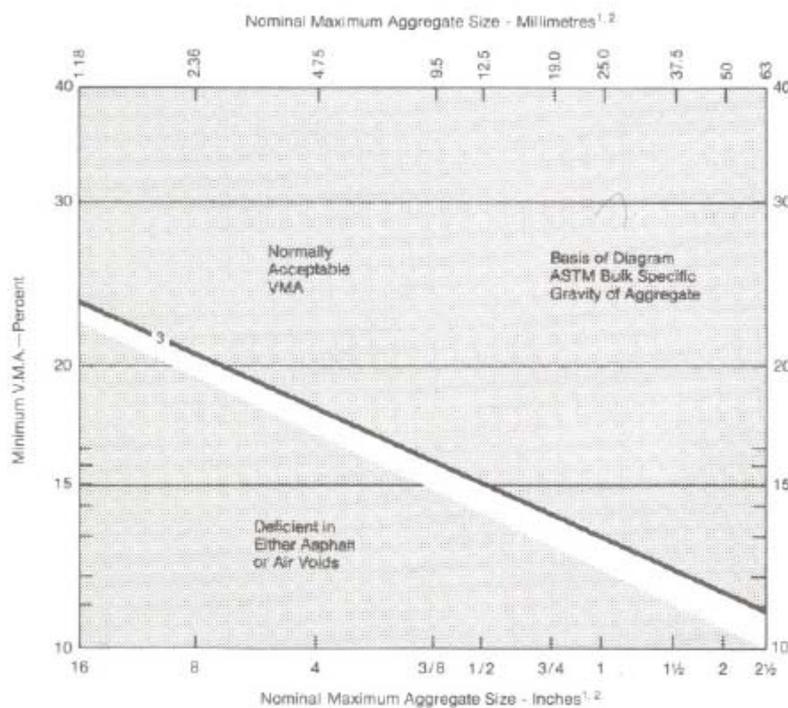
<sup>1</sup> Luego de saturar los vacíos y sumergir en agua el espécimen

Fuente: Instituto del Asfalto, Manual Series No. 14 (MS-14).

**Tabla 22.** Requerimientos para mezcla asfáltica con **granulometría densa** y asfalto rebajado diseñadas con el **método Marshall**.

Propiedad a evaluar	Especificación	
	Máximo	Mínimo
Grado de curado, porcentaje de solvente evaporado		
Mezclas de mantenimiento	25 %	
Mezclas de pavimentación	50 %	
Porcentaje de vacíos en la mezcla compactada	5	3
Porcentaje VMA	Ver Figura 13	
Estabilidad a 25 ° C (kN)		
Mezclas de mantenimiento	2.22	
Mezclas de pavimentación	3.34	
Flujo (0.25 mm)	16	8
% Estabilidad Retenida <sup>1</sup>	75%	

<sup>1</sup> Luego de cuatro días sumergido en agua a 25 ° C



<sup>1</sup>Standard Specification for Wire Cloth Sieves for Testing Purposes, ASTM Designation E11 (AASHTO Designation M92).

<sup>2</sup>For processed aggregate, the nominal maximum particle size is the largest sieve size listed in the applicable specification upon which any material is retained.

<sup>3</sup>Mixtures in the 1% tolerance band shall be permitted only when experience indicates that the mixture will perform satisfactorily and when all other criteria are met.

Enter the chart with normal maximum particle size and move vertically to the heavy line. Select a minimum VMA value at or above this line.

**Figura 13:** Porcentaje mínimo de vacíos en el agregado mineral.  
Figura adaptada del MS-14 del Instituto del Asfalto.

## CAPÍTULO 6 EQUIPOS Y PROCEDIMIENTOS PARA LA CONSTRUCCIÓN

### 6.1. Equipo para mezcla producida en sitio

Existen numerosos tipos de máquinas destinadas a la producción de mezclas en sitio. Se presenta a continuación un resumen de varios tipos de equipos para mezclado, distribución y compactación usados comúnmente.

#### 6.1.1. Equipo para mezclado

##### a) Mezcladoras rotatorias

Es una mezcladora mecánica rotatoria que posee una cámara de mezclado móvil montada en un camión autopropulsado. La cámara, es usualmente de 2 m de ancho y abierta en el fondo, que tiene uno o más ejes transversales a la dirección del pavimento, en los cuales están montadas las cuchillas que revuelven el material.

Mientras la máquina se mueve hacia delante, va dejando atrás una mezcla uniforme de agregado-asfalto. La mayoría de máquinas rotatorias tienen un solo eje. Algunas están equipadas con un sistema que añade el asfalto por aspersion dentro de la cámara de mezclado mientras que la máquina se mueve hacia delante, donde la cantidad de dosificación está sincronizada con la velocidad del equipo. Sin embargo, otras máquinas se deben utilizar en conjunto como un distribuidor de asfalto que adiciona el asfalto en el agregado inmediatamente antes del mezclador móvil. (Ver Figura 14)



**Figura 14:** Mezcladoras rotatorias.

Ambos tipos de máquinas tienen la capacidad de realizar un corte liso en el fondo y luego mezclar el agregado con el asfalto produciendo la mezcla de diseño, utilizando sus

dispositivos individuales que les permite desempeñarse de manera óptima. Las máquinas que poseen el alimentador de asfalto incorporado deben tener un medidor preciso y un mezclador de asfalto que esté sincronizado con el movimiento continuo hacia delante cuando se está mezclando en el sitio. Para ser más específicos, la barra de distribución del asfalto debe tener el tamaño del ancho del mezclador.

Los equipos también deben contar con controles para la profundidad de corte, para el proceso de mezclado y para la colocación del material mezclado cuando va saliendo de la cámara de mezclado.

Las mezcladoras rotatorias que no poseen aspersor de asfalto generalmente vienen equipadas con controles que permiten el ajuste de la profundidad de cortado hasta 250 mm, ajuste de la puerta trasera y ajuste de la cubierta con el propósito de mantenimiento y limpieza.

Algunas máquinas de perfilado y aplanado se pueden equipar con sistemas para la dosificación de aditivos. El sistema debe calibrarse para obtener los porcentajes de dosificación de diseño. Hay máquinas recuperadoras que pueden mezclar con el asfalto ya sea, con material existente del pavimento o incorporando agregado virgen que ha sido colocado previamente en la superficie del camino. La mezcla final se descarga en un camellón sobre la superficie (Figura 15a. y Figura 15b.), directamente en un camión distribuidor o en una pavimentadora para su colocación (Figura 15c. y Figura 15d.)



a. Colocación de camellón con la mezcladora



b. Colocación de camellón con la recuperadora



c. Colocación de la mezcla en camión distribuidor



d. Colocación de la mezcla en pavimentadora

**Figura 15:** Máquinas de perfilado.

Hay recuperadoras que cortan el material de un pavimento existente, que rompe los tamaños grandes y redimensiona para realizar el *reciclado en frío en sitio*. El material redimensionado se combina en un mezclador rotatorio con el asfalto y finalmente la mezcla se descarga en la superficie del pavimento. (Ver Figura 16)



**Figura 16:** Equipo de reciclado en frío en sitio.

## b) Moto niveladora

Con este equipo se realiza el mezclado del asfalto con el agregado en el sitio con ayuda de la cuchilla. El asfalto es aplicado directamente delante de la moto niveladora por medio de un distribuidor de asfalto. (Ver Figura 17)

Para un mezclado más efectivo, el equipo debe tener una cuchilla de al menos 3 m de largo, y debe tener una rueda base de 4.5 m. Las moto niveladoras utilizadas para la colocación final y acabado de la superficie deben estar equipadas con llantas neumáticas lisas en lugar de llantas de taco. Se le pueden añadir aditamentos como escarificador delante o detrás de la hoja.



**Figura 17:** Equipo moto niveladora para mezclado con cuchilla.

## c) Plantas móviles

Las plantas móviles son unidades autopropulsadas que dosifican y mezclan los agregados y el asfalto mientras va por la superficie del pavimento. Un tipo de planta móvil recibe el agregado dentro de su tolva cuando los camiones descargan, luego añade el asfalto y coloca la mezcla en la parte trasera mientras se mueve por la ruta. (Ver Figura 18)

Los equipos poseen ciertas características y dispositivos que son comunes para todas las plantas móviles. Estos equipos permiten una operación más efectiva y producen una mezcla que cumple con las especificaciones de diseño. Las llantas en las cuales la máquina se

mueve, deben poseer el tamaño, diseño y posición de tal manera que no dañe o deforme la superficie en la que opera, cuando está totalmente cargada.



**Figura 18:** Equipo planta móvil equipada con tolva.

El propósito de una planta móvil es mezclar el agregado y el asfalto. Algunas máquinas están equipadas con mecanismos que mantienen las proporciones adecuadas automáticamente. Otras, requieren que se mantenga una velocidad constante para asegurar que la dosificación sea uniforme. Sin importar el tipo, los fabricantes recomiendan los procedimientos para la calibración y operación de la planta móvil que deben ser seguidos de manera estricta. Finalmente, una planta móvil eficiente debe ser capaz de mezclar completamente el asfalto y las partículas de agregado, dispersando uniformemente el asfalto y recubriendo adecuadamente las partículas de agregado, produciendo una mezcla de un color uniforme.

Las plantas móviles con tolva, en algunos casos, requieren de dispositivos para asegurar un control preciso del flujo de agregado desde la tolva al tambor mezclador y que se mantengan las proporciones correctas de la mezcla. La alimentación del asfalto al tambor mezclador, de manera similar, requiere de una calibración precisa. Esto se logra con una bomba de desplazamiento positivo a través de la barra de aspersión.

#### d) Distribuidor de agua

La construcción de una capa de riego en el sitio puede requerir prehumedecer el agregado para obtener un mejor recubrimiento y facilidad a la hora de compactar. Por lo que, se requiere de un distribuidor de agua capaz de aplicar una cantidad controlada. (Ver Figura 19)

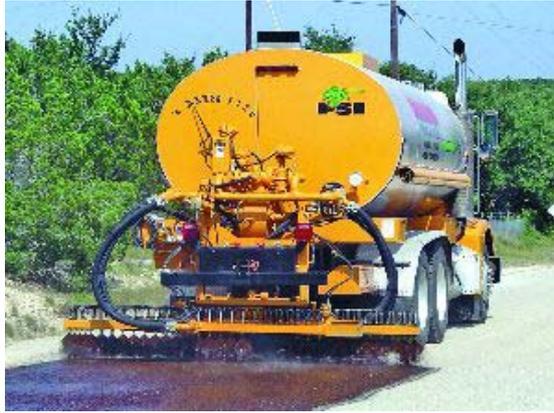


**Figura 19:** Distribuidor de agua.

#### e) Distribuidor de asfalto

El distribuidor de asfalto es una pieza clave para la construcción de mezclas asfálticas en frío, particularmente cuando se utilizan mezcladores rotatorios sin alimentación automática o cuando se usa mezclado con moto niveladora. El distribuidor de asfalto ya sea de camión o de carreta, consiste en un tanque aislado con un sistema de calentamiento, bomba y una barra de aspersión con boquillas, a través de las cuales el asfalto rebajado o emulsionado es aplicado a presión sobre el agregado preparado. (Ver Figura 20)

Hay gran variedad en distribuidores de asfalto algunos son capaces de rociar hasta un ancho de 5 m a velocidades controladas de hasta 13.5 l/m<sup>2</sup>. Es importante tener una adecuada cantidad de asfalto cerca del sitio de pavimentación para evitar atrasos. En zonas rurales, es recomendable tener un camión de asfalto en el proyecto.



