



ISSN 0188-7297



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

---

# **COMPORTAMIENTO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS MODIFICADAS CON SBR**

Paul Garnica Anguas  
Horacio Delgado Alamilla  
José Antonio Gómez López  
Álvaro González Madrigal

**Publicación Técnica No 254  
Sanfandila, Qro, 2004**

---

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

**COMPORTAMIENTO DE  
MEZCLAS ASFÁLTICAS  
MODIFICADAS CON SBR**

**Publicación Técnica No 254  
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, así como el Ing Álvaro González Madrigal tesista de la Universidad Autónoma de Chihuahua.

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

---

# Índice

---

<b>Resumen</b>	<b>III</b>
<b>Abstract</b>	<b>V</b>
<b>Resumen ejecutivo</b>	<b>VII</b>
<b>Introducción</b>	<b>1</b>
<b>1 Asfaltos modificados</b>	<b>3</b>
1.1 Principales modificadores de asfalto	3
1.2 Componentes de las sustancias modificadoras más utilizadas	4
1.3 Asfalto ahulado (SBR)	4
1.3.1 Descripción	5
1.3.2 Aplicaciones	5
1.4 Procedimiento de trituración y molienda del hule	6
1.5 Procedimiento de incorporación del SBR	6
1.6 Factores que influyen en el asfalto modificado con hule molido	7
<b>2 Métodos de diseño de mezclas asfálticas</b>	<b>9</b>
2.1 Método Marshall	9
2.1.1 Pruebas a las mezclas asfálticas	9
2.2 Método Superpave	11
2.2.1 Pruebas al agregado mineral	11
2.2.2 Pruebas al cemento asfáltico	12
2.2.3 Pruebas a la mezcla asfáltica	13
<b>3 Descripción del experimento</b>	<b>15</b>
3.1 Caracterización de los materiales	15
3.1.1 Agregado mineral	15
3.1.2 Cemento asfáltico	16
3.1.3 Hule molido (SBR)	18
3.2 Elaboración de la mezcla asfáltica	18
3.2.1 Granulometría	19
3.2.2 Parámetros de la mezcla asfáltica	20
3.3 Pruebas a la mezcla asfáltica	21
3.3.1 Pruebas de volumetría	21
3.3.2 Pruebas mecánicas	22
<b>4 Análisis de resultados</b>	<b>25</b>
4.1 Pruebas volumétricas	25

4.2 Propiedades mecánicas	26
4.2.1 Tensión indirecta	26
4.2.2 Ensayo Cántabro	29
4.2.3 Prueba de compresión axial sin confinar	29
4.2.4 Prueba de inmersión-compresión (sensibilidad a la humedad)	30
4.2.5 Estabilidad y flujo Marshall	32
4.2.6 Analizador de pavimentos asfálticos (APA)	33
<b>Conclusiones</b>	<b>35</b>
<b>Bibliografía</b>	<b>37</b>

# Resumen

---

Se evalúa el comportamiento de las mezclas asfálticas modificadas con la adición de diferentes porcentajes de asfalto ahulado, utilizando las metodologías de diseño Marshall y Superpave. Se ilustra el efecto del SBR en los parámetros volumétricos más importantes en el diseño, como son el volumen de vacíos ( $V_a$ ); vacíos en el agregado mineral (VAM); y vacíos llenos de asfalto (VFA). Al igual se valora la variación en el desempeño de la mezcla asfáltica compactada por la modificación con el SBR, mediante pruebas mecánicas que evalúan parámetros como el esfuerzo y deformación máxima a la falla, desgaste, susceptibilidad a la humedad y deformación permanente.



# Abstract

---

This work evaluates the behavior of hot mix asphalt modified with different percentage of crumb rubber (SBR), using the methodologies of asphalt mix design Marshall and Superpave. It shows the effect of the crumb rubber (SBR) over the volumetric parameters more important in the design as they are the air voids ( $V_a$ ), voids in the mineral aggregate (VMA), voids filled with asphalt (VFA). To the equal the variation in the performance of the paving mixture due to the modification with the crumb rubber (SBR) is evaluated, using mechanical test for evaluated the stress and strain, abrasion, moisture susceptibility and rutting resistance.



# Resumen ejecutivo

---

Uno de los problemas que se enfrenta en la actualidad en México, es la generación de altos volúmenes de contaminantes industriales y el almacenamiento de los mismos, aunado al creciente incremento tanto en número como en magnitud de las cargas de tránsito, ocasionando fallas prematuras en los pavimentos asfálticos.

Investigaciones recientes están buscando el mejoramiento de las mezclas asfálticas para pavimentación, mediante la inclusión de nuevos materiales para optimizar su desempeño.

En los últimos años, uno de los modificadores más utilizados ha sido el asfalto ahulado mediante el empleo de diferentes tipos de residuos de hule, como pueden ser llantas de desecho, SBR, hule natural, polibutadieno y hule reciclado.

En el primer capítulo se presentan los principales modificadores empleados en México, así como una breve descripción de su composición. De igual forma se hace énfasis en uno de los modificadores más utilizados como es el hule de llantas de desecho, mostrando los diferentes procesos de obtención e incorporación del hule, junto con los principales factores que afectan la mezcla asfalto-hule.

El capítulo 2 contiene dos métodos de diseño de mezclas asfálticas: el método Marshall, que es el que más se ha utilizado en México y el Superpave que es el más actual para el diseño de mezclas.

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

Por otra parte, en el capítulo 3 se presenta la descripción del experimento, así como los resultados de las pruebas realizadas, al igual que los criterios adoptados.

Se describen los diferentes tipos de pruebas volumétricas y mecánicas utilizadas para evaluar el desempeño del SBR como modificador del asfalto, mediante diversos criterios, como son el desgaste de la mezcla; deformación permanente; la susceptibilidad a la humedad; parámetros de resistencia, como el esfuerzo y deformación máxima a la falla; al igual que el módulo a la falla del material.

El capítulo 4 exhibe los resultados obtenidos, los cuales muestran los efectos producidos debido al empleo de diferentes porcentajes de SBR a través de la evaluación de propiedades volumétricas y mecánicas.



# Introducción

---

El creciente desarrollo industrial ha generado mejoras a la humanidad, pero también problemas ambientales que afectan en menor o mayor grado al medio que nos rodea; uno de estos problemas, es la generación de residuos industriales y de consumo que por su naturaleza y volumen representan en muchos casos un problema de salud pública, así como para los ecosistemas.

Los residuos sólidos municipales en el país se han estimado en 27.4 millones de toneladas; y el volumen de residuos peligrosos, de 7.7 millones de toneladas para 1994 (SEDESOL: INE.1994), ocasionando una gran desproporción entre el volumen generado e infraestructura de tratamiento. En la república, una gran mayoría de los residuos terminan en el drenaje y basureros, causando problemas ambientales y de salud.

En la última década, en muchos países se ha acentuado la preocupación por la disposición de residuos industriales, que por sus características no biodegradables y alto volumen en que se producen, constituyen un grave problema para el medio ambiente; entre estos se encuentran los residuos de hule como EVA (etilen vinil acetato), PU (poliuretano), y SBR (hule estireno-butadieno), así como los productos fabricados con este último material que al concluir su vida útil vienen a sumarse a la acumulación de este tipo de residuos como es el caso de los neumáticos; muchos de los cuales, son quemados en condiciones no controladas generando un grave deterioro en la calidad del aire.

Aunado a este problema está el creciente incremento tanto en número como en magnitud de las cargas de tránsito, ocasionando fallas prematuras en los pavimentos asfálticos. Se necesitan pavimentos que puedan soportar las cargas ocasionadas por el tránsito vehicular mediante mejoras en las metodologías de diseño.

Sin embargo, actualmente se busca a través de la investigación el mejoramiento de las mezclas asfálticas para pavimentación, mediante la inclusión de nuevos materiales para mejorar su desempeño, siendo uno de los más utilizados el hule de llanta.



