



Certificación ISO 9001:2000 ‡
Laboratorios acreditados por EMA §

ANÁLISIS COMPARATIVO DE LOS MÉTODOS MARSHALL Y SUPERPAVE PARA COMPACTACIÓN DE MEZCLAS ASFÁLTICAS

Paul Garnica Anguas
Horacio Delgado Alamilla
Carlos Daniel Sandoval Sandoval

Publicación Técnica No 271
Sanfandila, Qro, 2005

SECRETARÍA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTES
INSTITUTO MEXICANO DEL TRANSPORTE

**Análisis comparativo de los métodos de
Marshall y Superpave para
compactación de mezclas asfálticas**

Publicación Técnica No 271
Sanfandila, Qro, 2005

Este trabajo fue realizado por el Jefe de la División de Laboratorios, Dr Paul Garnica Anguas y los investigadores M en I Horacio Delgado Alamilla de la Coordinación de Infraestructura del Instituto Mexicano del Transporte, y Carlos Sandoval Sandoval tesista de la Universidad Autónoma de Chihuahua.

Se agradece la participación del técnico Mario Antonio Pérez González y del tesista Adalberto Rogelio Hernández Ortiz, por su colaboración en los ensayos de laboratorio.

Índice

Resumen	III
Abstract	V
Resumen ejecutivo	VII
1 Método de diseño de mezclas asfálticas	1
1.1 Método Marshall	1
1.1.1 Pruebas a las mezclas asfálticas compactadas	1
1.2 Método Superpave	3
1.2.1 Pruebas al agregado mineral	3
1.2.2 Pruebas al cemento asfáltico	4
1.2.3 Pruebas a la mezcla asfáltica	5
2 Parámetros volumétricos	7
2.1 Definiciones	7
2.1.1 Gravedad específica neta del agregado	10
2.1.2 Gravedad específica efectiva del agregado	10
2.1.3 Gravedad específica máxima de la mezcla asfáltica	11
2.1.4 Absorción del asfalto	12
2.1.5 Contenido de asfalto efectivo	12
2.1.6 Porcentaje de vacíos en el agregado mineral	12
2.1.7 Porcentaje de vacíos de aire	13
2.1.8 Porcentaje de vacíos llenos de asfalto	14
3 Descripción del experimento	15
3.1 Selección de los materiales	15
3.1.1 Agregado mineral	15
3.1.1.1 Dosificación de la mezcla de agregados	15
3.1.1.2 Granulometría	16
3.1.2 Ligante asfáltico	17
3.1.2.1 Viscosímetro Rotacional (RV)	17
3.1.2.2 Reómetro de corte dinámico (DSR)	18
3.2 Características de la mezcla asfáltica	20
3.2.1 Porcentaje de asfalto y niveles de compactación	20
3.2.2 Elaboración de la mezcla asfáltica	21
3.2.3 Compactación	22
3.3 Ensayos fundamentales a la mezcla asfáltica	24
3.3.1 Gravedad específica neta de la mezcla compactada (Gmb)	24
3.3.2 Gravedad específica teórica máxima (Gmm)	26

3.4 Susceptibilidad a la deformación permanente en el APA	27
4 Análisis de resultados	31
4.1 Análisis de los parámetros volumétricos de la mezcla asfáltica	31
4.2 Selección del contenido óptimo de asfalto	32
4.3 Desarrollo de la densificación de la mezclas asfáltica	33
4.4 Comportamiento mecánico de la mezcla asfáltica	36
4.4.1 Deformación permanente	36
4.4.2 Resistencia a la tensión indirecta	37
4.4.3 Comentarios	38
4.5 Aplicación de la metodología RAMCODES	39
4.5.1 RAMCODES en las mezclas asfálticas	39
4.5.2 Aplicación de la metodología	42
4.5.2.1 Superficies de respuesta	42
4.5.2.2 Control de campo	48
Conclusiones	45
Bibliografía	47

Resumen

Se realiza una comparación de dos métodos de diseño como, son el método Marshall, el cual es el método más utilizado en México y el método Superpave, que es el desarrollo del programa SHRP del Departamento de Transporte de Estados Unidos de Norteamérica. Se hace énfasis en los antecedentes de ambas metodologías y en las propiedades volumétricas de las mezclas asfálticas compactadas; en forma conjunta se realiza un ensayo de desempeño de la mezcla asfáltica mediante el Analizador de Pavimentos Asfálticos (APA), mismo que se utiliza para evaluar la susceptibilidad da la mezcla a la deformación permanente.

Abstract

This work makes a comparison between two hot mix asphalt methods, the Marshall method which is the most used in Mexico and the Superpave method which is a development of the Strategic Highway Research Program (SHRP) in the United States. This work emphasizes the background of the two methodologies and the hot mix asphalt volumetric properties, in the same way present a hot mix asphalt performance test by means of the Asphalt Pavement Analyzer (APA), which is using for evaluate the rut susceptibility.

Resumen ejecutivo

La práctica de diseño de mezclas asfálticas ha recurrido a diferentes métodos para establecer un diseño óptimo en laboratorio; los comúnmente más utilizados son el método Marshall, y el Hveem. Siendo el primero el más común en la práctica mexicana.

La práctica actual del diseño de mezclas asfálticas deja ver la importancia de lograr propiedades volumétricas adecuadas en la carpeta asfáltica terminada, ya que de esto depende en gran medida el desempeño de la superficie de rodamiento en su vida de servicio. De ahí, la trascendencia de simular de manera adecuada en el laboratorio la densificación que ocurre en campo, bajo la acción vehicular y de esta forma llegar a fórmulas de trabajo que permitan dosificar mezclas que exhiban un mejor comportamiento en condiciones específicas de tránsito y clima.

En el presente trabajo se incorpora un ensayo de caracterización mecánica de la mezcla asfáltica, que permita desarrollar un mejor criterio para la elección del contenido óptimo de asfalto en la etapa de diseño.

El capítulo 1 presenta dos métodos de diseño de mezclas asfálticas: el Marshall, que es el que más se ha utilizado en México, y el Superpave que es el más actual para el diseño de mezclas.

Se proporcionan antecedentes de las metodologías y las diferentes pruebas, tanto volumétricas como mecánicas, que se emplean para la selección de un diseño apropiado.

En el segundo capítulo se procede a una descripción detallada de los parámetros volumétricos empleados, estableciendo la importancia del diseño volumétrico y a la vez presentando diagramas y fórmulas referentes a los parámetros más importantes en el diseño.

Lo relacionado con la caracterización de los materiales, fabricación de las probetas y el desarrollo de los ensayos mecánicos realizados, se trata en el capítulo 3.

Dentro de los ensayos mecánicos que se llevaron a cabo se encuentra la evaluación de la deformación permanente de la mezcla asfáltica compactada en el Analizador de Pavimentos Asfálticos (APA), o sea un dispositivo de rueda cargada utilizado por algunas agencias de transporte en los Estados Unidos para adoptar criterios de aceptación y rechazo en actividades del control de calidad, así como prueba complementaria en el diseño de mezclas asfálticas.

También se introduce el ensayo de tensión indirecta por compresión diametral que por su simplicidad, fácil aplicación y gran sensibilidad a los parámetros volumétricos y componentes constitutivos de la mezcla, resulta de gran utilidad para estudiar los efectos que tienen las características de la mezcla asfáltica compactada en sus propiedades mecánicas.

En el cuarto capítulo se describe el comportamiento observado en la experimentación, y se discuten con interés los resultados en lo referente a los ensayos realizados. Se presenta un diseño volumétrico de la mezcla asfáltica empleando los métodos Marshall y Superpave, en donde se asientan algunas diferencias a nivel volumétrico que surgen al utilizar ambas metodologías, donde su principal distintivo es la compactación en laboratorio. Además, se muestra una aplicación directa de la metodología RAMCODES para análisis de la densificación de la mezcla asfáltica compactada en donde se liga racionalmente las especificaciones del diseño con el control de calidad en campo mediante la implementación del *polígono de vacíos*.

1 Métodos de diseño de mezclas asfálticas

Las mezclas asfálticas han sido típicamente diseñadas con procedimientos empíricos de laboratorio, lo que significa que se requiere la experiencia en campo para determinar si el análisis de laboratorio tiene correlación con el desempeño del pavimento. De cualquier manera, aun con la correcta conjunción de estos procedimientos y el desarrollo del criterio de diseño de la mezcla, no se podían asegurar buenos grados de desempeño.

1.1 Método Marshall

El concepto del método Marshall en el diseño de mezclas para pavimentación fue formulado por Bruce Marshall, ingeniero de asfaltos del Departamento de Autopistas del estado de Mississippi. El Cuerpo de Ingenieros de Estados Unidos, a través de una extensiva investigación y estudios de correlación, mejoró y adicionó ciertos aspectos al procedimiento de prueba Marshall, a la vez que desarrolló un criterio de diseño de mezclas.

El método original únicamente es aplicable a mezclas asfálticas en caliente para pavimentación, que contengan agregados con un tamaño máximo de 25 mm (1") o menor. El método Marshall modificado se desarrolló para tamaños máximos arriba de 38 mm (1.5"), y está pensado para diseño en laboratorio y control en campo de mezclas asfálticas en caliente, con graduación densa. Debido a que la prueba de estabilidad es de naturaleza empírica, la importancia de los resultados en términos de estimar el comportamiento en campo se pierde cuando se realizan modificaciones a los procedimientos estándar.

El método Marshall utiliza especímenes de prueba estándar de 64 mm (2 ½") de alto y 102 mm (4") de diámetro; se preparan mediante un procedimiento para calentar, combinar y compactar mezclas de asfalto- agregado (ASTM D1559). Los dos aspectos principales del método Marshall son la densidad-análisis de vacíos, y la prueba de estabilidad y flujo de los especímenes compactados; cabe mencionar que este proceso de diseño no tiene especificado pruebas para agregados minerales ni para cementos asfálticos.

1.1.1 Pruebas a las mezclas asfálticas compactadas

En el método Marshall se elaboran tres tipos de pruebas para conocer tanto sus características volumétricas como mecánicas.

Determinación de la gravedad específica

La prueba de gravedad específica puede desarrollarse tan pronto como el espécimen se haya enfriado en un cuarto de temperatura. Esta prueba se hace de acuerdo con la Norma ASTM D1188, gravedad específica de mezclas asfálticas compactadas utilizando parafina; o la ASTM D2726, gravedad específica de

mezclas asfálticas compactadas mediante superficies saturadas de especímenes secos.

Para determinar cuál norma se debe utilizar, se realizan pruebas de absorción a la mezcla asfáltica compactada; si la absorción es mayor al 2%, se recurre a la norma ASTM D1188; en caso contrario, se emplea la norma ASTM D2726.

Prueba de estabilidad y flujo

Después de que la gravedad específica se ha determinado, se procede a la prueba de estabilidad y flujo, que consiste en sumergir el espécimen en un baño María a $60^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ ($140^{\circ}\text{F} \pm 1.8^{\circ}\text{F}$) de 30 a 40 minutos antes de la prueba.

Con el equipo de prueba listo se remueve el espécimen colocado en baño María y cuidadosamente se seca la superficie. Ubicando y centrando el espécimen en la mordaza inferior, se coloca la mordaza superior y se centra completamente en el aparato de carga.

Posteriormente, se aplica la carga de prueba al espécimen a una deformación constante de 51 mm (5") por minuto, hasta la falla. El punto de falla se define por la lectura de carga máxima obtenida. El número total de Newtons (lb) requeridos para que se produzca la falla del espécimen deberá registrarse como el valor de estabilidad Marshall.

Mientras la prueba de estabilidad está en proceso, si no se utiliza un equipo de registro automático, se deberá mantener el medidor de flujo sobre la barra guía y cuando la carga empiece a disminuir se deberá tomar la lectura, y registrarla como el valor de flujo final. La diferencia entre el valor de flujo final e inicial, expresado en unidades de 0.25 mm (1/100"), será el valor del flujo Marshall.

Análisis de densidad y vacíos

Después de completar las pruebas de estabilidad y flujo, se lleva a cabo el análisis de densidad y vacíos para cada serie de especímenes de prueba.

Se debe determinar la gravedad específica teórica máxima (ASTM D2041) para al menos dos contenidos de asfalto, preferentemente los que estén cerca del contenido óptimo de asfalto. Un valor promedio de la gravedad específica efectiva del total del agregado, se calcula de estos valores.

Utilizando la gravedad específica y la gravedad específica efectiva del total del agregado, así como el promedio de las gravedades específicas de las mezclas compactadas, la gravedad específica del asfalto y la gravedad específica teórica máxima de la mezcla asfáltica, se calcula el porcentaje de asfalto absorbido en peso del agregado seco, porcentaje de vacíos (V_a), porcentaje de vacíos llenados con asfalto (VFA), y el porcentaje de vacíos en el agregado mineral (VMA).

1.2 Método Superpave

En 1987, el Strategic Highway Research Program (SHRP) fue establecido por el Congreso de los Estados Unidos con un presupuesto de 150 millones de dólares en programas de investigación, a fin de mejorar el desempeño y duración de las carreteras volviéndolas más seguras tanto para automovilistas como para los trabajadores de las mismas.

Un tercio de este presupuesto se empleó en el desarrollo de especificaciones de desempeños basados en asfalto, directamente relacionados con análisis de laboratorio y con aplicaciones en campo.

Iniciando el desarrollo de un nuevo sistema para especificar materiales asfálticos, el producto final del programa es un nuevo sistema llamado Superpave (Superior Performing Asphalt Pavement). Representa una tecnología provista de tal manera que pueda especificar cemento asfáltico y agregado mineral; desarrollar diseños de mezclas asfálticas; analizar y establecer predicciones del desempeño del pavimento.

Este método evalúa los componentes de la mezcla asfáltica en forma individual (agregado mineral y asfalto), y su interacción cuando están mezclados.

1.2.1 Pruebas al agregado mineral

Las propiedades del agregado mineral son obviamente importantes para el desempeño de mezclas asfálticas. El criterio de agregados está directamente incorporado en el procedimiento Superpave. Hubo otros procedimientos que se refinaron para concordar con el sistema Superpave. Al respecto, dos tipos de propiedades de agregados se especifican en el sistema Superpave: propiedades de consenso y propiedades de origen.

Propiedades de consenso

Las propiedades de consenso del Superpave son: angularidad del agregado grueso; angularidad del agregado fino; partículas alargadas y aplanadas; y equivalente de arena.

Propiedades de la fuente de origen

Además de las propiedades de consenso, los expertos viales pensaron que había otras características críticas del agregado. Aun cuando éstas son relevantes en el proceso de diseño de la mezcla, podrían también usarse como un control de aceptación de la fuente de origen.

