



Certificación ISO 9001:2000 ‡  
Laboratorios acreditados por EMA §

---

# **ANÁLISIS DE VARIANZA DEL EFECTO DE ALGUNOS FACTORES QUE INFLUYEN EN LA DEFORMACIÓN PERMANENTE DE MEZCLAS ASFÁLTICAS**

Paul Garnica Anguas  
Horacio Delgado Alamilla  
Carlos Daniel Sandoval Sandoval

**Publicación Técnica No 272  
Sanfandila, Qro, 2005**

---

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

**Análisis de varianza del efecto de  
algunos factores que influyen en la  
deformación permanente de  
mezclas asfálticas**

**Publicación Técnica No 272**  
**Sanfandila, Qro, 2005**

---



---

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

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

---



# Índice

---

<b>Resumen</b>	<b>III</b>
<b>Abstract</b>	<b>V</b>
<b>Resumen ejecutivo</b>	<b>VII</b>
<b>1 Desempeño de la carpeta asfáltica en el pavimento flexible</b>	<b>1</b>
1.1 Comportamiento del ligante asfáltico	1
1.2 Comportamiento del agregado mineral	3
1.3 Comportamiento de la mezcla asfáltica	5
1.3.1 Agrietamiento por baja temperatura	5
1.3.2 Agrietamiento por fatiga	6
1.3.3 Deformación permanente	8
<b>2 Deformación permanente en la mezcla asfáltica</b>	<b>9</b>
2.1 Tipos de deformación permanente	9
2.1.1 Deformación permanente en las capas subyacentes	9
2.1.2 Deformación permanente en las mezclas asfálticas	8
2.2 Comportamiento reológico de la mezcla asfáltica	11
2.3 Respuesta de la mezcla asfáltica a los esfuerzos de corte	12
2.4 Mecanismo de la deformación permanente	13
2.5 Factores que influyen en la deformación permanente	15
2.5.1 Agregado pétreo	15
2.5.1.1 Granulometría	15
2.5.1.2 Textura y angularidad	15
2.5.1.3 Tamaño máximo de la mezcla de agregados	17
2.5.2 Ligante asfáltico	17
2.5.3 Aspectos de la mezcla asfáltica	18
2.5.3.1 Metodología de diseño	18
2.5.3.2 Contenido de asfalto	18
2.5.3.3 Vacíos de aire	18
2.5.3.4 Vacíos en el Agregado Mineral (VAM)	19
2.5.3.5 Energía de compactación en laboratorio	19
2.5.3.6 Energía de compactación en campo	19
2.5.4 Temperatura	20
2.5.5 Tránsito	21
2.6 Relación entre la deformación permanente y la práctica de diseño de pavimentos	22
2.7 Estimación de la profundidad de rodera	23
2.7.1 Análisis elástico	23
2.7.2 Análisis viscoelástico	24
2.7.3 Comparación entre la metodología elástica y viscoelástica	24

<b>3</b>	<b>Evolución de las ruedas cargadas</b>	<b>27</b>
3.1	Dispositivos de ruedas cargadas	27
3.1.1	Rueda cargada de Hamburgo	27
3.1.2	Rueda cargada LCPC	28
3.1.3	Evaluador de pavimentos de la universidad de Nottingham	29
3.1.4	Rueda cargada de Georgia	30
3.1.5	Analizador de pavimentos asfálticos (APA)	31
3.2	Factores que afectan el resultado de los ensayos	33
3.2.1	Porcentaje de vacíos	33
3.2.2	Temperatura	33
3.2.3	Elaboración de las probetas de ensaye	33
3.2.4	Magnitud de la carga aplicada	34
3.2.5	Tamaño máximo del agregado	34
3.3	Experiencia en uso de ruedas cargadas	34
<b>4</b>	<b>Descripción del experimento</b>	<b>37</b>
4.1	Selección de los materiales	37
4.1.1	Agregado mineral	37
4.1.1.1	Dosificación de la mezcla de agregados	37
4.1.1.2	Granulometría	38
4.1.2	Ligante asfáltico	39
4.1.2.1	Viscosímetro Rotacional (RV)	39
4.1.2.2	Reómetro de corte dinámico (DSR)	40
4.2	Características de la mezcla asfáltica	42
4.2.1	Porcentaje de asfalto y niveles de compactación	42
4.2.2	Elaboración de la mezcla asfáltica	43
4.2.3	Compactación	44
4.3	Ensayos fundamentales a la mezcla asfáltica	46
4.3.1	Gravedad específica neta de la mezcla compactada (Gmb)	46
4.3.2	Gravedad específica teórica máxima (Gmm)	48
4.4	Susceptibilidad a la deformación permanente en el APA	49
<b>5</b>	<b>Análisis de resultados</b>	<b>53</b>
5.1	Análisis estadístico	53
5.1.1	Análisis de varianza	53
5.1.2	Análisis de residuales	54
5.2	Deformación permanente	55
5.3	Esfuerzos de corte	61
	<b>Conclusiones</b>	<b>67</b>
	<b>Bibliografía</b>	<b>69</b>

# Resumen

---

Se estudia el efecto que presentan las características de la mezcla asfáltica compactada con la metodología Superpave, en la respuesta a ensayos mecánicos realizados en laboratorio. Aspectos como el nivel de compactación, volumen de asfalto, y modificación del ligante asfáltico se intercambiaron durante la experimentación a fin de conocer la influencia de estos, en el desempeño de la mezcla. Se evalúa la susceptibilidad de la mezcla asfáltica a la deformación permanente mediante el Analizador de Pavimentos Asfálticos (APA). Además se estudia el efecto del ligante asfáltico, y la mezcla de agregados en las mediciones de los esfuerzos de corte durante la compactación giratoria.



## **Abstract**

---

This work study the effect of the compacted hot mix asphalt characteristic by means of the response of mechanical laboratory tests using the Superpave method as hot mix asphalt design method. Aspects as compaction level, asphalt content and asphalt binder modification were interchanged during the experiment with the purpose of knowing their influence in the hot mix asphalt performance. It evaluates the hot mix asphalt rut susceptibility by means of the Asphalt Pavement Analyzer (APA). Furthermore it studies both the asphalt binder and aggregate blend effect and shear stress measured during the gyratory compaction.



# Resumen ejecutivo

---

El incremento en el volumen del tránsito y de las cargas impuestas por éste, exige mezclas cada vez más durables y con mejor desempeño, por lo que actividades como el diseño, fabricación y colocación de la mezcla asfáltica deben llevarse a cabo al más alto nivel, optimizando los recursos disponibles. A menudo, la práctica actual del diseño de mezclas asfálticas sólo se limita a determinar el contenido de asfalto en la mezcla. Sin embargo, a este hecho le debe preceder una serie de análisis en donde se tomen en cuenta todas las variables que van influir directamente en su comportamiento.

El propósito principal de esta investigación es realizar un análisis de las variables de mayor influencia en la deformación permanente de la carpeta asfáltica, siendo este criterio de desempeño uno de los más importantes en el diseño de un pavimento, y más aún en México debido a la temperatura, clima y condiciones de tránsito tan adversas que existen en el país

El capítulo uno se destina a describir aquellas fallas en la carpeta asfáltica que más atañen al ingeniero de pavimentos, y se comenta en qué medida contribuyen los materiales, de manera individual y en conjunto, en el desarrollo de este tipo de deterioros.

En el presente trabajo se pone especial énfasis en el tema de la deformación permanente en la carpeta asfáltica, visto como una problemática funcional y de seguridad para el usuario, por lo que se dedica un capítulo en especial donde se tratan aspectos relacionados con la importancia de poseer características reológicas adecuadas en la mezcla asfáltica, a fin de evitar la acumulación de deformaciones plásticas en la superficie de rodamiento. Se abordan también los principales factores que propician la formación de roderas en el pavimento, y se dan algunas recomendaciones a nivel de diseño, con el propósito de mitigar este problema del que tanto adolecen los pavimentos asfálticos de nuestra infraestructura carretera.

En el tercer capítulo se toca el tema de la evaluación de la deformación de la mezcla asfáltica en laboratorio, mediante ensayos de simulación como los que se llevan a cabo con dispositivos de ruedas cargadas (wheel tracking testers). Se describen los principales dispositivos de ruedas cargadas de mayor uso en el mundo, y se destacan algunas experiencias en el uso de estos equipos en actividades de control de calidad de la mezcla asfáltica.

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.

Se llevó a cabo una evaluación de la susceptibilidad a la deformación permanente de la mezcla asfáltica compactada en el Analizador de Pavimentos Asfálticos (APA), el cual es un dispositivo de rueda cargada que se ha utilizado por algunas agencias de transporte en los Estados Unidos para adoptar criterios de aceptación y rechazo en actividades del control de calidad, así como prueba complementaria en el diseño de mezclas asfálticas.

En el último capítulo se muestran los resultados de la investigación, divididos en dos partes: una que presenta la susceptibilidad a la deformación evaluada en laboratorio, y otra que analiza los esfuerzos de corte que se producen durante la densificación de la mezcla en el compactador giratorio; para la realización de estos análisis se utilizaron diferentes herramientas estadísticas como son el análisis de varianza y diseño de experimentos, al igual se presentan diferentes mapas de contorno, los cuales tienen como fin presentar de manera gráfica la influencia de diferentes variables.

# 1 Desempeño de la carpeta asfáltica en el pavimento flexible

El concreto asfáltico, o HMA (Hot Mix Asphalt), es un material de pavimentación constituido por un ligante asfáltico y agregado mineral. El ligante puede ser un cemento asfáltico o un cemento asfáltico modificado, que actúa como un agente ligante que aglutina las partículas en una masa cohesiva. El agregado mineral o material pétreo con ciertas características de resistencia, durabilidad y graduación, al ser ligado por el material asfáltico actúa como una estructura pétreo que aporta resistencia y rigidez a la mezcla. Al incluir, tanto ligante asfáltico como material pétreo al concreto asfáltico, su comportamiento se afecta por las propiedades individuales de cada componente, y por la interrelación de estos dentro del sistema.

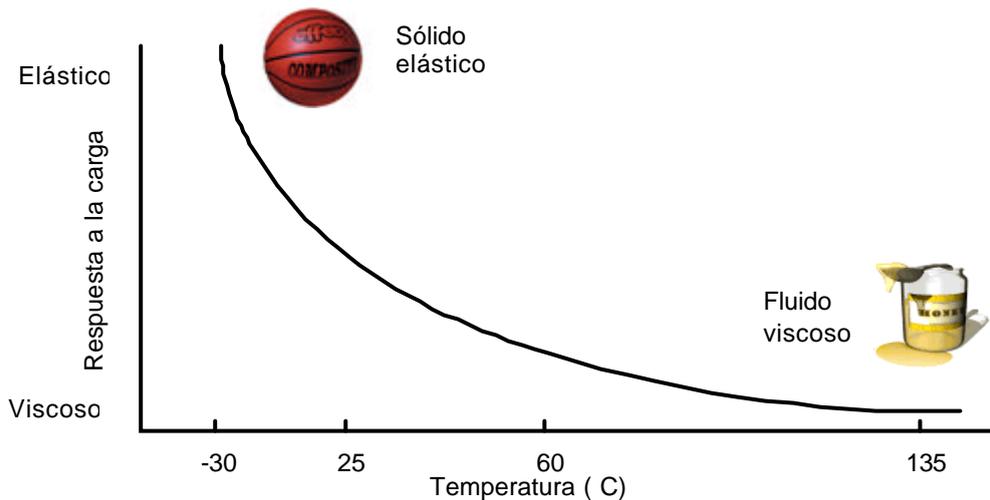
## 1.1 Comportamiento del ligante asfáltico

La más importante característica del ligante asfáltico, muchas veces una ventaja, y a veces una desventaja, es su susceptibilidad térmica. Otro aspecto que influye de manera determinante en el comportamiento del ligante es el tiempo de aplicación de la carga. Como el comportamiento del cemento asfáltico es dependiente de la temperatura y de la duración del tiempo de aplicación de la carga (Figura 1.1), ambos factores pueden intercambiarse. Es decir, una baja velocidad de carga puede simularse con temperaturas elevadas, y una alta velocidad de carga puede simularse con bajas temperaturas. Por ello, los ensayos de caracterización de los cementos asfálticos deben especificar la temperatura y la velocidad de aplicación de carga, para que los resultados del ensayo sean efectivamente interpretados.