# 1 Asfaltos modificados

---

La Norma N-CMT-4-05-002/01 define el asfalto modificado como el producto de la disolución, o incorporación en el asfalto de un polímero o de hule molido de neumático, que son sustancias estables en el tiempo y en los cambios de temperatura y que se añaden al material asfáltico para modificar sus propiedades físicas y reológicas, a fin de disminuir su susceptibilidad a la temperatura y a la humedad, así como a la oxidación.

## 1.1 Principales modificadores del asfalto

Los modificadores del asfalto se pueden clasificar según la Norma N-CMT-4-05-002/01, en cuatro grupos importantes:

### **Polímero tipo I**

Es un modificador de asfaltos que mejora el comportamiento de mezclas asfálticas tanto a altas como a bajas temperaturas. Se fabrica a base de bloques de estireno, en polímeros elastoméricos radiales de tipo bibloque o tribloque, mediante configuraciones como estireno-butadieno-estireno (SBS) o estireno-butadieno (SB), entre otras.

### **Polímero tipo II**

Es un modificador de asfaltos que mejora el comportamiento de mezclas asfálticas a bajas temperaturas. Se hace a base de polímeros elastoméricos lineales, mediante una configuración de caucho de estireno, butadieno-latex o neopreno-latex.

### **Polímero tipo III**

Es un modificador de asfaltos que mejora la resistencia al ahuellamiento de las mezclas asfálticas; disminuye la susceptibilidad del cemento asfáltico a la temperatura y mejora su comportamiento a altas temperaturas. Se obtiene de un polímero de tipo plastómero, mediante configuraciones como etil-vinil-acetato (EVA) o polietileno de baja densidad (HDPE, LDPE), entre otras.

### **Hule molido de neumáticos**

Es un modificador de asfaltos que mejora la flexibilidad y resistencia a la tensión de las mezclas asfálticas, reduciendo la aparición de grietas por fatiga o por cambios de temperatura. Es fabricado con base en el producto de la molienda de neumáticos.

## 1.2 Componentes de las sustancias modificadoras más utilizadas

Los polímeros más comúnmente utilizados son elastómeros, SBR y SBS, así como el plastómero (EVA). A continuación se presenta un resumen de las propiedades de cada componente de estas sustancias:

### Acetato de etilo

Líquido inflamable, incoloro con olor característico a frutas, su punto de ebullición es de 171 °F. Es incompatible y reacciona con los oxidantes, catalizadores para polímeros de vinil, peróxidos, ácidos fuertes y cloruro de aluminio. Puede polimerizarse si es contaminado o sujeto a calentamiento.

### Acetato de vinilo

Líquido incoloro con olor característico a fruta, inflamable. Es compatible y reacciona con los oxidantes, ácidos, bases, sílica gel, alumina, azocompuestos, ozono. Su punto de ebullición es de 162 °F y su punto de inflamación es de 919.01 °F. Puede polimerizarse si es contaminado.

### Estireno

Líquido incoloro amarillo, aceitoso, con olor característico. Puede formar peróxidos en circunstancias específicas, iniciando una polimerización explosiva. La sustancia se puede polimerizar debido al calentamiento suave bajo la influencia de la luz, con peligro de incendio o explosión.

### Butadieno

Aspecto de gas licuado comprimido, incoloro, con olor característico; su punto de ebullición es de -4 °C, su punto de fusión es de -109 °C. Extremadamente inflamable.

## 1.3 Asfalto ahulado (SBR)

En el mercado se pueden encontrar una gran variedad de asfaltos adicionales a los antes mencionados esto debido a que la acción de los modificadores colabora en la tendencia a que el asfalto presente menores variaciones de consistencia por cambios de temperatura.

Con la utilización de asfaltos modificados, las mezclas asfálticas pueden optimizar su desempeño; el grado y tipo de mejoramiento dependerá de la interacción asfalto-modificador. Entre las posibles mejoras se pueden mencionar:

- Disminuir la susceptibilidad térmica
- Aumentar la cohesión interna

- Mejorar la elasticidad y flexibilidad a bajas temperaturas
- Mejorar el comportamiento a la fatiga
- Aumentar la resistencia al envejecimiento
- Reducir la deformación permanente

Cabe mencionar que un sólo modificador no puede lograr todas estas mejoras en el desempeño de la mezcla asfáltica modificada; de echo, la mejora sustancial de una propiedad importante (ejemplo, deformación permanente) conllevará a la disminución de otra (ejemplo, fatiga).

### **1.3.1 Descripción**

En los últimos años, uno de los modificadores más utilizados ha sido el asfalto ahulado mediante el empleo de diferentes tipos de residuos de hule, como puede ser llantas de desecho, SBR, hule natural, polibutadieno y hule reciclado. Esto debido a la búsqueda del aprovechamiento de los residuos sólidos que existen en el país.

El asfalto ahulado está definido en la Norma ASTM como una mezcla de cemento asfáltico, hule de llantas y ciertos aditivos en el cual el hule es al menos el 15% del peso total de la mezcla y tiene una reacción con el cemento asfáltico suficiente para causar un aumento de volumen en las partículas de hule.

### **1.3.2 Aplicaciones**

Los asfaltos modificados con hule se han empleado con frecuencia en tratamientos superficiales de riego con gravilla aplicados a pavimentos fisurados y tratamientos antirreflexión de fisuras entre capas. Asimismo, han tenido una notable difusión como material sellado de fisuras y juntas de pavimentos, como tratamiento de impermeabilización de materiales susceptibles al agua y por último como ligante en mezclas asfálticas de distintos tipos fabricadas en caliente.

En tratamientos superficiales se ha obtenido un buen comportamiento, siempre que las fisuras que presentaba el pavimento tenían poco movimiento. Pero presentan comportamiento deficiente cuando estas fisuras son reflejadas desde capas inferiores y con movimientos relativos importantes entre sus bordes o fisuras reflejadas en capas asfálticas que han cubierto antiguos pavimentos de concreto.

En cuanto al asfalto modificado con hule como material de sellado de fisuras, tiene cualidades como una buena adherencia con los bordes de las fisuras, elasticidad y poca susceptibilidad térmica. Se han observado y obtenido excelentes resultados en pavimentos asfálticos con fisuras poco activas, pero no así como sellador de juntas entre losas de concreto, en las que aunque más económico que otros materiales, se ha demostrado una menor eficiencia.

## 1.4 Procedimiento de trituración y molienda del hule

Para reducir el hule procedente de neumáticos o de otras fuentes, a tamaños de varios centímetros se emplean trituradores similares a los habituales en el tratamiento de residuos sólidos urbanos y desechos industriales; este proceso se denomina proceso primario o de trituración y se realiza principalmente con máquinas trituradoras que cuentan de una tolva reguladora que alimenta al conjunto formado de dos o más carboles paralelos de cuchillas que giran en sentido contrario o en el mismo sentido y a distinta velocidad. Después se realiza el proceso secundario o molienda a temperatura ambiente, el cual consiste en reducir el tamaño de los granos de hule hasta aproximadamente 0.32 mm; estas máquinas constan de un árbol rotatorio y una parte fija que lo rodea; se trata de equipos más ligeros que los trituradores, tanto en peso como en potencia, y su principal característica es que todo el proceso se realiza a temperatura ambiente.

Finalmente, se realiza un tercer proceso denominado criogenización del hule o molienda en húmedo, la cual se basa en la reducción de la temperatura de un material hasta conseguir su fragilización; para ello, el procedimiento más utilizado es la inmersión directa en baño de nitrógeno líquido. La temperatura de criogenización del hule se alcanza aproximadamente a los -60 °C. A esa temperatura el hule puede molerse con molinos de martillos o de bolas, obteniendo hule molido de 0.16 mm; en cuanto a la molienda húmeda, es simplemente formar un “lodo” de agua y partículas de hule, que mediante la acción producida por unas muelas va reduciendo el tamaño. Es usual aplicar un último proceso que es de separación de acero y de fibras, que se realiza principalmente con separadores magnéticos.

