

Proyecto N° UI-05-09

**IMPLEMENTACIÓN DEL DISEÑO Y PROCEDIMIENTOS DE ENSAYO DE LABORATORIO PARA  
MEZCLAS EN FRÍO PARA LA REPARACIÓN DE BACHES 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) 2511 2513  
E-mail: [monica.jimenez@ucr.ac.cr](mailto:monica.jimenez@ucr.ac.cr)

**Ing. Andrea Ulloa Calderón**

Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales  
Universidad de Costa Rica, Ciudad Universitaria Rodrigo Facio,  
San Pedro de Montes de Oca, Costa Rica  
Tel: (506) 2511 2513  
E-mail: [andrea.ulloacalderon@ucr.ac.cr](mailto:andrea.ulloacalderon@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) 2511 4994  
E-mail: [asistenteui@lanamme.ucr.ac.cr](mailto:asistenteui@lanamme.ucr.ac.cr)

San José, Costa Rica

Marzo 2010

# ÍNDICE GENERAL

CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN.....	7
1.1 Justificación e importancia.....	7
1.2 Introducción.....	7
1.3 Objetivo General.....	8
1.4 Objetivos específicos .....	8
1.5 Esquema experimental.....	8
CAPÍTULO 2 Descripción de ensayos y equipos de laboratorio .....	10
2.1 Ensayos para emulsiones asfálticas .....	10
□ Emulsiones catiónicas .....	10
2.1.1 Muestreo de emulsiones.....	11
2.1.2 Viscosidad Saybolt Furol .....	12
2.1.3 Estabilidad al almacenamiento .....	13
2.1.4 Demulsibilidad.....	13
2.1.5 Recubrimiento y resistencia al agua .....	13
2.1.6 Mezclado de la emulsión asfáltica.....	14
2.1.7 Ensayo del tamiz.....	14
2.1.8 Destilación del residuo y aceite .....	14
2.1.9 Ensayos al residuo de asfalto.....	14
2.2 Ensayos para los asfaltos rebajados .....	15
a) Asfalto rebajado de curado medio MC .....	16
2.3 Ensayos para los agregados.....	16
2.3.1 Muestreo y cuarteo de agregados .....	19
2.3.2 Granulometría .....	19
2.3.3 Índice de plasticidad .....	20
2.3.4 Peso unitario .....	20
2.3.5 Caras fracturadas.....	21
2.3.6 Equivalente de arena .....	21
2.3.7 Abrasión de Los Ángeles.....	22
2.3.8 Durabilidad por acción de sulfatos .....	22
2.3.9 Índice de durabilidad .....	22
2.3.10 Carbonatos solubles .....	22

2.3.11	Partículas friables.....	23
2.4	Ensayos para las mezclas en frío.....	23
2.4.1	Muestreo de mezclas en frío.....	26
2.4.2	Recubrimiento de las partículas.....	27
2.4.3	Procedimiento para el diseño de mezcla Marshall con emulsión asfáltica.....	29
a)	Cantidad aproximada de asfalto emulsificado .....	29
b)	Contenido óptimo de agua en compactación. ....	30
c)	Compactación de especímenes.....	32
d)	Variación del contenido de asfalto residual.....	33
e)	Porcentaje de vacíos de aire .....	33
f)	Estabilidad modificada y flujo Marshall a 22.2 °C .....	34
g)	Prueba de estabilidad y flujo en especímenes saturados .....	35
h)	Interpretación de los datos de ensayo .....	35
i)	Determinación del contenido óptimo de asfalto .....	38
2.5	Procedimiento para el diseño de mezcla Marshall con asfaltos rebajados .....	39
2.6	Resistencia retenida a la tensión diametral .....	45
2.7	Módulo resiliente a 23 °C.....	45
CAPÍTULO 3 Especificaciones para los componentes y las mezclas asfálticas en frío .....		47
3.1	Emulsión asfáltica .....	47
3.2	Asfalto rebajado.....	47
3.3	Agregado .....	49
3.4	Agua.....	50
3.5	Mezclas en frío .....	51
CAPÍTULO 4 Caracterización de emulsión asfáltica, asfalto rebajado y agregado.....		53
4.1	Emulsión asfáltica CSS-1h .....	53
4.2	Asfalto rebajado MC-800 .....	54
4.3	Agregado 1 .....	55
CAPÍTULO 5 Implementación del método de diseño Marshall para las mezclas en frío..		57
5.1	Emulsión asfáltica .....	57
5.1.1	Resultados para el Agregado 1 utilizando la ecuación del Instituto del Asfalto.....	57

a)	Determinación del contenido inicial de emulsión asfáltica .....	57
b)	Pruebas de recubrimiento.....	58
c)	Contenido de agua óptima para la compactación .....	59
d)	Contenido óptimo de emulsión asfáltica .....	64
5.2	Asfalto rebajado.....	67
5.2.1	Resultados para el Agregado 1 .....	67
a)	Determinación de la temperatura de mezclado y compactación .....	67
b)	Preparación de especímenes para varios contenidos de asfalto rebajado.....	68
c)	Determinación del contenido óptimo de asfalto rebajado.....	69
CAPÍTULO 6 Conclusiones, recomendaciones y comentarios finales .....		71
6.1	Conclusiones .....	71
6.2	Recomendaciones.....	71
CAPÍTULO 7 Referencias .....		73

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Resumen de métodos de ensayo que se realizan en emulsiones catiónicas.....	10
Tabla 2. Resumen de métodos de ensayo que se realizan en asfaltos rebajados de curado medio MC.....	16
Tabla 3. Métodos de ensayo para los agregados que se utilizan para mezclas en frío. ....	18
Tabla 4. Métodos de ensayo para las mezclas en frío. ....	23
Tabla 5: Especificación para la emulsión catiónica, utilizada en el diseño de slurry seal. ....	47
Tabla 6. Guía para el uso de productos derivados del asfalto en mezclas en frío <sup>1</sup> . ....	48
Tabla 7. Especificaciones mínimas y máximas para el asfalto rebajado de curado medio para construcción de mezclas en frío. ....	48
Tabla 8. Resumen de especificaciones para los agregados finos y gruesos, utilizados en la construcción de mezclas asfálticas en frío.....	49
Tabla 9. Resumen de especificaciones granulométricas para en la construcción de mezclas asfálticas en frío de graduación densa. ....	50
Tabla 10. Requerimientos para mezcla asfáltica con granulometría densa .....	51
Tabla 11. Requerimientos para mezcla asfáltica con granulometría densa .....	51
Tabla 12: Caracterización de la emulsión asfáltica, CSS-1h.....	54
Tabla 13. Caracterización del asfalto rebajado de curado medio MC-800. ....	55
Tabla 14. Caracterización del Agregado 1.....	56
Tabla 15. Contenido de emulsión asfáltica inicial para el Agregado 1. ....	57
Tabla 16. Ensayo de recubrimiento para el Agregado 1.....	58
Tabla 17. Contenido de emulsión asfáltica inicial para el Agregado 1, utilizando la fórmula de la Shell de Colombia.....	61
Tabla 18. Ensayo de recubrimiento para el Agregado 1, con 9.4 % de emulsión inicial. ....	61
Tabla 19. Resultados para el contenido de agua óptimo para el Agregado 1.....	63
Tabla 20. Resultados para el contenido de emulsión óptima para el Agregado 1.....	65
Tabla 21. Resultados de porcentajes de vacíos para el contenido de agua óptimo para el Agregado 1.....	66
Tabla 22. Temperaturas de mezclado y compactación para el Agregado 1, variando el contenido de asfalto rebajado.....	68
Tabla 23. Resultados del porcentaje de vacíos para el Agregado 1, para cada contenido de asfalto rebajado.....	69

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Mezcla en frío tipo apilamiento de uso inmediato. ....	8
Figura 2: Esquema experimental utilizado en el proyecto. ....	9
Figura 3: Ejemplos de contenedores para el muestreo de emulsión asfáltica. ....	12
Figura 4: Equipo de ensayo para viscosidad Saybolt Furol. ....	12
Figura 5: Extracción y producción del Agregado 1. ....	18
Figura 6: Definición gráfico de cara fracturada. ....	21
Figura 7: Gráficos del comportamiento típico de la mezcla en frío diseñada por Marshall ....	37
Figura 8: Ejemplo de la relación de temperatura-viscosidad para un asfalto rebajado de cura media. ....	41
Figura 9: Ejemplo de la composición para un asfalto rebajado de cura media. ....	42
Figura 10: Gráficos del comportamiento típico de la mezcla en frío con asfalto rebajado diseñada por Marshall ....	44
Figura 11: Disposición del espécimen para ensayo de módulo resiliente. ....	46
Figura 12: Porcentaje mínimo de vacíos en el agregado mineral. ....	52
Figura 13: Producción de emulsión asfáltica en el laboratorio. ....	53
Figura 14: Curva granulométrica para el Agregado 1. ....	56
Figura 15: Ensayo de recubrimiento para el Agregado 1. ....	59
Figura 16: Desintegración de especímenes para un 6.8 % de emulsión inicial. ....	60
Figura 17: Ensayo de recubrimiento para el Agregado 1, con 9.4 % de emulsión inicial. ....	62
Figura 18: Gráfica de los puntos obtenidos para encontrar del contenido de humedad óptima. ....	63
Figura 19: Gráfica de los puntos escogidos para encontrar del contenido de humedad óptima para el Agregado 1. ....	64
Figura 20: Determinación del contenido de emulsión óptima para el Agregado 1. ....	67
Figura 21: Especímenes de mezclas en frío con asfalto rebajado para el Agregado 1. ....	70

# **CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN**

## **1.1 Justificación e importancia**

Las mezclas asfálticas en frío se vuelven atractivas como una alternativa en contraposición al uso de las mezclas asfálticas en caliente para la reparación de baches, ya que se pueden emplear a través de distintas técnicas de aplicación en sitio, además permiten evitar los problemas relacionados con las temperaturas de colocación y acarreo de la mezcla asfáltica en caliente.