**Figura 20:** Distribuidor de asfalto.

### **6.1.2. Equipo para la colocación**

#### **a) Moto niveladora**

Cuando se utiliza una moto niveladora para la colocación de la mezcla asfáltica en frío, se debe revisar que esté en óptimas condiciones para realizar este trabajo.

El borde de corte de la cuchilla debe estar afilado y recto de lado a lado para producir la sección transversal requerida. El cuchillo debe ser de la longitud suficiente para asegurar que el acabado quede lo más cercano a las tolerancias de la transversal. Usualmente se usan cuchillas de 3.7 a 4 m.

Las articulaciones y vínculos del sistema de suspensión de la cuchilla deben estar ajustados y libres de desgaste excesivo. Si esto no se toma en cuenta, la cuchilla puede vibrar y ocasionar variaciones en la presión durante su operación, que puede resultar en irregularidades en la superficie.

La moto niveladora debe ser lo suficientemente pesada para sostener de manera firme y uniforme la cuchilla sobre la superficie mientras está esparciendo la mezcla. La base de las llantas debe ser larga para permitir un aplanado cercano a las tolerancias solicitadas.

Cuando se utilice este equipo para colocar capa de ruedo, lo recomendable es que la máquina se equipe con llantas lisas para que no dejen las marcas de los tacos de las llantas

en el pavimento. El motor debe tener suficiente potencia para propulsar la máquina sin que se fuerza cuando está colocando la mezcla.

#### **b) Colocadores especializados (spreaders)**

Algunas mezclas en frío pueden ser colocadas con el espesor requerido sin el proceso de aireación. Generalmente, estas mezclas son de granulometría abierta colocadas bajo condiciones climáticas que permiten la evaporación del agua o de los volátiles en un tiempo razonable. Este tipo de mezclas pueden ser esparcidas con el mezclador rotatorio, o colocadas en camellones por la moto niveladora o con equipos más especializados que poseen dispositivos con múltiples propósitos. Un dispositivo especial de tipo “pick up” sirve para colocar la mezcla en frío en forma de camellón, este dispositivo se coloca detrás del pavimentador. Hay equipos que realizan las operaciones de recoger y colocar en un proceso continuo sin interrupciones. (Ver Figura 21)



**Figura 21:** Colocadores especializados.

#### **6.1.3. Equipo para la compactación**

##### **a) Compactador de llantas de hule (neumáticos)**

Los compactadores de llantas de hule para la compactación de mezclas en frío deben ser autopropulsados y de tipo tándem. Puede tener de dos a siete llantas en el frente y cuatro a ocho en la parte de atrás, deben estar libres para oscilar verticalmente. El peso de los compactadores varía entre 3 toneladas vacío hasta 35 toneladas con un peso añadido de arena húmeda. (Ver Figura 22)

Este tipo de compactadores son muy efectivos para la compactación inicial de las mezclas en frío, especialmente las mezclas que se utilizan para capas delgadas. El acabado final para corregir los defectos de la superficie es mejor realizarlo con compactadores de rodillo metálico.

El peso del compactador de llanta de hule es uno de los factores más importantes que inciden en la efectividad de la compactación. Los otros factores que afectan la compactación son la carga de las llantas, la presión de inflado, el área de contacto de la llanta y la velocidad del compactador.

Se deberían utilizar llantas lisas porque las llantas de taco pueden dejar marcas que no pueden ser eliminadas con las pasadas para el acabado final. El área de contacto de la llanta puede ser ajustada para una carga dada, aumentando la presión de inflado o manteniendo la presión de inflado y modificando la carga de la llanta. La presión de inflado de las llantas usualmente se debe especificar con un rango de variación entre  $\pm 34$  kPa.



**Figura 22:** Compactadores de llanta de hule.

## **b) Compactadores de rodillo metálico**

Hay dos tipos de compactadores de rodillo de acero.

1. *Compactadores tándem*, de doble eje, están disponibles con pesos entre 3 a 15 toneladas o más. En la mayoría se puede añadir más peso a las llantas colocando arena

mojada. Aunque hay compactadores con pesos de 3 a 6 toneladas, la mayoría de los proyectos requieren compactadores de 8 ton. Generalmente, el peso ejercido por la llanta trasera no debe ser menor que 43.8 N/mm del ancho del rodillo. (Ver Figura 23)



**Figura 23:** Compactadores de rodillo metálico.

2. *Compactadores de tres llantas*, equipados con dos llantas en la parte de atrás motrices, cada una de 150 a 180 cm de diámetro por 50 a 60 cm de ancho. La llanta del frente de dirección tiene un menor diámetro pero más ancha longitudinalmente. Los pesos varían entre 8 ton hasta 16 ton. (Ver Figura 24)



**Figura 24:** Compactadores de rodillo metálico de tres llantas.

### c) Compactadores vibratorios

Los compactadores vibratorios están equipados con uno o dos rodillos de acero liso de 90 a 150 cm de diámetro y entre 120 y 240 cm de ancho. La compactación se lleva a cabo por medio de una combinación de peso estático y fuerza dinámica donde la frecuencia y

amplitud de la fuerza se pueden ajustar. La frecuencia y la amplitud están influenciadas por la velocidad del vehículo, se tienen que variar para cada mezcla en particular. En muchos casos, la mejor combinación se determina en las secciones de prueba en el sitio. Estos equipos deben estar equipados con un sistema para humedecer el rodillo y otro para la transmisión hidráulica. (Ver Figura 23)

#### 6.1.4. Otros equipos

Están los equipos de mezclado e inyección de la mezcla en frío para bacheo. Existen distintos modelos. Hay disponibles equipos que se remolcan y otros que van sobre un camión. Además hay maquinaria que deposita la mezcla por medio de la abertura de compuertas, otros utilizan un brazo telescópico para depositar la cantidad exacta de material en el hueco con lo que se minimizan las labores de limpieza del material sobrante. La capacidad del equipo es de 4.5 ton de material mezclado. (Ver Figura 25)

Estos equipos cuentan con un sistema de calentamiento y también con las paredes insoladas para asegurar que la mezcla mantenga su temperatura. En el caso de que se tenga que aplicar un sello antes de la colocación del bache, hay máquinas que tienen un tanque de almacenamiento para la emulsión, que vienen equipadas con una manguera para la distribución y el sistema de bombeo.



**Figura 25:** Equipos para bacheo.

También se necesitan otros equipos dependiendo del tipo de proyecto a realizar, por ejemplo barredoras mecánicas, escarificadores, quebradores, entre otros.

## **6.2. Requerimientos generales para la construcción de mezclas en frío preparadas en sitio**

### **6.2.1. Preparación de la superficie de rodadura**

La superficie en la cual el material mezclado es colocado se debe conformar y compactar. Además, se debe limpiar con una barredora mecánica para eliminar la suciedad y cualquier otro material. Dependiendo de la condición, tipo de base granular o subrasante puede ser necesario utilizar una capa de imprimación del tipo MC-30, MC-70 o MC-250. Cuando esta capa se utiliza, se debe dejar curar y luego de 24 horas cualquier exceso de asfalto en la superficie, se debe limpiar con arena o con otros materiales finos.

Si se obtienen porciones de agregado de la superficie existente, la superficie vieja tiene que ser escarificada y colocada con el espesor mostrado en los planos. El material suelto tiene que ser minuciosamente pulverizado, después todos los fragmentos sobredimensionados se tienen que remover de la mezcla y ser descartados.

Cuando todo el agregado para la mezcla preparada en sitio se trae como material nuevo, la superficie que va a ser cubierta se debe preparar de acuerdo con los requerimientos siguientes:

- a. Los huecos y las depresiones en las superficies granulares se deben reparar, removiendo todo el material suelto y defectuoso. Se tiene que reemplazar con material de bacheo aprobado por el ingeniero. El material de reparación hay que compactarlo para producir una superficie rígida homogénea.
- b. Los huecos y las depresiones en las superficies asfálticas viejas, se reparan removiendo todo el material suelto y defectuoso. Se tapan colocando mezclas de bacheo. La mezcla de bacheo se tiene que compactar para producir una superficie similar y con la misma elevación del pavimento de alrededor.

- c. Las protuberancias, ondas y corrugaciones que afectan las cualidades de confort de la superficie existente, se tienen que remover para producir una superficie lisa e impermeable.
- d. Si se va a utilizar un asfalto de imprimación (MC-30, MC-70 o MC-250), todo el material suelto y extraño se tiene que eliminar barriendo suavemente y si la superficie está cubierta de polvo, se tiene que humedecer con agua. (Ver Figura 26)



**Figura 26:** Aplicación de la capa de imprimación.

- e. El exceso de asfalto en los baches y juntas se tiene que remover sólo a través de métodos probados. Estos excesos además de la totalidad de la superficie de asfalto existente que va a ser tratada, se barren con una barredora rotatoria para remover todo el material suelto. Todas las depresiones que no han sido alcanzadas por la barredora se tienen que barrer manualmente. (Ver Figura 27)



**Figura 27:** Barrido de la superficie.

### 6.2.2. Preparación de camellones

Algunos tipos de construcción de mezclas en frío, requieren que el agregado se coloque en la superficie tipo camellón antes del mezclado y colocación. Si se van a utilizar este tipo de camellones, la superficie tiene que estar limpia de toda vegetación en el ancho suficiente para acomodar el camellón y mientras la mezcla cura: el tránsito.

Debido a que el espesor de la nueva capa es directamente proporcional a la cantidad de agregado del camellón, es necesario realizar una medición precisa y control del volumen de material del camellón. (Ver Figura 28)

Usualmente, no hay suficiente material suelto en la superficie de la carretera para utilizar en la mezcla, en este caso, es mejor combinar el material suelto en el espaldón, que realizar distintas maniobras para mezclar los materiales existentes con el nuevo material.

