



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

ANÁLISIS DE LA INFLUENCIA DE MÉTODO DE COMPACTACIÓN EN EL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS

Paul Garnica Anguas
Horacio Delgado Alamilla
José Antonio Gómez López

**Publicación Técnica No 255
Sanfandila, Qro, 2004**

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

**Análisis de la influencia del método
de compactación en el
comportamiento mecánico de
mezclas asfálticas**

**Publicación Técnica No 255
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.

Se agradece al Ing. Rodolfo Téllez Gutiérrez los comentarios hechos a este trabajo; de igual forma se reconoce la participación del becario Adalberto Rogelio Hernández Ortiz y del técnico Mario Antonio Pérez González en los ensayos de laboratorio.

Índice

Resumen	III
Abstract	V
Resumen ejecutivo	VII
Introducción	1
1 Compactación de mezclas asfálticas	3
1.1 Martillo Marshall	3
1.2 Compactador de amasado de California	4
1.3 Compactador giratorio	5
2 Método de diseño Marshall	7
2.1 Metodología	7
2.2 Granulometría	7
2.3 Especificaciones de la metodología	8
2.4 Pruebas a las mezclas asfálticas compactadas	9
2.4.1 Determinación de la gravedad específica	9
2.4.2 Prueba de estabilidad y flujo	9
2.4.3 Análisis de densidad y vacíos	9
3 Método de diseño Superpave	11
3.1 Granulometría	11
3.2 Especificaciones de la metodología	12
3.3 Pruebas a las mezclas asfálticas	13
3.3.1 Requerimientos volumétricos de la mezcla	13
3.3.2 Proporción de polvo	13
3.3.3 Susceptibilidad a la humedad	13
4 Descripción del experimento	15
4.1 Caracterización de los materiales	15
4.1.1 Agregado mineral	15
4.1.2 Cemento asfáltico	16
4.2 Elaboración de la mezcla asfáltica	17
4.2.1 Granulometría	17
4.2.2 Parámetros de la mezcla asfáltica	18
4.3 Pruebas mecánicas a la mezcla asfáltica	20
4.3.1 Prueba de compresión axial sin confinar	20
4.3.2 Prueba de inmersión-compresión	21

4.3.3	Prueba de tensión indirecta	21
4.3.4	Prueba de estabilidad y flujo Marshall	22
4.3.5	Ensayo Cántabro	23
4.3.6	Analizador de Pavimentos Afálticos (APA)	23
5	Análisis de resultados	25
5.1	Propiedades mecánicas	25
5.1.1	Tensión indirecta	25
5.1.2	Ensayo Cántabro	26
5.1.3	Prueba de compresión axial sin confinar	27
5.1.4	Prueba de inmersión-compresión	28
5.1.5	Estabilidad y flujo Marshall	29
5.1.6	Analizador de Pavimentos Asfálticos (APA)	29
	Conclusiones	31
	Bibliografía	33

Resumen

Se evalúa la importancia del método de compactación, utilizando dos metodologías de diseño como son el método Marshall y Superpave mediante diferentes pruebas mecánicas, con el fin de evaluar la mezcla asfáltica compactada bajo diferentes condiciones de falla con base en criterios, como el desgaste de la mezcla, deformación permanente, susceptibilidad a la humedad, cohesión de partículas, valores de resistencia y gráficas de esfuerzo-deformación.

Abstract

This work evaluates the importance of the compaction method, using the methodologies of asphalt mix design Marshall and Superpave, by means of the use of different mechanical tests, with the purpose of evaluating to the asphalt mixture under different fail condition, by means of approaches as mixture abrasion, rutting resistance, moisture susceptibility, cohesion of particles and effort values by means of stress-strain graphic.

Resumen ejecutivo

A través de la evolución de las mezclas asfálticas, se han desarrollado diferentes tipos de dispositivos de laboratorio para compactación. En general, los aciertos de éstos es que fabrican especímenes para caracterización volumétrica y física.

Dependiendo del sistema, los especímenes pueden tener forma cilíndrica, trapezoidal o rectangular y la compactación lograrse a base de impactos, amasado o vibración.

Las metodologías Marshall y Superpave cuentan con dos de los tipos de densificación más utilizadas, como son la compactación a base de impactos (martillo Marshall) y por amasado (compactador giratorio), respectivamente.

En el capítulo 1 se presentan los equipos de compactación más comúnmente utilizados través de la historia: el martillo Marshall y el compactador por amasado de California; al igual se describe el compactador giratorio, el cual es el producto del programa de investigación SHRP.

El capítulo 2 describe el método de diseño Marshall, proporcionando criterios y especificaciones para la selección de la granulometría de diseño; conjuntamente presenta los parámetros para evaluación y ajuste del diseño.

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

Por su parte, el capítulo 3 hace referencia a la metodología Superpave mediante una descripción de la selección de granulometrías de diseño con base en la gráfica de Fuller; de igual forma se presentan las especificaciones de la metodología.

Como complemento se hace alusión a las diferentes pruebas establecidas para seleccionar la mezcla de diseño, mediante la descripción de las pruebas volumétricas y mecánicas que establecidas por esta metodología.

El capítulo 4 incluye los pasos que se realizaron para el experimento, mencionando las diferentes pruebas de los materiales utilizados (agregado mineral y asfalto), así como las consideraciones relativas para seleccionar la granulometría adecuada para los dos métodos; en forma conjunta se describen los criterios establecidos para el diseño y compactación de las probetas.

Se hace una breve descripción de las pruebas mecánicas utilizadas y se presentan figuras de la instrumentación de las mismas.

En el último capítulo se presentan los resultados de las diferentes pruebas y se analiza el efecto producido por el tipo de compactador utilizado para los diferentes criterios de falla aplicados.