Las propiedades que se consideraron fueron: la tenacidad mediante la prueba de desgaste de Los Ángeles; la durabilidad a través de la prueba de intemperismo acelerado; y la prueba de materiales deletéreos

1.2.2 Pruebas al cemento asfáltico

Las pruebas Superpave para cementos asfálticos miden propiedades físicas que pueden estar directamente relacionadas con el desempeño en campo a través de principios ingenieriles.

Las pruebas Superpave para cemento asfáltico, también son llevadas a temperaturas a las que se encuentran los pavimentos en servicio.

El tema central de las especificaciones Superpave es la confianza sobre las pruebas del cemento asfáltico en condiciones que simulan las tres etapas críticas durante la vida del asfalto.

Las pruebas realizadas en el asfalto original, representan la primera etapa: *transportación, almacenamiento, y manejo.*

La segunda etapa representa el asfalto durante la producción, mezcla y construcción; es simulada por las especificaciones mediante el envejecimiento del asfalto en el Horno Rotatorio de Película Delgada (RTFO). Este procedimiento expone una película delgada de asfalto a calor y aire para aproximar el envejecimiento que sufre el asfalto durante su mezcla y construcción.

La tercera etapa ocurre cuando envejece el cemento asfáltico desde que se coloca en la mezcla asfáltica, y carpeta asfáltica, hasta el fin de su vida de diseño para la cual fue planeado. Esta etapa se simula en la vasija de envejecimiento a presión (PAV), mediante la exposición de muestras de asfalto a calor y presión, para representar el envejecimiento del pavimento a lo largo de los años de servicio.

En la Tabla 1.1 se pueden observar las pruebas utilizadas en el Superpave, y el propósito de las mismas.

Tabla 1.1
Propósito de las pruebas de asfaltos Superpave

Equipo	Propósito
Horno rotatorio de película delgada (RTFO) Vasija de envejecimiento a presión (PAV)	Simula las características del envejecimiento del asfalto
Reómetro de corte dinámico (DSR)	Mide las propiedades del asfalto a temperaturas altas e intermedias
Viscosímetro rotacional (RV)	Mide las propiedades del asfalto a altas temperaturas
Reómetro de viga en flexión (BBR) Ensayo de tensión directa (DTT)	Mide las propiedades del asfalto a bajas temperaturas.

1.2.3 Pruebas a las mezclas asfálticas

Los requerimientos del diseño de mezclas asfálticas de Superpave son:

Requerimientos volumétricos de la mezcla

Los requerimientos volumétricos de la mezcla son: vacíos de aire; vacíos del agregado mineral y vacíos llenos de asfalto. El contenido de vacíos de aire es una propiedad importante que se utiliza como base para la selección del contenido del cemento asfáltico.

Superpave define los vacíos del agregado mineral (VAM), como la suma del volumen de vacíos de aire y del asfalto efectivo en una muestra compactada. Representa los vacíos entre las partículas del agregado.

Los vacíos llenos de asfalto (VFA) son el porcentaje de VAM que contiene cemento asfáltico. Consecuentemente, VFA es el volumen de cemento asfáltico efectivo, expresado como el porcentaje de VAM.

Proporción de polvo

Otro requerimiento de la mezcla es la proporción de polvo; se calcula como la relación entre el porcentaje en peso del agregado más fino que el tamiz 0.075 mm y el contenido de asfalto efectivo en porcentaje de peso total en la mezcla, menos el porcentaje de asfalto absorbido.

Susceptibilidad a la humedad

El ensayo de susceptibilidad a la humedad para evaluar una HMA al desprendimiento es la Norma AASHTO T-283, Resistencia de mezclas bituminosas compactadas al daño inducido por humedad. Este ensayo, que no se basa en el desempeño, sirve para dos propósitos; primero, identificar si una combinación de cemento asfáltico y agregado es susceptible a la acción del agua; segundo, mide la efectividad de los aditivos antidesprendimiento o de mejora de adherencia.

2 Parámetros volumétricos

Un factor que debe ser tomado en cuenta al considerar el comportamiento de la mezcla asfáltica, es el de las *proporciones volumétricas* del asfalto y de los componentes del agregado; o más simplemente, *parámetros volumétricos de la mezcla asfáltica*. Este capítulo describe el análisis volumétrico de HMA, el cual juega un rol significativo en muchos procedimientos de diseño de mezclas.

Las propiedades volumétricas de una mezcla de pavimento compactado (vacíos de aire (V_a); vacíos en el agregado mineral (VAM); vacíos llenados con asfalto (VFA); y contenido de asfalto efectivo (P_{be}) proporcionan una indicación del probable funcionamiento de la mezcla asfáltica. Es necesario entender las definiciones y los procedimientos analíticos descritos en este capítulo, para tomar decisiones concernientes a la selección del diseño de mezclas asfálticas. La información aplica tanto a mezclas elaboradas en laboratorio, como a probetas asfálticas extraídas en el campo.

2.1 Definiciones

El agregado mineral es poroso, y puede absorber agua y asfalto a un grado variable. Además, el cociente de absorción entre el agua y el asfalto varía con cada agregado. Los tres métodos para medir la gravedad específica del agregado toman estas variaciones en consideración. Estos métodos son, la gravedad específica neta, la aparente, y la efectiva:

Gravedad específica neta, G_{sb} .— Proporción de la masa al aire de una unidad de volumen de un material permeable (incluyendo vacíos permeables e impermeables del material) a una temperatura indicada, con respecto a una masa al aire de igual densidad de volumen igual al de agua destilada a una temperatura indicada (Figura 2.1).

Gravedad específica aparente, G_{sa} .— Proporción de la masa en aire de una unidad de volumen de un material impermeable a una temperatura indicada, con respecto a una masa al aire de igual densidad de volumen igual al de agua destilada a una temperatura indicada (Figura 2.1).

Gravedad específica efectiva, G_{se} .— Proporción de la masa en aire de una unidad de volumen de un material permeable (excluyendo vacíos permeables de asfalto) a una temperatura indicada, con respecto a una masa al aire de igual densidad de volumen igual al de agua destilada a una temperatura indicada (Figura 2.1).

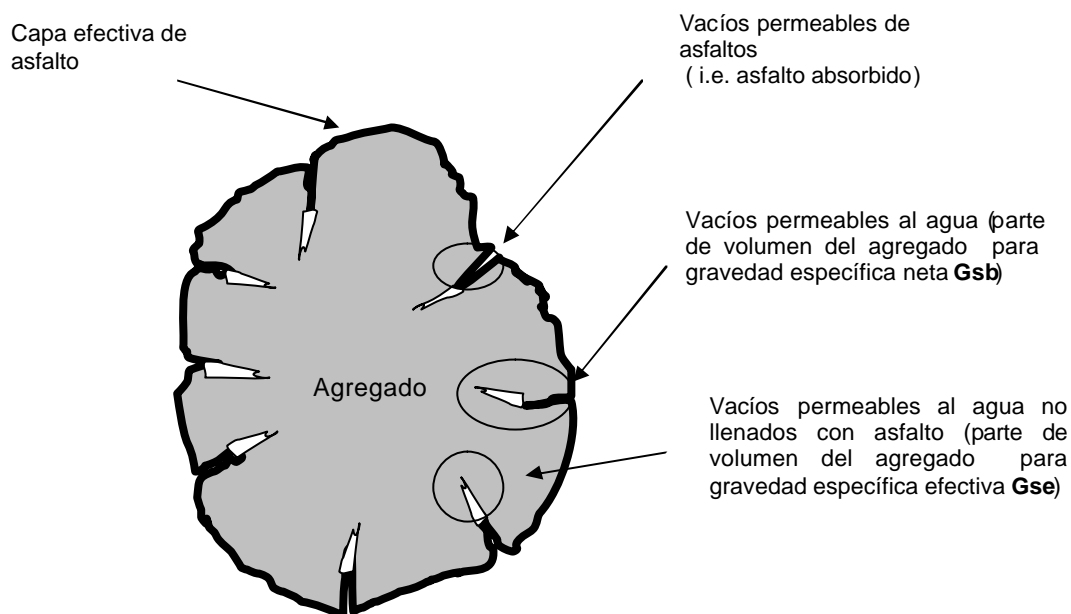


Figura 2.1
Ilustración de los parámetros de diseño volumétrico

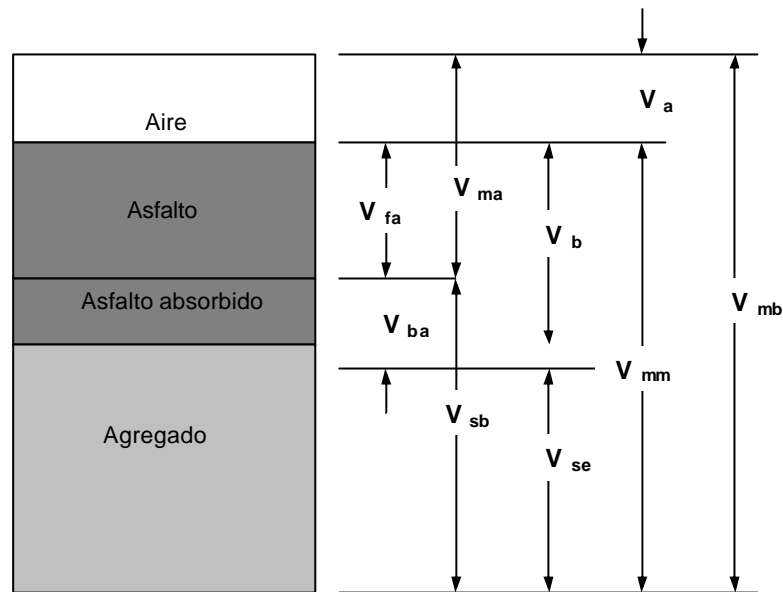
Vacíos en el agregado mineral, VAM.— Volumen de espacio vacío intergranular entre las partículas del agregado de una mezcla asfáltica compactada, que incluye los vacíos de aire y el contenido de asfalto efectivo, expresado como un porcentaje del volumen total de la muestra (Figura 2.2).

Contenido de asfalto efectivo, P_{be} .— Contenido de asfalto total de una mezcla asfáltica, menos la proporción de asfalto absorbido en las partículas del agregado.

Vacíos de aire, V_a .— Volumen total de una pequeña bolsa de aire entre las partículas cubiertas del agregado en una mezcla de pavimento compactado, expresado como el porcentaje del volumen neto de la mezcla del pavimento compactado (Figura 2.2).

Vacíos llenados con asfalto, VFA.— Porción del porcentaje del volumen de espacio vacío intergranular entre las partículas del agregado, que es ocupado por el asfalto efectivo. Se expresa como la porción de $(VAM - V_a)$ entre VAM. (Figura 2.2).

El procedimiento de diseño de mezcla, calcula los valores de VAM para las mezclas de pavimento en términos de la gravedad específica neta de los agregados, G_{sb} .



- V_{ma} = volumen de vacíos en agregado mineral
 V_{mb} = volumen total de la mezcla asfáltica
 V_{mm} = volumen de la mezcla asfáltica sin vacíos
 V_{fa} = volumen de vacíos llenados con asfalto
 V_a = volumen de vacíos de aire
 V_b = volumen de asfalto
 V_{ba} = volumen de asfalto absorbido
 V_{sb} = volumen de agregado mineral (gravedad específica de la masa)
 V_{se} = volumen de agregado mineral (gravedad específica efectiva)

Figura 2.2

Componente del diagrama de compactación de una HMA

Los vacíos en el agregado mineral (V_{AM}) y vacíos de aire (V_a), se expresan como un porcentaje del volumen de la mezcla asfáltica. Los vacíos llenos de asfalto (VFA) son el porcentaje del VAM llenado con el asfalto efectivo.

Dependiendo de cómo se especifica el contenido de asfalto, el contenido de asfalto efectivo puede expresarse como un porcentaje de la masa total de la mezcla asfáltica, o como porcentaje de la masa del agregado de la mezcla asfáltica.

Debido a que el vacío de aire, VAM y VFA son cantidades de volumen; una mezcla asfáltica, primero debe ser diseñada o analizada sobre la base del volumen. Para propósitos de diseño, este acercamiento volumétrico puede ser fácilmente cambiado a valores de masas, para proveer una mezcla de diseño.

2.1.1 Gravedad específica neta del agregado

Cuando el agregado total consiste en fracciones separadas de agregado grueso; agregado fino; y filler, todos tienen diferentes gravedades específicas; la gravedad específica neta para el agregado total se calcula usando:

$$G_{sb} = \frac{P_1 + P_2 + \dots + P_N}{\frac{P_1}{G_1} + \frac{P_2}{G_2} + \dots + \frac{P_N}{G_N}}$$

Donde:

- G_{sb} = gravedad específica neta para el agregado total
- P_1, P_2, P_n = porcentajes individuales por masa de agregado
- G_1, G_2, G_n = gravedad específica neta individual del agregado

La gravedad específica neta del filler es difícil de determinar correctamente. De cualquier modo, si la gravedad específica aparente del filler es estimada, el error es usualmente insignificante.

2.1.2 Gravedad específica efectiva del agregado

Cuando se basa en la gravedad específica máxima de una mezcla de pavimento, G_{mm} , la gravedad específica efectiva del agregado, G_{se} , incluye todos los espacios de vacíos en las partículas del agregado, excepto aquellos que absorben el asfalto; G_{se} se determina usando:

$$G_{se} = \frac{P_{mm} - P_b}{\frac{P_{mm}}{G_{mm}} - \frac{P_b}{G_b}}$$

Donde:

- G_{se} = gravedad específica efectiva del agregado
- G_{mm} = gravedad específica teórica máxima (ASTM D 2041/AASHTO T 209) de mezcla de pavimento (sin vacíos de aire)
- P_{mm} = porcentaje de masa del total de la mezcla suelta = 100
- P_b = contenido de asfalto con el cual ASTM D 2041/AASHTO T 209 desarrolló el ensayo; el porcentaje por el total de la masa de la mezcla
- G_b = gravedad específica del asfalto

El volumen de asfalto absorbido por los agregados es casi invariablemente menor al volumen de agua absorbida. Por tanto, el valor para la gravedad específica efectiva de un agregado debe estar entre su gravedad específica neta y su gravedad específica aparente. Cuando la gravedad específica efectiva sale de estos límites, su valor se debe asumir como incorrecto. El cálculo de la gravedad específica máxima de la mezcla mediante la ASTM D 2041/ASSHTO T 209; la composición de la mezcla en términos del contenido de agregado; y el total de asfalto se deben entonces, volver a inspeccionar para encontrar la causa del error.

2.1.3 Gravedad específica máxima de la mezcla asfáltica

En el diseño de una mezcla asfáltica para un agregado dado, se necesitará la gravedad específica máxima, G_{mm} , para cada contenido de asfalto con el fin de calcular el porcentaje de vacíos de aire para cada contenido de asfalto. Mientras que la gravedad específica máxima puede determinarse para cada contenido de asfalto mediante ASTM D 2041/ASSHTO T 209; la precisión del ensayo es mejor cuando la mezcla está cerca del contenido de asfalto de diseño. Además, es preferible medir la gravedad específica máxima por duplicado o triplicado.