## 1.5 Procedimiento de incorporación del SBR

Como sucede con otros aditivos, el hule puede incorporarse en los materiales asfálticos mediante dos procedimientos:

### Vía húmeda

El cemento asfáltico se modifica con caucho de neumáticos, como si se tratase de cualquier otro polímero.

### Vía seca

Se utiliza solamente en la fabricación de mezclas asfálticas en caliente y consiste en la mezcla directa del hule con el agregado mineral durante el proceso de fabricación de la mezcla asfáltica, antes de incorporar el asfalto al mezclador.

## **1.6 Factores que influyen en el asfalto modificado con hule molido**

La interacción entre el asfalto y el hule se ha explicado tradicionalmente como un proceso por el que este último incorpora en sus cadenas poliméricas parte de los componentes más volátiles del asfalto. El grano del caucho o hule se ablanda y sufre un cierto hinchamiento. El resultado es el aumento de la viscosidad del ligante, este proceso se ve afectado por diversos factores que a continuación se mencionan.

### **Características del asfalto original**

El empleo de asfaltos de alta penetración conduce a asfaltos-caucho poco consistentes a altas temperaturas, por el contrario, los asfaltos con poca penetración dan lugar a asfaltos-caucho demasiado rígidos a bajas temperaturas.

### **Composición del hule**

Las variaciones en la composición del hule procedente del neumático de desecho no suelen ser significativas.

### **Incorporación de aceites compatibles y otros aditivos**

La función principal de los aceites es limitar la viscosidad para facilitar la aplicación del producto, así como disminuir su módulo a bajas temperaturas.

Otros aditivos frecuentes son polímeros con alto contenido de hule natural, que se descomponen e incorporan en el asfalto a temperaturas más bajas que el hule de neumáticos, proporcionando al ligante modificado mayor adhesividad y flexibilidad pero no reducen la susceptibilidad térmica tanto como el hule de neumáticos.

### **Contenido de hule en la mezcla**

Al aumentar el contenido del hule se incrementa el grado de modificación del asfalto modificado con hule. Al realizarse pruebas con un asfalto AC-20 de aproximadamente penetración 60/70, con hule menor a 1.25mm, el período de interacción fue de 90 minutos a 176°C y empleando el mismo método de mezcla se llega a la conclusión de que a mayor contenido de hule sobre el asfalto, aumenta claramente la viscosidad, así como el punto de reblandecimiento y el porcentaje de retorno elástico.

### **Granulometría del hule**

Cuanto menor es el tamaño de las partículas de hule, mayor será su superficie específica y con ella el grado de interacción con el asfalto; como efecto contrario se ha observado que las partículas más pequeñas tienden a despolimerizarse, lo que supone una disminución de la viscosidad.

### **Superficie específica**

Esta propiedad no sólo depende de la granulometría del hule sino que también se relaciona con el procedimiento de molienda a que ha sido sometido.

### **Impurezas del hule**

Estas impurezas son desde humedad, acero y fibras, hasta cualquier contaminante. La humedad puede provocar vapor de agua al mezclar hule y asfalto. Por ello, el hule debe analizarse periódicamente introduciendo muestras en estufa a 100°C, hasta peso constante.

### **Mezclador empleado**

En general, los asfaltos modificados con hule fabricados por medios mecánicos apropiados presentan una menor dispersión en la viscosidad (homogeneidad) y una disminución algo más asentada de cíclicos, tratándose por tanto de una interacción asfalto-hule más completa.

### **Tiempo y temperatura de reacción**

Al aumentar la temperatura se acelera la interacción química entre el asfalto y el hule, con temperaturas entre 165 y 200°C. El almacenamiento posterior no debe superar los 150 –160°C para evitar la degradación del hule.

En cuanto a tiempos de mezclado, suelen ser suficientes períodos de no más de una hora, sobre todo si se almacena en caliente la mezcla en un segundo tanque provisto de agitación. La viscosidad aumenta en cuanto sube la temperatura y es mayor el tiempo de mezclado.

## **2 Métodos de diseño de mezclas asfálticas**

---

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

### **2.1 Método 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. El cuerpo de ingenieros de Estados Unidos, a través de una extensiva investigación y estudios de correlación, mejoró y adicionó ciertos aspectos al procedimiento de prueba Marshall, a la vez que desarrolló un criterio de diseño de mezclas.

El método original 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 procedimiento está pensado para diseño en laboratorio y control en campo de mezclas asfálticas en caliente con graduación densa. Debido a que la prueba de estabilidad es de naturaleza empírica, la importancia de los resultados en términos de estimar el comportamiento en campo se pierde cuando se realizan modificaciones a los procedimientos estándar.

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

#### **2.1.1 Pruebas a las mezclas asfálticas compactadas**

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

##### **Determinación de la gravedad específica**

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

mezclas asfálticas compactadas 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 recurre a la norma ASTM D1188; en caso contrario se utiliza la norma ASTM D2726.

### **Prueba de estabilidad y flujo**

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

Con el equipo de prueba listo se removerá el espécimen colocado en baño María y cuidadosamente se secará la superficie. Ubicando y centrando el espécimen en la mordaza inferior, se colocará 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 la falla. El punto de falla se define por la lectura de carga máxima obtenida. El número total de Newtons (lb) requeridos para que se produzca la falla del espécimen deberá registrarse como el valor de estabilidad Marshall.

Mientras 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 deberá tomar la lectura y registrarla como el valor de flujo final. La diferencia entre el valor de flujo final e inicial, expresado en unidades de 0.25 mm (1/100"), será el valor del flujo Marshall.

### **Análisis de densidad y vacíos**

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

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

## 2.2 Método Superpave

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

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

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

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

### 2.2.1 Pruebas al agregado mineral

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

#### Propiedades de consenso

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

#### Propiedades de la fuente de origen

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

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

## 2.2.2 Pruebas al cemento asfáltico

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

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

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

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

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

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

En la Tabla 2.1 se pueden observar las pruebas utilizadas en el Superpave y el propósito de las mismas.

**Tabla 2.1**  
**Propósito de las pruebas de asfaltos Superpave**

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

### **2.2.3 Pruebas a las mezclas asfálticas**

Los requerimientos del diseño de mezclas asfálticas de Superpave son:

#### **Requerimientos volumétricos de la mezcla**

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

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

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

#### **Proporción de polvo**

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

#### **Susceptibilidad a la humedad**

El ensayo de susceptibilidad a la humedad para evaluar una HMA al desprendimiento es la Norma 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 Descripción del experimento

---

La investigación se realizó utilizando dos métodos de diseño: el método Marshall y el método Superpave, siguiendo tres parámetros fundamentales: caracterización de materiales, elaboración de las probetas asfálticas y pruebas a la mezcla asfáltica.

### 3.1 Caracterización de los materiales

En esta etapa se llevaron a cabo pruebas en los materiales utilizados, como son el agregado mineral, ligante asfáltico y hule molido.

#### 3.1.1 Agregado mineral

El material granular en estudio proviene del banco de materiales La Cañada, Saldarriaga, Qro (Figura 3.1) y está compuesto de roca basáltica triturada.