Introducción

Las mezclas asfálticas al ser típicamente diseñadas con procedimientos empíricos de laboratorio implican que la experiencia en campo, se vuelve necesaria 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.

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 ambos métodos de diseño radica en los equipos empleados en la compactación de la mezcla asfáltica, los cuales tienen mecanismos de compactación muy diferentes.

Generalmente cuando se valora el efecto del equipo de compactación, sólo se evalúan las propiedades volumétricas de la mezcla asfáltica en laboratorio mediante la evaluación de parámetros, como son el porcentaje de vacíos y el acomodo de las partículas.

En eso radica la importancia de esta investigación, ya que no únicamente se necesita conocer las propiedades volumétricas que se producen con los diferentes tipos de compactadores, sino también conocer el desempeño que tiene la mezcla asfáltica compactada bajo diferentes condiciones de falla.

Mediante las de pruebas mecánicas y de correlación es factible llevar a cabo una valoración en cuanto al posible desempeño que podría presentar la mezcla asfáltica, cuando forme parte del pavimento.

1 Compactación de mezclas asfálticas

El diseño de mezclas asfálticas ha tenido a través del tiempo diversos métodos; siendo la gran diferencia entre ellos los equipos de compactación.

El propósito de dichos equipos en laboratorio es simular lo mejor posible la densificación que sufre la mezcla asfáltica en campo, siendo los dos parámetros principales en la densificación el porcentaje de vacíos de aire (V_a) y el acomodo de las partículas.

Existen diferentes tipos de compactaciones de laboratorio, entre las cuales se encuentran la compactación a base de impactos, compactación por amasado y la compactación giratoria.

Al igual que los compactadores, los especímenes tienen una gran variedad de formas y tamaños, desde las probetas cilíndricas con diferentes diámetros y alturas, hasta probetas prismáticas. Las dimensiones y tipos de probetas están en función de la propiedad que se necesite determinar, por ejemplo, las cilíndricas de 4 y 6 plg con relación altura-diámetro de 0,6 a 0,7 se utilizan para conocer las propiedades volumétricas y de cohesión; probetas cilíndricas con relación altura-diámetro de 1:1 y 2:1, se emplean en pruebas de susceptibilidad a la humedad y de compresión axial; las probetas prismáticas se utilizan generalmente en pruebas de fatiga.

1.1 Martillo Marshall

Para compactar las probetas se emplea un dispositivo de acero formado por una base plana y circular de 98.4 mm (3 7/8") de diámetro y un pistón de 4.536 g (10 lb), montado de forma que se pueda conseguir una caída libre del mismo sobre la base desde una altura de 457.2 mm (18"). Consta de un pedestal de compactación; consiste en una pieza prismática de madera de 200 x 200 x 460 mm (8 x 8 x 18 ") con un plato de acero de 305 x 305 x 25 mm (12 x 12 x 1 "). La base de madera deberá ser de roble o pino y tener un peso seco de 670 a 770 kg/m³. El martillo Marshall forma parte de la metodología Marshall.

El concepto del método Marshall para diseño de mezclas para pavimentación fue formulado por Bruce Marshall, ingeniero de asfaltos del Departamento de Autopistas del estado de Mississippi. Dicho método utiliza especímenes de prueba estándar, de una altura de 64 mm (2 1/2") y 102 mm (4") de diámetro.

En la Figura 1.1 se puede observar la compactación de una probeta con el martillo Marshall y en la Figura 1.2 un acercamiento del equipo utilizado durante la compactación.



Figura 1.1
Compactación Marshall



Figura 1.2
Martillo Marshall

1.2 Compactador de amasado de california

La compactación de la probeta se realiza con el compactador mecánico que imparte una consolidación por medio de una acción de amasado mediante series individuales a través de un pistón con una superficie redondeada; en cada aplicación, el pistón induce una presión de 3,45 MPa (500 psi), proporcionando al espécimen una compresión de amasado sobre un área aproximada de 2000 mm² (3,1 in²). Cada aplicación se mantiene por aproximadamente 2/5 de segundo. El compactador de amasado de California se puede observar en la Figura 1.3.



Figura 1.3
Compactador de amasado de California

Los conceptos básicos del método de diseño de mezclas asfálticas Hveem, fueron originalmente diseñados por Francis N Hveem, que fue ingeniero del Departamento de Transporte de California.

El procedimiento de esta prueba y sus aplicaciones se han desarrollado a través de una investigación extensiva y estudios de correlación sobre pavimentos asfálticos de autopistas.

Este método es aplicable a mezclas asfálticas elaboradas con cemento asfáltico o asfaltos rebajados que contengan tamaños máximos de agregados mayores a 25 mm (1") y es apto en el diseño de mezclas asfálticas con graduaciones densas o cerradas.

1.3 Compactador giratorio

Es el equipo más nuevo para evaluar las características de compactación de las mezclas asfálticas, bajo el concepto de que el compactador giratorio simula mejor la compactación en campo. Es importante notar que las características de compactación están disponibles para predecir las que correspondan al pavimento no sólo en el momento de la construcción, sino también a través de la vida del asfalto.

Los compactadores giratorios aplican un esfuerzo de amasado para fabricar especímenes cilíndricos. Dichos equipos han experimentado una evolución, resultado de varios dispositivos únicos y una variedad de métodos.

Existen tres valores que se consideran en la compactación giratoria.