Algunas veces, se considera práctico incorporar al material existente (si es uniforme y suficiente) otro material para que cumpla con los requisitos de granulometría. Cuando esto se hace, el agregado suelto se debe mezclar y colocar en camellón para medir el volumen, esto con el fin de determinar si es suficiente o hay que añadir más material para alcanzar el volumen necesario.



**Figura 28:** Camellón de agregado antes del mezclado.

Es necesario cuantificar la cantidad de agregado en el camellón antes de la aplicación del asfalto.

Las cantidades se determinan a través de una fórmula, que toma como base la Figura 29 donde se modela un camellón.

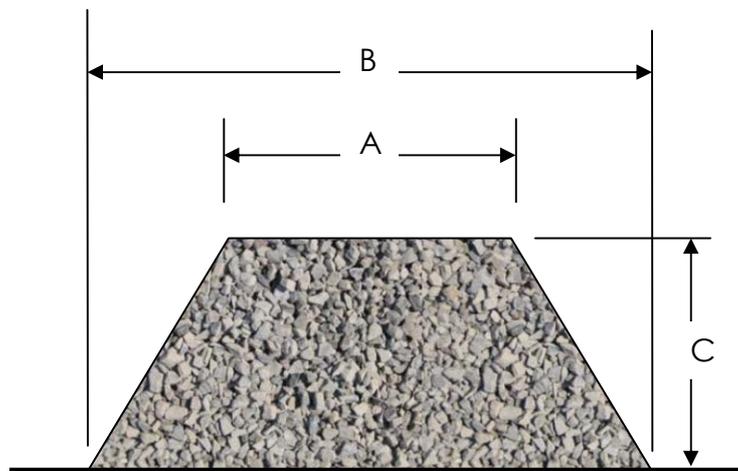
La fórmula para determinar el volumen es

$$V = \frac{(A+B) \times C}{2}$$

donde

V = volumen del camellón, m<sup>2</sup>/m lineal

A, B, C = dimensiones del camellón, m



**Figura 29:** Estándar de camellón.

Por otro lado la fórmula para determinar la cantidad de agregado por metro lineal es

$$W_{\text{agreg}} = W_{\text{suelto}} \times V$$

donde

$W_{\text{agreg}}$  = cantidad de agregado en kg por metro lineal de camellón

$W_{\text{suelto}}$  = densidad suelta de agregado seco, kg/m<sup>3</sup>

Por ejemplo, cuánto agregado se necesita para un camellón de agregado seco con las siguientes dimensiones: 0.5 m de alto (C), de 0.5 m de ancho en la parte superior (A) y de 1.0 m de ancho en la base (B), tiene una densidad suelta de 1500 kg/m<sup>3</sup>.

$$V = \frac{(A+B) \times C}{2}$$

$$V = \frac{(0.5+1.0) \times 0.5}{2}$$

$$V = 0.375 \text{ m}^2/\text{m lineal}$$

Ahora se sustituye el volumen en la siguiente ecuación

$$W_{\text{agreg}} = W_{\text{suelto}} \times V$$

$$W_{\text{agreg}} = 1500 \times 0.375$$

$$W_{\text{agreg}} = 562.5 \text{ kg/m lineal}$$

### 6.2.3. Consideraciones generales sobre los materiales componentes

#### a) Agregado mineral

El agregado mineral para capa base será piedra triturada, grava triturada o sin triturar, escoria, arena, piedra tamizada, polvo mineral o una combinación de cualquiera de esos materiales conociendo las graduaciones y requerimientos de calidad. Cuando el agregado mineral consiste en material del sitio, para la sub-base todas las rocas o grumos de material iguales o más grandes que 63 mm tienen que ser removidos y descartados.

El agregado mineral para la capa superficial tiene que cumplir con la granulometría y requerimientos de calidad que se expusieron en la Tabla 14.

## b) Ligante asfáltico

El ligante asfáltico se puede aplicar ya sea con un distribuir antes del mezclado o dentro del tambor de mezclado en las plantas móviles durante el proceso de mezclado. En cualquier caso, es necesario un control de la tasa de aplicación y de la viscosidad para un mezclado apropiado del agregado y el ligante.

Es muy importante que el ligante asfáltico tenga la viscosidad apropiada, para que fluya fácilmente a través de las boquillas del aspersor y que además recubra adecuadamente las partículas de agregado. Los asfaltos rebajados, de por sí ya fluidos, necesitan un poco de calentamiento para llevarlos a la viscosidad apropiada para su dosificación, la cual es entre 0.20 y 1.20 Poises. Pero a menos que el mezclado comience inmediatamente, la viscosidad comienza a aumentar y se tienen que realizar entonces modificaciones para obtener un rango de viscosidad de 1.5 a 3.0 Poises. Los volátiles del asfalto rebajado lo mantienen suficientemente fluido para completar el mezclado. La temperatura del agregado debe ser al menos 10 °C en la sombra al tiempo del mezclado.

A continuación se presenta en la Tabla 23 un resumen de las temperaturas para una adecuada aspersión y mezclado de la emulsión asfáltica y del asfalto rebajado.

**Tabla 23.** Temperaturas típicas para la fabricación de mezclas en frío.

Tipo y Grado	Temperatura del ligante cuando se mezcla en planta (°C)	Temperatura del ligante en camellones antes del mezclado (°C)
<i>Emulsión asfáltica Aniónica</i>		
MS-1, MS-2, MS-2h	10 – 70 <sup>1</sup>	20 – 70
SS-1, SS-1h		
HFMS-2, HFMS-2h, HFMS-2s		
<i>Emulsión asfáltica Catiónica</i>		
CMS-2, CMS-2h	10 – 70 <sup>1</sup>	20 – 70
CSS-1, CSS-1h		
<i>Asfalto rebajado<sup>2</sup></i>		
MC, SC		
70	-	Min 20 <sup>4</sup>
250	55 – 80 <sup>3</sup>	Min 40 <sup>4</sup>
800	75 – 100 <sup>3</sup>	Min 55 <sup>4</sup>
3000	80 – 155 <sup>3</sup>	-

<sup>1</sup> Temperatura de la emulsión en la máquina mezcladora.

<sup>2</sup> Temperatura de aplicación puede en algunos casos estar sobre el punto de inflamación del material. Se debe tener cuidado entonces de que ocurra un incendio o explosión.

<sup>3</sup> Temperatura de la mezcla inmediatamente después de mezclada en lugar de la temperatura del ligante.

<sup>4</sup> La máxima temperatura debe estar debajo del punto al cual comienza la evaporación.

Tomada del manual MS-14 Tabla II-2

Las *emulsiones asfálticas* dependen de la evaporación del agua para alcanzar el curado y sus características de adhesión. El desplazamiento del agua puede ser ciertamente rápido bajo condiciones climáticas favorables, por el contrario, la humedad alta, temperatura baja o lluvia luego de la aplicación pueden impedir el curado apropiado. Aún así, las condiciones atmosféricas son menos críticas para emulsiones catiónicas que para las emulsiones aniónicas.

La anticipación de las condiciones climáticas durante la construcción es muy importante cuando se utilizan las emulsiones asfálticas. La regla general es seleccionar el equipo que permita una construcción rápida. Es preferible utilizar plantas de mezclado centrales o plantas móviles, pues se pueden alcanzar grandes tasas de producción durante un buen clima y el proyecto se puede detener cuando el clima es adverso. El mezclado en sitio con cuchilla es menos favorable de utilizar pues quedan grandes áreas expuestas durante el mezclado.

La lluvia puede aumentar el contenido óptimo de agua, produciendo que se tenga que airear el material. Por otro lado, la facilidad de una planta central depende de la economía en los acarrees.

Cuando se utilizan emulsiones del tipo MS o SS para mezclas en frío, el uso del agregado ligeramente húmedo facilita los procesos de mezclado y recubrimiento. El aumento en la rigidez del material en los materiales tipo SS depende principalmente de la deshidratación y absorción, cuando el agua se ha evaporado una vez que la emulsión ha roto. Cuando se utilizan las emulsiones de tipo CMS o CSS se requiere que el agregado esté cerca o en el punto de humedad óptima para poder obtener un buen mezclado y recubrimiento.

En el caso de que se estén aplicando varias capas sucesivas, la siguiente capa no se debe colocar hasta que el agua se haya evaporado totalmente de la capa anterior.

Con respecto a los *asfaltos rebajados*, la cantidad de asfalto aplicado, tipo y grado, así como la humedad, el viento, la cantidad de lluvia y el rango de la temperatura ambiente de la región afectan las tasas de curado durante la aplicación. La tasa de curado y el

endurecimiento del asfalto se ven afectados no solo por las condiciones climáticas sino también por la temperatura de mezclado.

Generalmente, en los asfaltos rebajados si el solvente es liviano se evaporará más rápido, pero si es pesado le tomará más tiempo para curar. Adicionalmente, si la temperatura es muy baja y hay mucha humedad, la tasa de evaporación del solvente se vuelve más lenta.

#### **6.2.4. Determinación de la tasa de aplicación del asfalto**

Antes de que la operación de mezclado comience, se debe calcular la tasa de aplicación correcta y la velocidad de aspersion en el equipo de mezclado o en el camión distribuidor basada en la cantidad de agregado del camellón. Además, cuando se utiliza emulsión asfáltica, si se necesita prehumedecer el agregado, se tiene que calcular la tasa de aplicación del agua y la velocidad del distribuidor.

Las siguientes ecuaciones se pueden utilizar para calcular la tasa de aplicación del asfalto en litros por metro lineal del camellón y la velocidad de avance requerida del mezclador o distribuidor en metros por minuto. Estas mismas fórmulas se pueden utilizar para calcular la tasa de aplicación del agua y la velocidad de avance del distribuidor.

La tasa de aplicación del asfalto a lo largo del camellón se calcula con la siguiente ecuación:

$$A = \frac{W_{\text{agreg}} \times P}{100 \times G}$$

donde:

A = tasa de aplicación del asfalto en litros por metro lineal

$W_{\text{agreg}}$  = cantidad de agregado en kg por metro lineal

P = contenido de asfalto, en porcentaje por peso de agregado seco, determinado en el diseño.

G = peso del asfalto, aproximadamente 1 kg/l

Por ejemplo, si el peso de agregado es 562.5 kg/m lineal de camellón y se le va a añadir un ligante de tipo MC-250 con un contenido de 4% por peso de agregado seco, la tasa de aplicación del asfalto sería

$$A = \frac{562.5 \times 4}{100 \times 1}$$

$$A = 22.5 \text{ litros por metro lineal}$$

Es importante tomar en cuenta que si la aplicación del asfalto se hace en una o varias pasadas, se tiene que dividir el cálculo anterior entre el número de pasadas.