Después de calcular la gravedad específica efectiva del agregado para cada gravedad específica máxima medida; y promediando los resultados del G_{se} , la gravedad específica máxima para cualquier otro contenido de asfalto puede obtenerse con la siguiente ecuación, la cual supone que la gravedad específica efectiva del agregado es constante, y ésta es válida puesto que la absorción del asfalto no varía apreciablemente con los cambios en el contenido de asfalto.

$$G_{mm} = \frac{P_{mm}}{\frac{P_s}{G_{se}} + \frac{P_b}{G_b}}$$

Donde:

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 = 100

P_s = contenido de agregado, porcentaje del total de la masa de la mezcla

P_b = contenido de asfalto, porcentaje del total de la masa de la mezcla

G_{se} = gravedad específica efectiva del agregado

G_b = gravedad específica del asfalto

2.1.4 Absorción del asfalto

La absorción se expresa como un porcentaje de la masa del agregado, más que como un porcentaje del total de la masa de la mezcla.

La absorción del asfalto, P_{ba} , se determina mediante:

$$P_{ba} = 100 \times \frac{G_{se} - G_{sb}}{G_{sb} G_{se}} \times G_b$$

Donde:

P_{ba} = asfalto absorbido, porcentaje de la masa del agregado

G_{se} = gravedad específica efectiva del agregado

G_{sb} = gravedad específica neta del agregado

G_b = gravedad específica del asfalto

2.1.5 Contenido de asfalto efectivo

El contenido de asfalto efectivo, P_{be} , de una mezcla de pavimento es el volumen total de asfalto, menos la cantidad de asfalto perdido por absorción dentro de las partículas del agregado. Es la porción del contenido total de asfalto que se queda como una capa en el exterior de la partícula del agregado y es el contenido de asfalto que gobierna el desempeño de una mezcla asfáltica. La fórmula es:

$$P_{be} = 100 \times \frac{G_{se} - G_{sb}}{G_{sb} G_{se}} \times G_b$$

Donde:

P_{be} = contenido de asfalto efectivo, porcentaje de la masa total de la mezcla

P_b = contenido de asfalto, porcentaje de la masa total de la mezcla

P_{ba} = asfalto absorbido, porcentaje de la masa del agregado

P_s = contenido de agregado, porcentaje total de la masa de la mezcla

2.1.6 Porcentaje de vacíos en el agregado mineral

Los vacíos en el agregado mineral, VAM, se definen como el vacío intergranular entre las partículas del agregado en una mezcla asfáltica compactada, que incluye los vacíos de aire y el contenido de asfalto efectivo, expresado como un porcentaje del volumen total. El VAM puede calcularse sobre la base de la

gravedad específica neta del agregado, y expresarse como un porcentaje del volumen mezcla asfáltica compactada. Por tanto, el VAM puede estimarse restando el volumen del agregado determinado por su gravedad específica neta, del volumen neto de la mezcla asfáltica compactada.

Si la composición de la mezcla se determina como el porcentaje del total de la masa de la mezcla asfáltica:

$$VMA = 100 - \frac{G_{mb} \times P_s}{G_{sb}}$$

Donde:

VAM = vacíos en el agregado mineral (porcentaje del volumen neto)

G_{sb} = gravedad específica neta del total de agregado

G_{mb} = gravedad específica neta de la mezcla asfáltica compactada (ASTM D 1188 O D 2726/AASHTO T 166)

P_s = contenido de agregado, porcentaje del total de la masa de la mezcla asfáltica

O, si la composición de la mezcla es determinada como el porcentaje de la masa del agregado:

$$VMA = 100 - \frac{G_{mb}}{G_{sb}} \times \frac{100}{100 + P_b} \times 100$$

Donde:

P_b = contenido de asfalto, porcentaje de la masa del agregado

2.1.7 Porcentaje de vacíos de aire

Los vacíos de aire, V_a , en la mezcla asfáltica compactada consiste en los pequeños espacios de aire entre las partículas de agregado. El porcentaje del volumen de vacíos de aire en una mezcla compactada, puede determinarse usando:

$$V_a = 100 \times \frac{G_{mm} - G_{mb}}{G_{mm}}$$

Donde:

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

G_{mm} = gravedad específica máxima de la mezcla asfáltica

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

2.1.8 Porcentaje de vacíos llenos de asfalto

El porcentaje de los vacíos en el agregado mineral que son llenados por el asfalto, VFA, no incluyendo el asfalto absorbido, se determina usando:

$$VFA = 100 \times \frac{VMA - V_a}{VMA}$$

Donde:

VFA = vacíos llenados con asfalto, porcentaje de VAM

VAM = vacíos en el agregado mineral, porcentaje del volumen total

V_a = vacíos de aire en mezclas compactadas, porcentaje del volumen total

3 Descripción del experimento

Se describe la metodología y desarrollo de la experimentación referente a la caracterización de los materiales y ensayos mecánicos realizados a la mezcla asfáltica compactada.

3.1 Selección de los materiales

3.1.1 Agregado mineral

El material pétreo que se utilizó para la elaboración de la mezcla asfáltica proviene del banco de materiales “La Cañada”, ubicado en la ciudad de Querétaro, y consta básicamente de roca basáltica triturada; las pruebas al agregado se realizaron de acuerdo con los requerimientos establecidos por la metodología Superpave. En la Tabla 3.1 se muestra el resumen de los resultados:

Tabla 3.1
Pruebas al agregado mineral

Ensayos	Resultado	Especificación
De consenso		
Angularidad del agregado grueso (ASTM D5821)	100/100	100/100
Angularidad del agregado fino (ASTM C1252)	58	45 mín
Partículas planas y alargadas (ASTM D4791)	2%	10% máx
Equivalente de arena (ASTM D2419)	75%	50% mín
De origen		
Desgaste de los Ángeles (ASTM C131)	16%	35% máx
Intemperismo acelerado (ASTM C88)	7%	10% máx
Densidad aparente (Gsa)	2,869	-----
Densidad neta (Gsb)	2,725	-----

3.1.1.1 Dosificación de la mezcla de agregados

Se utilizó una mezcla de tres agregados, y se definió la estructura del agregado de diseño calculando la granulometría de la mezcla por medio de combinaciones matemáticas de las granulometrías individuales de los materiales.

Tabla 3.2

Materiales constitutivos de la mezcla de agregados

Material	Porcentaje de aporte a la mezcla total
Grava (3/4-3/8)	30
Material para sello (3/8-No.4)	25
Arena de trituración (Pasa No.4)	45
TOTAL	100

La dosificación de las cantidades de material para la elaboración de las probetas se llevó a cabo por medio del procedimiento de reducción de muestras descrito por la Norma ASTM C 702. Durante el desarrollo de la experimentación se hizo una verificación periódica de la graduación de la mezcla de agregados a fin de detectar cualquier variación en la granulometría.

Para la fabricación de las probetas Superpave (150 mm de diámetro) se emplearon aproximadamente 3000 g de material pétreo, lo que resulta en probetas con una altura de 75 ± 3 mm, altura requerida para realizar el ensayo de susceptibilidad a la deformación permanente en el Analizador de Pavimentos Asfálticos.

Para la fabricación de las probetas Marshall (100 mm de diámetro) se utilizaron aproximadamente 1200 g de material; la altura de estas probetas también resulta adecuada para el ensayo de deformación permanente.

3.1.1.2 Graduación

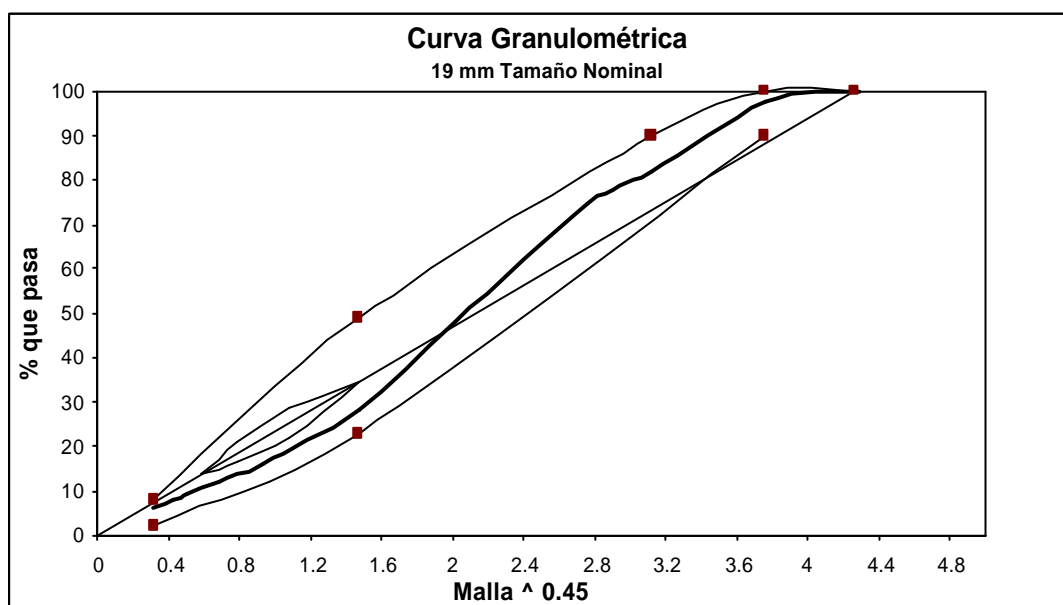


Figura 3.1
Curva granulométrica de la mezcla de agregados

La curva granulométrica de la mezcla de agregados se presenta en la Figura 3.1, donde se puede observar que cumple con los requerimientos de Superpave citados en el capítulo 2. Las características del agregado (calidad, graduación, tamaño máximo nominal, etc) fueron las mismas que se emplearon en la elaboración de las probetas ensayadas en este experimento.

Los puntos de control corresponden al tamaño máximo nominal, en este caso de 19 mm, un tamaño intermedio (2.36 mm), y un tamaño de polvo mineral (0.075 mm). La zona restringida se ubica entre los tamaños 2.36 y 0.3 mm.

3.1.2 Ligante asfáltico

El asfalto utilizado en el presente trabajo es del tipo AC-20, proveniente de la refinería de Salamanca, Guanajuato. Se elaboraron las probetas con asfalto AC-20 sin modificar, y modificado con SBS (Estireno Butadieno Estireno) al 3%. Con el propósito de caracterizar los tipos de ligante utilizados, se realizaron ensayos en el viscosímetro rotacional (RV) y el reómetro de corte dinámico (DSR).

3.1.2.1 Viscosímetro rotacional (RV)

La prueba del viscosímetro rotacional (Figura 3.2) se utiliza para determinar las temperaturas de mezclado y compactación de la mezcla asfáltica en el laboratorio. Se determinan las viscosidades a distintas temperaturas, y se construye una carta de viscosidad (Figura 3.3) en donde se seleccionan las temperaturas de mezclado y compactación correspondientes a los rangos de viscosidades de 0.17 ± 0.02 y 0.28 ± 0.03 Pa.s respectivamente.



Figura 3.2
Viscosímetro rotacional

Basándonos en estos criterios establecidos por Superpave, es factible obtener los rangos de temperatura de mezclado y compactación para el asfalto AC-20 sin modificar, y modificado con SBS. Los resultados se muestran en la Figura 3.3.

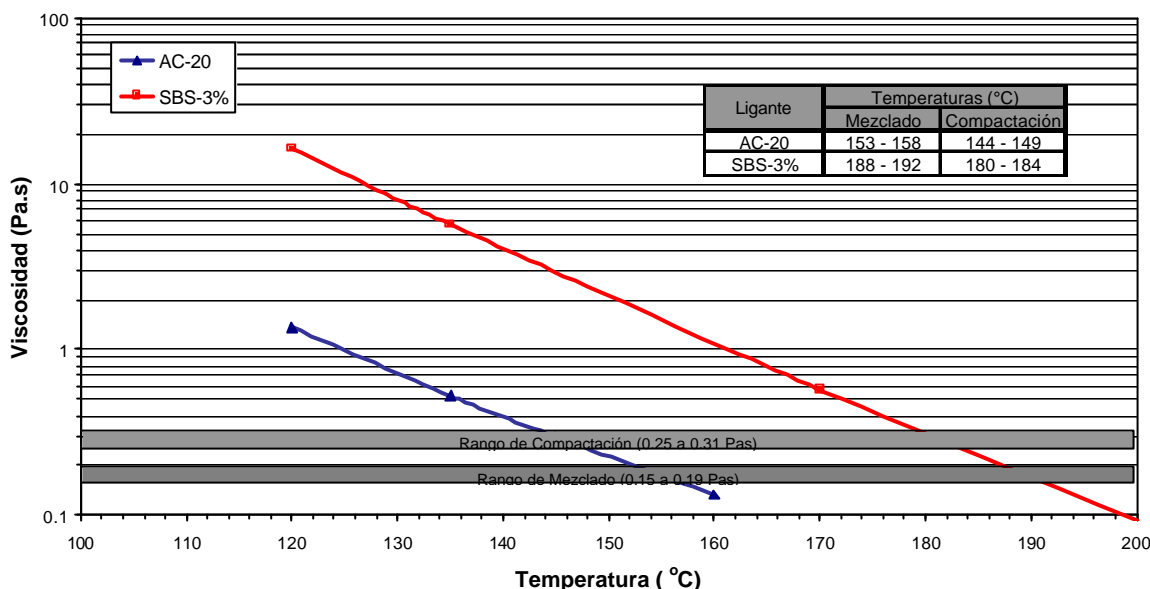


Figura 3.3
Carta de viscosidad

Superpave también establece un criterio para asegurar el fácil manejo y bombeo del asfalto en planta, especificando un valor de viscosidad a la temperatura de 135 °C; este valor debe ser como máximo de 3 Pa.s. Se puede ver en la Figura 3.3 que el cemento asfáltico AC-20 sin modificar cumple con el requerimiento, no así el modificado con 3% de SBS. Dado lo anterior, si se pretende utilizar el ligante modificado en estudio, en la elaboración de mezcla asfáltica en planta, se deberán tomar las medidas necesarias para lograr temperaturas que permitan un adecuado manejo, fabricación y compactación de la mezcla.

3.1.2.2 Reómetro de corte dinámico (DSR)

Se llevó a cabo la caracterización de los ligantes asfálticos en el DSR (Figura 3.4) con el fin de evaluar su contribución a resistir las deformaciones plásticas en la mezcla, con base en la medición del parámetro reológico $G^*/\text{sen } \delta$.