N_{ini} .- Número de giros mínimo para que se empiece a compactar la mezcla asfáltica

N_{des} .- Número de giros con que se diseña la mezcla asfáltica

$N_{máx}$.-Número de giros para predecir la densificación de la mezcla asfáltica después de ser colocada

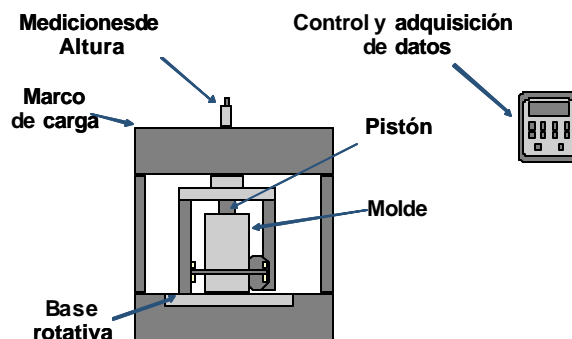


Figura 1.4
Esquema del compactador giratorio

El compactador giratorio se diseñó para compensar automáticamente el ángulo de giro (bajo servo-control de realimentación) y así mantener el ángulo de giro constante durante la compactación; además, provee un recurso para un ajuste simple y rápido de los parámetros críticos. El servo control de realimentación está habilitado para brindar más precisión y resultados consistentes; es una herramienta potente para evaluar los parámetros fijados y permite un ajuste para siguientes trabajos, indicando los parámetros que serán cambiados. Un aditamento más reciente es la medición de la resistencia al corte.

Esto se logra con la instalación de un transductor de presión en las líneas de presión de los tres puntos giratorios actuantes. A través de un algoritmo similar al usado con la máquina GTM, el promedio de la presión medida por ciclos es trasladada en resistencia al corte (Figura 1.5).



Figura 1.5
Compactador giratorio

2 Método de diseño Marshall

2.1 Metodología

El concepto del método Marshall para 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 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 Marshall modificado se desarrolló para tamaños máximo arriba de 38 mm (1.5"). El método 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.

Se emplea en especímenes de prueba estándar de una altura de 64 mm (2 ½") y 102 mm (4") de diámetro. Estos se preparan mediante un procedimiento específico para calentar, mezclar y compactar mezclas de asfalto- agregado. (ASTM D1559) Los dos aspectos principales del método Marshall de diseño de mezclas, 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.

2.2 Granulometría

La metodología Marshall utiliza una gráfica semi logarítmica para definir la granulometría permitida, en la cual en la ordenada se encuentra 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.

2.3 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 de 4%. Todas las propiedades medidas y calculadas con este contenido de asfalto deberán ser evaluadas, comparándolas con los criterios para el diseño de mezclas (Tabla 2.1). Si todos los criterios se cumplen, entonces se tendrá el diseño preliminar de la mezcla asfáltica; en caso de que un criterio no cumpla, se necesitará hacer ajustes o rediseñar la mezcla.

Tabla 2.1
Criterio de diseño de mezclas Marshall

Método Marshall	Tráfico ligero		Tráfico medio		Tráfico pesado	
	Carpetas y base		carpetas y base		carpetas 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 2.2
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

2.4 Pruebas a las mezclas asfálticas compactadas

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

2.4.1 Determinación de la gravedad específica

La prueba de gravedad específica puede ser desarrollada 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 utilizando parafina o la ASTM D2726, gravedad específica de mezclas asfálticas compactadas empleando 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.

2.4.2 Prueba de estabilidad y flujo

Después de que la gravedad específica se ha determinado, se desarrolla la prueba de estabilidad y flujo; 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. Después de colocando y centrando el espécimen en la mordaza inferior, se aplicará 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 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 ser registrada 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, se tendrá 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.

2.4.3 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.

Determinar la gravedad específica teórica máxima (ASTM D2041) para al menos dos contenidos de asfalto, preferentemente 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).

3 Método 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 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 asfaltos) y su interacción cuando están mezclados.

3.1 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 granulometría permitida (gráfica de Fuller). Esta carta usa 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 abscisas, en escala aritmética, representan las aberturas de los tamices en mm, elevadas a la potencia 0.45.

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). La Figura 3.1 muestra un esquema para un tamaño máximo de agregado de 19 mm.

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.

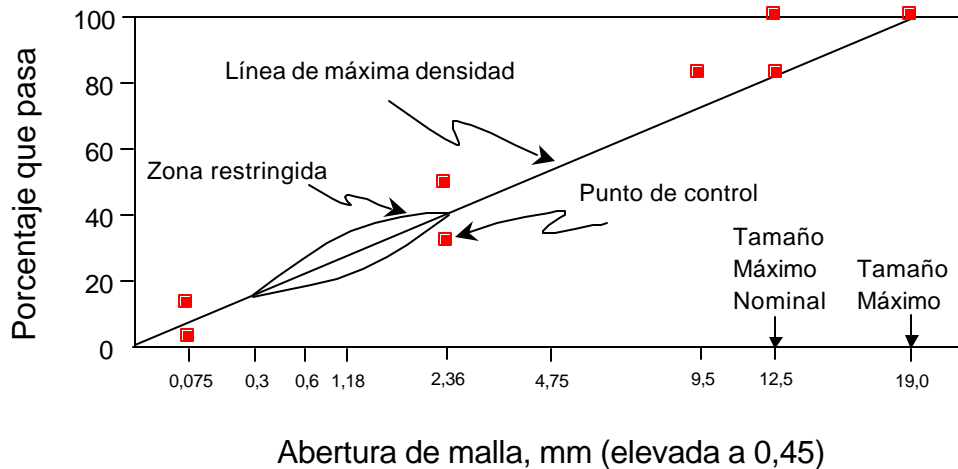


Figura 3.1
Límites para las granulometrías Superpave

En la Tabla 3.1 se presentan a cinco designaciones propuestas en la metodología Superpave.

Tabla 3.1
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

3.2 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 3.2 se observan los valores de los parámetros mencionados.

Tabla 3.2
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.

3.3 Pruebas a las mezclas asfálticas

Los requerimientos del diseño de mezclas asfálticas de Superpave son:

3.3.1 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.

