



**Certificación ISO 9001:2000 ‡
Laboratorios acreditados por EMA §**

ASPECTOS DEL DISEÑO VOLUMÉTRICO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS

Paul Garnica Anguas
Horacio Delgado Alamilla
José Antonio Gómez López
Sergio Alonso Romero
Humberto Alonso Alarcón Orta

**Publicación Técnica No 246
Sanfandila, Qro, 2004**

**SECRETARÍA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTES
INSTITUTO MEXICANO DEL TRANSPORTE**

**Aspectos del diseño
volumétrico de mezclas
asfálticas**

**Publicación Técnica No 246
Sanfandila, Qro, 2004**

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 y M en I José Antonio Gómez López en la Coordinación de Infraestructura del Instituto Mexicano del Transporte, y Humberto Alarcón Orta tesista de la Universidad Autónoma de Querétaro.

Se agradece la participación del Centro de Investigación y Asesoría Tecnológica en Cuero y Calzado (CIATEC), al igual que al técnico Mario Antonio Pérez González por su colaboración en los ensayos de laboratorio.

Índice

Resumen	III
Abstract	V
Resumen ejecutivo	VII
Introducción	1
1 Método de diseño Marshall	3
1.1 Metodología	3
1.2 Granulometría	3
1.3 Especificaciones de la metodología	5
1.4 Evaluación y ajuste de una mezcla de diseño	6
1.4.1 Vacíos bajos y estabilidad baja	6
1.4.2 Vacíos bajos y estabilidad satisfactoria	7
1.4.3 Vacíos satisfactorios y estabilidad baja	7
1.4.4 Vacíos altos y estabilidad satisfactoria	7
1.4.5 Vacíos altos y estabilidad baja	7
1.5 Pruebas a las mezclas asfálticas compactadas	8
1.5.1 Determinación de la gravedad específica	8
1.5.2 Prueba de estabilidad y flujo	8
1.5.3 Análisis de densidad y vacíos	8
2 Método de diseño Superpave	11
2.1 Granulometría	11
2.2 Especificaciones de la metodología	14
2.3 Pruebas a las mezclas asfálticas	15
2.3.1 Requerimientos volumétricos de la mezcla	15
2.3.2 Proporción de polvo	16
2.3.3 Susceptibilidad a la humedad	16
3 Parámetros volumétricos	17
3.1 Definiciones	17
3.1.1 Gravedad específica neta del agregado	20
3.1.2 Gravedad específica efectiva del agregado	20
3.1.3 Gravedad específica máxima de la mezcla asfáltica	21
3.1.4 Absorción del asfalto	22
3.1.5 Contenido de asfalto efectivo	22
3.1.6 Porcentaje de vacíos en el agregado mineral	22
3.1.7 Porcentaje de vacíos de aire	23
3.1.8 Porcentaje de vacíos llenos de asfalto	24

4 Selección del diseño final	25
4.1 Evaluación de la curva de VAM	25
4.2 Efecto del nivel de compactación	27
4.3 Efecto de los vacíos de aire	29
4.4 Efecto de los vacíos llenos de asfalto	29
5 Descripción del experimento	31
5.1 Caracterización de los materiales	31
5.1.1 Agregado mineral	31
5.1.2 Cemento asfáltico	32
5.2 Elaboración de la mezcla asfáltica	33
5.2.1 Determinación de la granulometría	33
5.2.2 Contenido de asfalto inicial	35
5.2.3 Dosificación de las probetas	35
5.2.4 Preparación de la mezcla asfáltica compactada	35
5.3 Pruebas a las mezclas asfálticas	39
5.3.1 Pruebas volumétricas	40
5.3.2 Pruebas mecánicas	42
6 Resultados	45
6.1 Análisis volumétrico	45
6.1.1 Selección de la granulometría de diseño	45
6.1.2 Determinación del contenido óptimo de asfalto	46
6.1.3 Propiedades en el óptimo de asfalto	49
Conclusiones	51
Bibliografía	53

Resumen

Se realiza una comparación a nivel volumétrico de las metodologías Marshall y Superpave, describiendo los procedimientos y requerimientos específicos de cada metodología y los criterios para la selección del diseño final de la mezcla.

Se evalúa la variación que se presentan en parámetros, como son el volumen de vacíos (V_v); los vacíos en el agregado mineral (VAM); vacíos llenos de asfalto (VFA); y contenido óptimo de asfalto, debidos a la utilización de dos métodos de mezclas asfálticas diferentes.

Abstract

In this work makes a volumetric level comparison of the mix design methodologies Marshall and Superpave, describing both the procedures and specific requirements of each methodology and the approaches for the selection of the final hot mix design.

It evaluate the variation that are presented in parameter as they are the air voids (Va), voids in the mineral aggregate (VMA), voids filled with asphalt (VFA) and the design asphalt content, due to the use of two different asphalt mixtures design

Resumen ejecutivo

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

Para la evaluación de las características volumétricas de la mezcla asfáltica, se emplean diferentes parámetros como son el volumen de vacíos en el agregado mineral (VAM), los vacíos llenos de asfaltos (VFA) y el porcentaje de vacíos de la mezcla asfáltica compactada (V_a), mediante diversas pruebas mecánicas, como son la gravedad específica del agregado mineral (G_{sb}), la gravedad específica de la mezcla asfáltica compactada (G_{mb}) y la gravedad teórica máxima de la mezcla asfáltica (G_{mm}).

El capítulo 1 describe el diseño Marshall; se presentan antecedentes históricos de la metodología, y los parámetros necesarios para una correcta selección de la granulometría, junto con las especificaciones pertinentes al diseño de la mezcla asfáltica, de igual forma se incluyen criterios para la evaluación y ajuste de la mezcla asfáltica a utilizar.

Adicionalmente se proporciona una descripción tanto de las pruebas volumétricas como mecánicas establecidas para la selección del diseño.

En el capítulo 2 se hace referencia a la metodología Superpave, tomando en cuenta parámetros como son la selección de la granulometría de diseño por medio de la gráfica de Fuller, y las especificaciones que establece la metodología para determinar el diseño de la mezcla asfáltica.

Se mencionan las diferentes pruebas establecidas para la selección de la mezcla asfáltica, mediante la descripción de las pruebas volumétricas y mecánicas incluidas en la metodología.

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

El capítulo 4 presenta diferentes consideraciones que se deben tomar en cuenta en el diseño volumétrico, describiendo el efecto de cada parámetro en el desempeño del pavimento, utilizando como parámetros de influencia los vacíos en el agregado mineral (VAM), nivel de compactación, vacíos de aire (V_a) y vacíos llenos de asfalto (VFA).

En el capítulo 5 se describe el experimento realizado en esta investigación, proporcionando los resultados de las pruebas de calidad realizadas a los

materiales (agregado mineral y asfalto), así como las consideraciones para seleccionar de las granulometrías.

Se hace una amplia descripción de descripción del procedimiento seguido para elaborar la mezcla asfáltica compactada con las dos metodologías, de igual forma se presentan las pruebas volumétricas y mecánicas sugeridas en cada método de diseño.

El último capítulo exhibe los resultados obtenidos, los cuales muestran los criterios de selección de la granulometría de diseño y del contenido óptimo de asfalto mediante los dos métodos de diseño, se hace una comparación entre los resultados con cada método de diseño.

Introducción

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.

Al respecto, las propiedades volumétricas de la mezcla asfáltica compactada son los vacíos de aire (V_a); vacíos en el agregado mineral (VMA); vacíos llenados con asfalto (VFA); y contenido de asfalto efectivo (P_{be}). Son los que proporcionan una indicación del probable funcionamiento de la mezcla asfáltica.

Con el desarrollo de la metodología Superpave y la aparición del compactador giratorio, la práctica actual de diseño de mezclas asfálticas en caliente (HMA) se encuentra en una etapa de redefinición, de ahí la importancia de la comparación contra el método Marshall, que ha sido el más utilizado para el diseño de mezclas asfálticas en México.

La diferencia más significativa de estos dos métodos de diseño radica en los equipos utilizados para realizar la compactación de la mezcla asfáltica, los cuales tienen mecanismos de compactación muy diferentes.

El fin de esta investigación es proporcionar todos los parámetros necesarios para una correcta selección del contenido de asfalto óptimo de una mezcla asfáltica, y comparar las variaciones existentes entre la metodología actualmente utilizada (Marshall) y la Superpave.

La selección del contenido óptimo debe ser un compromiso para seleccionar de manera balanceada todas las propiedades de la mezcla. Normalmente, los criterios de diseños de mezclas producirán un rango limitado de contenidos aceptables de asfaltos que pasen todos los lineamientos.

1 Método de diseño Marshall

1.1 Metodología

El concepto del método Marshall para diseño de mezclas de 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 y desarrollo un criterio de diseño de mezclas.

El método original de Marshall, sólo es aplicable a mezclas asfálticas en caliente para pavimentación que contengan agregados con un tamaño máximo de 25 mm (1") o menor. El método modificado se desarrolló para tamaños máximo arriba de 38 mm (1.5"). Está pensado para diseño en laboratorio y control de 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 una altura de 64 mm (2 ½") y 102 mm (4") de diámetro. Se preparan mediante un procedimiento específico para calentar, mezclar y compactar mezclas de asfalto-agregado. (ASTM D1559). Los dos aspectos principales del método de diseño son, la densidad-análisis de vacíos y la prueba de estabilidad y flujo de los especímenes compactados.

La estabilidad del espécimen de prueba es la máxima resistencia en N (lb) que un espécimen estándar desarrollará a 60 °C cuando es ensayado. El valor de flujo es el movimiento total o deformación, en unidades de 0.25 mm (1/100") que ocurre en el espécimen entre estar sin carga y el punto máximo de carga durante la prueba de estabilidad.

1.2 Granulometría

La metodología Marshall utiliza una gráfica semilogarítmica para definir la granulometría permitida, en la cual en la ordenada se encuentran el porcentaje de material que pasa cierta malla, y en la abcisa las aberturas de las mallas en mm, graficadas en forma logarítmica.

La selección de una curva granulométrica para el diseño de una mezcla asfáltica cerrada o densa, está en función de dos parámetros: el tamaño máximo nominal del agregado y el de las líneas de control (superior e inferior), Las líneas de control son puntos de paso obligado para la curva granulométrica. La Tabla 2.1 presenta los tamaños máximos nominales más utilizados, así como sus líneas de control de acuerdo con la ASTM D3515.