El uso de las mezclas en frío se ha convertido en un tema de gran importancia, ya que permiten una economía en las inversiones y al mismo tiempo un desarrollo sostenible por distintas razones principalmente porque la inversión energética para producirlas es inferior, puesto que no es necesario calentar los agregados a temperaturas superiores a los 100 °C.

Antes de implementarlas, es necesario realizar los ensayos de laboratorio tanto para el diseño así como para medir el desempeño de la mezcla, para establecer la forma en la que se deben aplicar estos métodos en el control de calidad del producto en nuestro medio.

## **1.2 Introducción**

Luego de realizar el estudio bibliográfico para establecer la factibilidad de la aplicación de las mezclas asfálticas en frío en Costa Rica y concluir que sí es factible, es importante continuar con el estudio de las características de esta mezclas, por lo tanto, se propone una segunda etapa para la implementación de los ensayos de laboratorio para el diseño de mezcla y para evaluar el desempeño de las mismas.

En esta segunda etapa se propone realizar un estudio experimental que incluyen: emulsión asfáltica o asfalto rebajado. Se van a realizar las mezclas de prueba para establecer las dosificaciones de los componentes para luego realizar los diseños de mezcla. Dentro del esquema también se va a realizar una caracterización de los materiales que componen estas mezclas, es decir, a los agregados y a los ligantes.

Para una tercera etapa se propone realizar bacheos de prueba (Figura 1), a escala natural para darle seguimiento y medir su desempeño bajo las condiciones reales de clima y tránsito. A pesar de que el bacheo es una solución temporal mientras se resuelve la causa raíz del problema del pavimento se pretende medir su durabilidad, para poder establecer parámetros comparativos con respecto a las mezclas asfálticas en caliente.



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

### **1.3 Objetivo General**

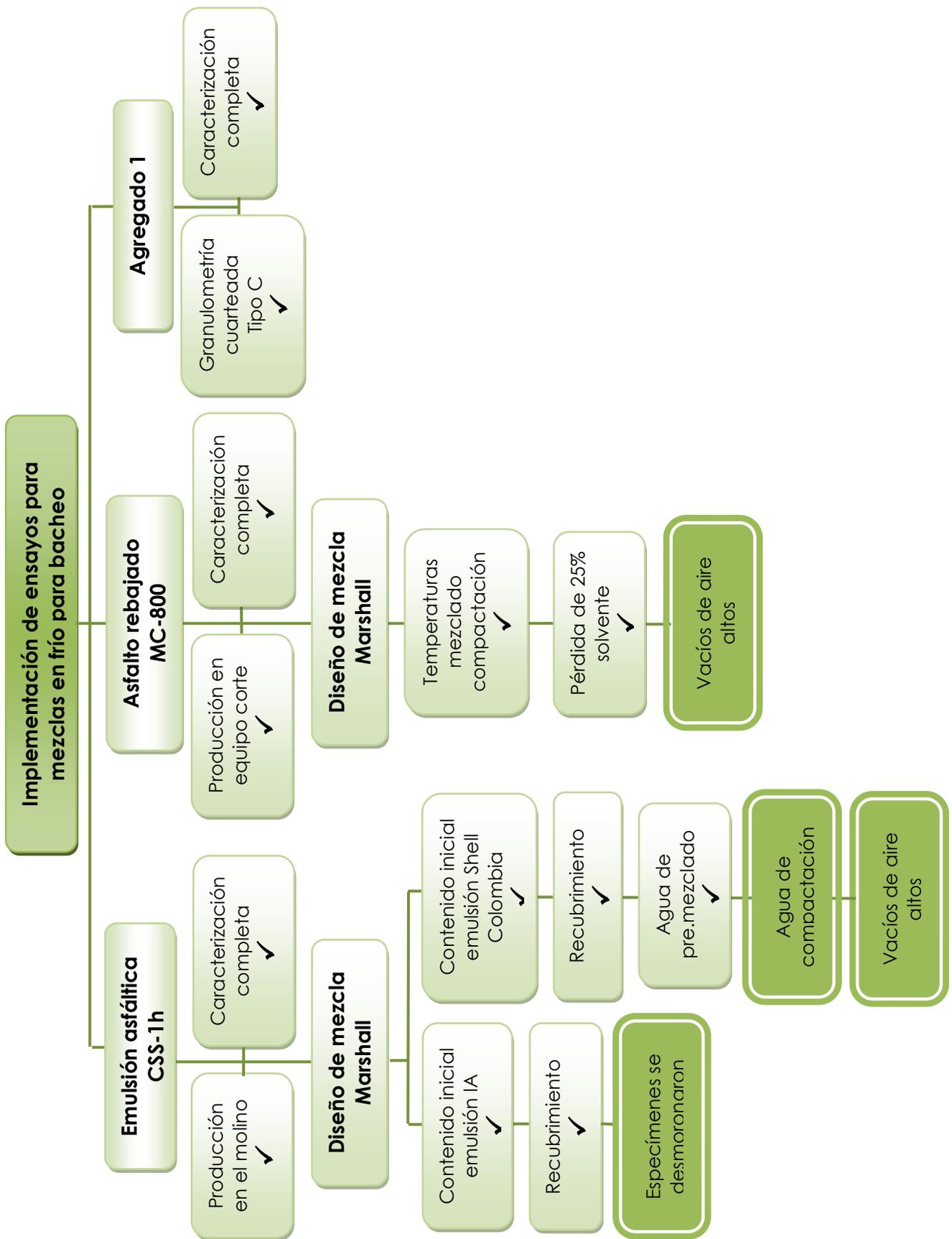
Implementar el diseño y los procedimientos de laboratorio para mezclas asfálticas en frío que se utilizan en la reparación de baches para Costa Rica.

### **1.4 Objetivos específicos**

- Establecer los ensayos de laboratorio para la caracterización de los componentes de la mezcla en frío: emulsión asfáltica, asfalto rebajado y agregados.
- Definir y establecer las variables respuesta para el diseño de la mezcla: dosificación de agregado y ligante, mediante las mezclas de prueba y los diseños.
- Realizar los diseños de mezcla y analizar los resultados para las distintas combinaciones de factores establecidos.

### **1.5 Esquema experimental**

A continuación en la Figura 2 se presenta un esquema experimental de cómo se realizó la investigación. Las casillas indican los ensayos que se describen más adelante en la sección 4 de este documento.



**Figura 2:** Esquema experimental utilizado en el proyecto.

## CAPÍTULO 2 Descripción de ensayos y equipos de laboratorio

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).

### 2.1 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, el almacenamiento 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 residuos de la emulsión (asfalto residual).

Específicamente para este estudio se utilizó una emulsión catiónica de rompimiento lento del **tipo CSS-1h**.

#### • 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 1 se presenta un resumen de los métodos de ensayo para las emulsiones **catiónicas**.

**Tabla 1.** Resumen de métodos de ensayo que se realizan en emulsiones catiónicas

TIPO DE ENSAYO	DESIGNACIÓN AASHTO	DESIGNACIÓN ASTM
<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>

**Tabla 1.** Resumen de métodos de ensayo que se realizan en emulsiones catiónicas

TIPO DE ENSAYO	DESIGNACIÓN AASHTO	DESIGNACIÓN ASTM
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 N° 20	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>En el residuo de la destilación (asfalto residual)</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.

### 2.1.1 Muestreo de emulsiones

El propósito es obtener muestras representativas, para poder caracterizarlas y extrapolar estas características a 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 eso no es posible entonces se debe 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)



a. Galón plástico



b. Cubeta

**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

### 2.1.2 Viscosidad Saybolt Furol

La viscosidad es la resistencia al flujo de los fluidos y es una propiedad que afecta la trabajabilidad de la emulsión. La viscosidad se mide con el viscosímetro de Saybolt Furol (Figura 4), 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”.



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

### **2.1.3 Estabilidad al 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.

### **2.1.4 Demulsibilidad**

El ensayo indica la tasa relativa a la cual los glóbulos coloidales de asfalto en la emulsión romperán cuando se esparce en una 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.

### **2.1.5 Recubrimiento y resistencia al agua**

Este ensayo tiene tres propósitos, pues determina la capacidad de la emulsión para:

- 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 se termina el proceso de 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.

### **2.1.6 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 (N°14), se indica la capacidad de la emulsión para mezclarse con materiales de una mayor área superficial sin romperse.

### **2.1.7 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  $\mu\text{m}$  (N° 20) y se mide la cantidad de partículas de asfalto u otros materiales retenidos. Por ejemplo, una cantidad excesiva de partículas puede indicar problemas en el manejo y aplicación de la emulsión.

### **2.1.8 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.

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 puede envejecer alterando las propiedades físicas del residuo de asfalto.

### **2.1.9 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, de este ensayo resulta 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 capacidad del asfalto para 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 en romperse dentro del molde, cuando el agua del baño pasa a través de él.

## **2.2 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).

En este estudio se utilizó un asfalto rebajado de curado medio **MC-800**.

### a) 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 2 se presenta un resumen de los métodos de ensayo para los **asfaltos rebajados MC**.

**Tabla 2.** 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

### 2.3 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 3 se resumen los ensayos que se pueden realizar a los agregados que se utilicen para producir mezclas en frío.

**Tabla 3.** Métodos de ensayo para los agregados que se utilizan para mezclas en frío.

TIPO DE ENSAYO	DESIGNACIÓN AASHTO	DESIGNACIÓN ASTM
<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

Los agregados utilizados en esta fase experimental fueron obtenidos de una fuente:

**Agregado 1:** material extraído del Río Guápiles, en Guápiles Limón quebrado con impactor (Ver Figura 5)



**Figura 5:** Extracción y producción del **Agregado 1**.

Tomado de: <http://www.mecocr.com/recursos/centros.php> 2010

### **2.3.1 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".

### **2.3.2 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  $\mu\text{m}$  (Nº 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.

### **2.3.3 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<sup>o</sup> 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.