3.3.2 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 del asfalto absorbido.

3.3.3 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 anti desprendimiento, o de mejora de adherencia.

4 Descripción del experimento

La investigación se realizó utilizando dos tipos de compactaciones: por medio de impactos (martillo Marshall) y por amasado (compactador giratorio), siguiendo tres parámetros fundamentales: caracterización de materiales, elaboración de las probetas asfálticas y pruebas a la mezcla asfáltica.

4.1 Caracterización de los materiales

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

4.1.1 Agregado mineral

El material granular en estudio proviene del banco de materiales La Cañada, Saldarriaga, Qro (Figura 4.1) y está compuesto de roca basáltica triturada.



Figura 4.1
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 4.1.

Tabla 4.1
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 4.2.

Tabla 4.2
Pruebas adicionales a los agregados

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

4.1.2 Cemento asfáltico

Se llevaron a cabo 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 4.2 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 de 135 – 140°C, respectivamente.

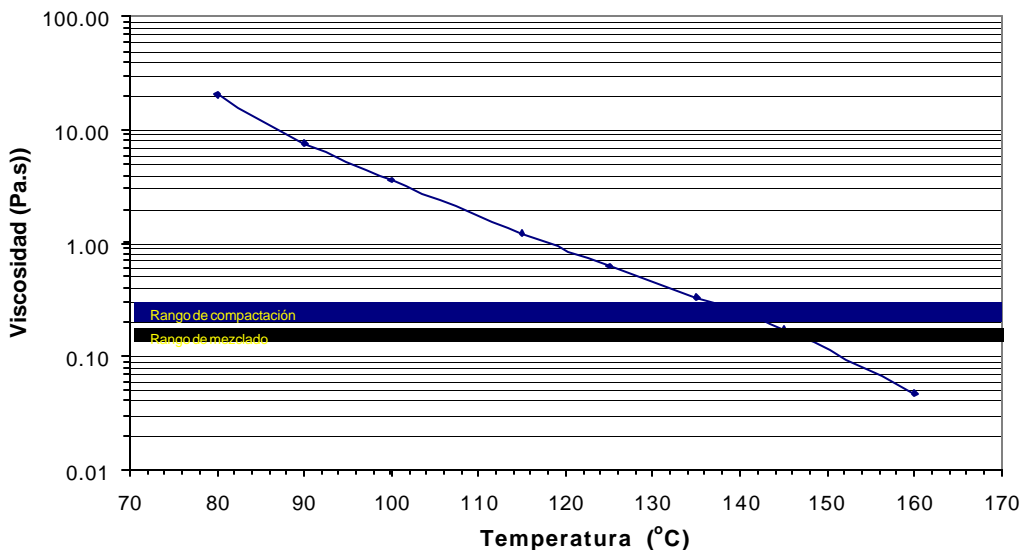


Figura 4.2
Carta de viscosidad

Reómetro dinámico de corte (DSR)

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

El resultado que se obtuvo en esta prueba se muestra en la Tabla 4.3, tomando como parámetros de evaluación el ángulo de fase, módulo de corte (G^*) y el criterio de evaluación, $G^*/\text{Sen}(\delta)$.

Tabla 4.3
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

4.2 Elaboración de la mezcla asfáltica

Al evaluar las variaciones en cuanto al desempeño de las mezclas asfálticas al utilizar dos diferentes métodos de compactación, se tuvieron que realizar ciertos ajustes en cuanto a granulometrías y fijar algunos parámetros como el porcentaje de asfalto, volumen de tránsito y el tamaño máximo del agregado.

4.2.1 Granulometría

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

En la Figura 4.3 se observa la granulometría Marshall para un tamaño máximo nominal de 12.5 mm

Como se observa en dicha Figura, 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.

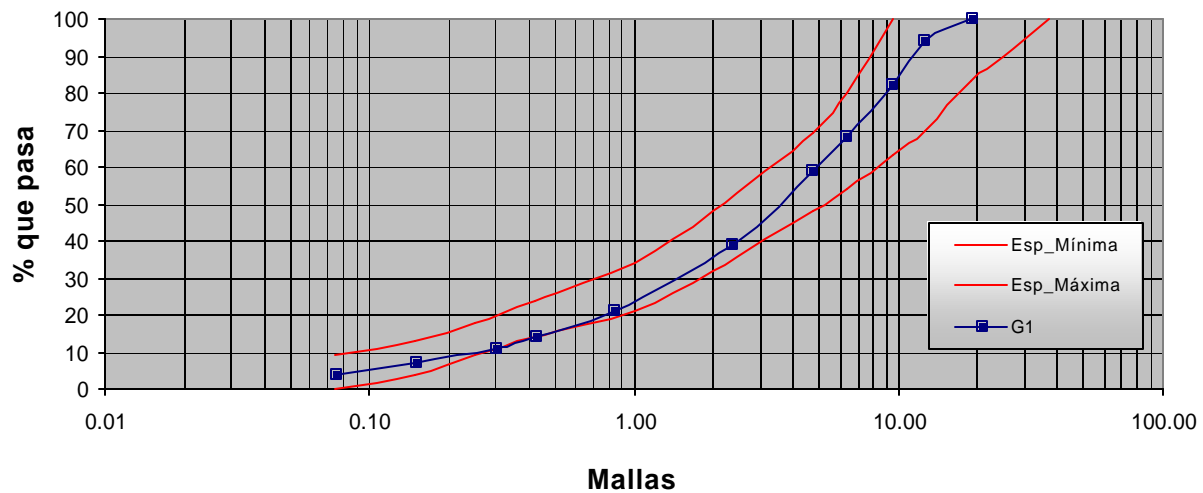


Figura 4.3
Granulometría Marshall

En la Figura 4.4 se presenta la granulometría establecida con el método Superpave, para un tamaño máximo nominal de 12.5 mm.