La prueba se realizó a los asfaltos en su estado original y envejecido en el horno RTFO. La Figura 3.5 muestra la variación del valor $G^*/\text{sen } \delta$ para las diferentes temperaturas a las que se ejecutó el ensaye. Se puede ver que el valor de $G^*/\text{sen } \delta$ disminuye notablemente a medida de que aumenta la temperatura de prueba. Se observa también que tanto para el cemento asfáltico modificado y sin modificar, los valores de $G^*/\text{sen } \delta$ son más altos para el asfalto envejecido; esto es debido al

endurecimiento que sufre el ligante como consecuencia de la volatilización de aceites durante la prueba en el horno RTFO.

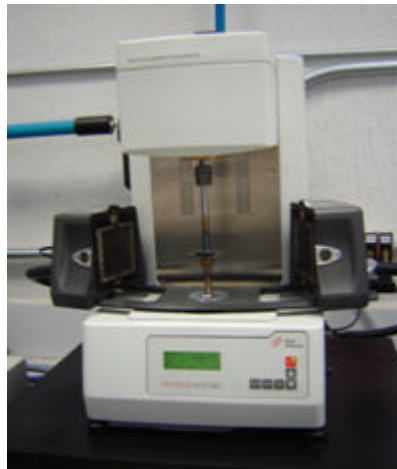


Figura 3.4
Reómetro de corte dinámico (DSR)

En la Figura 3.5 se puede ver que la diferencia entre los grados de desempeño entre el cemento asfáltico AC-20 sin modificar (PG-64), y el modificado con 3% de SBS (PG-88) es bastante amplia, dado los mayores valores de $G^*/\text{sen } \delta$ que se presentan para este último tipo de ligante, lo que indica que el asfalto modificado presenta una rigidez muy superior a altas temperaturas, que el cemento asfáltico sin modificar.

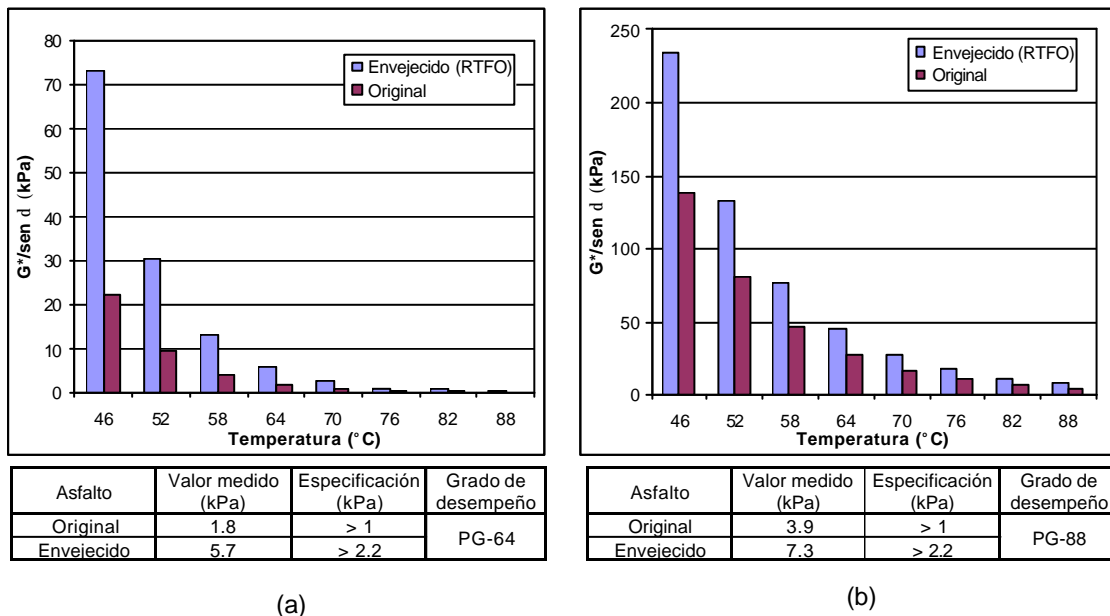


Figura 3.5
Caracterización del ligante asfáltico en el DSR; (a) AC-20; (b) SBS-3%

3.2 Características de la mezcla asfáltica

3.2.1 Porcentajes de asfalto y niveles de compactación

Con datos de la mezcla de agregados de diseño, como son la gravedad específica neta (G_{sb}); la gravedad específica aparente (G_{sa}); y el tamaño máximo nominal del agregado (S_n), se puede determinar un porcentaje de asfalto inicial (P_{bi}); tal como describe el Instituto del Asfalto de Norteamérica en su publicación referente al diseño de mezclas asfálticas en caliente, por el método Superpave. En la referencia [3] se puede consultar lo relacionado con este procedimiento, el cual sirvió como punto de partida para seleccionar los contenidos de asfalto que se utilizaron en el experimento.

El valor de P_{bi} obtenido fue de 5.1%, y los contenidos de asfalto a emplear en cada método se presentan a continuación:

Tabla 3.3
Selección de los contenidos de asfalto

Método de diseño	Contenidos de asfalto a utilizar
Superpave Nivel I	<ul style="list-style-type: none">• $P_{bi} - 1.0\%$• $P_{bi} \pm 0.5\%$• $P_{bi} + 1.0\%$
Marshall	<ul style="list-style-type: none">• $P_{bi} \pm 0.5\%$• $P_{bi} + 1.0\%$• $P_{bi} + 1.5\%$

Los contenidos de asfalto para cada método se seleccionaron con objeto de obtener curvas de los parámetros mejor definidas que se analizan en el diseño volumétrico.

Los niveles de compactación aplicados en el experimento se muestran en la Tabla 3.4 y 3.5 para las probetas elaboradas con la metodología Superpave y Marshall respectivamente. Tanto los rangos de nivel de compactación, como los de contenido de asfalto elegidos para cada metodología, contemplan valores típicos que se manejan en la práctica, para el diseño de una mezcla asfáltica en caliente en el laboratorio.

Tabla 3.4
Características de las probetas Superpave

Tipo de asfalto	Nivel de compactación (giros)	Contenido de asfalto (%)
AC-20 sin modificar	50	4.1
	100	4.6
AC-20 modificado con SBS al 3%	160	5.1
	160	5.6
	250	6.1

Nota: se elaboraron tres replicas para cada condición

Tabla 3.5
Características de las probetas Marshall

Tipo de asfalto	Nivel de compactación (golpes/cara)	Contenido de asfalto (%)
AC-20	50	4.6
	50	5.1
	75	5.6
	75	6.1
	100	6.6

Nota: se elaboraron dos replicas para cada condición

3.2.2 Elaboración de la mezcla asfáltica

Una vez que los materiales se acondicionan cercanos a la temperatura de mezclado, se dosifica el asfalto en peso con respecto a la mezcla total (Figura 3.6a). Posteriormente se procede al cubrimiento del agregado pétreo, manteniendo la temperatura de mezclado dentro del rango especificado hasta que las partículas más gruesas se hayan cubierto totalmente (Figura 3.6b).

Cuando la mezcla haya alcanzado la temperatura de compactación, se coloca dentro de los moldes donde va ser compactada. Los moldes deberán estar calientes, así como los demás accesorios que se utilicen en el vaciado y acomodo de la mezcla, con el fin de evitar una reducción de temperatura de la mezcla asfáltica, previa a su compactación.



Figura 3.6
Elaboración de la mezcla asfáltica

3.2.3 Compactación

En la compactación de la mezcla asfáltica caliente se utilizó el compactador giratorio para las probetas Superpave, y el martillo de impacto para las probetas Marshall. Los distintos niveles de compactación utilizados son los establecidos en las Tablas 3.4 y 3.5.

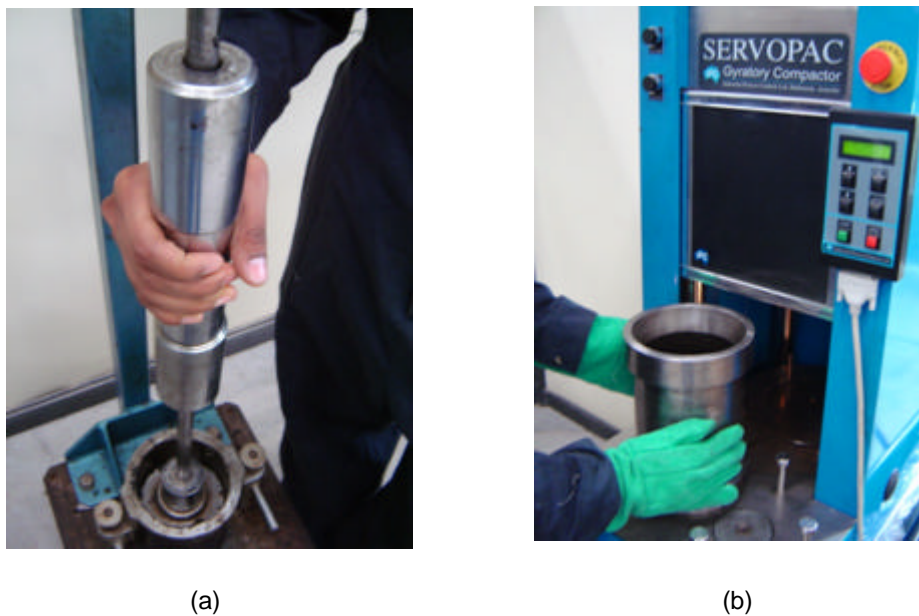


Figura 3.7
Compactación de la mezcla asfáltica

Una de las versatilidades del compactador giratorio son las mediciones de los esfuerzos de corte durante el proceso de compactación.

En la Figura 3.8 se puede observar el desarrollo de los esfuerzos de corte, a medida que aumenta el número de giros.

Dado que se cuenta con una extensa información como resultado de todas las probetas elaboradas en el compactador giratorio, en el presente trabajo se anexa un análisis sobre los efectos de las características de la mezcla asfáltica en las mediciones de los esfuerzos de corte, en el compactador giratorio

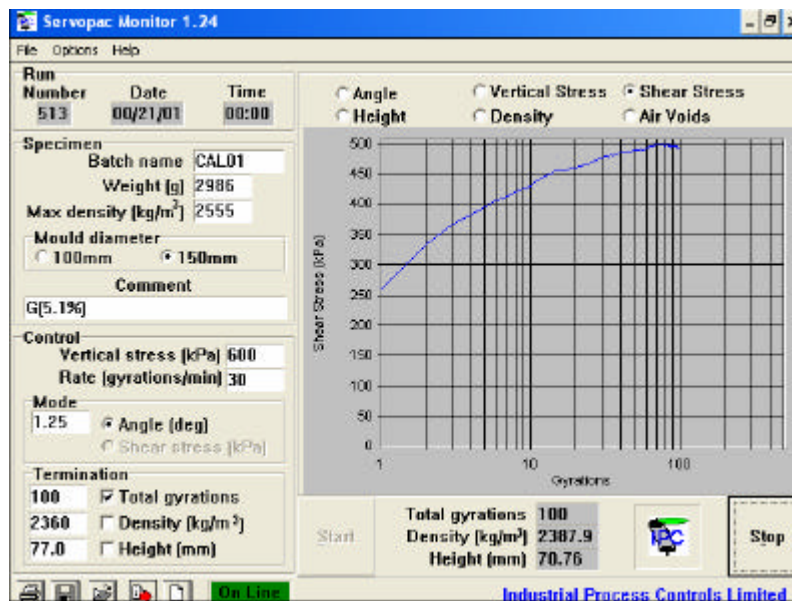


Figura 3.8
Mediciones de los esfuerzos de corte en el compactador giratorio

Con el propósito de realizar un análisis comparativo a nivel volumétrico entre las dos metodologías, se tomó como referencia un nivel de tránsito de 10 millones de ejes equivalentes (ESALs). Los niveles de compactación para esta condición se incluyen en la Tabla 3.6 donde se observa que dichos niveles se encuentran dentro de los ya contemplados en el experimento.

La metodología Superpave, en sus inicios tomaba como factores para la selección de la energía de compactación (número de giros), el nivel de tránsito (ESALs) y la temperatura. Recientes modificaciones al método, establecen que la elección del número de giros de diseño ($N_{\text{diseño}}$) a la que se compactará la mezcla, va en función del nivel del tránsito; este mismo criterio lo comparte el método Marshall.

Tabla 3.6
Niveles de compactación de diseño para 10 millones de ESALs

Método	Energía de compactación
Superpave Nivel I	$N_{\text{diseño}} = 100$ giros
Marshall	75 golpes por cara

En la Figura 3.9 se muestra el aspecto de las probetas fabricadas con cada metodología



Figura 3.9
Probetas de mezcla asfáltica

3.3 Pruebas fundamentales a la mezcla asfáltica

Con el objeto de determinar los parámetros volumétricos de la mezclas asfáltica se realizaron los ensayos correspondientes para determinar la gravedad específica neta (G_{mb}) y la gravedad específica teórica máxima (G_{mm}).

3.3.1 Gravedad específica neta (G_{mb})

El procedimiento a seguir para las probetas con un porcentaje de absorción menor al 2 % fue el descrito por la Norma ASTM D2726. La expresión para la gravedad específica es la siguiente:

$$G_{mb} = \frac{A}{B - C} \quad (3.1)$$

Donde:

A = masa del espécimen al aire

B = masa del espécimen saturado, y superficialmente seco

C = masa del espécimen sumergido en agua

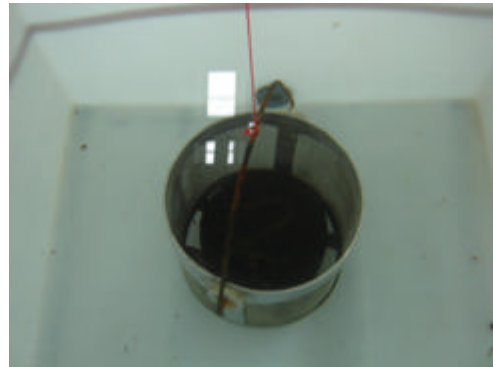
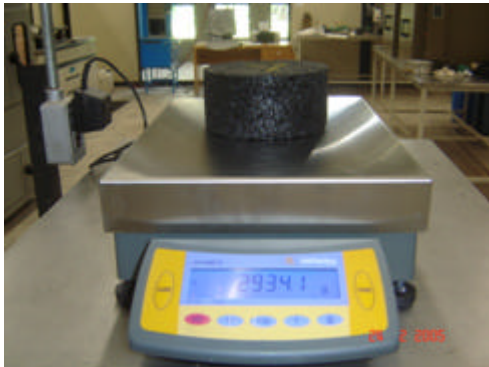


Figura 3.10

Determinación de la gravedad específica neta de la mezcla compactada

Para la determinar la gravedad específica de las probetas que presentaron mas del 2 % de absorción se empleó el procedimiento que describe la Norma ASTM D1188, la cual requiere impermeabilizar las probetas de mezcla asfáltica con una película de parafina (Figura 3.11).