**Figura 1.1**  
**Dependencia tiempo-temperatura del cemento asfáltico**

El cemento asfáltico es un material visco-elástico por que exhibe simultáneamente características viscosas. A altas temperaturas (mayor a 100°C), el cemento asfáltico actúa casi como fluido viscoso, y a muy baja temperatura (menor a 0°C) se comporta como un sólido elástico. A una temperatura intermedia, que es la condición prevista en el pavimento, el cemento asfáltico tiene características de ambos estados, un fluido viscoso y un sólido elástico (Figura 1.2).



**Figura 1.2**  
**Comportamiento visco-elástico del asfalto**

Al estar compuesto de moléculas orgánicas, el cemento asfáltico reacciona con el oxígeno del medio ambiente. Esta reacción se denomina “oxidación”, y cambia la composición y la estructura de las moléculas de asfalto, haciendo más dura y frágil la estructura del asfalto dando origen al “endurecimiento por envejecimiento”. La oxidación se produce más rápidamente a altas temperaturas; es por ello que parte del endurecimiento ocurre durante el proceso de producción, cuando es necesario calentar la mezcla asfáltica para permitir la elaboración, mezclado y compactación.

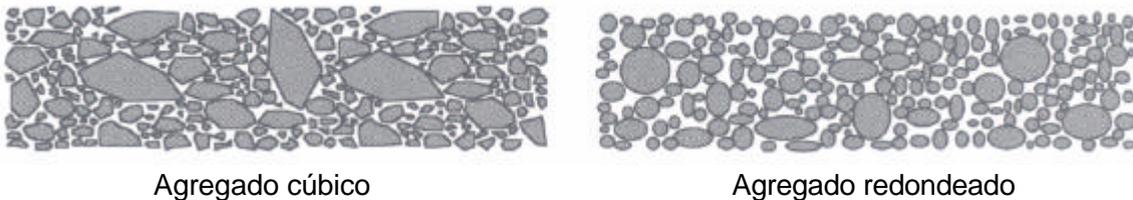
Este es también el motivo por el cual la oxidación es más crítica en cementos asfálticos utilizados en pavimentos en climas cálidos y desérticos. Los ligantes asfálticos modificados son productos concebidos para superar las propiedades del asfalto original, mejorando el desempeño de la carpeta asfáltica a largo plazo.

Si bien los modificadores pueden afectar muchas propiedades; la mayoría de ellos intenta reducir la dependencia con la temperatura, el endurecimiento por oxidación del cemento asfáltico, y la susceptibilidad a la humedad de la mezcla.

## 1.2 Comportamiento del agregado mineral

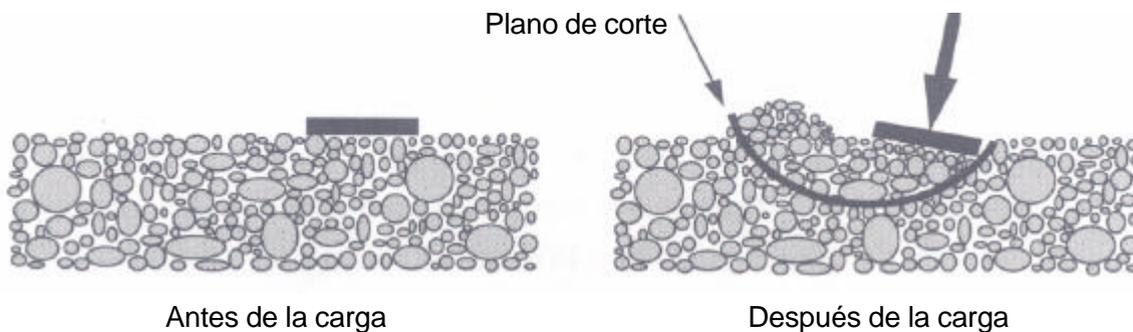
Los materiales pétreos empleados para la elaboración de concreto asfáltico pueden o no tener algún tipo de tratamiento previo a su utilización. La aplicación de tratamientos al agregado mineral, tienen como objeto mejorar ciertas características de la mezcla asfáltica; estos tratamientos pueden ser el lavado del agregado, el cribado o la trituración parcial o total.

Independientemente de la fuente (métodos de procesamiento u origen mineralógico) se espera que el agregado provea un resistente y durable esqueleto pétreo para tolerar las repetidas aplicaciones de carga. Agregados de textura rugosa, de buena cubicidad, dan más resistencia que los redondeados. Aunque una pieza de agregado redondeado podría poseer la misma resistencia interna de una pieza angular, las partículas angulares tienden a cerrarse más apretadamente, resultando una fuerte trabazón de las partículas, a diferencia de lo que ocurre con las partículas redondeadas, ya que tienden a deslizarse unas sobre otras (Figura 1.3).



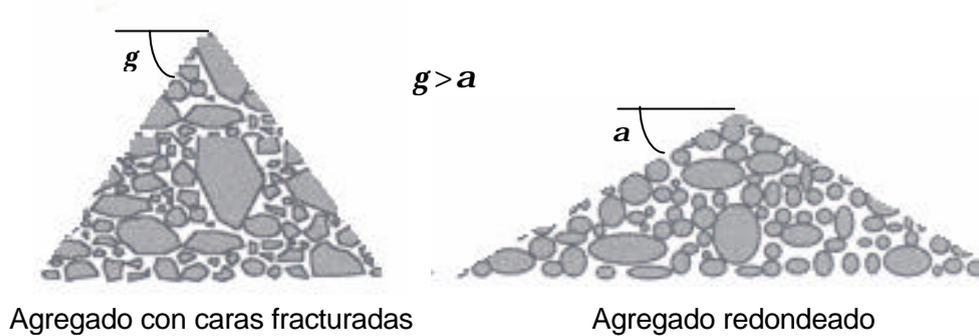
**Figura 1.3**  
**Estructura pétreo de la mezcla**

Cuando una masa de agregados es cargada (Figura 1.4), puede generarse dentro de la masa un plano por el que las partículas sean deslizadas o cizalladas unas respecto a otras, lo cual resulta en una deformación permanente de la masa. Es en este plano, donde las tensiones de corte exceden a la resistencia al corte de la masa de agregados. La resistencia al corte del agregado pétreo es de crítica importancia en el desempeño de una carpeta asfáltica, ya que provee en gran medida la resistencia a la deformación permanente de la mezcla.



**Figura 1.4**  
**Comportamiento del agregado a la carga de corte**

El comportamiento a la resistencia al corte de los agregados con superficies fracturadas y de los agregados lisos se puede observar fácilmente en las pilas de acopio, en cuales los agregados triturados forman pilas más empinadas y estables que los redondeados (Figura 1.5). Los ángulos de reposo son mayores en los materiales con caras fracturadas.



**Figura 1.5**  
**Comportamiento de los agregados en las pilas de acopio**

De acuerdo con la teoría de Mohr-Coulomb, la resistencia al corte de una mezcla de agregados depende de: cuán unidas estén las partículas del agregado ( el término usual es cohesión), la tensión normal a que están sometidos los agregados, y la fricción interna de los agregados.

Una masa de agregados tiene relativamente baja cohesión. Así, la resistencia al corte depende principalmente de la oposición al movimiento que ofrecen los agregados. Además, cuando es cargada, la masa de agregados tiende a ser más fuerte porque la tensión resultante tiende a unir a los agregados más estrechamente entre sí, lo que ocasiona que la resistencia al corte en la masa de agregados aumente.

El ángulo de fricción interna indica la capacidad del agregado para entrelazarse y así crear una masa de agregados casi tan fuerte como las partículas individuales.

Para asegurar una mezcla de materiales resistente a emplear en la elaboración de un concreto asfáltico, se deben especificar propiedades del agregado que mejoren la fricción interna de la mezcla de agregados; esto se logra normalmente recurriendo a porcentajes de caras fracturadas en el material grueso que integra la mezcla.

## 1.3 Comportamiento de la mezcla asfáltica

El comportamiento de la mezcla asfáltica se explica mejor considerando que el cemento asfáltico y el agregado mineral actúan como un sistema. Para una mayor comprensión del comportamiento de una mezcla asfáltica, es necesario identificar los tipos básicos de deterioros que el ingeniero trata de evitar: la fisuración por baja temperatura, la fisuración por fatiga, y la deformación permanente (roderas).

### 1.3.1 Agrietamiento por baja temperatura

Este tipo de deterioro se caracteriza por la aparición de fisuras transversales que se producen con un espaciamiento notablemente uniforme. La fisuración perpendicular al eje del camino, por lo general no se asocia a las cargas del tránsito. Cuando la carpeta se encuentra sobre una losa de concreto asfáltico, el fenómeno puede atribuirse a la reflexión de las grietas que existen en la losa.

La carpeta se contrae debido a las bajas temperaturas, originando esfuerzos de tensión dentro de la capa; en algún lugar a lo largo de la carpeta se excede la resistencia a la tracción, y la capa asfáltica se fisura.

El ligante asfáltico juega un papel importante en la fisuración por baja temperatura. Las mezclas asfálticas elaboradas con un cemento asfáltico de naturaleza dura o propensa a la oxidación, serán más susceptibles a presentar este tipo de deterioro. Se ha visto que el empleo de ligantes blandos y resistentes al envejecimiento, reducen notablemente la fisuración por baja temperatura; también es importante lograr mezclas asfálticas impermeables con un contenido de vacíos de aire adecuado, con el propósito de que el cemento asfáltico que constituye la mezcla no resulte excesivamente oxidado.



**Figura 1.6**  
**Agrietamiento por baja temperatura**

### **1.3.2 Agrietamiento por fatiga**

La fisuración por fatiga es un deterioro que con frecuencia se produce en la huella donde las cargas pesadas se aplican. La aparición de fisuras longitudinales intermitentes a lo largo de la huella son un signo prematuro de la fisuración por fatiga; en algún momento estas fisuras iniciales se unirán con otras, causando un estado intermedio de la fisuración por fatiga dando lugar a lo que se conoce como “piel de cocodrilo”. Un estado de severidad más avanzado de la fatiga, resulta con la dislocación y desprendimiento de bloques de carpeta asfáltica, bajo la acción del tránsito, con llevando a la formación de baches en la superficie de rodamiento.

Una mezcla asfáltica muy rígida tiende a oponer baja resistencia a la fatiga cuando la estructura del pavimento permite deflectar a la carpeta asfáltica. Materiales muy rígidos, altas deflexiones y altos niveles de tensiones conducen a vidas útiles, reducidas por la fatiga.

El mecanismo de fatiga no puede enfocarse como un problema de los materiales exclusivamente, ya que este mecanismo se produce generalmente por un número de factores que deben generarse simultáneamente; obviamente un factor trascendental son las cargas pesadas repetidas en el pavimento.

La estructura del pavimento juega un rol central en este tipo de deterioro, ya que una subrasante con un drenaje pobre, resulta en pavimentos blandos con altas deflexiones, pobres diseños y/o deficiente construcción de las capas del pavimento; así como espesores de pavimento muy delgados y rígidos, son también propensos a sufrir altas deflexiones.



**Figura 1.7**  
**Agrietamiento por fatiga**

En otros casos, la fisuración por fatiga es sólo un signo de que un pavimento ha alcanzado el número de cargas para el cual fue diseñado; esto no sería

necesariamente una falla, sino la progresión natural de una estrategia de diseño del pavimento.

A continuación se enuncian algunas medidas a tomar para evitar la fisuración por fatiga:

- Estimación adecuada del número de ejes equivalentes en la etapa de diseño
- Mantener por todos los medios posibles seca la subrasante
- Pavimentos con espesores adecuados de tal forma que no permitan grandes deflexiones en la estructura
- Utilizar materiales que no sean excesivamente débiles ante la presencia de humedad
- Emplear materiales en el pavimento lo suficientemente resilientes para resistir deflexiones normales

En el momento de la aplicación de la carga, se producen tensiones de tracción horizontales cerca del fondo de la carpeta asfáltica; el material en esa zona debe ser lo suficientemente resistente para soportar estas tensiones, ya que es ahí donde se presentan las mayores concentraciones e inicia la fisuración en caso de sobrepasarse la resistencia a la tracción de la carpeta. No obstante, para superar el fisuramiento por fatiga, dicho material debe ser también resiliente. En este contexto, resiliente significa que el material puede resistir, sin fisurarse, muchas cargas a niveles de tensión mucho menores que la resistencia a tracción.



