



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FES ARAGÓN

Incorporación del Protocolo AMAAC en Carreteras Federales

TESIS

Que para obtener el título de
Ingeniero Civil

PRESENTAN

Paola Ximena Olmedo Frías
Alberto Antonio Morales Lozada

DIRECTOR DE TESIS

Ing. Gabriel Ruiz González



Ciudad Nezahualcóyotl, Estado de México, 2019



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

AGRADECIMIENTOS

Durante la vida hay muchos retos que superar. Vamos aprendiendo conforme la vida nos va poniendo cada reto, cada prueba. Desde que nacemos empieza el aprendizaje, empezamos a descubrir lo que hay a nuestro alrededor, aprendemos a distinguir colores, sabores, incluso lo que está bien y lo que está mal y conforme vamos creciendo el nivel de aprendizaje también va aumentando. Entramos a la escuela y, desde entonces hasta este momento, la vida académica es parte fundamental de nosotros. Pasamos de un grado a otro, de un nivel al siguiente. Después de 15 años de estudiar nos encontramos con una de las decisiones más importantes de la vida, ¿qué profesión quiero estudiar? Esa decisión nos va a acompañar el resto de nuestras vidas. Después de unos años nos podremos parar y ver en retrospectiva, ¿realmente era la carrera que queríamos? La vida nos sigue dando lecciones y seguimos creciendo, nos ayuda forjar un carácter, a aprender el trato con la gente, a ser mejores cada día. Lo que a todos nos falla es el aprender a vivir.

Hoy hemos terminado esta etapa de la vida académica, no ha sido fácil, pero a pesar de las circunstancias que hemos vivido, lo logramos. Culminamos una carrera universitaria y hoy podemos decir es satisfactorio cerrar este ciclo para poder dar pie a abrir nuevos, y continuar con el crecimiento personal y profesionalmente.

Sin duda, hay personas que estuvieron con nosotros durante este proceso, algunas más, otras menos, pero que son importantes, hablamos de todos aquellos que, de alguna manera, nos ayudaron a llegar a este punto.

Queremos agradecer a la Honorable Universidad Nacional Autónoma de México y a la FES Aragón que, sin duda alguna, nos brindaron la oportunidad de estudiar una carrera con las mejores instalaciones y equipo posibles. A nuestros profesores, parte fundamental de la UNAM, que, sin duda, todo ese conocimiento y pasión por transmitirlo influyen de manera importante en el camino que, como profesionista, uno decide tomar. Y, en especial, queremos agradecer a nuestros padres y hermanos, que nos ayudaron a llegar hasta aquí, con regaños y felicitaciones por igual. Testigos del trabajo y esfuerzo que implicó este camino.

¡Muchas gracias!

ÍNDICE

• INTRODUCCIÓN	3
• CAPÍTULO I. Diseño y construcción de mezclas asfálticas en caliente de granulometría densa de alto desempeño.	5
• CAPÍTULO II. Aspectos a considerar en el diseño estructural de pavimentos asfálticos.	12
• CAPÍTULO III. Guía de diseño de mezclas asfálticas en caliente de granulometría densa de alto desempeño.	27
• CAPÍTULO IV. Guía de procedimiento constructivo para pavimentos con mezclas asfálticas en caliente de granulometría densa de alto desempeño.	66
• CAPÍTULO V. Guía de control y aseguramiento de calidad para mezclas asfálticas en caliente de granulometría densa de alto desempeño.	74
• CONCLUSIONES	111
• REFERENCIAS	112

INTRODUCCIÓN

En México, el 80% de las carreteras pavimentadas lo están con pavimentos asfálticos. Por ello, es importante tener una buena metodología para la elaboración de los pavimentos flexibles. La red nacional de carreteras constituye un patrimonio importante y valioso, por lo que debe gestionarse de manera adecuada.

Con el objeto de mejorar los procedimientos de diseño y construcción y mejorar los desempeños de las estructuras de pavimento, que permitan optimizar los costos de mantenimiento y rehabilitación, así como los costos de operación de los usuarios, en 2008, la Asociación Mexicana del Asfalto, A.C. (AMAAC), en colaboración con el Instituto Mexicano del Transporte (IMT), impulsaron metodología que incorpora nuevos procedimientos para una mejor caracterización de los materiales utilizados en una mezcla asfáltica, así como pruebas de desempeño que ayudan a evaluarla.

Esta metodología se denomina: Protocolo AMAAC “Diseño de mezclas asfálticas de granulometría densa de alto desempeño” (PA-MA 01). Por sus ventajas técnicas, el Protocolo AMAAC fue requerido por la Dirección General de Carreteras (DGC) de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT) para ser aplicado en diferentes tramos de prueba a lo largo de la República Mexicana. Hasta el momento hay más de 900 kilómetros construidos con mezclas asfálticas de alto desempeño.

El Protocolo AMAAC es una metodología creada por la Asociación Mexicana del Asfalto y el Instituto Mexicano del Transporte, necesaria para diseñar una mezcla asfáltica que se utiliza en la construcción de pavimentos para carreteras en donde se desee obtener altos niveles de desempeño, esto se refiere a la mezcla asfáltica elaborada en caliente resistente a las deformaciones plásticas, al fenómeno de fatiga y al daño por humedad, cuyo comportamiento es superior al de las mezclas asfálticas convencionales.

El Protocolo AMAAC, establece diferentes niveles de diseño para una mezcla asfáltica densa en función de la importancia de la carretera determinada por el nivel de tránsito o el desempeño deseado para la infraestructura que se requiere. En el Nivel I se considera un volumen de tránsito bajo, con un máximo de 1,000,000 de número de ejes equivalentes. El Nivel II va de 1,000,000 a 3,000,000 de ejes equivalentes en un nivel medio de tránsito. Para el Nivel III, los ejes equivalentes ya van desde 3,000,000 hasta 30,000,000 y un tránsito alto. El Nivel IV ya está considerado para autopistas de cuota importantes o vialidades urbanas muy grandes con un tránsito muy alto y más de 30,000,000 de ejes equivalentes.

Los ensayos utilizados en el protocolo AMAAC ya son de uso en nuestro país, por lo que no representa un cambio en la normativa actual. Un punto importante a considerar, es que el Protocolo AMAAC utiliza la clasificación de asfaltos PG. El grado de desempeño (PG por sus siglas en inglés, Performance Grade) es el rango de temperaturas, de máxima a mínima, entre las que un cemento asfáltico convencional o modificado se desempeña satisfactoriamente. El grado PG permite seleccionar el cemento asfáltico más adecuado para una determinada obra, en función del clima dominante, de la intensidad del tránsito esperada y de la velocidad de operación a que estará sujeta la carretera durante su vida útil.

Este trabajo busca ser un referente para los proyectistas, diseñadores y constructores de carreteras, para incrementar la utilización del Protocolo AMAAC tanto en el mantenimiento de la red carretera nacional, como en la construcción de nuevas autopistas.

Las carreteras federales en nuestro país sufren de constantes deformaciones y fallas que afectan al usuario, además de presentar una vida útil menor a la esperada o deseada de acuerdo al proyecto que se presenta. Esto conlleva a que los costos de mantenimiento, rehabilitación y recuperación se eleven más de lo debido, se afecte al tráfico y al usuario, además de la necesidad de incorporar los avances tecnológicos disponibles y aprovechar las ventajas que ofrecen en materia energética, menor impacto ambiental y menor costo.

Los daños que se presentan en los pavimentos asfálticos se deben a diferentes factores como lo son las temperaturas extremas del lugar donde se encuentran, la mala ejecución en el tendido y compactación de la mezcla asfáltica, así como de la mala calidad de los materiales utilizados para la fabricación de ésta, y si bien son factores que se pueden controlar, la presencia de una metodología más óptima ayudaría a mejorar los caminos por los que transitamos.

El problema en México, es la falta de una supervisión y control de calidad, ya que se busca gastar menos en la construcción de caminos, debido a ello la durabilidad se ve comprometida con el uso de materiales de baja calidad sin tener preocupación en el control en laboratorio de dichos materiales. Los resultados son los ya referidos anteriormente.

Esto lleva a fijarnos en la metodología de mezclas de alto desempeño que este trabajo presenta, dando una opción óptima para la construcción de pavimentos en carreteras federales. Dicha metodología incluye especificaciones para el debido control de calidad, así como la selección de los materiales, los cálculos a realizar, como todo lo necesario para poder llevar a cabo adecuadamente esta metodología.

Más allá de lo aquí expuesto, existe una amplia experiencia de ingenieros y personal técnico para la construcción de carreteras y pavimentos duraderos que benefician al usuario. Es así, como se pretende dar a conocer la metodología de mezclas asfálticas de alto desempeño para que estos ingenieros y personal técnico sigan aplicando sus conocimientos, para una opción más eficiente.

CAPÍTULO I. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE DE GRANULOMETRÍA DENSA DE ALTO DESEMPEÑO

A. CONTENIDO

Este capítulo comprende los requisitos y las características de calidad para ser utilizados en el diseño y construcción de la Mezcla Asfáltica de Granulometría Densa de Alto Desempeño (tamaño nominal 19 mm), para proyectos de niveles de tránsito mayor o iguales a diez millones de ejes equivalentes y menores o iguales a 30 millones de ejes equivalentes.

El presente capítulo está basado en el Protocolo AMAAC vigente.

B. DEFINICIÓN

Las carpetas asfálticas con mezcla en caliente son aquellas que se construyen mediante el tendido y compactación de una mezcla de materiales pétreos y material asfáltico.

La carpeta asfáltica tendrá un espesor adecuado para desempeñar la función estructural de soportar y distribuir la carga de los vehículos hacia las capas inferiores del pavimento.

La mezcla asfáltica de alto desempeño es una mezcla especialmente diseñada y construida para resistir deformaciones permanentes, fatiga y tener mayor resistencia a los agentes ambientales.

La mezcla asfáltica es un material compuesto de materiales pétreos, material asfáltico, filler y en algunos casos algún aditivo.

C. REQUISITOS DE CALIDAD DE LOS MATERIALES

La selección del material con la que se realizará la mezcla es importante; si se considera que el material pertenezca a un banco o a más de uno, el mezclado del material pétreo deberá ser homogéneo en ambos casos. Cabe mencionar que la selección depende de la calidad que ofrezca el banco, así como la localización de éste para el acarreo a la planta de asfalto. Una vez seleccionado, se requerirá que cumpla con las especificaciones que a continuación se mencionan.

Todas las pruebas para definir la calidad se desarrollarán por un laboratorio con reconocimiento AMMAC-IMT.

C.1 AGREGADO GRUESO.

El agregado grueso (material pétreo retenido en la malla No. 4) será de un banco aprobado por la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT), triturado totalmente a un tamaño nominal de 19 mm ($\frac{3}{4}$ "), debiendo cumplir éste con las especificaciones que se muestran en la **TABLA 1**.

TABLA 1.- Características de calidad del agregado grueso¹

Característica	Norma	Especificación
Desgaste Los Ángeles, %	ASTM C131	30 máx.
Desgaste Microdeval, %	AASHTO T327 / ASTM D6928	18 máx.
Intemperismo acelerado, %	AASHTO T 104 /ASTM C88	15 máx. para sulfato de sodio 20 máx. para sulfato de magnesio
Caras fracturadas, % (2 caras o más)	ASTM D 5821	90 mín.
Partículas planas y alargadas, %	ASTM D 4791	5 a 1 %, 10 máx. ²
Densidad del agregado grueso	ASTM C 127	≥ 2.4
Absorción del agregado grueso, %	ASTM C 127	Reportar
Adherencia con el asfalto, % de cubrimiento	Recomendación AMAAC RA-08/2010	90 mín.

C.2 AGREGADO FINO.

El agregado fino (material que pasa la malla No. 4) constituye parte de la mezcla asfáltica, siendo éste de un banco aprobado por la SCT, cumpliendo con las especificaciones marcadas en la .

¹ PA-MA 01/2013

² Suma de %planas + %alargadas

TABLA 2.- Características de calidad del agregado fino.³

Característica	Norma	Especificación
Equivalente de arena, %	ASTM D 2419	50 min.
Angularidad, %	AASHTO T 304	40 mín.
Azul de metileno, mg/g	Recomendación AMAAC RA-05	15 máx.
Densidad del agregado fino	ASTM C 128	≥ 2.4
Absorción del agregado fino	ASTM C 128	Reportar

C.3 RELLENO MINERAL DE APORTE (FILLER).

Se define como filler de aporte a la fracción de material que pasa el tamiz No. 200 (0.075 mm) y que se incorpora a la mezcla de manera complementaria, normalmente con el fin de cumplir con los requisitos granulométricos establecidos. El filler de aporte suele ser ceniza volante o material proveniente de la trituración de agregado fino. Este material se caracteriza por estar libre de aglomeraciones cuando se encuentra seco, además de estar libre de impurezas orgánicas y tener un índice de plasticidad no mayor a 4, así como un valor de azul de metileno no mayor a 15.

C.4 MATERIAL ASFÁLTICO.

En la carpeta asfáltica de alto desempeño, se utilizará un material asfáltico grado PG que cumpla con los requisitos de calidad indicados en la **TABLA 3**.

El grado PG del material asfáltico será seleccionado de acuerdo a las condiciones de clima y tránsito del proyecto y será aprobado por la SCT.

La mayor parte de los proyectos, por condiciones de tránsito requieren un grado PG a la alta temperatura de 76 y por las condiciones climáticas de un grado PG a la baja temperatura de -16.

³ Tabla complementada de PA-MA 01, 2013. p. 10

TABLA 3.- Características de calidad de un asfalto modificado⁴

Característica	Norma	Especificación
Punto de inflamación Cleveland, °C	M-MMP-4-05-007/00	230 mín.
Viscosidad dinámica a 135°C, Pa.s	M-MMP-4-05-005/02	3 máx.
Punto de reblandecimiento, °C	M-MMP-4-05-009/00	55 mín.
Recuperación elástica por torsión a 25°C, %.	M-MMP-4-05-024/02	35 mín.
Módulo reológico de corte dinámico (G*/sen ω), 76°C, KPa	M-MMP-4-05-025/02	1.0 mín.
Después de prueba de película delgada y aire de horno (ASTM D2872)		
Pérdida de masa, %	ASTM D2872	1.0 máx.
Módulo reológico de corte dinámico (G*/sen ω), 76°C, KPa	M-MMP-4-05-025/02	2.2 mín.
Recuperación elástica en ductilómetro a 25°C, %	M-MMP-4-05-026/02	60 mín.
Después de prueba de película delgada y aire de horno @ 100°C (ASTM D6521)		
Rigidización (G*/sen ω), 34°C KPa,	ASTM D6648	5,000 máx.
Rigidización de Flexión - 6°C S(t); Mpa, Valor "m"	ASTM D6648	300 máx. 0.3 mín.

C.4.1 CALIDAD DEL MATERIAL ASFÁLTICO

La calidad del material asfáltico se regulará con una certificación expedida por el fabricante del mismo. Para la aceptación en campo, la constructora y la supervisión, serán responsables de muestrear cada carro tanque suministrado, para realizar como mínimo las siguientes pruebas: copa de Cleveland, punto de reblandecimiento, separación diferencia de anillo y esfera, así como recuperación elástica por torsión, dichas pruebas se realizarán bajo los parámetros de la normativa para asfaltos modificados (N-CTM-4-05-002/06).

De acuerdo a las especificaciones de normativa, las muestras del material asfáltico se muestrean en tres latas de un galón de capacidad (4 litros) cada una, cerradas y

⁴ N-CTM-4-05-002/06, 2006

firmadas por el proveedor, el cliente y la empresa a cargo de la supervisión, quedando una muestra para la supervisión quien realizará sus pruebas en un laboratorio certificado (**TABLA 3**) y comparará los resultados con la empresa constructora, verificando la calidad del material, así como que haya realizado adecuadamente las pruebas.

D. DISEÑO DE LA MEZCLA.

El diseño de la mezcla se realizará por un diseñador y laboratorio con reconocimiento AMAAC – IMT, considerando como mínimo las propiedades volumétricas, la evaluación de la susceptibilidad a la humedad y la evaluación de la susceptibilidad a la deformación permanente. Las temperaturas de mezclado y compactación serán las recomendadas por el proveedor del producto asfáltico.

Para la fabricación de los especímenes, la mezcla asfáltica será compactada en el Compactador Giratorio de acuerdo al número de giros especificados en la **TABLA 5**.

La selección del contenido de material asfáltico estará en función del cumplimiento de las propiedades volumétricas indicadas en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

La granulometría de la mezcla asfáltica se apegará a la mencionada en la **TABLA 4**, en el eje horizontal se graficará la abertura de la malla en mm elevada a la 0.45 y en el eje vertical el por ciento que pasa, alojándose dentro de los puntos de control. La línea de Máxima densidad es una línea recta que se traza del tamaño máximo del agregado, del 100% de material que pasa al origen. FIGURA 1.

1. **Tamaño Máximo:** Un tamaño mayor que el tamaño nominal.
2. **Tamaño Nominal:** Un tamaño mayor que la primera malla o tamiz que retiene más del 10% de agregado.

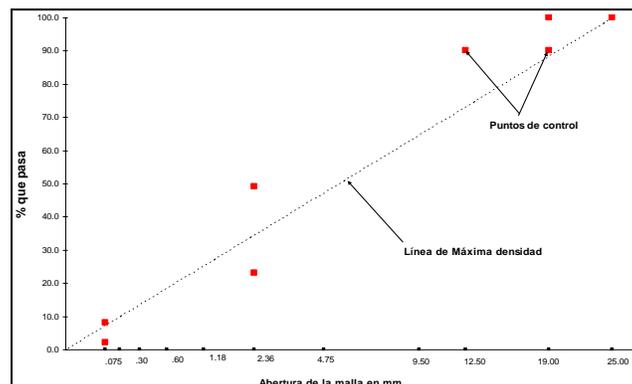


TABLA 4.- Puntos De Control en la Granulometría para Tamaño Nominal de ¾" (19mm).⁶

Abertura de la malla (mm)	% que pasa	
	Mín	Máx
50.00		
37.50		
25.00	100	
19.00	90	100
12.50		90
9.50		
4.75		
2.36	23	49
0.08	2	8

TABLA 5.- Energía de Compactación en el Compactador Giratorio.⁷

Parámetros de Compactación		
Nini	Ndiseño	Nmáx
8	100	160

TABLA 6.- Requerimientos Volumétricos.⁸

Densidad requerida (% de la gravedad específica teórica máxima - Gmm)			Vacíos de agregado mineral mínimo en % (tamaño nominal 19 mm)	Vacíos llenos de asfalto en %	Relación filler asfalto
Nivel de Compactación giratoria					
Nini	Ndis	Nmáx			
≤ 90.5	96	≤ 98	13	65 - 78	0.6 - 1.2

⁵ PA-MA 01, 2013. p. 17

⁶ Tomada de la tabla de PA-MA 01, 2013. p. 7

⁷ Tomada de la tabla de PA-MA 01, 2013. p. 10

⁸ Tomada de la tabla de PA-MA 01, 2013. p. 9

E. CONSTRUCCIÓN

Se desarrollará éste tema en el capítulo IV: “Guía de procedimiento constructivo”.

E.1 EJECUCIÓN.

Durante la ejecución de la obra se compactará del noventa y cuatro por ciento (94%) al noventa y ocho por ciento (98%) de la Gravedad Específica Teórica Máxima (Gmm) de la mezcla asfáltica, obtenida en campo.

Previamente a los trabajos, se construirá un tramo de prueba de 200 metros de longitud, donde se realizarán las siguientes evaluaciones: propiedades volumétricas, Gravedad Específica Compactada (Gmb), Gravedad Específica Teórica Máxima (Gmm), ensayo de susceptibilidad a la deformación permanente y ensayo de susceptibilidad a la humedad. En caso de que el tramo de prueba construido no cumpla con todos los requisitos para los cuales se construye un tramo de prueba, se ejecutarán todos los tramos de prueba necesarios hasta cumplir con tales requisitos.

F. CONTROL DE CALIDAD

Se desarrollará este tema en el capítulo V: “Guía de control y aseguramiento de calidad.”

El profesional técnico responsable del control de calidad de los trabajos contará con la preparación y experiencia necesaria para desarrollar adecuadamente los trabajos referentes al control de calidad de mezclas asfálticas en caliente de granulometría densa de alto desempeño; además de identificar sus cargos a ocupar.

Tanto el personal técnico como el laboratorio deberán contar con reconocimiento AMAAC-IMT, al menos en las categorías de agregados y mezclas asfálticas.

CAPÍTULO II. ASPECTOS A CONSIDERAR EN EL DISEÑO ESTRUCTURAL DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS.

A. INTRODUCCIÓN

Este documento pertenece a una serie de anexos técnicos que conforman los documentos de apoyo para proyectos con mezclas asfálticas en caliente de alto desempeño y que tienen como propósito orientar a los ingenieros y técnicos especialistas en pavimentos asfálticos en los tópicos relacionados al diseño, control de calidad, supervisión y construcción de una obra.

B. ALCANCE

Se presentan de manera general los lineamientos del diseño estructural de pavimentos flexibles y los conceptos principales que involucra, no pretende ser una guía de diseño ya que cada metodología tiene una teoría particular que se recomienda revisar minuciosamente antes de aplicarla.

Así mismo se mencionan los principales métodos de diseño estructural usados en México, que, si bien no son los únicos, sí son los más usados en la práctica relacionada a los pavimentos flexibles.

C. DESCRIPCIÓN DE DISEÑO ESTRUCTURAL

Un pavimento puede expresarse como un conjunto de capas, paralelas entre sí, construidas con geo materiales especialmente seleccionados para que actúen en conjunto formando una estructura, que van desde la parte superior de las terracerías hasta la superficie de rodamiento.

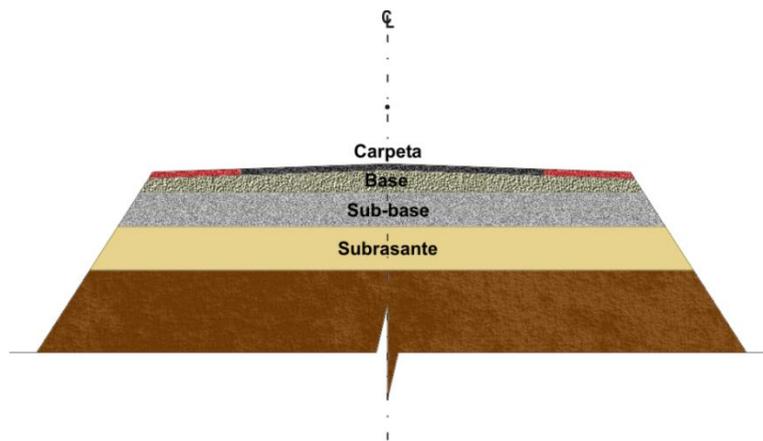


FIGURA 1.- Estructuración típica de un pavimento flexible¹

¹ Manual de Supervisión MS-3, 2012. p. 34

El diseño estructural del pavimento se refiere entonces al proceso de ingeniería que se encarga de revisar o proponer una estructura multicapa debidamente caracterizada mediante sus parámetros de resistencia y calidad de los materiales usados, que sea capaz de ser resistente a las condiciones del clima y del tránsito de diseño en el horizonte de proyecto propuesto.

Un pavimento tendrá que cumplir con lo siguiente:

- Resistir cargas impuestas por el tránsito y su estimación de crecimiento
- Resistir los agentes del Intemperismo
- Textura adecuada
- Ser durable
- Condiciones de drenaje adecuadas

Las principales funciones de un pavimento son las de transmitir los efectos del tránsito adecuadamente a las terracerías y proporcionar una superficie de rodamiento cómoda y segura para los usuarios.

Los pavimentos se diseñan para un número de repeticiones de cargas esperadas (periodo de diseño). El comportamiento previsto al final del periodo presentará el nivel de deterioro que el mismo diseño establece.

C.1 TIPOS DE PAVIMENTO

Existen tres principales tipos de pavimentos:

- Los pavimentos flexibles son sistemas multicapas comúnmente con mejor calidad de materiales en la parte superior donde la intensidad de los esfuerzos es más alta, y menor calidad de los materiales en las capas inferiores donde los esfuerzos son más bajos. En la **FIGURA 1** se muestra una estructura típica de un pavimento flexible, este principio de configuración hace que puedan permitirse materiales locales cuando su calidad cumple con la de la capa en cuestión.
- Los pavimentos rígidos se construyen con una losa de concreto hidráulico con cemento portland y se analizan estructuralmente con la teoría de placas en vez de la teoría elástica multicapa como los flexibles, la razón de esto es porque la rigidez es mayor en una losa de concreto hidráulico y distribuye los esfuerzos en un área más amplia.

- Los pavimentos compuestos se conforman de una capa de mezcla asfáltica en caliente comúnmente colocada sobre una de concreto hidráulico, esta configuración resulta con características muy buenas en cuanto al comportamiento de un pavimento. Ya que el concreto hidráulico provee una base muy fuerte y la mezcla asfáltica provee una superficie cómoda y no reflejante. Sin embargo, este tipo de pavimento es muy caro y es raramente usado como un pavimento nuevo.

C.2 CRITERIOS DE DISEÑO Y ESTRUCTURACIÓN DE UN PAVIMENTO

Los principios de diseño aquí mencionados buscan obtener estructuras adecuadas en las cuales se optimice el costo, la capacidad estructural, aspectos constructivos y durabilidad.

Para lograr esta optimización se busca:

- Producir un balance estructural entre las capas, de modo que las propiedades de cada capa tengan relación con las respuestas críticas o índice de servicio a las cuales están sometidas según la profundidad de cada una.
- Hacer uso de asfalto en el mejoramiento de aquellas capas que mejor aprovechan las propiedades aglutinantes de estos materiales. (capas estabilizadas).
- Diseñar para un buen comportamiento ante la sobrecarga del tránsito, es decir, que resistan las deformaciones unitarias máximas debidas al exceso de peso de los vehículos de carga que circulan en el país.
- Diseñar para un período mínimo de 20 años, o aquel periodo de acuerdo a la importancia del camino o a los requerimientos del proyecto.
- Presentar varias alternativas de diseño que permitan optimizar el uso de materiales locales o modificados que resulten en alternativas adecuadas en la relación beneficio – costo.

C.3 CARACTERÍSTICAS DEL PROYECTO

Con base en los estudios realizados, volúmenes de tránsito, calidad de los materiales, y sus valores de resistencia, se presentarán propuestas según se indique en cada proyecto particular.

El diseño estructural del pavimento incluirá de manera enunciativa, mas no limitativa, lo siguiente: el volumen y las características del tránsito, la vida útil u horizonte de proyecto del pavimento, el clima, los materiales que lo constituyen y las características

geotécnicas de la subrasante, el diseño de la mezcla, y demás aspectos de acuerdo con las normas, especificaciones y manuales respectivos.

El trabajo deberá ser entregado de acuerdo a los lineamientos generales para el procedimiento constructivo del pavimento propuesto y, en su caso, elaborar las especificaciones técnicas que regirán en la etapa de construcción (Capítulo IV. Guía de procedimiento constructivo)

El proyecto de diseño estructural del pavimento tendrá los siguientes documentos:

1. Índice
2. Introducción
3. Objetivo del estudio.
4. Descripción del tramo en estudio.
 - 4.1 Localización.
 - 4.2 Antecedentes de construcción.
 - 4.3 Características geométricas de la carretera.
5. Datos generales.
 - 5.1 Topografía.
 - 5.2 Geología.
 - 5.3 Clima.
6. Resultados de ensayos de laboratorio para obtener calidad de los materiales y el procedimiento de prueba utilizado, y toda la información técnica que sustente el cumplimiento de calidad de los materiales propuestos.
7. Propuesta del diseño del pavimento
8. Memoria de cálculo
 - 8.1 Estudio de tránsito. (Volumen, FDS, FDC, tasa de crecimiento, etc.)
 - 8.2 Métodos de diseño.
 - *Instituto de ingeniería de la UNAM
 - *AASHTO 93
 - *Revisión por el IMT-PAVE (versión más reciente)
9. Análisis económico de las alternativas propuestas.
10. Tabla resumen de bancos
11. Generadores de cantidades de obra
12. Procedimiento de construcción y especificaciones particulares y generales
13. Secciones estructurales tipo de pavimento
14. Secciones tipo de las obras complementarias de drenaje

D. DIFERENCIA ENTRE DISEÑO ESTRUCTURAL DE UN PAVIMENTO FLEXIBLE Y DISEÑO DE LA MEZCLA ASFÁLTICA.

D.1 DISEÑO ESTRUCTURAL. Proceso de ingeniería que se encarga de proponer la configuración o espesores de cada una de las capas que componen el pavimento (Ver **FIGURA 1**). Este proceso comprende los métodos de diseño que se mencionan en el inciso F.