Figura 3.11

Probetas de mezcla asfáltica parafinadas

En este procedimiento la expresión para calcular la gravedad específica es:

$$G_{mb} = \frac{A}{D - E - \left(\frac{D - A}{F} \right)} \quad (3.2)$$

Donde:

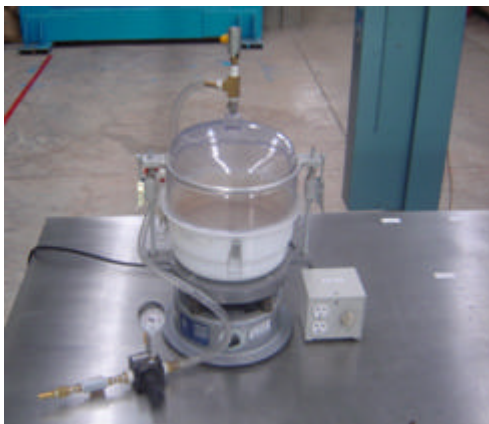
D = masa al aire del espécimen parafinado

E = masa del espécimen sumergido en agua

F = gravedad específica de la parafina

3.3.2 Gravedad específica teórica máxima (Gmm)

Se determina la gravedad específica teórica máxima Gmm (ASTM D2041) de la mezcla asfáltica en su estado suelto, para al menos dos contenidos de asfalto; de preferencia en un rango en donde se estime que podrá encontrarse el contenido óptimo. Una vez hecho lo anterior, se pueden determinar los valores de Gmm para los distintos contenidos de asfalto que se utilizan en el diseño, empleando fórmulas de aproximación tal como lo describe el Instituto del Asfalto de Norteamérica en su manual de métodos de diseño de mezclas asfálticas en caliente, Referencia [3].



(a)



(b)

Figura 3.12
Determinación de la gravedad específica teórica máxima.
(a) picnómetro (b) mezcla asfáltica en estado suelto

La expresión para determinar la gravedad específica teórica máxima a partir del procedimiento descrito por la norma ASTM D2041 es:

$$G_{mm} = \frac{G}{G + H - I} \quad (3.3)$$

Donde:

G = masa de la mezcla asfáltica (estado suelto)

H = masa del picnómetro + agua

I = masa del picnómetro + mezcla + agua

3.4 Susceptibilidad a la deformación permanente en el APA

La evaluación de la susceptibilidad de la mezcla asfáltica a la deformación permanente, se realizó mediante el ensayo de rueda cargada en el APA. El procedimiento de la prueba se describe a continuación:

1. Las probetas se acondicionan en el horno a la temperatura de prueba (64°C) por un espacio de 6 h previo al ensaye.
2. Se enciende el equipo, y desde el software de operación se introduce la temperatura de prueba en el panel de control principal (Figura 3.13).

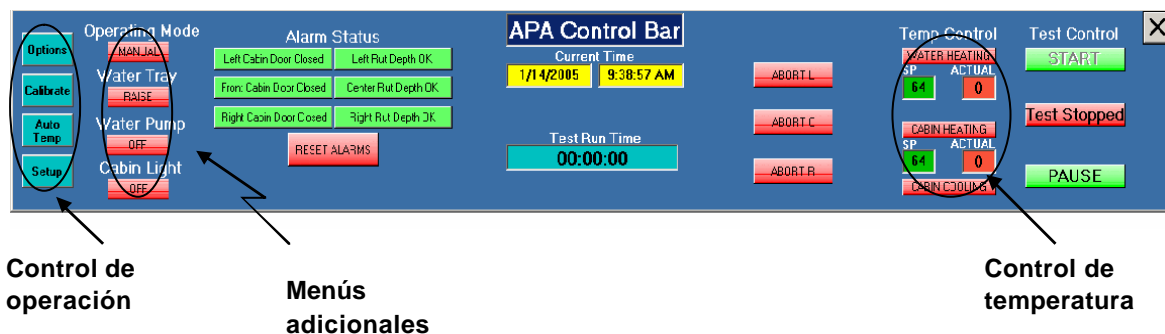


Figura 3.13
Panel de control principal del APA

3. Se lleva a cabo la calibración de las ruedas del APA mediante una celda de carga (Figura 3.14), a fin de asegurar que cada rueda aplique un fuerza de 100 lb durante el desarrollo de la prueba.

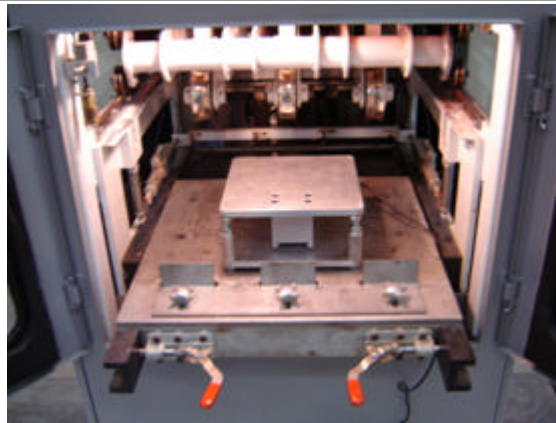


Figura 3.14
Calibración de las ruedas del APA

4. En el panel de control del ensayo de deformación permanente (Figura 3.15), se especifica el tipo de probeta (viga o moldes cilíndricos); número de ciclos; presión de las mangueras; posición de los medidores de deformación (LVDT,s), entre otros parámetros. La prueba se ejecutó a 8 000 ciclos, con una presión de aire en las mangueras de 100 lb/pulg².

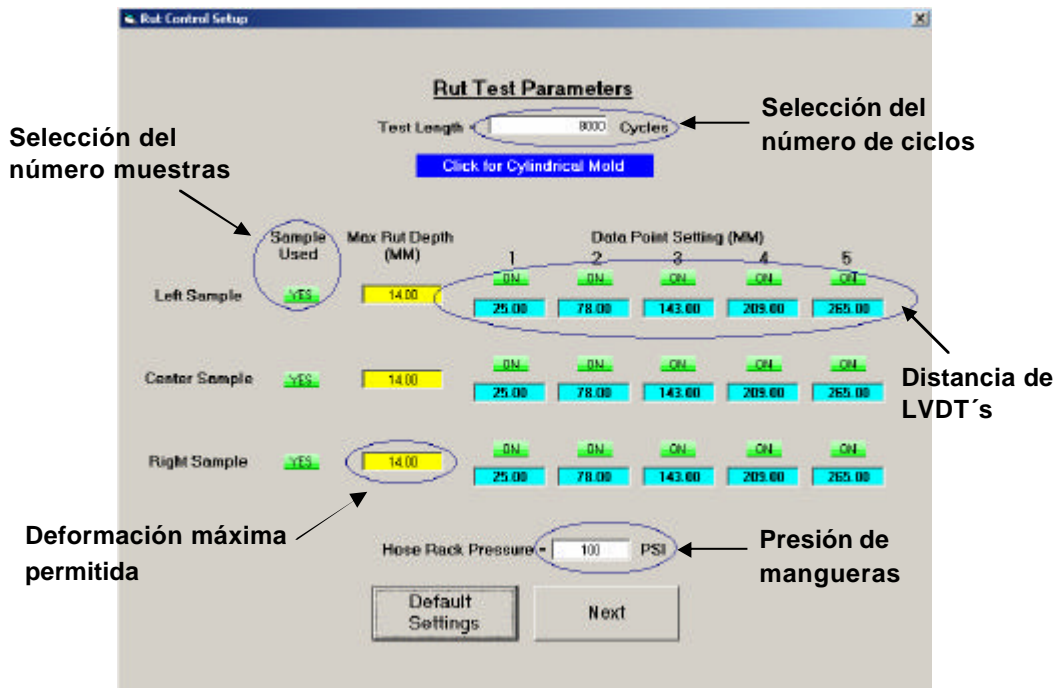


Figura 3.15
Panel de control para el ensayo de deformación permanente en el APA

5. Una vez que el equipo ha alcanzado los 64 °C se sacan las probetas del horno y se colocan las probetas dentro de los moldes de plástico, mismos que se introducen en el APA de tal forma que queden centrados por debajo de cada rueda (Figura 3.16-a).

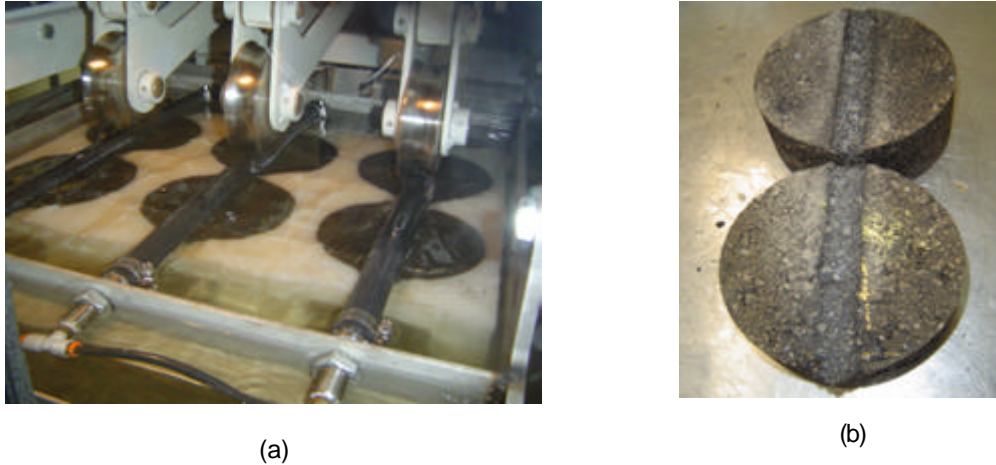


Figura 3.16
Evaluación de la deformación permanente en el APA

La prueba termina una vez completados los 8 000 ciclos, la Figura 3.16b muestra la apariencia de las probetas después del ensayo de deformación permanente en el Analizador de Pavimentos Asfálticos. En la Figura 3.17 se aprecia una curva típica de la evolución de la deformación permanente durante la prueba.

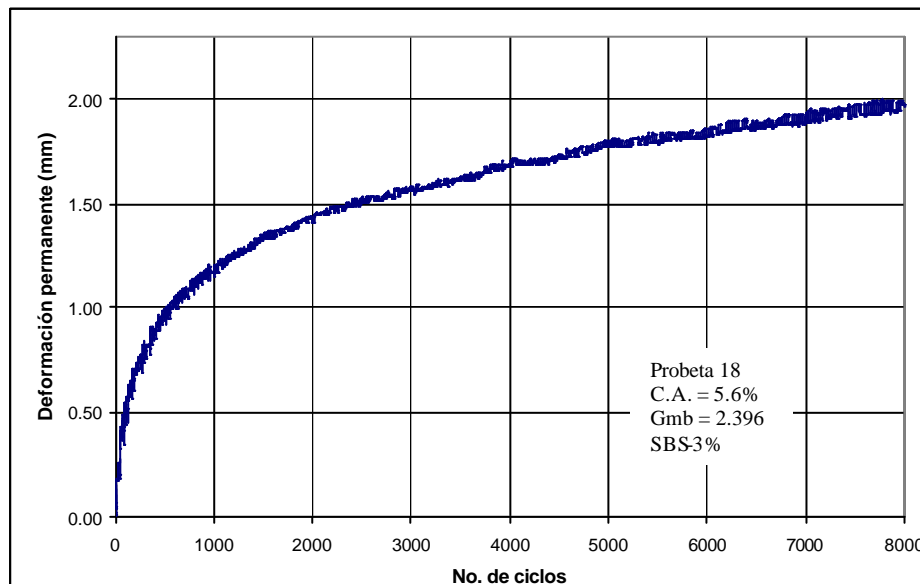


Figura 3.17
Evolución de la deformación permanente en el APA

4 Análisis de resultados

En el presente análisis, se parte de que la mezcla asfáltica se diseña para un nivel de tránsito correspondiente a 10 millones de ejes equivalentes (ESALs); los niveles de compactación para cada metodología son los que se muestran en la Tabla 3.6.

4.1 Análisis de los parámetros volumétricos de la mezcla asfáltica

Una vez determinados los ensayos de densidad para la mezcla asfáltica suelta (Gmm) y compactada (Gmb) para las probetas elaboradas con la metodología Marshall y Superpave, se tiene toda la información necesaria para determinar los parámetros volumétricos de la mezcla asfáltica, y obtener el contenido óptimo de asfalto para cada metodología.

En la Figura 4.1 se muestran las gráficas para el análisis volumétrico de la mezcla asfáltica en estudio, compactada con las dos metodologías de diseño.

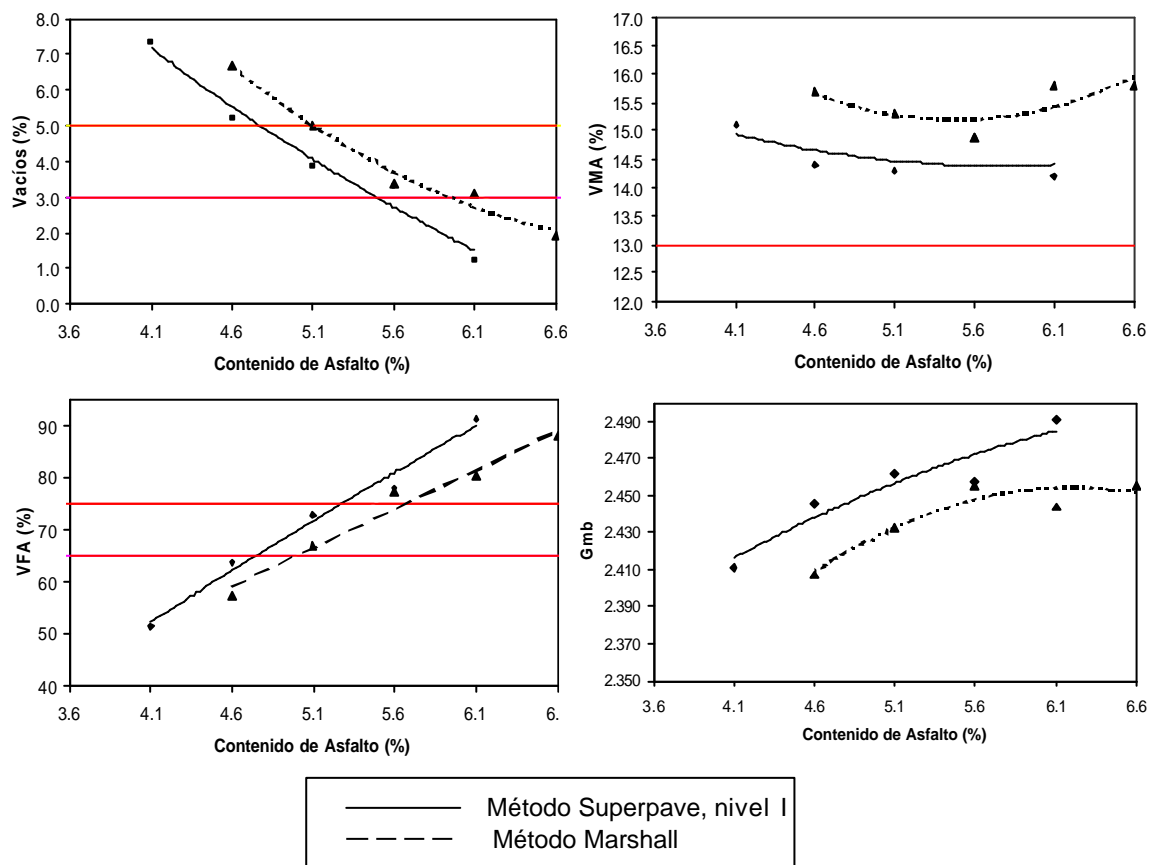


Figura 4.1
Análisis volumétrico para el diseño de la mezcla asfáltica

Las relaciones para determinar los porcentajes de vacíos de aire (V_a), vacíos en el agregado mineral (VAM), y vacíos llenos de asfalto (VFA) son las descritas en el capítulo 2.