**Figura 1.8**  
**Tensiones de tracción en la parte inferior de la carpeta asfáltica**

Desde el punto de vista de la fisuración por fatiga, es deseable que la carpeta se comporte como un material elástico blando; para lograr lo anterior, y dado que el comportamiento a la tracción de la mezcla asfáltica está fuertemente influido por el ligante asfáltico, se deben seleccionar cementos asfálticos cuyos límites superiores se ubiquen en la parte elástica en lo que se refiere a sus propiedades de rigidez.

### **1.3.3 Roderas**

Las roderas son deformaciones plásticas en la superficie de rodamiento de un pavimento asfáltico, que se presentan a lo largo de la zona de mayor incidencia de los neumáticos de vehículos pesados. Usualmente aparece como una depresión longitudinal con ligero levantamiento lateral del material asfáltico.

En el siguiente capítulo se abunda en el tema de las deformaciones plásticas en las mezclas asfálticas, a fin de dar a conocer las causas de este tipo de deterioro, así como algunas medidas para mitigar el problema de funcionalidad y seguridad de los pavimentos flexibles.



**Figura 1.9**  
**Formación de roderas en la superficie de rodamiento**

## **2 Deformación permanente en las mezclas asfálticas**

---

La aparición de roderas en la superficie de rodamiento, aparte de afectar la funcionalidad del pavimento representa un problema serio para quienes transitan por la vía, ya que la acumulación de agua dentro de estas depresiones longitudinales suele causar el deslizamiento de las ruedas de los vehículos. Es por esto que se deben establecer límites permisibles de profundidad de rodera en función de las consideraciones de seguridad. La Administración Federal de Carreteras de los Estados Unidos (FHWA) clasifica las roderas en cuatro grados de severidad:

- 1 Hidroplaneo ( 0.5 a 0.7 cm)
- 2 Baja (0.7 a 1.25 cm)
- 3 Media (1.25 a 2.5 cm)
- 4 Alta (mayor a 2.5 cm)

Sin embargo, para muchos investigadores el único estándar razonable es aquel que se asocia al hidroplaneo. Pavimentos con pendientes transversales del orden del 2 % y profundidades de rodera de aproximadamente 1.25 cm, son condiciones que se consideran suficientes para causar el hidropalaneo de un automóvil que viaje a una velocidad de 80 km/h o más. A medida que incrementa la profundidad de la rodera, resulta difícil mantener la dirección del vehículo a altas velocidades, lo que se convierte en un gran problema de seguridad para el usuario.

### **2.1 Tipos de deformación permanente**

La deformación permanente en pavimentos flexibles equivale a la acumulación de pequeñas deformaciones generadas con cada aplicación de carga. Esta deformación es irrecuperable.

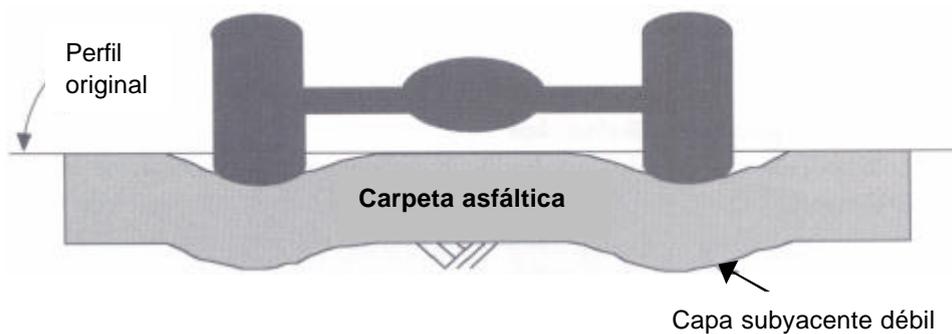
La aparición de roderas en un pavimento flexible se debe principalmente a dos causas: deformación permanente en las capas subyacentes, y/o deformación permanente en la carpeta asfáltica.

#### **2.1.1 Deformación permanente en las capas subyacentes**

La deformación se produce por la aplicación repetida de carga a la subrasante, la sub-base, o la base por debajo de la carpeta asfáltica (figura 3.1), y aunque el empleo de materiales más rígidos reduce parcialmente este tipo de deformación,

el fenómeno normalmente se considera más como un problema estructural de materiales.

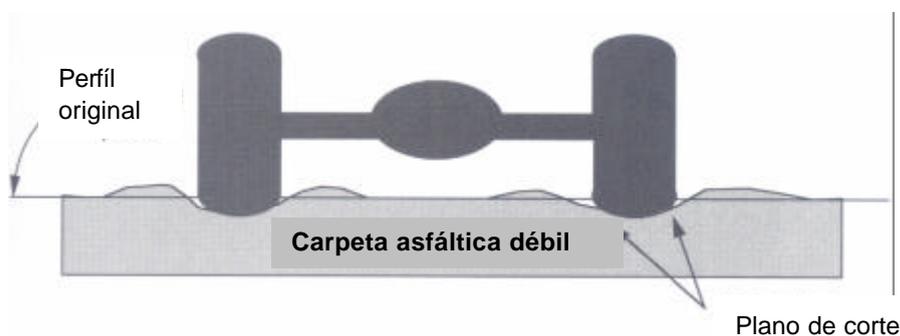
Frecuentemente es el resultado de una sección de pavimento demasiado delgada, y sin la suficiente profundidad para reducir a niveles tolerables la tensión sobre la subrasante cuando las cargas se aplican. Podría ser también producto de una subrasante debilitada por el ingreso inesperado de humedad.



**Figura 2.1**  
**Deformación permanente debido a una capa subyacente débil**

### 2.1.2 Deformación permanente en mezclas asfálticas

Cuando una mezcla asfáltica presenta roderas, es evidente que su resistencia al corte es demasiado baja para resistir las cargas pesadas repetidas a las que está sujeta (Figura 2.2). La deformación por corte se caracteriza por un movimiento de la mezcla hacia abajo y lateralmente. Las superficies de rodamiento que presentan este tipo de problema representan un peligro para el usuario, ya que los surcos que se forman retienen suficiente agua como para provocar hidroplaneo o acumulación de hielo.



**Figura 2.2**  
**Deformación permanente debido a una mezcla asfáltica débil**

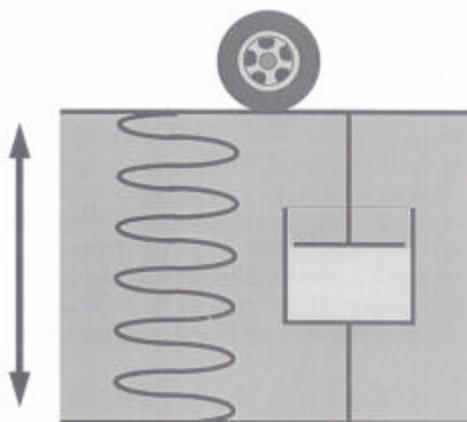
## 2.2 Comportamiento reológico de la mezcla asfáltica

Las mezclas asfálticas son materiales cuyo comportamiento mecánico no depende sólo de la magnitud de las tensiones resistidas, sino también de la forma en que éstas se aplican; en particular de la temperatura, y de la velocidad de aplicación. La ciencia de los materiales que estudia estas características es la reología.

Su comportamiento reológico es bastante complejo y para su estudio hay que adoptar soluciones más o menos aproximadas que en general, consideran las mezclas como materiales viscoelásticos lineales y termoreológicamente simples. Esto significa que las variables temperatura y tiempo de aplicación de carga son intercambiables; es decir, que su influencia es equivalente; es análogo, por ejemplo, considerar unas bajas temperaturas o unos tiempos de aplicación de carga pequeños.

Para tiempos de aplicación de la carga muy pequeños (0.1 s) y temperaturas bajas (inferiores a 10 °C), el comportamiento de las mezclas asfálticas se puede considerar elástico; y el módulo de rigidez, análogo a un módulo de Young. Para unos valores elevados de tiempo de aplicación y unas temperaturas altas, su comportamiento es fundamentalmente viscoso. En un pavimento, una mezcla asfáltica tiene, entonces, una rigidez muy variable.

Bajo condiciones de altas temperaturas o de bajas velocidades de aplicación de las cargas, la respuesta mecánica de una mezcla asfáltica es viscoelástica. Por ello, si la mezcla no tiene características reológicas adecuadas, puede producirse una acumulación de deformaciones plásticas, e incluso la fluencia del material. Este fenómeno tiene su manifestación más típica en las denominadas roderas.



**Figura 2.3**  
**Modelo viscoelástico del comportamiento de la mezcla asfáltica**

En la Figura 2.3 se muestra un modelo viscoelástico que representa el comportamiento de la mezcla asfáltica. El modelo está integrado por dos componentes básicos, un resorte, y un amortiguador formado por un recipiente con agua y un émbolo.

La parte elástica se caracteriza por el resorte que obedece la Ley de Hooke, que afirma que el esfuerzo es proporcional a la deformación. Donde  $s$  es el esfuerzo,  $e$  es la deformación, y  $E$  es el módulo de elasticidad.

$$s = Ee \quad (2.1)$$

La parte viscosa se representa por el amortiguador, el cual se ajusta a la Ley de Newton que establece que el esfuerzo es proporcional a la velocidad de deformación.

$$s = I \frac{\partial e}{\partial t} \quad (2.2)$$

En esta ecuación  $I$  es la viscosidad, y  $t$  es el tiempo. Bajo esfuerzo constante la ecuación se puede integrar fácilmente:

$$e = \frac{st}{I} \quad (2.3)$$

En otras ocasiones, el fenómeno de la deformación plástica se pone de manifiesto mediante arrollamientos o resaltos transversales, como si el pavimento se comportara como una alfombra mal sujeta. Esto puede ocurrir donde los esfuerzos horizontales son muy fuertes, como en las paradas ante los semáforos o en las vías de pendiente pronunciada. En estos casos, la deformación también puede ser atribuida a una mala adherencia con la capa subyacente.

## **2.3 Respuesta de la mezcla asfáltica a los esfuerzos de corte**

La deformación permanente de las mezclas asfálticas débiles es un fenómeno asociado a las altas temperaturas. Si bien esto podría sugerir que es problema del cemento asfáltico, resulta más correcto enfocarlo como un problema conjunto del agregado y del cemento asfáltico. De hecho, la ecuación Mohr-Coulomb puede emplearse para ilustrar cómo ambos materiales pueden influir en el ahuellamiento de la mezcla asfáltica.

$$t = c + S \tan f \quad (2.4)$$

En este caso,  $t$  es la resistencia al corte de la mezcla asfáltica. La cohesión ( $c$ ) puede considerarse la fracción de la resistencia al corte de la mezcla asfáltica provista por el cemento asfáltico;  $f$  es el ángulo fricción interna; y  $s$  el esfuerzo normal al que está sujeto el agregado.

Para que el cemento asfáltico aporte una aceptable resistencia al corte, es deseable que su comportamiento sea lo más próximo al de un sólido elástico cuando el pavimento este sujeto a las altas temperaturas de su entorno; así, tenderá a recuperar su posición en lugar de permanecer deformado.

Los cementos asfálticos con características pobres de resistencia al corte minimizan la cohesión, y hasta cierto punto el esfuerzo normal de confinamiento; como consecuencia, la mezcla comienza a comportarse como una masa de agregados no ligados.