D.2 DISEÑO DE LA MEZCLA ASFÁLTICA. Consiste en encontrar la proporción de los materiales que componen la mezcla asfáltica (asfalto, material pétreo, *filler* y aditivos), para asegurar su adecuado desempeño. El diseño de la mezcla asfáltica se utiliza para asegurarse que su comportamiento cumple con el especificado en el diseño estructural. El procedimiento de diseño de la mezcla asfáltica se encuentra en el Capítulo III. Guía de diseño

E. CONCEPTOS GENERALES SOBRE MÓDULOS ELÁSTICOS

E.1 MÓDULO ELÁSTICO O MÓDULO DE YOUNG. Las teorías de análisis estructural de materiales requieren como parámetro de entrada para determinar esfuerzos: deformaciones y deflexiones, lo que fue llamado por Hooke el módulo del material. De la resistencia de materiales se sabe que el módulo de un material en su forma más sencilla es la relación que se obtiene dividiendo el esfuerzo aplicado entre la deformación unitaria. Eso es lo que se conoce como módulo elástico o módulo de Young. En la ingeniería existen muchos tipos de módulos, todos ellos relacionan los esfuerzos inducidos entre las deformaciones observadas, la idea es conocer bajo qué condiciones de carga o de prueba se someten los materiales para obtener tal módulo característico. En el caso del módulo de Young típicamente se usa el ejemplo de un resorte o una barra sometida a una carga, y con base en la determinación de la elongación, que es constante a la fuerza aplicada, se puede determinar el módulo (**FIGURA 2**).

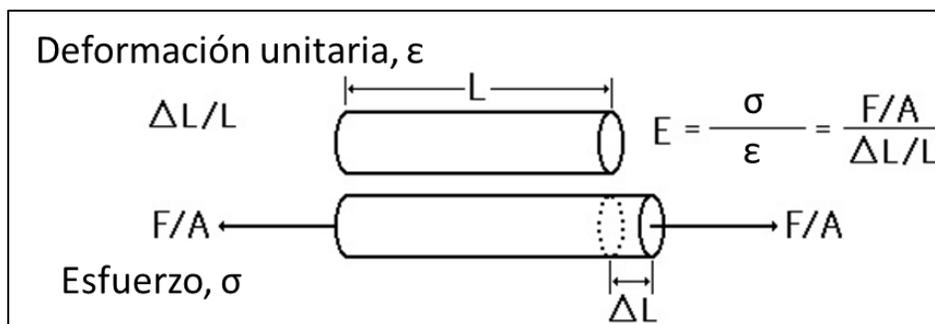


FIGURA 2.- Concepto del Módulo Elástico, E

E.2 MÓDULO RESILIENTE. El módulo resiliente es el módulo elástico que se utiliza en la teoría elástica multicapa para pavimentos. Es muy conocido que la mayoría de los materiales para pavimentos no son elásticos, pero experimentan alguna deformación permanente después de cada aplicación de carga. Sin embargo, si la carga es pequeña comparada con la resistencia de los materiales y se repite un gran número de veces, la deformación bajo cada repetición de carga se vuelve completamente recuperable (y proporcional a la carga); entonces puede considerarse elástica.

E.3 MÓDULO RESILIENTE EN SUELOS. La **FIGURA 3** muestra la deformación unitaria de un espécimen bajo carga repetida. En la etapa inicial de aplicación de la carga existe una considerable de formación permanente, indicado como deformación plástica. Cuando el número de repeticiones crece, la deformación plástica debida a cada repetición de carga disminuye. Después de cierto número de ciclos, la deformación es prácticamente recuperable (ϵ_r).

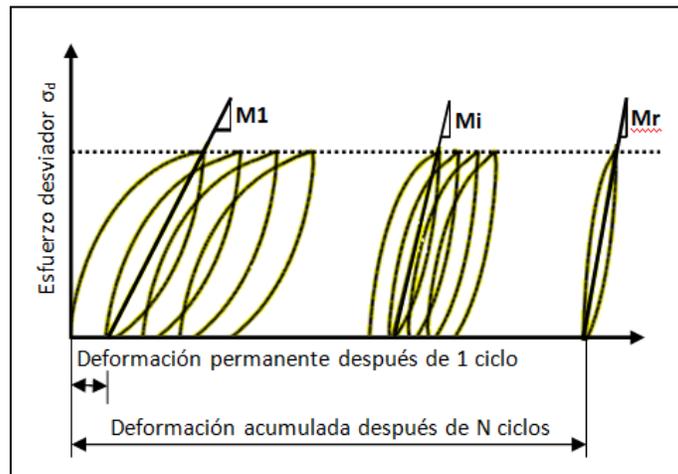


FIGURA 3. Deformaciones unitarias bajo cargas repetidas.²

El módulo resiliente se resume como el módulo elástico basado en la deformación recuperable bajo carga repetida. Está definido por:

$$M_R = \frac{\sigma_d}{\epsilon_r} \quad (1)$$

Donde (σ_d) es el esfuerzo desviador, el cual es el esfuerzo axial en una prueba a compresión sin confinamiento o el esfuerzo axial excedente a la presión de confinamiento en una prueba de compresión triaxial.

² Publicación Técnica 256, 2004. p. 15

Dado que la carga aplicada es usualmente pequeña, la prueba de módulo resiliente es una prueba no destructiva, y un mismo espécimen puede ser usado para otras pruebas con diferentes cargas o condiciones ambientales, la norma para realizar esta prueba es la AASHTO T307.

E.4 MÓDULO RESILIENTE EN MEZCLAS ASFÁLTICAS. El módulo resiliente es determinado mediante un ensayo de cargas repetidas en modo de tensión indirecta. El cual está descrito en la Norma ASTM D7369. El espécimen de prueba utilizado tiene 100 mm de diámetro y 38.5 mm de espesor. Se utiliza una señal de sollicitación de tipo sinoidal en compresión. **FIGURA 4.**

El ensayo consiste en aplicar una sollicitación de 0.1s y 0.9 s de reposo. Durante el ensayo se miden las deformaciones verticales y horizontales, lo que permite calcular el valor del módulo y el Coeficiente de Poisson.



FIGURA 4.- Ensayo de módulo resiliente en mezclas asfálticas³

E.5 MÓDULO DINÁMICO. El módulo dinámico es uno de los diferentes métodos para describir la relación esfuerzo deformación de materiales viscoelásticos, por lo que solo aplica para la caracterización mecánica de las mezclas asfálticas. El módulo dinámico se compone de una parte real y una imaginaria, donde la primera representa la rigidez elástica de la mezcla asfáltica y la parte imaginaria caracteriza el amortiguamiento o viscosidad de los materiales.

La prueba de módulo dinámico se elabora con especímenes cilíndricos de 100 mm de diámetro y 150 mm de altura, sujetos a una sollicitación sinusoidal en compresión a esfuerzo controlado. A partir de las mediciones de las deformaciones axiales se pueden medir el módulo dinámico y el ángulo de fase de la mezcla asfáltica.

³ Foto de laboratorio

El módulo dinámico combina varias frecuencias (generalmente 5: 0.1, 1, 5, 10, 25 Hz) y varias temperaturas de ensayo (4.4, 21.1, 37.5 y 54 °C) para determinar lo que se llama curva maestra del material. La curva maestra permite tener en un solo gráfico a una temperatura de referencia, el módulo del material en un espectro importante de frecuencias. Para pasar de cada combinación de temperatura-frecuencia se deben usar factores de corrección y modelación matemática para generar una única curva a la temperatura de referencia deseada. La prueba del módulo dinámico se obtiene con la prueba AASHTO T 342. **FIGURA 5.**

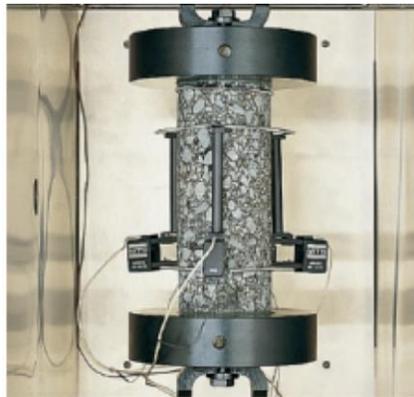


FIGURA 5.- Ensayo de módulo dinámico en mezclas asfálticas ⁴

F. METODOLOGÍAS DE DISEÑO DE PAVIMENTOS FLEXIBLES UTILIZADAS EN MÉXICO

Existen diferentes metodologías para el diseño de pavimentos flexibles, y se considera pertinente aclarar los siguientes puntos sobre ellas.

Cada método se basa en su propia teoría de análisis, que, si bien los lineamientos son los mismos, sus ecuaciones y procedimientos de calibración proceden de diferentes orígenes, lo que explica que no existe un procedimiento único donde se obtengan los mismos resultados.

El buen comportamiento de un pavimento dependerá más de los materiales empleados en construirlo y de las condiciones de trabajo de los mismos (por ejemplo, drenaje y subdrenaje), que, del uso preferente de un determinado método de diseño, aunque siempre se requiere la experiencia técnica del diseñador en la selección de los valores de resistencia adecuados para las capas propuestas.

El comportamiento de los pavimentos flexibles depende en gran medida de condiciones no incluidas necesariamente en los métodos de diseño estructural. La temperatura, las condiciones de drenaje regional, la Hidrología y otras pueden jugar papeles muy

⁴ Foto de laboratorio

importantes y frecuentemente pueden ser objeto de consideración del responsable del diseño geométrico y geotécnico de la carretera, con muy adecuadas repercusiones en el resultado final.

El uso de distintos métodos de diseño para valorar el proyecto final también tiene que ver en el origen de los métodos donde el tránsito con el cual se calibraron los modelos no representa los grandes volúmenes de tránsito actuales y la extrapolación de las ecuaciones de diseño, fueron hechas posteriormente. La idea es presentar diferentes resultados comparativos entre sí, que ayuden al tomador de decisiones a tener un panorama más amplio.

De forma complementaria, la tendencia en la práctica internacional del diseño de pavimentos se dirige hacia el uso de los métodos empírico-mecanicistas, que pretenden relacionarse directamente con el comportamiento esperado del pavimento, por eso se pide de manera adicional a los diseños típicos usados en México que, de manera complementaria, se incluya una verificación con el software del IMT-PAVE, adicional al diseño elegido.

Finalmente, cuando el tránsito para el carril de diseño sea superior a los 30 millones de ejes equivalentes, se propone que el proyectista elija un método adicional con enfoque mecanicista empírico donde se tenga una alternativa más de comparación en el diseño, y que esté sustentada técnicamente en la memoria de cálculo del proyecto. Por ejemplo, Per Road, DAMA, Darwin ME, IMT PAVE, etc.

F.1 MÉTODO DEL INSTITUTO DE INGENIERÍA DE LA UNAM.⁵

Desde hace aproximadamente tres décadas, los proyectistas de carreteras han contado en México con un método de diseño para pavimentos desarrollado por el Instituto de Ingeniería de la UNAM, a petición de la entonces Secretaría de Obras Públicas, luego SAHOP y ahora SCT. Este método partió del análisis de datos experimentales en tramos de prueba, en carreteras en servicio, de investigación teórica y de experimentación en laboratorio en la pista circular de pruebas, que influyó más recientemente en sucesivos perfeccionamientos. Actualmente el método está preparado para ser manejado con la ayuda de gráficas, con calculadoras programables o con la ayuda del cómputo. El conjunto del trabajo de años del Instituto de ingeniería de la UNAM se encuentra en la publicación No. 325 de dicha institución que data de 1974. Este método considera como datos de entrada básicos: el tipo de carretera, el número de carriles, la vida de proyecto, el tránsito diario promedio anual (TDPA), tasa de crecimiento y variables adicionales sobre características del terreno y materiales, así como de climas, nivel freático y precipitación pluvial.

⁵ Metodología de diseño de pavimentos desarrollada por el Instituto de Ingeniería de la UNAM

Como guía para el proyectista, se recomienda la estimación de un Valor Relativo de Soporte crítico (VRS crítico) para las condiciones previamente dadas, para las capas no estabilizadas. Para el caso de las capas estabilizadas se utiliza el módulo elástico.

El método de la UNAM fue calibrado con un módulo elástico cuyo valor típico de referencia es de 35 000 kg/cm²; se recomienda seguir usando este valor. Las mezclas en caliente de granulometría densa de alto desempeño, cumpliendo con los lineamientos del capítulo III. “Guía de Diseño”, aseguran que se obtengan valores de módulos elásticos que garantizan el valor de referencia del método de la UNAM.

F.2 MÉTODO AASHTO 93⁶

El método de la AASHTO, versión 1993, describe con detalle los procedimientos para el diseño de la sección estructural de los pavimentos flexibles y rígidos de carreteras.

Los procedimientos involucrados en el actual método de diseño, versión 1993, están basados en las ecuaciones originales de la AASHTO que datan de 1961, producto de las pruebas en Ottawa, Illinois, con tramos a escala natural y para todo tipo de pavimentos. La versión de 1986 y la actual de 1993 se han modificado para incluir factores o parámetros de diseño que no habían sido considerados y que son producto de la experiencia adquirida por ese organismo entre el método original y su versión más moderna, además de incluir experiencias de otras dependencias y consultores independientes.

El diseño está basado primordialmente en identificar o encontrar un “número estructural SN” para el pavimento flexible que pueda soportar el nivel de carga solicitado. Para determinar el número estructural SN requerido, el método proporciona una ecuación general que involucra los siguientes parámetros:

- El tránsito en ejes equivalentes acumulados para el período de diseño seleccionado, W_{18} .
- El parámetro de confiabilidad, R .
- La desviación estándar global, S_o .
- El módulo de resiliencia efectivo del material usado para la subrasante, M_r .
- La pérdida o diferencia entre los índices de servicios inicial y final deseados, Δ_{PSI}

F.3 IMT-PAVE⁷

El IMT-PAVE es una herramienta informática para el diseño de pavimentos mediante una metodología empírico mecanicista que, sin descuidar otros factores, pone un énfasis en el concepto de espectro de carga para relacionarlo con el de espectro de daño, a través del análisis de esfuerzos y deformaciones en la estructura de pavimento y su correlación con los principales tipos de deterioros que presenta

Las componentes de entrada al proceso de diseño se refieren a la geometría de la estructura; básicamente son los espesores de cada capa; las propiedades de los materiales que conforman cada una de esas capas que serán módulos dinámicos (AASHTO T 342) para la carpeta y resilientes (AASHTO T307) para las capas inferiores, y el nivel de tránsito vehicular definido por su espectro de distribución de cargas. La selección del diseño inicial consiste en una primera estimación de valores para esas componentes de entrada

A partir de la respuesta estructural en el pavimento se calcula el nivel de daño esperado en el período de diseño, para los dos tipos de deterioro principales que se presentarán; estos son agrietamientos por fatiga y deformaciones permanentes.

Calculados los niveles de deterioro para el período de diseño, se introduce el concepto de vida remanente, el cual es el inverso del daño acumulado en el periodo de diseño y determinará cuando una sección ha excedido o no el valor máximo de daño acumulado.

La idea fundamental es la de poder garantizar el desempeño del pavimento a lo largo de su vida de proyecto. Esto significa garantizar que los niveles de agrietamiento y de deformación permanente, se mantendrán dentro de un rango ideal, que dependerá de la importancia de la red carretera de que se trate.

Cabe destacar que esta herramienta de diseño pone especial énfasis en las capas inferiores o la interfaz entre la estructura y las terracerías, siendo esta parte del pavimento la que requerirá especial cuidado en su diseño y construcción para el correcto comportamiento durante su vida de proyecto.

F.4 NOTA SOBRE LAS METODOLOGÍAS DE DISEÑO Y SUS PARÁMETROS DE RESISTENCIA

Como se ha mencionado, todos los métodos de diseño utilizan parámetros de resistencia basados en un ensayo específico, comúnmente esos parámetros tienen una correlación con los módulos mencionados que se podrán obtener siguiendo los lineamientos

⁷ Herramienta de diseño de pavimentos desarrollada por el Instituto Mexicano del Transporte

recomendados por cada metodología y observando sus recomendaciones de uso, para el caso del método de la UNAM se relacionan los valores de VRS con el Módulo Resiliente con la ecuación propuesta por el Instituto de Ingeniería para el caso de capas no estabilizadas y para el caso de AASHTO se relacionan los módulos a los coeficientes estructurales mediante las tablas propuestas en la guía de diseño. Siempre tomando en cuenta el criterio del diseñador para dar los valores adecuados al método.

A continuación para el caso del IMT – PAVE se presentan dos tablas con valores típicos para Módulos Dinámicos (**TABLA 1**) y Módulos Resilientes (**TABLA 2**), que pueden servir como valores de referencia, recordando que un proyecto técnico final estará sustentado con las pruebas que garanticen que el valor usado en el diseño pueda ser factible de lograrse en el proceso constructivo.

TABLA 1.- Valores típicos de Módulos Dinámicos, Ed, para Mezclas Asfálticas (a 20°C, 10Hz)

Material	Rango de Ed, MPa	Valor típico de Ed, Mpa
Mezcla asfáltica diseñada con la metodología Marshal, asfalto convencional	2000 – 4000	3000 MPa
Mezcla asfáltica de alto desempeño, metodología Superpave, Protocolo AMAAC, asfalto modificado	4000 – 6000	5000 MPa
Mezcla asfáltica de alto módulo, metodología especial	8000 – 12000	10000 MPa

TABLA 2.- Valores típicos del módulo de resiliencia, Mr, para suelos clasificados con el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos, S.U.C.S. Manual SCT M-MMP-1-02/03

Clasificación del suelo	Rango de Mr (MPa)	Valores típicos de Mr (Mpa)
CH	34 - 90	55
CH+cal	100-200	150
CH+cemento	200-300	250
MH	55 - 120	80
CL	90 - 165	117
ML	50 – 100	
SW	193 – 259	220
SP	166 – 228	193
SW-SC	148 - 214	176
SW-SM	166 – 228	193

SP-SC	148 - 214	176
SP-SM	166 - 228	193
SC	148 - 193	
SM	193 - 259	221
GW	273 - 350	310
GW+cemento	750-2000	1500
GW+Asfalto	500-1500	1000
GP	245 -300	270
GW-GC	193 - 276	238
GW-GM	245 - 279	266
GP-GC	193 - 269	235
GP-GM	214 - 276	252
GC	166 - 259	214
GM	228 - 290	266

G. FUNCIÓN DE LAS CAPAS DEL PAVIMENTO FLEXIBLE

G.1 CAPA DE RODADURA. Se define como la superficie del pavimento que está sometida a las cargas directas de tránsito y expuesta al envejecimiento y a las acciones climáticas. La capa de rodadura es la que debe proporcionar una superficie segura, confortable y estética, por ello, el uso de asfaltos y agregados de alta calidad se justifica por las solicitudes a que están sometidos.

Es la capa superior del pavimento flexible, sus funciones son proporcionar una superficie cómoda en rodamiento, color y textura, con coeficiente de fricción alto (resistencia a la fricción) pero sin ser excesivamente abrasivos a los neumáticos. La superficie de rodamiento no juega un papel estructural sino funcional, dado que se construyen menores a 4 cm., con tamaño nominal típico de ½”.

G.2 CARPETA ASFÁLTICA. Es la primera capa estructural del pavimento y su función principal debe ser la de soportar los efectos del tránsito, está constituida por una mezcla de material pétreo cuidadosamente producido, de partículas muy resistentes y de ángulo de fricción interno alto, en íntimo contacto entre ellas (esqueleto mineral) pero fuertemente ligadas por un cemento asfáltico (cohesión) y con algunos pequeños espacios o huecos con aire que le permiten expandirse; esta mezcla forma una estructura resistente al Intemperismo y debe tener un módulo adecuado. Se recomienda aplicar una capa de rodamiento ya que comúnmente una carpeta asfáltica no contempla las características de una capa de rodadura.

G.3 BASE HIDRÁULICA. Esta capa sirve de apoyo a la carpeta asfáltica, de ahí su nombre de base, estructuralmente debe reducir los esfuerzos dinámicos del tránsito conjuntamente con la carpeta de manera que no dañen a las capas inferiores. Base también es sinónimo de estable, esto es, no debe presentar cambios volumétricos importantes y su resistencia al corte debe ser alta y variar poco al cambiar su contenido de agua con el tiempo, por esta razón se construye con materiales granulares con pocos finos y de alto ángulo de fricción interna, muy pocas veces existen bancos que en su estado natural o con tratamientos simples produzcan materiales para formar esta capa. En autopistas y carreteras tipo “A” se prefieren suelos con gravas parcialmente trituradas. El término hidráulica significa alto coeficiente de permeabilidad y baja ascensión capilar, poca capacidad de retención de agua y rapidez para desalojarla, esto significa buena compatibilidad con el agua.

G.4 BASE ESTABILIZADA CON ASFALTO. Este tipo de capas se utiliza para cumplir mayores requerimientos de la capa de base, mejorando los materiales pétreos con el uso de cemento asfáltico para lograr un mejor comportamiento mecánico e hidráulico.

Una diferencia importante de las bases estabilizadas contra las bases hidráulicas es que resisten esfuerzos a tensión, por lo que las bases estabilizadas distribuyen la carga del tránsito en un área más grande que como lo hacen las bases hidráulicas, como resultado de esto es común que se requieran espesores menores al utilizarlas.

G.5 CAPA DE SUB-BASE. La acción conjunta de la carpeta y la base disminuyen los esfuerzos dinámicos del tránsito lo suficiente para usar otro tipo de material con menos requisitos estructurales. Después de cierta profundidad, los esfuerzos dinámicos disminuyen considerablemente y pueden ser tomados por una capa de suelos con especificaciones de calidad más modestas, pero que cumplan con la normativa vigente; el objetivo de la construcción de esta capa es limitar el espesor de la base y completar el espesor faltante para reducir los esfuerzos a niveles tales que puedan ser soportados por las terracerías.

G.6 CAPA SUBRASANTE. Los terraplenes se construyen con el producto de la excavación de los cortes o de bancos cercanos al camino prácticamente sin tratamiento alguno, generalmente presentan abundantes fragmentos de roca y son muy heterogéneos, por otro lado, la cama de los cortes también es irregular. La superficie de cortes y terraplenes no es adecuada para el desplante de un pavimento y se requiere una capa de transición, de fuerte espesor, para absorber las irregularidades y de calidad controlada para asegurar cierta uniformidad al pavimento, esta capa puede ser el cimientado para el pavimento; recibe el nombre de subrasante debido a que el nivel de su superficie, su geometría, sobreancho, sobreelevación, bombeo, etc. se controlan topográficamente con precisión y existen normas para su acabado, con esto se asegura el espesor constante de las capas del pavimento.

G.7 CAPA SUBYACENTE. En carreteras de altas especificaciones que tendrán un tránsito elevado y un alto porcentaje de vehículos pesados, puede construirse por debajo de la subrasante una capa adicional de transición al cuerpo del terraplén, o capa subyacente.

Los materiales para la capa subyacente son suelos y fragmentos de roca, producto de los cortes o de la extracción de los bancos, que se utilizan para formar dicha capa inmediatamente encima del cuerpo del terraplén, la capa subyacente se construye con calidades de materiales entre la subrasante y el cuerpo del terraplén.

CAPÍTULO III. GUÍA DE DISEÑO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE DE GRANULOMETRÍA DENSA DE ALTO DESEMPEÑO

A. CONTENIDO

Esta guía contiene los requisitos y las características de calidad para ser utilizados en el diseño y construcción de la Mezcla Asfáltica de Granulometría Densa de Alto Desempeño (tamaño nominal de 19 mm), para proyectos con niveles de tránsito mayores o iguales a diez millones de ejes equivalentes y menores o iguales a 30 millones de ejes equivalentes.

Este documento se basa en el Protocolo AMAAC vigente.

B. DEFINICIONES

Las carpetas asfálticas con mezcla en caliente son aquellas que se construyen mediante el tendido y compactación de una mezcla de materiales pétreos y material asfáltico.

El espesor de la carpeta asfáltica será el adecuado para desempeñar la función estructural de soportar y distribuir la carga de los vehículos hacia las capas inferiores del pavimento.

La mezcla asfáltica de alto desempeño es una mezcla especialmente diseñada y construida para resistir deformaciones permanentes, fatiga y tener mayor resistencia a los agentes ambientales.

La mezcla asfáltica es un material compuesto, la cual es una combinación de materiales pétreos, material asfáltico, filler y en algunos casos algún aditivo.

C. ESTRUCTURACIÓN DEL DISEÑO DE LA MEZCLA ASFÁLTICA

Para el correcto diseño de una mezcla asfáltica se asegurará que tanto la mezcla como sus componentes sean de buena calidad y cumplan con las especificaciones establecidas en el Protocolo AMAAC PA-MA 01 vigente. Para esto se realizará el diseño de la mezcla asfáltica verificando los siguientes puntos:

- Calidad del material asfáltico
- Calidad del material pétreo
- Estructura granular de la mezcla asfáltica
- Estimación de propiedades volumétricas
- Determinación del contenido óptimo de material asfáltico
- Evaluación del desempeño de la mezcla asfáltica

C.1 CALIDAD DEL MATERIAL ASFÁLTICO

Las propiedades que tendrá que cumplir el material asfáltico están especificadas en la Tabla 1.

TABLA 1.- Características de calidad de un asfalto

Característica	Norma	Especificación
Punto de inflamación Cleveland, °C	M-MMP-4-05-007/00	230 mín.
Viscosidad dinámica a 135°C, Pa.s	M-MMP-4-05-005/02	3 máx.
Punto de reblandecimiento, °C	M-MMP-4-05-009/00	55 mín.
Recuperación elástica por torsión a 25°C, %.	M-MMP-4-05-024/02	35 mín.
Separación diferencia anillo-esfera	M-MMP-4-05-022/02	3 máx.
Módulo reológico de corte dinámico ($G^*/\text{sen}\delta$), 76°C, KPa	M-MMP-4-05-025/02	1.0 mín.
Después de prueba de película delgada y aire de horno (ASTM D2872)		
Pérdida de masa, %	ASTM D2872	1.0 máx.
Módulo reológico de corte dinámico ($G^*/\text{sen}\delta$), 76°C, KPa	M-MMP-4-05-025/02	2.2 mín.
Recuperación elástica en ductilómetro a 25°C, %	M-MMP-4-05-026/02	60 mín.
Después de prueba de película delgada y aire de horno @ 100°C (ASTM D6521)		
Rigidización ($G^*/\text{sen}\delta$), 34°C KPa,	ASTM D6648	5,000 máx.
Rigidización de Flexión - 6°C S(t); Mpa, Valor "m"	ASTM D6648	300 máx. 0.3 mín.

C.2 EVALUACIÓN DEL MATERIAL PÉTREO

El material utilizado para los ensayos de caracterización será representativo de los bancos de material utilizados en el proyecto. El muestreo se realizará de acuerdo con la norma M-MMP-4-04-001 vigente, "Muestreo de Materiales Pétreos para mezclas asfálticas".

Las propiedades del material pétreo serán realizadas de acuerdo con las fracciones del material: fracción gruesa (material retenido en la malla No. 4) y fracción fina (material que pasa la malla No. 4). Los ensayos y especificaciones para la fracción gruesa están definidos en la Tabla 2, y para la fracción fina en la Tabla 3.

TABLA 2.- Características de calidad del agregado grueso¹

Característica	Norma	Especificación
Gravedad específica bruta	ASTM C127	2.4 min
Absorción, %	ASTM C127	Reportar
Desgaste Los Ángeles, %	ASTM C131	30 máx.
Desgaste Microdeval, %	AASHTO T327 / ASTM D6928	18 máx.
Intemperismo acelerado, %	AASHTO T 104 /ASTM C88	15 máx. para sulfato de sodio 20 máx. para sulfato de magnesio
Caras fracturadas, % (2 caras o más)	ASTM D 5821	90 mín.
Partículas planas y alargadas, %	ASTM D 4791	5 a 1 %, 10 máx. ²
Adherencia con el asfalto, % de cubrimiento	Recomendación AMAAC RA-08/2010	90 mín.

*Todas las pruebas serán desarrolladas por un laboratorio con reconocimiento AMAAC-IMT.

TABLA 3.- Características de calidad del agregado fino³

Característica	Norma	Especificación
Gravedad específica bruta	ASTM C128	2.4 min
Absorción, %	ASTM C128	Reportar
Equivalente de arena, %	ASTM D 2419	50 min.
Angularidad, %	AASHTO T 304	
Azul de metileno, mg/g	Recomendación AMAAC RA-05/2010	15 máx.

*Todas las pruebas serán desarrolladas por un laboratorio con reconocimiento AMAAC-IMT.

Comparando los resultados obtenidos en los ensayos a las dos fracciones del material pétreo con las especificaciones de las Tablas 2 y 3, se determinará si el material cumple con las propiedades físicas para una mezcla asfáltica en caliente de alto desempeño.