**Figura 3.1**  
**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 1.

**Tabla 3.1**  
**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 integran la Tabla 3.2.

**Tabla 3.2**

**Pruebas adicionales a los agregados**

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

### 3.1.2 Cemento asfáltico

Se efectuaron dos tipos de pruebas al ligante, de acuerdo con la metodología Superpave, mismas que se describen a continuación:

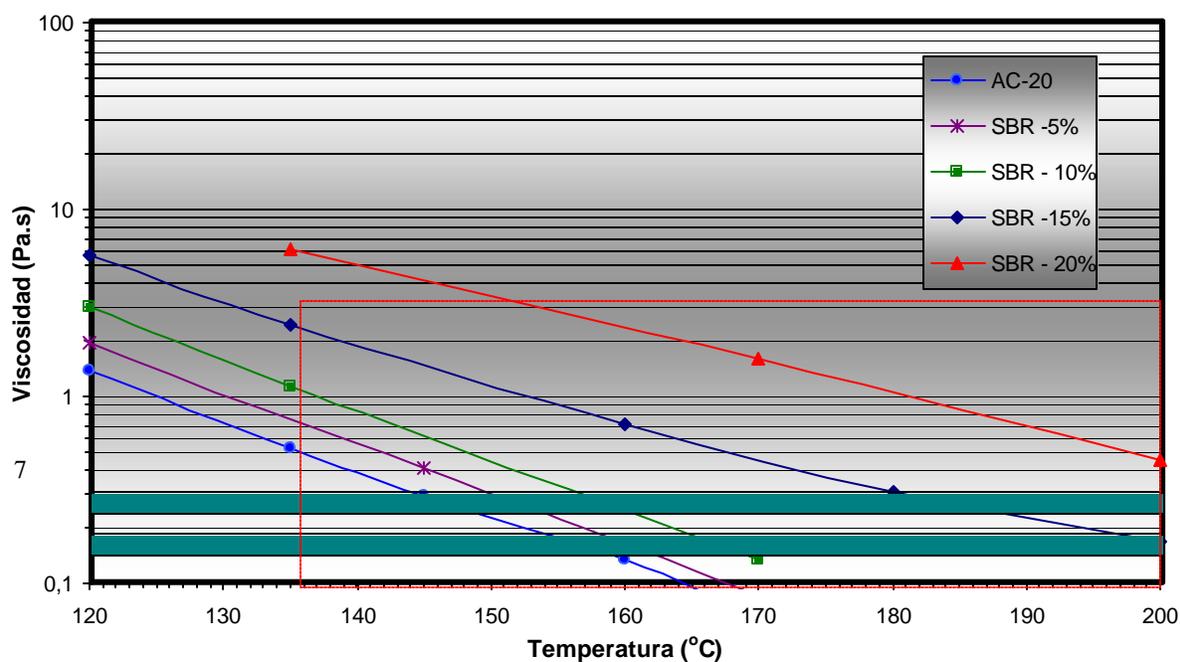
#### Viscosímetro rotacional (RV)

Las temperaturas de mezclado y compactación de la muestra están dadas con base en la viscosidad del asfalto, en donde se especifica que para mezclarse y compactarse el asfalto, éste debe tener una viscosidad entre 0.15 y 0.19 Pa.s y entre 0.25 y 0.31 Pa.s respectivamente; para tal determinación se realizó una carta de viscosidad-temperatura.

Con objeto de elaborar la carta de viscosidad-temperatura, se realizaron pruebas en el viscosímetro rotacional a diferentes temperaturas y así conocer la viscosidad atribuible a una temperatura específica. Las diferentes temperaturas, así como los valores obtenidos se pueden observar en la Figura 3.2; de igual forma en la Tabla 3.3 se muestran los resultados de las temperaturas de mezclado y compactación para los diversos porcentajes de SBR.

Se puede observar que las temperaturas tanto de mezclado como de compactación, se incrementan con la adición del hule molido

Para determinar la viscosidad, la especificación Superpave establece que el asfalto debe tener una viscosidad máxima de 3 Pa.s (3000cP) para una temperatura de 135 °C; en la Figura 3.2 se dibujó un área de control con las especificaciones de temperatura y viscosidad mencionadas, en donde todas las curvas que sobrepasen la parte superior del cuadro no cumplirán con la especificación. En este caso particular, el ligante con 20 % de SBR tiene una viscosidad muy alta, lo que lo hace inapropiado para su manejo en plantas y en su almacenamiento.



**Figura 3.2**  
**Gráfica de viscosidades**

**Tabla 3.3**  
**Temperaturas de compactación y mezclado**

Ligante	Temperatura (°C)	
	Compactación	Mezclado
AC-20	144 - 148	153 - 158
AC20 / SBR 5%	149 - 153	157 - 161
AC20 / SBR 10%	155 - 160	164 - 170
AC20 / SBR 15%	178 - 186	194 - 201
AC20 / SBR 20%	209 - 215	221 - 227

### Reómetro dinámico de corte (DSR)

Conjuntamente se determinó la visco-elasticidad del cemento asfáltico, definiendo su grado de desempeño (PG); para ello se utilizó el ligante original (AC-20), y la adición de SBR en porcentajes de 5, 10, 15 y 20 % .

Los resultados que se obtuvieron se muestran en la Tabla 3.4, tomando como parámetros de evaluación el ángulo de fase, módulo de corte ( $G^*$ ) y el criterio de evaluación  $G^*/\text{Sen}(\delta)$ .

**Tabla 3.4**  
**Resultados del reómetro de corte dinámico**

Parámetros	Ligante			
	AC - 20	AC-20 c/SBR 5%	AC-20 c/SBR 10%	AC-20 c/SBR 15%
Ángulo de fase ( grados )	84,61	83,60	80,08	74,15
Módulo de corte ( $G^*$ , kPa)	1,515	1,120	1,642	1,759
$G^* / \text{Sen}(\delta)$ , (kPa)	1,522	1,127	1,667	1,828
PG	64	70	70	76

En la tabla anterior se aprecia el incremento en el grado de desempeño del ligante asfáltico (PG), conforme se incrementa el porcentaje de hule molido.

### 3.1.3 Hule molido (SBR)

Para esta investigación se utilizó un elastómero (hule estireno-butadieno, SBR); el producto fue proporcionado por el CIATEC de la ciudad de León, Gto. El hule es de color negro, con un tamaño menor a 0,150 mm.

Para adicionar el SBR al asfalto, se utilizó un mezclador de alto torque; el mezclado se realizó a 150 °C por un período de 30 min y una velocidad de 500 rev/min, utilizando un bastidor de sizalla rectangular.



**Figura 3.3**  
**Hule molido (SBR)**

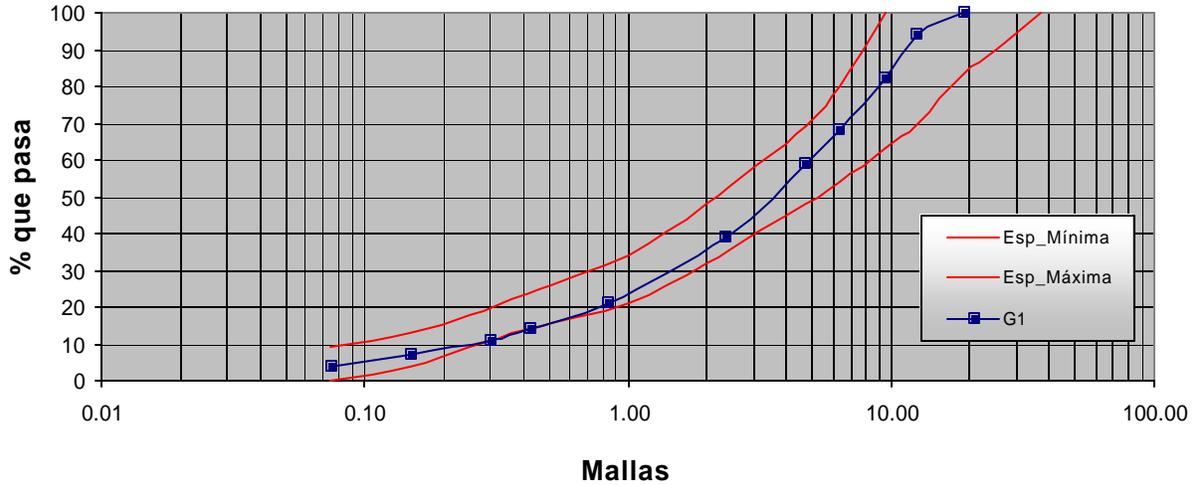
## 3.2 Elaboración de la mezcla asfáltica

Al evaluar las variaciones en cuanto al desempeño que sufren las mezclas asfálticas al adicionar diferentes porcentajes de SBR, con los métodos de diseño Marshall y superpave; 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.