Para determinar la velocidad de avance del distribuidor se utiliza la siguiente ecuación:

$$S = \frac{D_p}{A_b}$$

donde

S = velocidad de avance del mezclador o distribuidor en m/min

$D_p$  = descarga de la bomba en litros/min

$A_b$  = la tasa de aplicación del ligante, en litros/m

Siguiendo con los ejemplos anteriores, para calcular la velocidad de avance del mezclador, aplicando la mitad del asfalto en cada dos pasadas del mezclador.

Se calcula la tasa de aplicación por pasada,

$$\text{Tasa por pasada} = \frac{22.5}{2} = 11.25 \text{ litros por metro}$$

Luego, la velocidad de avance del mezclador, asumiendo una tasa de descarga de la bomba constante de 100 l/min es

$$S = \frac{100}{11.25} = 8.9 \text{ m/min}$$

### 6.2.5. Mezclado

Las *mezcladoras rotatorias* equipadas con un dispositivo para la dosificación del ligante, requieren que la tasa de aplicación del asfalto se ajuste precisamente con el ancho y el espesor de la capa, también con la velocidad de avance y la densidad del agregado que está colocado en el sitio. Sin embargo, cuando la mezcladora no posee este dispositivo, un distribuidor de asfalto puede aplicar el asfalto al agregado justo delante de la mezcladora. Una combinación de aplicaciones de asfalto y pasadas del mezclador se requiere para alcanzar la mezcla especificada.

La mayoría de las mezcladoras rotatorias están equipadas con el dispositivo de dosificación de asfalto. Cuando se utiliza este tipo de mezcladoras es recomendable:

- a. Esparcir el agregado en una sección transversal uniforme con la moto niveladora.
- b. Mezclar completamente el agregado con una o dos pasadas del mezclador. (Al tiempo de la aplicación del asfalto el contenido de humedad de los agregados no debe exceder un 3% para asfaltos rebajados, a menos que las pruebas de laboratorio demuestren que este contenido de humedad no es problemático)
- c. Incrementar el asfalto, añadiendo 2.25 litros/m<sup>2</sup> hasta que la cantidad total de asfalto requerido es alcanzado y mezclado. Un total de 0.7 a 1.1 litros/m<sup>2</sup> por 10 mm de espesor compactado es usualmente lo necesario. Si el mezclador no está equipado con las barras de aspersion el asfalto es usualmente aplicado con el distribuidor de asfalto.
- d. Realizar una o más pasadas del mezclador entre aplicaciones de asfalto, las necesarias para asegurar un mezclado completo. El material mezclado se debe colocar de nuevo en camellón o esparcido sobre el carril con un espesor uniforme para realizar la segunda aplicación de asfalto.
- e. Mantener la superficie lisa y la sección transversal utilizando la moto niveladora durante el proceso de mezclado.
- f. Airear la mezcla con una manipulación adicional, si es necesario.

Cuando se utiliza *mezclado con cuchilla*, el material ya sea nuevo o reciclado del mismo sitio se tiene que conformar en el camellón. El camellón se aplanar con la cuchilla al tamaño del ancho de la barra de aspersion del distribuidor de asfalto. El asfalto se aplica en pasadas

sucesivas sobre el material aplanado, con el cuidado de que cada pasada no exceda 3.5 litros/m<sup>2</sup>.

Luego de cada pasada del distribuidor de asfalto, la mezcla es removida hacia delante y atrás, a lo largo de la superficie con la cuchilla, algunas veces ayudado con equipo auxiliar de mezclado. Antes de la siguiente aplicación de asfalto, la mezcla se reconfirma en el camellón aplanado.

El material del camellón es sometido a varios procesos de mezclado, distribución, reconfirmación y aplanado las veces que sea necesario para asegurar que las partículas de agregado queden recubiertas con asfalto.

Durante el mezclado, el ángulo vertical de la cuchilla puede ajustarse repetidamente hasta lograr una acción de mezclado del camellón lo más completa posible. Esto con el propósito de asegurar que se acarrea suficiente material frente a la cuchilla pues el peso del agregado facilita la operación de mezclado.

Adicionalmente, se tiene que tener cuidado durante el mezclado para que no se añada material extraño con la cuchilla y se incorpore al camellón además se debe evitar dejar material del camellón fuera del borde de la cuchilla o dejado en la superficie sin mezclar.

Algunas veces, cuando se utilizan asfaltos rebajados, la formación de “grumos aceitosos”, que son aglomeraciones de material fino saturados con una excesiva cantidad de asfalto, dificulta el trabajo de distribución y compactación. Esta condición se puede corregir, conformando la mezcla en un camellón más cerrado y dejarlo que cure durante varios días.

Luego de que el mezclado y aireación se hayan completado, el camellón es movido a un lado del camino para prepararlo y distribuirlo en el carril. Si se va dejar durante cierto tiempo, se tienen que realizar aberturas en el camellón para asegurar un buen drenaje de la lluvia de la superficie a pavimentar.

Al utilizar *plantas móviles de mezclado*, existe la ventaja de que se puede realizar un mayor control de la operación de mezclado que cuando se utiliza el mezclado con cuchilla.

La planta con tolva opera mezclando el asfalto con el agregado en el tambor mezclador, y deposita la mezcla directamente en el camión, que a su vez deposita la mezcla en la tolva de la planta que esparce la mezcla en la superficie (Figura 30). Cuando se utiliza mezcla de granulometría abierta se tiene que asegurar que hubo suficiente evaporación de los diluyentes de la mezcla antes de compactarla.



**Figura 30:** Mezcla colocada en el carril en camellón.

#### **6.2.6. Aireación**

Antes de la compactación, todos los diluyentes que han hecho que la mezcla en frío sea trabajable se tienen que dejar evaporar. En la mayoría de los casos, esto ocurre durante el mezclado y la colocación, por lo que se requiere muy poco tiempo para la aireación. Pero en ocasiones se requiere una manipulación adicional para ayudar a acelerar el proceso de disipación del exceso de diluyentes. Hasta que la mezcla esté suficientemente aireada, soportará los compactadores sin presentar desplazamientos laterales. Generalmente, la mezcla está suficientemente aireada cuando se vuelve “pegajosa” y aparenta que se “arrastra”.

Muchos factores afectan la tasa y el tiempo requerido para la aireación. Mezclas finas o densas requieren más tiempo de aireación que las mezclas abiertas y de agregado grueso bajo las mismas condiciones. Además, si se estabiliza la base y a esta se le va a colocar una capa de rudo en un poco tiempo, la aireación antes de la compactación debe ser completa pues la sobrecapa actúa como sello y retardaría la remoción de los diluyentes.

Para las *emulsiones asfálticas*, la experiencia indica que la compactación debe comenzar inmediatamente antes, o al mismo tiempo, cuando la emulsión comienza a romper (Indicado cuando un cambio de color marcado se da, de café a negro). Cerca de este tiempo el contenido de humedad en la mezcla es suficiente para actuar como lubricante entre las partículas de agregado, pero se reduce al punto donde ya no se pueden llenar los vacíos, por lo que permite su reducción bajo la acción de las fuerzas de compactación. También, en este momento, la mezcla debe soportar al compactador sin que sufra desplazamientos.

Cuando se utilizan *asfaltos rebajados*, la aireación se tiene que alcanzar cuando la cantidad de volátiles se reduce a cerca de un 50% del contenido original del material asfáltico y el contenido de humedad es menor que 3% por peso total de mezcla.

#### **6.2.7. Colocación y compactación**

Una vez que se ha terminado el mezclado y la aireación sigue la colocación y la compactación de la mezcla en frío. El objetivo de realizar estas dos operaciones es alcanzar la sección final y el acabado de la superficie de acuerdo con las especificaciones.

La mezcla se tiene que colocar uniformemente (ya sea una sola pasada o en varias pasadas de capas delgadas) de tal manera que no queden puntos de menor espesor en la superficie terminada.

La colocación se tiene que realizar en capas sucesivas, evitando reducir el espesor, las capas pueden ser del tamaño de 2 veces el tamaño máximo de las partículas de agregado, generalmente no más de 76 mm. Una vez que se ha colocado la capa, la compactación debe seguir inmediatamente con un compactador de llantas de hule. Para comprobar el espesor de la capa se pueden realizar pequeños orificios, en las áreas en las que hay deficiencia del material por más de 13 mm, se tiene que volver a reconformar la capa con la adición de material para aumentar el espesor de la capa y para lograr lo especificado.

Cuando se utiliza la moto niveladora, hay una tendencia de que las llantas compacten la mezcla recién esparcida. Las marcas pueden aparecer como crestas en la superficie terminada a menos que se realice una adecuada compactación entre cada capa

esparcida. El compactador debe ir detrás de la moto niveladora para eliminar las marcas de las llantas de este equipo (Figura 31).



**Figura 31:** Compactación.

Si en cualquier momento de la compactación, la mezcla exhibe deformación permanente o desplazamiento, el proceso de compactado se tiene que detener. La compactación no se tiene que realizar hasta que se haya producido suficiente reducción en el contenido de humedad o en el contenido de diluyentes ya sea naturalmente o por medio de aireación.

Luego de que se ha colocado una capa y esta ha curado suficientemente se pueden colocar otras capas. Esta operación se tiene que repetir hasta alcanzar la sección transversal apropiada. Para obtener una superficie con un buen acabado se puede utilizar una moto niveladora para "cortar" y nivelar mientras los compactadores terminan la última capa.

Luego de que la capa se ha conformado hasta la sección transversal requerida, se tiene que dar el acabado con un compactador de rodillo de acero para eliminar las marcas del compactador de llantas de hule (Figura 31).

Algunas veces, se tiene que abrir el tránsito temporalmente, en estos casos, para evitar que los vehículos desprendan material de la superficie, esta se tienen que sellar por medio de una un tratamiento preventivo como un sello de niebla o un sello de arena.

### **6.3. Equipo para mezclado en planta**

Es similar al método de mezclado en sitio, algunos equipos pueden ser utilizados para ambos métodos.

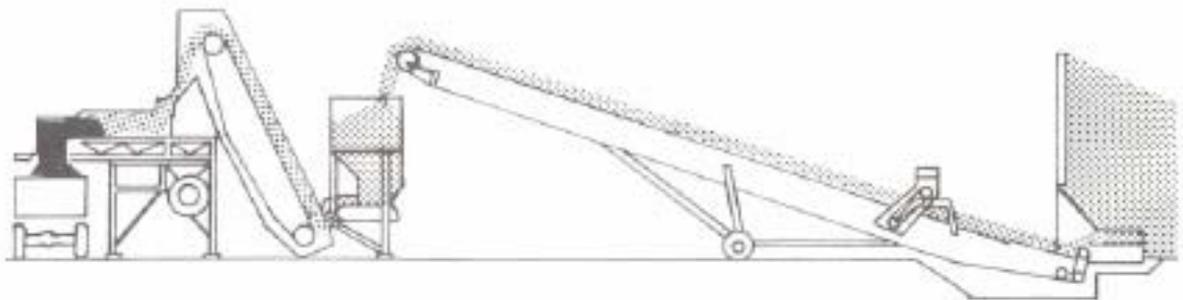
#### **6.3.1. Plantas estacionarias**

Las plantas de mezclado estacionarias generalmente se ubican lejos del sitio de construcción y cerca de las fuentes de agregados. Una planta estacionaria consiste en un mezclador y un equipo para calentar el asfalto rebajado (si es necesario) y para dosificar el asfalto, agregado y aditivos en el mezclador. Es muy similar en varios aspectos a las plantas de mezclas calientes excepto que no tiene dispositivos para el secado. Como las plantas de mezclas calientes, una planta estacionaria de mezcla asfáltica fría puede ser de bache (Ver Figura 32) o de tipo continuo que son las más comunes (Ver Figura 33).