¹ Tabla complementada de PA-MA 01, 2013. p. 9

² Suma de %planas + %alargadas

³ Tabla complementada de PA-MA 01, 2013. p. 10

C.3 SELECCIÓN DE LA ESTRUCTURA GRANULOMÉTRICA

La granulometría de diseño se realizará siguiendo lo establecido en el método de prueba M.MMP-4-04-001, “Granulometría de materiales pétreos para mezclas asfálticas”, utilizando las mallas establecidas en la Tabla 4.

Se construirá la gráfica granulométrica como se muestra en la **FIGURA 1**, graficando en el eje de las abscisas, eje “x” la abertura de la malla en milímetros (mm) elevada a la potencia cero coma cuarenta y cinco (0,45) y en el eje de las ordenadas, eje “y” el porcentaje que pasa de cada material pétreo en cada malla. Posteriormente se graficarán los puntos de control especificados en la Tabla 4 y la línea de máxima densidad, la línea de máxima densidad es una línea recta que se traza del origen a la abertura de veinticinco (25) milímetros al cien (100) por ciento. La curva granulométrica estará dentro de los puntos de control especificados y podrá cruzar una sola vez la línea de máxima densidad.

TABLA 4.- Puntos de Control en la Granulometría para Tamaño Nominal de ¾” (19 mm)⁴

Abertura de la malla (mm)		
	Mín	Máx
25.00	100	
19.00	90	100
12.50		90
9.50		
4.75		
2.36	23	49
1.18		
0.60		
0.30		
0.15		
0.075	2	8

⁴ PA-MA 01, 2013. p. 7

FIGURA 1.- Ejemplo de gráfica granulométrica⁵

C.4 PROPUESTA GRANULOMÉTRICA Y COMBINACIÓN DE PROPIEDADES

C.4.1 PROPUESTA GRANULOMÉTRICA

Se establecerán las propuestas granulométricas de prueba iniciales, seleccionando tres granulometrías para posteriormente estimar sus propiedades volumétricas. Se utilizarán al menos tres tipos de materiales pétreos y tres granulometrías diferentes en las propuestas de combinación granulométricas iniciales.

Las tres granulometrías pueden corresponder a las variaciones esperadas durante la producción en un cierto banco de materiales, o bien, a tres tipos de granulometrías. **FIGURA 2** presenta ejemplos de granulometrías.

Algunos lineamientos a considerar son evitar el uso de mezclas plásticas, que pueden tenerse, entre muchos otros factores, por el uso de materiales redondeados sin la trituración mínima requerida, evitar el uso de materiales con bajo contenido de finos (que pasa la malla 200), evitar combinaciones granulométricas que provoquen que el material se aproxime a la línea de máxima densidad, etc.

Los criterios de selección de una combinación de materiales incluyen la experiencia que se tenga con dichos materiales pétreos para este tipo de mezclas. En este paso es importante incorporar la experiencia de los diseñadores para seleccionar las combinaciones de materiales más adecuadas.

⁵ PA-MA 01, 2013. p. 7

Las combinaciones de prueba iniciales seleccionadas cumplirán con los usos granulométricos especificados en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

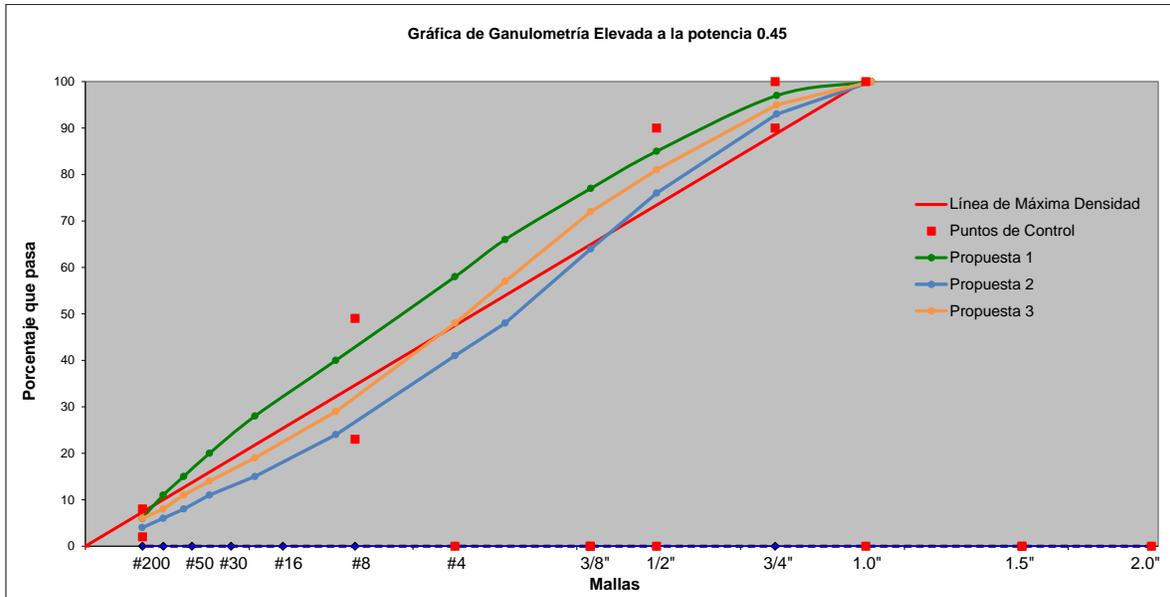


FIGURA 2.- Ejemplo de propuestas granulométricas iniciales

Para determinar la combinación de los materiales a utilizar se pueden emplear métodos de aproximaciones sucesivas, métodos gráficos, analíticos, numéricos como ecuaciones lineales o ecuaciones diferenciales.

Independientemente del número de agregados a combinar o del método por el cual se determinó la combinación de los materiales, la ecuación general se establece como:

$$P = Aa + Bb + Cc + \dots \quad (1)$$

Dónde: P = Porcentaje de material combinado que pasa una malla determinada

A,B,C, = Porcentaje de material que pasa una malla determinada

a,b,c = Proporciones individuales de cada material usados en la combinación cuya suma total será igual a cien (100) por ciento

C.4.2 COMBINACIÓN DE PROPIEDADES

Después de haber establecido las propuestas granulométricas se determinarán las siguientes propiedades físicas combinadas:

- Gravedad específica bruta (Gsb),
- Gravedad específica aparente (Gsa)
- Absorción

C.4.3 CÁLCULO DE LAS GRAVEDADES ESPECÍFICAS

El cálculo de la gravedad específica combinada de cada material pétreo se realizará aplicando la Fórmula 2.

$$G_{sx} = \frac{P1+P2}{\frac{P1}{G1} + \frac{P2}{G2}} \quad (2)$$

Dónde: G_{sx} = Gravedad específica bruta o aparente combinada en un solo material pétreo

P1= Porcentaje retenido en la malla 4.75 mm

G1= Gravedad específica del material retenido en la malla 4.75 mm

P2= Porcentaje que pasa 4.75 mm

G2= Gravedad específica del material que pasa en la malla 4.75 mm

Calcular la gravedad específica bruta del material total (granulometría propuesta) y la gravedad específica aparente del agregado total mediante la Fórmula 3.

$$G_{sx} = \frac{P1 \ P2 + \dots + Pn}{\frac{P1}{G1} + \frac{P2}{G2} + \dots + \frac{Pn}{Gn}} \quad (3)$$

Dónde: G_{sx} = Gravedad específica bruta o aparente para el material total

P1, P2, Pn = Porcentajes individuales por masa de material

G1, G2, Gn= Gravedad específica bruta individual del material

C.4.4. CÁLCULO DE LA ABSORCIÓN

Determinar la absorción de cada material pétreo en su fracción fina (ASTM C 128) y gruesa (ASTM C 127) aplicando la Fórmula 4, para posteriormente calcular la absorción combinada de cada material, aplicando la Fórmula 5.

$$\text{Absorción}_{\text{individual}} = \frac{(P1 \times A1) + (P2 \times A2)}{100} \quad (4)$$

Dónde: P1= Porcentaje (%) retenido en la malla 4.75 mm

A1= Absorción de agua del material retenido en la malla 4.75 mm
P2= Porcentaje (%) que pasa 4.75 mm
A2= Absorción de agua del material que pasa en la malla 4.75 mm

Obteniendo el valor de absorción de cada material pétreo, calcular la absorción del agregado total aplicando la Fórmula 5.

$$\text{Abs}_{\text{del agregado total}} = \frac{(P1 \cdot A1) + (P2 \cdot A2) + \dots + (Pn \cdot An)}{100} \quad (5)$$

Dónde: **Absorción**_{agregado total} = Absorción para el material total, porcentaje (%)

P1, P2, ... Pn = Porcentajes individuales por masa de material
A1, A2, Gn = Absorción de agua individual del material

C.5 ESTIMACIÓN DE PROPIEDADES VOLUMÉTRICAS

Una vez establecidas las propuestas granulométricas y determinadas la combinación de las propiedades físicas, se procederá a estimar cuál de estas tiene mejores propiedades volumétricas.

C.5.1 DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO DE MATERIAL ASFÁLTICO INICIAL

Calcule el contenido inicial de material asfáltico de acuerdo a AASHTO PP-28 para cada una de las granulometrías de prueba, aplicando la Fórmula 6. Todos los contenidos de material asfáltico calculados en este documento serán con respecto a la masa de la mezcla.

$$Pb_{\text{inicial}} = \frac{Gb \cdot (Vbe_{\text{inicial}} + Vba_{\text{inicial}})}{Gb \cdot (Vbe_{\text{inicial}} + Vba_{\text{inicial}}) + Ws_{\text{inicial}}} \quad (6)$$

Dónde: Pb inicial = Contenido inicial de material asfáltico

Gb = Gravedad Específica del material asfáltico (ASTM D70)
Vbe_{inicial} = Volumen de material asfáltico no absorbido en el material pétreo
Vba_{inicial} = Volumen de material asfáltico absorbido en el material pétreo
Ws = Peso del material pétreo

Para obtener los valores requeridos en la Fórmula 6 aplicar las Fórmulas 7, 8, 9 y 10.

$$Gse_{\text{inicial}} = ((Gsa - Gsb) \cdot 0.8) + Gsb \quad (7)$$

Gse_{inicial} = Gravedad específica efectiva inicial

Gsa = Gravedad específica aparente del material pétreo total

Gsb = Gravedad específica bruta del material pétreo total

$$V_{b\text{inicial}} = \frac{P_s*(1-V_a)}{\left(\frac{P_b}{G_b} + \frac{P_s}{G_{s\text{inicial}}}\right)} * \left(\frac{1}{G_{sb}} - \frac{1}{G_{s\text{inicial}}}\right) \quad (8)$$

Dónde: $V_{b\text{inicial}}$ = Volumen de material asfáltico absorbido en el material pétreo

P_s = Contenido de material pétreo, porcentaje del total de la masa de la mezcla asfáltica

P_b = Contenido de material asfáltico, porcentaje de la masa del material pétreo

G_b = Gravedad Específica del material asfáltico

$G_{s\text{inicial}}$ = Gravedad Específica efectiva inicial

G_{sb} = Gravedad Específica bruta del material pétreo total

V_a = Vacíos de aire

$$V_{be\text{inicial}} = 0.176 - [\log(T_n) * 0.0675] \quad (9)$$

Dónde: $V_{be\text{inicial}}$ = Volumen de material asfáltico no absorbido en el material pétreo.

T_n = Tamaño nominal de la granulometría en mm.

$$W_s = \frac{P_s*(1-V_a)}{\frac{P_b}{G_b} + \frac{P_s}{G_{s\text{inicial}}}} \quad (10)$$

Dónde: W_s = Masa del material pétreo

P_s = Contenido de material pétreo, porcentaje del total de la masa de la mezcla asfáltica

P_b = Contenido de material asfáltico, porcentaje de la masa del material pétreo

G_b = Gravedad específica del material asfáltico

$G_{s\text{inicial}}$ = Gravedad específica efectiva inicial

C.5.2 ELABORACIÓN DE ESPECÍMENES DE PRUEBA

Este punto cubre el procedimiento para la elaboración y compactación de mezclas asfálticas en laboratorio. La finalidad de estas mezclas será determinar sus propiedades volumétricas y tomar estos valores como base para estimar las propiedades volumétricas para lograr el cuatro (4) por ciento de vacíos de aire.

Previo a la preparación de las mezclas de prueba, verificar de acuerdo al proyecto el tipo de material asfáltico a utilizar y determinar las temperaturas de mezclado y compactación.

Para material asfáltico modificado con polímero, las temperaturas mencionadas serán proporcionadas por el proveedor.

C.5.2.1. ELABORACIÓN DE LA MEZCLA ASFÁLTICA

1. Pesar la cantidad apropiada de material pétreo requerido en cada fracción para la granulometría seleccionada (Granulometría inversa).

Tomar como referencia la cantidad y número total de mezclas requeridas por prueba de acuerdo a la **TABLA 5**.

2. Calentar el material asfáltico y el material pétreo en un horno a la temperatura de mezclado especificada por el proveedor. El material asfáltico no se calentará por más de dos horas a la temperatura de mezclado.

Colocar el material pétreo caliente a la temperatura de mezclado en un recipiente, realizar un cráter en el centro del material pétreo y adicionar la cantidad de material asfáltico requerido.

Para calcular la cantidad de material asfáltico que se requiere aplicar la Fórmula 11.

$$M_b = \left(\frac{M_s}{1 - \frac{P_b}{100}} \right) \quad (11)$$

Dónde: Mb= Masa de material asfáltico requerido para un espécimen particular.

Ms= Masa de material pétreo en peso por espécimen.

Pb= Material asfáltico requerido en porcentaje (%).

3. Mezclar inmediatamente el material pétreo con el material asfáltico en un mezclador mecánico de laboratorio (debido a las grandes cantidades de material que se utilizan, el mezclado a mano no es recomendable).

Continúe mezclando hasta cubrir las partículas de material pétreo con el material asfáltico.

4. Después del mezclado, extender la mezcla en una charola plana tratando de obtener un espesor de la mezcla homogéneo entre veinticinco (25) milímetros y cincuenta (50) milímetros.

Curar la mezcla de acuerdo a AASHTO R30 "Practice for Short and Long Term Conditioning of Hot Mix Asphalt HMA", durante dos (2) horas más-menos cinco (5) minutos para material pétreo con absorción total menor

o igual al dos (2) por ciento y cuatro (4) horas más-menos cinco (5) minutos para material pétreo con absorción total mayor al dos (2) por ciento.

TABLA 5.- Cantidad de muestras requeridas por prueba.

Prueba	Cantidad de mezcla recomendada	Número de muestras requeridas	
Determinación de la gravedad específica teórica máxima, G_{mm}	2 500g	2 muestras para cada contenido de cemento asfáltico por cada granulometría seleccionada	Para la evaluación de 3 granulometrías diferentes se requieren 6 muestras
Determinación de la gravedad específica bruta de la mezcla asfáltica compactada, G_{mb}	4 500-4 700g (para especímenes de 150mm de diámetro)	2 para cada contenido de cemento asfáltico	Para la evaluación de 3 granulometrías diferentes se requieren 6 muestras

Se comprobará que las gravedades específicas del material pétreo cumplen la siguiente relación:

$$G_{sa} > G_{se} > G_{sb}$$

Para calcular el valor de G_{se} se utilizará la Fórmula 25. En caso de no cumplir con la relación se comprobará la determinación de la gravedad específica bruta de los materiales pétreos y la determinación de la gravedad específica teórica máxima.

C.5.2.2. GRANULOMETRÍA INVERSA

Para reproducir las granulometrías seleccionadas, de manera más adecuada, se recomienda separar las fracciones de material pétreo por cada una de las mallas.

Después de tener el material separado, se realizará una dosificación por malla y por fracción de material pétreo. Los cálculos se realizarán de acuerdo a la Fórmula 12

$$M_s = \left(\frac{A \cdot B \cdot C}{10\ 000} \right) \tag{12}$$

Dónde: M_s =Masa de material requerido en una malla determinada

A=Gramos totales de material requerido para realizar la mezcla.

B=Proporciones individuales de cada material pétreo usados en la combinación, cuya suma será igual a cien (100) por ciento.

C=Material retenido en una malla determinada expresado en porcentaje.

C.5.2.3. COMPACTACIÓN DE LA MEZCLA ASFÁLTICA

Las mezclas preparadas para determinar la gravedad específica bruta de la mezcla asfáltica compactada (G_{mb}), serán elaboradas utilizando el compactador giratorio de acuerdo al método ASTM D 6925 "Standard Test Method for Preparation and Determination of the Relative Density of Hot Mix Asphalt (HMA) Specimens by Means of the Superpave Gyrotory Compactor".

Nota: Las mezclas preparadas para la determinación de la gravedad específica teórica máxima (G_{mm}) no podrán ser compactadas.

El procedimiento general de compactación en el compactador Giratorio, considerará:

1. Colocar el molde de compactación y la base en un horno precalentado a la temperatura de compactación requerida por un período de treinta (30) minutos a sesenta (60) minutos antes de realizar la compactación.
2. Después del tiempo de curado, se procederá a la compactación utilizando el Compactador Giratorio siguiendo el método ASTM D6925.

Los especímenes tendrán que ser compactados a cien (100) giros (N_{dis}) (ver Tabla 6), verificando que la presión aplicada sea de seiscientos (600) Kilopascuales más-menos dieciocho (18) Kilopascuales, con un ángulo exterior de giro de uno coma veinticinco (1,25) grados Celsius más-menos cero coma dos (0,02) grados Celsius.

TABLA 6.- Número de giros según el nivel de tránsito esperado⁶

Parámetros de Compactación		
N_{ini}	N_{dis}	$N_{máx}$
8	100	160

⁶ Tomada de la tabla de PA-MA 01, 2013. p. 12

C.5.3 DETERMINACIÓN DE PROPIEDADES VOLUMÉTRICAS

Para determinar las propiedades volumétricas de especímenes de laboratorio para el diseño de la mezcla, es necesario conocer la altura del espécimen a cada giro de compactación, la gravedad específica bruta de la mezcla compactada (G_{mb}) y la gravedad específica teórica máxima de la mezcla (G_{mm}), para lo cual se requieren los siguientes pasos:

1. Preparar muestras de mezcla de acuerdo al apartado **C.5.2** para la determinación de la gravedad específica teórica máxima utilizando el método de prueba AASHTO T209, "Gravedad Específica teórica máxima de la mezcla asfáltica (G_{mm})".
2. Recopilar los registros de altura después de cada giro que se almacenan en la memoria del compactador giratorio con una aproximación a cero coma uno (0,1) milímetros.
3. Medir y registrar la masa del espécimen compactado con una aproximación a uno (1) gramos. Determinar la gravedad específica bruta compactada (G_{mb}) del espécimen de acuerdo con el método de prueba (ASTM D1188 O D2776), "Gravedad específica bruta de mezclas asfálticas compactadas, con o sin parafina".

A partir de la determinación de la gravedad específica bruta calculada del espécimen compactado (G_{mb}), de la gravedad específica teórica máxima de la mezcla suelta (G_{mm}), y conociendo la altura (h) de los especímenes a diferentes números de giros de compactación, se determinará para cada uno de los especímenes los siguientes valores:

1. Se calculará el porcentaje de gravedad específica teórica máxima de la mezcla (% G_{mm}) a los giros iniciales ($N_{ini}=8$) utilizando la Fórmula 13.

$$\%G_{mm} @ N_x = \frac{G_{mb}@N_x}{G_{mm}} * 100 \quad (13)$$

Dónde: $\%G_{mm}@ N_x$ = Gravedad específica teórica máxima de la mezcla a un número de giros determinado.

$G_{mb} @ N_x$ = Gravedad específica bruta de la mezcla compactada a un número de giros estimado.

G_{mm} = Gravedad específica teórica máxima.

2. Se calcula el valor estimado de la gravedad específica bruta de la mezcla compactada al número de giros iniciales $G_{mb} @ N_x$ que se requiere en la Fórmula 13, para lo cual primero se determinará el factor de corrección por las irregularidades de superficie en el espécimen mediante la fórmula 14 y posteriormente se aplicará en la Fórmula 15.

$$C = \frac{h @ N_{x_{medido}}}{h @ N_{x_{estimado}}} \quad (14)$$

Dónde: C= factor de corrección

h = altura del espécimen.

$N_{x_{medido}}$ es el número de giros a los que el espécimen fue pesado y medido para el cálculo del G_{mb} . En este paso será a N_{dis} .

$N_{x_{estimado}}$ es el número de giros al cual no se tiene una medición real del G_{mb} y se requiere estimar. En este paso será a N_{ini} .

$$G_{mb @ N_{estimado}} = Cx (G_{mb @ N_{medido}}) \quad (15)$$

$G_{mb @ N_{estimado}}$ =Gravedad específica bruta de la mezcla compactada a un número de giros estimado. En esta paso se determinará al número de giros iniciales ($@N_{ini}$)

$G_{mb @ N_{medido}}$ =Gravedad específica bruta de la mezcla compactada medida a un número de giros determinado. En esta paso se determinará al número de giros iniciales ($@N_{dis}$)

3. Se determinan los vacíos de aire de las combinaciones de prueba (V_a) mediante la Fórmula 16.

$$V_a = \left(\frac{G_{mm} - G_{mb}}{G_{mm}} \right) x 100 \quad (16)$$

Dónde: V_a = vacíos de aire en la mezcla compactada, porcentaje del volumen total

G_{mb} =Gravedad específica bruta de la mezcla asfáltica compactada medida.

G_{mm} = Gravedad específica teórica máxima de la mezcla.

4. Se determinan los vacíos en el material pétreo (VAM) para las granulometrías de prueba, mediante la Fórmula 17.

Dónde: VAM= Vacíos en el material pétreo, porcentaje del volumen bruto.

G_{mb} =Gravedad específica bruta de la mezcla asfáltica compactada medida.

P_s = Contenido de material pétreo, porcentaje total de la masa de la mezcla asfáltica.

G_{sb} = Gravedad específica bruta de la mezcla de material pétreo (obtenida mediante la Fórmula 3).

- Se calcula el porcentaje de gravedad específica teórica máxima G_{mm} a los giros de diseños N_{dis} mediante la Fórmula 18 o utilizando la Fórmula 19.

$$\%G_{mm} @ N_x = 100 - V_a \quad (18)$$

$\%G_{mm} @ N_x$ = Gravedad específica teórica máxima de la mezcla a un número de giros determinado. En esta paso se determinará al número de giros iniciales (@ N_{dis}).

V_a = vacíos de aire en la mezcla compactada, porcentaje del volumen total.

$$\%G_{mm} @ N_x = \left(\frac{G_{mb}}{G_{mm}} \right) \times 100 \quad (19)$$

$\%G_{mm} @ N_x$ = Gravedad específica teórica máxima de la mezcla a un número de giros determinado. En esta paso se determinará al número de giros iniciales (@ N_{dis}).

G_{mb} = Gravedad específica bruta de la mezcla asfáltica compactada.

G_{mm} = Gravedad específica teórica máxima de la mezcla.

C.5.4 ESTIMACIÓN DE PROPIEDADES VOLUMÉTRICAS PARA CUATRO (4) POR CIENTO DE VACÍOS DE AIRE

Una vez realizados los cálculos del porcentaje de vacíos de aire ($\%V_a$), porcentaje de gravedad específica teórica máxima ($\%G_{mm}$), vacíos en el material pétreo (VAM), para cada una de las combinaciones granulométricas de prueba; se realizará el ajuste en el contenido de material asfáltico en caso de ser necesario para obtener un contenido de vacíos de aire del cuatro (4) por ciento para lo cual se utiliza la Fórmula 20.

$$Pb_{estimado} = Pb_{inicial} - [0.4 * (4 - Va_{inicial})] \quad (20)$$

$Pb_{estimado}$ = Contenido de material asfáltico requerido para obtener cuatro (4) por ciento de vacíos de aire.

$Pb_{inicial}$ = Contenido de material asfáltico al cual se realizó la mezcla de prueba expresado en porcentaje (%).

$Va_{inicial}$ = Porcentaje de vacíos obtenidos en la mezcla inicial de prueba.

Con este contenido de material asfáltico estimado se calcularán los vacíos en el material pétreo ($VAM_{estimado}$), los vacíos llenados con material asfáltico ($VFA_{estimado}$), el contenido de material asfáltico efectivo ($Pbeestimado$), la relación filler- material asfáltico (D_p) y % de G_{mm} de acuerdo a las siguientes fórmulas:

$$\text{VAM}_{\text{estimado}} = \text{VAM}_{\text{inicial}} + [\text{K} * (4 - \text{V}_{\text{ainicial}})] \quad (21)$$

Dónde:

$\text{VAM}_{\text{estimado}}$ = Vacíos en el material pétreo estimado.

$\text{VAM}_{\text{inicial}}$ = Vacíos en el material pétreo inicial

K = constante = Si: $V_a \leq 4.0\%$, $K=0.1$

$V_a > 4.0\%$, $K=0.2$

$$\text{VFA} = 100 \left[\frac{\text{VAM} - V_a}{\text{VAM}} \right] \quad (22)$$

Dónde:

VFA = Vacíos llenos con material asfáltico, porcentaje de VAM.

VAM = Vacíos en el material pétreo.

V_a = Vacíos de aire expresados en porcentaje: En este caso se usará el valor de 4.0%.

$$\text{Pbe} = \text{Pb} - \left[(\text{P}_s * \text{G}_b) * \left(\frac{\text{G}_{se} - \text{G}_{sb}}{\text{G}_{se} * \text{G}_{sb}} \right) \right] \quad (23)$$

Dónde: Pbe = Contenido de material asfáltico efectivo en la mezcla evaluada.

Pb = Contenido de material asfáltico para obtener cuatro (4) por ciento de vacíos.

P_s = Contenido de material pétreo, porcentaje del total de la masa de la mezcla asfáltica

G_{se} = Gravedad específica efectiva del material pétreo

G_{sb} = Gravedad específica bruta del material pétreo total

$$\text{DP} = \frac{P_{0.075}}{\text{Pbe}} \quad (24)$$

Dónde: DP = Relación filler-asfalto

Pbe = Contenido de material asfáltico efectivo en la mezcla evaluada

$P_{0.075}$ = porcentaje de material pétreo que pasa la malla 200

$$\%G_{mm} @ \text{Nini}_{\text{estimado}} = \%G_{mm} @ \text{Nini}_{\text{ini}} - (4.0 - \text{V}_{\text{ainicial}}) \quad (25)$$

Dónde: $\%G_{mm} @ N_{ini}$ = Gravedad específica teórica máxima inicial de la mezcla a los giros iniciales.

$\%G_{mm} @ N_{\text{estimado}}$ = Gravedad específica teórica máxima estimada de la mezcla a los giros iniciales.

V_{ainicial} = Porcentaje de vacíos obtenidos en la mezcla inicial de prueba.

C.5.5. SELECCIÓN DE LA GRANULOMETRÍA DE TRABAJO

Una vez determinadas en las diferentes propuestas granulométricas a un contenido de material asfáltico los valores estimados de: vacíos en el material pétreo (VAM), vacíos llenos con material asfáltico (VFA), contenido de material asfáltico efectivo (Pbe), proporción filler-material asfáltico (DP) y el porcentaje de gravedad específica teórica máxima de la mezcla (% de Gmm), revisar aquellas que cumplan con los parámetros volumétricos solicitados en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

Descartar aquellas propuestas que en sus valores estimados no cumplan con las propiedades requeridas en dicha tabla.

Sí más de una combinación cumple con los criterios volumétricos requeridos, la decisión estará basada en el costo y la experiencia local o bien aquellas fórmulas de trabajo que representen el menor riesgo técnico de desempeño basado en la experiencia del diseñador.

Se puede presentar el escenario en el que alguna de las propiedades volumétricas no se cumpla en ninguna de las propuestas, por lo que a continuación se presentan algunas variables a evaluar:

Vacíos en el material pétreo (VAM). Algunas guías generales para incrementar el valor de **VAM** son: Alejar la granulometría de la línea de máxima densidad, usar partículas con alta angularidad (trituration), uso de partículas con superficie rugosa, uso de diferentes materiales por ejemplo de sílice vs calizas y reducción del material que pasa la malla 200 usado en la combinación de prueba.

Proporción filler asfalto (DP). Si la relación de filler-asfalto es menor a cero coma seis (0,6) se pueden utilizar combinaciones de material pétreo que incrementen el porcentaje de material que pasa la malla 200.

Mientras que, si la relación filler-material asfáltico es mayor al uno coma dos (1,2), se puede disminuir la cantidad de material que pasa la malla 200 en la combinación total de material pétreo, o bien, utilizar curvas granulométricas que permitan incrementar el contenido de material asfáltico en la mezcla o bien el uso de material pétreo con menor absorción.