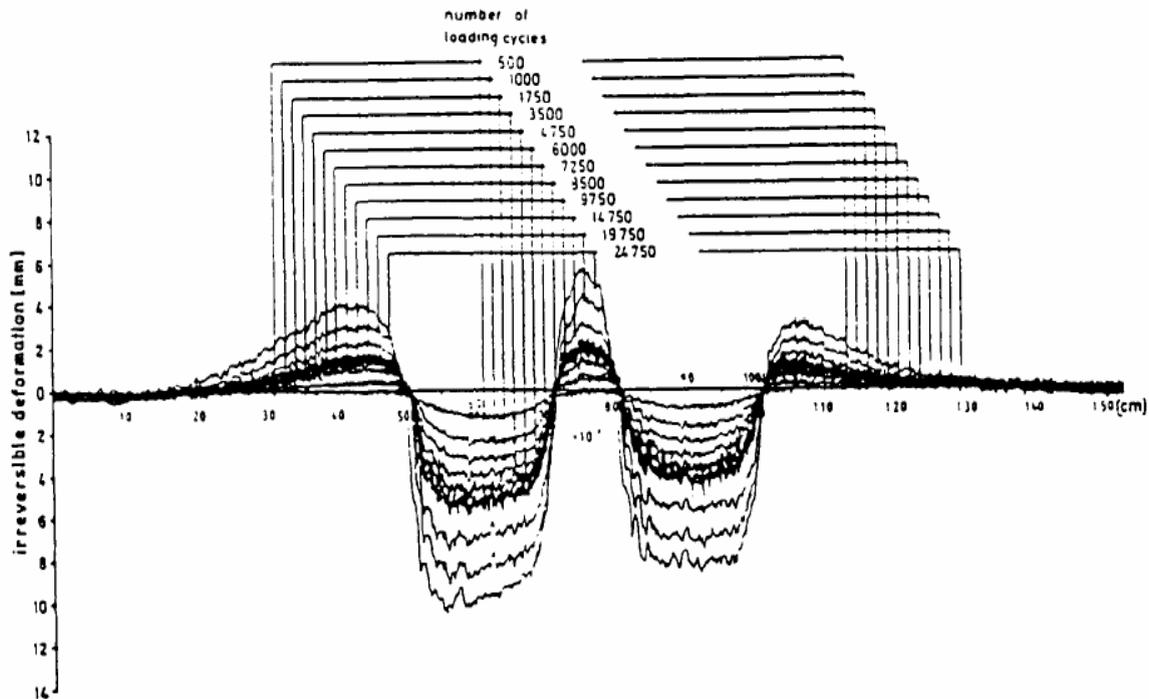
Para obtener una mezcla asfáltica que exhiba un ángulo alto de fricción, es necesario seleccionar un agregado de buena cubicidad (caras fracturadas) y rugosidad, con una granulometría bien graduada; de tal forma que se desarrolle un buen contacto partícula-partícula. Así, cuando la carga se aplica, las partículas se juntan y funcionan no sólo como una masa de partículas individuales, sino como una única roca elástica.

## 2.4 Mecanismo de la deformación permanente

La deformación permanente en mezclas asfálticas resultado de una combinación de dos factores: la densificación de la mezcla (decremento de volumen), y la deformación plástica por esfuerzos de corte. En estudios durante las pruebas del tramo AASHO (1962) e investigaciones más recientes realizadas con equipos de ruedas cargadas (Hofstra y Klomp), indican que la deformación plástica (sin cambio de volumen) por esfuerzo de corte, es por mucho el principal mecanismo de deformación permanente.

De manera similar, trabajos recientes coinciden en que las roderas son producidas principalmente por flujo plástico sin que ocurra cambio de volumen (Eisenmann y Hilmer). La Figura 2.4 reproduce el efecto del número de pasadas que una rueda cargada realiza sobre la sección transversal de una capa asfáltica.

El espesor de carpeta asfáltica es de 23 cm, mismo que se encuentra sobre una plataforma de hule con una rigidez determinada, a fin de reproducir el efecto de una subrasante con un comportamiento puramente elástico, y así todas las mediciones de la deformación permanente atribuir las solamente al concreto asfáltico.



**Figura 2.4**  
**Efecto del número de pasadas de una rueda cargada en la sección transversal de un pavimento asfáltico (Eisenmann y Hilmer)**

Se muestra la magnitud de las deformaciones, además de los volúmenes de material desplazado debajo de las ruedas y en las zonas adyacentes a éstas.

En la primera etapa de aplicación de los ciclos de carga, el incremento de la deformación permanente debajo de las ruedas es muy distinto con respecto al levantamiento de la mezcla que ocurre en las zonas laterales. En esta fase inicial, la compactación impuesta por el tránsito tiene una importante influencia en la formación de las roderas.

Después de esta etapa inicial, el decremento de volumen debajo de las ruedas es aproximadamente igual al incremento de volumen en las zonas laterales de las rodadas.

Esto es un indicador de que la compactación debida al tránsito ha sido completada casi en su totalidad, y que las deformaciones posteriores son causadas esencialmente por desplazamientos de la mezcla a volumen constante. Se considera que esta última fase es representativa del comportamiento a la deformación permanente de la carpeta asfáltica para la mayor parte de su vida de servicio.

## **2.5 Factores que influyen en la deformación permanente**

A continuación se describen los factores que influyen directa o indirectamente en la formación de roderas en la carpeta asfáltica; entre los que se encuentran características propias de los materiales, el tránsito y el medio ambiente.

### **2.5.1 Agregado pétreo**

#### **2.5.1.1 Granulometría**

En la actualidad existe evidencia, que muestra que son deseables mezclas con granulometrías de graduaciones densas para mitigar los efectos de la deformación permanente.

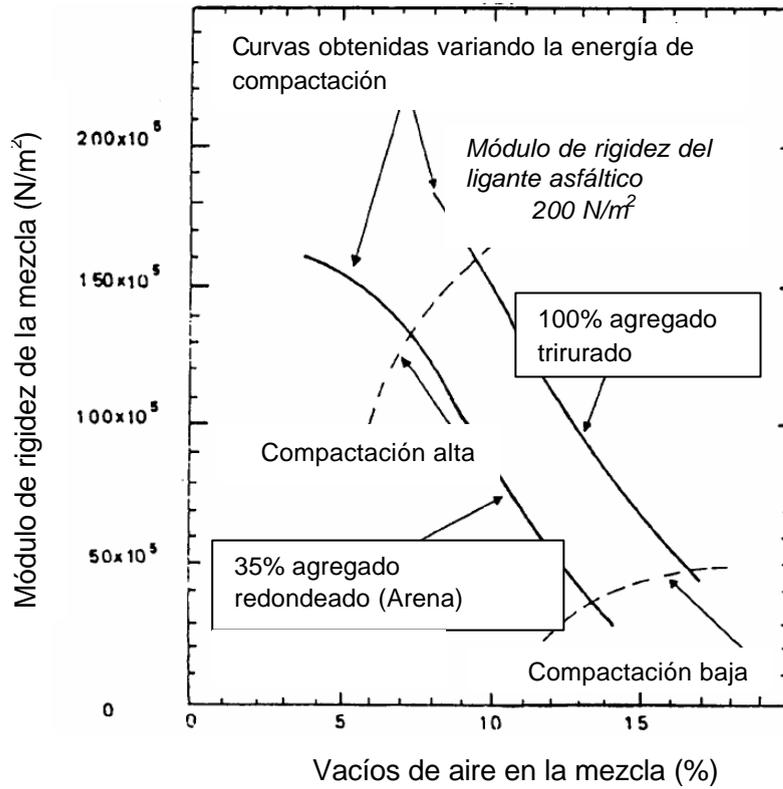
Cuando estas mezclas se compactan adecuadamente, resultan con menos vacíos de aire y mayor contacto entre partículas a diferencia de una granulometría abierta. Algunos investigadores (Brown y Pell) han concluido que mezclas elaboradas con granulometrías abiertas del tipo gap-graded , exhiben mayor deformación que la mezclas de granulometría densa.

Lo anterior lo atribuyen a que en las primeras se presenta un menor contacto entre partículas; y dado que el contacto partícula-partícula en la mezcla es de mayor importancia a altas temperaturas, las mezclas de tipo gap-graded son más susceptibles de sufrir roderas bajo estas condiciones. A pesar de que lo anterior parece ser un consenso general entre los ingenieros de pavimentos, algunos investigadores han reportado mezclas de granulometría abierta del tipo open graded que han exhibido una buena resistencia a la deformación plástica (Hicks, et al).

#### **2.5.1.2 Textura y angularidad**

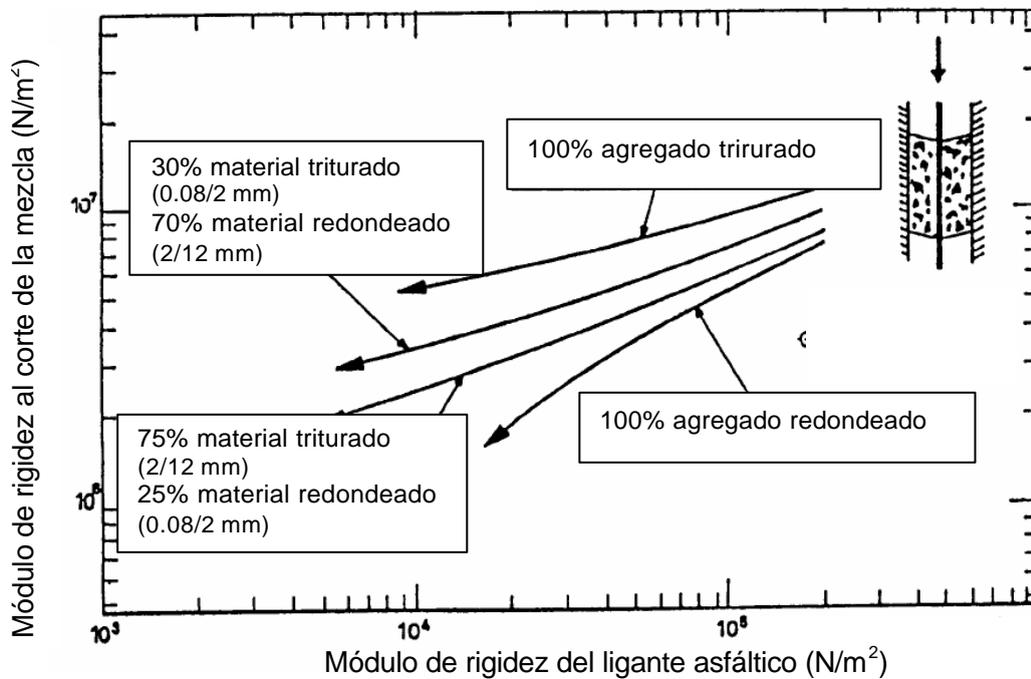
La textura y angularidad del agregado juegan un papel importante en el comportamiento de la mezcla. Se ha visto que mezclas con agregados triturados y de textura rugosa, son menos deformables que aquellas que se han elaborado con agregados redondeados, aún con la misma graduación. En la Figura 2.5 se muestra el efecto que tiene la angularidad del agregado para un porcentaje de vacíos dado, en la rigidez de la mezcla

Uge y Van de Loo investigaron la estabilidad de diferentes mezclas, empleando las mismas curvas de graduación para todas las mezclas y diferentes porcentajes de agregados triturados y redondeados (Figura 2.6).



**Figura 2.5**

**Efecto de la angularidad del agregado en la rigidez de la mezcla asfáltica**



**Figura 2.6**

**Efecto de la angularidad del agregado, y módulo de rigidez del ligante asfáltico**

Como se esperaba, la más estable es aquella en la cual 100% de los agregados han sido tratados por trituración; y la menos estable aquella con el 100% de agregados redondeados. Un dato interesante es que una composición intermedia en donde sólo la fracción de arena fue triturada, demuestra mejor comportamiento que una mezcla en donde únicamente la fracción gruesa recibió este tratamiento, a pesar de que la primera contenía mayor porcentaje de agregados redondeados. Esto indica que el contacto entre partículas podría ser un factor más trascendental, que el porcentaje de trituración del agregado.

Para efectos de control de la deformación permanente en las carpetas asfálticas la Administración Federal de Carreteras de los Estados Unidos recomienda limitar el contenido de arenas naturales en la mezcla, a no más del 15%.

### **2.5.1.3 Tamaño máximo de la mezcla de agregados**

Se han reportado que concretos asfálticos elaborados con asfaltos blandos, bajos contenidos de vacíos de aire, y tamaños máximos del agregado grandes (38 mm o mayores), han presentado buena resistencia a la deformación permanente.

Conviene señalar que se ha concluido que el uso de mezclas asfálticas con tamaños máximos de agregado, de aproximadamente dos tercios el espesor de la carpeta ("large-stone" mixtures), pueden reducir la susceptibilidad a presentar roderas en las mezclas asfálticas, ya que este tipo de mezclas mitiga en gran medida el efecto de concentración de cargas que producen las altas presiones de inflado de los neumáticos (Davis).

### **2.5.2 Ligante asfáltico**

El comportamiento reológico del ligante debe tomarse en cuenta en la selección del cemento asfáltico que se vaya a emplear en la fabricación de la mezcla, de tal forma que sea adecuado para las condiciones de servicio (niveles de tránsito, velocidades de aplicación de carga, temperatura, etc) a las cuales va estar sujeto el pavimento. Controlando la rigidez del ligante a elevadas temperaturas se garantiza que el asfalto provea su mayor aporte a la resistencia global al corte de la mezcla, en términos de la elasticidad a altas temperaturas.