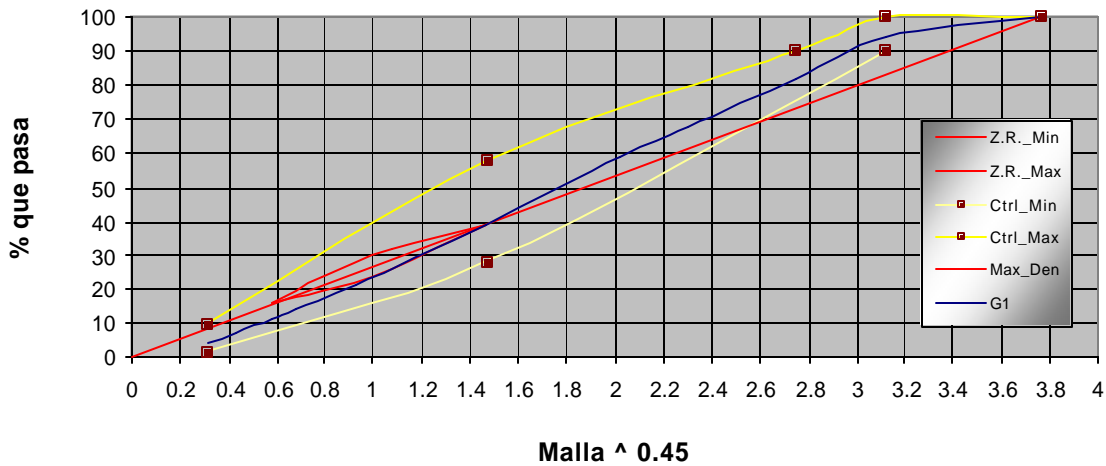


Figura 4.4
Granulometría Superpave

4.2.2 Parámetros de la mezcla asfáltica

Los parámetros de la mezcla utilizados, se seleccionaron de acuerdo con la publicación No 246, la cual establece un tamaño máximo nominal de agregado de 12,5 mm, un porcentaje de asfalto de 5.3 % para el método Superpave y 5.9 % para el método Marshall.

Dosificación

Se decidió utilizar el molde de 10 cm (4") de diámetro, debido a que este tipo de diámetro es compatible con los dos métodos de compactación.

La determinación de la altura de las probetas está en función de tipo de prueba mecánica que se quiera realizar en la mezcla asfáltica. Para esto se manejan cuatro tipos de altura de probetas:

- Altura de 57 mm; realizar el ensayo Cántabro, que es un parámetro de desgaste de la mezcla asfáltica debido al paso del tránsito vehicular
- Altura de 63.5 mm; 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
- Altura de 180 mm (2:1); con ellas se puede realizar la prueba de compresión axial sin confinar; al igual que las de carga cíclica, para determinar la deformación de la mezcla asfáltica

Compactación

Un parámetro que se debe definir antes de empezar la compactación es el número de giros (método Superpave), o de golpes por cara (método Marshall); para la 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.



Figura 4.5
Compactación Superpave



Figura 4.6
Compactación Marshall

Con estos valores se pudo determinar un número de giros de 174 (Superpave), con una presión vertical de 600 kPa, ángulo de 1.25° y 30 rev/min, y de 75 golpes por cara (Marshall)

4.3 Pruebas mecánicas a las mezclas asfálticas

Estas pruebas tienen como finalidad evaluar la resistencia de la mezcla asfáltica compactada bajo diferentes condiciones y tipos de carga, utilizando diversos equipos como es la máquina de ensayos Marshall, la máquina de Los Ángeles y la máquina servohidráulica Instron. El fin de estos ensayos es evaluar el desempeño de la mezcla asfáltica compactada bajo diferentes criterios de falla, como pueden ser su resistencia, humedad y desgaste.

4.3.1 Prueba de compresión axial sin confinar

Las pruebas de compresión axial sin confinar se realizaron en la máquina servohidráulica Instron, según la Norma ASTM D1074 a una velocidad de deformación de 0.05 mm/min por cada milímetro de altura de la probeta; como las mezclas asfálticas compactadas tenían en promedio 175 mm de altura, la velocidad de deformación utilizada fue de 8.8 mm/min.

En la Figura 4.7 se muestra una probeta después de ser ensayada en compresión axial sin confinar; las probetas utilizadas para estas, pruebas deben tener una relación altura-diámetro de aproximadamente 2:1.



Figura 4.7
Probeta después de la prueba de compresión axial

4.3.2 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. La determinación consiste en hacer 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 4.8 se observa una probeta durante el ensayo de inmersión-compresión; a su vez, en la Figura 4.9 se aprecia una probeta después de ser ensayada.



Figura 4.8
Ensayo de inmersión-compresión

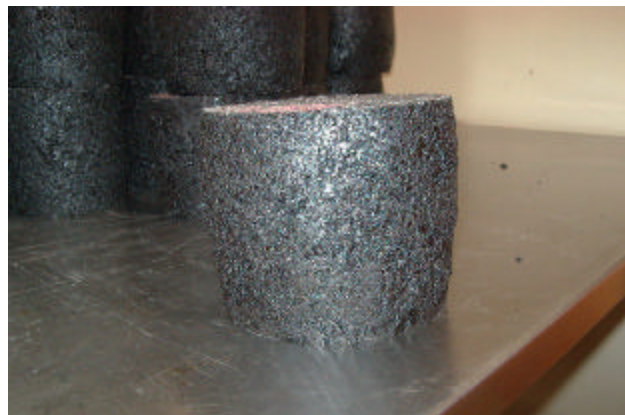


Figura 4.9
Probeta después de ensaye

4.3.3 Prueba de tensión indirecta

Esta prueba evalúa la cohesión de la mezcla asfáltica; y se realizó de acuerdo con la Norma NLT – 346; consiste en ensayar la probeta a una deformación constante de 50.8 mm/min con el fin de calcular en forma indirecta la resistencia a la tensión y donde la mayor oposición a la falla la presenta la cohesión del asfalto con el agregado mineral (Figuras 4.10 y 4.11).