Tabla 1.1
Graduaciones propuestas para mezclas cerradas (ASTM D3515)

Abertura de malla	Mezclas cerradas									
	Tamaño máximo nominal del agregado									
	2 in (50 mm)	1 ½ in (37,5 mm)	1 in (25,0 mm)	¾ in (19,0 mm)	½ in (12,5 mm)	3/8 in (9,5 mm)	No. 4 (4,75 mm)	No. 8 (2,36 mm)	No. 16 (1,18 mm)	
	Graduaciones para mezclas de agregados (grueso, fino y filler)									
2 ½ in. (63mm)	100	...	...	...	...	...	...	...	...	...
2 in. (50mm)	90 - 100	100	...	...	...	...	...	...	...	...
1 ½ (37,5mm)	...	90 - 100	100	...	...	...	...	...	...	...
1 in. (25,0 mm)	60 - 80	...	90 - 100	100	...	...	...	...	...	...
¾ in. (19,0mm)	...	56 - 80	...	90 - 100	100	...	...	...	...	...
½ in. (12,5mm)	35 - 65	...	56 - 80	...	90 - 100	100	...	...	...	...
3/8 in. (9,5mm)	...	...	...	56 - 80	...	90 - 100	100	...	...	...
No. 4 (4,75mm)	17 - 47	23 - 53	29 - 59	35 - 65	44 - 74	55 - 85	80 - 100	...	...	100
No. 8 (2,36mm)	10 - 36	15 - 41	19 - 45	23 - 49	28 - 58	32 - 67	65 - 100	...	...	95 - 100
No. 16 (1,18mm)	...	...	...	...	...	...	40 - 80	...	...	85 - 100
No. 30 (600 µm)	...	...	...	...	...	...	35 - 65	...	...	70 - 95
No. 50 (300 µm)	3 - 15	4 - 16	5 - 17	5 - 19	5 - 21	7 - 23	7 - 40	...	...	45 - 75
No. 100 (150 µm)	...	...	...	...	...	...	3 - 20	...	...	20 - 40
No. 200 (75 µm)	0 - 5	0 - 6	1 - 7	2 - 8	2 - 10	2 - 10	2 - 10	...	...	9 - 20
	Asfalto, Porcentaje con respecto al peso total de la mezcla									
	2 - 7	3 - 8	3 - 9	4 - 10	4 - 11	5 - 12	6 - 12	7 - 12	8 - 12	

1.3 Especificaciones de la metodología

La selección del contenido óptimo de asfalto depende de muchos criterios que se discutirán en este capítulo. Un punto inicial para el diseño es escoger el porcentaje de asfalto para el promedio de los límites de vacíos de aire, el cual es 4%. Todas las propiedades medidas y calculadas bajo este contenido de asfalto deberán ser evaluadas comparándolas con los criterios para el diseño de mezclas (Tabla 1.2). Si todos los criterios se cumplen, entonces se tendrá el diseño preliminar de la mezcla asfáltica, en caso de que un criterio no se cumpla, se necesitará hacer ajustes, o rediseñar la mezcla.

Tabla 1.2
Criterio de diseño de mezclas Marshall

Método Marshall	Tráfico ligero		Tráfico medio		Tráfico pesado	
	Carpeta y base		carpeta y base		carpeta y base	
Criterio de mezcla	Mín	Máx	Mín	Máx	Mín	Máx
Compactación, número de golpes en cada uno de los especímenes	35		50		75	
Estabilidad, (N) (lb)	3336		5338		8006	
	750	-----	1200	-----	1800	-----
Flujo, (0.25 mm) (0.01 in)	8	18	8	16	8	14
Porcentaje de vacíos	3	5	3	5	3	5
Porcentaje de vacíos en los agregados minerales	Ver Tabla 2.2					
Porcentaje de vacíos rellenos de asfalto	70	80	65	78	65	75

Tabla 1.3
Mínimo porcentaje de vacíos de agregado mineral (VMA)

Máximo tamaño de partícula nominal		Porcentaje mínimo VMA		
		Porcentaje diseño vacíos de aire		
mm	in	3.0	4.0	5.0
1.18	No.16	21.5	22.5	23.5
2.36	No.8	19.0	20.0	21.0
4.75	No.6	16.0	17.0	18.0
9.5	3/8.	14.0	15.0	16.0
12.5	1/2.	13.0	14.0	15.0
19	3/4.	12.0	13.0	14.0
25	1.0	11.0	12.0	13.0
37.5	1.5	10.0	11.0	12.0

1.4 Evaluación y ajustes de una mezcla de diseño

Cuando se desarrolla una mezcla de diseño, es frecuentemente necesario hacer varias mezclas de prueba para encontrar una que cumpla con todos los criterios de diseño. Cada una de las mezclas de prueba sirve como una guía para evaluar y ajustar las pruebas siguientes. Para diseño de mezclas preliminares o exploratorias, es aconsejable comenzar con una graduación de agregado que se acerque a la media de los límites establecidos. Las mezclas de prueba iniciales sirven para establecer la fórmula de trabajo y verificar que la graduación de agregado dentro de los límites especificados puede ser reproducida en una planta mezcladora.

Cuando las mezclas de pruebas iniciales fallan con los criterios de diseño en cualquier contenido de asfalto seleccionado, será necesario modificar o, en algunos casos, rediseñar la mezcla. Para corregir una deficiencia, la manera más fácil de rediseñar una mezcla es cambiar la graduación de los agregados ajustando los porcentajes utilizados. Frecuentemente este ajuste es suficiente para cumplir con las especificaciones. Si el ajuste de los porcentajes no es suficiente, se deberán realizar serias consideraciones.

Existen lineamientos generales para ajustar las mezclas de prueba, aunque estas sugerencias no funcionan en todos los casos:

1.4.1 Vacíos bajos y estabilidad baja

Los vacíos pueden incrementarse en diferentes formas. Como un acercamiento general para lograr vacíos altos en el agregado mineral (en consecuencia proveer de suficientes espacios, para una adecuada cantidad de asfalto y vacíos de aire), la graduación del agregado debe ajustarse mediante la adición de más agregado grueso o fino.

Si el contenido de asfalto es más alto de lo normal y el exceso no es necesario para remplazar el absorbido por el agregado, entonces el contenido de asfalto deberá reducirse a fin de incrementar el porcentaje de vacíos, proveyendo un adecuado VMA. Se deberá recordar que disminuir el porcentaje de asfalto podrá tender a bajar la durabilidad del pavimento. Demasiada reducción en el contenido de asfalto puede ocasionar fracturación, oxidación acelerada e incremento de la permeabilidad. Si los ajustes anteriores no producen una mezcla estable, el agregado tendrá que cambiarse.

Es también posible mejorar la estabilidad e incrementar el contenido de vacíos en el agregado de la mezcla, mediante el incremento del agregado grueso o reducción de la cantidad de material que pasa la malla No. 200. Con la incorporación de arena procesada, el contenido de vacíos puede mejorarse sin sacrificar la estabilidad de la mezcla.

1.4.2 Vacíos bajos y estabilidad satisfactoria

Bajos contenidos de vacíos pueden eventualmente resultar en inestabilidad debido a flujo plástico o después de que el pavimento ha sido expuesto al tránsito por un periodo de tiempo ante la reorientación de las partículas y compactación adicional.

Por su parte, insuficientes vacíos pueden ser producto de la cantidad requerida de asfalto para obtener una durabilidad alta en mezclas finas; sin embargo, la estabilidad es inicialmente satisfactoria por el tránsito específico. Una degradación de agregado pobre durante la producción de la mezcla y/o bajo la acción de tránsito puede ocasionar subsecuentemente inestabilidad y flujo si el contenido de vacíos de la mezcla no es suficiente. Por estas razones, mezclas con vacíos bajos tendrán que ajustarse por uno de los métodos dados, en el inciso anterior sin importar que la estabilidad inicial sea satisfactoria.

1.4.3 Vacíos satisfactorios y estabilidad baja

La baja estabilidad cuando los vacíos y la graduación del agregado son satisfactorios, puede indicar algunas deficiencias en el agregado. Se deberán tomar consideraciones para mejorar la forma de la partícula de los agregados utilizando material producto de trituración o incrementando el porcentaje de agregado grueso en la mezcla o posiblemente aumentando el tamaño máximo del agregado. Partículas de agregado con textura rugosa y superficies menos redondeadas, presentan más estabilidad cuando se mantiene o incrementa el volumen de vacíos.

1.4.4 Vacíos altos y estabilidad satisfactoria

Altos contenidos de vacíos se asocian frecuentemente con mezclas con alta permeabilidad; al permitir la circulación de aire y agua a través del pavimento pueden ocasionar endurecimiento prematuro del asfalto, desprendimiento del agregado, o posible desprendimiento del asfalto en el agregado. Aun cuando la estabilidad es satisfactoria, se deberán realizar ajustes para reducir los vacíos. Pequeñas reducciones se lograrán mediante la adición de polvo mineral a la mezcla. Podría ser necesario seleccionar o combinar agregados para lograr una graduación, la cual deberá estar cerca de la curva de máxima densidad.

1.4.5 Vacíos altos y estabilidad baja

Se deberán tomar en cuenta dos pasos para este tipo de condiciones; el primero es ajustar el volumen de vacíos mediante los métodos discutidos en los puntos anteriores; y en el segundo, si los ajustes no mejoran la estabilidad, deberá hacer una consideración de la calidad de los materiales, conforme en 1.4.1 y 1.4.2.

1.5 Pruebas a las mezclas asfálticas compactadas

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

1.5.1 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 desarrolla de acuerdo con la Norma ASTM D1188, gravedad específica de mezclas asfálticas compactadas empleando parafina; o ASTM D2726, gravedad específica de mezclas asfálticas compactadas utilizando superficies saturadas de especímenes secos.

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

1.5.2 Prueba de estabilidad y flujo

Después de que la gravedad específica se ha determinado, se desarrolla 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 removerá el espécimen de prueba del baño María y cuidadosamente se secará la superficie. Colocándolo y centrándolo en la mordaza inferior, se procederá a colocar la mordaza superior y se centrará completamente en el aparato de carga.

Posteriormente se aplica la carga de prueba al espécimen a una deformación constante de 51mm (5") por minuto, hasta que ocurra la falla. El punto de falla está definido 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 que 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 habrá que 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.

1.5.3 Análisis de densidad y vacíos

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

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

Utilizando la gravedad específica y la gravedad específica efectiva del total del agregado; 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 (Va); porcentaje de vacíos llenados con asfalto (VFA) y el porcentaje de vacíos en el agregado mineral (VMA).

2 Métodos de diseño 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.

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 de tal manera provista 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 asfaltos) y su interacción cuando están mezclados.

2.1 Granulometría

Para especificar la granulometría, Superpave ha modificado el enfoque de la granulometría Marshall. Emplea el exponente 0.45 en la carta de granulometría para definir la permitida (gráfica de Fuller), mediante una técnica gráfica única para juzgar la distribución de tamaños acumulados de partículas de una mezcla de agregados. Las ordenadas de la carta son los porcentajes que pasan; las abcisas, en escala aritmética, representan las aberturas de los tamices en mm, elevadas a la potencia 0.45. La Figura 2.1 ilustra cómo se calcula el valor de la abcisa. En el ejemplo la malla de 4.75mm se grafica como 2.02. Normalmente este tipo de gráficas no muestran una escala aritmética común como la Figura 3.1, en vez de ello, la escala esta en función de tamaño de malla como se observa en la Figura 2.2.

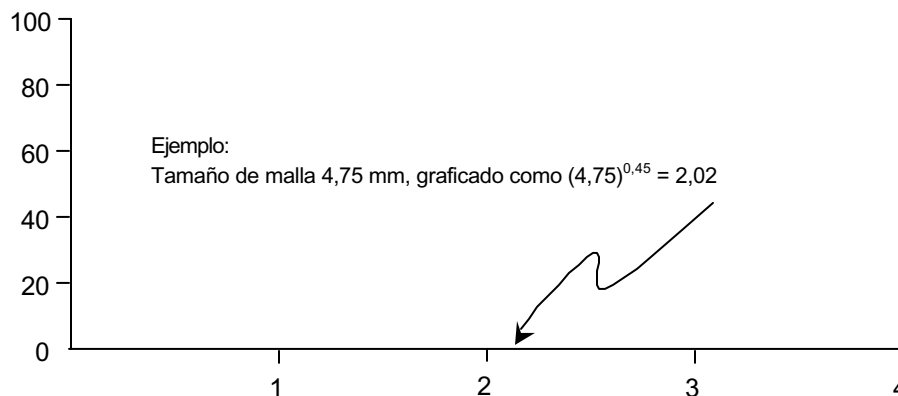


Figura 2.1
Ilustración de cómo se grafican las abcisas

Un rango importante de esta carta es la granulometría de máxima densidad; corresponde a una línea recta extendida desde la abcisa de tamaño máximo de agregado y ordenada 100%, hasta el origen (0 %, 0 mm).