Muchos investigadores han tratado de mejorar el desempeño de la mezcla a la deformación permanente mediante modificadores en el cemento asfáltico, buscando así incrementar la viscosidad a altas temperaturas sin causar efectos adversos a la mezcla a bajas temperaturas.

La rigidez, debido al *envejecimiento*, contribuye a la resistencia al corte del ligante asfáltico con el tiempo, ya que su viscosidad se incrementa con las altas temperaturas. Desde luego, un cemento asfáltico demasiado rígido ayuda de manera importante en el agrietamiento por fatiga.

## **2.5.3 Aspectos de la mezcla asfáltica**

### **2.5.3.1 Metodología de diseño**

En relación con los métodos de diseño, en Estados Unidos de Norteamérica se han utilizado principalmente dos: el basado en el procedimiento Marshall, y el método que aplica el estabilómetro de Hveem. Hasta 1985, treinta y ocho estados de la Unión Americana han empleado el procedimiento Marshall y once más el procedimiento Hveem (Khandal y Koehler). Sin embargo ante los recientes incrementos del tránsito, en términos de repeticiones de carga y aplicaciones de carga por eje mayores, así como por las altas presiones de inflado de los neumáticos, se observó un incremento en el problema de la deformación permanente en la red nacional de carreteras norteamericanas, particularmente en los estados en donde se utilizó el método Marshall como procedimiento de diseño (Federal Highway Administration, 1987).

### **2.5.3.2 Contenido de asfalto**

La selección de un contenido óptimo de asfalto durante la etapa de diseño, es crítica en el desempeño de la mezcla. Si se seleccionan excesivos contenidos de asfalto, la aparición de roderas en la mezcla es muy probable como resultado de un bajo porcentaje de vacíos de aire de la carpeta debido a altas densidades en el lugar, después de que se haya completado la compactación por el tránsito.

Dentro del estudio nacional de deformación permanente en pavimentos asfálticos, realizado en Estados Unidos en 1987, Khandall establece que para efectos de la deformación permanente, el contenido de asfalto en la mezcla resulta de mayor relevancia que las propias características del ligante asfáltico.

### **2.5.3.3 Vacíos de aire (Va)**

Los vacíos de aire tienen un efecto significativo en el desempeño de la mezcla asfáltica. Una considerable reducción de vacíos de aire en la mezcla como consecuencia de un alto contenido de cemento asfáltico, provoca que estos vacíos sean llenados con asfalto debido al flujo del ligante por las altas temperaturas, y la compactación adicional de la mezcla por acción del tránsito. Bajo esta condición, el asfalto actúa como un lubricante entre los agregados afectando el contacto entre partículas, con lo cual disminuye la resistencia al corte de la masa pétreo. Se ha observado que cuando el porcentaje de vacíos de aire de la carpeta asfáltica cae por debajo del 3%, la probabilidad de aparición de roderas en la superficie de rodamiento se incrementa significativamente.

Según Kandhall, et al, los beneficios que se obtienen con las propiedades de angularidad y textura del agregado, dejan de tener relevancia en el comportamiento de la mezcla cuando se incurre en rangos de porcentaje de vacíos de aire inaceptables, por debajo de 2.5%.

#### **2.5.3.4 Vacíos en el agregado mineral (VAM)**

Algunos investigadores (Cooper, Brown y Pooley) han concluido que una mezcla asfáltica resistente a la deformación permanente, requiere que ésta presente bajos porcentajes de vacíos de aire en el agregado mineral (VAM); lo anterior se logra utilizando graduaciones densas. Cabe mencionar que se debe de cumplir con valores mínimos de VAM, y de esta forma garantizar suficiente espacio para acomodar el volumen efectivo de asfalto.

#### **2.5.3.5 Energía de compactación en el laboratorio**

El mecanismo de formación de roderas comienza desde el momento en que la carpeta asfáltica es abierta al tránsito, por lo que es deseable dejar una carpeta terminada con un porcentaje de vacíos de aire de cuando menos el 8 %, para que una vez completada la densificación impuesta por el tránsito, este porcentaje de vacíos se encuentre en un rango de aproximadamente del 3 al 5 por ciento. Esta condición de la mezcla es deseable desde el punto de vista de desempeño y durabilidad, según los métodos de diseño hoy en uso.

Por lo anterior, resulta de relevancia el hecho de simular en laboratorio, tan cerca como sea posible, la compactación que se produce en el sitio de la obra. Parece ser un consenso general entre los ingenieros de pavimentos, adoptar de la compactación giratoria como método de compactación en el laboratorio, ya que el efecto de la densificación por la acción de amasado parece reproducir de manera más fiel las condiciones en campo.

#### **2.5.3.6 Energía de compactación en campo**

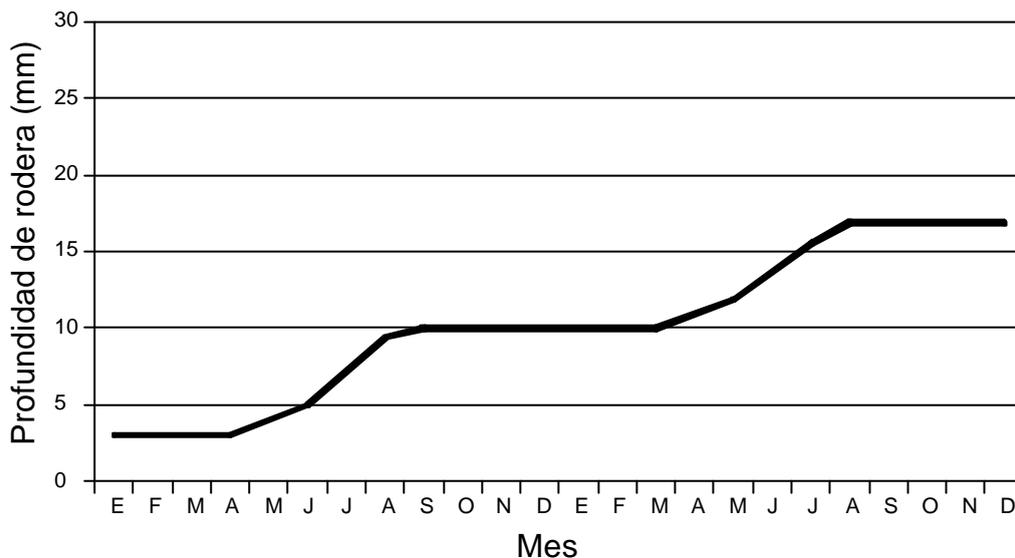
Algunos aspectos que se han tratado y que contribuyen a la resistencia a la deformación permanente de la mezcla asfáltica, como es el tamaño máximo del agregado; angularidad; bajos contenidos de asfalto; etc, derivan en otro importante problema que es la *trabajabilidad* de la mezcla asfáltica; por lo que se recomienda utilizar altas energías de compactación en campo para lograr una superficie estable, y con un alto ángulo de fricción interna. Una compactación deficiente en el lugar, podría dar como resultado una carpeta con un alto contenido de vacíos (mayor a 8 %); si la vía tiene un alto porcentaje de vehículos pesados, el problema de la deformación permanente se agrava aún más, ya que aparte del flujo plástico debido a los esfuerzos de corte inducidos por el tránsito, podría ocurrir una consolidación adicional de la carpeta.

También se debe tener especial cuidado en actividades que preceden a la compactación, como es el manejo y extendido de la mezcla asfáltica ya que estos factores tienen gran influencia en el acomodo final de los agregados dentro de la carpeta.

## 2.5.4 Temperatura

La exposición de la mezcla asfáltica a las altas temperaturas favorece el mecanismo de la deformación permanente en las mezclas asfálticas. Al respecto se realizó un estudio en Texas, EUA, sobre secciones de pavimentos expuestas a las más altas temperaturas con objeto de conocer la evolución diaria de la deformación permanente durante el año (Mahboub y Little). Dentro de las conclusiones que se obtuvieron, se encuentran las siguientes:

- La deformación permanente ocurre durante el día, de las 7:30 am a las 5:30 pm
- Se pueden ignorar los efectos de la temperatura en la deformación permanente, por debajo de los 10 °C
- La deformación permanente sucede por lo general en el período de abril a octubre (Figura 2.7)



**Figura 2.7**  
**Efectos de la temporada del año en la deformación permanente**  
**(NCHRP REPORT 468)**

## 2.5.5 Tránsito

El tránsito es un factor de primer orden en la formación de roderas en el pavimento, en el cual los cambios en la distribución del tránsito, en especial el incremento de vehículos pesados, además de grandes magnitudes de carga y altas presiones de inflado de los neumáticos, han contribuido en los últimos años de manera importante a la manifestación de la deformación permanente en los

pavimentos flexibles de nuestro país. En la Tabla 2.1 se presenta un resumen de los factores que influyen en la deformación permanente.

**Tabla 2.1**  
**Factores que influyen en la deformación permanente**

Factores			Resistencia a la deformación permanente
Agregado pétreo	Textura superficial	De liso a rugoso	Incrementa
	Graduación	Abierta a continua	Incrementa
	Angularidad	Redondeada a angular	Incrementa
	Tamaño máximo	Incremento en el tamaño	Incrementa
Ligante asfáltico	Rigidez (a)	Incremento	Incrementa
Mezcla	Contenido de asfalto	Incremento	Reduce
	Contenido de vacíos de aire (b)	incremento	Reduce
	VMA (c)	Incremento	Reduce
	Método de compactación	(d)	(d)
Condiciones en el lugar	Temperatura	Incremento	Reduce
	Estado de esfuerzos/deformaciones	Incremento en la presión de inflado de los neumáticos	Reduce
	Repeticiones de carga	Incremento	Reduce
	Agua	De seco a mojado	Reduce si la mezcla es sensible al agua

(a) Se refiere a la rigidez del ligante a la temperatura en donde la mezcla asfáltica es propensa de presentar roderas. Modificadores al ligante asfáltico pueden ser utilizados para incrementar su rigidez a temperaturas críticas.

(b) Cuando el contenido de vacíos de aire (Va) es menor a un 3%, la propensión de la mezcla asfáltica de presentar roderas, se incrementa.

(c) Se argumenta que muy bajos porcentajes de VAM en la mezcla (menos del 10%) deben evitarse.

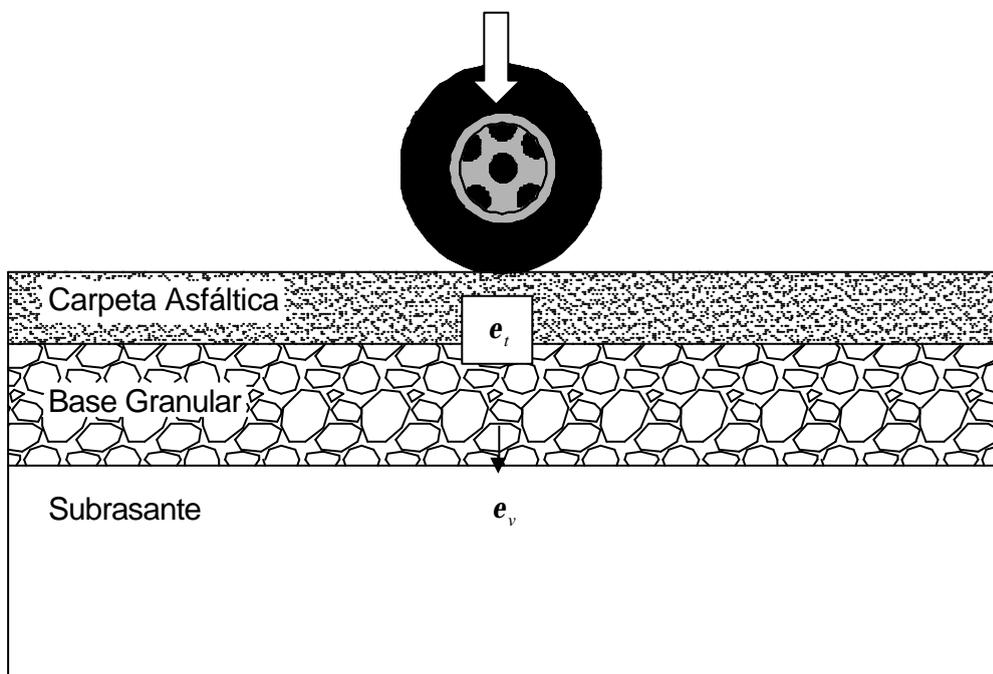
(d) El método de compactación, ya sea en campo o en el laboratorio puede influir en gran medida al ahuellamiento de la mezcla asfáltica.