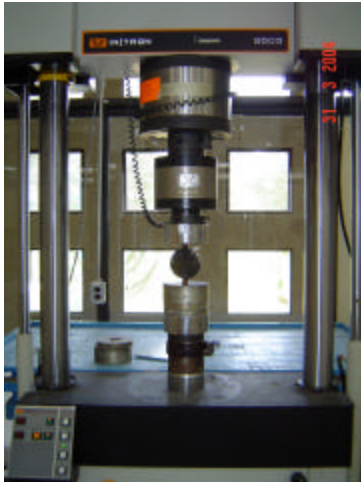


Figura 4.10
Arreglo para prueba de tensión indirecta



Figura 4.11
Probeta después del ensayo

4.3.4 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. Dicha prueba solamente se aplica para probetas fabricadas con el martillo Marshall; 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 4.12); los valores obtenidos se utilizan para determinar el contenido óptimo de asfalto.

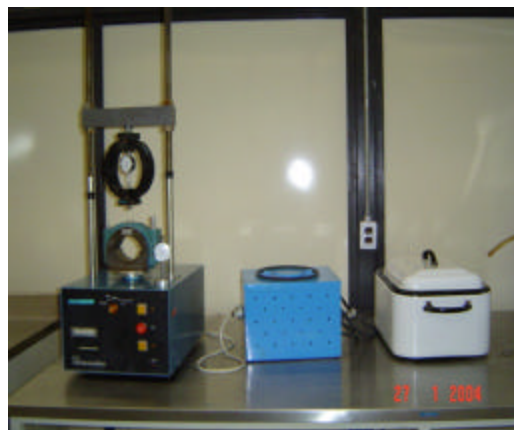


Figura 4.12
Equipo de pruebas Marshall

4.3.5 Ensayo Cántabro

Este ensayo se realiza de acuerdo con la Norma española NLT – 352 con el fin de evaluar el desgaste que puede sufrir la mezcla asfáltica durante su vida útil. Consiste en colocar la probeta en la máquina de Los Ángeles (Figura 4.13) aplicarles 300 giros, el valor de desgaste es la diferencia en masa de las muestras. La Figura 4.14 presenta una comparación con una probeta después de ser ensayada.

$$\text{Desgaste}(\%) = \frac{M_1 - M_2}{M_1}$$

M_1 = masa de la probeta antes de ensaye

M_2 = masa de la probeta después de ensaye



Figura 4.13
Máquina de Los Ángeles



Figura 4.14
Probeta después del ensayo

4.3.6 Analizador de pavimentos asfálticos (APA)

Es un probador de carga multifuncional que se utiliza para evaluar la deformación permanente, agrietamiento por fatiga y susceptibilidad a la humedad de las mezclas asfálticas. El tiempo de prueba para una evaluación completa de deformación permanente es de 2h y 16min (8000 ciclos). La evaluación de la susceptibilidad a la deformación permanente de las mezclas asfálticas se puede determinar tanto en especímenes rectangulares como en cilíndricos, mediante cargas repetidas aplicadas con ruedas y midiendo la profundidad de la huella que deja la rueda. El APA cuenta con un sistema de adquisición de datos automatizado.

Las partes de la rueda de carga y la presión de inflado son representativas de las condiciones actuales en campo. Cada espécimen puede estar sujeto a un diferente nivel de carga. Pueden probarse seis cilindros a la vez bajo temperaturas controlables, tanto en condición seca como en húmeda.

Para la evaluación de esta prueba se utilizó una presión de 100 psi y una carga de 100 lbs, en condición seca, evaluando la deformación permanente de la mezcla asfáltica compactada después de 8000 ciclos de carga. En la Figura 4.15 se observa el equipo APA; de igual forma, en la Figura 4.16 se muestra el equipo en operación.



Figura 4.15
Analizador de pavimentos asfálticos



Figura 4.16
Ejecución de prueba en el APA

5 Análisis de resultados

5.1 Propiedades mecánicas

Las pruebas evaluadas en esta investigación fueron establecidas con el fin de profundizar en las características de la mezclas, bajo diferentes condiciones de falla.

5.1.1 Tensión indirecta

En la Tabla 5.1 se presentan los resultados del ensayo de tensión indirecta para las probetas elaboradas con el martillo Marshall y el compactador giratorio; los parámetros evaluados son la resistencia a la tensión, carga máxima, esfuerzo máximo, deformación unitaria a la falla y el módulo a la falla.

Tabla 5.1
Ensayo de tensión indirecta

Parámetros	Método de diseño	
	Martillo Marshall	Compactador giratorio
Resistencia a la tensión (N/cm ²)	14.64	17.44
Esfuerzo máximo (MPa)	2.02	2.37
Deformación a la falla (%)	1.80	1.46
Módulo a la falla (MPa)	112	167

En la tabla anterior se puede observar que las probetas fabricadas con el método Superpave tienen mayores resistencias y menos deformaciones a la falla, lo que hace que los valores de módulos sean más altos que en el método Marshall.

Las probetas elaboradas con el método Superpave presentan una mayor resistencia a la tensión, lo que representa que el tipo de compactación induce una mayor adherencia entre partículas o que el alto contenido de asfalto en el método Marshall reduce la cohesión de las probetas.