En la Figura 4.1 se observa que la compactación giratoria produce mayores densidades de la mezcla asfáltica compactada; esto desde luego repercute de manera directa en los demás parámetros volumétricos. Los vacíos de aire son mayores, aproximadamente en 1% para la mezcla elaborada con el método Marshall; este valor se mantiene considerablemente constante para todos los contenidos de asfalto.

Al haber más espacio intergranular en las mezclas elaboradas con el método Marshall, era de esperarse obtener valores más altos de VAM para estas probetas ya que existe más espacio disponible para acomodar asfalto y aire en la mezcla. Por la misma razón, los mayores valores de VFA se presentan para mezclas compactadas con la metodología Superpave ya que al haber menos espacio entre las partículas para alojar el asfalto efectivo, son estas probetas las que presentan mayor porcentaje de saturación en una misma cantidad de asfalto.

4.2 Selección del contenido óptimo de asfalto

La práctica actual del diseño volumétrico de mezclas asfálticas elaboradas en caliente, recomienda como primer criterio de selección elegir aquel contenido de asfalto correspondiente al 4 % de vacíos de aire (V_a), y verificar después que los parámetros volumétricos restantes se encuentren dentro de los rangos establecidos por el método.

Dado que el principal aspecto a tomar en cuenta en el presente diseño, es obtener una mezcla asfáltica que se desempeñe adecuadamente y que además sea resistente a la deformación permanente (roderas), se ha decidido cambiar el criterio en la selección del contenido óptimo, estableciendo aquel contenido de asfalto para el cual el VAF se encuentre a la mitad de su rango permitido (70 %), esto garantiza a nivel de diseño que la mezcla asfáltica no se encuentre cerca de su nivel de saturación. En la tabla 4.1 se presentan los resultados obtenidos bajo el criterio anterior.

Se puede ver que para este criterio de selección, se cumple con las especificaciones de los demás parámetros volumétricos de la mezcla en ambas metodologías. Cabe mencionar que en el método Marshall, el tipo de ligante asfáltico puede influir determinadamente en la selección del contenido óptimo, al intervenir otros parámetros en el criterio de selección a parte de los volumétricos, como son la estabilidad y el flujo, pruebas que se realizan a 60°C independientemente del tipo de ligante que se utilice.

Tabla 4.1
Selección del contenido óptimo, bajo el criterio del 70% de VAF

Parámetro	Marshall	Superpave	Especificación
Contenido de asfalto (%)	5.4	5.0	-
VMA (%)	15.2	14.5	13 mín
Va (%)	4.6	4.4	3 a 5
Gmb	2.434	2.452	-
Gmm	2.550	2.566	-
%Gmm ($N_{inicial}$)	-	85.5	menor que 89
%Gmm ($N_{diseño}$)	-	96	95 a 97
%Gmm ($N_{máx}$)	-	96	menor que 98

El contenido óptimo de asfalto con la metodología Marshall resultó mayor en 0.4% con respecto al obtenido por Superpave. Es de especial importancia reflexionar acerca de las repercusiones que puede traer consigo la selección del método de compactación de la mezcla en el laboratorio durante la etapa de diseño.

En el supuesto de que la compactación giratoria represente de mejor manera las condiciones de densificación de un pavimento en servicio, se puede observar para la mezcla asfáltica densa en estudio, que la compactación dinámica que proporciona el método Marshall se podría estar quedando corta, tratando de simular las condiciones de densificación que se producen en campo, al generar densidades más bajas con respecto al procedimiento Superpave. Lo anterior tiene como consecuencia directa la elección de contenidos de asfaltos “óptimos” mayores a los requeridos, condición que podría afectar directamente el desempeño de la mezcla asfáltica.

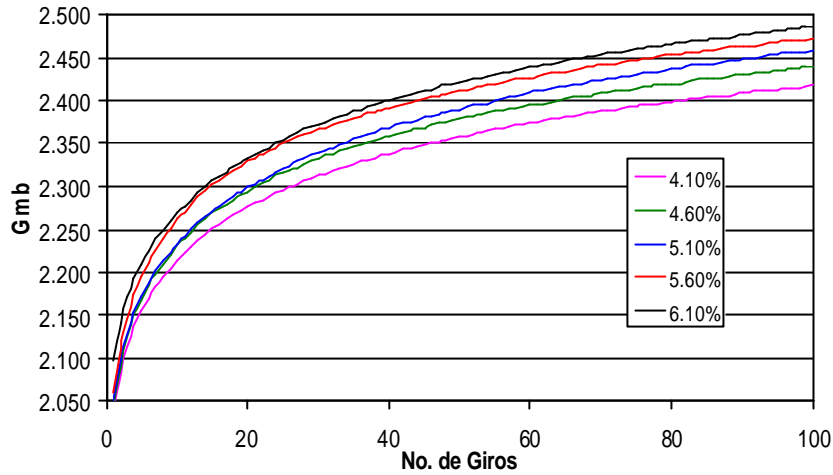
Tomando en cuenta que la carpeta de concreto asfáltico es la superficie más costosa de la estructura del pavimento flexible, es importante mencionar otro inconveniente directamente relacionado con lo dicho, el hecho de encarecer la elaboración de la mezcla asfáltica utilizando más volumen de asfalto del requerido.

4.3 Desarrollo de la densificación de la mezcla asfáltica

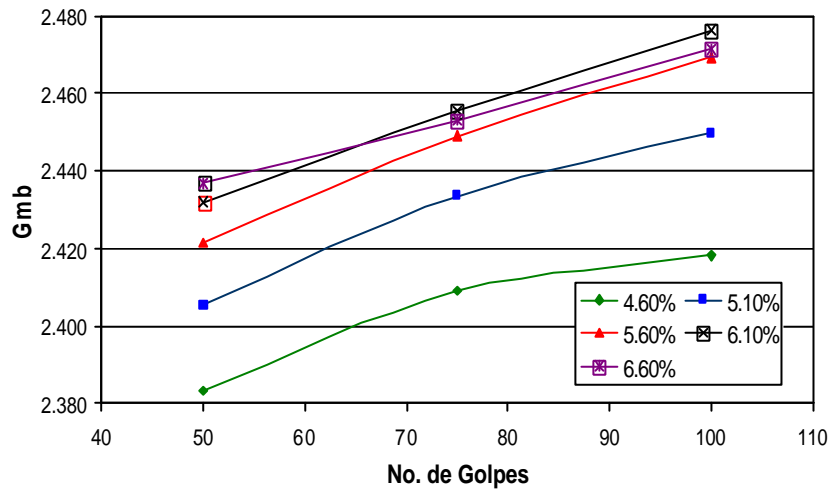
En la figura 4.2 se muestra la evolución de la densificación de la mezcla asfáltica compactada con las diferentes metodologías.

Se observa en la Figura 4.2a las típicas curvas de densificación obtenidas en el compactador giratorio para cada contenido de asfalto utilizado en el diseño de la mezcla por el Superpave. Lo anterior desde luego es posible, ya que se pueden generar valores de Gmb para cualquier número de giros partiendo de la altura final del espécimen para $N_{diseño}$, y el valor de Gmb medido para la misma condición.

Se compactaron probetas a 50, 75 y 100 golpes, para los contenidos de asfalto utilizados en el diseño Marshall, con el fin de conocer la variación de la densidad de la mezcla al aumentar la energía de compactación y el contenido de asfalto (Figura 4.2b).



(a)



(b)

Figura 4.2
Curvas de densificación. (a) Superpave (b) Marshall

Se puede observar que los valores de Gmb correspondientes al 6.6% de asfalto empiezan a descender con respecto a los valores de Gmb de la curva de 6.1%, esto indica el principio de la saturación de la mezcla, es decir, cuando en la curva Gmb contra contenido de asfalto, se empieza a definir la rama húmeda.

La Figura 4.3 muestra la variación de la densidad de la mezcla asfáltica para distintos contenidos de asfalto, empleando diferentes energías para la compactación por *amasado* que proporciona el compactador giratorio, así como para la compactación *dinámica* que ejerce el martillo de impacto Marshall.

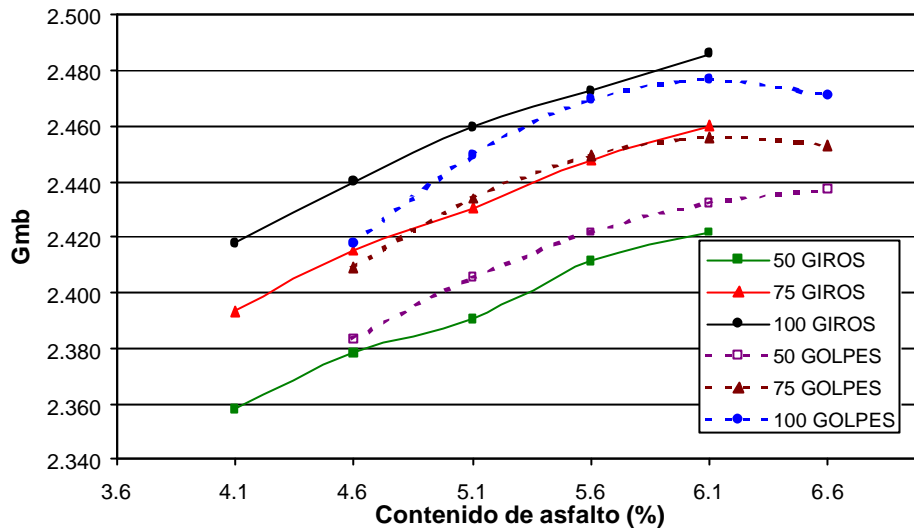


Figura 4.3

Curvas de densificación para diferentes niveles de compactación

Se puede notar que en las primeras 50 aplicaciones de carga se logra ligeramente una mayor densificación con el martillo de impacto. A las 75 aplicaciones, parece que se alcanzan similares condiciones de densificación tanto en la compactación giratoria, como en la compactación dinámica que ejerce el martillo Marshall. A las 100 aplicaciones los valores de Gmb cercanos a la máxima densificación de la mezcla, tienden a coincidir para ambas condiciones de compactación.

Las curvas de densificación obtenidas con los criterios de diseño de cada metodología, 75 golpes Marshall y 100 giros Superpave, presentan una diferencia promedio de densidad de 0.030, lo que hace suponer que el contenido de asfalto no tiene influencia en la diferencia entre ambos métodos de compactación.

Si se toma en cuenta que el porcentaje de vacíos de aire (V_a) está fuertemente influenciado por el contenido de asfalto, se podría concluir que sin importar que valor de V_a se utilice en el diseño, la diferencia entre los dos métodos será constante.

Lo anterior se puede demostrar mediante un análisis comparativo de los resultados del diseño volumétrico (Tabla 4.2) para diferentes porcentajes de vacíos de aire (3,4 y 5 %).

La Tabla 4.2 muestra las diferencias de contenido de asfalto entre la metodología Superpave y Marshall [$d(CA)\%$]; también se presenta el parámetro comparativo

N_{eq} , que es el valor de número de giros (metodología Superpave) con el cual se logra el mismo grado de densificación de la metodología Marshall (75 golpes).

Tabla 4.2

Análisis comparativo de los resultados del diseño volumétrico

%Va	d(CA)%	N_{eq} Marshall (Giros)
3	-0.4	70
4	-0.4	77
5	-0.3	74
PROMEDIO	-0.4	74

Se observa que para el rango de vacíos de aire, el valor de $d(CA)\%$ permanece prácticamente constante, y el valor de N_{eq} es relativamente estable.

4.4 Comportamiento mecánico de la mezcla asfáltica

Desde luego, resulta de especial interés observar el comportamiento a ensayos mecánicos que tienen las probetas de mezcla asfáltica elaboradas con las distintas metodologías de diseño, vistas hasta ahora. Las probetas utilizadas en este análisis comparativo fueron ensayadas en el Analizador de Pavimentos Asfálticos (APA), además de determinar su resistencia a la tensión indirecta (RTI).

4.4.1 Deformación permanente

En la Figura 4.4 se muestran los resultados de los ensayos de deformación permanente para las probetas empleadas en el diseño de la mezcla asfáltica.

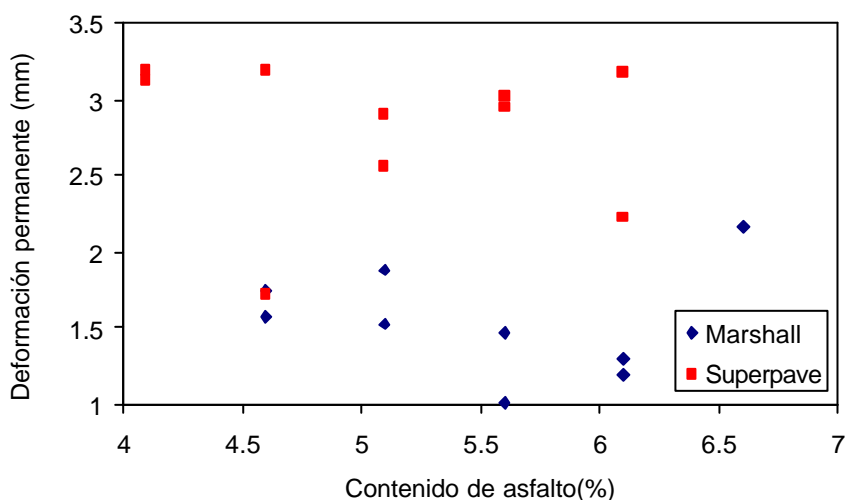


Figura 4.4

Ensayo de deformación permanente para las probetas Marshall Y Superpave

Por la ubicación de los puntos, se puede ver que se obtuvieron valores de deformación permanente más altos para las probetas elaboradas mediante Superpave. En la Figura 4.5 se aprecia la evolución de la deformación permanente durante el ensayo de rueda cargada en el APA, de dos probetas con el 6.1 % de asfalto elaboradas con los distintos métodos de compactación.