## 2.6 Relación entre la deformación permanente y la práctica del diseño de pavimentos

Los procedimientos de diseño de pavimentos flexibles actuales se basan en limitar el esfuerzo vertical en la parte superior de la subrasante y los esfuerzos de tensión en el fondo de la carpeta asfáltica (figura 3.8).

Los valores de los esfuerzos y las deformaciones son controlados incrementando el espesor y la rigidez de cada capa del pavimento, teniendo como resultado una estructura compuesta de capas que de acuerdo con la posición relativa que ocupan en la estructura, poseen un módulo de rigidez que se incrementa hacia la superficie. Esta composición de capas atenúa los esfuerzos producidos por el tránsito, controlan los esfuerzos verticales en la subrasante y mantienen dentro de límites tolerables las deflexiones del pavimento.

Una subrasante rígida posee la capacidad de distribuir mejor los esfuerzos que le son aplicados. Una capa de rodamiento rígida reduce el riesgo de que ocurran deflexiones en la subrasante, pero por otro lado incrementa los esfuerzos de tensión y los de corte, horizontales al fondo de dicha capa. Es por esto que el diseñador debe asegurarse que la resistencia al corte y a la flexión de esta capa sea lo suficientemente alta para resistir estos altos estados de esfuerzos.



**Figura 2.8**  
**Esfuerzos y deformaciones en el pavimento**

Desafortunadamente estos métodos no cuantifican completamente el fenómeno de las roderas debido a la deformación de la carpeta asfáltica. Bajo altos niveles de tránsito pesado y espesores de carpeta asfáltica razonablemente altos, la evaluación de la deformación permanente por medio del estado de esfuerzos y deformaciones de la subrasante parece no tener mucho sentido, ya que la mayor parte de la deformación permanente ocurre en la carpeta asfáltica y no en la subrasante.

Los métodos de diseño de pavimentos flexibles, históricamente se han concentrado en proteger la subrasante del pavimento, dejando el problema de la resistencia al corte de la capa asfáltica en manos del diseño de la mezcla. La resistencia al corte de la mezcla, a menudo se evalúa por métodos empíricos, como es el Hveem o el Marshall.

Se han venido desarrollando recientemente ensayos que permitan evaluar el desempeño de la mezcla asfáltica, como es el caso de ruedas cargadas, pruebas triaxiales y de creep, entre otras. En la actualidad existe una clara tendencia de introducir pruebas de desempeño en los métodos de diseño de la mezcla, tal el caso de los niveles 2 y 3 del método Superpave.

## 2.7 Estimación de la profundidad de rodera

La estimación de la deformación permanente en materiales de pavimentación depende en gran medida de los métodos de ensaye y de los procedimientos que se utilizan para la fabricación de los especímenes de prueba. Estas variaciones conjuntamente con la incertidumbre del tránsito y las condiciones ambientales, hacen extremadamente difícil predecir la profundidad de las roderas.

La deformación permanente es un importante factor en el diseño de pavimentos flexibles. Con el incremento en las cargas del tránsito y presiones de inflado de los neumáticos de los vehículos, la mayor parte de la deformación permanente ocurre en las capas superiores del pavimento más que en la subrasante.

El método Shell (Claessen, et al) introduce un procedimiento que pretende mejorar las metodologías tradicionales, además de incluir un análisis adicional para estimar la cantidad de deformación permanente que ocurre en la capa asfáltica. Este método realiza un análisis elástico de un sistema de capas (layer-strain method). Otras metodologías de predicción utilizan procedimientos de análisis viscoelástico.

### 2.7.1 Análisis elástico

En este análisis se divide cada capa del pavimento en varias subcapas; el esfuerzo se calcula al centro de cada subcapa, directamente debajo del punto de aplicación de la carga del neumático, haciendo uso de la teoría de la elasticidad.

Con los esfuerzos promedio obtenidos en el centro de cada subcapa, la correspondiente deformación plástica puede determinarse mediante resultados

de pruebas de laboratorio (compresión axial, pruebas de carga repetida, etc). Por consiguiente, la profundidad total de deformación para un número dado de repeticiones de carga, se obtiene sumando la deformación plástica promedio que ocurre en el centro de cada subcapa. Este método se considera en ingeniería como una aproximación simple para estimar la profundidad de las roderas.

## **2.7.2. Análisis viscoelástico**

Se considera el movimiento de las ruedas cargadas, conjuntamente con las variaciones de las propiedades de los materiales en el tiempo para definir los estados de esfuerzo y deformaciones en puntos específicos en la estructura de pavimento. Las propiedades de cada material se pueden definir en términos de modelos viscoelásticos (Maxwell, y/o Kelvin) en varios arreglos, o generalizando un término que los relacione. Una importante ventaja de este método es que el movimiento de las ruedas se considera directamente, lo que resulta en la velocidad correcta de la aplicación de la carga, además de que permite estimar adecuadamente el flujo plástico, que ocurre por debajo del neumático en movimiento.

## **2.7.3 Comparación entre la metodología elástica y viscoelástica**

Algunos aspectos que tienen en común estas metodologías, es la determinación del estado de esfuerzos en la estructura del pavimento, y además especifican características de deformación permanente de los materiales que componen el pavimento en función del estado de esfuerzos, repeticiones de carga, temperatura y otros aspectos. Los métodos de predicción basados en la teoría de la elasticidad, lineal o no lineal, parecen ser una razonable aproximación para predecir la deformación permanente.

A pesar de que los métodos viscoelásticos son teóricamente más refinados, su complejidad y la relativa poca concordancia que se ha encontrado entre los valores medidos y los valores predichos, ha demostrado no tener una ventaja significativa sobre los métodos elásticos. Sin embargo, si las ecuaciones de predicción se desarrollan con base en pruebas de laboratorio, que apliquen un estado de esfuerzos comparable al que se encuentra en el pavimento cerca de los límites de los neumáticos, y que los modelos viscoelásticos se apliquen de tal forma que puedan incorporarse todos estos aspectos, pueden esperarse predicciones más exactas.

Una mejora en los métodos de predicción actuales, podría contemplar una extensión del análisis de los esfuerzos a partir de la línea central de la aplicación de la carga hacia toda la zona de influencia mediante una técnica de elementos finitos, y así tomar en cuenta la contribución a la deformación permanente que presentan los esfuerzos de corte en las inmediaciones de los neumáticos.

También resulta de gran importancia, reproducir de manera más fiel en el laboratorio los estados de esfuerzos, a los que está sujeto el pavimento en campo. Con respecto a lo anterior, el programa estratégico de investigación de carreteras de Estados Unidos (SHRP) ha concluido que las pruebas de laboratorio que han resultado más prometedoras en cuanto a la evaluación de la resistencia a la deformación de los materiales, en orden de preferencia, son las siguientes:

- a) Ensayos de corte simple, creep, y ensayos de corte repetido
- b) Ensayos de compresión triaxial simple, creep, y de carga repetida
- c) Ensayos de compresión uniaxial, creep, y de carga repetida
- d) Ruedas Cargadas
- e) Ensayos diametrales

Los ensayos diametrales no proveen mediciones confiables a la resistencia a la deformación permanente, ya que su complejo estado de esfuerzos dificulta la interpretación de los resultados. Por su parte, los ensayos de ruedas cargadas, que simulan las condiciones de campo, dado su costo, muchas veces se tiene que prescindir de este equipo, de ahí que aumenta la dificultad de llevar a cabo las evaluaciones de rutina. Sin embargo resulta de gran utilidad para investigaciones especiales, incluyendo la evaluación y validación de los ensayos ya citados.



## **3 Evolución de las ruedas cargadas**

En forma creciente, las agencias de transporte en los Estados Unidos están ampliando sus procedimientos de diseño de mezclas con ensayos empíricos de resistencia. Se llaman empíricos debido a que de sus resultados se deriva una decisión de “se acepta/no se acepta”.

Basado en la experiencia de la agencia con el ensayo calibrado para el pavimento real, un ejemplo al respecto, es el de las ruedas cargadas (loaded wheel tester) que simulan el paso del tránsito. Este tipo de ruedas se han empleado para determinar la susceptibilidad de la mezcla asfáltica a presentar deformación permanente y fatiga.

### **3.1 Dispositivos de ruedas cargadas**

En los últimos años se han empleado en Europa y Estados Unidos distintos dispositivos de ruedas cargadas para evaluar las propiedades de la mezclas asfálticas, entre las que se encuentran: la rueda cargada de Hamburgo (HWDT); la rueda cargada (LCPC); el evaluador de pavimentos de la Universidad de Nottingham; la rueda cargada de Georgia (GLWT); y el analizador de pavimentos asfálticos (APA).

#### **3.1.1 Rueda Cargada de Hamburgo (HWTD)**

La rueda cargada de Hamburgo (HWTD) la desarrolló la compañía Helmit-Wind, de Alemania. Se utiliza como especificación en algunas de las carreteras más transitadas en Alemania para evaluar la deformación permanente y la susceptibilidad de la mezcla asfáltica a la humedad (stripping).



**Figura 3.1**  
**Rueda cargada de Hamburgo**

Se ensaya una viga de 260 mm de ancho, 320 mm de largo, y 40 mm de alto (10.2 x 12.6 x 1.6 pulgadas). Estas vigas se compactan por lo regular hasta un porcentaje de vacíos de aire de  $7 \pm 1$  % mediante un compactador lineal de amasado (linear kneading compactor).

El espécimen se prueba sumergido bajo el agua, a temperaturas que pueden estar entre los 25 y 70°C, siendo 50°C la temperatura de ensaye más común. Se aplica una carga de 158 lb mediante una rueda de acero de 47 mm de diámetro. La rueda de acero cargada realiza entonces movimientos de ida y vuelta sobre las vigas, hasta completar un total de 20 mil pasadas o hasta que ocurra 20 mm de deformación; lo que se presente primero. La velocidad de la rueda es aproximadamente de 340 mm por segundo.

### **3.1.2 Rueda cargada LCPC**

La rueda cargada LCPC también llamada rueda cargada francesa (French Rutting Tester FRT), se ha empleado en Francia durante los últimos 20 años exitosamente en la prevención de la deformación permanente en los pavimentos asfálticos. En los últimos años, la FRT se ha aplicado en Estados Unidos notablemente en el estado de Colorado, y por la Administración Federal de Carreteras (FHWA) en algunos de sus centros de investigación.



**Figura 3.2**  
**Rueda cargada LCPC**

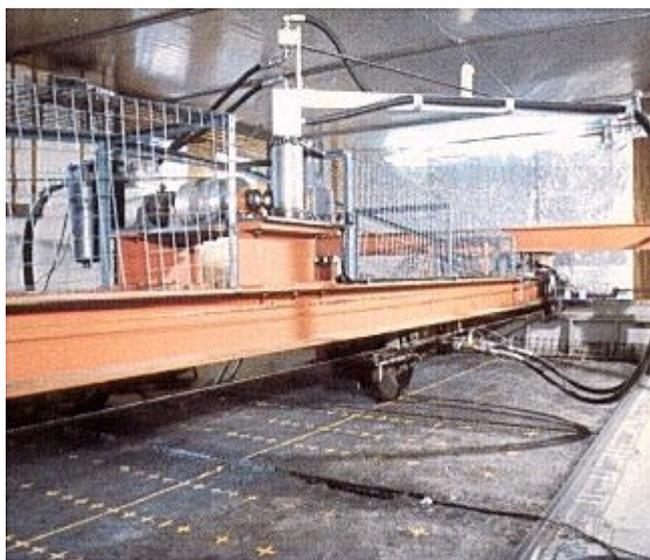
La FRT es capaz de ensayar simultáneamente dos vigas de mezcla asfáltica. Las dimensiones de las vigas son regularmente de 180 mm de ancho, 500 mm de largo, y de 20 a 100 mm de espesor (7.1 x 19.7 x 0.8 a 3.9 pulgadas). Las probetas, generalmente se compactan con el compactador neumático LCPC. El mecanismo de carga se lleva a cabo mediante la aplicación de 1124 lb a

través de un neumático inflado a 87 lb/pulg<sup>2</sup>. Durante el ensayo el neumático realiza sus pasadas por el centro de las vigas dos veces por segundo.