TABLA 7.- Requerimientos para el diseño de la mezcla⁷

Nivel de Compactación giratoria			Vacíos de agregado mineral mínimo en %	Vacíos llenos de asfalto en %	Relación filler asfalto
Nini	Ndis	Nmáx			
≤ 90.5	96	≤ 98	13	65 - 78	0.6 - 1.2

C.6. SELECCIÓN DEL CONTENIDO ÓPTIMO DE MATERIAL ASFÁLTICO

Una vez seleccionada la propuesta de diseño y determinado el contenido estimado de material asfáltico ($P_{b\text{estimado}}$).

A) Se elaboran por duplicado mezclas para la determinación de la gravedad específica teórica máxima (G_{mm}) al contenido de material asfáltico estimado siguiendo los procedimientos descritos en el punto **C.5.2** “Elaboración de mezcla” y “Mezclado” de este documento.

B) Se elaboran mezclas por duplicado para la determinación de la gravedad específica bruta (G_{mb} @ N_{dis}) de la mezcla asfáltica compactada (de acuerdo a ASTM D1188 o ASTM D 2726) a cien (100) giros; a cada uno de los siguientes contenidos de material asfáltico.

- P_b estimado más cero coma cinco (0,5) por ciento de cemento asfáltico
- P_b estimado más uno coma cero (1,0) por ciento de cemento asfáltico
- P_b estimado
- P_b estimado menos cero coma cinco (0,5) por ciento de cemento asfáltico
- P_b estimado menos uno coma cero (1,0) por ciento de cemento asfáltico

Preparar los especímenes mediante el procedimiento indicado en el apartado **C.5.2** de este documento.

C) Se calculan las propiedades volumétricas de cada uno de los especímenes elaborados de acuerdo a los siguientes pasos:

1. Se calculará el porcentaje de gravedad específica teórica máxima de la mezcla % G_{mm} a los giros iniciales (N_{ini}) mediante la Fórmula 12.

Nota: el valor de gravedad específica teórica máxima G_{mm} cambia con el contenido de material asfáltico.

⁷ Tomada de la tabla de PA-MA 01, 2013. p. 12

2. Para calcular el valor estimado de la gravedad específica bruta compacta de la mezcla (G_{mb_x}) al número de giros iniciales que se requiere en la Fórmula 12, determinar el factor de corrección por las irregularidades de superficie en el espécimen mediante la Fórmula 13 y aplicarlo en la Fórmula 14.
3. Para calcular la gravedad específica máxima teórica (G_{mm}) a un contenido de material asfáltico distinto al estimado ($P_{bestimado}$), primero calcular la gravedad específica efectiva del material pétreo (G_{se}) utilizando la Fórmula 26:

$$G_{se} = \frac{P_{mm} - P_b}{\frac{P_{mm}}{G_{mm}} - \frac{P_b}{G_b}} \quad (26)$$

G_{se} = Gravedad Específica efectiva del material pétreo

G_{mm} = Gravedad Específica teórica máxima, obtenida en laboratorio

(ASTM D 2041, AASHTO T209) de mezcla de pavimento (sin vacíos de aire)

P_{mm} = Porcentaje de masa del total de la mezcla suelta = 100

P_b = Contenido de material asfáltico con el cual ASTM D 2041 / AASHTO T209 Desarrolló el ensayo; el porcentaje por el total de la masa de la mezcla

G_b = Gravedad Específica del material asfáltico

Posteriormente determinar la gravedad específica teórica máxima de la mezcla a otros contenidos de material asfáltico utilizando la Fórmula 27.

$$G_{mm} = \frac{P_{mm}}{\frac{P_s}{G_{se}} + \frac{P_b}{G_b}} \quad (27)$$

G_{mm} = Gravedad Específica teórica máxima de la mezcla del pavimento (sin vacíos de aire)

P_{mm} = Porcentaje de la masa del total de la mezcla suelta igual a cien (100)

P_b = Contenido de material asfáltico, porcentaje del total de la masa de la mezcla

G_{se} = Gravedad Específica efectiva del material pétreo

G_b = Gravedad Específica del material asfáltico

4. Se determinan los vacíos de aire de las mezclas de prueba (V_a) mediante la Fórmula 16.
5. Se determinan los vacíos en el agregado pétreo VAM, mediante la Fórmula 17.
6. Se calcula el porcentaje de gravedad específica teórica máxima (G_{mm}) a los giros de diseños N_{dis} mediante la Fórmula 18 o usando la Fórmula 19.

7. Se grafica el contenido de material asfáltico en el eje de las abscisas “x”, expresado en porcentaje y en el eje de las ordenadas “y” graficar :
 - a. El porcentaje de vacíos de aire (%Va) y el límite de control inferior en cuatro (4) por ciento de vacíos requerido en el diseño.
 - b. Los vacíos del material pétreo (VAM), graficar el límite de control inferior (13) mínimo, de acuerdo al tamaño nominal de la combinación de materiales.
 - c. Los vacíos llenos con material asfáltico (VFA), graficar el límite de control inferior (65) y superior del proyecto (78).
 - d. La relación filler-asfalto (Dp), graficar el límite de control inferior (0.6) y superior (1.2).

C.6.1. CÁLCULO DEL CONTENIDO ÓPTIMO DE ASFALTO

Sí el contenido estimado de material asfáltico no cumple con el cuatro (4) por ciento de vacíos de aire, se realiza una interpolación, mediante la Fórmula 28.

$$Pb_{\text{óptimo}} = \left(0.5 * \frac{Va_s - 4}{Va_s - Va_i} \right) + Pb_i \quad (28)$$

Pb_i: Cálculo de material asfáltico expresado en porcentaje, por arriba de los vacíos de aire objetivo (menor a cuatro (4) por ciento)

Va_s: Vacíos de aire expresados en porcentaje al contenido de material asfáltico Pb inferior (vacíos mayores a cuatro (4) por ciento)

Va_i: Vacíos de aire expresados en porcentaje al contenido de material asfáltico Pb superior (vacíos menores a cuatro (4) por ciento)

C.6.2. VERIFICACIÓN DE LA MÁXIMA DENSIFICACIÓN DE LA MEZCLA.

1. Se elaborarán por duplicado mezcla para la determinación de la gravedad específica bruta de la mezcla asfáltica (Gmb) al Nmax igual a ciento sesenta (160) giros, para verificar la máxima densificación de la mezcla asfáltica.
2. Se determinará la gravedad específica teórica máxima (Gmm) al contenido óptimo de diseño.
3. Se calcula el porcentaje de gravedad específica máxima de la mezcla asfáltica: a los giros iniciales (%G_{mm}@N_{ini}), a los giros de diseño (%G_{mm}@N_{dis}), a los giros máximos (%G_{mm}@N_{max}), utilizando la Fórmula 15. En esta verificación el porcentaje de específica gravedad de diseño (%G_{mm} para N_{dis}) tendrá una tolerancia de más-menos cero coma tres (0,3) por ciento.

C.6.2.1. EVALUACIÓN DE LA SUSCEPTIBILIDAD DE LA MEZCLA ASFÁLTICA AL DAÑO INDUCIDO POR HUMEDAD (TSR)

Una vez determinado el contenido óptimo de material asfáltico en la mezcla asfáltica, evaluar la susceptibilidad de la mezcla asfáltica al daño inducido por humedad mediante el método AASHTO T283. El ensayo se realizará considerando un ciclo de congelamiento con un valor mínimo aceptable de TSR igual a ochenta (80) por ciento.

Para asegurar un siete (7) por ciento de vacíos en los especímenes de TSR, en el Compactador Giratorio se fijará la altura del espécimen a noventa y cinco (95) milímetros para un diámetro del espécimen de ciento cincuenta (150) milímetros (seis (6) pulgadas). Para especímenes de cien (100) milímetros (cuatro (4) pulgadas) de diámetro la altura tendrá que fijarse en sesenta y tres coma cinco (63,5) milímetros y ajustarse la cantidad de mezcla requerida utilizando la Fórmula 32.

Elaborar un espécimen de prueba y realizar la corrección basada en los pesos de este espécimen aplicando las Fórmulas 29, 30, 31 y 32.

$$V_{\text{medido}} = (W_{ss} - W_w) \quad (29)$$

W_w = Masa de la probeta en el agua (sin parafina).

W_{ss} = Masa de la probeta saturada y superficialmente húmeda

$$C = \frac{V_{\text{medido}}}{V_{\text{estimado real}}} = \frac{V_{\text{medido}}}{\pi * \left(\frac{d_r^2}{4}\right) * h_r * 0.001} \quad (30)$$

Dónde: d_r = Diámetro real de la probeta,

h_r = altura real de la probeta

$$V_{\text{corregido}} = C * V_{\text{estimado teórico}} = C * \left(\pi * \left(\frac{d_t^2}{4}\right) * h_t * 0.001\right) \quad (31)$$

Dónde: d_t = Diámetro especificado de la probeta,

H_t = Altura especificada de la probeta

Determinar el G_{mb} para lograr el siete (7) por ciento de vacíos de aire V_a .

$$G_{mb} = G_{mm} * 0.93 \quad (32)$$

G_{mb} = gravedad específica bruta de la mezcla asfáltica compactada.

G_{mm} = gravedad específica teórica máxima de la mezcla.

Y finalmente determinar la masa de mezcla requerida mediante la Fórmula 33.

$$\text{Masa de mezcla requerida} = G_{mb} * V_{\text{Corregido}} \quad (33)$$

Considerar que las mezclas asfálticas elaboradas con ciertos materiales pueden presentar daños por humedad en su vida útil. El agua puede causar desprendimiento de la película de material asfáltico en la mezcla, lo que puede ocasionar fallas aceleradas en el pavimento como “desgranamientos” y no lograr la vida útil esperada de la capa asfáltica. Para ayudar a prevenir daños por humedad, si el valor obtenido en esta prueba es menor al ochenta (80) por ciento, se recomienda el uso de aditivos mejoradores de adherencia (consulte al proveedor de material asfáltico para la incorporación de aditivos).

Nota: Evitar algunos errores comunes en este método como son: a) los vacíos de los especímenes acondicionados no son iguales a los vacíos de los especímenes sin acondicionar, b) los especímenes acondicionados no son saturados al porcentaje marcado por el método (de setenta (70) por ciento a ochenta (80) por ciento), c) los especímenes acondicionados no son sumergidos por veinticuatro (24) horas en un baño de agua a sesenta (60) grados Celsius más-menos un (1) grado Celsius.

C.6.2.2. EVALUACIÓN DE LA SUSCEPTIBILIDAD A LA DEFORMACIÓN PERMANENTE

Evaluar la susceptibilidad de la mezcla al daño por humedad y a la deformación permanente por rodera de la mezcla, por medio del analizador de la rueda cargada de Hamburgo (HWT).

Los especímenes serán ensayados a cincuenta (50) grados Celsius durante el número de pasadas establecido en la Tabla 8 y presentará una deformación máxima de diez (10) milímetros.

TABLA 8.- Número de pasadas mínimas para la deformación máxima en la prueba de Hamburgo⁸

Nivel de tránsito	Pasadas mínimas para la deformación máxima de 10 mm
Medio	15.000

⁸ Tomada de la tabla de PA-MA 01, 2013. p. 15

EJEMPLO DE DISEÑO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE DE GRANULOMETRÍA DENSA DE ALTO DESEMPEÑO. PROCEDIMIENTO DE DISEÑO NIVEL II

1. Estructura granular de la mezcla asfáltica anexo

a. Granulometrías de diseño

Con el propósito de ejemplificar cada uno de los pasos y cálculos requeridos para un diseño de mezcla en caliente, se utilizará un diseño de mezcla de referencia; por lo que, los datos de los ejemplos estarán relacionados entre sí.

Se considerará un ejemplo de diseño de Nivel II del Protocolo AMAAC, con un tamaño nominal de 19 mm.

Durante la realización del Proyecto se analizarán 3 diferentes granulometrías, para el caso particular de este ejemplo solamente se presentará el cálculo de una de ellas.

La granulometría está compuesta de tres fracciones granulares. Las cuáles serán mezcladas con las siguientes proporciones. Material 1 (40%), Material 2 (45%), y Material 3 (15%).

La **Tabla A.1** presenta el ejemplo de cálculo para la Malla No. 4 (Aplicando la fórmula 1).

Tabla A.1 Ejemplo de cálculo de combinación de materiales.

Identificación de agregado	Agregado #1	Agregado #2	Agregado #3	Combinación de materiales
Proporciones individuales de cada agregado usado en la combinación	a 40%	B 45%	C 15%	
A = porcentaje que pasa la malla 4,75mm	98.2	3.9	1	P= 41.2

$$P = \frac{Axa+Bxb+Cxc}{100} = \frac{(98.2*40)+(3.9*45)+(1*15)}{100} = 41.2 \quad (1)$$

El cálculo de todas las mezclas de agregados se presenta en la Tabla A.2.

Tabla A.2. Granulometría de la combinación de prueba.

Abertura de la malla mm	a= 40%	b= 45%	c = 15%	Combinación de materiales
	Agregado 1	Agregado 2	Agregado 3	
	% que pasa la malla			
25	100	100	100	100
19	100	100	73.6	
12,5	100	98.8	12.7	86.4
9,5	100	70.9	3.8	72.5
4,75	98.2	3.9	1.0	41.2
2,36	69	1.6	0.8	28.4
1,18	47.1	1.5	0.7	19.6
0,6	30.9	1.4	0.6	13.1
0,3	18.5	1.4	0.6	8.1
0,15	12.4	1.4	0.6	5.7
0,075	9.0	1.3	0.5	4.3

b. Combinación de propiedades

Como segundo punto de la combinación se combinan las gravedades específicas de acuerdo con la granulometría evaluada. Los datos de gravedades específicas por fracción granular son presentados en la Tabla A.3.

Tabla A.3 Ejemplo de cálculo de gravedad bruta combinada para el agregado total

Abertura de la malla mm	a= 40%	b= 45%	c = 15%
	Agregado 1	Agregado 2	Agregado 3
	% que pasa la malla		
Gsb	2.478	2.533	2.528
Gsa	2.649	2.713	2.646
Absorción	3.491	1.266	2.373

Con los datos mostrados en la **tabla A.3** se calcula las propiedades combinadas del material pétreo:

$$G_{sb} = \frac{P_1 + P_2 + \dots + P_n}{\frac{P_1}{G_1} + \frac{P_2}{G_2} + \dots + \frac{P_n}{G_n}} = \frac{40 + 45 + 15}{\frac{40}{2.478} + \frac{45}{2.533} + \frac{15}{2.528}} = 2.510 \quad (3)$$

$$G_{sa} = \frac{P_1 + P_2 + \dots + P_n}{\frac{P_1}{G_1} + \frac{P_2}{G_2} + \dots + \frac{P_n}{G_n}} = \frac{40 + 45 + 15}{\frac{40}{2.649} + \frac{45}{2.713} + \frac{15}{2.648}} = 2.677 \quad (3)$$

$$Absorción_{agregado\ total} = \frac{(P_1 * A_1) + (P_2 * A_2) + \dots + (P_n * A_n)}{100} = \frac{(40 * 3.491) + (45 * 1.266) + (15 * 2.373)}{100} = 2.322\% \quad (5)$$

2. Estimación de propiedades volumétricas

a. Contenido de asfalto inicial (Pbi)

Para calcular el contenido de asfalto inicial de la granulometría propuesta anteriormente, se suponen los valores siguientes:

- Contenido de asfalto (Pb) de 5.0%,
- Vacíos de aire (Va) de 4.0%

Se deben contar con los siguientes datos:

- Gravedad específica del asfalto (Gb) = 1.039
- Tamaño nominal del agregado (TN) = 19 mm
- Gsb = 2.510
- Gsa = 2.677

Definidos estos valores se aplican las siguientes fórmulas (referenciadas como: 6 a 10 en la guía de diseño)

$$G_{se\text{inicial}} = ((G_{sa} - G_{sb}) * 0.8) + G_{sb} = ((2.677 - 2.510) * 0.8) + 2.510 = 2.644 \quad (7)$$

$$V_{b\text{inicial}} = \frac{P_s * (1 - V_a)}{\left(\frac{P_b}{G_b} + \frac{P_s}{G_{se\text{inicial}}}\right)} * \left(\frac{1}{G_{sb}} - \frac{1}{G_{se\text{inicial}}}\right) = \frac{0.95 * (1 - 0.04)}{\left(\frac{0.05}{1.030} + \frac{0.95}{2.644}\right)} * \left(\frac{1}{2.510} - \frac{1}{2.644}\right) = 0.0450 \quad (8)$$

$$V_{be\text{inicial}} = 0.176 - (\log(Tn) * 0.0675) = 0.176 - (\log(19) * 0.0675) = 0.0897 \quad (9)$$

$$W_s \text{ inicial} = \frac{P_s * (1 - V_a)}{\frac{P_b}{G_b} + \frac{P_s}{G_{se\text{inicial}}}} = \frac{0.95 * (1 - 0.04)}{\frac{0.05}{1.030} + \frac{0.95}{2.644}} = 2.236 \quad (10)$$

$$P_{b\text{inicial}} = \frac{G_b * (V_{be\text{inicial}} + V_{b\text{inicial}})}{G_b * (V_{be\text{inicial}} + V_{b\text{inicial}}) + W_s \text{ inicial}} = \frac{1.030 * (0.08968 + 0.0448)}{1.030 * (0.08968 + 0.0450) + 2.238} * 100 = 5.84 \% \quad (6)$$

b. Elaboración de especímenes de ensayo

Una vez determinado el contenido de asfalto inicial (Pbi) se realizará siguiente procedimiento por granulometría:

- Compactar dos especímenes al número de giros de diseño, (Ndis = 100 giros)
- Mezclar dos muestras de 2500 g para realizar el ensayo de Gmm.

La Tabla A.4 presenta un ejemplo de dosificación de la granulometría a utilizar. Procedimiento de dosificación de granulometría Inversa

Tabla A.4 Granulometría inversa para una granulometría de prueba determinada.

Datos				Cálculo
B	40.00%	45.00%	15.00%	Combinación de materiales total (Ms)
Abertura de la malla mm	Agregado 1	Agregado 2	Agregado 3	
	% que pasa la malla			
25	0	0	0	0
19	0	0	59	59
12,5	0	8	137	145
9,5	0	188	20	208
4,75	11	452	6	469
2,36	175	16	0	191
1,18	131	1	0	132
0,6	97	1	0	
0,3	74	0	0	74
0,15	37	0	0	37
0,075	20	1	0	21
Pasa 200	54	9	1	64
Total	600	675	225	1500

Los resultados obtenidos de gravedad específica teórica máxima Gmm obtenida para la granulometría de prueba conforme al método AASHTO T209 se muestran en la tabla A.6.

$$G_{mm} = \frac{W_s}{W_s - W_w} = \frac{1579.5}{1579.5 - 924.2} = 2.410$$

Tabla A.6. Datos y cálculo de la gravedad específica teórica máxima de la mezcla asfáltica (Gmm)

Gmm para Pb inicial (AASHTO T 209)							
Datos						Cálculos	
Espécimen	Pb, inicial	Peso en aire W_s	Peso de la muestra y recipiente con agua	Peso del matraz con agua	Peso de la muestra en agua W_w	Gmm	Gmm promedio
1	0.0583	1579.5	2647.6	1723.4	924.2	2.410	2.408
2	0.0583	1581.0	2647.3	1723.4	923.9	1	

Gravedad específica bruta de la mezcla asfáltica compactada (ASTM D 2726)

Este ensayo se realizará en los dos especímenes compactados a 100 giros de diseño.

$$G_{mb} = \frac{W_a}{W_{ss} - W_w} = \frac{4429.7}{4445.8 - 2523.8} = 2.305$$

Tabla A.5 Datos y cálculo de la gravedad específica bruta de la mezcla asfáltica compacta (Gmb)

Gmb @ N diseño, para Pb inicial (ASTM D 1128)						
	Datos				Cálculos	
Espécime n	Pb inicial	Peso seco, W _a	Peso sumergido, W _w	Peso saturado superficialmente seco, W _{ss}	Gmb	Gmb promedio
1	0.0584	4429.7	2523.8	4445.8	2.305	2.306
2	0.0584	4421.0	2521.3	4436.6	2.308	

Se deberá verificar las propiedades del agregado cumplen la siguiente relación:

$$G_{sa} > G_{se} > G_{sb}$$

Para realizar esta comprobación se deberá calcular el valor de Gse:

$$G_{se} = \frac{\frac{P_{mm} - P_b}{G_{mm}} - \frac{P_b}{G_b}}{\frac{P_{mm}}{G_{mm}} - \frac{P_b}{G_b}} = \frac{\frac{100 - 5.84}{2.408} - \frac{5.84}{1.030}}{\frac{100}{2.408} - \frac{5.84}{1.030}} = 2.638$$

Se observa que si cumple con la relación por lo cual se puede seguir con el diseño.

$$2.677 > 2.638 > 2.510$$

c. Propiedades volumétricas iniciales

De los datos capturados por el Compactador Giratorio se obtuvieron los siguientes valores:

Registros de altura del compactador giratorio de cada uno de los especímenes a los giros iniciales (N_{ini}) y de diseño (N_{dis}).

Tabla A.7 Datos y registro del compactador giratorio.

Número de especímen	Datos	
	Altura h @Nini	Altura h@Ndis
1	126.3	112.1
2	125.6	111.4

Considerando los datos anteriores se obtiene primero el factor de corrección como se muestra a continuación:

$$C \text{ para mezcla de prueba 1A} = \frac{h@Nx_{medido}}{h@Nx_{estimado}} = \frac{112.1}{126.3} = 0.8876 \quad (14)$$

$$C \text{ para mezcla de prueba 1B} = \frac{h@Nx_{medido}}{h@Nx_{estimado}} = \frac{111.4}{125.6} = 0.8869$$

$$G_{mb}@N_{ini} \text{ muestra 1A} = Cx (G_{mb} @ N_{dis}) = 0.8876 * 2.305 = 2.046 \quad (15)$$

$$G_{mb}@N_{ini} \text{ muestra 2A} = Cx (G_{mb} @ N_{dis}) = 0.8869 * 2.308 = 2.047$$

$$G_{mb} @ N_{ini} \text{ promedio} = 2.046$$

Tabla A.8 Determinación de la gravedad específica bruta de la mezcla asfáltica compactada a los giros iniciales (Gmb@Nini).

Datos			Cálculos		
Número de espécimen	Altura h @Nini	Altura h@ Ndis	C	Gmb @ Nini	Gmb promedio @ Nini
1	126.3	112.1	0.8876	2.046	2.046
2	125.6	111.4	0.8869	2.047	

Después se calculan los vacíos de aire a los giros de diseño (%Va) utilizando la fórmula 16.

$$V_a@N_{dis} = \left(\frac{G_{mm} - G_{mb}@N_{dis}}{G_{mm}} \right) x 100 = \left(\frac{2.408 - 2.306}{2.408} \right) x 100 = 4.2 \quad (16)$$

Para determinar el valor de los vacíos en el agregado mineral (VAM) se utiliza la fórmula 17.

$$P_s = \text{contenido de agregado} = 100 - \text{contenido de asfalto en porcentaje (\%)} = 100 - 5.84 = 94.16$$

$$VAM = 100 - \frac{G_{mb}@H_{des} * P_s}{G_{sb}} = 100 - \frac{2.306 * 94.16}{2.510} = 13.49 \quad (17)$$

Aplicando la fórmula 18 o 19 se obtiene el porcentaje de gravedad específica teórica máxima de la mezcla (% de Gmm) a los giros de diseño (Ndis)

$$\%G_{mm} @ N_{dis} = 100 - V_a @ N_{dis} = 100 - 4.2 = 95.8 \quad (18)$$

$$\%G_{mm} @ N_{dis} = \left(\frac{G_{mb}@N_{dis}}{G_{mm}} \right) * 100 = \left(\frac{2.306}{2.408} \right) * 100 = 95 \quad (9)$$

De igual forma calculamos el % de Gmm a los giros iniciales, aplicando la fórmula 19.

$$\%G_{mm} @ N_{ini} = \left(\frac{G_{mb}@N_{ini}}{G_{mm}} \right) * 100 = \left(\frac{2.046}{2.408} \right) * 100 = 85.0$$

Resumiendo, los resultados obtenidos tenemos:

Tabla A.9 Resumen de propiedades volumétricas de la combinación granulométrica de prueba inicial.

Valores medidos				Valores calculados							
Pb inicial	Altura @ Nini	Altura @Ndis	Gmb @ Ndis	C	Gmb @ Nini	Gmb promedio @ Nini	Gmb promedio @Ndis	%Gm m @Nini	%Gm m @Ndis	Va %	VAM %
5.84	126.3	112.1	2.305	0.8876	2.046	2.046	2.306	85.0	95.8	4.2	13.5
5.84	125.6	111.4	2.308	0.8869	2.047						

d. Estimación de propiedades volumétricas para un Va de 4%

- Se determina el porcentaje de asfalto estimado:

$$Pb_{estimado} = Pb_{inicial} - [0.4 * (4 - Va_{inicial})] = 5.84 - [0.4 * (4 - 4.2)] = 5.93$$

- Se determinan los vacíos en el agregado mineral aplicando la fórmula 21:

$$VAM_{estimado} = VAM_{inicial} + [K * (4 - Va_{inicial})] = 13.48 + [0.2 * (4 - 4.2)] = 13.43$$

Dado que los vacíos de las pruebas iniciales fueron mayores a 4.0 (valor real 4.6%) el valor de K es de 0.2

- Se determinan los vacíos llenos con asfalto aplicando la fórmula 22:

$$VFA_{estimado} = 100 * \left[\frac{VAM_{estimado} - Va}{VAM_{estimado}} \right] = 100 * \left[\frac{13.43 - 4.0}{13.43} \right] = 70.22$$

- Se determina el contenido de asfalto efectivo utilizando la fórmula 23:

$$Pbe_{estimado} = Pb_{estimado} - \left[(P_s * G_b) * \left(\frac{G_{se} - G_{sb}}{G_{se} * G_{sb}} \right) \right] = 5.93 - \left[(100 - 5.93) * 1.030 * \left(\frac{2.638 - 2.510}{2.638 * 2.510} \right) \right] = 4.06$$

- Se determina la proporción filler-asfalto utilizando la fórmula 24:

$$DP_{estimada} = \frac{P_{0.075}}{Pbe_{estimada}} = \frac{4.3}{4.06} = 1.1$$

- Se determina la gravedad específica teórica máxima inicial de la mezcla a los giros iniciales mediante la fórmula 25.

$$\%G_{mm} @Nini_{estimado} = \%G_{mm} @Nini_{ini} - (4.0 - Va_{inicial}) = 85 - (4 - 4.2) = 85.2$$

Tabla A.10 Resumen cálculo del contenido de asfalto estimado.

Mezcla de prueba	Resumen					
	Pb _{estimado}	VAM _{estimado}	VFA _{estimado}	%Gmm @ Nini @Pb _{estimado}	Pbe _{estimado}	DP _{estimado}
Mezcla 1	5.93	13.43	70.22	85.2	4.0	1.1

e. Selección de la granulometría de trabajo.

Este punto consiste que seleccionar la granulometría a utilizar en el diseño.

Tabla A.11 Resumen de propiedades volumétricas estimadas en las combinaciones de prueba.

Combinación de prueba	Pb _{estimado}	VAM _{estimado}	VFA _{estimado}	%Gmm @ Nini @Pb _{estimado}	Pbe _{estimado}	DP _{estimado}
Combinación 1	6.07	14.10	71.6	84.7	4.1	0.9
Combinación 2	5.81	13.43	70.2	85.2	4.0	1.1
Combinación 3	5.81	13.32	70.0	85.7	3.9	1.2

En este caso las tres granulometrías de prueba cumplen los parámetros volumétricos especificados. Se decidió utilizar la granulometría de prueba número dos (2) dado que su costo de producción sería menor en comparación con la granulometría uno (1) y además presenta menor relación filler-asfalto (abajo del límite superior) que la propuesta tres (3).

3. Determinación del contenido óptimo de asfalto

Como primer paso, se determina el valor de Gmm para el contenido de asfalto estimado (Pb_{estimado}).

Tabla A.12 Determinación de la gravedad específica teórica máxima de la mezcla al contenido de asfalto estimado (Pbestimado).