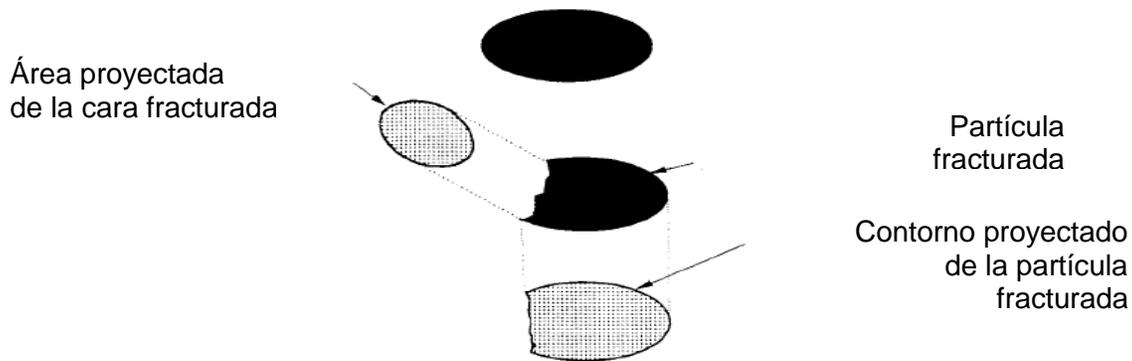
### **2.3.4 Peso unitario**

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 suelto 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.

### 2.3.5 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 6). 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 6:** Definición gráfico de cara fracturada.  
Figura adaptada de ASTM D 582.

### 2.3.6 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 (N°4)). 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.

### **2.3.7 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.

### **2.3.8 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.

### **2.3.9 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.

### **2.3.10 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.

### 2.3.11 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.

### 2.4 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 4 donde se resumen los métodos que se deben de aplicar en el laboratorio para establecer el diseño de mezcla.

**Tabla 4.** 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 F 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
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 utilizando 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.

El ensayo de desempeño que se ha utilizado es la Estabilidad Marshall 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.

#### **2.4.1 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.

#### **2.4.2 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  $\mu\text{m}$  (N° 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 2.4.3 a) de este documento. La emulsión debe añadirse en un rocío suave para minimizar la tendencia del asfalto a aglomerarse 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, el exceso de 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.

### **2.4.3 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.

#### **a) 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 (Nº 8)\*.

B = Porcentaje de agregado pasando la malla de 2.36mm (Nº 8) y retenido en la malla de 75 µm (Nº 200)\*.

C = Porcentaje de agregado pasando la malla de 75 µm (Nº 200)\*.

\*Expresado como un número entero.

La fórmula anterior está dada por el Instituto del Asfalto.

La fórmula del Manual de la Shell de Colombia es la misma fórmula anterior sin multiplicar el 0.7.

Otra fórmula que se puede utilizar para aproximar el contenido de asfalto emulsificado es la del método de la Universidad de Illinois:

$$\%L = 0.00138 \times AB + 6.385 \times \log C - 4.655$$

Donde:

%L = porcentaje de ligante residual

A = porcentaje de agregado retenido en el tamiz de 4.75 mm (Nº 4)

B = porcentaje de agregado entre los tamices de 4.75 mm (Nº 4) y 0.075 µm (Nº 200)

C = porcentaje que pasa el tamiz de 0.075 µm (Nº 200)

## **b) 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, recombinao 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.

### **c) 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.

#### **d) 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, de manera que se conserve el contenido óptimo de agua de compactación inicialmente establecido; por lo tanto la cantidad de agua deberá reducirse o aumentarse según la cantidad de emulsión que se agregue. Se mezclan y 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).

#### **e) 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

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

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

$$\text{Densidad seca (kg/m}^3\text{)} \Rightarrow 1000 \times G_d$$

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

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

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

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

#### **f) Estabilidad modificada 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  $22.2 \pm 1.1$  °C ( $72 \pm 2$  °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  $93 \pm 6$  °C ( $200 \pm 10$  °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.

#### **g) 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.

#### **h) 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.

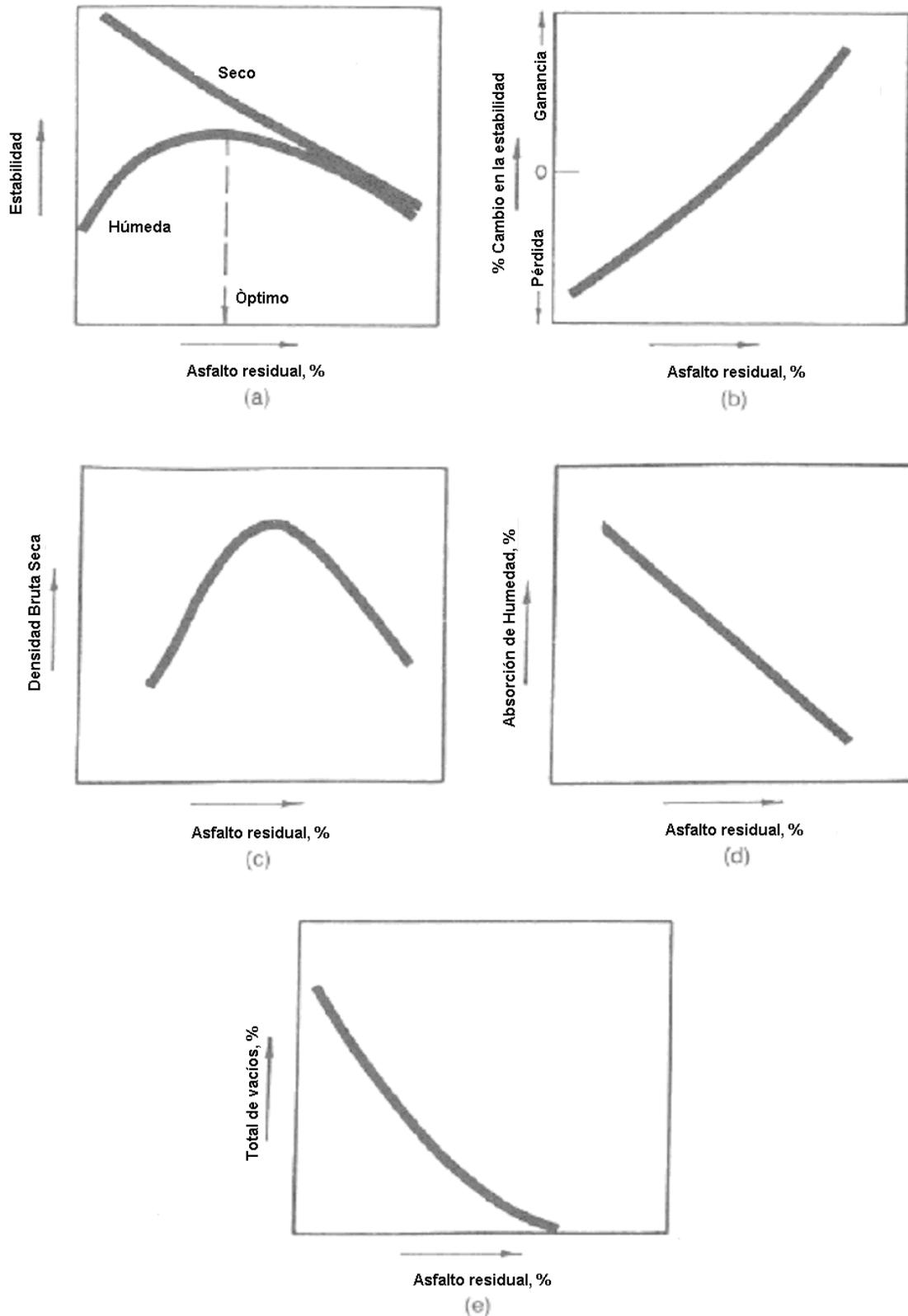
En cada gráfico, conectar los datos con una curva suave que provea la mejor forma para todos los valores.

En la Figura 7 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 7:** Gráficos del comportamiento típico de la mezcla en frío diseñada por Marshall

Figura adaptada del MS-14 del Instituto del Asfalto.