En Francia se ha recurrido a temperaturas de prueba de 60°C para las carpetas asfálticas, y 50°C para las bases negras. La profundidad de rodera se expresa como porcentaje con respecto al espesor original de la viga. La deformación se define como el promedio de la profundidad de rodera de una serie de 15 mediciones, las cuales consisten en tres lecturas tomadas a lo ancho de la probeta para cinco puntos a lo largo de la viga. La prueba termina una vez que se han aplicado 100 mil ciclos, a menos de que previo a esto la profundidad de la rodera exceda el 15 % de la deformación con respecto a la altura original de la probeta. Usualmente se realizan mediciones de la profundidad de rodera, deteniendo la prueba en 30, 100, 300, 1 000, 3 000 y 100 000 ciclos.

### 3.1.3 Evaluador de pavimentos de la Universidad de Nottingham

El evaluador de pavimentos de la Universidad de Nottingham, Inglaterra, permite ensayar secciones de pavimento de 4.8 m (16 pies) de largo por 2.4 m de ancho, construida sobre una fosa de 1.5 m (5 pies).



**Figura 3.3**  
**Evaluador de pavimentos de la Universidad de Nottingham**

La prueba se lleva a cabo bajo temperaturas controladas, y la carga, de 10 kN, se aplica por medio de un neumático que transmite una presión de contacto de 73 lb/pulg<sup>2</sup>, a una velocidad de 16 km / h. El rango de trabajo de este dispositivo es de 20 a 25°C.

### **3.1.4 Rueda cargada de Georgia (GLWT)**

La rueda cargada de Georgia (GLWT), se desarrolló a mediados de los 80's a través de una investigación entre el Departamento de Transporte de Georgia y el Instituto de Tecnología del mismo estado.

El desarrollo de la GLWT consistió en modificar una rueda cargada diseñada originalmente por CR Benedict, de Benedict Slurry Seal, Inc, para evaluar la calidad de las lechadas asfálticas. El principal propósito en el proyecto de la GLWT fue un dispositivo que permitiera actividades de rutina para el control de calidad en la producción de las mezclas asfálticas elaboradas en caliente, en términos de la deformación permanente.

La GLWT es capaz de ensayar vigas o especímenes cilíndricos. Las dimensiones de las vigas son generalmente 125 mm de ancho, 300 mm de largo, y 75 mm de altura (5 x 12 x 3 pulgadas). Se han empleado diferentes procesos para la compactación de las vigas de ensaye. Originalmente se utilizaba una pequeña plataforma cargada, que proporcionaba una compactación por amasado ( "loaded foot" kneading compactor). West, et al, utilizó un método de compresión estático para la elaboración de vigas. En 1995, Lai y Shami diseñaron un nuevo método, en el cual se emplea un rodillo (rolling wheel) para la fabricación de las probetas.



**Figura 3.4**  
**Rueda cargada de Georgia**

Los especímenes cilíndricos, generalmente son de 15 mm de diámetro y 75 mm de alto. Los métodos de compactación para estas probetas incluyen la plataforma cargada ("loaded foot" kneading compactor), y el compactador giratorio Superpave entre otros. Por lo general, las probetas se compactan de 4 a 7 % de vacíos de aire. Aunque se han evaluado probetas con porcentajes de vacíos de aire de hasta el 2 %.

El ensaye de los especímenes en la GLWT consiste en aplicar una carga de 100 lb sobre una manguera presurizada a 100 lb/pulg<sup>2</sup>. La carga se aplica a través de una rueda de aluminio sobre la manguera que se encuentra situada encima de la probeta. La rueda bajo carga estática realiza movimientos de atrás hacia adelante sobre el espécimen. La prueba termina una vez que se completan 8 mil ciclos de carga (un ciclo se define como un movimiento de ida y vuelta que realiza la rueda sobre el espécimen). Algunos investigadores sugieren que menos ciclos de carga, podrían ser suficientes. Las temperaturas de ensayo de la GLWT oscilan entre los 35 y 60°C. Originalmente se realizaban los ensayos a la temperatura de 35°C, ya que es la temperatura promedio que prevalece en el estado de Georgia durante el verano.

Una plantilla con siete ranuras se coloca sobre el molde que contiene los especímenes; y mediante un micrómetro, se obtienen las mediciones de la profundidad de la rodera.

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

El analizador de pavimentos asfálticos (Figura 3.5) es una modificación de la rueda cargada de Georgia, y se fabricó por primera vez en 1996 por Pavement Technology, Inc. El APA se ha utilizado por algunas agencias de transporte de los Estados Unidos para evaluar la deformación permanente, fatiga y sensibilidad a la humedad de las mezclas asfálticas.

Dado que el APA es la segunda generación de la GLWT, se siguen procedimientos similares de ensaye; la rueda cargada realiza movimientos de ida y vuelta sobre la manguera presurizada, para inducir la rodera en la probeta.

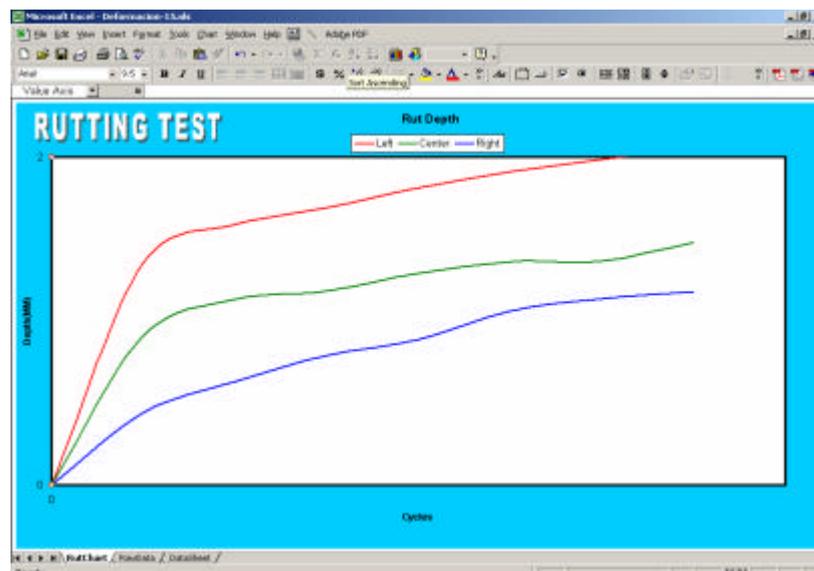
A diferencia de la GLWT el APA puede ensayar especímenes sumergidos en agua. Los especímenes de prueba pueden ser vigas o probetas cilíndricas; las dimensiones de las vigas son idénticas a las que utilizan en la GWLT.

Actualmente, el método más común para elaborar vigas es con el compactador vibratorio de mezclas asfálticas (Asphalt Vibratory Compactor). Para elaborar las probetas cilíndricas se ha recurrido al compactador giratorio Superpave y el martillo Marshall. Cabe mencionar que se pueden ensayar probetas con diámetros de 100 o 150 mm.



**Figura 3.5**  
**Analizador de pavimentos asfálticos (Instituto Mexicano del Transporte)**

Las probetas se compactan hasta un porcentaje de vacíos de aire de 4 a 7 %. También se pueden ensayar corazones o vigas extraídas de pavimentos que se encuentren en servicio. Los rangos de temperatura de trabajo que se manejan en el APA son de 5 a 70°C.



**Figura 3.6**  
**Evolución de la deformación permanente en el APA.**

El APA consta de sensores de deformación que monitorean el desarrollo de la profundidad de la rodera para cada uno de los 8 mil ciclos de carga (figura 4.6). Se pueden ensayar simultáneamente tres vigas o seis especímenes cilíndricos.

La carga de la rueda y la presión de la manguera, son las mismas que utiliza la GLWT, 100lb y 100 lb/pulg<sup>2</sup>, respectivamente. Investigaciones recientes con el APA han evaluado la utilización de cargas de rueda de 120 lb y presiones de manguera de 120 lb/pulg<sup>2</sup>, con resultados satisfactorios.

## **3.2 Factores que afectan los resultados de los ensayos**

### **3.2.1 Porcentaje de vacíos de aire**

Estos dos parámetros que se especifican de acuerdo con el dispositivo de rueda cargada que se utilice, constituyen dos de los factores que más influyen en los resultados de la prueba, especialmente en la profundidad de la rodera.

El porcentaje de vacíos para el ensaye se especifica con base en dos criterios. Algunos investigadores sugieren que los especímenes deberían ser compactados hasta aproximadamente un 7 % de vacíos de aire, ya que este contenido de aire representa las densidades de una carpeta asfáltica recién puesta en servicio.

Otros proponen la idea de compactar las probetas hasta un porcentaje de vacíos de aire del 4 %, ya que el esfuerzo de corte de falla de la mayoría de las mezclas asfálticas ocurre cuando ésta presenta contenidos de vacíos de aire aproximadamente por debajo del 3 %. De cualquier manera, se ha visto que un incremento en el porcentaje de vacíos a su vez representa un incremento en la profundidad de la rodera.

### **3.2.2 Temperatura**

De manera similar a lo que ocurre con el porcentaje de vacíos, al aumentar la temperatura, la profundidad de la rodera se incrementa. Si las probetas no se precalientan lo suficiente, se pueden esperar valores bajos de profundidad de la rodera. Para evaluar la deformación permanente parece ser suficiente un acondicionamiento de seis horas a la temperatura de ensaye. El acondicionamiento de las probetas cuando se van a realizar pruebas en condiciones húmedas, se lleva a cabo sumergidas en agua.

### **3.2.3 Elaboración de las probetas de ensaye**

Los dos tipos de probetas de mezcla asfáltica que se ensayan son las cilíndricas y las vigas. Para la evaluación de la deformación permanente y la susceptibilidad a la humedad, se ha visto ambos tipos de probetas arrojan resultados diferentes

para un mismo tipo de prueba; sin embargo, para efectos de evaluación dichos tipos se consideran satisfactorios.

El método de compactación para la elaboración de probetas también influye en los resultados de la prueba. Las cilíndricas, generalmente se compactan con el compactador giratorio Superpave; y las vigas se elaboran con un compactador vibratorio o por amasado. Esto influye en las densidades y en la orientación del agregado pétreo en la probeta.

Otra razón de peso por la que estos dos tipos de probetas no producen los mismos resultados para un mismo tipo de prueba, son las diferencias de dimensiones y volumen que existe entre una probeta cilíndrica y una viga.

### **3.2.4 Magnitud de la carga aplicada**

La magnitud de las cargas aplicadas es otro parámetro que influye significativamente en los resultados. Un amplio rango de magnitudes de carga y presiones de contacto se consideran característicos de diferentes dispositivos de ruedas cargadas. Ciertos cambios en la magnitud de las cargas aplicadas pueden afectar los resultados de las pruebas. Por lo anterior, no es factible la comparación de resultados entre un dispositivo y otro.

### **3.2.5 Tamaño máximo del agregado**

Quizá la característica de la mezcla asfáltica que más impacta los resultados de las pruebas de carga, es el tamaño máximo nominal del agregado. Para un mismo tipo de agregado y ligante asfáltico, las mezclas cuya graduación contengan tamaños máximos más grandes tienden a presentar profundidad de roderas menores.

## **3.3 Experiencias en el uso de ruedas cargadas**

Con base en la experiencia que se ha vivido en la Unión Americana en los últimos años en lo que se refiere al uso de ruedas cargadas para evaluación de las mezclas asfálticas, Khandall hace las siguientes observaciones:

- Tanto las probetas cilíndricas, como las vigas han resultado adecuadas para evaluar las mezclas asfálticas en términos de la deformación permanente.
- Los resultados de los dispositivos de ruedas cargadas parecen correlacionarse razonablemente bien, con el desempeño de los pavimentos cuando la condiciones de servicio, como son los niveles de carga y temperaturas de la localidad, son consideradas.
- Los ensayos con ruedas cargadas parecen diferenciar razonablemente ligantes con distintos grados de desempeño.