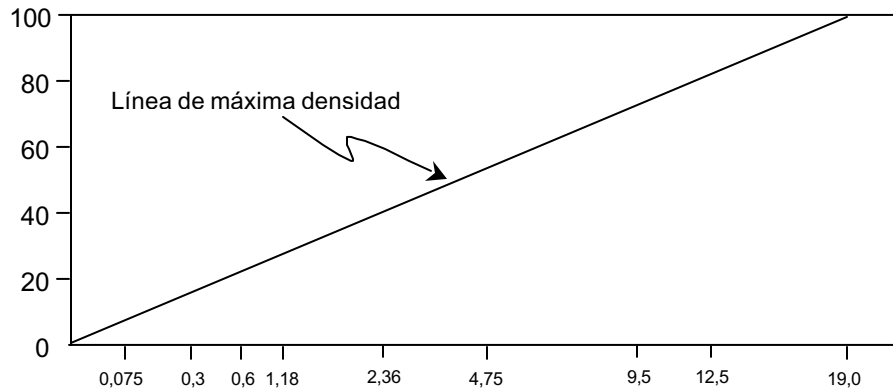


Figura 2.2
Graduación de máxima densidad para tamaño máximo de 19 mm

La granulometría de máxima densidad representa la graduación para la cual las partículas de agregado se acomodan entre sí, conformando el arreglo volumétrico más compacto posible. Evidentemente, esta granulometría debe evitarse porque habría muy poco espacio entre los agregados como para permitir el desarrollo de una película de asfalto lo suficientemente gruesa, como para obtener una mezcla durable.

Para especificar la granulometría del agregado, se emplean dos conceptos adicionales: puntos de control y una zona restringida. Los puntos de control son puntos de paso obligado para la curva granulométrica y corresponden al tamaño máximo nominal, un tamaño intermedio (2.36 mm) y un tamaño de finos (0.075 mm).

Por su parte, la zona restringida se ubica entre los tamaños intermedios (4.75 o 2.36 mm) y 0.3 mm. Forma una banda por la cual la curva granulométrica no deberá pasar. Gradulometrías que pasan a través de la zona de restricción (desde abajo), se llaman "humped graduations" (graduaciones con joroba) por la forma característica de joroba que se forma en la curva al pasar por aquella zona. En la mayoría de los casos, estas curvas indican una mezcla con mucha arena fina en relación con el total de la arena. Las granulometrías que violan la zona restringida poseen un esqueleto granular débil que depende demasiado de la rigidez del cemento asfáltico para alcanzar una mezcla con resistencia al corte. La Figura 2.3 muestra un esquema para un tamaño máximo de agregado de 19 mm.

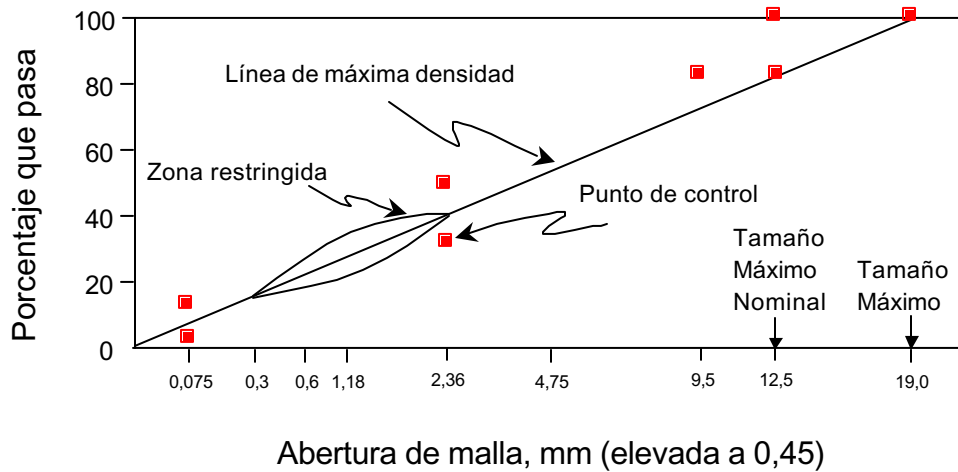


Figura 2.3
Límites para las granulometrías Superpave

Un diseño de la estructura del agregado que pase entre los puntos de control y evite la zona de restricción, satisface los requerimientos granulométricos de Superpave.

Los valores de los parámetros: puntos de control y zona restringida, están referenciados a cinco designaciones que la metodología Superpave establece, en las cuales proponen los tamaños máximos nominales más utilizados y los criterios correspondientes a los parámetros mencionados.

En la Tabla 2.1 se presentan las cinco designaciones propuestas en la metodología Superpave.

Tabla 2.1
Graduaciones para mezclas Superpave

Designación Superpave	Tamaño máximo nominal	Tamaño máximo
37,5 mm	37,5	50,0
25,0 mm	25,0	37,5
19,0 mm	19,0	25,0
12,5 mm	12,5	19,0
9,5 mm	9,5	12,5

Las Tablas 2.2 y 2.3 contienen las especificaciones de puntos de control y zona restringida para los dos tamaños máximos nominales de agregados más usuales.

Tabla 2.2
Especificación de gráfica de Fuller para un tamaño máximo nominal de 19mm

Malla (mm)	Puntos de control		Zona restringida	
	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
25,0		100,0		
19,0	90,0	100,0		
12,5		90,0		
2,36	23,0	49,0	34,6	34,6
1,18			22,3	28,3
0,600			16,7	20,7
0,300			13,7	13,7
0,075	2,0	8,0		

Tabla 2.3
Especificación de gráfica de Fuller para un tamaño máximo nominal de 12.5mm

Malla (mm)	Puntos de control		Zona restringida	
	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
19,0		100,0		
12,5	90,0	100,0		
9,5		90,0		
4,75				
2,36	28,0	58,0	39,1	39,1
1,18			25,6	31,6
0,600			19,1	23,1
0,300			15,5	15,5
0,075	2,0	10,0		

2.2 Especificaciones de la metodología

La selección del contenido óptimo de asfalto depende de dos factores, que son los criterios establecidos para la compactación y el número de giros aplicados.

Para el caso del compactador giratorio se puede mencionar como parámetros establecidos el esfuerzo vertical, ángulo de giro y velocidad de giro. En la Tabla 2.4 se observan los valores de los parámetros mencionados.

Tabla 2.4
Especificaciones de la metodología Superpave

Esfuerzo vertical	600 kPa
Ángulo de giro	1.25 °
Velocidad de giro	30 rpm

La selección del número de giros está en función de la temperatura promedio del lugar y del número de ejes equivalentes (ESAL's) establecidos en el diseño. En la Tabla 2.5 se muestran los diferentes rangos de valores establecidos para seleccionar el número de giros.

2.3 Pruebas a las mezclas asfálticas

Tabla 2.5
Esfuerzo de compactación giratoria para el diseño Superpave

ESAL's de diseño (millones)	Temperatura promedio del aire para diseño											
	< 39°C			39 – 40 °C			41 – 42 °C			43 – 44 °C		
	N _{ini}	N _{des}	N _{máx}	N _{ini}	N _{des}	N _{máx}	N _{ini}	N _{des}	N _{máx}	N _{ini}	N _{des}	N _{máx}
<0.3	7	68	104	7	74	114	7	78	121	7	82	127
0.3 - 1	7	76	117	7	83	129	7	88	138	8	93	146
1 - 3	7	86	134	8	95	150	8	100	158	8	105	167
3 - 10	8	96	152	8	106	169	8	113	181	9	119	192
10 - 30	8	109	174	9	121	195	9	128	208	9	135	220
30 - 100	9	126	204	9	139	228	9	146	240	10	153	253
>100	9	143	235	10	158	262	10	165	275	10	172	288

Los requerimientos del diseño de mezclas asfálticas de Superpave son:

2.3.1 Requerimientos volumétricos de la mezcla

Los requerimientos correspondientes 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 en la selección del contenido del ligante 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 valores mínimos especificados para el VAM en cuanto al porcentaje de diseño de vacíos de aire del 4% son una función del tamaño máximo nominal del agregado. La Tabla 2.6 muestra los requerimientos del Superpave para el VAM.

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

Tabla 2.6
Criterio para VAM

Tamaño máximo de agregado	Porcentaje de VAM mínimo
9,5 mm	15,0
12,5 mm	14,0
19,0 mm	13,0
25,0 mm	12,0
37.5 mm	11,0

El rango aceptable del VFA de diseño para 4% de vacíos de aire es una función del nivel de tránsito (Tabla 2.7).

Tabla 2.7
Criterio para VFA

Tránsito, ESAL's (millones)	Porcentaje de VAM de diseño
< 0,3	70 – 80
< 1	65 – 78
< 3	65 – 78
< 10	65 – 75
< 30	65 – 75
< 100	65 – 75
>100	65 – 75

2.3.2 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 del peso total en la mezcla, menos el porcentaje de asfalto absorbido.

2.3.3 Susceptibilidad a la humedad

El ensayo de susceptibilidad a la humedad para evaluar una HMA al desprendimiento es la Norma 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.

3 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 (VMA); 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 poder 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.

3.1 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 3.1.

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 3.1.

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 3.1.