## **i) 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 10. 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.

## **2.5 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.

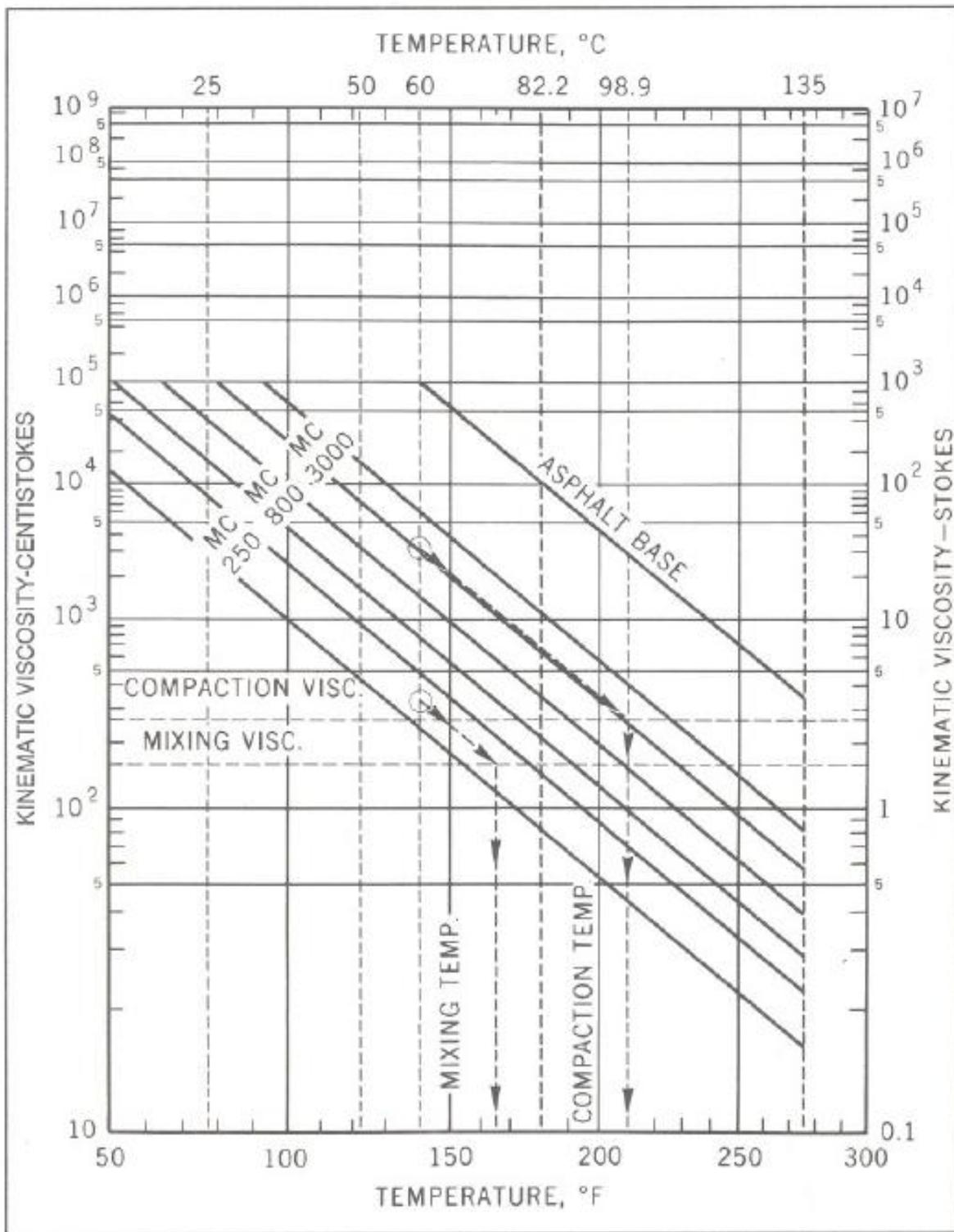
El método Marshall utiliza especímenes de prueba estándar de 64 mm (2 ½ pulgadas) de altura y 102 mm (4 pulgadas) de diámetro. Estos son preparados utilizando un procedimiento específico para calentar, mezclar y compactar las mezclas de agregado-asfalto. Las dos principales características del método 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:

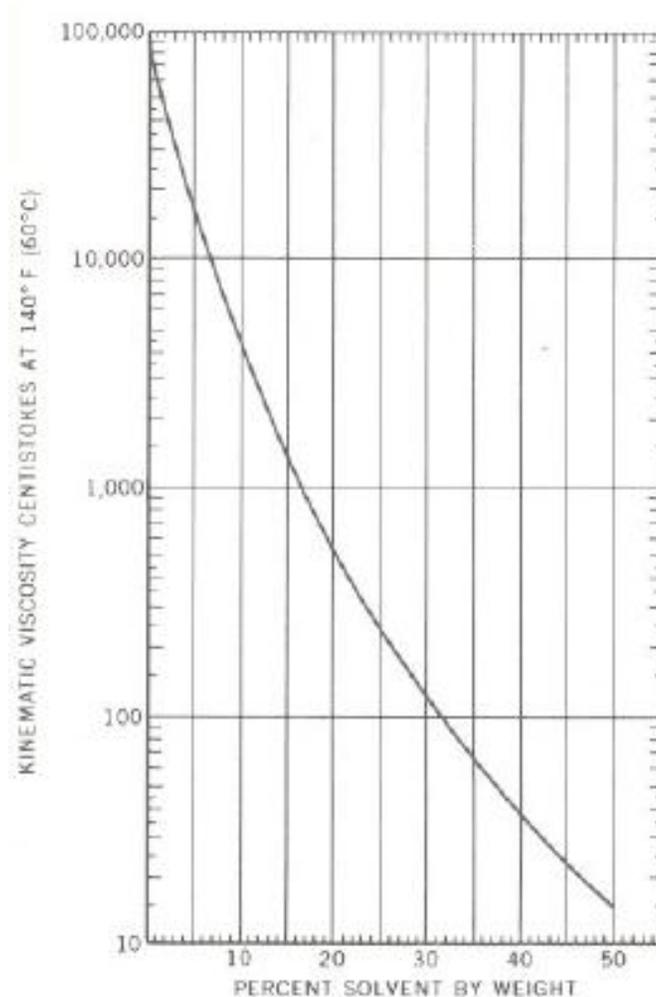
- (a) Se selecciona el agregado que se encuentre dentro de los requerimientos de las especificaciones del proyecto.
- (b) Se selecciona el tipo y grado de asfalto rebajado acuerdo con el tipo de agregado, el equipo de mezclado y colocación y las condiciones de clima.
- (c) Se determina la temperatura 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 8).

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 9) de composición también se determina la viscosidad a  $60\text{ }^{\circ}\text{C}$  ( $140\text{ }^{\circ}\text{F}$ ) 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 8:** Ejemplo de la relación de temperatura-viscosidad para un asfalto rebajado de cura media.

Figura adaptada del MS-14 del Instituto del Asfalto.



**Figura 9:** 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.

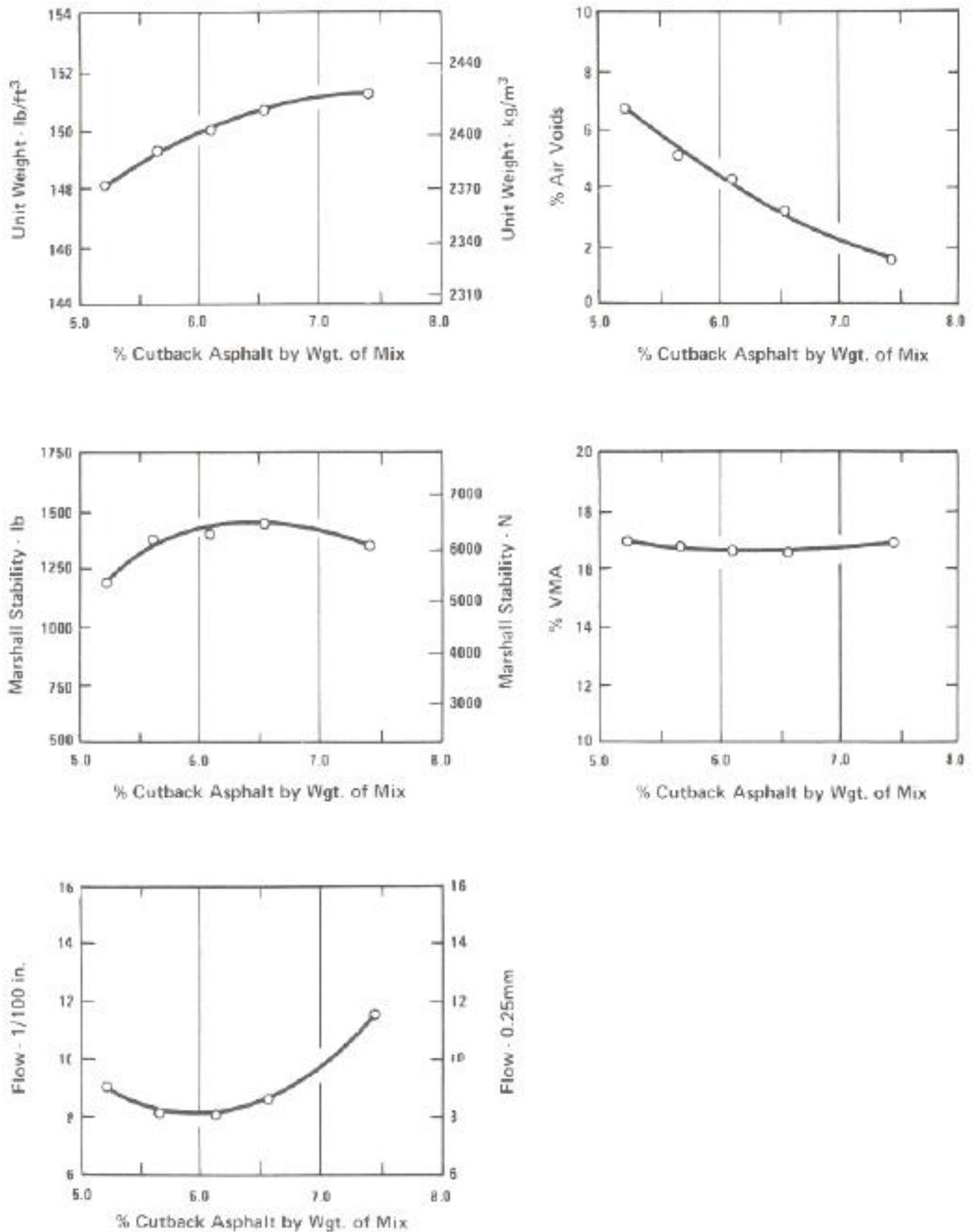
Se preparan gráficos separados para los siguientes parámetros (como se ilustra en la Figura 10):

- (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 10:** 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.

## **2.6 Resistencia retenida a la tensión diametral**

El ensayo consiste en fabricar 8 especímenes con el contenido óptimo de ligante, y se dividen en dos grupos de 4 especímenes, uno se resguarda y luego se falla seco, mientras que el otro grupo, se somete a un acondicionamiento por 24 horas en agua a una temperatura de 60 °C, luego se fallan a 25 °C. Se calcula la resistencia de ambos grupos y se hace la relación porcentual de la resistencia húmeda con respecto a la resistencia seca.