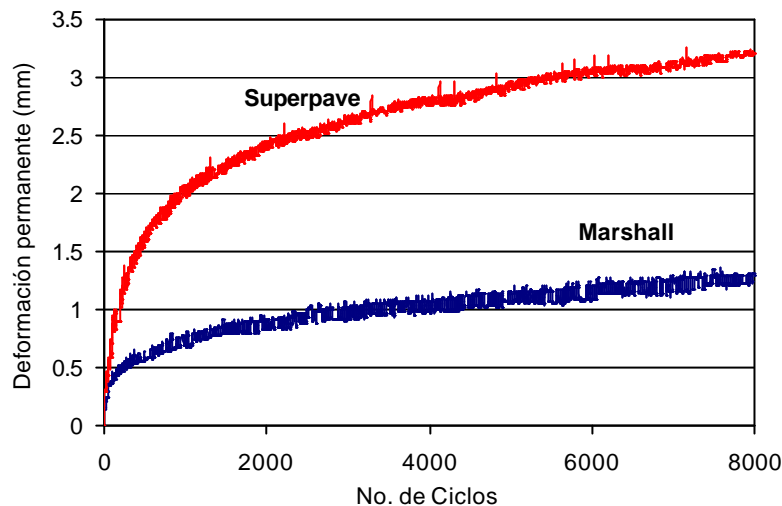


Figura 4.5
Evolución de la deformación permanente en el APA

Además de la diferencia entre el valor último de la deformación permanente entre estas probetas, se observa por la forma de las curvas, que la deformación evoluciona de manera distinta en ambas probetas respecto al número de ciclos aplicado en el ensayo.

4.4.2 Resistencia a la tensión indirecta

En la Figura 4.6 se muestra la evolución de la resistencia a la tensión indirecta de las probetas Marshall y Superpave.

Se puede observar que las probetas elaboradas con metodología Marshall mostraron valores de RTI considerablemente mayores que las elaboradas en el compactador giratorio, además del importante papel que juega el ligante asfáltico en la resistencia a la tensión indirecta de la mezcla asfáltica a bajas temperaturas, ya que independientemente del método de compactación los valores de RTI se incrementan a medida que aumenta el contenido de asfalto hasta estabilizarse para los contenidos de asfalto más altos.

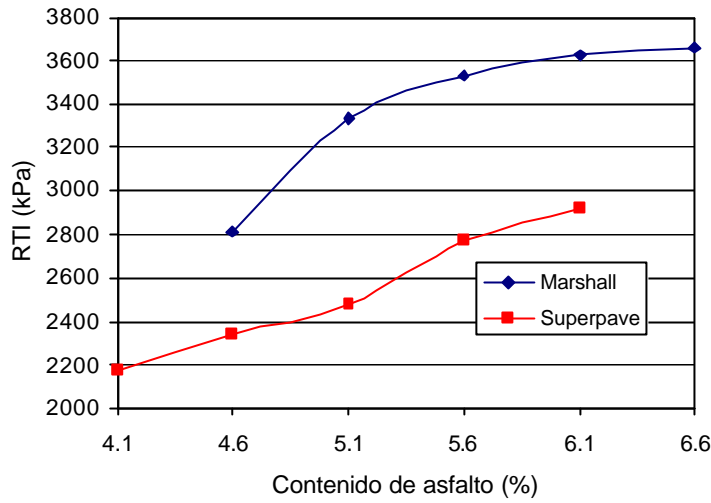


Figura 4.6

Valores de RTI para las probetas Marshall y Superpave

La Figura 4.7 muestra las curvas esfuerzo-deformación para las probetas ensayadas.

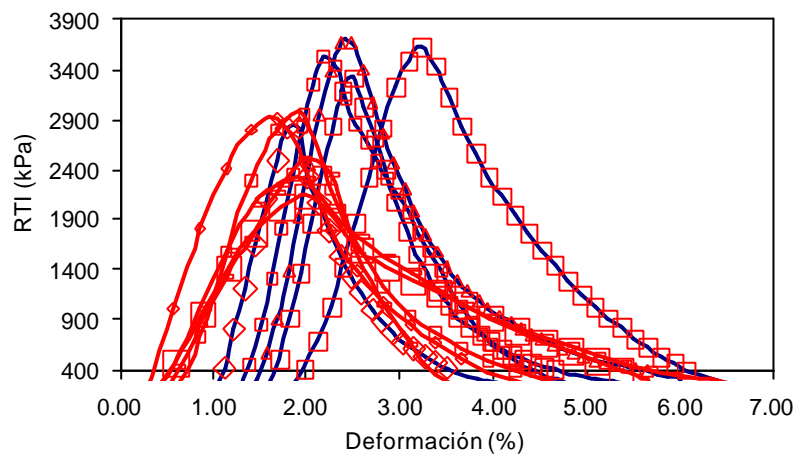


Figura 4.7

Curvas esfuerzo-deformación obtenidas en el ensaye de RTI

Las probetas Marshall tuvieron un porcentaje de deformación a la falla ligeramente mayor a las probetas Superpave. Las mezclas asfálticas que toleran bajas deformaciones antes de la falla son más propensas a presentar agrietamiento a bajas temperaturas.

4.4.3 Comentarios

Hasta ahora se podría pensar que las probetas elaboradas por el método de compactación Marshall han demostrado un mejor desempeño a los ensayos a que fueron sometidos. Sin embargo, la validez de esta comparación es bastante

cuestionable debido principalmente a un aspecto propio de los métodos de diseño, como es el diámetro de las probetas (Figura 4.8).

Aun cuando se empleó la misma granulometría, y que el valor de RTI toma en cuenta el diámetro y altura de los especímenes, el volumen y masa de las probetas varía considerablemente entre un método y otro.

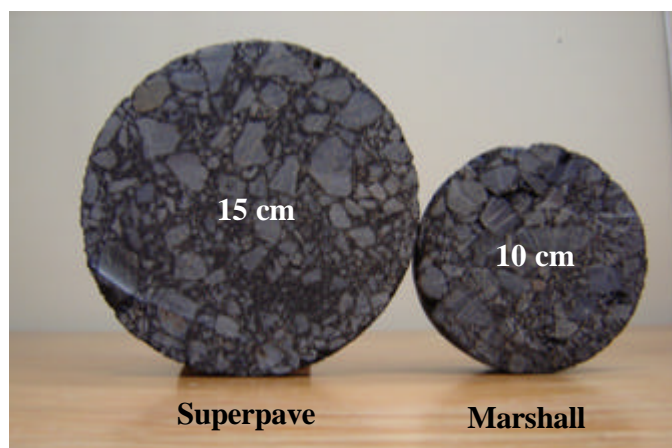


Figura 4.8
Probetas elaboradas con la metodología Marshall y la Superpave

En el caso de la prueba de deformación permanente en el APA, se aprecia que al variar la forma y área del espécimen ensayado, los resultados varían considerablemente aún cuando las características del agregado sean las mismas en cuanto a tamaño máximo y graduación. Dadas las razones anteriormente expuestas no se podría concluir claramente sobre cuál de las dos metodologías de compactación aplicadas en este experimento, produce probetas con un mejor desempeño para los ensayos realizados.

4.5 Aplicación de la metodología RAMCODES

El método RAMCODES, acrónimo de RAtional Methodology for COmpacted geomaterial's DENsification and Strenght Analysis, desarrollada por FJ Sánchez-Leal, es una metodología basada en experimentos factoriales, en conceptos de la mecánica de suelos no saturados, y en la experiencia práctica de diseño y control, para análisis de densificación y resistencia de geomateriales compactados. RAMCODES también ha demostrado tener aplicación exitosa en el control de la variación en el diseño, producción y colocación de mezclas asfálticas.

4.5.1 RAMCODES en las mezclas asfálticas

RAMCODES liga racionalmente las especificaciones de diseño con los criterios de control en campo, mediante la implementación del *“polígono de vacíos”* que

define un área donde se cumplen todas las especificaciones de vacíos (V_a , VMA, VFA).

Los vacíos son función del %CA y del G_{mb} , y se representan en mapas como isolíneas para los valores permitidos; la intersección de estas líneas produce una construcción gráfica en el espacio %CA- G_{mb} , que da lugar al polígono. Las expresiones que se emplean para el trazo de las isolíneas en el espacio G_{mb} -CA se muestran a continuación:

$$G_{mb} = \left(1 - \frac{V_a}{100}\right) (G_{mm}) \quad (5.1)$$

$$G_{mb} = \frac{100 - VMA}{100 - CA} G_{sb} \quad (5.2)$$

$$\frac{VFA}{100} = 1 - \frac{1 - \left(\frac{G_{mb}}{G_{mm}}\right) \cdot 100}{100 - (100 - CA) \frac{G_{mb}}{G_{sb}}} \quad (5.3)$$

Donde:

- CA = porcentaje de cemento asfáltico con respecto a la mezcla total
- G_{mb} = densidad específica neta de la mezcla asfáltica compactada
- V_a = porcentaje de vacíos de aire
- VAM = vacíos de aire en el agregado mineral
- VAF = vacíos de aire llenos de asfalto
- G_{mm} = densidad teórica máxima de la mezcla asfáltica
- G_{sb} = densidad específica neta de la combinación de agregados seleccionada

En la Figura 4.9 se presenta el polígono de vacíos para la mezcla asfáltica en estudio. Cabe señalar que aunque no existe un límite superior para el VAF, algunos investigadores (Cooper y Brown) recomiendan evitar valores muy altos si se quiere obtener una mezcla resistente a la deformación permanente.

El límite superior para el VAF se fijó en 16 por ciento, que fue el valor máximo que se obtuvo durante el diseño. También se muestra la línea de vacíos que representa la densidad máxima teórica de la mezcla asfáltica ($V_a = 0\%$).

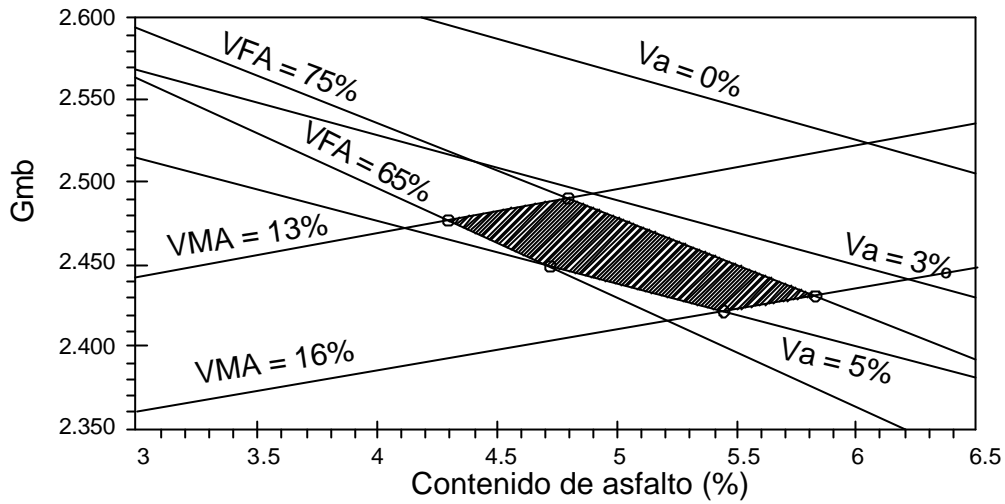


Figura 4.9
Polígono de vacíos

La Figura 4.10 muestra la superposición de las curvas de densidades, obtenidas durante el diseño en los métodos Superpave y Marshall.

Como era de esperarse, los porcentajes de asfalto correspondientes a los óptimos obtenidos para cada metodología se encuentran dentro de la región de aceptación delimitada por el polígono de vacíos.

Se observa que tanto para la metodología Superpave como para el método Marshall existe un rango de contenido de asfalto en la mezcla en donde se cumplen todas las especificaciones de vacíos. El rango es de 4.8-5.3 y 5.1-5.6 %, para las Superpave y Marshall respectivamente.

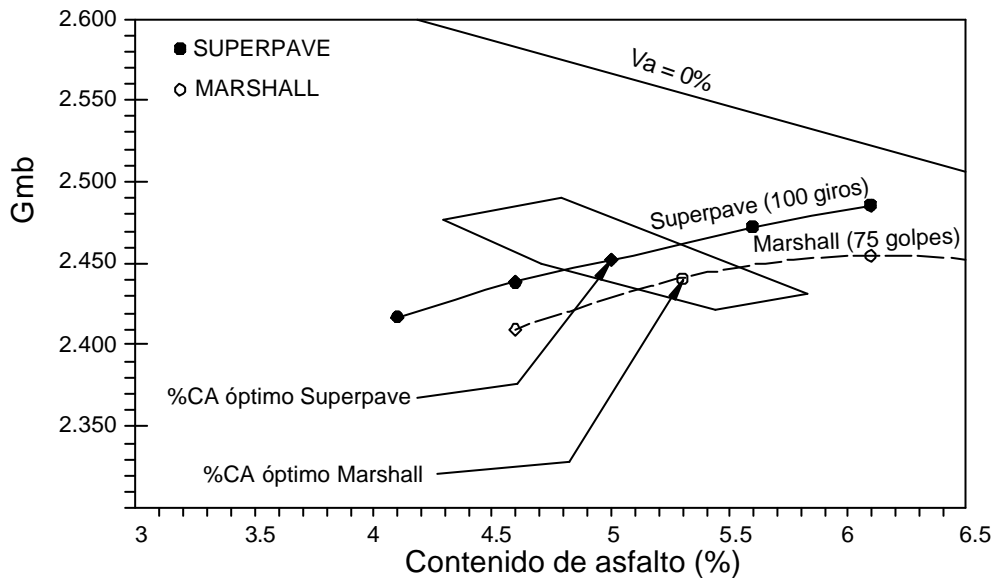


Figura 4.10
El polígono de vacíos en el diseño de mezclas asfálticas

De lo anterior se puede decir, que si en realidad los criterios volumétricos establecidos por los métodos de diseño de mezclas asfálticas actuales estiman adecuadamente el posible desempeño de la mezcla, entonces no sería un valor óptimo el que asegure el buen comportamiento de la superficie de rodamiento, sino un rango de valores del contenido de asfalto que establezca condiciones deseables en la mezcla.

4.5.2 Aplicaciones de la metodología

RAMCODES se basa en una técnica estadística de análisis (experimento factorial) que estudia la influencia de dos factores (Gmb y %CA) en el comportamiento de la mezcla asfáltica. Este enfoque, que utiliza la metodología resulta de gran utilidad en la acciones de control de calidad para la mezcla asfáltica compactada.