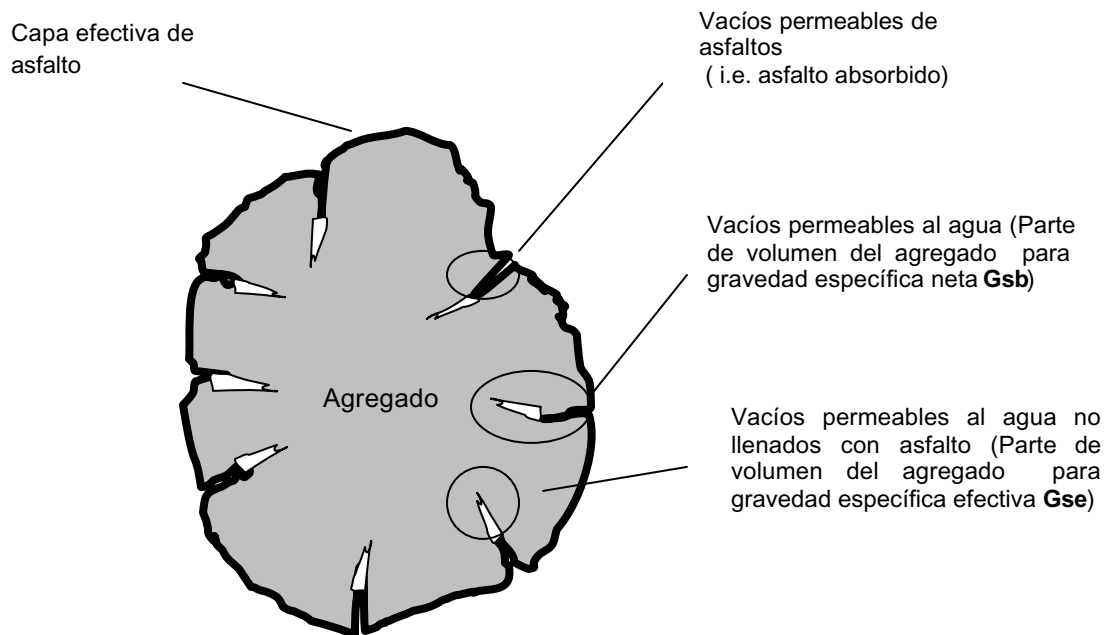


Figura 3.1
Ilustración de los parámetros de diseño volumétrico

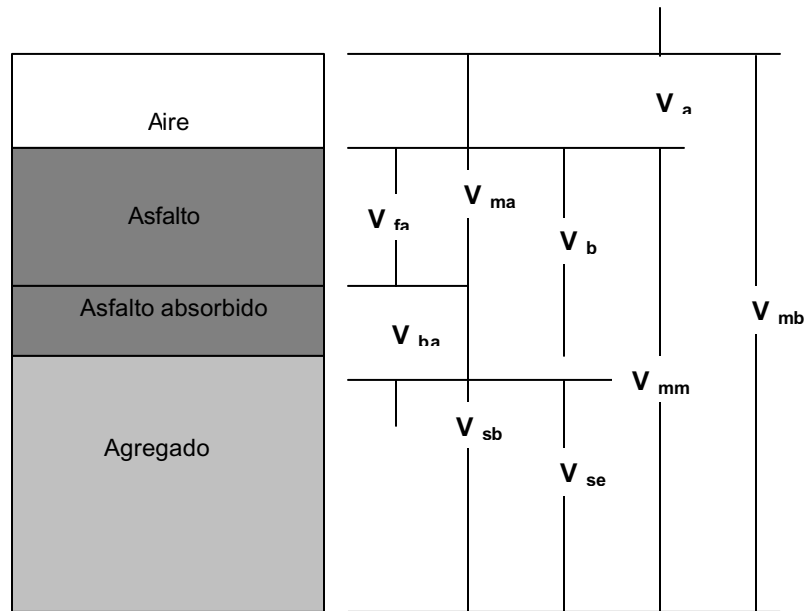
Vacíos en el agregado mineral, VMA.— Volumen de espacio vacío intergranular entre las partículas del agregado de una mezcla asfáltica compactada, que incluye los vacíos de aire y el contenido de asfalto efectivo, expresado como un porcentaje del volumen total de la muestra Figura 3.2.

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 3.2.

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 $(VMA - V_a)$ entre VMA. Figura 3.2.

El procedimiento de diseño de mezcla, calcula los valores de VMA 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 3.2

Componente del diagrama de compactación de una HMA

Los vacíos en el agregado mineral (V_{ma}) 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 V_{ma} llenado con el asfalto efectivo.

Dependiendo de cómo se especifica el contenido de asfalto, el contenido de asfalto efectivo puede ser expresado 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, V_{ma} 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 masas, para proveer una mezcla de diseño.

3.1.1 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.

3.1.2 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 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 que el 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.

3.1.3 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 ser obtenida 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 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

3.1.4 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

3.1.5 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

3.1.6 Porcentaje de vacíos en el agregado mineral

Los vacíos en el agregado mineral, VMA, 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 VMA puede calcularse sobre la base de la gravedad específica neta del agregado y expresado como un porcentaje del

volumen mezcla asfáltica compactada. Por lo tanto, el VMA 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:

VMA = 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

3.1.7 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

3.1.8 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 VMA

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

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

4 Selección del diseño final

La selección del diseño final de la mezcla es usualmente la más económica y cumple satisfactoriamente con todos los criterios establecidos. De cualquier forma, la mezcla no deberá ser diseñada para optimizar una propiedad en particular. Mezclas con valores altos anormales de estabilidad son frecuentemente menos deseables debido a que pavimentos con ese tipo de mezclas tienden a ser menos durables, o pueden fracturarse prematuramente bajo altos volúmenes de tránsito. Esta situación es bastante crítica cuando los materiales de la base y terreno natural son débiles y permiten deflexiones de moderadas a relativamente altas con el tránsito actual.

La selección del contenido óptimo debe ser un compromiso de optar por balancear de todas las propiedades de la mezcla. Normalmente, los criterios de diseños de mezclas producirán un rango limitado de contenidos aceptables de asfaltos que pasen todos los lineamientos.

La selección del contenido de asfalto puede ajustarse en este rango limitado para lograr propiedades de la mezcla que puedan satisfacer los requerimientos de un proyecto en especial; algunas propiedades serán más críticas, que otras y dependerán de circunstancias del diseño, como puede ser el tránsito, la estructura, el clima, el equipo de construcción y otros factores. Mas allá, el proceso de balanceo no es el mismo para cada pavimento ni para cada diseño de mezcla.

Hay algunas consideraciones en el ajuste que deben ser evaluadas antes de establecer el diseño final del contenido de asfalto:

4.1 Evaluación de la curva de VMA

En muchos casos, lo más difícil en el diseño de mezclas es lograr un mínimo de vacíos en el agregado mineral. El acierto es proporcionar suficiente espacio para el asfalto y se produzca una adhesión adecuada para ligar las partículas de agregado cuando las temperaturas se incrementen y el asfalto se expanda. Normalmente, la curva exhibe una forma de “U” alargada, decreciendo a un valor mínimo para después incrementar se con el aumento de contenido de asfalto Figura 4.1 a.

Esta dependencia del VMA sobre el contenido de asfalto, parece ser una contradicción a la definición. Uno puede esperar que el VMA se mantenga constante con la variación del contenido de asfalto, pensando que los vacíos de aire simplemente serán desplazados por el cemento asfáltico. En realidad, el volumen total cambia a través de la línea del contenido del asfalto; la adopción de una unidad constante de volumen no es correcta. Con el incremento en el asfalto, la mezcla realmente se vuelve más manejable y se puede compactar más fácilmente; mediante más peso, se puede comprimir en un menor volumen. Por

consiguiente, la densidad de masa de la mezcla se incrementa cuando el VMA disminuye.

En algunos puntos donde el contenido de asfalto aumenta (el fondo de la curva en forma de **U**), el VMA empieza a incrementarse porque relativamente el material es más denso (agregado) y está siendo desplazado y empujado separadamente por el material menos denso (cemento asfáltico). Se recomienda que los contenidos del asfalto en el lado húmedo o derecho creciente de la curva VMA se eviten, aunque el mínimo de vacíos de aire y el criterio de VMA cumplieran. El diseño de contenidos de asfalto en este rango tiene tendencia a expandirse y/o exhibir flujo plástico cuando está colocado en el campo. Cualquier cantidad de compactación adicional por el tráfico lleva a una fase inadecuada de expansión del asfalto, a la pérdida del contacto agregado-agregado y eventualmente al desgaste en las áreas de alto tráfico. Idealmente, el diseño del contenido de asfalto se recomienda seleccionarse un poco a la izquierda del punto bajo de la curva VMA, con tal que ninguno de los otros criterios de mezcla sean violados.

En algunas mezclas, el fondo de la curva VMA, en forma de **U** es muy plana, significando que las mezclas compactadas no son tan sensibles al contenido del asfalto en este rango como algunos otros factores. En el rango normal de los contenidos de asfalto, la compatibilidad es más influenciada por las propiedades de los agregados. De cualquier forma, en algún punto la cantidad de asfalto será crítico para el comportamiento de la mezcla y el efecto del asfalto dominará drásticamente los incrementos de VMA.

Cuando el fondo de la curva VMA en forma de **U** cae por debajo del nivel del criterio mínimo requerido para el tamaño del agregado máximo nominal de la mezcla (Figura 4.1b); ésta es una indicación de que se necesitará realizar cambios en las fórmulas de trabajo.

Específicamente, la granulometría del agregado debe modificarse para proporcionar un VMA adicional. El diseño del contenido del asfalto no debe ser seleccionado en los extremos del rango aceptable, aunque el criterio mínimo sea conveniente. Sobre el lado izquierdo, la mezcla puede ser muy seca, propensa a la segregación, y podría tener un alto porcentaje de vacíos de aire. En el lado derecho se espera que sufra deformaciones.

Si el criterio mínimo de VMA es completamente violado por encima de todo el rango del contenido del asfalto (la curva está completamente por debajo del mínimo Figura 4.1c), se justifica una importante redeterminación y/o cambio en las fuentes del material.

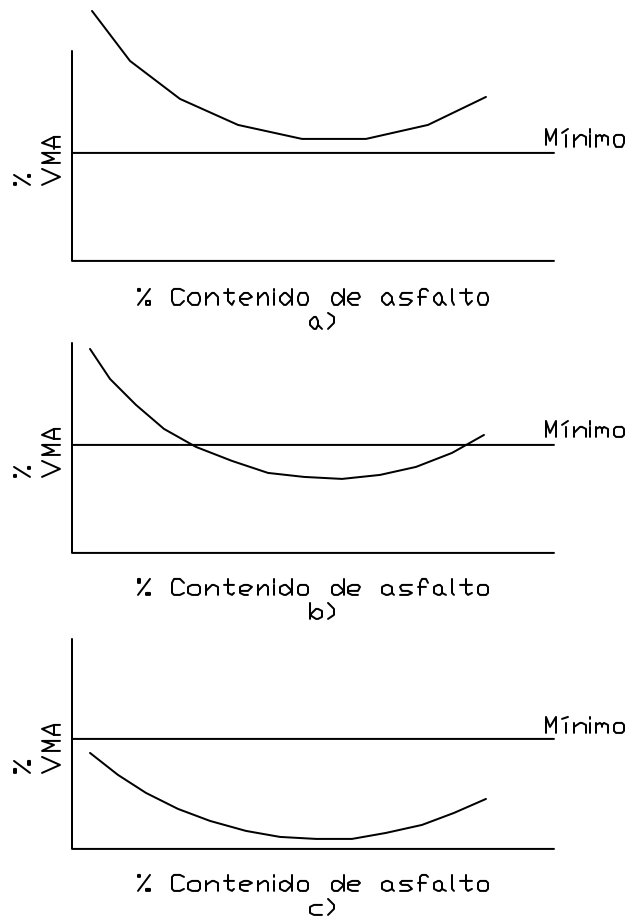


Figura 4.1
Relación entre VMA y límite de especificación

4.2 Efecto del nivel de compactación

Con el mismo contenido de asfalto, tanto los vacíos de aire (V_a), como los vacíos en el agregado mineral (VMA) disminuyen con el esfuerzo más alto compactado. Para una mejor ilustración, se utilizarán los tres niveles de compactación Marshall y tres números de giros, de acuerdo con la especificación Superpave. Como se muestra en la Fig. 4.2a, no sólo cambia las magnitudes de los valores, sino que el valor del contenido de asfalto varía en el mínimo VMA. Si una mezcla es determinada un poco a la izquierda del mínimo VMA en un nivel de compactación de 50 golpes o 150 giros y en el pavimento actualmente pasa un tráfico pesado mayor al esperado (cerca del nivel de determinación de 75 golpes o 174 giros); entonces, el mismo contenido de asfalto ahora se configura en el lado derecho o mojado del punto mínimo de VMA para una mezcla determinada, usando compactación de 75 golpes o 174 giros. Finalmente, el resultado será una mezcla susceptible a desgastarse.

Este escenario puede también trabajar en la dirección opuesta. Si una mezcla, determinada en un nivel de compactación de 75 golpes o 174 giros como se muestra en la Figura 4.2b, se sitúa en un pavimento con mucho menor volumen de tránsito, entonces el porcentaje final de vacíos de aire (V_a) puede ser considerablemente más alto de lo planeado. Esta condición podría llevar a una mezcla más abierta (permeable), permitiendo que el aire y el agua pasen a través de ella fácilmente. El resultado de esta situación es una mezcla que endurece prematuramente; se vuelve frágil y quebradiza a una edad temprana o el agregado se entrelaza fuera de la mezcla debido a la pérdida de adherencia del asfalto. Esta condición puede llevar al desprendimiento de partículas.

Por esta razón, es importante que el esfuerzo de compactación empleado en el laboratorio simule el diseño del tránsito esperado para el pavimento. También la mezcla debe construirse con el equipo de compactación adecuado, a fin de producir una densidad inicial adecuada e indiferente a las condiciones climáticas.