## **2.7 Módulo resiliente a 23 °C**

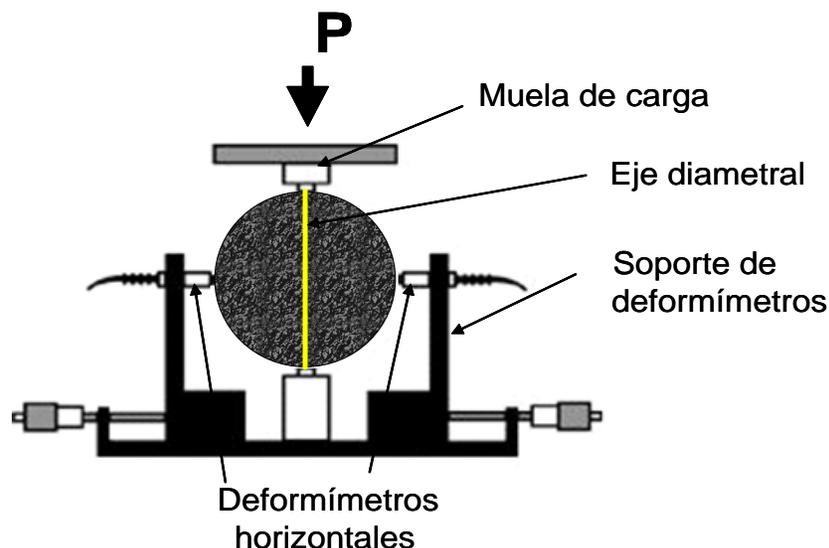
El valor del módulo resiliente determinado por este método, es una medida del módulo de elasticidad para mezclas asfálticas, que reconoce sus características no lineales. Los valores obtenidos de módulo resiliente pueden ser usados en los modelos de análisis estructural para calcular la respuesta de 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 11. 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 11:** Disposición del espécimen para ensayo de módulo resiliente.

## CAPÍTULO 3 Especificaciones para los componentes y las mezclas asfálticas en frío

### 3.1 Emulsión asfáltica

Se entiende como emulsión asfáltica a la dilución en agua de un ligante asfáltico, a partir del uso de agentes emulsificantes, de conformidad con los requisitos de AASHTO.

**(a) Emulsión asfáltica catiónica.** Debe cumplir con lo establecido en la norma AASHTO M 208 o ASTM D 2397. Los aspectos más importantes se muestran en la Tabla 5.

**Tabla 5:** Especificación para la emulsión catiónica, utilizada en el diseño de slurry seal.

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

NA: No aplica.

Adaptada de AASHTO M 208 ("Table 1 Requirements and typical applications for cationic emulsified asphalt")

### 3.2 Asfalto rebajado

Los tipos de asfaltos rebajados que pueden ser empleados para fabricación de mezclas en frío para mantenimiento 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 6).

**Tabla 6.** 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
	Parqueo uso inmediato					x	x			x	x					x	
	Parqueo 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		
		Arena			x	x	x				x	x	x				
		Suelos arenosos			x	x	x				x	x		x	x		
	Parqueo uso inmediato				x	x	x				x	x				x	

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

**Tabla 7.** 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>								
Nafta estándar	negativo							
Solvente xileno de nafta	negativo							
Solvente xileno de heptano	negativo							
<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	-

Se presenta la Tabla 7 donde se resume las especificaciones de calidad que deben de cumplir los asfaltos rebajados.

### 3.3 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 µm (Nº 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 8 se resumen las especificaciones para los agregados que se deben cumplir para la fabricación de mezclas en frío.

**Tabla 8.** 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 9, <b>¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.</b> y <b>¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.</b>	-
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%

**Tabla 8.** Resumen de especificaciones para los agregados finos y gruesos, utilizados en la construcción de mezclas asfálticas en frío.

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 la Tabla 9 se resumen las especificaciones granulométricas para la fabricación de mezclas en frío de graduación densa y abierta.

**Tabla 9.** 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

### 3.4 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.

### 3.5 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 10 y Tabla 11 se muestran los requerimientos para las mezclas asfálticas con granulometría densa con emulsión asfáltica y asfalto rebajado para el método de diseño Marshall.

**Tabla 10.** Requerimientos para mezcla asfáltica con **granulometría densa** y emulsión asfáltica diseñadas con el **método Marshall**.

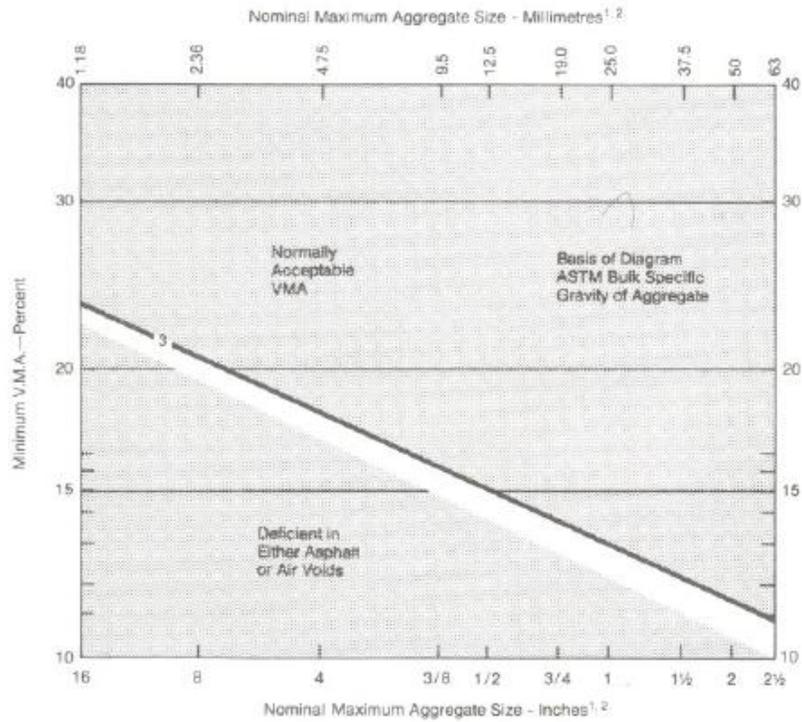
Propiedad a evaluar	Especificación
Estabilidad (kN) a $22 \pm 1$ °C	2.22 mínimo
Porcentaje de pérdida de Estabilidad <sup>1</sup>	50 máximo
Recubrimiento del agregado (%)	50 mínimo

<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 11.** 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 12	
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 12:** Porcentaje mínimo de vacíos en el agregado mineral.  
Figura adaptada del MS-14 del Instituto del Asfalto.

## CAPÍTULO 4 Caracterización de emulsión asfáltica, asfalto rebajado y agregado

### 4.1 Emulsión asfáltica CSS-1h

La emulsión asfáltica utilizada en este estudio fue fabricada en el laboratorio con el molino coloidal con la siguiente formulación: 67.4 % de asfalto tipo AC-30 y 32.6 % de emulsificante de tipo catiónico lento de la casa Akzo Nobel cuya marca registrada es Redicote®.

Las condiciones de producción fueron las siguientes:

- Temperatura de trabajo: 75 °C.
- Tiempo de mezclado: hasta obtener total homogeneidad (cerca de 100 min).
- Sistema de mezclado: molino coloidal.
- Envasado: galones plásticos.
- Bomba: 1800 rpm.
- Molino: 4000 rpm.
- pH: 2.0 Uph.



**Figura 13:** Producción de emulsión asfáltica en el laboratorio.

En la Tabla 12 se presentan de manera resumida la caracterización de la emulsión asfáltica producida en el laboratorio, donde se puede observar que todas las características cumplen con lo establecido en las especificaciones del Reglamento Técnico Centroamericano Productos de Petróleo. Asfaltos. Especificaciones RTCA-75.01.22:04. Los ensayos de laboratorio realizados corresponden a los métodos ASSHTO T 59, T 49, T 51 y T 44.

**Tabla 12:** Caracterización de la emulsión asfáltica, **CSS-1h**.

TIPO DE ENSAYO	Resultados	Especificación	
		mín	máx
<b>En la emulsión</b>			
Viscosidad Saybolt Furol a 25 °C (seg)	53.2 ± 0.1	20	100
Porcentaje de estabilidad de almacenamiento en 24 h (%)	0.2 ± 0.2		1
Ensayo de la carga de la partícula	positiva	positiva	
Porcentaje de mezclado del cementante asfáltico (%)	NR		2.0
Porcentaje retenido en el tamiz (%)	0.139 ± 0.001		1.0
Destilación			
Porcentaje de residuo (%)	67.4 ± 0.9	57	
Aceite (%)	1.5 ± 0.8		3
<b>En el residuo de la destilación</b>			
Penetración a 25 °C	70 ± 1	40	90
Ductilidad a 25 °C (cm)	88 ± 9	40	
Porcentaje de solubilidad en tricloroetileno (%)	99.5 ± 0.1	97.5	

NR: no se realizó esta prueba

Fuente: Las autoras

#### 4.2 Asfalto rebajado MC-800

El asfalto rebajado utilizado en este estudio fue fabricado en el laboratorio con el equipo de corte con la siguiente formulación: 78 % de asfalto tipo AC-30 y 22 % de queroseno comercial.

Las condiciones de producción fueron las siguientes:

- Temperatura de trabajo: 110 °C.
- Tiempo de mezclado: hasta obtener total homogeneidad.
- Sistema de mezclado: equipo de corte.
- Envasado: galones plásticos.

En la Tabla 13 se presentan de manera resumida la caracterización del asfalto rebajado producido en el laboratorio, donde se puede observar que la mayoría de las características cumplen con lo establecido en las especificaciones del Reglamento Técnico Centroamericano Productos de Petróleo. Asfaltos. Especificaciones RTCA-75.01.22:04. El porcentaje por volumen a 260 °C no cumple con el máximo permitido, lo cual se relaciona con el tiempo de fraguado, sin embargo, habría que realizar un estudio más profundo para determinar el efecto real de este resultado sobre dicho factor. Los ensayos de laboratorio realizados corresponden a los métodos ASTM D 2170, D 402, D 2042, D 95 y D 113.