Gmm para Pb, estimado (AASHTO T 209)							
Datos						Cálculos	
Espécimen	Pb, estimado	Peso en aire Ws	Peso de la muestra y matraz con agua	Peso del matraz con agua	Peso de la muestra en agua Ww	Gmm	Gmm Promedio
1	0.058	1603.5	2660.4	1723.4	937	2.406	2.402
2	0.058	1600.5	2656.4	1723.4	933	2.398	

Tabla A.13. Determinación de la gravedad específica bruta de la mezcla asfáltica compactada Gmb para cada contenido de asfalto a los giros de diseño N_{dis}

Gmb ASTM D 1128 @Ndis					
	Datos obtenidos			Cálculo	
Contenido de asfalto % _p	Peso seco W _s	Peso sumergido W _{sum}	Peso superficialmente seco W _{ss}	Gmb	Promedio Gmb
4.8%	4412.3	2514.0	4449.1	2.280	2.279
4.8%	4402.1	2500.1	4433.1	2.277	
5.30%	4422.3	2520.6	4446.9	2.296	2.296
5.30%	4417.0	2518.4	4441.3	2.297	
5.8%	4425.9	2522.8	4445.5	2.302	2.307
5.8%	4435.4	2529.0	4448.0	2.311	
6.3%	4448.1	2540.7	4466.6	2.310	2.314
6.3%	4439.3	2555.3	4469.4	2.319	
6.8%	4480.6	2569.0	4487.0	2.336	2.332
6.8%	4504.5	2575.7	4510.1	2.329	

De los datos almacenados en el compactador giratorio se obtuvieron las alturas a los giros iniciales y a los giros de diseño para cada uno de los especímenes mostrados en la tabla A.14.

Tabla A.14 Registro de alturas a los giros iniciales (@Nini) y de diseño (@Ndis) para cada espécimen.

% _p	Altura (H) @ Nini	Altura (H) @ Ndis
4.8%	126.5	112.9
4.8%	126.2	113.1
5.30%	125.7	112.3
5.30%	124.6	112.5
5.8%	124.3	111.2
5.8%	125.8	112.2
6.3%	126.1	112.2

6.3%	122.6	109.4
6.8%	125.3	111.1
6.8%	126.1	112.5

Cálculo del valor de la gravedad específica bruta de la mezcla asfáltica compactada, a los giros iniciales G_{mb} @ N_{ini} utilizando la fórmula 15, obteniendo primero el factor de corrección C por medio de la fórmula 15, como se muestra en la tabla A.15.

Por ejemplo, para el primer espécimen a un contenido de asfalto de 4.8% tenemos:

$$C = \frac{h@Nx_{medido}}{h@Nx_{estimado}} = \frac{112.9}{126.5} = 0.892 \quad (14)$$

$$G_{mb}@N_{ini} = Cx(G_{mb}@N_{dis}) = 0.892 * 2.280 = 2.034 \quad (15)$$

Tabla A.15 Cálculo de la gravedad específica bruta de la mezcla asfáltica compactada a los giros iniciales de diseño para cada uno de los contenidos de asfalto.

Cálculo			Datos obtenidos		Cálculos		
Contenido de asfalto %, Pb	G_{mb}_{dis}	$G_{mb}@N_{dis}$ Promedio	Altura (h) @ N_{ini}	Altura (h) @ N_{dis}	Corrección. C	$G_{mb}@N_{ini}$	Promedio $G_{mb}@N_{ini}$
4.8%	2.280	2.279	126.5	112.9	0.892	2.034	2.038
4.8%	2.277		126.2	113.1	0.896	2.041	
5.3%	2.296	2.296	125.7	112.3	0.893	2.051	2.062
5.3%	2.297		124.6	112.5	0.903	2.074	
5.8%	2.302	2.307	124.3	111.2	0.895	2.059	2.060
5.8%	2.311		125.8	112.2	0.892	2.061	
6.3%	2.310	2.314	126.1	112.2	0.890	2.055	2.062
6.3%	2.319		122.6	109.4	0.892	2.070	
6.8%	2.336	2.332	125.3	111.1	0.887	2.071	2.074
6.8%	2.329		126.1	112.5	0.892	2.77	

- Se calcula la gravedad específica efectiva del agregado G_{se} utilizando la fórmula 26.

$$G_{se} = \frac{\frac{P_{mm} - P_b}{P_{mm} - P_b}}{\frac{G_{mm} - G_b}}{\frac{100 - 5.8}{2.402} - \frac{5.8}{1.030}}} = 2.617$$

- Se determina la gravedad específica teórica máxima de la mezcla a otros contenidos de asfalto utilizando la fórmula 27. Por ejemplo, calculemos la gravedad específica teórica máxima de la mezcla (G_{mm}) a un contenido de asfalto del 6.8%.

$$G_{mm} = \frac{P_{mm}}{\frac{P_s}{G_{se}} + \frac{P_b}{G_b}} = \frac{100}{\frac{(100-6.8)}{2.617} + \frac{6.8}{1.030}} = 2.369$$

- Se calcula la gravedad específica teórica máxima para los otros contenidos de asfalto como se muestra en la tabla A.15 y posteriormente se calcula el porcentaje de G_{mm} a los giros iniciales $\%G_{mm} @ N_{ini}$ utilizando la fórmula 15. Por ejemplo, para 4.8 de contenido de asfalto en el primer espécimen:

$$\%G_{mm} @ N_{ini} = \frac{G_{mb@Nini}}{G_{mm}} * 100 = \frac{2.034}{2.437} * 100 = 83.6$$

Tabla A.15.1 Cálculo de la gravedad específica teórica máxima de la mezcla (G_{mm}) y el porcentaje de gravedad específica teórica máxima de la mezcla a los giros iniciales ($\%G_{mm} @ N_{ini}$) para cada uno de los contenidos de asfalto.

Gse = 2.617

Cálculo			Cálculos			%Gmm @Nini
Contenido de asfalto %, Pb	Gmb@ Ndis dis (Ws/(Wss- Wsum))	Promedio Gmb @dis	Gmb @Nini	Promedio Gmb @Nini	Gmm	
4.8	2.280	2.279	2.034	2.038	2.437	83.6
4.8	2.277		2.041			
5.3	2.296	2.296	2.051	2.062	2.419	85.2
5.3	2.297		2.074			
5.8	2.302	2.307	2.059	2.060	2.402	85.8
5.8	2.311		2.061			
6.3	2.310	2.314		2.062	2.385	86.5
6.3	2.319		2.070			
6.8	2.336	2.332	2.071	2.074	2.369	87.6
6.8	2.329		2.77			

Se determinan los vacíos de aire (V_a) de las mezclas de prueba mediante la fórmula 18; los vacíos del agregado mineral (VAM) mediante la fórmula 19, el porcentaje de gravedad específica teórica máxima a los giros de diseño ($\%G_{mm} @ N_{dis}$) mediante la fórmula 15; los vacíos llenos con asfalto (VFA) mediante la fórmula 24, contenido de asfalto efectivo (P_{be}) mediante la fórmula 26 y la

relación filler-asfalto (Dp) mediante la fórmula 27. En tabla A.16 se muestra el resumen de datos obtenidos.

Por ejemplo, para un contenido de asfalto de 4.8% tenemos

$$V_a @ N_{dis} = \left(\frac{G_{mm} - G_{mb} @ N_{dis}}{G_{mm}} \right) \times 100 = \left(\frac{2.437 - 2.279}{2.437} \right) \times 100 = 6.48 \quad (18)$$

$$VAM = 100 - \frac{G_{mb} * P_s}{G_{sb}} = 100 - \frac{2.279 * (100 - 4.8)}{2.510} = 13.57 \quad (19)$$

$$VFA = 100 \times \left[\frac{VAM - V_a}{VAM} \right] = 100 \times \left[\frac{13.57 - 6.48}{13.57} \right] = 52.2 \quad (24)$$

$$\%Gmm @ N_{dis} = \frac{G_{mb} @ N_{dis}}{G_{mm}} * 100 = \frac{2.279}{2.437} * 100 = 93.5 \quad (15)$$

$$P_{be} = P_b - \left[(P_s * G_b) * \left(\frac{G_{se} - G_{sb}}{G_{se} * G_{sb}} \right) \right] = 4.8 - \left[((100 - 4.8) * 1.030) * \left(\frac{2.617 - 2.510}{2.617 * 2.510} \right) \right] = 3.21. \quad (26)$$

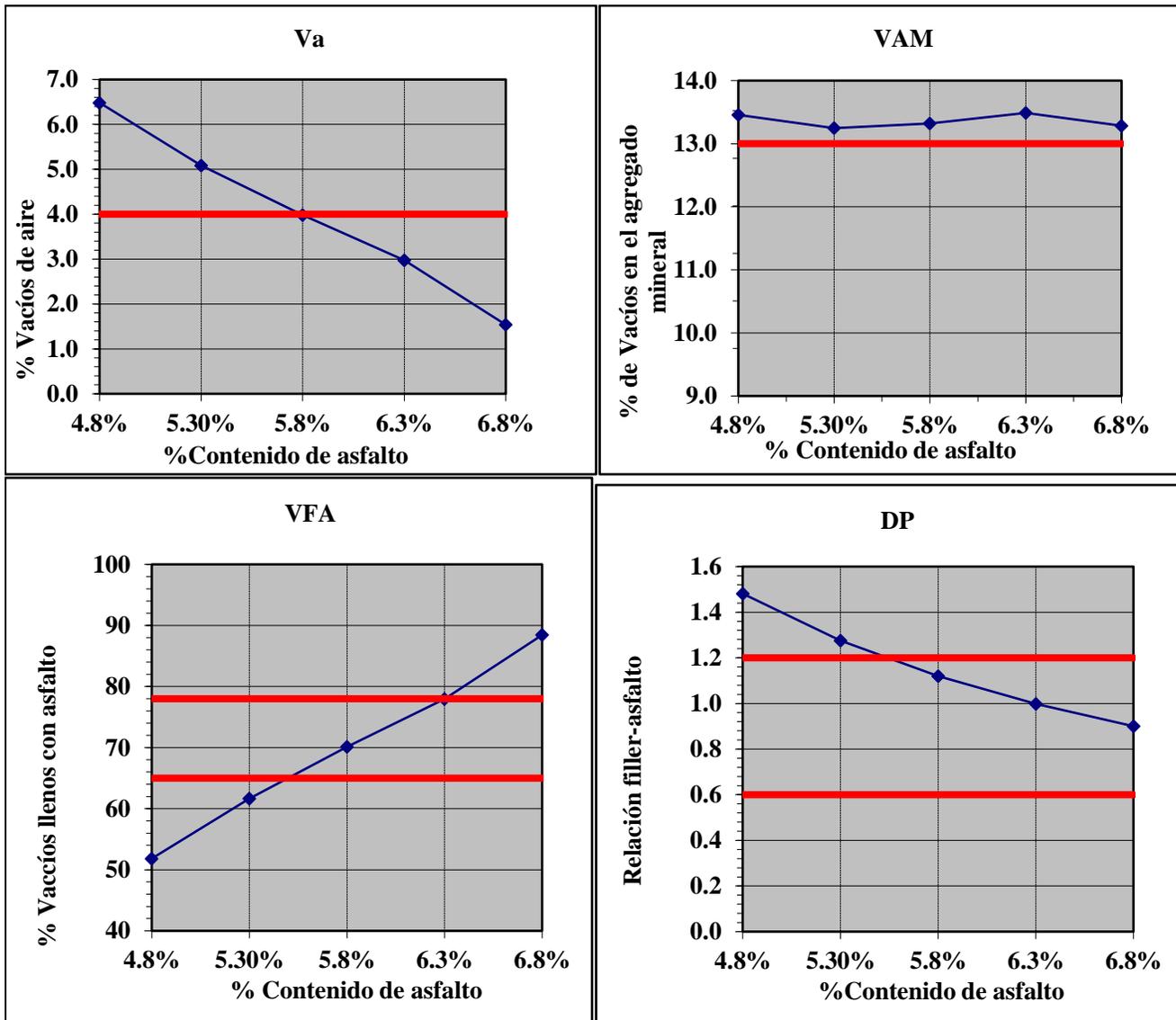
$$DP_{estimada} = \frac{P_{0.075}}{P_{be}} = \frac{4.3}{3.21} = 1.3 \quad (27)$$

Tabla A.16. Resumen de las propiedades volumétricas a los giros de diseño @Ndis

					Propiedades volumétricas @ Ndis					
Pb %	Promedi o Gmb @Ndis	Prom. Gmb @Nini	Gmm	%Gmm @Nini	Vacíos de aire Va, %	VAM	%Gmm	VFA	Pbe	Dp
4.8	2.279	2.038	2.437	83.6	6.48	13.57	93.5	52.2	3.21	1.3
5.3	2.296	2.062	2.419	85.257	5.07	13.36	94.9	62.0	3.72	1.1
5.8	2.307	2.060	2.402	85.775	3.97	13.43	96.0	70.4	4.22	1.0
6.3	2.314	2.062	2.385	86.462	2.97	13.60	97.0	78.2	4.73	0.9
6.8	2.332	2.074	2.369	87.581	1.53	13.40	98.5	88.6	5.24	0.8

1. Se grafican los valores de vacíos de aire (Va), Vacíos del agregado mineral (VAM), vacíos llenos con asfalto (VFA) y relación filler-asfalto (Dp) contra el contenido de asfalto y se grafican los límites de control. En este ejemplo los límites de control corresponden a los valores correspondientes a la tabla 7 para un tamaño nominal de 19mm y para un nivel de tránsito III.

Figura 4. Representación gráfica de las propiedades volumétricas con respecto al contenido de asfalto.



$$Pb_{\text{óptimo}} = \left(0.5 * \frac{Va_s - 4}{Va_s - Va_i}\right) + Pb_i = \left(0.5 * \frac{5.07 - 4}{5.07 - 3.97}\right) + 5.3 = 5.79 = 5.8 \text{ * Ec. 26}$$

Para calcular el contenido óptimo de asfalto para un porcentaje de vacíos de aire del 4.0% aplicamos la ecuación 26 obteniendo:

$$Pb_{\text{óptimo}} = \left(0.5 * \frac{Va_s - 4}{Va_s - Va_i}\right) + Pb_i = \left(0.5 * \frac{5.07 - 4}{5.07 - 3.97}\right) + 5.3 = 5.79 \text{ Ec. 26}$$

4. Verificación de la máxima densificación

Para verificar la máxima densificación es necesario determinar el valor de gravedad específica bruta de la mezcla asfáltica compactada a los giros máximos y la gravedad específica teórica máxima. Para esto se compactan dos especímenes al contenido óptimo de asfalto a los giros máximos (Nmax) que para nuestro ejemplo fueron de 160 (para un nivel de tránsito de 3 a 30 millones de ejes equivalentes) y se preparan dos mezclas para obtener la gravedad específica teórica máxima al contenido óptimo de asfalto. Las alturas registradas a cada nivel de giro para cada uno de los especímenes se muestran en la tabla A.17.

Tabla A.17. Registro de altura de los especímenes desde el ciclo inicial (@Nini) hasta los giros máximos de diseño (@Ndis)

Número de ciclo N	Especímen A Altura (h)	Especímen B Altura (h)
5	128.8	129.1
6	127.7	127.9
7	126.7	127
8	125.9	126.1
9	125.2	125.4
10	124.5	124.7
15	122.1	122.2
20	120.4	120.5
25	119.1	119.2
30	118.1	118.2
40	116.6	116.7
50	115.4	115.5
60	114.5	114.7
75	113.5	113.6
80	113.2	113.3
100	112.3	112.4
115	111.5	111.8
125	111.2	111.5
150	110.6	110.8
160	110.4	110.6

En tabla A.18 se muestran la determinación de la gravedad específica bruta de la mezcla compactada a los giros máximos de diseño.

Tabla A.18 Cálculo de la gravedad específica bruta de la mezcla compactada a los giros máximos de diseño (Gmb @Nmax)

ID muestra	Datos				Cálculo
	Pb óptimo (en fracción)	Peso seco Wa	Peso sumergido Ww	Peso superficialmente seco Wss	
A	0.058	4450	2556.1	4455.3	2.343
B	0.058	4441.9	2560.5	4457.4	2.342

Se determina el porcentaje de gravedad específica teórica máxima de la mezcla a los giros: iniciales %Gmm@Nini, a los giros de diseño %Gmm@Ndis y a los giros máximos de diseño %Gmm@Nmax. En la tabla A.19 se muestran los cálculos y los resultados obtenidos.

Por ejemplo, para la muestra A:

$$C @Nini = \frac{h@Nx_{max}}{h@Nx_{ini}} = \frac{110.4}{125.9} = 0.877 \text{ Fórmula (16)}$$

$$G_{mb}@N_{ini} = Cx (G_{mb} @ Nx_{max}) = 0.877 * 2.343 = 2.055 \text{ Fórmula (17)}$$

$$C @Ndis = \frac{h@Nx_{max}}{h@Nx_{dis}} = \frac{110.4}{112.3} = 0.983 \text{ Fórmula (16)}$$

$$G_{mb}@N_{dis} = Cx (G_{mb} @ Nx_{max}) = 0.983 * 2.343 = 2.303 \text{ Fórmula (17)}$$

$$\%G_{mm} @N_{ini} = \frac{G_{mb}@N_{ini}}{G_{mm}} = \frac{2.055}{2.402} = 85.5 \text{ (Fórmula 15)}$$

$$\%G_{mm} @N_{dis} = \frac{G_{mb}@N_{dis}}{G_{mm}} = \frac{2.303}{2.402} = 95.9 \text{ (Fórmula 15)}$$

$$\%G_{mm} @N_{max} = \frac{G_{mb}@N_{max}}{G_{mm}} = \frac{2.342}{2.402} = 87.5 \text{ (Fórmula 15)}$$

Tabla A.19 Cálculo de la gravedad específica teórica máxima a los giros: iniciales y de diseño

Identificación de la muestra	Cálculo	Datos Giros			Cálculo Gmb @ Nini			Cálculo Gmb @ Ndis		
		Ini	Dis	Máx.						
		8	100	160						
	Gmb @ Nmax	Altura (h) @ Nini	Altura (h) @ Ndis	Altura (h) @ Nmax	Corrección C	Gmb @Nini	Promedio Gmb @ Nini	Corrección C	Gmb @ Ndis	Promedio Gmb @ Ndis
A	2.343	125.9	112.3	110.4	0.877	2.055		0.983	2.303	2.304
B	2.342	126.1	112.4	110.6	0.877	2.054	2.055	0.984	2.304	

Tabla A.19 Continuación. Cálculo de la gravedad específica teórica máxima a los giros: máximos

ID muestra	Cálculo	Datos Giros			Cálculo Gmb @ Nmax		%Gmm @Nini	%Gmm @Ndis	%Gmm @Nmax
		Ini	Dis	Máx.					
		8	100	160					
	Gmb @ Nmax	Altura (h) @ Nini	Altura (h) @ Ndis	Altura (h) @ Nmax	Gmb @ N max medido	Promedio Gmb @ Nmax			
A	2.343	125.9	112.3	110.4	2.343	2.342	85.5	95.9	97.5
B	2.342	126.1	112.4	110.6	2.342				

5. Evaluación de la susceptibilidad de la mezcla asfáltica al daño inducido por humedad (TSR).

Suponga que se realizó un espécimen de prueba de 100mm de diámetro y 63.5 mm de altura, para verificar la masa de mezcla requerida para compactar los especímenes de susceptibilidad al daño por humedad TSR al 7.0% de vacíos de aire. Donde los datos obtenidos fueron:

Diámetro del espécimen especificado (d_t): 100mm

Altura del espécimen especificada (h_t): 63.5mm

Altura real del espécimen (h_r): 63.4mm

Diámetro del espécimen real (d_r): 100mm

Peso superficialmente seco del espécimen compactado a N@dis (W_{ss})= 1100.4g

Peso del espécimen sumergido compactado a N@dis (W_w)= 632.1g.

Solución

0. Se determina el volumen medido mediante la fórmula 31:

$$V_{medido} = (W_{ss} - W_w) = 1100.4 - 632.1 = 468.3$$

1. Se determina el factor de corrección por la fórmula 32:

$$C = \frac{V_{medido}}{V_{estimado\ real}} = \frac{468.3}{\pi \left(\frac{100^2}{4} \right) * 63.4 * 0.001} = \frac{468.3}{497.9} = 0.940$$

2. Se determina el volumen corregido por medio de la fórmula 33

$$V_{corregido} = C * V_{estimado\ teórico} = 0.940 * 498.7 = 469$$

3. Se determina el valor de la gravedad específica bruta de la mezcla asfáltica compactada para obtener siete por ciento de vacíos usando la fórmula 34:

$$G_{mb} = G_{mm} * 0.93 = 2.402 * 0.93 = 2.234$$

4. Se determina la masa de mezcla requerida mediante la fórmula 35:

$$Masa\ de\ mezcla\ requerida = G_{mb} * V_{corregido} = 2.234 * 469 = 1047\ g.$$

CAPÍTULO IV. GUÍA DE PROCEDIMIENTO CONSTRUCTIVO PARA PAVIMENTOS CON MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE DE GRANULOMETRÍA Densa DE ALTO DESEMPEÑO

A. CONTENIDO

Esta guía contiene el procedimiento constructivo para carpetas con mezclas asfálticas en caliente de granulometría densa de alto desempeño, con tamaño nominal de 19 mm (3/4”).

La guía se complementa con el procedimiento constructivo para carpetas asfálticas con mezcla en caliente, considerado en la Norma SCT: N-CTR-CAR-1-04-006/09 en los incisos E, F, G, H, I, J, K y L. En caso de discrepancia entre lo indicado en los incisos mencionados de la norma SCT y lo especificado en la presente guía, prevalecerá lo señalado en este documento.

B. DEFINICIÓN

Las carpetas asfálticas con mezcla en caliente, son aquellas que se construyen mediante el tendido y compactación de una mezcla de materiales pétreos y material asfáltico.

La carpeta asfáltica tendrá un espesor adecuado para desempeñar la función estructural de soportar y distribuir la carga de los vehículos hacia las capas inferiores del pavimento.

La mezcla asfáltica de alto desempeño, es una mezcla especialmente diseñada y construida para resistir deformaciones permanentes, fatiga y tener mayor resistencia a los agentes ambientales.

La mezcla asfáltica es un material compuesto de materiales pétreos, material asfáltico, filler y en algunos casos algún aditivo.

C. REFERENCIAS

MANUALES	DESIGNACIÓN
1. Principios de construcción de pavimentos de mezcla asfáltica en caliente	MS-22, Asphalt Institute
2. Hot mix asphalt materials, mixture design and construction	NCAT
3. Construyendo pavimentos de calidad de mezcla asfáltica en caliente	QIP-112S, traducción AMAAC de NAPA.
4. Guía práctica para hacer pavimentos de calidad	Traducción AMAAC de NAPA
5. Producción de mezcla asfáltica en caliente,	

	equilibrando los procesos	
6.	Calidad en la operación de máquinas pavimentadoras	Traducción AMAAC de NAPA
7.	Calidad en la operación de los compactadores de rodillos	Traducción AMAAC de NAPA
8.	Juntas longitudinales: problemas y soluciones	Traducción AMAAC de NAPA
9.	Producción de mezcla asfáltica en caliente (AMAAC)	MS-01 AMAAC
10.	Tendido y compactación de mezcla asfáltica en caliente (AMAAC)	MS-02 AMAAC

D. EQUIPO

D.1. PLANTA DE MEZCLADO

La mezcla asfáltica en caliente se fabricará en plantas de producción continua o discontinua, capaces de manejar en frío el número de fracciones de agregado que se exija para el cumplimiento del diseño de la mezcla.

La planta mezcladora contará como mínimo con:

- Tres tolvas para almacenar el material pétreo, protegidas de la lluvia y el polvo, y con separadores que eviten contaminación entre las diferentes fracciones del agregado.
- Dispositivos que permitan dosificar los materiales pétreos por peso, con un fácil ajuste de la dosificación de la mezcla en cualquier momento, para obtener la granulometría que indique el proyecto.
- Silo para el almacenamiento del filler de aporte, si se requiere, así como un sistema de dosificación del mismo, cuya operación debe ser independiente del sistema utilizado para el resto de los agregados y debe proteger el material de la humedad.

D.2. PAVIMENTADORAS

Las pavimentadoras que se utilicen, estarán provistas de un sistema electrónico (sensores) para el control de espesores.

D.3. COMPACTADORES

Tanto los compactadores metálicos como los neumáticos que se utilicen serán autopropulsados, en ningún caso podrán ser remolcados.

Los tipos y pesos de los compactadores, serán los que permitan obtener las densificaciones deseadas, sin afectar la estructura interna de la mezcla.

D.4. BARREDORAS MECÁNICAS

Todas las barredoras que se utilicen serán autopropulsadas, en ningún caso se aceptarán del tipo remolcadas.

E. EJECUCIÓN

El control de calidad de las diferentes etapas del proceso, se realizará de acuerdo a lo establecido en la Guía de Control y Aseguramiento de Calidad de las mezclas asfálticas en caliente de alto desempeño (Anexo 4).

El espesor mínimo compacto de colocación de la carpeta asfáltica con Tamaño Nominal de 19 mm (3/4") será como sigue: Para mezcla gruesa ($\leq 47\%$ de agregado que pasa la malla número 4) ≥ 6 cm de espesor compacto. Para mezcla fina ($> 47\%$ de agregado que pasa la malla número 4) ≥ 5 cm de espesor compacto.

Cuando el espesor total de la carpeta sea ≤ 10 cm se colocará en una sola capa para asegurar que todo el espesor de la carpeta trabaje monolíticamente.

La temperatura de mezclado del cemento asfáltico será la indicada por el proveedor del mismo, siendo ésta la adecuada para cumplir con las especificaciones que exige la Dependencia.

Previo al inicio de la producción se verificará que todos los instrumentos de control, especialmente los termómetros, de la planta estén calibrados y en buenas condiciones de operación.

Al cargar las tolvas de agregado, se tendrá cuidado de minimizar la segregación y degradación del agregado. Se mantendrá suficiente material en todas las tolvas para proveer un flujo constante y uniforme.

La mezcla que se utilice para el arranque de producción y calibración de la planta de mezcla en caliente será desechada y no se mezclará con la producción controlada.

Se asegurará la continuidad del suministro de mezcla para evitar juntas frías y no se descargará mezcla a cargadores. Preferentemente la mezcla se debe cargar directamente a los camiones de transporte.

E.2. ALMACENAMIENTO Y TRANSPORTE

Si es necesario almacenar temporalmente la mezcla, se hará en silos de almacenamiento, se recomiendan con aislamiento térmico, asegurándose de que la mezcla conserve la temperatura necesaria para que sea colocada cumpliendo los requisitos de temperatura solicitados.

El fondo y paredes de la caja de los camiones de transporte se mantendrán limpios y se rociarán con un agente antiadherente, antes de cada carga para evitar que se pegue la mezcla. La caja debe escurrirse previo a la carga de la mezcla. Podrán utilizarse agentes a base de silicón que son los más efectivos para estas aplicaciones. No se recomienda el uso de diesel como agente antiadherente (no funciona bien con otros agentes, y creará problemas durante la pavimentación).

Para disminuir el riesgo de segregación de la mezcla, el procedimiento de carga al camión de transporte, será primero en la parte delantera de la caja, después en la parte trasera y finalmente en el centro.

Durante el transporte, la mezcla se cubrirá con una lona para mantener su temperatura y evitar que se contamine con polvo u otros materiales extraños.

E.3. TRAMO DE PRUEBA

La construcción del tramo de prueba tiene como objetivos la calibración de la planta, la verificación de que la mezcla definida en el diseño puede ejecutarse, la evaluación del equipo y procedimientos de puesta en obra.

La temperatura de mezclado del cemento asfáltico será la indicada por el proveedor del mismo, siendo ésta la adecuada para cumplir con las especificaciones.

Se ejecutará previamente un tramo de prueba de mínimo 200 metros de longitud por 7m de ancho, donde se realizarán por lo menos las siguientes evaluaciones: grado de compactación, propiedades volumétricas, granulometría, contenido de asfalto, susceptibilidad a la humedad y susceptibilidad a la deformación permanente.

En caso de que el tramo de prueba construido no cumpla con todos los objetivos para los cuales se construye un tramo de prueba, se tendrá que ejecutar todos los tramos de prueba necesarios hasta cumplir con tales objetivos.

E.4. TENDIDO DE LA MEZCLA ASFÁLTICA

Es recomendable utilizar equipos de transferencia de la mezcla, de los camiones a la pavimentadora, para uniformizar las temperaturas y evitar segregación de la mezcla.

La capacidad y especificaciones de la pavimentadora serán las necesarias para cumplir en tiempo y forma con el plan de trabajo establecido.

Cualquier mezcla derramada desde los camiones de carga será eliminada del frente de la pavimentadora para mejorar el acabado.

No se utilizarán mezclas contaminadas o que no cumplan los requerimientos solicitados. Para prevenir la adherencia, el agente anti adherencia se rociará sobre la pavimentadora y herramientas. No se utilizará diésel.

La operación de la pavimentadora será uniforme y continua, para producir una carpeta de alta calidad, evitando paros que generen juntas frías y afecten la calidad de la carpeta.