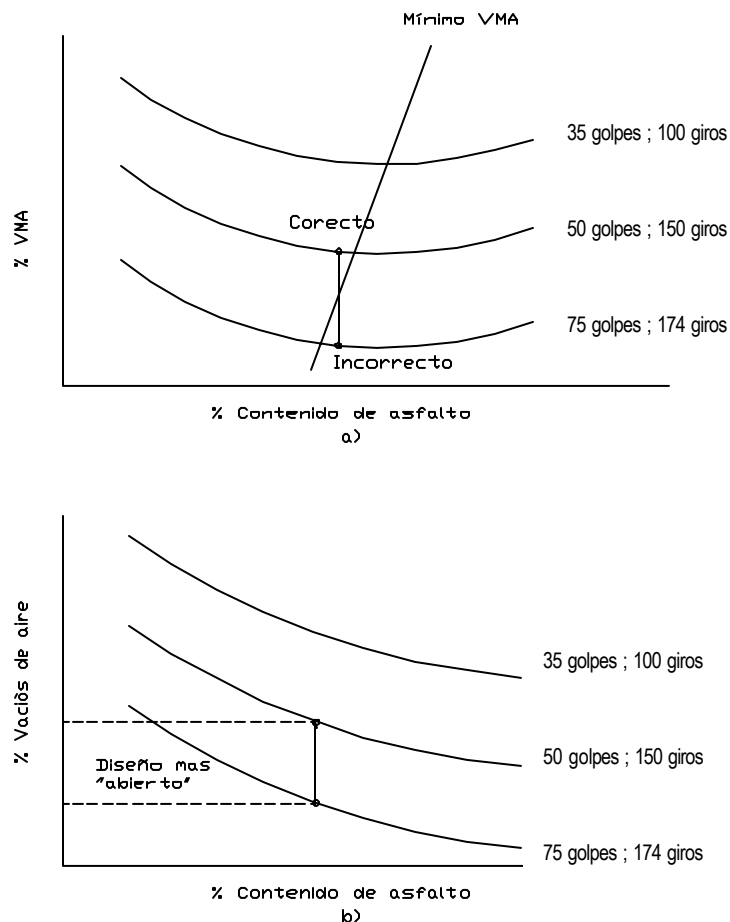


Figura 4.2

Efecto de los esfuerzos de compactación Marshall en VMA y V_a

Esto es importante para notar que el criterio de la VMA no cambia se basa en el nivel de compactación. Los argumentos para tener suficiente VMA (manteniendo espacio para el asfalto y vacíos de aire) son consistentes sin tomar en cuenta el nivel de tránsito para el cual la mezcla está diseñándose.

4.3 Efecto de los vacíos de aire

Debe enfatizarse que la determinación del rango de los vacíos de aire (3 a 5 %) es el nivel deseado después de varios años de tránsito. Esta meta no varía con el tránsito; se supone que el esfuerzo de compactación de laboratorio es seleccionado para el volumen vehicular esperado. Esta determinación del rango de los vacíos de aire, normalmente se logra si la mezcla se diseña con el correcto esfuerzo de compactación y el porcentaje de los vacíos después de la construcción de encuentra entre 6 y 8 %, ya que se espera un poco de consolidación con el tránsito.

El resultado de un cambio en cualquier factor, o cualquier desvío en el procedimiento que compensa el proceso total será una pérdida de desempeño o vida de servicio. Se han observado mezclas que finalmente consolidan con el 3 % de vacíos, aunque puede esperarse que haga roderas si se coloca en situaciones de tránsito pesado. Varios factores pueden contribuir a este incidente, como un incremento arbitrario o accidental en el contenido del asfalto mezclado con facilidad o un incremento en la cantidad de partículas finas que pasan los 75 μ (malla No 200) más allá del tamiz que se usa en el laboratorio, la cual podría aumentar el contenido óptimo de asfalto.

Similarmente, pueden ocurrir problemas si el contenido final de vacíos de aire está por encima del 5%, o si el pavimento se construye con más del 8% de vacíos de aire inicial. Quebradizo, agrietamiento prematuro, desgaste y desprendimiento son algunas de las posibilidades bajo estas condiciones.

El objetivo global es limitar los ajustes del diseño del contenido de asfalto a menos de 0.5% de vacíos de aire de la media del criterio de diseño (4%), especialmente en la parte baja del rango; y para verificar que la mezcla de la planta se parezca exactamente a la elaborada del laboratorio.

4.4 Efecto de los vacíos llenos de asfalto

Aunque VFA, VMA y V_a , están interrelacionadas y sólo dos de los valores se requieren para resolver los restantes, tomando el criterio VFA ayuda a prever el diseño de mezclas con un VMA de marginal a aceptable. El efecto principal del criterio de VFA es que limita los niveles máximos de VMA y subsecuentemente, los niveles máximos de contenido de asfalto.

El VFA también restringe el contenido de aire permitido para mezclas cercanas al criterio mínimo de VMA. Mezclas diseñadas para volúmenes de tráfico bajos, no pasarán el criterio de VFA con un porcentaje de vacío relativamente alto (5%),

aunque el criterio de vacíos de aire se cumpla. El propósito es evitar mezclas menos durables en situaciones de tránsito ligero.

Las mezclas diseñadas para tránsito pesado no pasarán el criterio VFA con un bajo porcentaje de vacíos (menor de 3.5%), aunque los vacíos sean aceptados dentro del rango. Porque un bajo contenido de vacíos suele ser muy crítico en términos de deformación permanente. El criterio VFA ayuda a evitar mezclas que puedan ser susceptibles a roderas en situaciones de alto tráfico.

El criterio VFA provee un factor de seguridad adicional en el diseño y proceso de construcción en términos de su desempeño; desde que puedan ocurrir cambios entre la etapa de diseño y la construcción, el incremento en el margen de error es aceptable.

5 Descripción del experimento

Se realizó una comparación entre las metodologías Marshall y Superpave a nivel de diseño volumétrico, siguiendo tres parámetros fundamentales: caracterización de materiales, elaboración de las probetas asfálticas y pruebas de densidad a la mezcla asfáltica.

5.1 Caracterización de los materiales

En esta etapa se realizaron pruebas en los materiales utilizados, como son el agregado mineral y el ligante asfáltico.

5.1.1 Agregado mineral

El material granular en estudio proviene del banco de materiales La Cañada, Saldarriaga, Qro (Figura 5.1) y está compuesto de roca basáltica triturada.



Figura 5.1
Banco La Cañada

De igual forma, se evaluó la calidad de los materiales utilizados en las mezclas asfálticas; los resultados se observan en la Tabla 5.1.

Tabla 5.1
Concentrado de pruebas al agregado mineral

Pruebas	Resultado	Especificación
Angularidad del agregado grueso	100 / 100	100 / 100
Partículas alargadas y aplanadas	2 %	10 % máx
Equivalente de arena	75 %	50 % mín
Desgaste de Los Ángeles	16 %	35 % máx
Intemperismo acelerado	7 %	10 % máx

Las pruebas adicionales realizadas a los agregados, fueron absorción, densidad específica y aparente tanto al agregado grueso como al fino. Los resultados se presentan en la Tabla 5.2.

Tabla 5.2
Pruebas adicionales a los agregados

Pruebas	Resultado
Absorción (%)	3.01
Densidad	2.70
Densidad aparente	2.78

5.1.2 Cemento asfáltico

Se realizaron dos tipos de pruebas al ligante, de acuerdo con la metodología Superpave, las cuales se describen a continuación:

Viscosímetro rotacional (RV)

Se realizaron pruebas de viscosidad a diferentes temperaturas con el fin de obtener las temperaturas de mezclado y compactación; en la Figura 5.2 se presenta la carta de viscosidad en donde observa que los rangos de valores de mezclado y de compactación son de 143 – 147°C y 135 – 140°C, respectivamente.

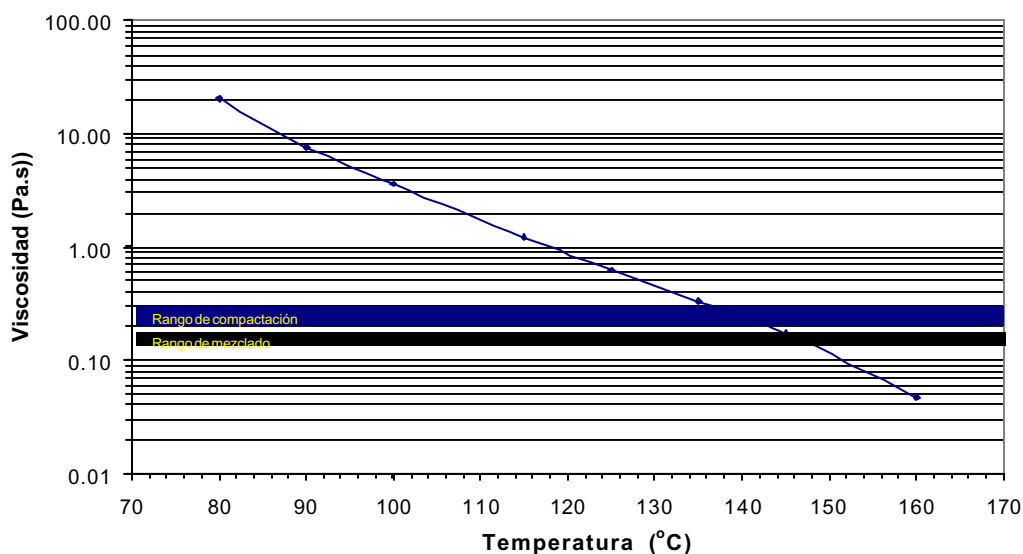


Figura 5.2
Carta de viscosidad

Reómetro dinámico de corte (DSR)

Conjuntamente se determinó la viscoelasticidad del cemento asfáltico, determinando su grado de desempeño (PG).

El resultado que se obtuvo en esta prueba se muestra en la Tabla 5.3, tomando como parámetros de evaluación el ángulo de fase, módulo de corte (G^*) y el criterio de evaluación $G^*/\text{Sen}(\delta)$.

Tabla 5.3
Resultados del reómetro de corte dinámico

Parámetros	Ligante
	AC - 20
Ángulo de fase (grados)	84,61
Módulo de corte (G^* , kPa)	1,515
$G^* / \text{Sen}(\delta)$, (kPa)	1,522
PG	64

5.2 Elaboración de la mezcla asfáltica

Después de haber realizado las pruebas correspondientes al material granular y verificar que cumple con las especificaciones mínimas se procedió a separarlo por tamaños; el máximo nominal del agregado, fue de 12.57 mm ($\frac{1}{2}$ "), que es un tamaño común en carpetas asfálticas.

5.2.1 Determinación de la granulometría

La granulometría se seleccionó teniendo en cuenta que debería cumplir con las dos especificaciones de diseño; gráfica en escala semilogarítmica (método Marshall) y gráfica de Fuller que está elevada a la potencia 0.45 (método Superpave).