4.5.2.1 Superficies de respuesta

La superposición de superficies de respuesta o mapas de contorno, producto de un experimento factorial son de gran utilidad para evaluar la variación de las propiedades mecánicas de la mezcla asfáltica dentro del área donde se cumplen todas las especificaciones de vacíos. La Figura 4.11 muestra la respuesta de la mezcla asfáltica a la deformación permanente medida en el Analizador de Pavimentos Asfálticos, expresada en milímetros.

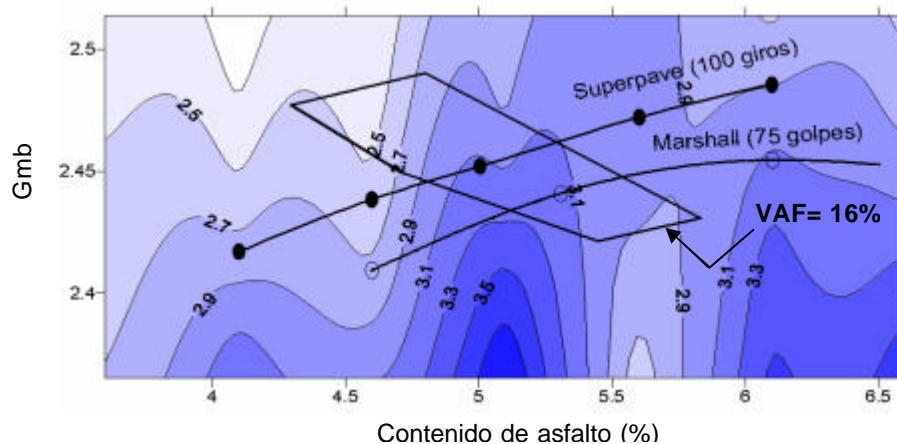


Figura 4.11

Superposición de superficies de respuesta en el polígono de vacíos

Teóricamente, el polígono de vacíos podría extenderse hacia la esquina inferior derecha del mapa de contorno, dado que no existe un límite superior para el VAM; sin embargo, es en esa zona en donde la mezcla asfáltica presenta los contenidos de asfalto más altos y las densidades de la mezcla más bajas; condiciones que

propician la deformación permanente. Corroborando de esta forma el sentido que tienen las recomendaciones de Cooper y Brown sobre evitar valores de VAM demasiados altos para conseguir una carpeta asfáltica resistente a las roderas.

El mapa de contorno de la Figura 4.12 ilustra la respuesta de la mezcla asfáltica a la resistencia a la tensión indirecta en kPa. Se muestra cómo dentro del polígono de vacíos, los valores de RTI varían entre los 2 600 y 2 750 kPa.

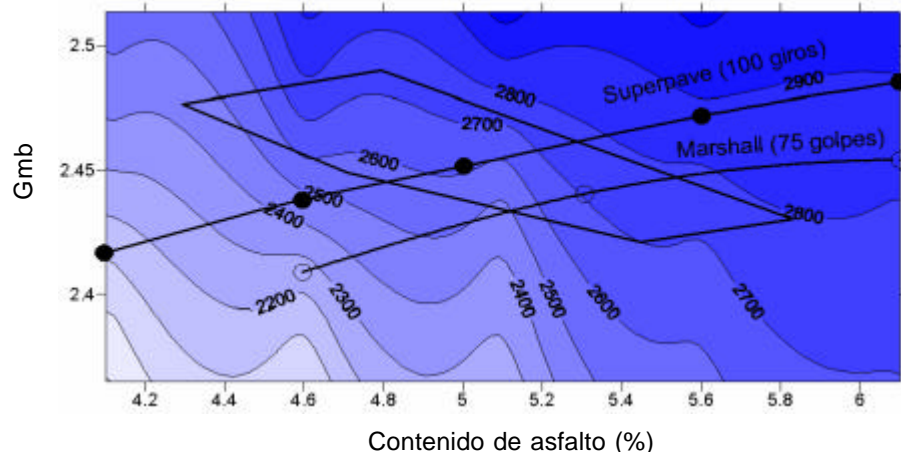


Figura 4.12
Variación de los valores de RTI en el polígono de vacíos

De igual forma, otras propiedades de la mezcla pueden ser evaluadas, como la estabilidad y flujo Marshall, por lo que el polígono de vacíos se convierte en una región de control de calidad para la aceptación de mezclas asfálticas compactadas.

4.5.2.2 Control de campo

En la actualidad, metodologías como Superpave demuestran que se ha avanzado mucho sobre aspectos tales como la selección del ligante asfáltico, la selección de la mezcla de agregados; y la compactabilidad de la mezcla. Sin embargo, la práctica de control de campo ha quedado sin cambios; esto es, el control está basado en la densidad final de la carpeta, situación que podría llevar a la aceptación de lotes defectuosos y al rechazo de lotes buenos.

Los criterios para el control de calidad de compactación de mezclas asfálticas establecidos por la Secretaría de Comunicaciones y Transportes en la Norma N-CMT-4-05-003/02 señalan que la tolerancia aceptable del contenido de asfalto en la mezcla es del orden de $\pm 0,05\%$ con respecto a la masa del agregado pétreo.

Esta norma parece ser muy rigurosa, ya que en la práctica actual del control de calidad de mezclas asfálticas tanto en Estados Unidos como en México, es usual

utilizar rangos entre $\pm 0.25\%$ y $\pm 0.35\%$. La Norma N-CMT-4-05-003/02 también establece que las capas construidas con mezcla asfáltica, serán compactadas como mínimo al 95% de su masa volumétrica máxima.

A fin de ilustrar algunas discrepancias entre el control de calidad y el diseño de mezclas asfálticas, se presentan en la Figura 4.13 los criterios de diseño (polígono de vacíos) y los de control de calidad en campo en el espacio %CA-Gmb, tomando como referencia el contenido óptimo de asfalto, obtenidos por el método Superpave.

Los rombos están definidos en la vertical por los criterios de densidad mínima (95% de la masa volumétrica máxima y la línea de la densidad teórica máxima); y por la horizontal, el rango tolerable de %CA; en este caso se utilizó $\pm 0,30\%$ del contenido óptimo de asfalto. También se superponen los pares %CA-Gmb de probetas densificadas en el compactador giratorio.

Lo primero que resalta es que la región de control de campo, sólo cubre una parte del polígono de vacíos y que además permite la aceptación de lotes que violan los criterios de vacíos de diseño, obteniendo en principio mezclas mucho menos durables. La superposición de los pares %CA-Gmb de probetas elaboradas con diferentes energías de compactación nos dejan ver, que de ser correctas las especificaciones de diseño se puede esperar que muchas mezclas con características satisfactorias puedan ser rechazadas, y que se acepten otras cuyas propiedades estén divorciadas de los criterios de diseño.

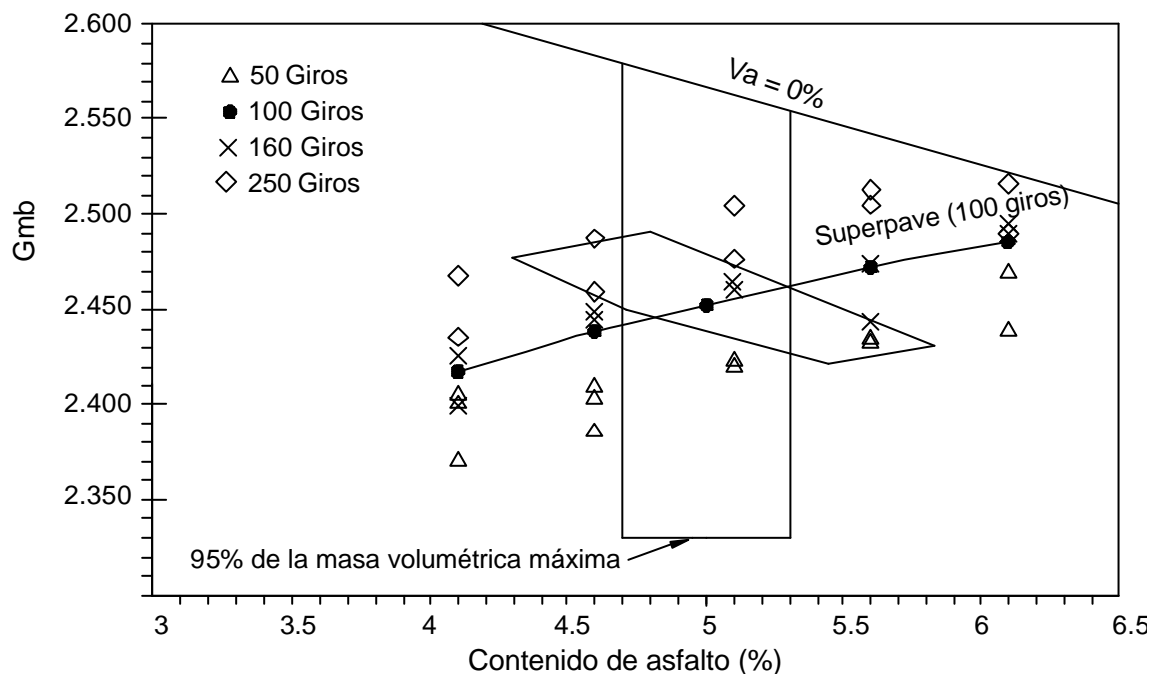


Figura 4.13
Criterios volumétricos en el diseño y control en campo

Conclusiones

- La metodología Superpave ha demostrado tener importantes avances en lo que se refiere a la selección del ligante asfáltico; la mezcla de agregados; y la compactabilidad de la mezcla asfáltica. Por otro lado una ventaja que puede mencionarse al método Marshall es la gran versatilidad de su equipo para llevar a cabo acciones de control de calidad en campo.
- Para la mezcla asfáltica en estudio, la variación entre los contenidos de asfalto determinados por los métodos Superpave y Marshall parece ser independiente tanto del valor de vacíos de aire, como del contenido de asfalto. Se obtuvo un valor de $d(CA)$ de aproximadamente 0.4% para el rango de vacíos de aire en estudio, lo que implica que las curvas Va - $\%CA$ permanecen casi paralelas cuando menos dentro de este rango.
- En el método Marshall, el tipo de ligante puede ser determinante en la selección del contenido óptimo ya que existen otros parámetros que influyen en el diseño, como la estabilidad y el flujo; pruebas que se llevan a cabo a 60°C independientemente del tipo de ligante asfáltico que se utilice.
- Mediante la determinación de N_q para la mezcla en estudio, se puede observar que el método Marshall podría no estar simulando adecuadamente la densificación producida por el tránsito esperado en la vida de servicio, lo que tendería a dar lugar a mezclas potencialmente susceptibles a presentar deformaciones permanentes, y con contenidos de asfalto mayores a los requeridos encareciendo las obras de pavimentación.
- RAMCODES puede ser una herramienta de gran utilidad en el control de la variación en el diseño, producción y colocación de mezclas asfálticas al ligar racionalmente las especificaciones de diseño, con los criterios de control de campo mediante la implementación del “polígono de vacíos”, que define un área donde se cumplen todas las especificaciones de vacíos.
- De acuerdo con la metodología RAMCODES, se puede inferir que la mezcla asfáltica diseñada por el método Superpave nivel I presente un mejor desempeño durante su vida de servicio, ya que el par $\%CA$ - Gmb correspondiente al contenido óptimo cumple con todas las especificaciones de vacíos, lo que garantiza una carpeta durable; además de exhibir una mejor resistencia a la deformación permanente, con relación a la mezcla diseñada por el método Marshall.
- El divorcio entre los criterios de diseño y los de control de campo, puede traer consigo el rechazo de mezclas con características satisfactorias, y/o la

aceptación de mezclas cuyas propiedades volumétricas vayan en contra de los criterios de diseño.

Bibliografía

1. Annual Book of ASTM Standard, 4.03 Roofing and Paving Material; Vehicle-Pavement System (2001).
2. Asphalt Institute Performance Graded Asphalt Binder Specification and Testing, Series No 1 (SP-1), (1996).
3. Asphalt Institute, Superpave Mix Design, Series No 2 (SP-2), (1996).
4. Centros de Estudios Experimentales de Obras Públicas – Centro de Estudios de Carreteras, Normas NLT1-Ensayos de carreteras.
5. Garnica P, Delgado H, Gómez J A, Alonso S., Alarcón H A, Aspectos del diseño volumétrico de mezclas asfálticas, Publicación técnica No 246, Instituto Mexicano del Transporte (2004).
6. Garnica P, Delgado H, Gómez J A, Análisis de la influencia del método de compactación en el comportamiento mecánico de mezclas asfálticas, Publicación técnica No 255, Instituto Mexicano del Transporte (2004).
7. Dale Alan Rand, Comparative Analysis of Superpave Gyratory Compactors and TxDoT Gyratory Compactors. Texas Department of Transportation.
8. Harrigan E T, Leahy R B, Youtcheff J S, The SUPERPAVE Mix Design System Manual of Specification, Test Method, and Practices, SHRP-A-379, Strategic Highway Research Program, National Research Council, Washington, DC (1994).
9. Sánchez-Leal FJ, Garnica Anguas P, Gómez López J A, Pérez García N, RAMCODES: Metodología Racional para el Análisis de Densificación y Resistencia de Geomateriales Compactados, Publicación Técnica No 200, Instituto Mexicano del Transporte (2002).
10. Instituto Mexicano del Transporte, Manual de Calidad de los Materiales en Secciones Estructurales de Pavimentos Carreteros, Documento Técnico, No 1 (1990).
11. Jorge B Sousa, George Way, John T Harvey and Mickey Hines, Comparison of Mix Design Concepts, Transportation Research Record No 1492.
12. National Asphalt Training Center, Background of Superpave Asphalt Mixtures Design and Analysis, SHRP-A-379, FHWA-SA-95-003.

13. Strategic Highway Research Program, Superior Performing Asphalt Pavement: The Product of the SHRP Asphalt Research Program, SHRP-A-410.
14. Thomas W Kennedy, Ensayos y especificaciones de los ligantes asfálticos en el sistema Superpave, Superpave Center at Austin Texas (USA,1996).
15. Garnica P, Gomez J A, Delgado H, Algunos aspectos de la densificación de las mezclas asfálticas con el compactador giratorio (2003).



‡ **Certificación ISO 9001:2000 según documento No 03-007-MX, vigente hasta el 24 de octubre de 2006 (www.imt.mx)**

§ **Laboratorios acreditados por EMA para los ensayos descritos en los documentos MM-054-010/03 y C-045-003/03, vigentes hasta el 9 de abril de 2007 (www.imt.mx)**

CIUDAD DE MÉXICO

Av Patriotismo 683
Col San Juan Mixcoac
03730, México, D F
tel (55) 5598-5610
fax (55) 55 98 64 57

SANFANDILA

km. 12+000, Carretera
Querétaro-Galindo
76700, Sanfandila, Qro
tel (442) 216-9777
fax (442) 216-9671

www.imt.mx
publicaciones@imt.mx