**Tabla 13.** Caracterización del asfalto rebajado de curado medio **MC-800.**

TIPO DE ENSAYO	Resultados	Especificación	
		Mín.	Máx.
<b>En el asfalto rebajado</b>			
Viscosidad cinemática a 60 °C	1075 ± 12	800	1600
Punto de inflamación Tag copa abierta	NR	66	-
Destilación a 360 °C			
Porcentaje por volumen a 225 °C	-	-	-
Porcentaje por volumen a 260 °C	43 ± 1	0	35
Porcentaje por volumen a 315 °C	80 ± 1	45	80
Porcentaje de residuo	78 ± 1	75	-
Porcentaje de agua por destilación	0.05 ± 0.01		0.2
Ensayo de la mancha			
Nafta estándar	NR	Negativo	
Solvente xileno de nafta	NR	Negativo	
Solvente xileno de heptano	NR	Negativo	
<b>En el residuo de la destilación (asfalto residual)</b>			
Viscosidad absoluta a 60 °C	924 ± 21	300	1200
Ductilidad a 25 °C	88 ± 4	100	-
Porcentaje de solubilidad en tricloroetileno	99.98 ± 0.04	99.0	-

NR: no se realizó esta prueba

Fuente: Las autoras

### 4.3 Agregado 1

La caracterización del Agregado se presenta en la Tabla 14, donde se resumen los resultados de laboratorio y el cumplimiento con las especificaciones.

En la Figura 14 se muestra la granulometría utilizada del Agregado y su cumplimiento con la especificación granulométrica de Tipo C para las mezclas de mantenimiento.

**Tabla 14.** Caracterización del **Agregado 1**.

TIPO DE ENSAYO	Resultados	Especificación
Índice de plasticidad	NP	-
Equivalente de arena	78 %	mínimo 35 %
Partículas friables	NR	máximo 1 %
Caras fracturadas	99.8 %	mínimo 75 %
Carbonatos solubles, residuo insoluble	NR	máximo 25 %
Índice de durabilidad (grueso y fino)	NR	mínimo 35 %
Abrasión de los Ángeles	21.21 %	máximo 40 %
Durabilidad en sulfatos	NR	máximo 12 %



**Figura 14:** Curva granulométrica para el **Agregado 1**.

Fuente: Las autoras

## CAPÍTULO 5 Implementación del método de diseño Marshall para las mezclas en frío

### 5.1 Emulsión asfáltica

La metodología de diseño de mezcla que se utilizó es la del Instituto del Asfalto. El método de ensayo se describe detalladamente en el Apéndice F del Manual MS-14 Mezclas asfálticas en frío.

#### 5.1.1 Resultados para el Agregado 1 utilizando la ecuación del Instituto del Asfalto

##### a) Determinación del contenido inicial de emulsión asfáltica

Se utilizó la ecuación C.K.E para encontrar el contenido inicial de emulsión asfáltica, basados en el procedimiento de la Shell de Colombia.

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

Donde:

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

A = Porcentaje del agregado retenido en la malla de 2.36 mm (Nº 8)\*.

B = Porcentaje de agregado pasando la malla de 2.36 mm (Nº 8) y retenido en la malla de 75 µm (Nº 200)\*.

C = Porcentaje de agregado pasando la malla de 75 µm (Nº 200)\*.

\*Expresado como un número entero.

En la Tabla 15 se muestra el cálculo del contenido inicial de emulsión asfáltica.

**Tabla 15.** Contenido de emulsión asfáltica inicial para el **Agregado 1.**

<b>Retenido en Nº 8 A (%)</b>	<b>Pasando Nº 8 y retenido en Nº 200 B (%)</b>	<b>Pasando Nº 200 C (%)</b>	<b>Contenido de emulsión inicial PTA P (%)</b>
57.3	36.5	6.1	6.8%

## b) Pruebas de recubrimiento

Entonces se procedió a realizar el ensayo de recubrimiento que consiste en variar el contenido de agua en distintos porcentajes y observar el recubrimiento de asfalto sobre las partículas.

Se dosificaron los siguientes porcentajes de agua de premezclado: 3 %, 4 %, 5 %, 6 % y 7 %, los resultados se presentan en la Tabla 16.

**Tabla 16.** Ensayo de recubrimiento para el **Agregado 1.**

<b>% Agua pre-mezcla</b>	<b>% Recubrimiento</b>
3	30 %
4	40 %
5	50 %
6	90 %
7	100%

Se escogió un 6 % de agua de pre-mezcla debido a que es el que cumple con el porcentaje mayor de 75 % especificado para las mezclas en frío para bacheo.

A continuación en la Figura 15 se presentan las fotos con los resultados obtenidos con este ensayo.

De acuerdo a las fotografías se comienza a observar un adecuado recubrimiento a partir del 3 %, sin embargo, al esperar que la muestra se seque al aire y realizar la estimación tal como se detalla en el punto 9 del procedimiento F.07, se puede distinguir verdaderamente cuál porcentaje de agua de premezclado utilizar.

El porcentaje de agua de pre-mezclado entonces que se utilizó fue el de 6 % según la Tabla 16, se continuó con el ensayo para encontrar el contenido de agua óptimo de compactación.



a. 3% de agua



b. 4% de agua



c. 5% de agua



d. 6% de agua



e. 7% de agua

**Figura 15:** Ensayo de recubrimiento para el **Agregado 1**.

Fuente: Las autoras

### c) Contenido de agua óptima para la compactación

Se procedió entonces a compactar los especímenes con un contenido de emulsión de 6.8 %, un contenido de agua de pre-mezclado de 6 % y se añadieron los siguientes porcentajes de agua de compactación: 5 %, 6 % y 7 %.

Para lo anterior se requiere utilizar las siguientes ecuaciones para obtener la cantidad de agua a añadir dentro de cada bache.

$$(a) \text{ Masa del agregado añadido seco al aire} = \frac{1149}{(100-0)} \times 100 = 1149\text{g}$$

$$(b) \text{ Masa de asfalto emulsificado} = \frac{1149 \times \left( \frac{6,8 \times 64}{100} \right)}{64} = 78\text{g}$$

$$(c) \text{ Masa de agua de pre-mezcla añadida} = 1149 \times \left( 5,0 - 0 - \frac{36 \times 4,4}{64} \right) / 100 = 29\text{g}$$

$$(d) \text{ Masa de agua perdida por compactación} = 1149 \times \left( \frac{5,0 - \left( \frac{6,8 \times 36}{100} \right)}{100} \right) = 29\text{g}$$

Luego de compactar los especímenes de acuerdo al procedimiento descrito se procede a realizar las gravedades específicas brutas para la obtención de las densidades secas. Sin embargo, los especímenes se desintegraron durante el acondicionamiento en el baño con agua a una temperatura de 25 °C, como se puede observar en la Figura 16. Esto debido al bajo contenido de ligante asfáltico.



**Figura 16:** Desintegración de especímenes para un 6.8 % de emulsión inicial.

Fuente: Las autoras

Por lo tanto, se decide corregir la fórmula escogida para la determinación del contenido inicial de emulsión. Según algunas de las referencias estudiadas en aquellos casos en que ocurre la desintegración de los especímenes se requiere utilizar la siguiente ecuación, proveniente de la Shell de Colombia.

$$P = 0.05A + 0.1B + 0.5C$$

Donde:

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

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

B = Porcentaje de agregado pasando la malla de 2.36 mm (N° 8) y retenido en la malla de 75 µm (N° 200)\*.

C = Porcentaje de agregado pasando la malla de 75 µm (N° 200)\*.

\*Expresado como un número entero.

En la Tabla 17 se muestra el cálculo del contenido inicial de emulsión asfáltica.

**Tabla 17.** Contenido de emulsión asfáltica inicial para el **Agregado 1**, utilizando la fórmula de la Shell de Colombia.

Retenido en N° 8 A (%)	Pasando N° 8 y retenido en N° 200 B (%)	Pasando N° 200 C (%)	Contenido de emulsión inicial PTA P (%)
59	35	5.93	9.4 %

Se procede luego a realizar el ensayo de recubrimiento para este nuevo porcentaje de emulsión inicial, para lo cual se dosificaron los siguientes porcentajes de agua de pre-mezcla: 3 %, 4 % y 5 %, los resultados se presentan en la Tabla 18.

**Tabla 18.** Ensayo de recubrimiento para el **Agregado 1**, con 9.4 % de emulsión inicial.

% Agua pre-mezcla	% Recubrimiento
3	75 %
4	85 %
5	100 %

Se escogió un 4 % de agua de pre-mezcla que es el que cumple con el porcentaje mayor de 75 %, según se puede observar en la Tabla 18.

A continuación en la Figura 17 se presenta la imagen con los resultados obtenidos para el ensayo de recubrimiento.

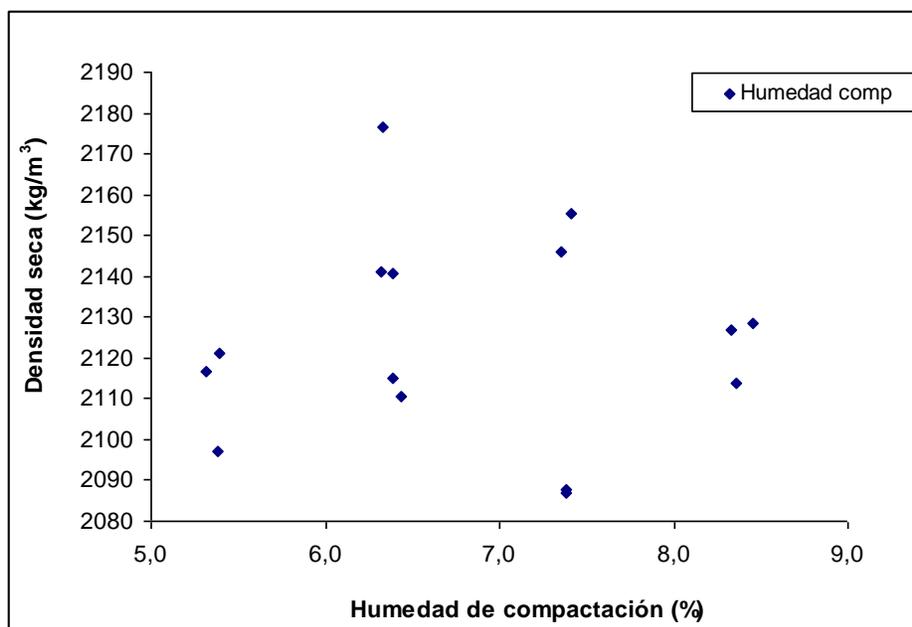


a. 3%, 4% y 5% de agua.