Para esto se propusieron tres curvas granulométricas: corresponden a una granulometría gruesa (G1) y dos granulometrías finas (G2 y G3). Las curvas granulométricas se pueden observar en las Figuras 5.3 y 5.4

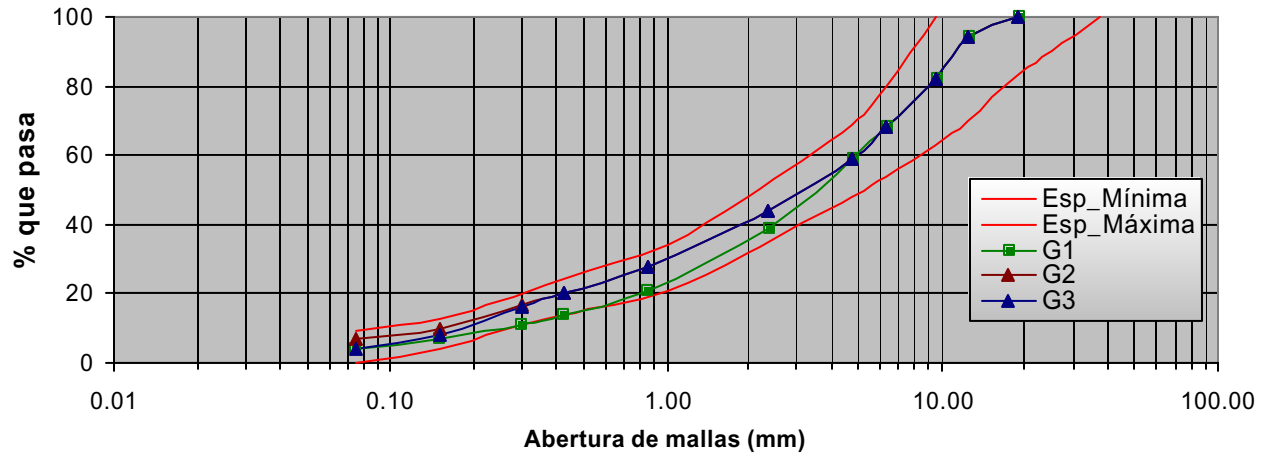


Figura 5.3
Granulometría Marshall

Como se observa en la Figura 5.3, la única restricción de la granulometría Marshall es que las curvas granulométricas deben estar dentro de la zona establecida por las curvas de especificación máxima y mínima.

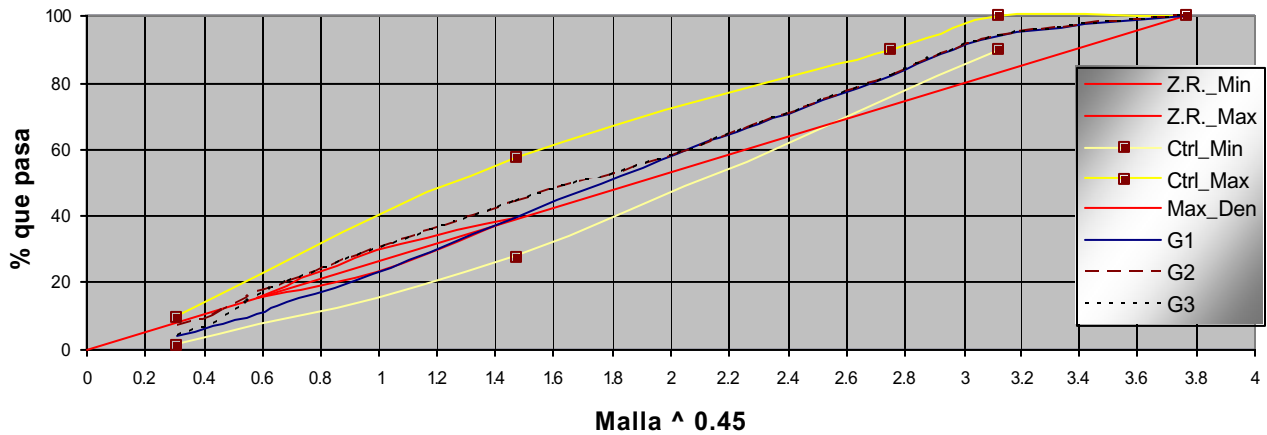


Figura 5.4
Granulometría Superpave

La granulometría Superpave cuenta con restricciones diferentes como son los puntos de control; éstos tienen una función similar a las curvas máximas y mínimas del método Marshall; otro aspecto a considerar es la zona de restricción, la cual no debe ser atravesada por la curva granulométrica debido a que produciría una mezcla muy susceptible a la rigidez del asfalto.

5.2.2 Contenido de asfalto inicial

Después de separar el material y definir las granulometrías, se determinó el porcentaje de asfalto inicial; para esto, se utilizó la fórmula de aproximación que establece la metodología Superpave, que para fines de diseño es más apropiada que la propuesta en la metodología Marshall, dando como resultado un porcentaje de 5.1 % para la mezcla gruesa (G1) y 5.0 % para las mezclas finas (G2 y G3).

5.2.3 Dosificación de las probetas

Para la investigación se decidió utilizar el molde de 10 cm (1”) de diámetro, debido a que este tipo de probetas son compatibles en los dos métodos de compactación.

La determinación de las alturas de las probetas va en función de tipo de prueba que se quiera realizar en la mezcla asfáltica. Para esto se manejaron dos tipos de alturas de probeta:

- Altura de 63.5 mm; para determinar la gravedad específica de la mezcla asfáltica compactada, estabilidad y flujo Marshall y tensión indirecta
- Altura de 100 mm (1:1); estas probetas se elaboran para la prueba de inmersión-compresión, que es un parámetro de susceptibilidad a la humedad de la mezcla asfáltica

5.2.4 Preparación de la mezcla asfáltica compactada

Para elaborar lo que se conoce como envuelta de la mezcla, se llevó al asfalto a la temperatura de mezclado (Tabla 4.1); y para el agregado, una temperatura mayor que la del asfalto, pero sin exceder de 28°C la temperatura de mezclado del asfalto; al igual que el asfalto a utilizar, no debe ser calentado a la temperatura de mezclado por más de una hora.

Preparación

Cuando los materiales alcanzan las temperaturas deseadas, se prepara el agregado para recibir el cemento asfáltico, haciendo una especie de cráter en donde se coloca el asfalto (Figura 5.5) y se mezcla hasta que todas las partículas de agregado estén cubiertas de asfalto (Figura 5.6).

De igual forma, el molde de compactación debe ser calentado (en el horno) para que alcance una temperatura aproximada a la de compactación (136 – 139 °C).



Figura 5.5
Preparación del agregado



Figura 5.6
Envuelta de la mezcla

Una vez que la mezcla asfáltica alcanza la temperatura de mezclado, se saca el molde del horno; se coloca el papel en la parte inferior interna del molde y se vacía la mezcla asfáltica (Figura 5.7); con una espátula o cuchara caliente se golpea 15 veces el perímetro del molde y diez veces en el interior; después se compacta la muestra, ya sea en el martillo Marshall o en el compactador giratorio.



Molde Superpave



Molde Marshall

Figura 5.7
Vaciado de la mezcla al molde

Compactación de la mezcla asfáltica

Un parámetro que se debe determinar antes de empezar la compactación, es el número de giros (método Superpave), o de golpes por cara (método Marshall); para su determinación, se requiere conocer el tránsito vehicular (en ESAL) y la

temperatura del lugar. En esta investigación se estableció un tránsito de 15×10^6 ESAL y una temperatura de pavimento de hasta 39°C .

Con estos valores se pudo determinar un número de giros de 174 (Superpave) y de 75 golpes por cara (Marshall)

Compactación Superpave

Además de los parámetros antes determinados, la compactación giratoria requiere de ciertos valores como son la presión vertical, ángulo de giro y la velocidad de rotación: en este caso, se tomaron los especificados para el diseño (Tabla 5.4).

Tabla 5.4
Especificación Superpave

Parámetros	Especificación
Esfuerzo vertical	600 kPa
Ángulo de giro	1.25°
Velocidad de rotación	30 rev/min

Todos estos parámetros son introducidos al software del compactador, al igual que los datos propios de la mezcla asfáltica, como son el nombre de la probeta, peso, densidad esperada y diámetro del molde. Una representación se presenta en la Figura 5.8.

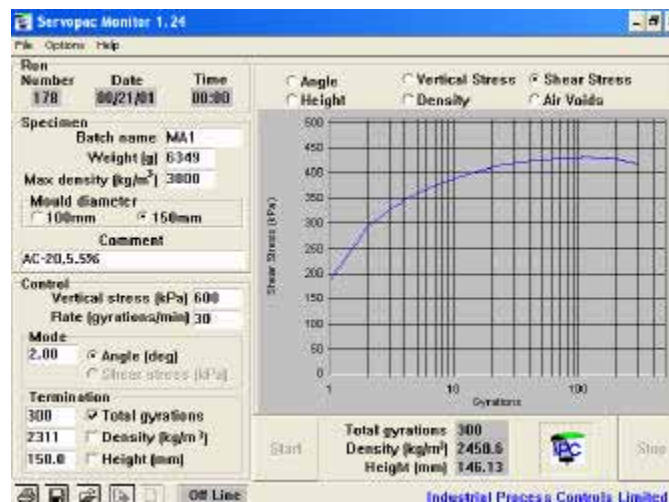


Figura 5.8
Datos generales y gráfica en el compactador Servopac

Antes de iniciar la compactación se asegura el molde en el compactador y después se inicia el proceso (Figura 5.9), el molde a utilizar deberá tener una temperatura aproximada a la de compactación, con el fin de reducir la pérdida de temperatura durante la compactación.



Figura 5.9
Colocación del molde

Durante la compactación, el software del Servopac presentará gráficas de números de giros contra diferentes parámetros, como la variación del ángulo de giro, esfuerzo de corte, densidad, volumen de vacíos.

Compactación Marshall

La compactación Marshall es mucho más sencilla, ya que sólo requiere de la determinación del número de golpes por cara. La figura 4.10 muestra una compactación con martillo Marshall; el martillo debe de ser calentado para que alcance una temperatura aproximada a la de compactación; esto se realiza con la ayuda de una plancha (Figura 5.11).



Figura 5.10
Compactación Marshall



Figura 5.11
Plancha y pisón de compactación

Extracción de la mezcla asfáltica compactada

Método Superpave

El compactador giratorio cuenta con un sistema de extracción (Figura 4.12), que es un gato hidráulico que expulsa a la muestra del molde. Para extraerla se tiene que dejar enfriar la muestra por lo menos una hora para no ocasionarle daño alguno; esto porque a altas temperaturas la mezcla asfáltica compactada no tiene la cohesión suficiente y podría afectarse su volumetría.

Método Marshall

Para la extracción de la mezcla asfáltica después de compactarla se utilizó un gato hidráulico. A diferencia de los moldes Superpave, el espesor del molde Marshall es muy delgado, por lo que se tiene que esperar menos tiempo para extraer la probeta (aprox. 30 min) (Figura 5.13).



Figura 5.12
Extracción Superpave



Figura 5.13
Extracción Marshall

5.3 Pruebas a las mezclas asfálticas

Para analizar la influencia del método de compactación, se utilizarán diferentes tipos de pruebas en la mezcla asfáltica, las cuales estarán divididas en dos fases; la primera, con el fin de evaluar las características volumétricas debidas a los diferentes equipos de compactación utilizados; en la segunda, se valorarán los parámetros de resistencia de la mezcla asfáltica mediante diferentes pruebas mecánicas con el fin de calificar la influencia de la compactación, bajo diferentes condiciones de falla.

5.3.1 Pruebas volumétricas

Un factor que debe tenerse en cuenta al considerar el comportamiento de la mezcla asfáltica es el de las proporciones volumétricas de los componentes, el ligante asfáltico y el agregado. A continuación se describen las pruebas que más influyen en los resultados de la volumetría y los parámetros a evaluar en este estudio.

Gravedad específica del agregado grueso

Este método de prueba se usa para determinar la densidad de la proporción esencialmente sólida de cantidad de partículas de agregado y provee un valor promedio representativo de la muestra.