En la Figura 5.1.a se presenta una gráfica de esfuerzo deformación para tres probetas elaboradas con martillo Marshall y en 5.1.b las gráfica esfuerzo-deformación de la pruebas de tensión indirecta para probetas elaboradas con martillo Marshall y con compactador giratorio.

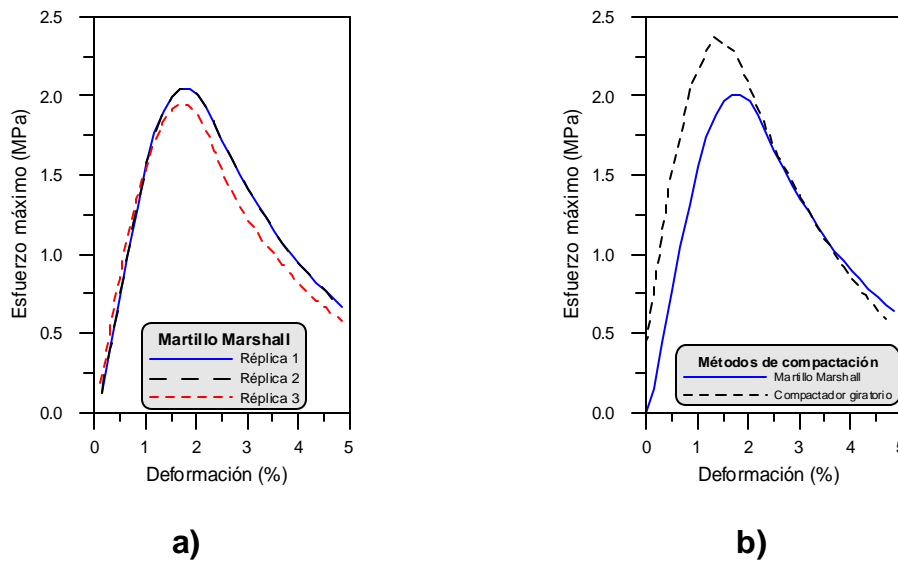


Figura 5.1

Gráfica de esfuerzo-deformación para la prueba de tensión indirecta

En la Figura 5.1.a se observa que las curvas esfuerzo-deformación para las tres réplicas elaboradas con el martillo Marshall tienen una repetibilidad buena, debido a que las tres curvas son muy similares.

Por su parte en la Figura 5.1.b se aprecia que la curva esfuerzo-deformación para las probetas fabricadas con el compactador giratorio tiene una pendiente más pronunciada, lo que produce que tenga una deformación a la falla menor que las probetas elaboradas con el martillo Marshall; de igual forma se refleja una mayor resistencia a la falla para las probetas hechas con el compactador giratorio.

5.1.2 Ensayo Cántabro

En la Tabla 5.2 se presentan los resultados del ensayo Cántabro para las probetas elaboradas con el martillo Marshall y el compactador giratorio.

Tabla 5.2

Resultados de ensayo Cántabro para los métodos Marshall y Superpave

Ligante	Desgaste (%)	
	Superpave	Marshall
AC - 20	16.0	13.2

De la Tabla anterior se puede observar que las mezclas asfálticas fabricadas con el compactador giratorio son más susceptibles al desgaste que las probetas elaboradas con el martillo Marshall.

5.1.3 Prueba de compresión axial sin confinar

En la Tabla 5.3 se presentan los resultados de la prueba de compresión axial sin confinar, evaluando la carga máxima, esfuerzo máximo, deformación unitaria a la falla y el módulo a la falla, para probetas elaboradas con el compactador giratorio

Tabla 5.3
Ensayo de compresión axial sin confinar

Ligante	Probetas de compresión axial			
	Carga máxima (kN)	Esfuerzo máximo (Mpa)	Deformación unitaria	Módulo (Mpa)
AC-20	32,11	4,09	0,0130	314

La Figura 5.2 presenta la variación que existe entre las curvas esfuerzo-deformación para las diferentes réplicas elaboradas con el compactador giratorio.

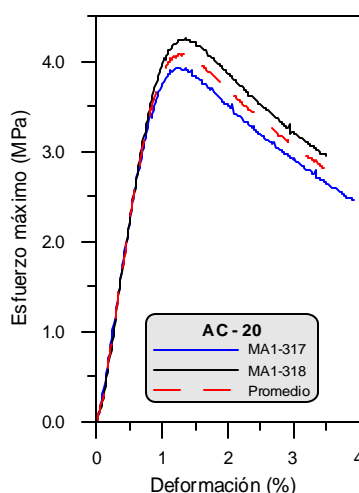


Figura 5.2

Gráfica de esfuerzo-deformación para la prueba de compresión axial sin confinar

En dicha figura se puede observar que las curvas esfuerzo-deformación para las dos réplicas elaboradas con el compactador giratorio tienen una repetibilidad buena, debido a que las dos curvas son muy similares.

5.1.4 Prueba de inmersión-compresión (sensibilidad a la humedad)

En la Tabla 5.4 se presentan los resultados de la prueba de inmersión-compresión, evaluando la carga máxima, esfuerzo máximo, deformación unitaria a la falla y el módulo a la falla, tanto para las probetas sin acondicionamiento como para las sumergidas a 60 °C.

Tabla 5.4
Ensayo de inmersión - compresión

Ligante	Probetas de inmersión - compresión			
	Carga máxima (kN)	Esfuerzo máximo (Mpa)	Deformación unitaria	Módulo (Mpa)
AC-20	46,38	5,91	0,0246	250
AC-20 (sumergido)	52,16	6,64	0,0273	244

Se puede observar que aunque las probetas con acondicionamiento presentan valores de esfuerzos máximos a la falla mayores, pero sus valores de módulo son muy similares, con lo que se puede determinar que la mezcla asfáltica no es susceptible a la humedad y que las variaciones que se presentan pueden estar, más bien atribuidas a la variación que existe en el ensayo.