**Figura 17:** Ensayo de recubrimiento para el **Agregado 1**, con 9.4 % de emulsión inicial.

Fuente: Las autoras

Posteriormente se compactaron los especímenes y se continuó con el mismo procedimiento para la obtención del contenido de agua óptima para la compactación. Pero, al graficar los datos de la densidad seca de los especímenes versus el contenido de agua no se obtuvo la tendencia esperada. Por lo tanto, se decide agregar seis especímenes adicionales (se compactaron seis especímenes más con 3 %, 4 %, 5 % y 6 % de agua de pre-mezcla).



**Figura 18:** Gráfica de los puntos obtenidos para encontrar del contenido de humedad óptima.

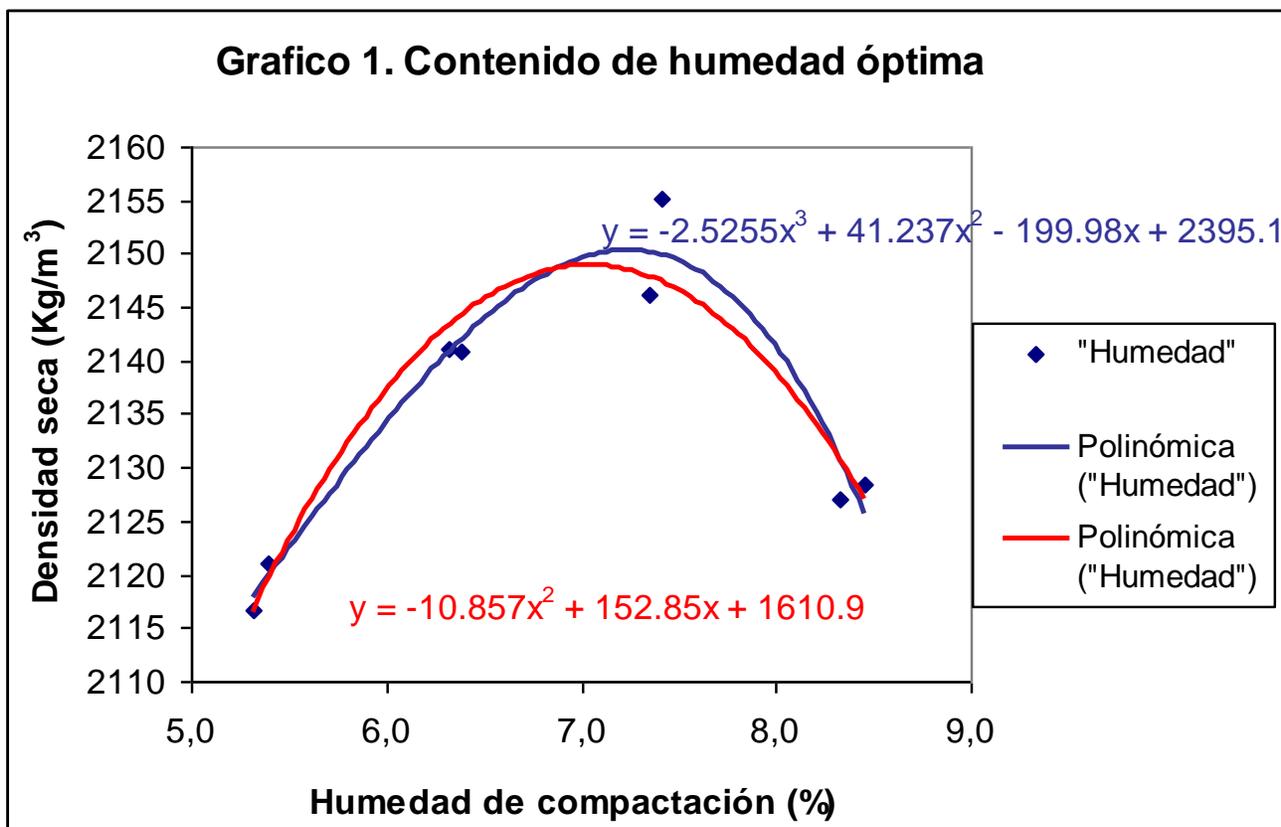
Fuente: Las autoras

A continuación se presentan los resultados tabulados en la Tabla 19.

**Tabla 19.** Resultados para el contenido de agua óptimo para el **Agregado 1.**

No. Espécimen	Emulsión asfáltica inicial PTA (%)	Gravedad específica bruta	Densidad seca (kg/m³)	Humedad de premezcla HP (%)	Humedad de compactación HC (%)
1(A)	9.4	2.126	2121.1	3.0	5.4
1(B)		2.103	2097.3	3.0	5.4
1(C)		2.122	2116.7	3.0	5.3
1	9.4	2.148	2140.9	4.0	6.4
2		2.118	2110.7	4.0	6.4
3		2.183	2176.4	4.0	6.3
3(A)	9.4	2.122	2114.9	4.0	6.4
3(B)		2.148	2141.2	4.0	6.3
4		2.094	2087.6	5.0	7.4
5	9.4	2.162	2155.2	5.0	7.4
6		2.155	2146.1	5.0	7.3
6(A)		2.096	2087.1	5.0	7.4
7	9.4	2.137	2128.5	6.0	8.5
8		2.123	2113.9	6.0	8.4
9		2.136	2127.0	6.0	8.3
<b>Promedios</b>		2.131	2124.3		
<b>Desv. Est.</b>		0.025	24.9		

En la Figura 19 se presenta el gráfico donde se puede determinar el porcentaje de agua óptimo para la máxima densidad.



**Figura 19:** Gráfica de los puntos escogidos para encontrar del contenido de humedad óptima para el **Agregado 1**.

Fuente: Las autoras

Observando el gráfico anterior se determinó que el contenido de agua óptima es de 7.2 %.

Una vez encontrado el porcentaje de agua óptima para la compactación se continuó para encontrar el porcentaje óptimo de emulsión asfáltica.

#### d) Contenido óptimo de emulsión asfáltica

Se realizaron los especímenes con un contenido de agua óptima de 7.2 %, con la variación del contenido de emulsión que se muestra en la Tabla 20 siguiente:

**Tabla 20.** Resultados para el contenido de emulsión óptima para el **Agregado 1.**

No. Espécimen	Emulsión asfáltica inicial PTA (%)	Contenido de agua óptimo PTA (%)	Gravedad específica bruta	Promedio Altura (mm)	Absorción de agua (%)
1	7.4	7.2	2.171	69.1	1.0
2		7.2	2.163	69.8	1.1
3		7.2	2.172	69.8	0.9
4		7.2	2.179	69.1	1.0
5		7.2	2.161	69.9	1.2
6		7.2	2.155	70.1	1.4
7	8.4	7.2	2.146	70.1	1.9
8		7.2	2.166	69.8	1.1
9		7.2	2.161	70.3	0.9
10		7.2	2.147	70.5	1.0
11		7.2	2.157	70.4	1.4
12		7.2	2.166	70.2	1.2
13	9.4	7.2	2.160	70.8	1.7
14		7.2	2.158	70.7	1.6
15		7.2	2.165	70.5	1.3
16		7.2	2.127	72.0	2.1
17		7.2	2.162	70.5	0.4
18		7.2	2.141	71.5	1.1
19	10.4	7.2	2.125	72.6	1.8
20		7.2	2.131	71.9	1.6
21		7.2	2.129	72.7	2.7
22		7.2	2.142	71.7	1.4
23		7.2	2.133	71.8	2.2
24		7.2	2.140	71.7	1.8
25	11.4	7.2	2.138	72.5	1.6
26		7.2	2.142	72.4	1.5
27		7.2	2.138	72.2	1.2
28		7.2	2.145	72.0	1.5
29		7.2	2.148	72.4	1.0
30		7.2	2.151	71.2	1.0
		<b>Promedios</b>	<b>2.151</b>	<b>71.0</b>	<b>1.4</b>
		<b>Desv. Est.</b>	<b>0.014</b>	<b>1.1</b>	<b>0.5</b>

Se procede entonces a determinar con cuál contenido de emulsión se obtiene el 4 % de vacíos, tal como se presenta en la Tabla 21.

**Tabla 21.** Resultados de porcentajes de vacíos para el contenido de agua óptimo para el **Agregado 1.**

No. Espécimen	Emulsión asfáltica inicial PTA (%)	Gravedad específica bruta	Densidad seca (Kg/m <sup>3</sup> )	Porcentaje de asfalto residual (%)	Porcentaje de vacíos totales (%)	Porcentaje de vacíos (%)
1	9.4	2.171	2171.2	11.6	13.86	13.85
2		2.163	2163.2	11.6	14.14	14.13
3		2.172	2171.6	11.6	13.82	13.81
4		2.179	2178.7	11.6	13.59	13.57
5		2.161	2161.1	11.6	14.29	14.27
6		2.155	2155.3	11.6	14.48	14.47
7		2.146	2146.4	13.1	13.32	13.31
8		2.166	2165.7	13.1	12.59	12.57
9		2.161	2161.3	13.1	12.71	12.69
10		2.147	2147.1	13.1	13.25	13.24
11		2.157	2156.9	13.1	12.86	12.85
12		2.166	2165.7	13.1	12.50	12.49
13		2.160	2159.8	14.7	11.20	11.19
14		2.158	2158.4	14.7	11.31	11.29
15		2.165	2165.0	14.7	11.02	11.01
16		2.127	2127.1	14.7	12.62	12.61
17		2.162	2161.8	14.7	11.18	11.17
18		2.141	2141.3	14.7	12.03	12.01
19		2.125	2124.8	16.3	11.24	11.23
20		2.131	2131.4	16.3	11.01	11.00
21		2.129	2129.2	16.3	11.06	11.05
22		2.142	2141.8	16.3	10.53	10.52
23		2.133	2133.5	16.3	10.90	10.89
24		2.140	2140.0	16.3	10.62	10.61
25		2.138	2138.1	17.8	9.23	9.21
26		2.142	2142.3	17.8	9.10	9.08
27		2.138	2138.3	17.8	9.27	9.26
28		2.145	2145.0	17.8	8.96	8.95
29		2.148	2147.9	17.8	8.82	8.80
30		2.151	2151.5	17.8	8.73	8.72
<b>Promedios</b>		<b>2.2</b>	<b>2.2</b>	<b>14.7</b>	<b>11.7</b>	<b>11.7</b>
<b>Desv. Est.</b>		<b>0.0</b>	<b>0.0</b>	<b>2.2</b>	<b>1.8</b>	<b>1.8</b>

A partir del análisis de los datos se descubrió que había sido dosificado erróneamente la cantidad de agua, por lo que no se logró el 4 % porcentaje de vacíos esperado. Será necesario realizar de nuevo la prueba calculando correctamente la cantidad de agua añadida a la mezcla de acuerdo a la cantidad de agua.