Se puede emplear cualquier tipo de planta que pueda producir mezcla de acuerdo con las especificaciones, pero como un mínimo debe estar equipada con dispositivos medidores de temperatura para garantizar el control del ligante asfáltico que se esta aplicando y alimentadores controlados que permitan dosificar las cantidades adecuadas de agregados y aditivos. Aunque no siempre sea un componente primario de las plantas, un silo de almacenamiento permite una operación de mezclado más continua, lo cual resulta en una mejor uniformidad en la mezcla.



**Figura 32:** Planta de bache de mezcla en frío.



**Figura 33:** Planta continua de mezcla en frío.

### 6.3.2. Camiones transportadores:

Una gran variedad de camiones transportadores son utilizados para producir mezcla asfáltica en frío; el tipo seleccionado depende del equipo utilizado para extender la mezcla. Las vagonetas comunes pueden ser utilizadas junto con la pavimentadora. Los camiones de descarga inferior dejan surcos en el pavimento por lo tanto no se utilizan con las pavimentadoras, solo se utilizan para transferir pequeñas cantidades de mezclas a los cargadores. Los camiones de descarga horizontal depositan la mezcla directamente dentro de los cargadores de la pavimentadora sin tener que mover o levantar el piso del contenedor. Estos camiones pueden ser utilizados con las cajas para colocar el camellón. Se deben garantizar un número suficiente de camiones limpios y con las superficies internas lisas para poder asegurar un proceso de pavimentación de calidad. (Ver Figura 34)



**Figura 34:** Distintos tipos de camiones transportadores

### 6.3.3. Moto niveladoras

Ya fueron expuestas en la sección 6.1.1. b.

### 6.3.4. Pavimentadoras

Si las condiciones climáticas y la graduación de los agregados permiten la evaporación de la humedad o de los volátiles de la mezcla, sin la aireación por manipulación, una pavimentadora asfáltica autopropulsada puede ser empleada para colocar la mezcla asfáltica en frío. Se puede usar una pavimentadora que abarque ambos carriles si la planta produce suficiente mezcla para mantener a la pavimentadora moviéndose sin detenerse.

### 6.3.5. Equipo para extender la mezcla

Los tipos Jersey y los de remolque son los más comúnmente utilizados. El tipo Jersey posee una tolva con una rueda frontal (front-wheeled hopper) que está anexada en el frente del rastrillo o tractor de llantas de hule. La mezcla asfáltica es depositada dentro de la tolva y cae directamente sobre la carretera donde es extendida y acomodada en un espesor controlado. Para que la mezcla sea extendida en un espesor determinado, el equipo debe ser conducido en bloques o en tablero. (Ver Figura 35)

El tipo grúa se une a la parte trasera del camión guía. La mezcla asfáltica fría es depositada en la tolva y cae directamente sobre la superficie que está siendo pavimentada. Como el camión guía se mueve hacia delante, la mezcla es enrasada con una barra cortadora, una cuchilla o con guías tipo codal.

El equipo para extender la mezcla, debe ser guiado a una velocidad uniforme ya que variaciones en la velocidad pueden ocasionar diferentes espesores. También si se realizan paradas frecuentemente pueden ocasionar asentamientos de la mezcla los cuales dan como resultado abultamientos (sistemáticos – cada vez que se detiene el aparato-) en el pavimento.



**Figura 35:** Equipo para extendido de la mezcla.

### 6.3.6. Equipo para extender la mezcla

En la sección 6.1.3 se discute sobre el equipo de compactación.

## **6.4. Requerimientos para la construcción de mezclas en frío preparadas en planta**

### **6.4.1. Preparación de la mezcla**

En las plantas tipo bache, generalmente se utilizan mezcladores de doble paleta. Típicamente estas plantas tienen una capacidad mayor a 907 kg (2000 lb). La proporción correcta de asfalto y agregado, generalmente se determina por peso, luego se mezcla y se coloca en un camión antes de que se comience a producir la próxima mezcla.

En las plantas continuas, los dispositivos que proveen el asfalto, el agregado y el agua se coordinan automáticamente, manteniendo las proporciones correctas. Generalmente los alimentadores automáticos miden y dictan el flujo del agregado de acuerdo con la salida de los reguladores del asfalto. Un arreglo de boquillas distribuye el asfalto sobre los agregados. Al mismo tiempo que se mezclan los componentes y atraviesan el mezclador, el material completamente mezclado, listo para su colocación se descarga para transportarlo hasta el sitio del proyecto. (Ver Figura 36).

Un aspecto que se suele mal interpretar, cuando las mezclas de asfalto emulsificado se realizan en planta, es el tiempo de mezclado. Las mezclas con emulsión usualmente requieren menos tiempo de mezclado que las mezclas asfálticas en caliente. El efecto que tiene este error es la pérdida de emulsión del agregado grueso, y el bombeo o separación del agregado fino. Esto también puede provocar un rompimiento prematuro de la mezcla causando el endurecimiento de la mezcla colocada.

Un problema menos común es la falta de recubrimiento del agregado, causado por mezclar menos de lo necesario. Los tiempos de mezclado se pueden cambiar, en una planta de mezcla continua variando el arreglo de las paletas, la altura de la compuerta, o cambiando la ubicación del rociador del asfalto. Con una planta de tambor mezclador el tiempo de mezclado es controlado variando la pendiente del tambor o cambiando la localización del canal de entrada del asfalto dentro del tambor.

Se debe notar que con las emulsiones asfálticas, a pesar de los métodos de mezclado, no siempre se logra recubrir totalmente las partículas del agregado. Un recubrimiento adicional ocurrirá cuando la mezcla sea manipulada cuando se extiende y se coloca ("compacta").

Algunos tipos de agregados son difíciles de recubrir apropiadamente, pero esto se debe evidenciar en la etapa de diseño de mezcla. Los procedimientos de mezclado deben lograr una dispersión uniforme de la emulsión, con un recubrimiento completo de la fracción fina de los agregados.



**Figura 36:** Mezcla en frío siendo cargada al camión transportador.

#### **6.4.2. Aireación de la mezcla preparada en planta**

Las mezclas que requieren aireación son generalmente colocadas sobre la carretera en montículos en forma de hileras, y luego son extendidas desde ahí. La mezcla es extendida con la moto niveladora y aireada con su paleta frontal que empuja la mezcla hacia delante y hacia atrás o es aireada con un tornillo sin fin del equipo de mezclado.

#### **6.4.3. Colocación y compactación**

Si la humedad del mezclado puede ser controlada exactamente, de modo que no necesite aireación, o si las condiciones climáticas y la graduación del agregado permite la evaporación de la humedad sin aireación por manipulación, se puede emplear una pavimentadora auto propulsada común para colocar la mezcla asfáltica en frío.

El éxito de la colocación utilizando pavimentadoras comunes requiere la presencia de suficientes fluidos ya que las mezclas secas tienden a separarse debajo del codal o barra de corte. Si la mezcla está muy seca el contenido de agua de la mezcla se puede incrementar. Cuando se utiliza una pavimentadora autopropulsada grande (para autopistas), calentar el codal o barra de corte con el fin eliminar esta separación no es aconsejable pues esto no resulta. Realmente esto lo que hace es volver las mezclas menos trabajables pues se acelera el proceso de secado.

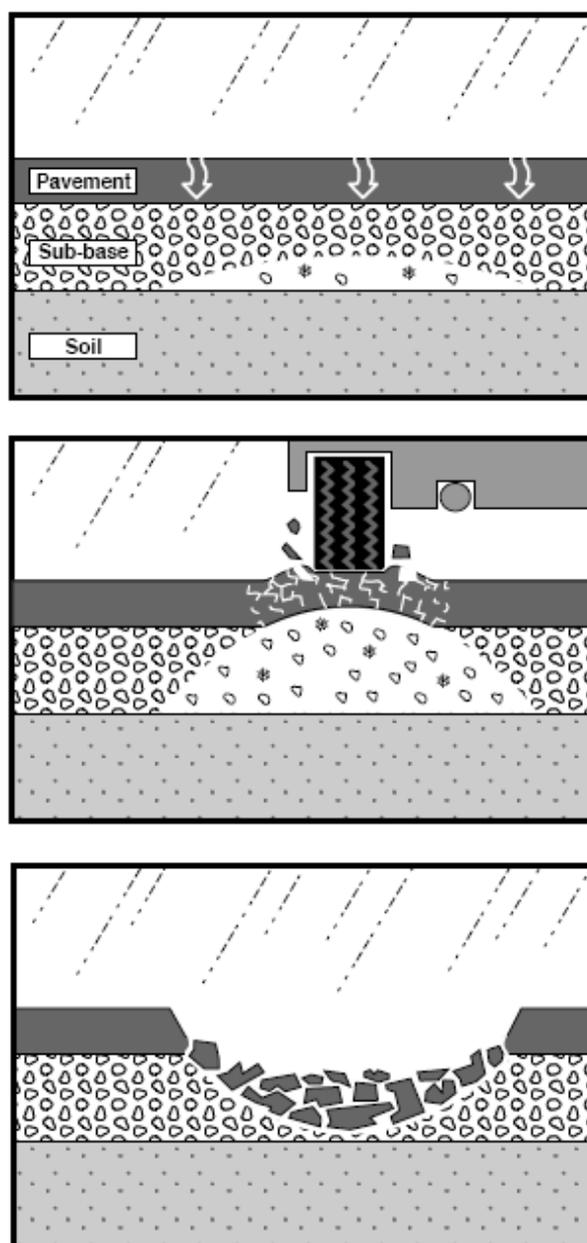
La mezcla puede ser extendida uniformemente en la carretera, iniciando desde el punto más lejano a la planta. No se debe permitir transportar sobre material fresco recién colocado, excepto cuando se requiera para completar el trabajo. Una ligera capa de agregado uniformemente distribuido se puede colocar para prevenir que la mezcla se levante por el tráfico normal de construcción o durante el proceso de post compactación. El agregado puede ser grueso o arena seca de menos de 2 mm (Nº 10).