En la Figura 5.3.a se presenta la gráfica esfuerzo-deformación para las mezclas asfálticas sin acondicionar para los diferentes tipos de ligantes utilizados, en tanto que la 5.3.b corresponde a una comparación de las gráfica esfuerzo-deformación para las mezclas asfálticas acondicionadas y sin acondicionamiento.

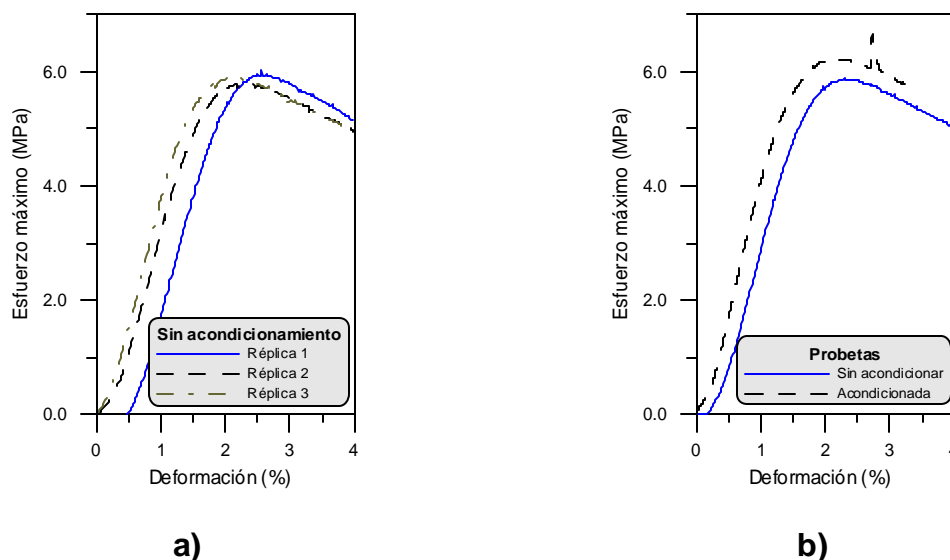


Figura 5.3

Gráfica de esfuerzo-deformación para la prueba de inmersión-compresión

De la gráfica 5.3.a se puede observar que las pendientes de las curvas son muy similares y que la variación radica en la deformación a la falla que presenta cada réplica. En la Figura 5.3.b se aprecia que las pendientes de las curvas para las probetas acondicionadas son similares y que la diferencia entre las curvas radica en que la probeta acondicionada tiene una mayor resistencia a la falla.

5.1.5 Estabilidad y flujo Marshall

En la Tabla 6.5 se presentan los resultados obtenidos en la prueba de estabilidad y flujo Marshall.

Tabla 5.5
Resultados de prueba de estabilidad y flujo Marshall

Ligante	Marshall	
	Estabilidad (kN)	Flujo
AC - 20	16,02	14

El diseño de mezclas asfálticas para el método Marshall presentó un valor de flujo muy cerca de la especificación, b que indica una fricción interna posiblemente baja; esto puede ser debido 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.

5.1.6 Analizador de pavimentos asfálticos (APA)

La Tabla 5.6 presenta los resultados de los ensayos de deformación permanente realizados en el equipo APA para las metodologías Marshall y Superpave, utilizando 8000 ciclos de carga a una temperatura de 64°C.

Tabla 5.6
Deformación permanente por medio del equipo APA

Parámetro	Método de diseño			
	Marshall		Superpave	
	Réplica 1	Réplica 2	Réplica 1	Réplica 2
Deformación (mm)	1,92	1,83	2,09	2,42
Promedio	1,88		2,26	

Se puede deducir de la Tabla anterior que las probetas fabricadas con el compactador giratorio tienen mayor deformación permanente; no obstante, la diferencia no parece ser muy significativa (diferencia de 0,38 mm); cabe señalar que los dos valores son relativamente bajos.

De igual forma se aprecia que la variación entre replicas es aceptable entre 0,1 y 0,3 mm, lo que representa una variación entre 5 y 14% del valor promedio.

Conclusiones

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

Tensión indirecta

Las probetas elaboradas con el compactador giratorio presentaron mayor resistencia a la tensión indirecta, lo que indica mayor cohesión entre partículas.

El incremento en el porcentaje de asfalto de diseño puede producir una reducción en la cohesión entre partículas y un aumento en el porcentaje de deformación a la falla de la mezcla.

Ensayo Cántabro

Las probetas elaboradas con el método Marshall presentaron menos desgaste (3%), que las probetas elaboradas con el Superpave.

Se estima que el aumento en el contenido de asfalto de la mezcla, mejora el desempeño en el ensayo Cántabro.

Compresión axial e inmersión-compresión

Se comprobó que la importancia de las propiedades mecánicas de la mezcla asfáltica no son solamente en función de su resistencia a la falla, ya que probetas con relación altura:diámetro 1:1 tenían mayor resistencia que las con relación 2:1 aunque su deformación es igualmente grande, lo que ocasiono que sus valores de módulo sean menores a los de las probetas con relación 2:1.

Inmersión-compresión y estabilidad y flujo Marshall

Porcentajes altos de asfaltos en la mezcla, producen una reducción en la fricción interna del pavimento.

Por su parte, 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.

Analizador de pavimentos asfálticos

El desempeño de la mezclas asfáltica en relación con la deformación permanente, no parece ser afectada por el método de compactación.

Bibliografía

1. Annual Book of ASTM Standard, 4.03 Roofing and Paving Material; Vehicle-Pavement System (2001).
2. Asociación Mexicana de Ingeniería en 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 Estudio 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 y 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 y 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