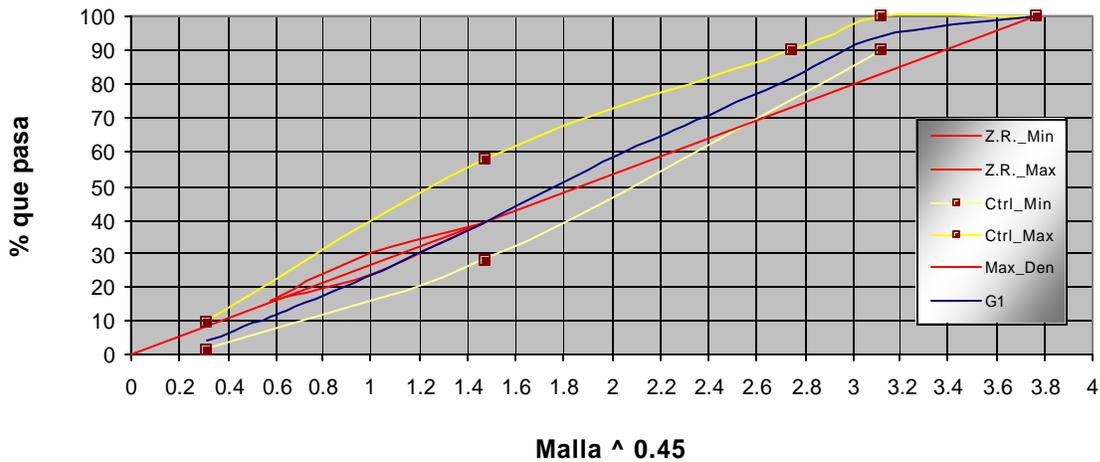
### 3.2.1 Granulometría

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).



**Figura 3.4**  
**Granulometría Marshall**

Como se observa en la Figura 3.4, 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 3.5**  
**Granulometría Superpave**

La granulometría Superpave (Figura 3.5) cuenta con restricciones diferentes, como son los puntos de control; estos puntos 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 ya que produciría una mezcla demasiado susceptible a la rigidez del asfalto.

### 3.2.2 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 en los dos métodos de compactación.

La determinación de las alturas de las probetas está en función de la clase de prueba mecánica que se quiera realizar en la mezcla asfáltica. Para esto se manejaron cuatro tipos de alturas de probeta:

- Altura de 57 mm; para 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; 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
- Altura de 180 mm (2:1); con estas probetas se puede realizar la prueba de compresión axial sin confinar, al igual que pruebas de carga cíclica para determinar la deformación de la mezcla asfáltica

#### Compactación

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 ello se requiere conocer el tránsito vehicular (en ESAL) y la temperatura de lugar. En esta investigación se estableció un tránsito de  $15 \times 10^6$  ESAL y una temperatura de pavimento de hasta 39 °C.

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



**Figura 3.6**  
**Compactación Superpave**



**Figura 3.7**  
**Compactación Marshall**

### 3.3 Pruebas a las mezclas asfálticas

Los diferentes tipos de pruebas a la mezcla asfáltica están divididos en dos fases; la primera, con el fin de evaluar las características volumétricas en razón de los diferentes equipos de compactación utilizados; en la segunda fase se valorarán los parámetros de resistencia de la mezcla asfáltica mediante pruebas mecánicas, con el fin de evaluar la influencia de la compactación bajo diversas condiciones de falla.

Antes de efectuar cualquier prueba en las mezclas asfálticas, se debe determinar la altura y diámetro de las mismas; en el caso de las probetas elaboradas en el compactador giratorio, no fue necesario ya que el compactador las proporciona en forma directa.

#### 3.3.1 Pruebas de volumetría

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:

##### **Gravedad específica de la mezcla asfáltica compactada (Gmb)**

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); en caso de no cumplir, se determinará mediante ASTM D118.

### **Gravedad teórica máxima de la mezcla (Gmm)**

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

### **3.3.2 Pruebas mecánicas**

Tienen como finalidad evaluar la resistencia de la mezcla asfáltica compactada bajo diferentes condiciones y tipos de carga, utilizando equipos como la máquina Marshall, la máquina de Los Ángeles y la máquina servohidráulica Instron, al igual que el analizador de pavimentos asfálticos (APA).

#### **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.

#### **Prueba de Inmersión-compresión (sensibilidad a la humedad)**

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 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 evalúan 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.

#### **Prueba de tensión indirecta**

Esta prueba evalúa la cohesión de la mezcla asfáltica; se realizó de acuerdo con la Norma NLT – 346 y 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.

### **Analizador de pavimentos asfálticos (APA).**

Es un probador de carga multifuncional que se utiliza para evaluar 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 húmeda.

Para la evaluación de esta prueba se utilizó una presión de 100 psi y una carga de 100 lb, en condición seca, evaluando la deformación permanente de la mezcla asfáltica compactada después de 8000 ciclos de carga

### **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 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; los valores obtenidos se utilizan para determinar el contenido óptimo de asfalto.

### **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 y aplicarle 300 giros; el valor de desgaste es la diferencia en masa de las muestras.



## 4 Análisis de resultados

El análisis de resultados está dividido en dos fases; la primera, es evaluar las propiedades volumétricas de la mezcla asfáltica, para después evaluar en la segunda etapa, la influencia del SBR en la resistencia de la mezcla asfáltica compactada bajo diferentes condiciones de carga.

### 4.1 Propiedades volumétricas

En las Tablas 4.1 y 4.2 se presentan los resultados de las pruebas de densidades a las mezclas asfálticas, así como los parámetros del diseño volumétrico evaluados, utilizando diferentes porcentajes de SBR para las dos metodologías en cuestión.

**Tabla 4.1**

**Variación de la volumetría, con diferentes porcentajes de SBR (Superpave)**

Gmb	Gmm	%Gmm	% Va	VMA	VFA	% SBR
2.407	2.497	96.4%	3.6%	14	74	0
2.403	2.497	96.2%	3.8%	14	73	5
2.382	2.497	95.4%	4.6%	15	69	10
2.347	2.497	94.0%	6.0%	16	62	15

**Tabla 4.2**

**Variación de la volumetría, con diferentes porcentajes de SBR (Marshall)**

Gmb	Gmm	%Gmm	% Va	VMA	VFA	% SBR
2.355	2.458	95.8%	4.2%	16	74	0
2.357	2.458	95.9%	4.1%	16	75	5
2.364	2.458	96.2%	3.8%	16	76	10
2.320	2.458	94.4%	5.6%	17	68	15

De este análisis se pueden deducir varios comportamientos:

La densidad teórica máxima no cambia con la adición de SBR para ninguno de los métodos; esto se debe a que la densidad del hule es similar a la del asfalto y a que la proporción de masa del SBR con respecto a la masa total de la mezcla es casi insignificante.

Se puede observar un cambio en la densidad de la mezcla asfáltica compactada (Gmb); en el caso del método Superpave disminuye conforme aumenta el porcentaje de SBR, lo que ocasiona que el porcentaje de vacíos cambie completamente de lo estipulado en el diseño, aunque las variaciones no parecen afectar en demasía el VFA y el VMA; sin embargo, la densidad Gmb obtenida para el 15% de SBR afecta notablemente las propiedades volumétricas. En el caso de la metodología Marshall, el cambio parece ser a la inversa ya que el Gmb aumenta ocasionando cambios en el volumen de vacíos; el VFA para 10% de SBR sobrepasa la especificación, esto debido a que se compactó más de lo esperado presentando un exceso de asfalto en la mezcla.