Similar a las mezclas producidas en sitio, las mezclas de plantas centrales de mezclado ganan estabilidad cuando se evapora la humedad o los diluyentes, que eran necesarios para que la mezcla fuera trabajable. Es importante no dificultar este proceso. El factor más importante que afecta la pérdida de humedad o diluyentes es el tipo de asfalto, el contenido de humedad o diluyente, la graduación, la temperatura del agregado, la velocidad del viento y la temperatura y humedad ambiente. Debido a estas variables, la experiencia que se haya tenido en los sitios cercanos al proyecto en ejecución, es la mejor guía para determinar los espesores necesarios a colocar.

La compactación se realiza de igual manera como se describe en la sección 6.2.7.

### **6.5. Reparación de baches**

Los huecos se forman cuando queda agua atrapada debajo de la superficie del pavimento. El agua puede introducirse a través de las grietas de la superficie o por los lados del camino. Cada vez que pasa un automóvil sobre el pavimento, la capa superficial comienza a colapsar pues no tiene soporte, finalmente el hueco se expande cada vez que el tránsito pasa sobre él. (Ver Figura 37)



**Figura 37:** Formación de los huecos.

En el verano, se pueden realizar actividades preventivas como el sellado de grietas y el mejoramiento de los drenajes, pero en el invierno la única alternativa es la reparación de los huecos. Los agregados para el bacheo tienen que ser de alta calidad, quebrados y con pocos finos. El ligante puede ser una emulsión asfáltica con un aditivo de antidesnudamiento para minimizar que la capa de asfalto deje de recubrir el agregado. La mezcla tiene que ser trabajable a bajas temperaturas que facilite el manejo y la compactación.

La reparación de huecos recibe mucha atención por parte del público y existe gran variedad de procedimientos para cerrarlos desde reparaciones de emergencia, que son temporales, así como reparaciones permanentes de gran profundidad. Los huecos son el resultado de una falla del pavimento y por esto, cualquier reparación se tiene que considerar **temporal** hasta que la verdadera causa sea determinada y corregida.

A pesar de que las reparaciones con mezcla asfáltica en caliente duran más tiempo, existe la limitante que se tiene que mantener la temperatura de la mezcla durante la operación de bacheo, por lo que es aconsejable utilizar mezcla en frío pues es menos costosa, fácil de utilizar y se puede apilar.

Las reparaciones se pueden realizar durante las siguientes condiciones climáticas, desde días claros hasta días en que hay tormentas, con temperaturas desde -10 °C hasta 40 °C. Estas se pueden realizar de tipo emergencia bajo condiciones más severas o como un mantenimiento rutinario programado. Las agencias han utilizado con éxito tres métodos para el bacheo:

1. Colocar y compactar (throw-and-roll)
2. Semipermanente; e
3. Inyección a presión

La escogencia del método depende de cuanto presupuesto disponga la agencia, la disponibilidad del equipo y la productividad.

#### **6.5.1. Colocar y compactar (throw-and-roll)**

Este procedimiento consiste en colocar la mezcla en el hueco que podría estar lleno de agua y escombros, se debe utilizar cualquier tipo de herramienta manual tal como una pala para llenar el hueco. El hueco se tiene que llenar con una corona en el centro.

El material se compacta pasando por el unas 6 u 8 veces con la llanta de un camión. Algunas veces se ha utilizado arena para cubrir el bache antes de que se compacte para evitar que el material se pegue a las llantas (Figura 38).



**Figura 38:** Técnica colocar y compactar.

Se tiene que verificar el bache para asegurarse que el centro del bache está entre 6.35 mm a 12.7 mm sobre la superficie del pavimento. Si el nivel está por debajo de este rango se añade más mezcla en frío y se repiten las pasadas del camión. Este método es más recomendable que los métodos de llenar solamente el hueco sin compactarlo, pues la compactación provee un bache con mayor consistencia para el paso del tránsito, sin causar depresiones y provee un mejor drenaje del agua.

A pesar de que parece que la técnica semi-permanente puede producir un bacheo de mayor calidad que la técnica de colocar y compactar, el estudio realizado por el programa de monitoreo a largo plazo del desempeño de los pavimentos (1988, LTPP de FHWA) encontró que esta técnica probó ser tan efectiva como el procedimiento semi-permanente

para los materiales con los cuales ambas técnicas fueron comparadas. Como la técnica semi-permanente es más laboriosa, la técnica de colocar y compactar generalmente es más costo-efectiva cuando se utilizan materiales de buena calidad.

### **6.5.2. Semi-permanente**

El método semipermanente es el más recomendable para realizar. Primero hay que quitar el agua y los escombros del hueco (Figura 39a.), utilizando una escoba, pala, aire comprimido, lo que esté disponible. Se tienen que tratar los bordes y hacerlos lo más rectos y verticales posible (Figura 39b.), esto se puede hacer utilizando un taladro, cortadora o un molino.

Se aplica un sello en el fondo y las orillas del hueco (Figura 39b.). Se coloca la mezcla utilizando una pala y rastrillo (Figura 39c. y d.). El colocado se tiene que hacer en capas de no más de 76 mm. Se compacta el bache desde el centro hacia los bordes para que haya una mejor compactación hacia los bordes y esquinas (Figura 39e.). La compactación se puede lograr con un plato vibratorio o un solo rodillo vibratorio. Este método de reparación requiere más equipo y trabajadores que las técnicas de colocación-compactación e inyección a presión. Finalmente, se sellan las orillas del bache (Figura 39f.).



a. Hueco a reparar



b. Corte de la orillas y sellado



c. Colocación de la mezcla



d. Distribución de la mezcla



e. Compactación del bache



f. Sellado de las orillas del bache

**Figura 39:** Técnica semipermanente.

### 6.5.3. Inyección a presión

Este método es muy rápido, provee buenos resultados en el sentido de la durabilidad. Sin embargo, se requiere que los operadores tengan buena pericia para obtener un buen bacheo, y una de las limitantes es que el equipo es más costoso que los dos métodos mencionados anteriormente. El procedimiento consiste en los siguientes pasos.

Limpiar el hueco para quitar el agua y los escombros. Se rocía un sello de ligante a los lados y el fondo del hueco. Se inyecta la mezcla dentro del hueco, la compactación es provista

por medio de la velocidad de inyección. Finalmente el bache se cubre con una capa de agregado para evitar que el tránsito levante el material de bacheo (Figura 40).



**Figura 40:** Técnica de inyección a presión.

## 6.6. Clima

El asfalto no puede ser aplicado al agregado cuando la temperatura del aire en la sombra es menor que 10 °C (50° F). El trabajo se tiene que suspender durante la lluvia o después de la lluvia hasta que la mezcla de agregado se seque suficientemente, ya sea naturalmente o por aireación.

## 6.7. Control de tránsito

El tránsito se tiene que dirigir a través del proyecto con las señales de prevención apropiadas, hombres con bandera y camiones piloto, o carros de manera que se provea la máxima seguridad para los trabajadores y el tránsito, y se den las menores interrupciones al trabajo.

El tránsito se tiene que mantener alejado de las superficies recién rociadas con asfalto o materiales mezclados.

Si es necesario abrir al tránsito durante el trabajo, la velocidad se tiene que restringir a 40 km/h o menos, hasta que la compactación se complete y la mezcla asfáltica esté suficientemente firme para que el tránsito tome la velocidad normal.

## **CAPÍTULO 7 CARACTERÍSTICAS DE LOS PROYECTOS EN LOS CUALES ESTA TÉCNICA SE HA APLICADO EN OTROS PAÍSES**

Todas las partes que conforman el pavimento contribuyen al desempeño efectivo del mismo. Una cuidadosa conformación y compactación de la superficie es el paso primordial para construir una estructura de pavimento de buenas características.

Una parte muy importante de este proceso requiere que se detecten y reparen o reemplacen las áreas inestables, con material sólido de igual calidad al resto del camino.

Las sobrecapas, huecos y depresiones en las superficies granulares o asfálticas se deben reparar por medio de bacheo; las protuberancias, ondas y corrugaciones se deben eliminar, y el exceso de asfalto en las grietas y baches se debe remover, para este tipo de reparación se utilizan las mezclas denominadas de mantenimiento de uso inmediato o de apilamiento.

Es necesario diseñar y construir de manera apropiada los sistemas de drenaje, para minimizar la infiltración de agua dentro de la estructura del pavimento. Ocasionalmente, drenajes superficiales se necesitan en ciertos lugares para asegurar una remoción continua del agua de los elementos estructurales del pavimento.

En general las mezclas asfálticas en frío son muy utilizadas en Europa, a continuación se presenta la Tabla 24 que resume las toneladas anuales de mezcla en frío utilizada por cada país, como referencia se presentan algunos datos de otros países, presentada por la Asociación Europea de Pavimentos Asfálticos (AEPA) en el año 2005.

**Tabla 24.** Toneladas anuales de mezcla asfáltica en frío utilizada en Europa y en otros lugares

País	2003	2004	2005
Austria	50 000	50 000	60 000
Bélgica	35 000	23 000	34 000
Croacia	10 000	3 000	10 000
España	-	510 000	350 000
Estonia	8 902	-	-
Finlandia	715 000	1 114 000	1 210 900
Francia	1 600 000	1 600 000	1 700 000
Grecia	1 500	1 200	-
Hungría	15 437	6 426	5 334
Islandia	-	7 460	7 400
Irlanda	200 000	200 000	200 000
Italia	75 000	77 000	80 000
Holanda	15 000	10 000	-
Noruega	67 000	45 000	27 000
Polonia	52 000	50 000	57 000
Portugal	-	-	125 000
República Checa	2 950	7 530	7 830
Suecia	600 000	650 000	600 000
Suiza	1 570 000	1 533 000	1 290 000
Japón	193 000	171 000	162 600
Nueva Zelanda	16 620	-	16 500
Venezuela	-	1 960	-

Tomada del Informe Asphalt in Figures 2005

## 7.1. Colombia

Las mezclas densas en frío han sido aplicadas con éxito en Colombia en diferentes obras de importancia nacional. Su empleo se ha extendido ampliamente en sustitución de las mezclas asfálticas en caliente, ya sea por razones de índole climatológica, técnica o por el empleo de plantas portátiles de gran rendimiento que permiten trabajar en condiciones técnicas ideales. Algunas obras son:

- Carretera Sogamoso-Yopal, sector El cruce-ro-Toquilla
- Carretera Circunvalar de la Isla de San Andrés, en una longitud de 20 km
- Vía de acceso a Quibdó, Chocó, en una longitud de 20 km
- Pista de aterrizaje del aeropuerto de Ocaña, Norte de Santander
- Vía de acceso a la cárcel de máxima seguridad de Valledupar, Cesar
- Pista aeropuerto de Puerto Inirida, Guainía.
- Ampliación pista aeropuerto de Málaga, Santander.