Las juntas longitudinales en el pavimento existente estarán superpuestas por lo menos 150 mm **FIGURA 1** y **FIGURA 2**. Una junta de construcción directamente sobre las juntas existentes será propensa al agrietamiento y a la penetración de humedad.

Las juntas transversales tendrán un traslape mínimo de 150 mm de la carpeta nueva sobre la vieja (**FIGURA 3**). Se tendrán que colocar tablones en el borde del pavimento, para proporcionar a la compactadora una superficie sobre la cual pueda rodar, una vez que sobrepase el borde de la carpeta asfáltica y no dañarla (**FIGURA 4**).

Las juntas mal construidas aparecerán como un abundamiento o una ondulación en la carpeta.

Las juntas longitudinales y transversales se terminarán a 90 °, utilizando los equipos específicos para tal fin.

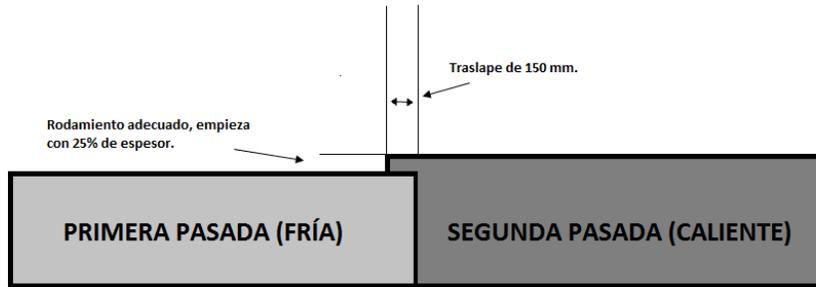


FIGURA 1.- Juntas longitudinales.¹

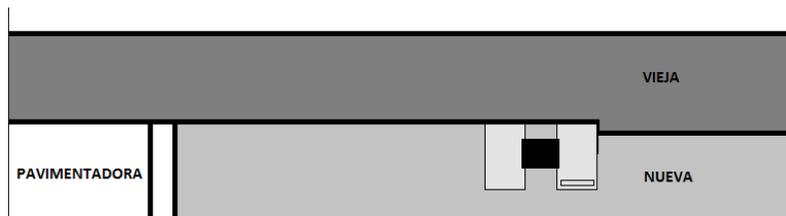


FIGURA 2.- Juntas longitudinales.²

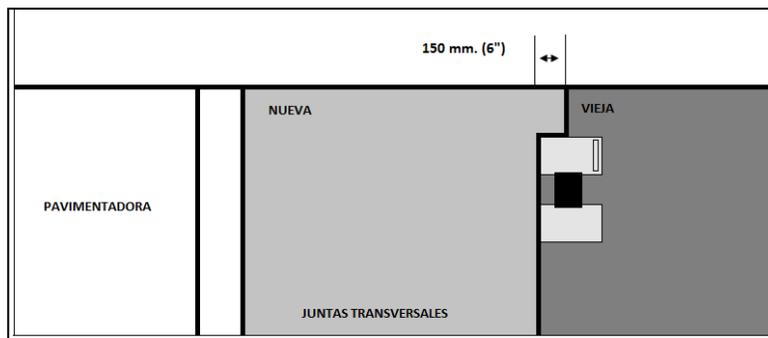


FIGURA 3.- Juntas transversales.³

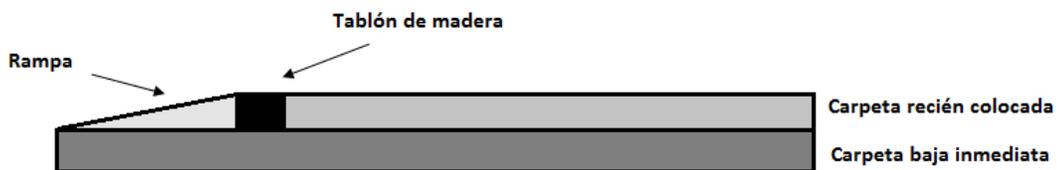


FIGURA 4.- Juntas transversales.⁴

¹ QIP-121S, 2008.p. 4

² Manual de Supervisión MS-2, 2012. p. 48

³ Manual de Supervisión MS-2, 2012. p. 46

⁴ Manual de Supervisión MS-2, 2012. p. 46

E.5. COMPACTACIÓN DE LA MEZCLA ASFÁLTICA

El patrón de compactación se definirá de acuerdo con aquel que cumpla con un noventa y cuatro (94) a noventa y ocho (98) por ciento de la gravedad específica teórica máxima suelta (Gmm) de la mezcla, determinada en el campo para la mezcla producida y tendida en el tramo prueba.

Se requieren al menos un compactador de rodillo con modulo vibratorio y un compactador neumático, con sistema de irrigación funcionando. También se pueden utilizar compactadores metálicos oscilatorios.

Para prevenir la adherencia de la mezcla a los compactadores, se podrán utilizar de 1 a 2 tazas de suavizante de telas, adicionadas en cada carga de agua al tanque del compactador.

En el uso del compactador de rodillos de acero se mantendrá la rueda impulsora por delante de la rueda de la dirección sobre todo en la primera pasada, ya que la rueda de dirección al ser peso muerto tiene tendencia a empujar la mezcla causando ondulación.

En el caso del compactador de neumáticos, no se utilizará en las primeras pasadas, ya que la fuerza de compactación es puntual, dejando mal acabado.

La cantidad de equipos estará acorde con el ritmo de la obra (al menos dos compactadores por carril) que trabajen en tándem, para que no se produzcan demoras ni enfriamiento de la mezcla antes de su compactación. La compactación se completará por lo menos con dos pasadas de los compactadores operando en modo estático, siendo la temperatura de compactación la recomendada por el proveedor del material asfáltico modificado. Se verificará que no haya indicios de trituración del material pétreo.

La capa asfáltica de rodamiento sólo será abierta al tránsito cuando se haya completado el proceso de compactación o si el material presenta una temperatura menor a 85° C.

1. Juntas transversales.
2. Borde exterior.
3. Compactación inicial e intermedia, comenzando en el lado bajo y avanzando hacia el lado alto.
4. Compactación final.

El proceso de compactación para capas con espesor menor de 10 cm, en escalón o empalmado una franja previamente colocada o cualquier otra barrera, tendrá la siguiente secuencia:

1. Juntas transversales.
2. Juntas longitudinales.
3. Borde exterior.
4. Compactación inicial e intermedia, comenzando en el lado bajo y avanzando hacia el lado alto.
5. Compactación final.

F. CRITERIOS DE ACEPTACIÓN O RECHAZO

Como parte de los criterios de aceptación o rechazo de la carpeta asfáltica terminada, se extraerán núcleos para verificar que se cumplan los requisitos solicitados de acuerdo a lo establecido en el manual de control y aseguramiento de calidad de mezclas densas de alto desempeño (Capítulo V).

Es conveniente colocar una capa de rodadura sobre la carpeta asfáltica, con la finalidad de protegerla del desgaste directo de los neumáticos de los vehículos y de los agentes ambientales, y proporcionar una adecuada resistencia a la fricción que cumpla con lo establecido en el inciso H.4 de la Norma SCT: N-CTR-CAR-1-04-006 vigente.

G. SEÑALAMIENTO Y DISPOSITIVOS PARA PROTECCION EN OBRAS

Este apartado se describe en la Norma SCT vigente: Señalamiento y dispositivos para protección en obras N-CTR-CAR-1-07-016.

CAPÍTULO V. GUÍA DE CONTROL Y ASEGURAMIENTO DE CALIDAD PARA MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE DE GRANULOMETRÍA Densa DE ALTO DESEMPEÑO

A. CONTENIDO

En este documento se trata lo referente al control y aseguramiento de calidad de la producción, tendido y compactación de las mezclas asfálticas en caliente de acuerdo a las especificaciones y diseño de las mezclas de alto desempeño.

Cubre aspectos tales como el plan de control y aseguramiento de la producción y tendido previo al arranque y rutinario de la mezcla en caliente, guías de ajuste de producción y colocación de las mezclas en caliente, equipo de laboratorio y campo requeridos para realizar el control de calidad.

B. DEFINICIONES

- B.1. CALIDAD.** Grado en el que un conjunto de características inherentes cumple con los requisitos.
- B.2. REQUISITO.** Necesidad o expectativa establecida, generalmente implícita u obligatoria.
- B.4. ASEGURAMIENTO DE LA CALIDAD.** Parte de la gestión de la calidad orientada a proporcionar confianza en que se cumplirán los requisitos de la calidad.
- B.5. FÓRMULA DE TRABAJO.** Combinación de materiales pétreos, filler/fibras, con el contenido óptimo de asfalto que se estableció en el diseño de la mezcla en caliente para cumplir con las propiedades volumétricas y de desempeño estipuladas en la especificación particular.
- B.6. LOTE DE PRODUCCIÓN.** Determinada unidad de medida de fabricación de un conjunto que se planifica y se fabrica con referencia a un número.
- B.7. SUBLOTE.** Una porción del lote, o la localización de donde una muestra es tomada.

C. REFERENCIAS

Las normas y manuales a los que se hace referencia en esta guía corresponden a las versiones vigentes.

NORMAS Y MANUALES	DESIGNACIÓN
Ejecución de Obras	N-LEG-3
Ejecución de Supervisión de Obras	N-LEG-4
Control de Calidad Durante la Construcción o Conservación	N-CAL-1-01
Criterios Estadísticos de Muestreo	N-CAL-1-02
Análisis Estadísticos de Control de Calidad	N-CAL-1-03
Calificación y Aprobación de Laboratorios	N-CAL-2-05-001
	M-MMP-4-05-001
Muestreo de Materiales Pétreos para mezclas Asfálticas	M-MMP-4-04-001
Granulometría de Materiales Pétreos para mezclas Asfálticas.....	M-MMP-4-04-002
Practica estándar de muestreo de mezcla asfáltica.....	ASTM D979
Practica estándar de muestreo de agregados.....	ASTM D75
Método de prueba para la determinación del contenido de asfalto en la mezcla por medio del método de ignición....	ASTM D6307
Método de prueba para la extracción cuantitativa del Asfalto de una mezcla asfáltica.....	ASTM 2172
MANUALES	
Quality Control and Acceptance of Superpave-Designed Hot Mix Asphalt.....	NCHRP Report 409
Standard specifications for Construction and Maintenance Of Highways, Streets and Bridges. 2004 Dense Graded Hot-Mix Asphalt (Quality Control /Quality Analysis).....	Texas Department Of Transportation

D. FUNCIONES Y RESPONSABILIDADES

D.1. DE LA CONSTRUCTORA

Será responsable de lograr el cumplimiento de los requisitos de las mezclas en caliente de alto desempeño de acuerdo a las especificaciones mencionadas en el Capítulo 1. Será el responsable del aseguramiento y control de calidad, producción, manejo, mezclado y colocación de la mezcla asfáltica. Deberá mantener y proveer a la SCT a cuando ésta se lo solicite, los registros de control de calidad y deberá someterse a las verificaciones requeridas por la SCT.

D.2. DE LA DEPENDENCIA

En forma directa o a través de una empresa Supervisora realizará la verificación de calidad, por medio de muestreos y ensayos de materiales. La SCT o la empresa Supervisora verificarán el cumplimiento de los requisitos establecidos de las mezclas en caliente de alto desempeño de acuerdo a las especificaciones del Capítulo 1. Para asegurar el cumplimiento de los requisitos podrá inspeccionar la planta de producción, el tendido, la compactación, monitorear las operaciones y control de calidad. La dependencia será la responsable de aceptar o rechazar los tramos o subtramos aplicados en el proyecto particular.

E. REQUISITOS DE LOS LABORATORIOS Y PERSONAL TÉCNICO

Es necesario que se incluya la relación de cada uno de los profesionales técnicos que serán responsables del control de calidad de los trabajos, identificados con los cargos que ocuparán.

El personal técnico comprobará que es capaz de ejecutar de manera certera las pruebas que se exigen en esta guía. El laboratorio de Control de Calidad contará con al menos un técnico con el Reconocimiento AMAAC-IMT.

El personal técnico contará con una experiencia necesaria para garantizar la correcta ejecución del control de calidad.

Los laboratorios de control de Calidad contarán con el reconocimiento AMAAC-IMT, y el equipo necesario que se especifica en el Anexo A de esta guía.

F. SISTEMA DE CONTROL DE CALIDAD

F.1. EVALUACIÓN DE LA MEZCLA ASFÁLTICA DE CALIBRACIÓN Y TRAMO DE PRUEBA

Previo a la producción de mezcla asfáltica y arranque de obra, se realizará la calibración de la planta, la verificación de la mezcla definida en el diseño, evaluación del equipo y procedimientos de puesta en obra de la mezcla asfáltica en caliente. Es importante que esta etapa sea realizada dos a tres semanas antes del arranque de obra.

Considerar que los materiales a utilizar en la producción de la mezcla asfáltica serán los mismos con los que se realizó el diseño.

El control de calidad en esta etapa del proyecto considerará los siguientes puntos:

F.1.1. Evaluación de los materiales pétreos

Se muestreará directamente de los almacenamientos de la planta de mezcla en caliente, cada fracción y tipo de material que se utilizará en la elaboración de la mezcla asfáltica de acuerdo a la norma M-MMP-4-04-001 “Muestreo de Materiales Pétreos para Mezclas Asfálticas”

El laboratorio de control de calidad determinará en campo la granulometría de cada uno de los materiales pétreos de acuerdo a la norma M-MMP-4-04-002 utilizando las mallas especificadas en la **Tabla 4** y las características físicas citadas en la **Tabla 1** y **Tabla 2** de acuerdo a la especificación particular, bajo los métodos de prueba especificados en dichas tablas. Se reportarán los valores obtenidos como parámetros de control de calidad de los materiales pétreos previo al arranque de obra.

Tabla 1.- Características de calidad de la fracción gruesa.¹

Característica	Norma	Especificación
Gravedad específica bruta	ASTM C 127	2.4 mín.
Absorción, %	ASTM C127	Reportar
Caras fracturadas, % (2 caras o más)	ASTM D 5821	90 mín.
Desgaste Los Ángeles, %	ASTM C131	30 máx.
Desgaste Microdeval, %	AASHTO T327 / ASTM D6928	18 máx.
Intemperismo acelerado, %	AASHTO T 104 /ASTM C88	15 máx. para sulfato de sodio 20 máx. para sulfato de magnesio
Partículas planas y alargadas, % ¹	ASTM D 4791	5 a 1 %, 10máx.
Adherencia con el asfalto, % de cubrimiento	Recomendación AMAAC RA-08/2010	90 mín.

¹ PA-MA 02, 2016. p. 5

Tabla 2.- Características de calidad de la fracción fina.²

Característica	Norma	Especificación
Gravedad específica bruta	ASTM C128	2.4 mín.
Absorción, %	ASTM C128	Reportar
Equivalente de arena, %	M-MMP-4-04-004/02	50 mín.
Angularidad, % ¹	AASHTO T 304	40 mín.
Azul de metileno, mg/g	M-MMP-4-014/09	15 máx.

F.1.2. Evaluación del material asfáltico

Se tomará una muestra del material asfáltico a utilizar en la producción de la mezcla asfáltica del auto-tanque, siguiendo el método M-MMP-4-05-001 “Muestreo de Materiales Asfálticos”.

Se analizará este material asfáltico de acuerdo a las propiedades y métodos especificados en la Tabla 3. Se reportarán los valores obtenidos como parámetros de control de calidad del material asfáltico previo al arranque de obra.

Tabla 3.- Características de calidad del cemento asfáltico.

Característica	Norma	Especificación
Punto de inflamación Cleveland, °C	M-MMP-4-05-007/00	230 mín.
Viscosidad dinámica a 135°C, Pa.s	M-MMP-4-05-005/02	3 máx.
Punto de reblandecimiento, °C	M-MMP-4-05-009/00	55 mín.
Recuperación elástica por torsión a 25°C, %.	M-MMP-4-05-024/02	35 mín.
Separación diferencia anillo-esfera	M-MMP-4-05-022/02	3 máx.
Módulo reológico de corte dinámico ($G^*/\text{sen}\delta$), 76°C, KPa	M-MMP-4-05-025/02	1.0 mín.
Después de prueba de película delgada y aire de horno (ASTM D2872)		
Pérdida de masa, %	ASTM D2872	1.0 máx.
Módulo reológico de corte dinámico ($G^*/\text{sen}\delta$), 76°C, KPa	M-MMP-4-05-025/02	2.2 mín.
Recuperación elástica en ductilómetro a 25°C, %	M-MMP-4-05-026/02	60 mín.
Después de prueba de película delgada y aire de horno @ 100°C (ASTM D6521)		

² PA-MA 02, 2016. p. 6

Rigidización (G*/senδ), 34°C KPa,	ASTM D6648	5,000 máx.
Rigidización de Flexión -6°C S(t); Mpa, "m"	ASTM D6648	300 máx. 0.3 mín.

1. Pruebas a determinar en el laboratorio de control de calidad de campo.
2. Pruebas a determinar en laboratorio central. Considerar diez días laborables para la entrega de resultados.

F.1.3. Evaluación de la granulometría de diseño

En cuanto los materiales de la construcción estén disponibles, se calibrará la planta de mezcla en caliente en seco (sin uso de material asfáltico) con el objetivo de reproducir la estructura granulométrica del diseño de la mezcla. Para lo cual:

- F.1.3.1. Tomará una muestra de la combinación de materiales pétreos de la banda transportadora, en la planta de mezcla en caliente de acuerdo al método ASTM D75 "Practica estándar de muestreo de agregados", fracción 5.3.2 "Muestreo en la Banda Transportadora".
- F.1.3.2. A las muestras tomadas de la banda se les determinará la granulometría de la combinación de materiales pétreos de acuerdo a la norma M-MMP-4-04-002 utilizando las mallas especificadas en la **Tabla 4** de esta guía. Método de muestreo: ASTM D75 "Practica estándar de muestreo de agregados", fracción 5.3.2 "Muestreo en la Banda Transportadora".
- F.1.3.3. Se realizarán los ajustes pertinentes en las dosificaciones o granulometría de las diferentes fracciones de materiales pétreos para reproducir la curva granulométrica de diseño dentro de las tolerancias especificadas en la **Tabla 5** y dentro de los puntos de control especificados en la **Tabla 4**.

F.1.4. Calibración de la mezcla asfáltica

En cuanto la calibración de la combinación de materiales pétreos sea realizada, el contratista calibrará la planta de mezcla en caliente apegándose a la fórmula de trabajo definida en el diseño de mezcla en cuanto a la estructura granulométrica de la combinación de materiales, contenido de cemento asfáltico, cantidad de filler o fibra en caso de requerirse y temperaturas de mezclado. El contratista producirá al menos 50 toneladas de mezcla asegurando una producción uniforme dentro de las tolerancias mostradas en la **Tabla 5**. Se tomarán al menos dos muestras de mezcla asfáltica durante la producción a la salida del mezclador y caída al transportador.

Esta mezcla cumplirá con la granulometría y contenido de asfalto con una tolerancia (desviación estándar) indicadas en la **Tabla 5** y dentro de los puntos de control

especificados en la **Tabla 4**. La elaboración de la mezcla se realizará de acuerdo a las temperaturas de mezclado recomendadas por el proveedor del material asfáltico.

Tabla 4.- Puntos de Control en la Granulometría para Tamaño Nominal de ¾" (19 mm).³

Abertura de la malla (mm)	% que pasa	
	Mín	Máx
25.00	100	
19.00	90	100
12.50		90
9.50		
4.75		
2.36	23	49
1.18		
0.60		
0.30		
0.15		
	2	8

Sí el contenido de asfalto y granulometría no cumplen con las tolerancias especificadas en la **Tabla 5**, se verificarán las propiedades volumétricas especificadas en la

³ PA-MA 01, 2013. p. 7

Tabla 7 en la mezcla producida en planta y compactada en el laboratorio central al número de giros especificados en la

Tabla 6.

Los valores especificados en la tabla 5 corresponden a muestras individuales (n=1). Para tamaños de muestras más grandes, los valores de desviación estándar deberán de ser ajustados utilizando la fórmula 1.

$$\sigma_{\bar{x}} = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad (1)$$

Dónde:

$\sigma_{\bar{x}}$ = Desviación estándar de la muestra para un tamaño “n”

σ = Desviación estándar de la **Tabla 3**

n= Tamaño de la muestra

En caso de no cumplir con las tolerancias requeridas, se realizarán los ajustes necesarios en la producción.

La muestra de mezcla será tomada conforme al método ASTM D979 “*Práctica estándar de muestreo de mezclas asfálticas*” y la cantidad aproximada de muestra requerida será de cuarenta kilogramos (40 kg).

Tabla 5.- Tolerancias en los requisitos de la mezcla asfáltica.

Propiedad de composición de la mezcla	Extracción ASTM D2172	Método de ignición ASTM D6307
Contenido de asfalto, en %	±0.3	±0.18
Material que pasa por las mallas superiores a la No. 4 (4,75)	±3	
Material que pasa por las mallas comprendidas entre la malla No. 8 (2,36) y la malla No. 100 (0,15)	±2	
Material que pasa la malla No. 200 (0,075)	±0.7	
Gravedad específica teórica máxima de la mezcla (Gmm)	Reportar	

Tabla 4.1.- Ejemplo de tolerancias en la granulometría de diseño.⁴

	Granulometría % que pasa la malla									
	19.0mm	12.5 mm	9.5mm	4.75mm	2.36mm	1.18mm	0.6mm	0.3mm	0.15mm	0.075mm
Diseño	95.2	86.4	71	38.8	26.1	18.7		7.8	5.3	4.6
Rango inferior	92.2	83.4	68	35.8	24.1	16.7	12.6	5.8	3.3	3.9
Rango superior	98.2	89.4	74	41.8	28.1	20.7	16.6	9.8	7.3	5.3

Tabla 6.- Energía de Compactación en el Compactador Giratorio⁵

Parámetros de Compactación		
Nini	Ndiseño	Nmáx
8	100	160

⁴ PA-MA 02, 2016. p. 8

⁵ Tomada de la tabla de PA-MA 01, 2013. p. 12

Tabla 7.- Requisitos Volumétricos de la mezcla asfáltica.⁶

Requerimientos para el diseño volumétrico de la mezcla**					
Densidad requerida (% de la gravedad específica teórica máxima-G _{mm})			Vacíos de agregado mineral mínimo en % (tamaño nominal 19mm)	Vacíos llenos de asfalto en %	Relación filler asfalto
Nivel de compactación giratoria					
N _{ini}	N _{dis}	N _{máx}			
≤ 90,5	96*	≤98	13	65-78	0.6-1.2

*En la verificación el porcentaje de gravedad específica teórica máxima de diseño (%G_{mm} para N_{dis}) tendrá una tolerancia de ±0.3%.

** Estas propiedades se determinarán en el laboratorio central.

F.1.5. Evaluación de la mezcla asfáltica para tramo de prueba

Una vez concluido el proceso de calibración de la planta de mezcla en caliente, se producirá la mezcla asfáltica necesaria para realizar el tramo de prueba de 200 metros por un ancho de 7.2m al espesor requerido en el proyecto, asegurando una producción uniforme dentro de las tolerancias mostradas en la Tabla 5.

Se obtendrá de forma aleatoria, mediante un procedimiento basado en tablas de números aleatorios, conforme a lo indicado en el anexo D fracción D.1. de la presente guía “Muestreo por períodos de tiempo”, una muestra de 100kg por cada sublote. Se considerará un solo lote y éste se dividirá en 3 sublotes (3 muestras). Se registrarán las temperaturas de mezclado durante cada muestreo. Estos sublotes serán divididos en dos grupos de muestras para determinar el promedio aritmético y la desviación estándar de las características indicadas en la **Tabla 8**.

Se tomará las muestras de acuerdo a lo indicado en el procedimiento de muestreo ASTM D979 “Práctica estándar de muestreo de mezclas asfálticas” en la salida del mezclador y la caída al transportador. Si se requiere, se ajustará la producción de la mezcla en caliente para cumplir con los rangos de tolerancia. Si los valores obtenidos en las pruebas de granulometría y contenido de asfalto no cumplen con las tolerancias establecidas en la tabla 5, se verificarán las propiedades volumétricas de la mezcla que se produzca para el tramo de prueba, especificadas en la tabla 7 compactando la mezcla en el laboratorio central a los giros especificados en la tabla 6.

Tabla 8.- Características requeridas en la evaluación de la mezcla asfáltica en el tramo de prueba.

Sublote	Muestra	Características requeridas
001	A	-Granulometría del material tomada de la banda. M-MMP-4-04-002/02 -Contenido de asfalto de la mezcla asfáltica (ASTM D2172 o ASTM D6307). - Gravedad específica teórica máxima de la mezcla (ASTM D2041) determinada en el laboratorio de campo y en el laboratorio central.
	B	
002	A	
	B	
003	A	
	B	

Si se requiere, ajustará la producción de la mezcla en caliente para cumplir con las propiedades volumétricas y si no se cumplen se realizará un nuevo diseño de mezcla.

F.1.6. Tramo de prueba

El lote de mezcla producida para el tramo de prueba será colocado en el espesor requerido en el proyecto.

Nota 1: Si después de los ajustes mencionados en la fracción F.I.5, la mezcla producida no cumple lo solicitado, valorará el riesgo de aplicar una mezcla que pudiese llegar a presentar problemas de desempeño.

El patrón de compactación se definirá de acuerdo con aquel que cumpla con un noventa y cuatro (94) a noventa y ocho (98) por ciento de la gravedad específica teórica máxima (G_{mm}), determinada en el campo para la mezcla producida y tendida en el tramo de prueba. Las mediciones de densificación de la carpeta serán realizadas a cada cincuenta (50) metros colocados, utilizando un densímetro nuclear o electromagnético. Considerando un solo lote y que el número de sub-lotes (muestras) será de cuatro (4) y que el tamaño del sublote será de cada cincuenta (50) metros.

Se realizarán extracciones de acuerdo al procedimiento establecido en el anexo D fracción D.2., considerando dos (2) sub-lotes (estaciones) y que el tamaño del sublote será de cien (100) metros/sublote, de acuerdo al número, y pruebas definidas en la tabla 9.

Tabla 9.- Características requeridas en los corazones extraídos del tramo de prueba.

Estaciones	Núcleo	Pruebas requeridas
001	6 núcleos de 4 pulgadas	-Gravedad específica bruta (Gmb). -Susceptibilidad al daño por humedad (TSR). -Vacíos de aire (Va).
	3 núcleos de 10 pulgadas	- Susceptibilidad a la humedad y a la deformación permanente por rodera de una mezcla asfáltica tendida y compactada por medio de la Rueda de Hamburgo. - Vacíos de aire (Va). - Gravedad específica bruta (Gmb). -Granulometría. -Contenido de asfalto.
002	6 núcleos de 4 pulgadas	-Gravedad específica bruta (Gmb). -Susceptibilidad al daño por humedad (TSR). -Vacíos de aire (Va).
	3 núcleos de 10 pulgadas	- Susceptibilidad a la humedad y a la deformación permanente por rodera de una mezcla asfáltica tendida y compactada por medio de la Rueda de Hamburgo. - Vacíos de aire (Va). - Gravedad específica bruta (Gmb). -Granulometría. -Contenido de asfalto.

Los núcleos extraídos de campo cumplirán con las propiedades de desempeño requeridas en **Tabla 10** y con el porcentaje de noventa cuatro (94) por ciento a noventa y ocho (98) por ciento de la gravedad específica teórica máxima (G_{mm}). Para el cálculo de los vacíos de aire y el porcentaje de gravedad específica teórica máxima (G_{mm}) utilizar el valor determinado en el laboratorio central de la evaluación de la mezcla asfáltica establecida en la fracción F.1.5. de esta guía.

Tabla 10.- Requisitos en pruebas de desempeño de la mezcla asfáltica.⁷

Característica	Recomendación	Especificación
Susceptibilidad de la mezcla asfáltica al daño inducido por humedad (TSR)	AMAAC RA-04/2010	80% mín.
Susceptibilidad a la humedad y a la deformación permanente por rodera de una mezcla asfáltica tendida y compactada. Por medio de Rueda de Hamburgo.	AMAAC RA-01/2010	20,000 pasadas mínimas para una deformación máxima de 10 mm

F.1.7. Aceptación o rechazo del tramo de prueba

Si la mezcla no cumple con las tolerancias de la fórmula de trabajo requeridas en la tabla 5, se podrá aprobar el inicio de la obra con los ajustes a la mezcla asfáltica hechos en campo con respecto al diseño original, solo si la combinación de materiales pétreos cumplen con los requisitos establecidos en la tabla 1 y 2 “*Características de los materiales pétreos*” y la mezcla asfáltica cumple con los requerimientos volumétricos especificados en la tabla 7 de esta guía y con lo especificado en la tabla 10 “*Requerimientos en pruebas de desempeño*”.