Una muestra de agregado se sumerge en agua por aproximadamente 24 ± 4 horas para llenar los poros. Después la muestra se retira, se seca superficialmente y se pesa. Finalmente la muestra se seca en horno y la masa es determinada. Usando las masas obtenidas y la fórmula siguiente, es posible calcular la densidad y la densidad relativa (gravedad específica).

$$G_{mb} = \frac{W_a}{W_{ss} - W_w}$$

Donde:

W_a = masa de la muestra ensayada secada al horno

W_w = masa de la aparente en agua

W_{ss} = masa de la muestra saturada y superficialmente seca

Gravedad específica de la mezcla asfáltica compactada (G_{mb})

Esta prueba se realiza para estimar el grado de densificación que tendrá la mezcla asfáltica colocada en la estructura del pavimento. Debe tenerse en cuenta que esta densificación es el valor estimado que tendrá la mezcla asfáltica después de un tiempo de haberse colocado en el pavimento. Esto debido a que el pavimento después de ser colocado, sigue sufriendo densificación debido al paso de los vehículos.

Esta densidad es la relación entre su peso en el aire y su volumen, incluyendo los vacíos permeables. Si la probeta tiene una absorción menor a 2 %, no se necesita parafinar la probeta (ASTM D2726), su peso específico (G_{mb}) se determina de manera sencilla, mediante la expresión:

$$G_{mb} = \frac{W_a}{W_{ss} - W_w}$$

Donde:

W_a = masa de la probeta en el aire

W_w = masa de la probeta en el agua

W_{ss} = masa en el aire de la probeta saturada y superficialmente seca

En la Figura 5.14 muestra la habilitación de la báscula para el pesaje de las probetas en forma sumergida, al aire y superficialmente seca.

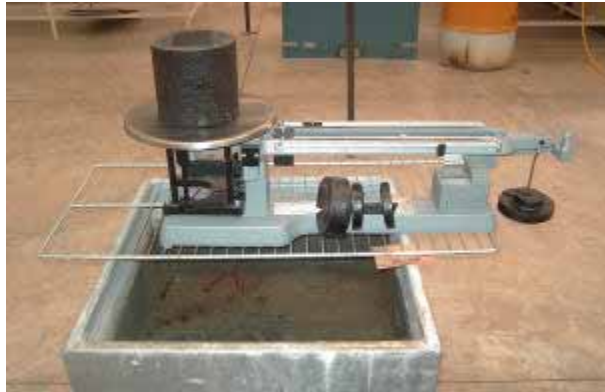


Figura 5.14
Determinación de las masas de las mezclas asfálticas

Gravedad teórica máxima de la mezcla asfáltica

La determinación de la gravedad teórica máxima de la mezcla asfáltica, es posiblemente la prueba de laboratorio más importante para definir las características volumétricas de la mezcla asfáltica, debido a que el cálculo del volumen de vacíos es la proporción que existe entre el G_{mb} y el G_{mm} .

Para esta prueba se utiliza un picnómetro de vacío según la Norma ASTM D2041 (Figura 5.15). Se realiza en la mezcla asfáltica en forma suelta y consiste en saturar de agua el picnómetro y aplicar vacío, con el fin de extraer todo el aire que contiene la mezcla.



Figura 5.15
Picnómetro de vacío

Para calcular la gravedad teórica máxima de la mezcla asfáltica, se utiliza la fórmula siguiente:

$$G_{mm} = \frac{A}{A + B - C}$$

Donde:

G_{mm} = gravedad específica máxima de la muestras

A = masas de la muestra seca, g

B = masa del picnómetro con agua a 25°C, g

C = masa del picnómetro con agua y muestra a 25°C, g

5.3.2 Pruebas mecánicas

Prueba de Inmersión-compresión.

Esta prueba se realiza de acuerdo con la Norma ASTM D1075 y se utiliza para determinar la pérdida de resistencia debido a la acción del agua. Esta determinación consiste en realizar dos juegos de probetas; las primeras, se evalúan en compresión a una temperatura de 25 °C; el segundo juego se sumerge en agua a una temperatura de 60 °C durante 24 horas; después se vuelve a sumergir en agua a 25 °C por 2 horas; finalmente se seca superficialmente la muestra y se evalúa en compresión a una temperatura de 25 °C.

La determinación de la velocidad de deformación es igual a la de la prueba de compresión axial sin confinar; la pequeña diferencia es que las probetas tienen diferente relación altura-diámetro (1:1), por lo que se utilizó una velocidad de deformación de 5 mm/min.

En la Figura 5.16 se observa una probeta durante el ensayo de inmersión-compresión; a su vez en la Figura 5.17 se aprecia una probeta después de ser ensayada.



Figura 5.16
Ensayo de inmersión-compresión



Figura 5.17
Probeta después de ensaye

Prueba de estabilidad y flujo Marshall

Esta prueba se realiza con el propósito de conocer los valores de cohesión (estabilidad) y fricción (flujo) de la mezcla asfáltica, mediante la aplicación de una carga a deformación controlada de 50.8 mm/min. Esta prueba es solamente para probetas fabricadas con el martillo Marshall y consiste en sumergir la probeta en baño María a una temperatura de 60 °C de 30 a 40 min, para después ensayarla en la máquina Marshall (Figura 5.18); los valores obtenidos se utilizan para la determinar el contenido óptimo de asfalto.

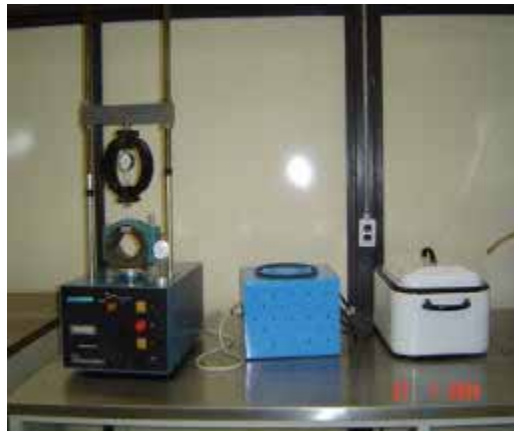


Figura 5.18
Equipo de pruebas Marshall

6 Resultados

La investigación se dividió en dos etapas, una que incluye el análisis volumétrico; y otra, que involucra las pruebas mecánicas a la mezcla asfáltica compactada, para cada método de diseño.

6.1 Análisis volumétrico

El análisis volumétrico está subdividido en tres etapas, las cuales son determinación de la selección de la granulometría de diseño, selección del contenido óptimo de asfalto, propiedades en el óptimo de asfalto.

Los parámetros a evaluar en esta etapa serán: vacíos en el agregado mineral (VMA), vacíos rellenos de asfalto (VFA); volumen de vacíos (Va); porcentaje de asfalto efectivo (Pbe); proporción de polvo (DP); gravedad específica de la mezcla asfáltica compactada (Gmb); densidad teórica máxima de la mezcla asfáltica (Gmm), absorción de la mezcla asfáltica. A estos se le adicionarán los parámetros propios de los métodos de diseño, como son estabilidad y flujo del método Marshall, y % de Gmm para el método Superpave.

6.1.1 Selección de la granulometría de diseño

En la Tabla 6.1 se presentan los datos obtenidos para el método de diseño Superpave.

Tabla 6.1
Análisis de las granulometrías para el método Superpave

Parámetros	Para 174 giros			Especificación
	G1	G2	G3	
Pbi (est)	5.60	5.40	6.00	-----
VMA (est)	14.9	15.1	16.0	14 (mín)
VFA (est)	73.2	73.5	75.0	65 – 75
% Gmm Nini (est)	87.4	87.9	87.8	87 (mín)
% Gmm Nmax (est)	97.2	97.2	97.2	98 (máx)
Pbe	4.8	4.8	5.3	-----
DP	0.84	1.46	0.75	0.6 – 1.2
Gmb	2.397	2.408	2.384	
Gmm	2.497	2.500	2.487	
Absorción (%)	1.24	0.91	0.47	

Se puede observar que la granulometría 2 (G2) no cumple con el parámetro de proporción de polvo, por lo que se descartará del diseño. De las dos granulometrías restantes se seleccionó la granulometría 1 (G1), debido a que la granulometría 3 (G3) estaba muy cerca de la especificación de VFA. Otros parámetros a observar son la densidad Gmb y la absorción, ya que al ser granulometrías densas, los porcentajes de absorción son muy bajos.

De la misma forma, en la Tabla 6.2 se presentan los resultados del método Marshall, con tendencias similares a los del método Superpave debido a la homogenización de las curvas granulométricas.

Tabla 6.2
Análisis de las granulometrías para el método Marshall

Parámetros	75 golpes por cara			Especificación
	G1	G2	G3	
Pbi (est)	5.7	5.50	6.00	-----
VMA (est)	15.0	15.3	15.9	14 (mín)
VFA (est)	73.3	73.9	74.8	65 – 75
Pbe	4.9	4.9	5.3	-----
DP	0.82	1.43	0.75	0.6 – 1.2
Flujo	16	13	13	8 – 14
Estabilidad (kN)	20197	26315	24766	8000 (mín)
Gmb	2.361	2.370	2.345	
Gmm	2.450	2.450	2.508	
Absorción (%)	1.22	0.77	0.31	

Al igual que en el análisis anterior, la granulometría 2 (G2) se descarta por exceso en el valor de proporción de polvo; de las granulometrías restantes, se deben observar dos parámetros; en la granulometría 3 (G3), el valor de VFA está próximo al límite superior de la especificación de VFA; por otro lado, la granulometría 1 (G1) no cumple con la especificación de flujo. Para este análisis en particular se tomarán en cuenta solamente los parámetros volumétricos, por tanto, se utilizará la granulometría 1.

6.1.2 Determinación del contenido óptimo de asfalto

Para determinar el contenido óptimo de asfalto, se evaluó la granulometría 1 (G1) con diferentes contenidos de asfalto (estimado, ± 0.5 y 1.0 %); los resultados se observan en las gráficas siguientes.

Método Marshall

Para determinar el porcentaje óptimo de asfalto, de la gráfica de Va vs % de asfalto se entra con el valor de 4% de Va y al interceptar con la curva se determina el porcentaje de asfalto a evaluar. El 4% de vacíos es la media para el diseño de mezclas asfálticas, ya que la especificación sugiere un valor entre 3 y 5.