La mezcla densa en frío es la combinación de un ligante bituminoso (emulsión) y un agregado mineral bien graduado, el cual proviene de trituración y presenta un alto contenido de relleno mineral. La mezcla es fabricada, extendida y compactada a temperatura ambiente. Estas mezclas son equiparables en calidad con las mezclas asfálticas en caliente, ya que constituyen una estructura densa, rica en mortero y relleno mineral, la cual una vez compactada presenta un bajo contenido de vacíos entre el 3 % y el 8 %.

Las mezclas densas en frío se aplican como capas de rodadura en vías de tráfico bajo, medio y alto y en espesores de 3 a 7 centímetros. El ligante a emplear es la emulsión asfáltica catiónica de rompimiento lento (MPI CRL-1) y la de rompimiento superestable (MPI CRL-1h).

#### **a) Pavimentación de la Vía Quibdo-Yuto, Departamento del Chocó-Colombia**

Los trabajos iniciaron en abril de 2001, con la instalación y montaje de las plantas de trituración, de producción de emulsión y de mezcla asfáltica. En el mes de setiembre de 2002 se dio la culminación.

Se utilizó mezcla densa en frío como carpeta de rodadura, su implementación resultó satisfactoria debido al óptimo desempeño a pesar del clima de la zona (altamente lluvioso) y la localización geográfica del departamento. Para la fabricación de la mezcla densa en frío se emplearon los materiales pétreos provenientes del río Atrato, con los cuales se obtuvieron buenos resultados. Los agregados cumplieron con las características físicas y mecánicas. La dosificación del material fue de un 80 % de triturado y un 20 % de arena fina.

La fabricación de la emulsión asfáltica se realizó en la obra utilizando la planta portátil PP-20 fabricada por MPI. La emulsión empleada se denomina catiónica de rompimiento lento MPI-CRL-1. Para su formulación se emplearon aditivos especiales que permitieran una excelente adherencia y cubrimiento de los materiales sin que afectara la manejabilidad apropiada de la mezcla.

Las propiedades mecánicas para la mezcla de material triturado, arena del río Atrato y asfalto residual óptimo de 5.8% determinado por el diseño Marshall Modificado son las siguientes:

- ⇒ Estabilidad al aire a 22 °C: 1930 lb
- ⇒ Estabilidad al agua a 22°C : 1800 lb
- ⇒ Pérdida de estabilidad: 7.0 %
- ⇒ Densidad seca bruta: 2151 kg/m<sup>3</sup>
- ⇒ Flujo: 14.8 pulg/100
- ⇒ Vacíos Totales: 6.2 %
- ⇒ Absorción: 2.9 %

Parámetros de Mezclado y Compactación:

- ⇒ % Asfalto residual para la máxima estabilidad saturada al vacío: 6.0
- ⇒ % Asfalto residual para la máxima densidad bruta: 5.5
- ⇒ % Asfalto residual óptimo: 5.8
- ⇒ % Emulsión óptima al 62% de asfalto: 9.3

Parámetros de humedad en la mezcla:

Del ensayo de cobertura se obtiene:

- ⇒ % Humedad total de mezclado: 8.6

La humedad total de mezclado está conformada por la humedad natural en el agregado, la humedad añadida y la aportada por la emulsión:

- ⇒ % Humedad de pre-recubrimiento: 5.0

La humedad de pre-recubrimiento es la humedad mínima que debe tener el agregado antes de la incorporación de la emulsión asfáltica, es decir, la humedad natural más la humedad añadida.

⇒ % Humedad óptima antes de la compactación: 4.6

La humedad óptima antes de la compactación de la mezcla, es la humedad a la cual se obtienen las estabilidades y densidades máximas iniciales en la mezcla compactada.

Dosificación de la emulsión:

- ⇒ % Asfalto residual por peso de agregado seco: 5.8
- ⇒ % Emulsión asfáltica MPI-CRL-1 al 62% de asfalto: 9.3
- ⇒ Dosificación de emulsión l/m<sup>3</sup> suelto de mezcla: 163
- ⇒ Dosificación de emulsión l/m<sup>3</sup> compacto de mezcla: 215.7

La duración total del proyecto fue de 17 meses, dentro de los cuales se desarrollaron actividades de rediseño y ampliación de algunos tramos de la vía existente, conformación de taludes, extensión de sub-base, base estabilizada con cemento, excavación y construcción de filtros y cunetas; lo anterior se ejecutó con rendimientos bajos a causa de las continuas lluvias. La producción, extensión y compactación de la mezcla asfáltica en frío se realizó en un tiempo de 5 meses.

Datos generales:

- ⇒ Longitud de la vía: 20 km
- ⇒ Ancho de vía: 7.6 m
- ⇒ Sub-base: 40 cm
- ⇒ Base estabilizada con cemento: 24 cm
- ⇒ Espesor de carpeta asfáltica de mezcla densa en frío: 5 cm

Tratándose de una región altamente lluviosa, se tuvo que tomar en cuenta el impacto de la lluvia en las obras. Una mala planeación afecta tanto el rendimiento de la obra como la calidad de la mezcla asfáltica.

Para proteger la mezcla asfáltica de una lluvia repentina, se construyó un acopio bajo techo en donde se almacenaba la mezcla recién producida. Diariamente y en las pocas horas

que no llovía, se producía mezcla asfáltica en el centro de acopio y de ahí se transportaba para ser extendida y compactada. En el sitio de acopio la mezcla perdía la humedad suficiente acercándose a valores cercanos a la humedad óptima. Si comenzaba a llover cuando se estaba extendiendo la carpeta, la mezcla en camino hacia la pavimentadora se regresaba al sitio de acopio, sin temor a que el producto se perdiera.

Para lograr determinar la humedad óptima de compactación se elaboraron tramos de prueba sobre el kilómetro 17+900 (margen derecho) en el que se observó el comportamiento de la mezcla cuando era compactada a humedades altas y bajas.

Cuando el contenido de humedad en la mezcla es bajo se presenta un desprendimiento de agregados; en el caso contrario, a humedades altas pueden producirse fisuras laterales al paso del compactador liso y lavado superficial de la mezcla.

El almacenamiento, de la mezcla asfáltica producida redujo el contenido de humedad acercándola a los valores óptimos de extensión y compactación.

El compactador de llantas y el compactador liso se mantuvieron en buen estado, limpios y asegurando que las llantas y el rodillo permanecieran humectados en todo momento. Adicionalmente, se revisaba la presión de las llantas y las almohadillas de limpieza, factores que influyen en el acabado de la carpeta asfáltica.

En la Figura 41 se muestran distintas etapas del proyecto.



a. Planta portátil de emulsión



b. Planta de producción de la mezcla en frío



c. Acopio de la mezcla



d. Colocación de la mezcla



e. Compactación de la mezcla



f. Vista del acabado final de la carpeta

**Figura 41:** Proyecto de la Vía Quibdo-Yuto

## 7.2. Suecia

En la carretera 524 Hössjö – Överboda una ruta forestal (Figura 42), cerca del oeste de la ciudad de Umeå en el norte de Suecia, se construyó una capa de rueda de mezcla en frío utilizando Nymix 630, que es un tipo especial de emulsión para reducir la deformación permanente. Este proyecto se construyó en setiembre de 1998. Esta ruta posee un tránsito liviano pero en términos relativos el número de camiones pesados es alto.

El contenido de asfalto residual fue de 4.5%, y se utilizó un espesor de 4.5 cm.



**Figura 42:** Proyecto de la ruta Hössjö – Överboda

### 7.3. India

En India, se utilizan las mezclas en frío en las zonas de alta precipitación. Se han desarrollado cuatro tipos de mezclas: (1) Bituminous Macadam (BM), (2) Mix Seal Surfacing (MSS), (3) Two Coat Surface Dressing (TCSD) y (4) Premix Carpet (PMC). Estas mezclas se pueden preparar utilizando mezcladoras de concreto convencionales o una planta de mezclado en caliente con la diferencia de que no se calientan los componentes de la mezcla. Se construyeron varios tramos de prueba en la ruta Jammu-Srinagar en H-1A cerca Patnitop (J&K) que es una zona de mucho frío y nieve; en la ruta Jowai - Badarpur en NH-44 cerca de Silchar (Assam), Mizoram (Region N.E.) bajo condiciones de mucha lluvia; y en la ruta H-S cerca de Hanumangarh (Rajastán) bajo condiciones climáticas tipo desierto. Lo anterior demostró que la colocación de mezclas en frío se puede realizar para las distintas condiciones climáticas. Hubo una economía del 10% en el ligante. El desempeño después de 5 años ha sido satisfactorio. El costo de la construcción fue cerca de 10 a 15% más barato que utilizar una mezcla en caliente.

A continuación se presentan unas fotos de proyectos recientes en las Figura 43 y Figura 44.



**Figura 43:** Proyecto de la ruta Dantaur- Khajuwala (Rajastán) en abril, 2007



**Figura 44:** Proyecto de la ruta Jammu- Srinagar (NH-1A) en setiembre, 2007

## **CAPÍTULO 8 FACTIBILIDAD DE LA CONSTRUCCIÓN DE MEZCLAS EN FRÍO EN COSTA RICA**

Para determinar la factibilidad de la aplicación de mezclas en frío para el mantenimiento en nuestro país, se toma como base las entrevistas realizadas a los siguientes sectores> Refinadora Costarricense de Petróleo (RECOPE) y Contratista (Empresa Constructora Santa Fé), así como la revisión bibliográfica que es el pilar fundamental de esta investigación.

### **8.1 Implementación**

Desde la perspectiva del MOPT es claro que han tenido la intención de implementar el uso de mezclas en frío, pues a principios del año 2007, hubo un primer intento de volver a tomarlas en cuenta como alternativa de reparación para calles municipales, en lugar de utilizar mezcla en caliente como comúnmente se aplica. Esto se logró gracias a que el MOPT puso en funcionamiento la planta de producción de mezcla asfáltica en frío en Colima de Tibás. Las expectativas de producción en el verano eran de aproximadamente 200 toneladas diarias.

Las ventajas que el MOPT visualizaba, según noticia publicada en el diario La Nación en marzo del 2007, eran que con esta alternativa se lograría llevar la mezcla, sin que perdiera calidad a zonas alejadas, además de que es un material con un costo menor comparado al costo de la mezcla asfáltica en caliente.

Según esta referencia, el proceso de implementación del uso de estas mezclas tardó aproximadamente un año ya que fue necesario que todos los sectores involucrados se pusieran de acuerdo, sobretodo el papel de RECOPE que son los encargados de producir los ligantes necesarios, principalmente la emulsión de rompimiento lento, para este caso.