De igual forma se observa que con la adición de 15% de SBR al asfalto, la densificación de la mezcla cambia notablemente en los dos métodos, dando un valor de porcentaje de Va alto; esto puede atribuirse a que la temperatura de mezclado y compactación son muy altas, ocasionando dificultad en su control durante el proceso de elaboración de la mezcla debido a que los diferenciales de temperatura que se presentan, son muy altos lo que repercute en una probeta inadecuada.

De estos resultados se puede pensar que el tipo de compactación tiene una gran influencia cuando se agrega un polímero a la mezcla asfáltica; en este caso en particular, el SBR es producto de la trituración de hule de suelas, lo que le proporciona cierta elasticidad a la mezcla afectando su compactación.

## 4.2 Propiedades mecánicas

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

### 4.2.1 Tensión indirecta

En la tabla 4.3 se presentan los resultados del ensayo de tensión indirecta para las probetas Superpave con diferentes porcentajes de SBR; los parámetros evaluados son la carga máxima, esfuerzo máximo, deformación unitaria a la falla y el módulo a la falla.

**Tabla 4.3**  
**Ensayo de tensión indirecta (Superpave)**

Ligante	Probetas Superpave			
	Carga máxima (kN)	Esfuerzo máximo (Mpa)	Deformación unitaria	Módulo (Mpa)
AC-20	18,65	2,37	0,0146	167
AC-20 / SBR 5%	17,22	2,19	0,0153	144
AC-20 / SBR 10%	12,04	1,53	0,0168	92
AC-20 / SBR 15%	13,64	1,74	0,0151	116

Se puede observar en dicha tabla que con el aumento del porcentaje de SBR, el esfuerzo máximo de la mezcla asfáltica compactada disminuye; mientras que la deformación a la falla se mantuvo estable, lo que ocasiona una reducción en el módulo a la falla conforme aumenta el porcentaje de SBR.

Por su parte en la tabla 4.4 se incluyen los resultados del ensayo de tensión indirecta para las probetas Marshall con diferentes porcentajes de SBR; los parámetros evaluados son la carga máxima, esfuerzo máximo, deformación unitaria a la falla y el módulo a la falla.

**Tabla 4.4**  
**Ensayo de tensión indirecta (Marshall)**

Ligante	Probetas Marshall			
	Carga máxima (kN)	Esfuerzo máximo (Mpa)	Deformación unitaria	Módulo (Mpa)
AC-20	15,83	2,02	0,0180	112
AC-20 / SBR 5%	16,04	2,04	0,0151	136
AC-20 / SBR 10%	13,00	1,66	0,0129	130
AC-20 / SBR 15%	15,19	1,93	0,0157	123

Resulta conveniente ver en la tabla mencionada que el esfuerzo máximo se mantiene estable conforme varía el porcentaje de SBR; igual se observa que la deformación a la falla también se mantiene estable, dando como resultado valores de módulos muy similares, pero un poco mayores con la adición del SBR.

En la Figura 4.1.a y 4.1.b se trazaron la gráficas esfuerzo-deformación de la pruebas de tensión indirecta para los métodos Marshall y Superpave, respectivamente.

Al respecto, en la Figura 4.1.a es obvio que el comportamiento de la mezcla asfáltica compactada con martillo Marshall, no se afecta con la adición de SBR.

En tanto que en la Figura 4.1.b se observa que las probetas fabricadas con el compactador giratorio son más susceptibles al modificador, debido a que sus curvas esfuerzo-deformación disminuyen conforme aumenta el porcentaje de SBR.

Otra situación especial que se puede apreciar es que las dos mezclas, con el 10% de SBR presentaron los valores más bajos de resistencia y módulo a la falla.

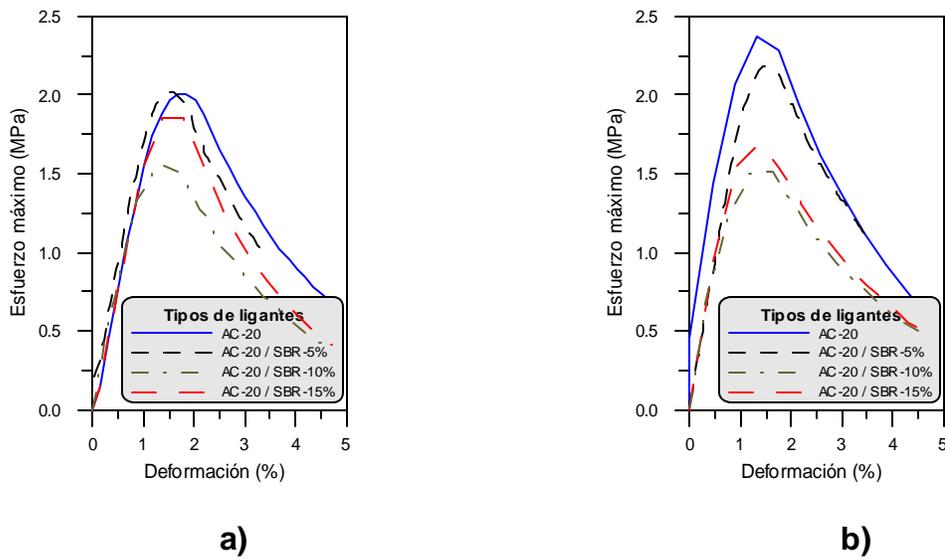


Figura 4.1

Gráfica de esfuerzo-deformación para la prueba de tensión indirecta

En la Tabla 4.5 aparecen los resultados de la variación de la resistencia a la tensión indirecta por la adición de SBR, con las dos metodologías utilizadas (Marshall y Superpave).

Tabla 4.5  
Resistencia a la tensión indirecta

Ligante	Resistencia (N/cm <sup>2</sup> )	
	Superpave	Marshall
AC - 20	17,44	14,59
AC - 20 / SBR - 5%	15,82	14,94
AC - 20 / SBR - 10%	10,89	12,01
AC - 20 / SBR - 15%	12,27	9,13

Al respecto, se observa que las probetas realizadas con base en el sistema Superpave reducen su resistencia a la tensión indirecta conforme aumenta el porcentaje de SBR; para el caso de la metodología Marshall las resistencias máximas parecen no verse afectadas por la adición del SBR; se puede decir que en el caso de Superpave existe una baja en la adherencia de las partículas por el añadido de SBR.

## 4.2.2 Ensayo Cántabro

En la Tabla 4.5 se presentan los resultados del ensayo Cántabro de los cuatro ligantes evaluados con los métodos Superpave y Marshall.

**Tabla 4.5**  
**Resultados de ensayo Cántabro para los métodos Marshall y Superpave**

Ligante	Desgaste (%)	
	Superpave	Marshall
AC - 20	16.0	13.2
AC - 20 / SBR - 5%	16.7	13.4
AC - 20 / SBR - 10%	21.8	16.1
AC - 20 / SBR - 15%	20.8	11.0

Conforme la Tabla anterior las mezclas asfálticas fabricadas con el método Superpave no parecen afectarse, sino hasta después de la incorporación de más del 5 % de SBR.

En el caso del método Marshall, tampoco parece ser representativa la adición del 5% de SBR, aunque para porcentajes más altos las variaciones parecen ser erráticas.

## 4.2.3 Prueba de compresión axial sin confinar

En la Tabla 4.6 se presentan los resultados de la prueba de compresión axial sin confinar con diferentes porcentajes de SBR, evaluando la carga máxima, esfuerzo máximo, deformación unitaria a la falla y el módulo a la falla, para la metodología Superpave.