En la Figura 20 se muestra una imagen de los especímenes fabricados para los distintos contenidos de emulsión y agua.



a. Especímenes compactados con diferentes contenidos de emulsión.

**Figura 20:** Determinación del contenido de emulsión óptima para el **Agregado 1**.

Fuente: Las autoras

Por esta razón no se prosiguió con las demás pruebas de desempeño, pues deberán revisarse los contenidos de agua total de acuerdo a la cantidad de agua en la emulsión, y de esta manera encontrar el contenido de emulsión óptimo.

## 5.2 Asfalto rebajado

### 5.2.1 Resultados para el Agregado 1

#### a) Determinación de la temperatura de mezclado y compactación

Inicialmente se determinó la temperatura de mezclado cuando el asfalto rebajado alcanza una viscosidad de  $170 \pm 20$  centiStockes, esto es entre  $78 \text{ }^{\circ}\text{C}$  y  $84 \text{ }^{\circ}\text{C}$ . Este rango de

temperaturas se obtiene de un gráfico que muestra la relación entre la viscosidad y la temperatura del asfalto rebajado similar al de la Figura 8.

La temperatura de compactación se determinó para una viscosidad de  $280 \pm 30$  centiStokes después de haber perdido el 25 % del porcentaje añadido de disolvente para el asfalto rebajado MC-800, e introduciendo los datos en una gráfico de composición para este tipo de asfalto rebajado para una viscosidad a 60 °C, similar a la **Figura 8**, se obtiene un rango de temperaturas de compactación de 80 °C y 91 °C.

### b) Preparación de especímenes para varios contenidos de asfalto rebajado

Se prepararon cinco especímenes para compactar y dos especímenes para gravedad máxima teórica por cada contenido de asfalto rebajado de prueba 5.5 %, 6.0 %, 6.5 %, 7.0 % y 7.5 %. En la Tabla 22 se muestran las temperaturas de mezclado y compactación, medidas en el proceso de preparación de las muestras, para cada espécimen.

**Tabla 22.** Temperaturas de mezclado y compactación para el **Agregado 1**, variando el contenido de asfalto rebajado.

No. de espécimen	Porcentaje de asfalto rebajado PTA (%)	Temperatura Mezclado °C	Pérdida de solvente (%)	Temperatura compactación °C
1	5.5	80	25	90.0
2	6.0	79		88.1
3	6.5	82		88.0
4	7.0	84		89.0
5	7.5	85		90.0
	<b>Promedios</b>	<b>82</b>		<b>89.0</b>
	<b>Desv. Est.</b>	<b>3</b>		<b>1.0</b>

Para lo anterior se debió llevar a peso constante la muestra hasta una pérdida del 25 % del contenido inicial de solvente existente en el asfalto rebajado, antes de ser compactado. Para ello se introdujeron al horno cada espécimen, y en intervalos de 15 minutos a la temperatura de compactación más 11 grados ( $91 \text{ °C} + 11 \text{ °C} = 102 \text{ °C}$ ), hasta perder el 25 % del 25 % del solvente añadido al asfalto rebajado.

En este proceso el agregado debió calentarse 14 °C por encima de la temperatura de mezclado sin calentar el asfalto rebajado para llevar a cabo la mezcla, esto con el propósito de evitar que exista pérdida del solvente antes de ser compactado el espécimen.

### c) Determinación del contenido óptimo de asfalto rebajado

Se procede a obtener el porcentaje de vacíos para cada contenido de asfalto rebajado, llevando a cabo el ensayo de gravedad específica bruta y las gravedades máximas teóricas respectivas, el resumen de los resultados se muestra en la Tabla 23.

**Tabla 23.** Resultados del porcentaje de vacíos para el **Agregado 1**, para cada contenido de asfalto rebajado.

No. de espécimen	Porcentaje de asfalto rebajado PTA (%)	Gravedad específica bruta	Promedio Altura (mm)	Absorción de agua (%)	Gravedad máxima teórica	Porcentaje de vacíos (%)
1	5.5	2.283	65.4	2.1	2.524	9.6
2	6.0	2.349	63.3	0.6	2.497	5.9
3	6.5	2.299	65.0	1.1	2.488	7.9
4	7.0	2.334	64.3	0.5	2.467	6.5
5	7.5	2.331	64.6	0.2	2.454	5.0
	<b>Promedios</b>	<b>2.319</b>	<b>64.5</b>	<b>0.9</b>	<b>2.486</b>	<b>7.0</b>
	<b>Desv. Est.</b>	<b>0.027</b>	<b>0.8</b>	<b>0.7</b>	<b>0.027</b>	<b>1.8</b>

De lo anterior se tiene que, deberá aumentarse el contenido en uno o dos por ciento más de asfalto rebajado añadido para encontrar el 4 % de vacíos buscado en el diseño de la mezcla asfáltica en frío.

Además se deberá tener cuidado para asegurarse que todo el solvente se ha evaporado a la hora de realizar los ensayos de gravedad específica.

Se presentan las fotos con los resultados obtenidos con este ensayo.



a. Mezclado de los especímenes para diferentes contenidos de asfalto rebajado.



b. Especímenes compactados



c. Presencia de solvente en la mezcla con asfalto rebajado



d. Ensayo de gravedad máxima teórica

**Figura 21:** Especímenes de mezclas en frío con asfalto rebajado para el **Agregado 1**.

Fuente: Las autoras

## **CAPÍTULO 6 Conclusiones, recomendaciones y comentarios finales**

### **6.1 Conclusiones**

A pesar de que los datos no mostraron los resultados esperados, se logró detectar cuáles procedimientos en la implementación de los ensayos deberán ser corregidos y de esta forma llevar a cabo el diseño completo tanto en las mezclas en frío con emulsión como las mezclas en frío con asfalto rebajado.

Es importante verificar mediante eficiencia de tamizado si la granulometría obtenida mediante el método de cuarteo cumple con las especificaciones para este tipo de mezclas asfálticas. Dado que fue posible detectar algunas variaciones en los tamaños de las partículas visualmente.

En el proceso de mezclas asfálticas en frío con emulsión no se obtuvieron los porcentajes de vacíos esperados debido a que el contenido de humedad calculado aumentaba con forme se incrementaba el contenido de emulsión en 1 % sobre el porcentaje inicial encontrado.

En el momento de realizar el ensayo de gravedad máxima teórica de la mezcla en frío con asfalto rebajado se observó gran cantidad de solvente y asfalto desprendido de la mezcla, por lo que quizá sea necesario curar la mezcla a la misma temperatura que se sometieron los especímenes para compactación y que haya una pérdida suficiente de solvente antes de enfriarla muestra y realizar el ensayo de gravedad máxima teórica.

### **6.2 Recomendaciones**

Es necesario revisar la granulometría obtenida a partir de cuarteo, de manera que se cumpla con las especificaciones establecidas previamente para este tipo de mezclas asfálticas.

De acuerdo a los resultados obtenidos no es posible asegurar aún que las mezclas en frío con emulsiones de rompimiento lento y con asfalto rebajado cumplan con las

especificaciones, por lo que se recomienda corregir algunos procedimientos en ambos procesos, tales como el cálculo del contenido de agua total en la mezcla cuando se utiliza emulsión, dado que debe mantenerse constante el contenido de humedad óptimo, cada vez que se varíe la cantidad de emulsión agregada.

Al no culminar todos los ensayos de diseño se recomienda repetir las pruebas a partir de la obtención del contenido de emulsión óptima para las mezclas en frío con emulsión.

En el caso de mezclas con asfalto rebajado se debe llevar a cabo la compactación tal cual se describe en el procedimiento, pero es probable que se requiera eliminar completamente el solvente restante, por lo que podrían curarse las pastillas compactadas en un horno a 52 °C por una noche y pesarlas posteriormente a peso constante; con el fin de obtener el ensayo de gravedad específica bruta correctamente.

Por todo lo anterior, será necesario definir en una nueva propuesta una tercera etapa de este proyecto, de manera tal que se realicen los ensayos de diseño faltantes y los ensayos de desempeño asociados a cada tipo de mezcla en frío en este informe planteados. Así como realizar las pruebas en otros agregados que también cumplan con las granulometrías según especificaciones.

## CAPÍTULO 7 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. 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>
7. González Murillo, Claudio. Mezclas asfálticas en frío. Informe de proyecto final de graduación para obtener el grado de Licenciatura en Ingeniería Civil, 1997.
8. Martínez Martínez, Óscar. Reciclado de pavimentos flexibles con emulsiones asfálticas. Informe de proyecto final de graduación para obtener el grado de Licenciatura en Ingeniería Civil, 1997.
9. Ministerio de Obras Públicas y Transporte, Secretaría Técnica, Dirección de Carreteras. Manual de Shell Colombia. Bogotá, Colombia. 1992
10. Rodríguez G. Diego. Análisis de resistencia y durabilidad de mezclas asfálticas en frío. Informe de proyecto final de graduación para obtener el grado de Licenciatura en Ingeniería Civil, 2001.
11. Secretaría de Integración Económica Centroamericana SIECA, Manual Centroamericano de Especificaciones para la Construcción de Carreteras y Puentes Regionales. 2001