En el año 2007 se pensó que las mezclas en frío serían una buena solución para realizar bacheos y no para sobrecapas, sobre todo como alternativa viable para las municipalidades.

### **8.2 Producción de asfalto rebajado y/o emulsión asfáltica**

Según la revisión bibliográfica realizada no se encontró ninguna referencia que prohíba el uso del asfalto rebajado en Costa Rica, por el contrario, el reglamento técnico centroamericano (RTC 2004) presenta las especificaciones de calidad para los tres tipos de

asfaltos rebajados, lo que hace suponer que se pueden utilizar. No obstante, todos los asfaltos rebajados emiten hidrocarburos durante el proceso de evaporación, lo cual produce contaminación atmosférica.

Existe buena disposición de parte de RECOPE para producir cualquier tipo de emulsión asfáltica, siempre y cuando se resuelvan las limitaciones en cuanto a infraestructura y se dé una comercialización que justifique la inversión necesaria. Además se vio reflejado en el primer intento que realizó el MOPT hace un año.

### **8.3 Producción de agregados**

Con respecto a la producción de los agregados, las granulometrías que se utilizan generalmente para las mezclas densas en caliente también pueden ser utilizadas para la elaboración de mezclas en frío. Esto implica que no sean necesarios cambios en el proceso de quebrado.

Por otro lado, si lo que se desea es elaborar granulometrías abiertas, se tendrían que realizar cambios en la producción del agregado.

### **8.4 Maquinaria y equipos**

En las distintas empresas contratistas están disponibles la mayoría de los equipos necesarios para la producción, colocación y compactación de este tipo de mezcla.

Sin embargo para la producción en un lugar fijo se requiere invertir en una planta de mezclado, con todos los dispositivos necesarios para asegurar la calidad de este tipo de mezclas. El equipo para acarrear y compactar la mezcla, cuando la producción es en planta, es el mismo que el empleado en el caso de la mezcla asfáltica en caliente; vagonetes, compactador de bota, compactador de rodillo y compactador neumático.

Para la producción en sitio se requiere equipo especializado sobre todo para el proceso de mezclado, como por ejemplo el equipo descrito anteriormente en este documento. Si el equipo no existiera en el país, cabría la posibilidad de comprarlo o traerlo desde otro

proyecto en Centroamérica donde se esté utilizando, siempre y cuando se justifique desde el punto de vista costo beneficio. Para transportar la materia prima hasta el sitio de mezclado, se requiere en el caso de la emulsión, camiones que cuenten con tanques adecuados para el transporte de este líquido. El equipo de compactación es el mismo que en el caso de mezclas asfálticas en caliente.

Para la colocación de la mezcla en frío, ya sea producida en planta o en sitio, el equipo requerido ya existe en el país por lo tanto no implica una limitación en ningún caso.

Con respecto a los equipos para la reparación de baches, por ser dispositivos muy sencillos se pueden comprar o construir de manera artesanal. Sin embargo, para la técnica de inyección, sí se requiere invertir en el equipo especializado descrito anteriormente.

## **8.5 Costos**

Para el año 2007 se calculó que la mezcla en frío con emulsión costaría  $\$4000$  por metro cúbico menos que la mezcla en caliente, sin embargo actualmente para tener una idea del costo hay que tomar en cuenta el incremento sustancial en los precios de los hidrocarburos en general, lo que también afecta el costo de las mezclas en frío.

No obstante, los costos de producción y colocación de las mezclas en frío serán menores comparados con los costos de producir las mezclas asfálticas en caliente.

De manera general, para tomar la decisión de producir mezclas asfálticas en frío se tiene que realizar un análisis económico con el objetivo principal de determinar el punto óptimo entre los costos relacionados con la inversión en el proyecto (relativos a los estándares de diseño) y los beneficios que trae el proyecto en cuanto a la reducción de los costos de operación que afectan al usuario. El propósito primordial de este análisis económico es lograr que la inversión que se realiza, minimice los costos del ciclo de vida del pavimento. El estándar de diseño óptimo está íntimamente relacionado con los niveles de tránsito, para un mayor tránsito es necesario que los estándares de diseño sean más rigurosos.

## **CAPÍTULO 9 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

### **9.1 Conclusiones**

Se definió el concepto de mezclas asfálticas en frío, además se presentó una descripción detallada de las distintas maneras en que estas mezclas se pueden clasificar.

Las mezclas asfálticas en frío producidas con emulsión tienen mucha aceptación pues son amigables con el ambiente, ya que para su producción se realizan menores gastos energéticos y no ocasionan contaminación luego de ser colocadas. Las mejoras a nivel ambiental son mayores cuando se producen mezclas asfálticas recicladas en frío, pues se está reutilizando un material que normalmente en nuestro país se considera como un desecho.

En este documento también se resumen los procedimientos de ensayo tanto para el diseño como para la medición del desempeño. Además, se incluyen los ensayos de laboratorio que permiten verificar el cumplimiento de las especificaciones de los componentes de las mezclas en frío: agregados, emulsión asfáltica y asfaltos rebajados.

En la revisión bibliográfica se logró encontrar las especificaciones de calidad, tanto para la mezcla como sus componentes, de otros países donde el uso de estos materiales es común.

Se presenta en este documento, una síntesis acerca de los equipos y procesos adecuados para la construcción de las mezclas en frío ya sean producidas en planta o en sitio.

Dado que las mezclas asfálticas en frío de graduación densa se producen con agregados similares a los que se utilizan para la elaboración de mezclas asfálticas en caliente, es factible que estas mezclas se puedan producir en nuestro país. La implementación de las mezclas de graduación abierta implicaría realizar cambios en los procesos de producción y dosificación de los nuevos tamaños de agregados, lo cual hace factible su elaboración siempre y cuando se cuente con los equipos necesarios.

Con respecto a la emulsión asfáltica de rompimiento lento y medio es factible su producción, si se justifica la inversión en materia prima e infraestructura con un aseguramiento de demanda de parte de los sectores involucrados.

A pesar de que la producción de asfalto rebajado es más factible pues se pueden elaborar en las plantas de producción no se recomienda su uso debido a las implicaciones ambientales.

A pesar de que la Administración ha visualizado esta técnica especialmente para su utilización en bacheo, en la recopilación bibliográfica realizada se logró hallar proyectos en los cuales las mezclas en frío se utilizan para la conformación de sobrecapas, los cuales han tenido un buen desempeño desde el punto de vista de vida útil.

De acuerdo con lo que se ha consultado en la bibliografía de referencia, las mezclas asfálticas en frío son una excelente opción para realizar bacheo. Es decir, se debe tener claro el concepto de bacheo: solución de corto plazo para un problema menor y puntual. Para solucionar este problema es mejor utilizar las mezclas en frío ya que poseen un menor costo, comparado con la mezcla asfáltica en caliente que es más costosa y que presenta mayores dificultades para su correcto manejo y aplicación sobre todo tomando en cuenta la informalidad con la que algunas veces se realizan los bacheos en nuestro medio.

No se pudo realizar la comparación económica entre esta opción de pavimentación y bacheo, con las técnicas actuales aplicadas en nuestro país, porque no existe información de referencia ni en nuestro país ni en la bibliografía de fuente internacional consultada.

## **9.2 Recomendaciones**

*Con respecto al presente estudio:*

Se debe tomar en cuenta que es necesario realizar pruebas de compatibilidad entre el agregado y el ligante que se pretende utilizar para asegurar la adherencia y buen comportamiento a desempeño de las mezclas en frío.

Ya que no fue posible realizar una comparación de costos, se recomienda elaborar un diseño de mezcla típico para determinar la proporción de la materia prima necesaria y extrapolar las cantidades, de manera que se pueda aproximar un costo total con base en el costo de los materiales. Sin embargo, sin la ayuda de los sectores involucrados no se puede obtener un dato más real pues se necesitarían los costos asociados con la maquinaria (adquisición, mantenimiento, operación y depreciación) entre otros rubros.

Es apropiado utilizar materiales premezclados industrialmente para solucionar de manera inmediata y artesanal los problemas de huecos o baches en carreteras en pavimentos flexibles para lograr una mejor compatibilidad entre materiales y así evitar el uso excesivo e inapropiado del concreto hidráulico, sobretodo en carreteras de bajo nivel de tránsito y con pocos camiones pesados como calles residenciales, es decir, a nivel de municipalidades esta es una buena opción sobretodo por tener bajos costos y una mayor rapidez para tratar los problemas pues la apertura al tránsito es casi inmediata.

*Con respecto a futuros estudios:*

Poner en práctica la teoría expuesta sobre los ensayos de laboratorio tanto para el diseño de los distintos tipos de mezcla en frío con los agregados y emulsiones de nuestro medio; así como para medir su desempeño para estudiar su comportamiento y la factibilidad de producirlas a nivel industrial.

Introducir el concepto de reciclado en frío como tema principal de investigación, ya que sería beneficioso reutilizar los materiales que normalmente son tratados como desechos, lo cual implicaría una recuperación de los costos asociados con la construcción de capas de mezcla asfáltica en caliente.

Construir tramos experimentales para probar el desempeño en campo de estas mezclas y así determinar la conveniencia real de su uso en nuestro país. Además se podrían realizar bacheos a modo de prueba en distintas zonas climáticas y con niveles de tránsito distintos.

## CAPÍTULO 10 REFERENCIAS

1. Asphalt Institute. A basic asphalt emulsion manual, MS-19. Kentucky, Estados Unidos. Tercera Edición.
2. Asphalt Institute. Asphalt cold mix manual, MS-14. Kentucky, Estados Unidos. Tercera Edición.
3. American Association of State Highway and Transportation Officials. Emulsified Asphalt, M 140. Washington D.C., Estados Unidos, 27<sup>ava</sup> Edición, 2007.
4. American Association of State Highway and Transportation Officials. Cationic Emulsified Asphalt, M 208. Washington D.C., Estados Unidos, 27<sup>ava</sup> Edición, 2007.
5. American Association of State Highway and Transportation Officials. Selection and Use of Emulsified Asphalts, R 5. Washington D.C., Estados Unidos, 27<sup>ava</sup> Edición, 2007.
6. Secretaría de Integración Económica Centroamericana SIECA, Manual Centroamericano de Especificaciones para la Construcción de Carreteras y Puentes Regionales. 2001
7. Ministerio de Obras Públicas y Transporte, Secretaría Técnica, Dirección de Carreteras. Manual de Shell Colombia. Bogotá, Colombia. 1992
8. Fishman, Stefanie R. Cost Effective Pothole Repairs. Local Technical Assistance Program (LTAP), Universidad de New Hampshire, Estados Unidos.  
<http://www.t2.unh.edu/winter98/pg6.html>