**Tabla 4.6**  
**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
AC-20 / SBR 5%	27,51	3,50	0,0112	313
AC-20 / SBR 10%	28,34	3,61	0,0085	425
AC-20 / SBR 15%	27,19	3,46	0,0074	465

De la Tabla anterior se puede observar que conforme aumenta el contenido de SBR, disminuye el esfuerzo máximo a la falla; de igual forma, se reduce la deformación unitaria a la falla, en cuanto al módulo a la falla se observa que para contenidos de 10% o más de SBR, el módulo muestra una mejora sustancial.

En cuanto a las figuras, la Figura 4.2.a presenta la variación que existe entre ensayos y el promedio de los mismos, con un asfalto AC-20; y en la 4.2.b la variación de las curvas esfuerzo-deformación por la adición de diferentes porcentajes de SBR.

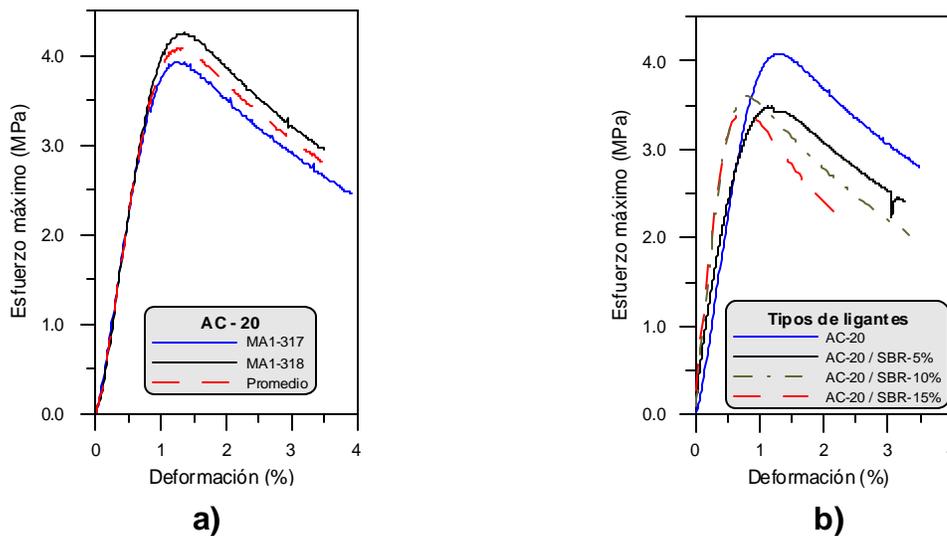


Figura 4.2

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

Retomando la Figura 4.2.a, resulta claro observar que no existe mucha variabilidad entre los ensayos realizados para cada tipo de ligante y que en la 4.2.b el asfalto AC-20 presenta el mayor esfuerzo a la falla, así como que los esfuerzos máximo a la falla no tienen una variación significativa cuando se adicionan diferentes porcentajes de SBR; a diferencia de la deformación a la falla, la cual disminuye cuando se añade el SBR, conduciendo a valores de módulos a la falla más altos.

### 4.2.4 Prueba de Inmersión-compresión (sensibilidad a la humedad)

La Tabla 4.7 se integra con los resultados de la prueba de inmersión-compresión con diferentes porcentajes de SBR, 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.

En ese sentido la Tabla 4.7 hace ver que en las probetas sin acondicionar conforme aumenta el contenido de SBR, disminuye el esfuerzo máximo a la falla; mientras que la deformación a la falla aumenta ligeramente, ocasionando que los módulos de deformación disminuyan notablemente. Las probetas acondicionadas presentan un comportamiento similar, y solamente para el 10 % de SBR resulta una disminución de la deformación a la falla, generando un módulo elevado.

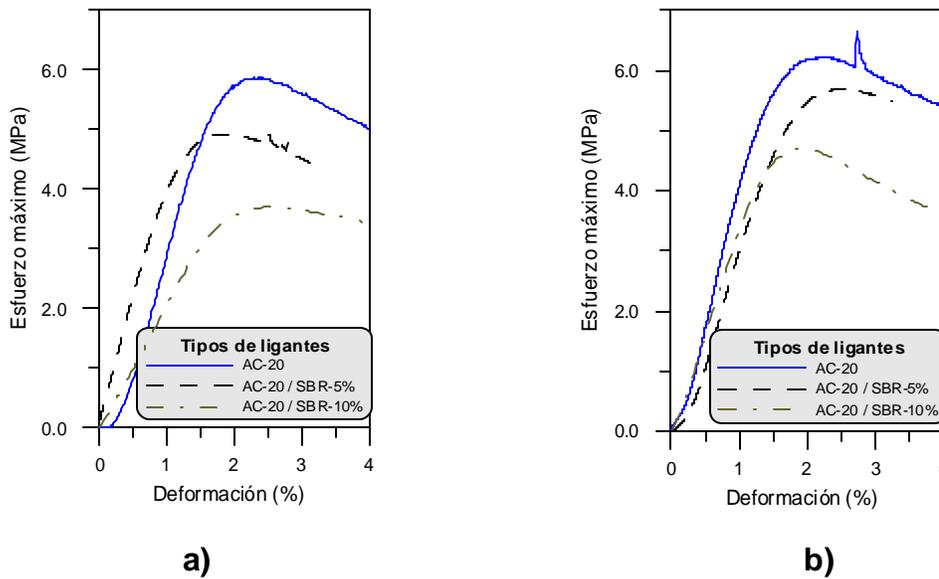
**Tabla 4.7**  
**Ensayo de inmersión – compresión**

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
AC-20 / SBR 5%	40,69	5,18	0,0266	195
AC-20 / SBR 5% (sumergido)	45,16	5,75	0,0294	202
AC-20 / SBR 10%	29,24	3,72	0,0263	142
AC-20 / SBR 10% (sumergido)	37,33	4,75	0,0193	250

Se puede observar que aunque las probetas con acondicionamiento tienen valores de esfuerzos máximos a la falla mayores, sus valores de módulo resultan 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 4.3.a aparece la gráfica esfuerzo-deformación para las mezclas asfálticas sin acondicionar para los diferentes tipos de ligantes utilizados y en la 4.3.b la gráfica esfuerzo-deformación para las mezclas asfálticas acondicionadas para los diferentes tipos de ligantes utilizados.

Como adición, en la 4.3.a se puede observar que las pendientes de las curvas varían en forma dispersa con la adición de SBR, siendo la reducción del esfuerzo máximo a la falla el parámetro más afectado; y que en la 4.3.b, las pendientes de las curvas para las probetas acondicionadas son similares, con una tendencia a decrecer conforme aumenta el porcentaje de SBR.



**Figura 4.3**

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

Como complemento informativo, se aprecia en la Figura 4.3.a que las pendientes de las curvas varían en forma dispersa con la adición de SBR, siendo la reducción del esfuerzo máximo a la falla el parámetro más afectado; a la vez se observa en la 4.3.b que las pendientes de las curvas para las probetas acondicionadas son similares, con una tendencia a disminuir conforme aumenta el porcentaje de SBR.

**4.2.5 Estabilidad y flujo Marshall**

En la Tabla 4.8 se presentan los resultados obtenidos en la prueba de estabilidad y flujo Marshall, con los diferentes ligantes utilizados.

**Tabla 4.8**  
**Resultados de prueba de estabilidad y flujo Marshall**

Ligante	Marshall	
	Estabilidad (kN)	Flujo
AC - 20	16,02	14
AC - 20 / SBR - 5%	20,08	12
AC - 20 / SBR - 10%	16,72	14
AC - 20 / SBR - 15%	15,39	14

Se indica en la misma tabla que los valores de estabilidad no tienen una tendencia definida; por tanto, no se puede encontrar alguna relación entre ellos. En cuanto al valor de Flujo se deduce que algunos valores se reducen pero al igual que el valor de estabilidad, no existe una relación entre los resultados y el porcentaje de SBR adicionado.