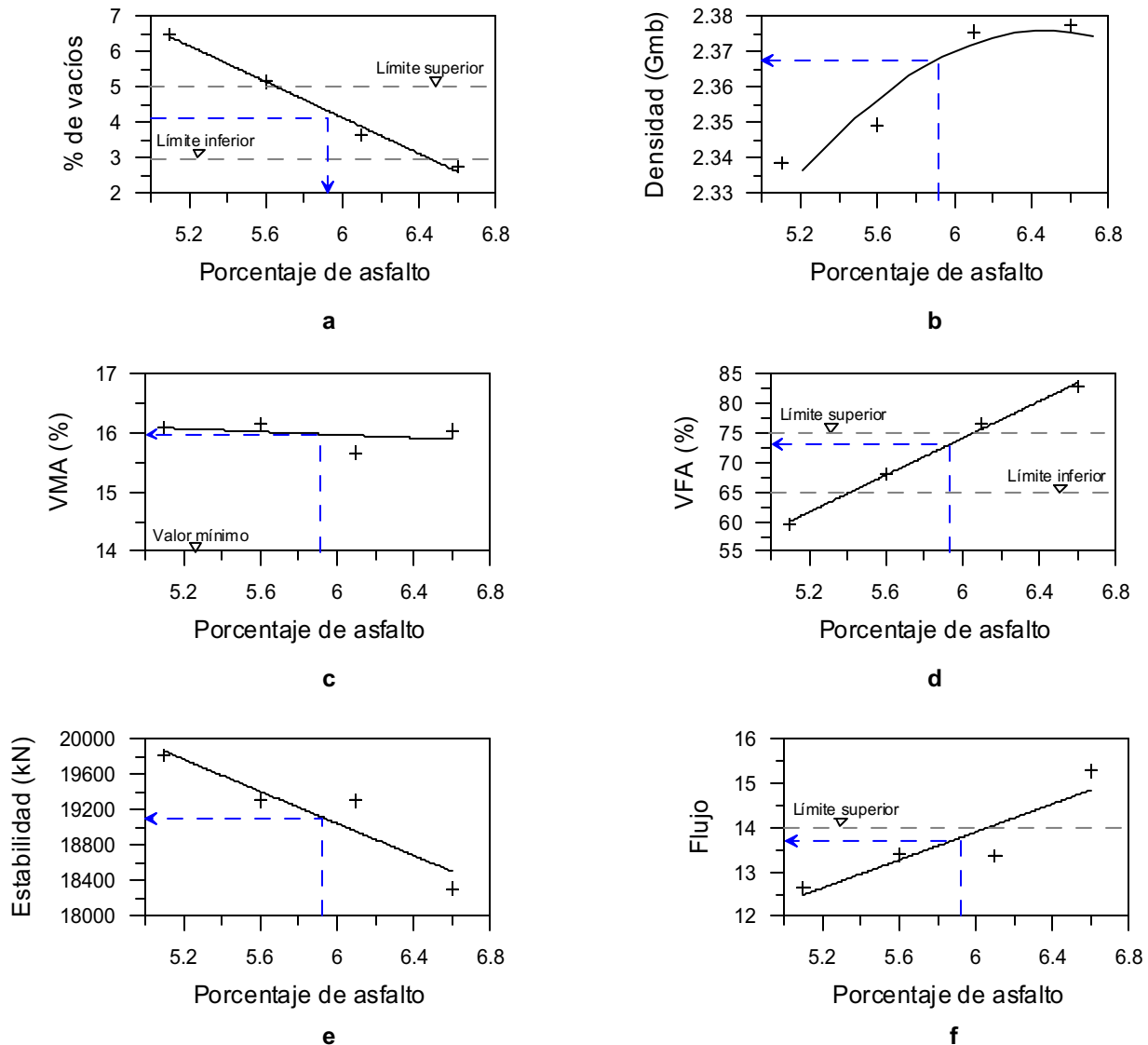


Figura 6.1

Gráficas para determinación de contenido óptimo de asfalto (Marshall)

En la Figura 6.1a se observa que el porcentaje de asfalto para un volumen de vacíos de 4 % es de 5.9. Con este valor se entra en las otras gráficas para verificar si cumple con la especificación establecida.

Método Superpave

Para calcular el porcentaje de asfalto óptimo se utiliza el mismo procedimiento que en el método Marshall, solo que en este caso el porcentaje determinado es 5.3.

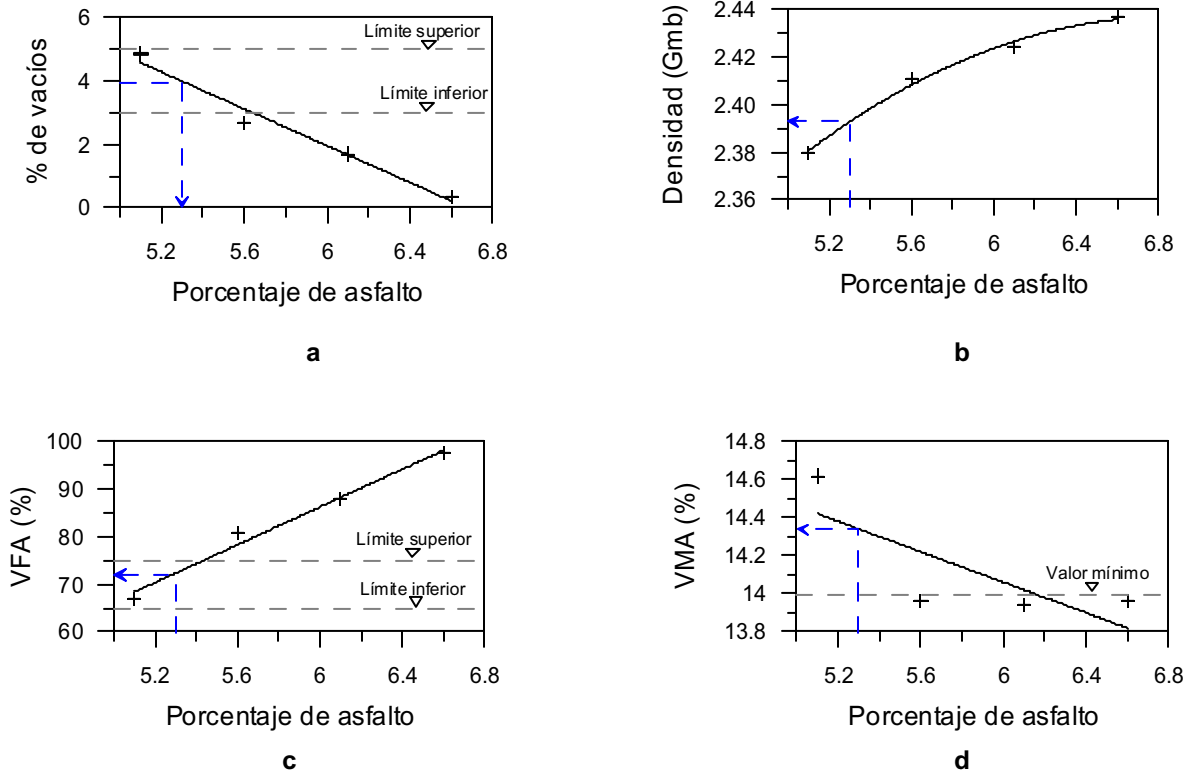


Figura 6.2

Gráficas para determinación de contenido óptimo de asfalto (Superpave)

Se realizó un concentrado de resultados mediante los dos métodos, Tabla 6.3. En ella se puede subrayar la diferencia de los porcentajes de asfalto óptimo entre métodos, siendo 0.6 % más para el Marshall; esto debido a las gravedades específicas de la mezcla asfáltica compactada (Gmb), ya que en el método Marshall se presentan densidades más bajas, exponiendo las diferencias entre los métodos de compactación; cabe señalar que las densidades obtenidas en Superpave, todavía podrían incrementarse; mientras que las Marshall no, debido a que las mezclas asfálticas compactadas ya presentaban indicios de rotura de agregado.

Tabla 6.3
Comparación de los parámetros volumétricos estimados

Parámetros	Métodos de diseño	
	Marshall	Superpave
% de asfalto óptimo	5.3	5.9
Gmb	2.366	2.392
VMA (%)	16	14.3
VFA (%)	73	72
Estabilidad (kN)	19100	-----
Flujo	13.6	-----

Los demás parámetros presentaron valores similares, aunque el VMA para el método Superpave dio cerca del límite.

6.1.3 Propiedades en el óptimo de asfalto

Con el fin de verificar los valores óptimos de asfalto estimados, se realizaron probetas con los porcentajes estimados, los resultados obtenidos integran la Tabla 5.4.

Tabla 6.4
Comparación de los parámetros volumétricos reales

Parámetros	Métodos de diseño	
	Marshall	Superpave
% de asfalto óptimo	5.3	5.9
Gmb	2.360	2.405
Gmm	2.406	2.501
VMA (%)	16	14
VFA (%)	75	72
Estabilidad (kN)	16204	-----
Flujo	14	-----
Inmersión-compresión	-----	97 %

Con los valores de la tabla anterior se puede determinar que el valor seleccionado de contenido óptimo fue correcto, ya que no existen diferencias significativas en entre los valores estimados y los reales en ninguno de los dos métodos.

El diseño de mezclas asfálticas para el método Marshall presentó un valor de flujo muy cerca de la especificación, lo que indica una fricción interna posiblemente baja, esto puede deberse al porcentaje de asfalto de diseño, el cual es relativamente alto.

El valor de estabilidad de la mezcla asfáltica es muy alto, lo que la hace susceptible al agrietamiento por fatiga. Esto también se puede observar en la prueba de inmersión-compresión, ya que presenta una susceptibilidad al agua casi nula, dejando ver que es una mezcla muy cerrada.

Conclusiones

El compactador giratorio (método Superpave), tiene mayor versatilidad que el martillo Marshall para elaborar probetas asfálticas con diferentes relaciones de altura-diámetro, lo que permite realizar más pruebas mecánicas

El compactador giratorio (Superpave) posee la capacidad de lograr mayores densidades que el compactador Marshall.

Se observó que la volumetría está fuertemente influenciada por la prueba de densidad teórica máxima, la cual no es comúnmente realizada en México.

Los porcentajes óptimos de asfalto para las metodologías de diseño fueron sensiblemente diferentes (diferencia $>0.5\%$); esto debido a que las densidades fueron superiores en el sistema Superpave lo que ocasiona que las probetas elaboradas con la metodología Marshall necesiten más asfalto para lograr el mismo volumen de vacíos (%Va).

Altos porcentajes de asfaltos en la mezcla, producen una reducción en la fricción interna del pavimento.

Mezclas cerradas con altos valores de estabilidad Marshall y baja susceptibilidad a la humedad, pueden ser indicativos de que la mezcla es susceptible al agrietamiento por fatiga.

Bibliografía

1. Annual Book of ASTM Standard, 4.03 Roofing and Paving Material; Vehicle-Pavement System (2001).
2. Asociación Mexicana de Ingeniería de Vías Terrestres, Reología de asfaltos, teoría, aplicación e implementación, 4º Seminario Técnico (1995).
3. Asphalt Institute Performance Graded Asphalt Binder Specification and Testing, Series No 1 (SP-1), (1996).
4. Asphalt Institute, Superpave Mix Design, Series No 2 (SP-2), (1996).
5. Centros de Estudios Experimentales de Obras Públicas – Centro de Estudios de Carreteras, Normas NLT1 -Ensayos de carreteras.
6. Dale Alan Rand, Comparative Analysis of Superpave Gyratory Compactors and TxDoT Gyratory Compactors. Texas Department of Transportation.
7. 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).
8. Murphy M, O'Mahony M, Lycett C and Jamieson I, Materials and Structures/Matériaux et Contructions, Vol 33, pp 438(2000).
9. Instituto Mexicano del Transporte, Manual de Calidad de los Materiales en Secciones Estructurales de Pavimentos Carreteros, Documento Técnico, No 1 (1990).
10. Jorge B Sousa, George Way, John T Harvey and Mickey Hines, Comparison of Mix Design Concepts, Transportation Research Record No 1492.
11. National Asphalt Training Center, Background of Superpave Asphalt Mixtures Design and Analysis, SHRP-A-379, FHWA-SA-95-003.
12. Strategic Highway Research Program, Superior Performing Asphalt Pavement: The Product of the SHRP Asphalt Research Program, SHRP-A-410.
13. Thomas W Kennedy, Ensayos y especificaciones de los ligantes asfálticos en el sistema Superpave, Superpave Center at Austin Texas (USA, 1996).
14. AASHTO Innovate Highway Technologies.
[//Leadstates.tamu.edu/sp/index.stm](http://Leadstates.tamu.edu/sp/index.stm)

15. Public Roads: Superpave comes of Age.

www.tfhre.gov/pubrds/02sep/10.htm

16. Superpave Mix Design

www.utexas.edu/research/superpave/mix/index.html

17. The Superpave Gyrotory Compactor

www.utexas.edu/research/superpave/articles/gyrate.html



‡ **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