F.2. CONTROL DE CALIDAD RUTINARIO

El control de calidad rutinario incluye la frecuencia de pruebas para: (a) mantener el proceso en control, (b) determinar rápidamente cuando el proceso esté fuera de control y (c) responder adecuadamente para controlar de nuevo el proceso. El control de calidad rutinario establece los requerimientos mínimos que se ejecutará durante el proyecto y comprende los siguientes puntos:

F.2.1. Muestreo de los materiales pétreos

Para verificar la uniformidad de la producción o bien realizar los ajustes pertinentes, se obtendrán muestras de los materiales pétreos en el número y frecuencia indicado en la norma M-MMP-4-04-001 “*Muestreo de materiales pétreos*”, para cada fracción y tipo de material establecido en la **Tabla 11**, siguiendo el procedimiento aleatorio de muestreo por metro cúbico de material especificado en el anexo D, fracción D.3. de esta guía. En este caso el tamaño del lote será de 250m³ considerando un sublote (una muestra) para muestras de material pétreo tomados

⁷ Tomada de la tabla de PA-MA 02, 2016. p. 12

del banco y para las muestras tomadas en la planta de mezcla en caliente el lote será de 2500m³ considerando un sublote (una muestra).

Si en el proyecto se utiliza una cantidad inferior de 2500m³ de material pétreo, se obtendrán al menos dos muestras para realizar la caracterización de la calidad de la fracción gruesa y fina del agregado total de acuerdo a la tabla 1 y 2 de esta guía.

Tabla 11.- Frecuencia de muestreo de materiales pétreos para el control de calidad rutinario⁸

Frecuencia	Lugar de muestreo	Tamaños de muestras parciales (kg)	Pruebas requeridas
Una muestra por cada 250m ³ de material pétreo extraído del banco que se destinará para el proyecto particular.	Almacenamiento en el banco de material pétreo	5	Granulometría. Equivalente de Arena. Azul de metileno.
Una muestra por cada 2500m ³ de material.	Almacenamiento de la planta de mezcla en caliente	40	Características de calidad fracción gruesa y fina del agregado total de acuerdo a la tabla 1 y 2.

F.2.2. Muestreo de materiales asfálticos

A la llegada de cada autotanque de material asfáltico a la obra se realizará el muestreo de acuerdo al método M-MMP-4-05-001/00 “*Muestreo de Materiales Asfálticos*”, y se le determinarán las características especificadas en la tabla 12.

Se analizarán estas muestras de material asfáltico de acuerdo a las propiedades y métodos especificados en la **Tabla 3**.

⁸ Tomada de la tabla de PA-MA 02, 2016. p. 13

Tabla 12.- Características de calidad a determinar en el cemento asfáltico a la llegada de cada autotanque.⁹

Característica	Norma	Especificación
Punto de inflamación Cleveland, °C ¹	M-MMP-4-05-007	230 mín.
Punto de reblandecimiento, °C ¹⁰	M-MMP-4-05-009	55 mín.
Recuperación elástica por torsión a 25°C, %. ¹	M-MMP-4-05-024	35 mín.

F.2.3. Muestreo de mezcla asfáltica

Se realizará un muestreo aleatorio de la mezcla asfáltica a la salida del mezclador y caída al transportador de acuerdo al método ASTM D979 “Practica Estándar de Muestreo de Mezclas Asfálticas”. Si la producción de mezcla en un día es igual o mayor a 700m³, se tomará el tamaño del lote de 700m³ (ver Anexo D ejemplo 4); de lo contrario el lote corresponderá a los metros cúbicos producidas en un día. El muestreo aleatorio en el caso de que el tamaño del lote sea igual o mayor a 700m³ se realizará de acuerdo al anexo D, fracción D.3. Si el tamaño del lote es menor a 700m³, el muestreo se realizará de acuerdo al anexo D, fracción D.1. Si en el proyecto se tiene solo un lote, se analizarán al menos dos muestras de mezcla asfáltica. Se debe llevar un registro diario de los siguientes puntos: temperatura del material asfáltico, temperatura de mezclado, metros cúbicos o toneladas de mezcla producida por lote. La frecuencia, tamaño de muestra, número de muestras y las características a determinar se establecen en la tabla 13.

⁹ Tomada de la tabla de PA-MA 02, 2016. p. 13

¹⁰ Pruebas a determinar en el laboratorio de control de calidad de campo

Tabla 13.- Frecuencia, número y tamaño de muestra de la mezcla asfáltica.¹¹

Frecuencia	Características a determinar	Tamaño de muestra requerido	Muestras requeridas (sub-lotes)
Cada lote	-Granulometría -Contenido de Asfalto -Gravedad específica teórica máxima (Gmm)	3 kg	5
Cada 5 lotes	-Susceptibilidad al daño por humedad y tensión indirecta (TSR). -Susceptibilidad a la deformación permanente, Rueda Cargada de Hamburgo.	40 kg	1

F.2.4. Tendido y compactación

Además, se debe llevar un registro diario de los siguientes puntos durante la producción: número de camiones de mezcla aplicados, los metros cúbicos de mezcla por camión, la temperatura de tendido de la mezcla, las temperaturas de inicio y finalización de compactación de la mezcla asfáltica. La mezcla tendida y compactada cumplirá con un rango de noventa y cuatro a noventa y ocho por ciento de gravedad específica teórica máxima (Gmm).

Se realizarán las mediciones del porcentaje de gravedad específica teórica máxima (Gmm) de acuerdo a la frecuencia, número de núcleos especificados y métodos especificados en la tabla 14. Las mediciones serán realizadas de acuerdo al muestreo aleatorio en área de acuerdo a lo especificado en el anexo D fracción D.2. de esta guía.

Si en el proyecto los kilómetros aplicados son menores a las frecuencias indicadas en la tabla 14, se realizarán por lo menos la determinación de cada una de las pruebas, excepto para la determinación del porcentaje de la gravedad específica teórica máxima en cuyo caso se requieren al menos 5 mediciones.

Tabla 14.- Frecuencia, características y número requerido de mediciones para un tramo aplicado.

Frecuencia	Características a determinar	Método	Número estaciones (sub-lotes/lote)
Cada kilómetro		No destructivo con densímetro electromagnético o nuclear	5
Cada dos kilómetros	-Susceptibilidad a la deformación permanente, por medio del analizador de Rueda Cargada de Hamburgo.	2 núcleos de 10 pulgadas	1
	-Determinación de granulometría -Contenido de asfalto, gravedad específica bruta (G_{mb}) y vacíos de aire (V_a)	1 núcleo de 10 pulgadas	
Cada cinco kilómetros	Susceptibilidad de la mezcla al daño inducido por humedad (TSR)	6 núcleos de 4" para G_{mb} y TSR	1

F.2.5. Verificación

La verificación de calidad de los materiales pétreos, material asfáltico, mezcla asfáltica y densificación se realizará al menos en el diez por ciento de la frecuencia requerida en este guía de control de calidad o su fracción. Si el diez por ciento de la frecuencia requerida es menor a dos muestras, se tomarán al menos dos muestras del proyecto completo para la evaluación de las características de los materiales: material pétreo, material asfáltico, mezcla asfáltica, extracciones del tramo tendido y compactado. Además de cumplir con estos requisitos; para que la carpeta de concreto asfáltico de alto desempeño, se considere terminada y sea aceptada, se comprobará el índice de perfil, el cual se medirá de acuerdo a lo establecido en el inciso H.2. de la Norma N-CTR-CAR-1-04-006. También se cumplirá con los requisitos establecidos en la fracción H.3 líneas, pendientes y espesores, de la norma N-CTR-CAR-1-04-006.

F.2.6. Análisis Estadístico de Control de Calidad

Todas las inspecciones y resultados de prueba serán registradas en los formatos correspondientes.

G. INFORMES DE CONTROL DE CALIDAD

El Jefe de Control de Calidad elaborará los informes que se indican a continuación, en los que se presenten, mediante tablas, gráficas, croquis y fotografías, los resultados de las mediciones y pruebas ejecutadas, incluyendo la información necesaria para su interpretación, por ejemplo: las cartas de control y los análisis estadísticos realizados; en su caso, las acciones y los tratamientos de los elementos rechazados de cada concepto de trabajo analizado; y el dictamen de calidad.

G.1. INFORMES DIARIOS

Elaborados para cada material, frente y concepto de obra al término de cada día, que presenten los resultados de las mediciones y pruebas ejecutadas durante el día, señalando aquellos que, en su caso, no cumplan con las especificaciones del proyecto y/o que muestren desviaciones en el proceso de producción o procedimiento de construcción que deban corregirse inmediatamente para no afectar la calidad, así como las posibles causas de falla y las recomendaciones para corregirlas.

En cada informe diario se incluirán, además el nombre de la obra, el número y la fecha del informe, el nombre del laboratorista que haya realizado las pruebas, así como el nombre y la firma del personal a cargo.

G.2. INFORMES MENSUALES

Elaborados al término de cada mes, que contengan como mínimo la descripción sucinta de los trabajos de control de calidad ejecutados en el periodo del que se informe; las cartas de control de las mediciones y pruebas realizadas, y los resultados de otros análisis estadísticos efectuados, para cada material, frente y concepto de obra; el dictamen que certifique que la obra ha sido ejecutada de acuerdo con las características de los materiales, de los equipos de instalación permanente, de los acabados y las tolerancias geométricas, especificadas en el proyecto. Como apéndices se incluirán un informe fotográfico que muestre los aspectos más relevantes del control de calidad y las copias de todos los informes diarios elaborados en ese periodo.

G.3. INFORME FINAL

Elaborado al cierre de la obra. Contendrá como mínimo los objetivos, alcances y descripción sucinta de los trabajos para el control de calidad ejecutados desde el inicio de la obra; las cartas de control de las mediciones y pruebas realizadas, y los resultados de otros análisis estadísticos efectuados en toda la obra, para cada material, frente y concepto de obra; el dictamen que certifique que la obra se ejecutó de acuerdo con las características de los materiales, de los equipos de instalación permanente, de los acabados y las tolerancias geométricas especificadas en el proyecto. Como apéndice se incluirá un informe fotográfico que muestre los aspectos más relevantes de la obra terminada. El informe final se entregará con la estimación de cierre.

SUB-ANEXOS

A. EQUIPO MÍNIMO REQUERIDO DE LABORATORIO

Descripción del equipo	Prueba relacionada	Laboratorio de control de calidad en campo	Laboratorio Central
Pruebas a los materiales pétreos			
-Mallas para granulometría de ¾", ½", 3/8", No. 4, No. 8, No. 16, No. 30, No. 50, No. 100, No. 200.	Granulometría.	✓	✓
- Soporte Universal - Pinza doble p/bureta – de 50ml. - Barra magnética 5x12mm. - Agitador magnético 11x11cm	Azul de metileno.	✓	✓
- Matraz volumétrico "A", T/vidrio 1,000ml. - Pisón y cono.	Absorción y gravedad específica del agregado fino.	✓	✓
- Equipo para equivalente de arena.	Equivalente de arena.	✓	✓
- Angularidad del agregado fino.	Angularidad del agregado fino.	✓	✓
- Equipo para índice de partículas alargadas y planas.	Partículas alargadas y planas.	✓	✓
- Desgaste de Los Angeles.	Desgaste de Los Angeles	No forzoso	✓
-Equipo MicroDeval	MicroDeval	No forzoso	✓
- Mesa vibratoria - Canastilla de 2kg de capacidad - Canastilla al vacío con capacidad de 2kg con canastilla volumétrica - Bomba de vacío - Manómetro digital	Determinación de gravedad específica teórica máxima	✓	✓
Balanza electrónica 22,000g x0.1g con accesorio de pesaje inferior	General	✓	✓

Pruebas a la mezcla asfáltica			
Extractor de centrifugado (Rotarex).	Determinación del contenido de asfalto.	✓	✓
Compactador giratorio.	Determinación de las propiedades volumétricas.	No forzoso	✓
- Prensa Marshall de kg de capacidad, con anillo de carga. - Mordazas TSR Lottman de 6” - Baño de agua con control de temperatura y recirculador.	Susceptibilidad de la mezcla asfáltica al daño por humedad	No forzoso	✓
Rueda Cargada de Hamburgo.	Susceptibilidad a la deformación permanente.	No forzoso	✓
Densímetro magnético o nuclear	Densificación de la mezcla compactada	✓	-
Pruebas al material asfáltico.			
Copa abierta de Cleveland	Punto de inflamación	✓	✓
Viscosímetro Rotacional Brookfield	Viscosidad dinámica	No forzoso	✓
Equipo para punto de reblandecimiento	Punto de reblandecimiento	✓	✓
Equipo de recuperación torsional.	Recuperación elástica por torsión.	✓	✓
Ductilómetro.	Recuperación elástica en ductilómetro	No forzoso	✓
Reómetro de corte dinámico.	Módulo reológico de corte dinámico.	No forzoso	✓
Horno de envejecimiento de película delgada (RTFO).	Pérdida por calentamiento y pruebas después de película delgada y aire de horno	No forzoso	✓
Cámara de presión y temperatura (PAV)	Pruebas después de envejecimiento en vasija de presión, temperatura y aire	No forzoso	✓
Reómetro de viga y flexión (BBR)	Rigidez de flexión	No forzoso	✓
Generales			
Termómetros, charolas, horno de calentamiento.	Generales.	✓	✓

B. GUÍAS DE AJUSTE DE PRODUCCIÓN, TENDIDO Y COMPACTACIÓN DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE.

Este anexo contiene algunas guías para resolver problemas que pueden llegar a ocurrir durante la producción de la mezcla asfáltica en caliente. Estos problemas son clasificados en problemas granulométricos e incumplimiento de características de los materiales, características no deseables durante el tendido y características no deseables en el pavimento terminado. Las soluciones a estos problemas a menudo requieren pruebas, análisis y ajustes adicionales. Estas guías están basadas en la publicación QIP-97 de la “National Asphalt Pavement Association’s (NAPA), “Quality Control for Hot-Mix Plant and Paving Operations”. Estas guías fueron utilizadas durante los proyectos de construcción NCHRP Project 9-7 y son aplicables para el diseño, producción y tendido de las mezclas asfálticas de alto desempeño.

B.1. ESTRUCTURA GRANULOMÉTRICA DEFICIENTE

B.1.1. Materiales pétreos

Si con las granulometrías de cada uno de los materiales pétreos a utilizar en el proyecto, no es posible producir una mezcla que cumpla con los requerimientos solicitados en la especificación particular, y si estos requerimientos no pueden ser modificados, se sugiere realizar alguna(s) de las siguientes acciones:

B.1.1.1. Realice una combinación de materiales pétreos que logren una estructura granulométrica aceptable, considerando algunos procesos de cribado en los materiales.

B.1.1.2. Verifique si la combinación de agregado adicional de otro tamaño con el material existente puede lograr una granulometría aceptable.

B.1.1.3. Rechace el material y revise otras fuentes de materiales pétreos.

B.1.2. Material pétreo combinado

Si cuando se determine la granulometría de la combinación de materiales pétreos en la banda de la planta de mezcla en caliente, no cumple con las tolerancias establecidas, se recomiendan los siguientes procedimientos:

B.1.2.1. Tome muestras del material pétreo y realice la granulometría de los materiales, para verificar el muestreo previo.

B.1.2.2. Si el nuevo muestreo confirma los resultados del muestreo previo, calcular nuevamente la granulometría y revisar si cambiando las dosificaciones de cada tolva se logra una granulometría dentro de los rangos de variación especificados para el diseño.

B.1.2.3. Por otro lado, si el nuevo muestreo no concuerda con el muestreo previo:

B.1.2.3.1. Revisar el método de muestreo y asegurar que la muestra sea representativa.

B.1.2.3.2. Realice una serie de pruebas en las tolvas, las variaciones en la granulometría ocurren por:

B.1.2.3.2.1. Contaminación del material con otras fracciones durante el proceso de carga del material pétreo a las tolvas.

B.1.2.3.2.2. Exceso de material en una tolva que provoca que caiga en la o las tolvas contiguas.

B.1.2.3.2.3. Problemas de consistencia en el material recibido en la planta.

B.2. INCUMPLIMIENTO EN LA MEZCLA ASFÁLTICA

B.2.1. Vacíos arriba o abajo de la especificación

El porcentaje de vacíos en las mezclas en caliente compactadas a nivel laboratorio dependen del porcentaje de vacíos en el agregado mineral y del porcentaje de asfalto. Cuando el porcentaje de vacíos es muy alto o muy bajo en las mezclas asfálticas pueden ocurrir problemas de desempeño. La desviación estándar de la determinación de vacíos de aire es alrededor del uno (1) por ciento.

Esto significa que al menos seis diferentes muestras de mezcla en caliente deben ser evaluadas y el valor promedio de estas mediciones determinará si el porcentaje de vacíos está dentro de la especificación.

Si los vacíos no se cumplen en la mezcla compactada a nivel laboratorio se tomarán las siguientes acciones:

B.2.1.2. Revisar el procedimiento utilizado para la determinación de la gravedad específica bruta de la mezcla asfáltica compactada (G_{mb}).

B.2.1.3. Revisar si la muestra de mezcla asfáltica es representativa; si el contenido de asfalto de la muestra cumple con las tolerancias, o bien si las características de gravedades específicas brutas y aparentes de los materiales pétreos coinciden con las del diseño.

B.2.1.4. Si no es posible ajustar el contenido de asfalto, los vacíos del agregado mineral (VAM) se ajustarán cambiando las granulometrías de acuerdo a lo establecido en el siguiente párrafo.

B.2.2. Vacíos del agregado mineral (VAM)

Este parámetro es importante en las mezclas asfálticas ya que permite el espacio necesario para el contenido de asfalto especificado y cumplir con los vacíos de aire. Cumplir con este parámetro es particularmente difícil cuando se usan arenas naturales, o materiales con bajo porcentaje de partículas fracturadas. Las mezclas hechas con partículas redondeadas pueden provocar desgranamiento y exudación al mismo tiempo. Las partículas finas colectadas por el baghouse (colector de polvos) puede también reducir los vacíos de aire causando un valor bajo de los vacíos del agregado mineral (VAM). Los vacíos del agregado mineral dependen de los siguientes factores:

B.2.2.0.1. Partículas de agregado redondeadas o con deficiencias en la angularidad.

B.2.2.0.2. Granulometría de los materiales pétreos (grueso y fino).

B.2.2.0.3. Cantidad de material que pasa la malla No. 200.

B.2.2.1. Incrementando los vacíos en el agregado mineral (VAM)

Esta propiedad puede ser incrementada por cualquiera de los siguientes puntos:

B.2.2.1.1. Usar materiales pétreos con mayor angularidad. Substituir materiales cribados por materiales triturados o mejorar la trituración. Este punto es especialmente importante a controlar en el material que pasa la malla 200.

- B.2.2.1.2.** Disminuir el contenido de material que pasa la malla de 0.15mm (No. 100) no utilizando o eliminando el polvo colectado en el bag-house. Reducir el contenido de material que pasa la malla No.100.
- B.2.2.1.3.** Incrementar la cantidad de material entre las malla de 4.75mm (No. 4) y la malla de 0.15mm (No. 100). Esto puede requerir un incremento en la cantidad de asfalto.
- B.2.2.1.4.** Alejar la granulometría de la línea de máxima densidad en la gráfica de potencia 0.45

B.2.2.2. Disminuyendo los vacíos en el agregado mineral (VAM)

- B.2.2.2.1.** Usar materiales gruesos cúbicos.
- B.2.2.2.2.** Usar materiales pétreos finos como arenas naturales o partículas redondeadas.
- B.2.2.2.3.** Incrementar la cantidad de filler en la mezcla.

B.2.3. Vacíos llenos de asfalto (VFA)

El porcentaje de los vacíos llenos con asfalto, afectan la durabilidad y flexibilidad del pavimento. Valores menores al 65 por ciento pueden causar endurecimiento prematuro o excesivo del material asfáltico en el pavimento, agrietamiento y desgranamiento. Valores mayores a 85 por ciento pueden provocar desplazamientos, roderas. Dado que el VAM representa un porcentaje de los vacíos del agregado mineral (VAM), para realizar ajustes en el VFA aplican los mismos ajustes mencionados anteriormente para el VAM.

B.3. Densificación en campo

Diferentes estudios realizados han demostrado que la densificación de una carpeta de mezcla asfáltica es usualmente más alta en el centro del carril, debido al traslape de los compactadores y menor en las orillas debido a la menor cobertura de los compactadores. Esto causa una variación en la densidad cuando un densímetro nuclear o magnético o bien extracciones son tomados de forma aleatoria a lo largo del carril. Si una medición de densificación se presenta por debajo del porcentaje de gravedad específica teórica máxima requerida, esto puede deberse a una o varias de las siguientes condiciones:

- B.3.1.** Usar un valor de gravedad específica teórica máxima basada en mediciones incorrectas o asumir gravedades específicas de los materiales pétreos o materiales asfálticos.
- B.3.2.** Usar una densidad de referencia basa en los especímenes compactados en el Compactador Giratorio, que fueron sobre compactados o compactados a una temperatura más alta.
- B.3.3.** Compactación insuficiente en campo debido una energía de compactación baja, patrón de compactación incorrecta o bien compactadores en malas condiciones.
- B.3.4.** Compactación a temperaturas bajas de la mezcla.
- B.3.5.** Presencia de arcilla en el material que pasa la malla 0.075mm (No. 200) en la mezcla asfáltica.
- B.3.6.** Compactación sobre bases y/o sub-bases blandas. La densificación y la deflexión de las superficies sobre las cuales se aplicará la carpeta de mezcla en caliente serán verificadas antes de empezar el tendido.
- B.3.7.** Dificultad para compactar mezclas duras. Estas mezclas en caliente pueden tener una alta resistencia o quizá demasiado filler en relación con la cantidad y propiedades del material asfáltico en la mezcla. El pavimento resultante puede tener un alto contenido de vacíos.
- B.3.8.** Mezclas plásticas.

B.4. Irregularidades en el pavimento

- B.4.1.** Verificación y agrietamiento en Pavimentos de nueva construcción.

Estas condiciones son usualmente causadas por técnicas de compactación inapropiadas. El operador de los compactadores evitará las siguientes situaciones:

- B.4.1.1.** Sobre-compactar mezclas plásticas.
- B.4.1.2.** Compactar una superficie que se ha enfriado en la superficie pero que sigue caliente en su estructura o compactar cuando los compactadores están fríos.
- B.4.1.3.** Compactar una mezcla densa cuando la temperatura es todavía muy alta.
- B.4.1.4.** Compactar con una base o base inestable.

B.4.1.5. Compactar muy rápido, dando vueltas de forma abrupta o empezar y parar de forma abrupta.

B.4.2. Desplazamientos de la mezcla.

El desplazamiento de la mezcla durante la construcción puede deberse a:

B.4.2.1. Uso de compactadores muy pesados.

B.4.2.2. Operar un compactador descompuesto en donde las ruedas no están verticales al pavimento.

B.4.2.3. Compactar mezclas plásticas, causadas por temperaturas muy altas o un diseño de mezcla con valores altos de los vacíos llenos con asfalto VFA.

B.4.2.4. Presencia de humedad en la mezcla.

B.4.3. Desgranamiento en el pavimento recién construido.

El desgranamiento puede ser causado por:

B.4.3.1. Contenido de asfalto muy bajo.

B.4.3.2. Segregación excesiva durante el traslado o tendido.

B.4.3.3. Compactación a bajas temperaturas, compactadores fríos.

B.4.3.4. Compactar una superficie mojada, demasiada agua utilizada para lubricar las llantas de los compactadores.

B.4.3.5. Agregados sucios con deficiencias de cubrimiento.

B.4.3.6. Envejecimiento del material asfáltico por sobrepasar las temperaturas de manejo del asfalto o las temperaturas de mezclado recomendadas.

B.4.4. Mezclas plásticas

Las mezclas plásticas pueden desplazarse al paso de los compactadores, las causas por las cuales se presentan este tipo de mezclas son las siguientes:

B.4.4.1. Contaminación del material asfáltico

B.4.4.2. Uso de diésel en lugar de aditivos anti-adherencia en los camiones de transporte de la mezcla asfáltica.

B.4.4.3. Alto contenido de asfalto en la mezcla.

B.4.4.4. Bajo contenido de asfalto en la mezcla.

B.4.4.5. Demasiado polvo.

B.4.4.6. Humedad excesiva en la mezcla en caliente.

C. CALIBRACIÓN DENSÍMETRO ELECTROMAGNÉTICO

Es importante considerar que el primer paso antes de obtener valores de densificación en carpetas de mezcla en caliente, es calibrar el equipo para el proyecto particular. Se recomienda seguir los procedimientos de calibración del equipo utilizado de acuerdo a las recomendaciones del fabricante. En general los pasos para realizar la calibración contemplan:

C.1. Determinar la gravedad específica máxima de la mezcla asfáltica de campo mediante el método ASTM D2041 “Gravedad específica teórica máxima de la mezcla asfáltica”. Este dato es requerido como un valor de entrada para los densímetros electromagnéticos.

C.2. Marcar un área seca de la carpeta asfáltica tendida, de una longitud de 3.0 metros por un ancho de 1.5 metros. Dividir dicha área en 5 ubicaciones y marcar cinco círculos. Realizar las mediciones con el densímetro como se muestra en la figura C.1. Estas mediciones serán reportadas como medición número 1.

C.3. Mover el densímetro 5cm hacia arriba y a la derecha a una posición equivalente a las horas del reloj 2:00, luego a 4:00, posteriormente a 8:00 y 10:00 (como se muestra en la figura C.2.). Realizar cuatro mediciones en cada ubicación.

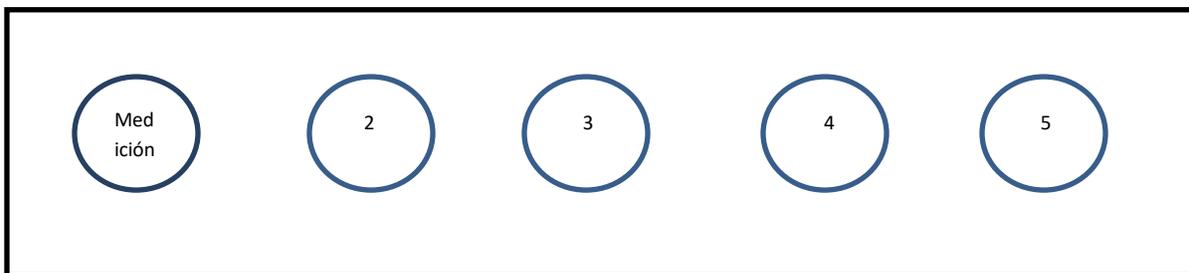


FIGURA C.1.- Medición de densidad en cinco ubicaciones marcadas sobre la superficie de la carpeta asfáltica al centro.

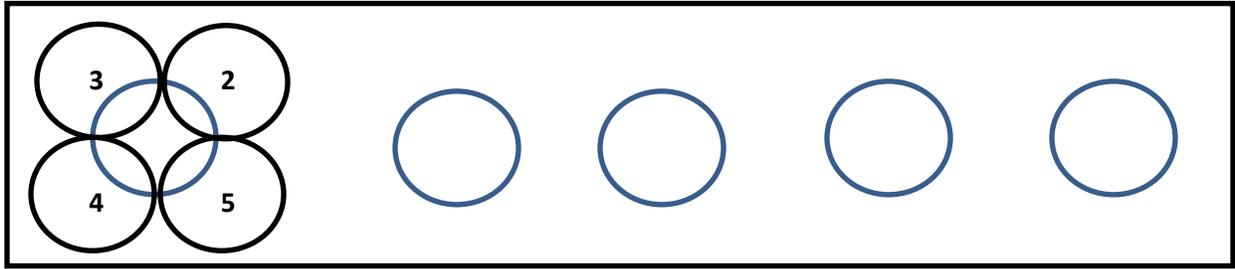


FIGURA C.2.- Medición de cuatro puntos por cada ubicación.

C.4. Registrar los datos en la siguiente tabla:

TABLA 1.- HOJA DE CALIBRACIÓN MEDICIONES DEL EQUIPO

Ubicación	1	2	3	4	5
Posición					
Centro					
2:00					
4:00					
8:00					
10:00					
Promedio					

C.5. Extraer corazones al centro de cada ubicación y determinar su densificación a nivel laboratorio (seguir el procedimiento especificado en el Anexo 2 “Guía de diseño de mezclas” para el cálculo del porcentaje de la gravedad específica teórica máxima).