#### 4.2.6 Analizador de pavimentos asfálticos (APA)

La Tabla 4.9 corresponde a la variación en los resultados de deformación permanente realizados en el equipo APA, con la adición de diferentes porcentajes de SBR para las metodologías Marshall, utilizando 8000 ciclos de carga a una temperatura de 64°C.

**Tabla 4.9**  
**Variación de la deformación permanente por la adición de SBR**

Ligante	Marshall (deformación, mm)			
	Réplica 1	Réplica 2	Promedio	% de cambio en la deformación
AC – 20	1,92	1,83	<b>1,88</b>	<b>Inicial</b>
AC – 20 / SBR – 5%	2,21	1,74	<b>1,98</b>	<b>+ 5,3 %</b>
AC – 20 / SBR – 10%	1,35	1,52	<b>1,44</b>	<b>- 23,4 %</b>
AC – 20 / SBR – 15%	1,24	0,97	<b>1,11</b>	<b>- 41,0 %</b>

Se observa que conforme aumenta el porcentaje de SBR disminuye la deformación permanente, lográndose una reducción de hasta el 41 % de la deformación para el asfalto modificado con 15 % de SBR.

A su vez la Tabla 4.10 se presenta la variación en los resultados de deformación permanente realizados en el equipo APA, con adición de diferentes porcentajes de SBR, para la metodología Superpave, utilizando 8000 ciclos de carga a una temperatura de 64°C.

**Tabla 4.10**  
**Variación de la deformación permanente por la adición de SBR**

Ligante	Superpave (deformación, mm)			
	Réplica 1	Réplica 2	Promedio	% de cambio en la deformación
AC – 20	2,09	2,42	<b>2,26</b>	<b>Inicial</b>
AC – 20 / SBR – 5%	2,62	2,52	<b>2,57</b>	<b>+ 13,7 %</b>
AC – 20 / SBR – 10%	1,73	2,11	<b>1,92</b>	<b>- 15,0 %</b>
AC – 20 / SBR – 15%	0,96	1,29	<b>1,13</b>	<b>- 50,0 %</b>

Se aprecia que conforme aumenta el porcentaje de SBR, disminuye la deformación permanente, lográndose una reducción de hasta el 50 % de la deformación para el asfalto modificado con 15 % de SBR.

De igual forma resulta que un porcentaje de SBR igual o menor al 5%, no tiene ninguna influencia en el desempeño de la mezcla, debido a que las variaciones que presenta corresponden más a la variación de la propia prueba, que por la adición del SBR.

# Conclusiones

---

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

Para obtener variación en el desempeño de la mezcla asfáltica, se deben tener porcentajes de SBR mayores a 5%.

Las características determinadas como resultado de esta investigación debida a los parámetros volumétricos se resume como sigue:

Con la adición del SBR el grado de densificación de la mezcla asfáltica cambia dependiendo del tipo de compactador utilizado

- Martillo Marshall: la densidad aumenta
- Compactador giratorio: la densidad disminuye

Para porcentajes de SBR de 15% o mayores, las temperaturas de mezclado y compactación son tan altas que con un equipo convencional no se puede tener un control adecuado de la densificación de las mezclas, debido a los diferenciales de temperatura que se presentan.

Las propiedades de las mezclas asfálticas determinadas en esta investigación, se sintetizan a continuación:

## Tensión indirecta

Para mezclas asfálticas elaboradas con el método Superpave, conforme aumenta el porcentaje de SBR se reduce la cohesión entre partículas (agregado mineral). En cambio, en el método Marshall la adición de SBR no parece tener una influencia significativa.

Las curvas esfuerzo-deformación de las probetas fabricadas con la metodología Superpave, disminuyen conforme aumenta el porcentaje de SBR.

## Ensayo Cántabro

Para porcentajes de 5% o mayores de SBR, se presenta un mayor desgaste en las probetas realizadas con la metodología Superpave.

## Compresión axial sin confinar

Para porcentajes de SBR mayores a 5%, la mezcla asfáltica compactada tiene una mejora en su deformación a la falla (deformación permanente), al igual que en sus valores de módulo a la falla.

### Inmersión compresión

Las mezclas asfálticas compactadas no presentaron susceptibilidad a la humedad para ninguno de los porcentajes de SBR utilizados.

La resistencia máxima de la mezcla asfáltica disminuye con la adición de SBR.

### Estabilidad y flujo Marshall

La adición de SBR no parece tener influencia en la estabilidad y flujo de la mezcla asfáltica compactada.

### Analizador de pavimentos asfálticos

Para mezclas asfálticas modificadas con porcentajes mayores a 5% de SBR, existe una mejoría sustancial en su susceptibilidad a la deformación permanente, logrando disminuciones de hasta el 50% de la roderas.

# 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. California Department of Transportation, Asphalt Rubber Usage Guide, (Enero 1993).
9. Gallego J. Mezclas bituminosas modificadas por adición de polvo de neumáticos, Cuadernos de Investigación, CEDEX, España (2000).
10. Murphy M, O'Mahony M, Lycett C y Jamieson I, Materials and Structures/Matériaux et Contructions, Vol 33, pp 438(2000)
11. Leite LFM y Soares BG, Petroleum Science and Technology 17(9&10), 1071(1999)
12. Gawell y Slusarski L, Progress in Rubber and Plastics Technology, Vol 15, No 4, 235(1999)
13. Kent Newman J, Journal of Elastomers and Plastics, Vol 30, 245(1998)
14. Hernández G, Rodríguez R, Blanco R y Castaño VM, Intern. J Polymer Mater, Vol 35 129(1997)
15. Blanco R, Rodríguez R, García G y Castaño VM, Journal of Applied Polymer Science, Vol 61, 1493(1996)

16. Instituto Mexicano del Transporte, Manual de Calidad de los Materiales en Secciones Estructurales de Pavimentos Carreteros, Documento Técnico, No 1 (1990).
17. Botasso H G, Gonzalez R O, Rosato M, Rebollo O, Rivera J J, Asfaltos modificados, fijación de residuos contaminantes, Universidad Tecnológica Nacional, Argentina.
18. Jorge B Sousa, George Way, John T Harvey y Mickey Hines, Comparison of Mix Design Concepts, Transportation Research Record, No 1492.
19. National Asphalt Training Center, Background of Superpave Asphalt Mixtures Design and Analysis, SHRP-A-379, FHWA-SA-95-003.
20. Strategic Highway Research Program, Superior Performing Asphalt Pavement: The Product of the SHRP Asphalt Research Program, SHRP-A-410.
21. Thomas W Kennedy, Ensayos y especificaciones de los ligantes asfálticos en el sistema Superpave, Superpave Center at Austin, Texas (USA, 1996)
22. AASHTO Innovate Highway Technologies.  
[//Leadstates.tamu.edu/sp/index.stm](http://Leadstates.tamu.edu/sp/index.stm)
23. Public Roads: Superpave comes of Age.  
[www.tfhre.gov/pubrds/02sep/10.htm](http://www.tfhre.gov/pubrds/02sep/10.htm)
24. Superpave Mix Design  
[www.utexas.edu/research/superpave/mix/index.html](http://www.utexas.edu/research/superpave/mix/index.html)
25. The Superpave Gyrotory Compactor  
[www.utexas.edu/research/superpave/articles/gyrate.html](http://www.utexas.edu/research/superpave/articles/gyrate.html)
26. Infratech Polymers.inc  
[www.infratech.com/mixes.htm](http://www.infratech.com/mixes.htm)
27. Crum Rubber Modifier in Asphalt Pavement  
[www.rubberpavement.org/library/fp25\\_ch1.asp](http://www.rubberpavement.org/library/fp25_ch1.asp)



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