TABLA 2.- HOJA DE CALIBRACIÓN MEDICIONES DE LOS NÚCLEOS EXTRAIDOS

Ubicación	1	2	3	4	5
Posición					
Centro					
2:00					
4:00					
8:00					
10:00					
Promedio					

C.6. Determinar la diferencia entre los valores de densificación obtenidos en campo utilizando el densímetro electromagnético contra los valores obtenidos de densificación en los corazones extraídos. Esta diferencia se le conoce como valor “offset” de calibración sugerido y se introducirá al equipo.

D. MUESTREO ALEATORIO

El objetivo de este procedimiento es seleccionar los sitios o tiempo en los cuales se tomarán muestras de forma aleatoria.

D.1. Muestreo por períodos de tiempo.

En este método el tamaño del lote corresponderá a las horas totales de producción en un día y el sub-lote representará la estratificación del lote. Los pasos a seguir son:

- D.1.1. Obtener el intervalo de tiempo del sub-lote dividiendo las horas totales de producción (minutos/lote) entre el número de sub-lotes (número de muestras requeridas).
- D.1.2. Escoger al azar un número secuencia de la tabla "A", registrar los valores "X" que correspondan a ese número secuencia. Tomar los datos "X" de los siguientes renglones; hasta que el número de datos sea igual al número de muestras requeridas (sub-lotes).
- D.1.3. Multiplicar cada valor "X" por el intervalo de tiempo del sub-lote. Los valores obtenidos representarán el tiempo que hay que sumar a la hora de inicio del proceso para tomar las muestras de cada sub-lote. La hora de inicio del primer sub-lote corresponde a la hora de inicio del proceso de producción, mientras que la hora de inicio de los subsecuentes sub-lote se les sumará a la hora de inicio del proceso el intervalo de tiempo del sub-lote obtenido en el paso D.1.1.

D.1.4. Ejemplo 1:

- D.1.4.1. Considerar que en un día se produjeron 200 toneladas de mezcla en caliente en un período ochenta minutos. La hora de inicio de la producción fue a las 7:00 de la mañana.

Primero calculamos el intervalo de tiempo del sub-lote:

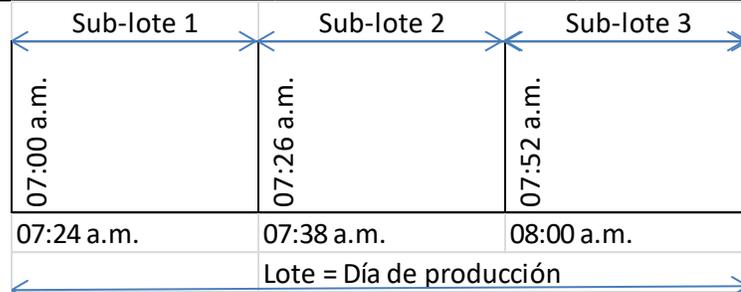
$$\text{Intervalo de tiempo del sub - lote} = \frac{80 \frac{\text{minutos}}{\text{lote}}}{3 \frac{\text{sub - lotes}}{\text{lote}}} = 26 \text{ minutos/sublote}$$

- D.1.4.2. El número de secuencia escogido al azar fue 8, por lo cual los tres valores tomados de "X" de la tabla de números aleatorios fueron:

Número de Secuencia	"X"
6	0.94
7	0.44
8	0.33

- D.1.4.3. Multiplicando el valor "X" de la tabla de números aleatorios por el intervalo de tiempo del sub-lote y sumando el resultado al tiempo de inicio de cada sub-lote, obtenemos el tiempo en que se realizarán los muestreos:

Número de Sub-lote		Tiempo de inicio de cada sub-lote	Tiempo de muestreo
1	26x0.94 = 24 min.	7:00 AM	7:00 + 24 min = 7:24 AM
2	26x 0.44= 11 min.	7:00+26 min = 7:26 AM	7:26 + 11 min = 7:37 AM
3	26 x 0.33= 8 min.	7:26 +26 min = 7:52 AM	7:52 + 8 min = 8:00 AM



D.2 MUESTREO EN ÁREA

- D.2.1.** Definir el número de lotes o tomar el valor especificado de acuerdo a esta guía. El número de lotes se redondeará al número entero inferior.
- D.2.2.** Definir el tamaño del sub-lote o considerar el valor especificado en esta guía.
- D.2.3.** Seleccionar al azar un número secuencia de la tabla “A”.
- D.2.4.** Tomar los valores “X” y “Y” de la tabla “A”, comenzando en el renglón del número de secuencia seleccionado al azar y el número de renglones subsecuentes de acuerdo al número de sub-lotes requeridos. Los valores “X” representaran en este caso la distancia longitudinal y “Y” representará la distancia transversal.
- D.2.5.** Multiplicar el valor” X” y “Y” por el tamaño del sub-lote para obtener las ubicaciones de los muestreos.

D.2.6. Ejemplo 2:

- D.2.6.1.** Se requiere medir el cumplimiento de densificación de un tramo carretero. De acuerdo al apartado F.2.4. de esta guía, las mediciones no destructivas con densímetro nuclear o electromagnético se realizarán a cada kilómetro aplicado y se requieren cinco muestras por lote. Suponga que en un día se aplicaron 1000metros con un ancho de 7.2 metros, comenzando en el cadenamiento km 100+000 al km 101+000. Para definir en donde realizar las mediciones, se obtiene el tamaño del lote y el tamaño del sub-lote:

$$\text{Número de lotes} = \frac{1000 \text{ metros}}{1000 \text{ metros/lote}} = 1 \text{ lote}$$

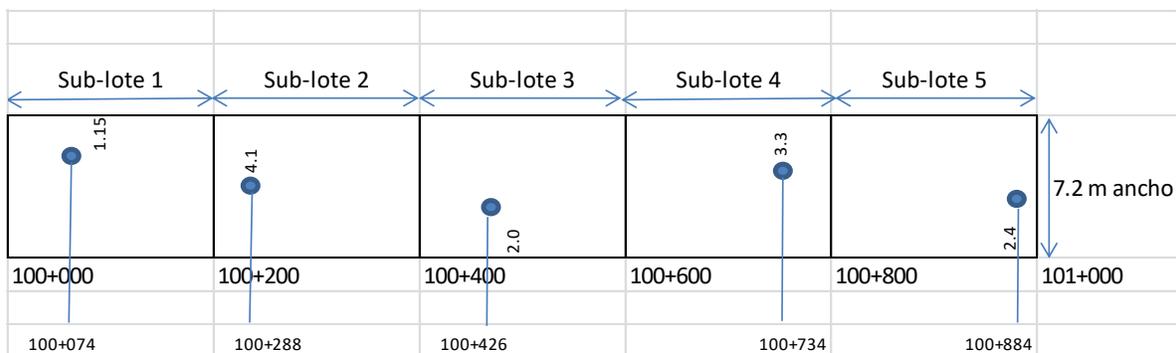
$$\text{Tamaño del sub-lote} = \frac{1000 \frac{\text{metros}}{\text{lote}}}{5 \frac{\text{sublotes}}{\text{lote}}} = 200 \text{ metros/sublote}$$

Al azar se seleccionó el número de secuencia 41, a partir de la tabla “A” se toman los valores de “X” y “Y” partiendo del 41 al 45 (dado que se requieren 5 sub-lotes).

Número de secuencia	X	Y
41	0.37	I 0.16
42	0.44	I 0.57
43	0.13	D 0.28
44	0.67	I 0.46
45	0.42	D 0.34

“X” en este caso representara el punto de muestro longitudinal y “Y” el transversal, estos números son multiplicados por la longitud y ancho del tramo pavimento respectivamente, como se muestra a continuación:

Sub-lote	X	Y	Punto de muestreo
1 (Inicio 100+000)	Coordenada X = 0.37 * 200 metros/lote = 74 metros	Coordenada Y = 0.16 * 7.2 metros = 1.15 metros	100+074 @ 1.15 metros del borde izquierdo.
2 (Inicio 100+200)	Coordenada X = 0.44 * 200 metros/lote = 88 metros	Coordenada Y = 0.57 * 7.2 metros = 4.1 metros	100+288 @ 4.1 metros del borde izquierdo.
3 (Inicio 100+400)	Coordenada X = 0.13 * 200 metros/lote = 26 metros	Coordenada Y = 0.28 * 7.2 metros = 2.0 metros	100+426 @ 2.0 metros del borde derecho.
4 (Inicio 100+600)	Coordenada X = 0.67 * 200 metros/lote = 134 metros	Coordenada Y = 0.46 * 7.2 metros = 3.3 metros	100+734 @ 3.3 metros del borde izquierdo.
5 (Inicio 100+800)	Coordenada X = 0.42 * 200 metros/lote = 84 metros	Coordenada Y = 0.34 * 7.2 metros = 2.4 metros	100+884 @ 2.4 metros del borde derecho.



D.3. MUESTREO POR METRO CÚBICO DE MATERIAL

D.3.1. Tomar el tamaño del lote especificado de acuerdo a esta guía y definir el número de lotes de acuerdo a la siguiente fórmula:

$$\text{Número de lotes} = \frac{m^3 \text{ de material requerido en el proyecto}}{\text{Tamaño especificado del sub - lote}}$$

De acuerdo a esta guía especificar el número de muestras requeridas (número de sub-lotes)

D.3.2. Al azar determine un número secuencia y tome el valor “Y” del renglón respectivo de la tabla “A”. Tome los números subsecuentes de ser necesario para completar los datos requeridos que deben ser igual al número de sub-lotes.

D.3.3. Multiplicar el valor “Y” por el tamaño del lote para obtener los m³ de muestreo.

D.3.4. Ejemplo 3:

Se requiere realizar el análisis de materiales pétreos de esta guía de acuerdo al punto F.2.1 en donde se especifica que el muestreo debe ser realizado cada 2500m³ (tamaño del lote). Suponga que el proyecto requiere 10,000 m³ totales de agregado.

D.3.4.1. Primero calcular el número de lotes:

$$\text{Número de lotes} = \frac{10,000m^3}{2500m^3/\text{lote}} = 4$$

De acuerdo a la fracción F.2.1 se requiere una muestra por lote (una muestra requerida por cada 2500m³ de material pétreo).

D.3.4.2. Al azar se escogió el número secuencia 24. De la tabla “A” obtenemos el valor “Y” = 0.18; dado que solo se requiere un sub-lote (una muestra) solo tomamos este valor.

De forma sucesiva se obtuvieron los valores “Y” para los otros lotes considerando que se tienen que escoger al azar otros números secuencia.

Número de secuencia	“Y”
24	0.18
8	0.73
15	0.39
90	0.48

D.3.4.3. Multiplicando el valor Y por el tamaño del lote, obtenemos los m³ en donde se realizarán los muestreos.

Lote	Y	Tamaño del lote	m ³ a muestrear	m ³ de muestreo de material pétreo
1	0.18	2500m ³	0.18*2500=450	450
2	0.85		0.73*2500=1825	2500+1825=4235
3	0.98		0.39*2500=975	5000+975=5975
4	0.42		0.48*2500=1200	7500+1200= 8700



D.3.5. Ejemplo 4

Se requiere realizar el análisis de mezcla asfáltica de esta guía de acuerdo al punto F.2.3 en donde se especifica que el muestreo debe ser realizado cada 700m³ (tamaño del lote). Suponga que se produjeron en un día 1500m³. Para determinar los m³ en los cuales se realizaría el muestreo:

D.3.5.1. Calcular el número de lotes:

$$\text{Número de lotes} = \frac{1500m^3}{700m^3/\text{lote}} = 2$$

De acuerdo a la fracción F.2.3 se requieren cinco muestras (5 sub-lotes).

D.3.5.2. Al azar se escogió el número secuencia 24. De la tabla “A” obtenemos el valor “Y” = 0.58; dado que se requieren cinco muestras (sub-lotes) tomamos los valores de “Y” de los renglones subsecuentes hasta completar cinco valores.

De forma sucesiva se obtuvieron los valores “Y” para el otro lote considerando que se tienen que escoger al azar otros números secuencia.

Número de secuencia 1er. Lote	“Y”
50	0.74
51	0.06
52	0.97
53	0.54
54	0.71

Dado que se tienen 2 lotes, nuevamente se seleccionaron cinco valores de “Y” para el segundo lote. El número secuencia seleccionado al azar fue 28

Número de secuencia 2º. Lote	“Y”
28	0.74
29	0.06
30	0.97
31	0.54
32	0.71

D.3.5.3. Multiplicando el valor Y por el tamaño del lote, obtenemos los m³ en donde se realizarán los muestreos.

Lote	Y	Tamaño del lote	m ³ a muestrear	m ³ de muestreo de material pétreo
1	0.74	700m ³	0.74*700=518	518
1	0.06		0.06*700=42	42
1	0.97		0.97*700=679	679
1	0.54		0.54*700=378	378
1	0.71		0.71*700=497	497
2	0.74	700m ³	0.74*700=518	700+518= 1218
2	0.06		0.06*700=42	700+42=742
2	0.97		0.97*700=679	700+679= 1379
2	0.54		0.54*700=378	700+378=1078
2	0.71		0.71*700=497	700+497=1197

Lote 1		Lote 2	
Sub-lote		Sub-lote	
No. 1 : 42 m3		No. 1 : 742 m3	
No. 2 : 378m3		No. 2 : 1079m3	
No. 3 : 498 m3		No. 3 : 1197m3	
No. 4 : 518m3		No. 4 : 1218m3	
No. 5 : 679m3		No. 5 : 1379m3	
700m3		1500m3	
Tamaño de 2 lotes 1500m3			

TABLA A. Tabla de números aleatorios.

Número de secuencia	X	Y	Número de secuencia	X	Y
1	0.20	I 0.92	51	0.24	I 0.06
2	0.32	I 0.56	52	0.22	D 0.97
3	0.28	D 0.51	53	0.13	I 0.54
4	0.30	I 0.30	54	0.31	D 0.71
5	0.99	I 0.06	55	0.49	D 0.47
6	0.94	I 0.03	56	0.98	I 0.63
7	0.44	D 0.68	57	0.55	I 0.91
8	0.33	D 0.73	58	0.94	D 0.29
9	0.65	D 0.67	59	0.99	I 0.08
10	0.27	D 0.68	60	0.74	D 0.03
11	0.30	I 0.62	61	0.33	D 0.91
12	0.04	I 0.59	62	0.46	D 0.67
13	0.27	D 0.64	63	0.62	I 0.36
14	0.69	D 0.34	64	0.93	I 0.59
15	0.67	D 0.39	65	0.40	I 0.89
16	0.99	D 0.92	66	0.24	I 0.18
17	0.61	D 0.28	67	0.76	I 0.19
18	0.89	I 0.58	68	0.35	I 0.96
19	0.36	D 0.36	69	0.21	I 0.90
20	0.64	D 0.43	70	0.83	D 0.49
21	0.71	I 0.27	71	0.69	D 0.43
22	0.59	0.83	72	0.61	D 0.65
23	0.90	I 0.76	73	0.34	I 0.37
24	0.58	D 0.18	74	0.95	D 0.88
25	0.25	D 0.85	75	0.31	D 0.61
26	0.73	I 0.98	76	0.34	I 0.99
27	0.15	I 0.42	77	0.72	I 0.06
28	0.51	I 0.88	78	0.76	D 0.72

29	0.75	D 0.18	79	0.12	I 0.49
30	0.12	I 0.37	80	0.89	D 0.04
31		I 0.33	81	0.28	D 0.08
32	0.12	I 0.80	82	0.63	I 0.61
33	0.72	I 0.69	83	0.00	I 0.39
34	0.80	I 0.75	84	0.75	I 0.03
35	0.97	D 0.02	85	0.08	D 0.64
36	0.96	I 0.36	86	0.00	I 0.95
37	0.74	D 0.89	87	0.23	I 0.37
38	0.65	D 0.10	88	0.13	D 0.52
39	0.86	D 0.29	89	0.62	I 0.89
40	0.20	I 0.46	90	0.32	I 0.48
41	0.37	I 0.16	91	0.63	I 0.33
42	0.44	I 0.57	92	0.90	I 0.80
43	0.13	D 0.28	93	0.94	D 0.60
44	0.67	I 0.46	94	0.14	D 0.83
45	0.42	D 0.34	95	0.52	I 0.69
46	0.49	I 0.73	96	0.35	I 0.94
47	0.96	D 0.22	97	0.45	D 0.07
48	0.89	I 0.04	98	0.96	D 0.14
49	0.74	I 0.20	99	0.51	D 0.03
50	0.27	I 0.74	100	0.58	I 0.34

X= Fracción decimal de la longitud total medida a lo largo de la carretera desde un punto de inicio.

Y= Fracción decimal medida a lo ancho de la carretera de cualquiera de las orillas hacia el centro de la línea del pavimento.

I= Posición desde el borde izquierda al centro de la línea.

D= Posición desde el borde derecho al centro de la línea.

CONCLUSIONES

Como bien se pudo observar en el trabajo, la metodología de diseño de mezclas asfálticas "Protocolo AMAAC", es una opción muy viable para uso en Carreteras Federales. Siguiendo cada parámetro, especificación y metodología, se puede asegurar un buen resultado en la ejecución del proyecto, obteniendo carreteras con mayor durabilidad y mayor rendimiento.

El control de calidad juega un papel muy importante en la fabricación de la mezcla asfáltica, como se menciona en el Capítulo V, el mantener una correcta selección en los materiales, tener la cantidad necesaria de los mismos en el laboratorio, la correcta ejecución de las pruebas a realizar con su evaluación correspondiente ayudará a obtener y utilizar los materiales adecuados. Es por ello de la importancia de que las pruebas sean realizadas por un laboratorio reconocido por el IMT-AMAAC ya que garantizará la calidad de los materiales y de la mezcla asfáltica.

Entonces, si se tiene un buen control de calidad en el diseño de la mezcla asfáltica, la fabricación, el tendido y la compactación, y a su vez la estructura del pavimento está en buen estado, se pueden tener pavimentos asfálticos de buena calidad, duraderos y confortables para el usuario.

El personal técnico encargado de la realización de las pruebas deberá ser capacitado para lograr que se cumpla con las especificaciones, así como el equipo deberá estar en buenas condiciones y debidamente calibrado, esto no sólo será para dar credibilidad a la empresa de que puede realizar los trabajos, sino que garantizará que el control de calidad será el adecuado.

Los problemas actuales en cuanto al daño del pavimento en poco tiempo se verían reducidos cumpliendo con los requisitos y especificaciones, el proyecto se verá beneficiado con la durabilidad y vida útil del pavimento deseados y esperados, así mismo el mantenimiento del pavimento será más sencillo y con menor presupuesto al que actualmente se cotiza. Con esto, las carreteras federales darán el servicio correspondiente y sin los problemas que el usuario sufre día a día debido a las fallas del pavimento.

Todo esto depende de la ejecución y por mucho del trabajo conjunto del laboratorio y la empresa contratista, pero con resultados beneficiosos, tan sólo es seguir las especificaciones en el control de calidad y una adecuada supervisión. Esto incluso se vería reflejado en costos, debido a que el mantenimiento de las carreteras sería menor dejando que el mantenimiento de rutina sea el único durante el tiempo de vida útil del pavimento, además de reducir los accidentes y daños a automóviles.

Es así como la aplicación de la metodología del "Protocolo AMAAC" en mezclas asfálticas es una opción óptima y viable para las carreteras federales del país.

REFERENCIAS

- Asociación Mexicana del Asfalto, A.C. (2013). *Protocolo AMAAC PA-MA-01*. México, Ciudad de México.
- Asociación Mexicana del Asfalto, A.C. (2016). *Protocolo AMAAC PA-MA-02*. México, Ciudad de México.
- Garnica Anguas, Paul; Gómez López, José Antonio; Pérez Salazar, Alfonso; Itandehui Martínez Peña, Guadalupe E. y Chávez Cárdenas, Julio Alejandro. (2004). Publicación Técnica 256 “*Módulos de resiliencia de agregados provenientes de rocas altamente intemperizadas*”. San Fandila, Qro., México, Instituto Mexicano del Transporte.
- López Urtusuástegui, José J. (2012). Manual de Supervisión MS-1 “*Producción de mezcla asfáltica en caliente*”. Ciudad de México, México, AMAAC.
- López Urtusuástegui, José J. (2012). Manual de Supervisión MS-2 “*Tendido y compactación de mezclas asfálticas en caliente*”. Ciudad de México, México, AMAAC.
- López Urtusuástegui, José J. (2012). Manual de Supervisión MS-3 “*Capas granulares y estabilizadas de pavimentos*”. Ciudad de México, México, AMAAC.
- NCHRP. (1998). *Quality Control and Acceptance of Superpave-Designed Hot Mix Asphalt*. Report 409, EE.UU.
- Texas Department of Transportation. *Dense Graded Hot-Mix Asphalt*. ITEM 341, EE.UU.
- NCAT. (2016). *Hot mix asphalt materials, mixture design and construction*. National Center for Asphalt Technology. EE.UU.
- Manual NAPA (1997) Quality improvement Series QIP-97 “*Quality Control for Hot-Mix Plant and Paving Operations*”. National Center Pavement Association. EE.UU.

- Manual NAPA (2003) Mejoramiento de la calidad QIP- 112S “*Construyendo pavimentos de calidad de mezclas asfálticas en caliente*”. National Center Pavement Association. EE.UU. Traducción al español por Asociación Mexicana del Asfalto, A.C. (2006) México.
- Manual NAPA (1997). Mejoramiento de la calidad QIP-121S “*Juntas longitudinales: problemas y soluciones*”. National Asphalt Pavement Association. EE.UU. Traducción al español por Asociación Mexicana del Asfalto, A.C. (2006), México.
- Manual NAPA. TAS 32 “*Guía práctica para hacer pavimentos de calidad*”. National Asphalt Pavement Association. EE.UU. Traducción al español por Asociación Mexicana del Asfalto, A.C. (2008) México.
- Manual NAPA (1999). Serie informativa SI-120S “*Producción de mezcla asfáltica en caliente, equilibrando los procesos*”. National Asphalt Pavement Association. EE.UU. Traducción al español Asociación Mexicana del Asfalto, A.C. (2007) México.
- Manual NAPA (2005). Serie informativa SI-121S “*Calidad en la operación del compactador de rodillos*”. National Asphalt Pavement Association. EE.UU. Traducción al español por Asociación Mexicana del Asfalto, A.C. (2006) México.
- Manual NAPA (2005). Serie informativa SI-125S “*Calidad en las máquinas pavimentadoras*”. National Asphalt Pavement Association. EE.UU. Traducción al español por Asociación Mexicana del Asfalto, A.C. (2006) México.
- Asphalt Institute. (1992). Serie de manuales No. 22 (MS 22) “*Principios de construcción de pavimentos de mezcla asfáltica en caliente*”. Asphalt Institute. EE.UU.
- AASHTO T 307. *Standard Method of Test for Determining the Resilient Modulus of Soils and Aggregate Materials*. American Association of State Highway and Transportation Officials. EE.UU. 2011.

- AASHTO T 342. *Standard Method of Test for Determining Dynamic Modulus of Hot-Mix Asphalt Concrete Mixtures*. American Association of State Highway and Transportation Officials. EE.UU. 2011.
- AASHTO PP-28. *Standard Practice for Superpave Volumetric Design for Hot Mix Asphalt (HMA)*. American Association of State Highway and Transportation Officials. EE.UU. 2001.
- AASHTO R30. *Practice for Short and Long Term Conditioning of Hot Mix Asphalt (HMA)*. American Association of State Highway and Transportation Officials. EE.UU. 2002.
- AASHTO T209. *Standard Method of Test for Theoretical Maximum Specific Gravity (Gmm) and Density of Hot Mix Asphalt (HMA)*. American Association of State Highway and Transportation Officials. EE.UU. 2012.
- AASHTO T283. *Standard Method of Test for Resistance of Compacted Asphalt Mixtures to Moisture-Induced Damage*. American Association of State Highway and Transportation Officials. EE.UU. 2014.
- ASTM C128. *Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Fine Aggregate*. American Society of Testing and Materials. EE.UU. 2001.
- ASTM D75. *Historical Standard: Práctica Normativa para el Muestreo de Agregados*. American Society of Testing and Materials. EE.UU. 2003.
- ASTM D979. *Standard Practice for Sampling Bituminous Paving Mixtures*. American Society of Testing and Materials. EE.UU. 2015.
- ASTM D1188. *Standard Test Method for Bulk Specific Gravity and Density of Compacted Bituminous Mixtures Using Coated Samples*. American Society of Testing and Materials. EE.UU. 2007.

- ASTM D2041. *Standard Test Method for Theoretical Maximum Specific Gravity and Density of Bituminous Paving Mixtures*. American Society of Testing and Materials. EE.UU. 2011.
- ASTM D2172. *Standard Test Methods for Quantitative Extraction of Asphalt Binder from Asphalt Mixtures*. American Society of Testing and Materials. EE.UU. 2017.
- ASTM D2726. *Standard Test Method for Bulk Specific Gravity and Density of Non-Absorptive Compacted Asphalt Mixtures*. American Society of Testing and Materials. EE.UU. 2017.
- ASTM D2776. *Methods of Test for Corrosivity of Water in the Absence of Heat Transfer (Electrical Methods)*. American Society of Testing and Materials. EE.UU. 1991.
- ASTM D2872. *Standard Test Method For Effect of Heat and Air on a Moving Film of Asphalt (Rolling Thin-Film Oven Test)* American Society of Testing and Materials. EE.UU. 2012.
- ASTM D6307. *Standard Test Method for Asphalt Content of Asphalt Mixture by Ignition Method*. American Society of Testing and Materials. EE.UU. 2010.
- ASTM D6521. *Standard Practice for Accelerated Aging of Asphalt Binder Using a Pressurized Aging Vessel (PAV)*. American Society of Testing and Materials. EE.UU. 2013.
- ASTM D6648. *Standard Test Method for Determining the Flexural Creep Stiffness of Asphalt Binder Using the Bending Beam Rheometer (BBR)*. American Society of Testing and Materials. EE.UU. 2008.
- ASTM D6925. *Standard Test Method for Preparation and Determination of the Relative Density of Asphalt Mix Specimen by Means of the Superpave Gyrotory Compactor*. American Society of Testing and Materials. EE.UU. 2015.

- ASTM D70. *Standard Test Method for Density of Semi-Solid Asphalt Binder (Pycnometer Method)*. American Society of Testing and Materials. EE.UU. 2018.
- M-CAL-1-03. *Análisis Estadísticos de Control de Calidad*. Norma de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes, México, 2003.
- M-MMP-1-02-/03. *Clasificación de fragmentos de roca y suelos*. Manual de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes, México, 2003.
- M-MMP-4-04-001. *Muestreo de Materiales Pétreos para Mezclas Asfálticas*. Manual de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes, México, 2002.
- M-MMP-4-04-002. *Granulometría de Materiales Pétreos para Mezclas Asfálticas*. Norma de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes, México, 2002.
- M-MMP-4-05-001. *Muestreo de Materiales Asfálticos*. Norma de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes, México, 2000.
- M-MMP-4-05-005/02. *Viscosidad Rotacional Brookfield de Cementos Asfálticos*. Manual de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes, México, 2002.
- M-MMP-4-05-007/00. *Punto de Inflamación Cleveland en Cementos Asfáltico*. Manual de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes, México, 2000.
- M-MMP-4-05-009/00. *Punto de Reblandecimiento en Cementos Asfálticos*. Manual de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes, México, 2000.
- M-MMP-4-05-022/02. *Separación en Cemento Asfáltico Modificado*. Manual de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes, México, 2002.
- M-MMP-4-05-024/02. *Recuperación Elástica por Torsión en Cemento Asfáltico Modificado*. Manual de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes, México, 2002.
- M-MMP-4-05-025/02. *Módulo Reológico de Corte Dinámico*. Manual de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes, México, 2002.

- M-MMP-4-05-026/02. *Recuperación Elástica en Ductilómetro*. Manual de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes.
- N-CTM-4-05-002/06. *Calidad de materiales asfálticos modificados*. Norma de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes, México, 2006.
- N-CTR-CAR-1-04-006. *Carpetas asfálticas con Mezcla en Caliente*. Norma de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes, México, 2009.
- N-CTR-CAR-1-07-016. *Señalamiento y Dispositivos para Protección en obras*. Norma de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes, México, 2000.
- N-LEG-3. *Ejecución de obras*. Legislación de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes, México, 2002.
- N-LEG-4. *Ejecución de Supervisión de obras*. Legislación de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes, México, 2002.
- N-CAL-1-01. *Ejecución del Control de Calidad Durante la Construcción o Conservación*. Norma de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes, México, 2005.
- N-CAL-1-02. *Criterios Estadísticos de Muestreo*. Manual de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes, México, 2001.
- N-CAL-1-03. *Análisis Estadísticos de Muestreo*. Norma de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes, México, 2003.
- N-CAL-2-05-001. *Aprobación de Laboratorios*. Norma de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes, México, 2005.