- Cuando se ha adquirido suficiente experiencia y se han podido correlacionar adecuadamente los resultados de las ruedas cargadas a un sitio con condiciones tránsito y temperaturas determinadas, la agencia de transporte puede usar los resultados de laboratorio como criterios de aceptación o rechazo para ese sitio en particular.
- La capacidad de predecir adecuadamente la magnitud de la deformación permanente en campo a partir de los resultados de las pruebas con ruedas cargadas, no se ha determinado hasta el momento.
- Un dispositivo, como es una rueda cargada que permite realizar ensayos en condiciones secas y sumergidas, ofrece a la agencia de transporte, más opciones en la evaluación de los materiales de pavimentación.

Una desventaja de usar este tipo de dispositivos, es que las agencias de transporte tienen que gastar considerables recursos para realizar la experiencia, y aun así ésta es sólo aplicable al material y a las condiciones del medio ambiente de la prueba. Nuevos productos y materiales requieren una experimentación adicional.



## 4 Descripción del experimento

---

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

### 4.1 Selección de los materiales

#### 4.1.1 Agregado mineral

El material pétreo que se utilizó para la elaboración de la mezcla asfáltica proviene del banco de materiales “La Cañada”, ubicado en la ciudad de Querétaro, y consta básicamente de roca basáltica triturada; las pruebas al agregado se realizaron de acuerdo con los requerimientos establecidos por la metodología Superpave. En la Tabla 4.1 se muestra el resumen de los resultados:

**Tabla 4.1**  
**Pruebas al agregado mineral**

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

#### 4.1.1.1 Dosificación de la mezcla de agregados

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

Tabla 4.2

**Materiales constitutivos de la mezcla de agregados**

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

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

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

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

#### 4.1.1.2 Graduación

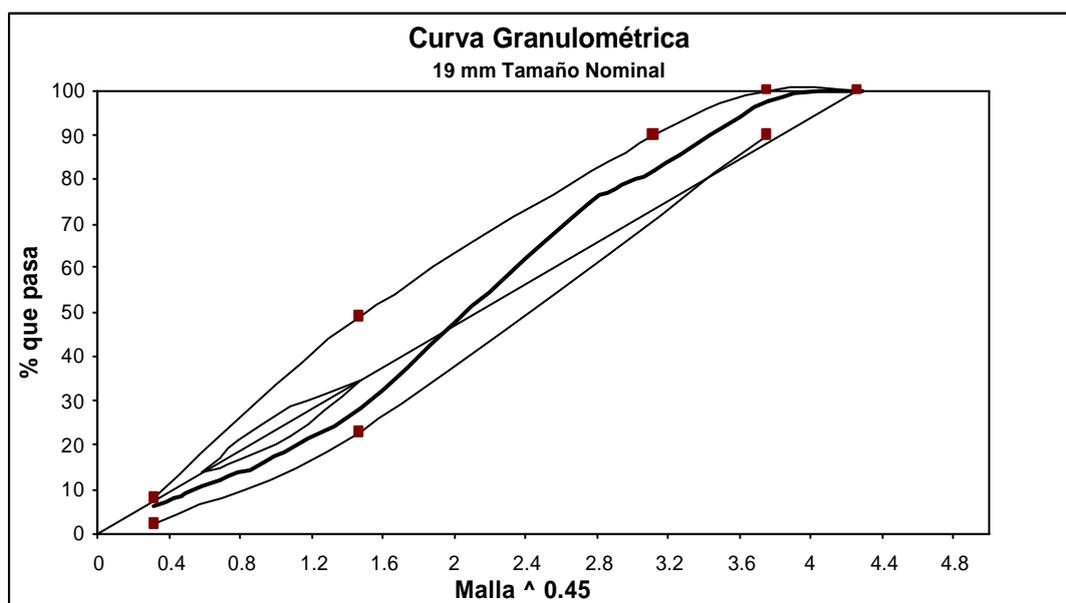


Figura 4.1  
Curva granulométrica de la mezcla de agregados

La curva granulométrica de la mezcla de agregados se presenta en la Figura 4.1, donde se puede observar que cumple con los requerimientos de Superpave citados en el capítulo 2. Las características del agregado (calidad, graduación, tamaño máximo nominal, etc) fueron las mismas que se emplearon en la elaboración de las probetas ensayadas en este experimento.

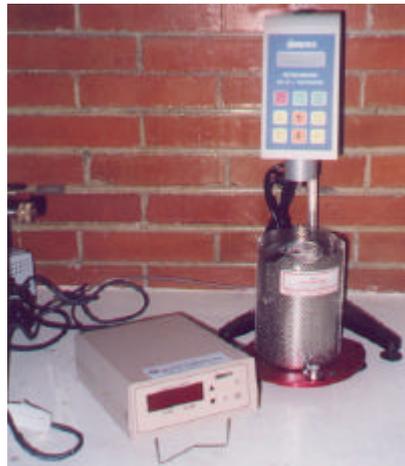
Los puntos de control corresponden al tamaño máximo nominal, en este caso de 19 mm, un tamaño intermedio (2.36 mm), y un tamaño de polvo mineral (0.075 mm). La zona restringida se ubica entre los tamaños 2.36 y 0.3 mm.

## 4.1.2 Ligante asfáltico

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

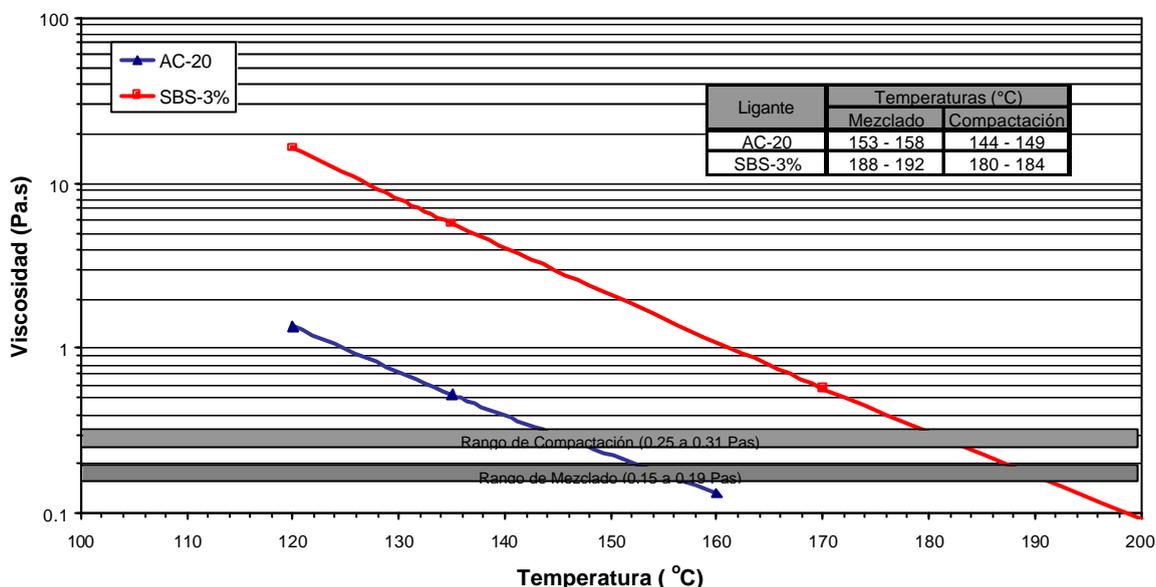
### 4.1.2.1 Viscosímetro rotacional (RV)

La prueba del viscosímetro rotacional (Figura 4.2) se utiliza para determinar las temperaturas de mezclado y compactación de la mezcla asfáltica en el laboratorio. Se determinan las viscosidades a distintas temperaturas, y se construye una carta de viscosidad (Figura 4.3) en donde se seleccionan las temperaturas de mezclado y compactación correspondientes a los rangos de viscosidades de  $0.17 \pm 0.02$  y  $0.28 \pm 0.03$  Pa.s respectivamente.



**Figura 4.2**  
**Viscosímetro rotacional**

Basándonos en estos criterios establecidos por Superpave, es factible obtener los rangos de temperatura de mezclado y compactación para el asfalto AC-20 sin modificar, y modificado con SBS. Los resultados se muestran en la Figura 4.3.



**Figura 4.3**  
**Carta de viscosidad**

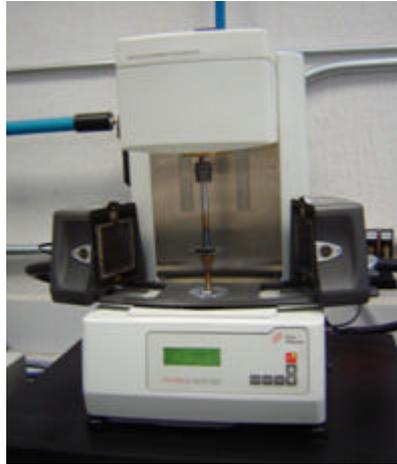
Superpave también establece un criterio para asegurar el fácil manejo y bombeo del asfalto en planta, especificando un valor de viscosidad a la temperatura de 135 °C; este valor debe ser como máximo de 3 Pa.s. Se puede ver en la Figura 4.3 que el cemento asfáltico AC-20 sin modificar cumple con el requerimiento, no así el modificado con 3% de SBS. Dado lo anterior, si se pretende utilizar el ligante modificado en estudio, en la elaboración de mezcla asfáltica en planta, se deberán tomar las medidas necesarias para lograr temperaturas que permitan un adecuado manejo, fabricación y compactación de la mezcla.

#### 4.1.2.2 Reómetro de corte dinámico (DSR)

Se llevó a cabo la caracterización de los ligantes asfálticos en el DSR (Figura 4.4) con el fin de evaluar su contribución a resistir las deformaciones plásticas en la mezcla, con base en la medición del parámetro reológico  $G^*/\text{sen } \delta$ .

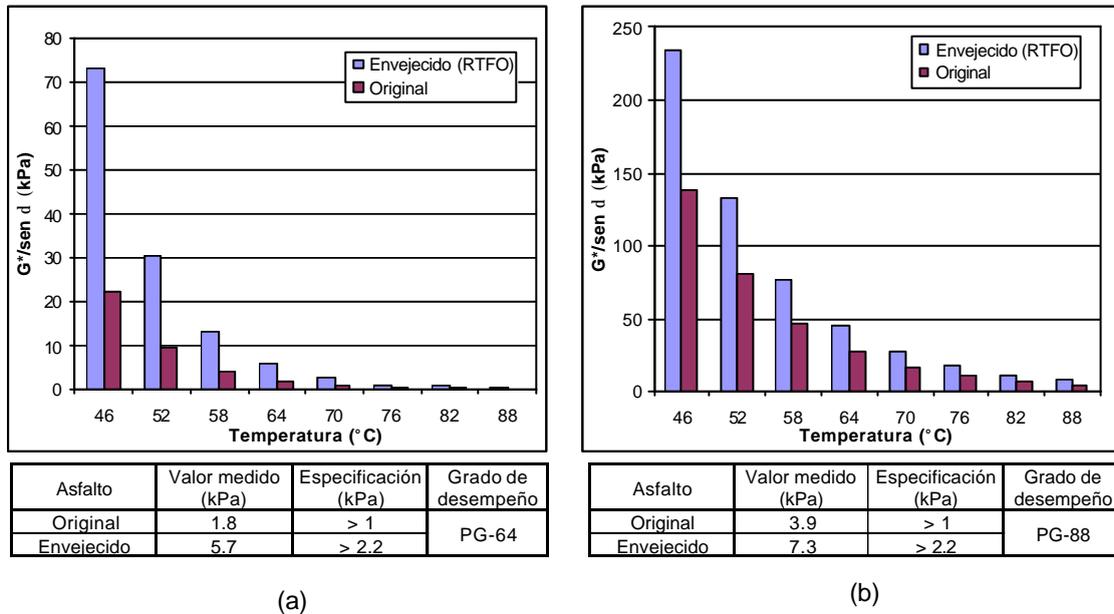
La prueba se realizó a los asfaltos en su estado original y envejecido en el horno RTFO. La Figura 4.5 muestra la variación del valor  $G^*/\text{sen } \delta$  para las diferentes temperaturas a las que se ejecutó el ensaye. Se puede ver que el valor de  $G^*/\text{sen } \delta$  disminuye notablemente a medida de que aumenta la temperatura de prueba. Se observa también que tanto para el cemento asfáltico modificado y sin modificar, los valores de  $G^*/\text{sen } \delta$  son más altos para el asfalto envejecido; esto es debido al

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



**Figura 4.4**  
**Reómetro de corte dinámico (DSR)**

En la Figura 4.5 se puede ver que la diferencia entre los grados de desempeño entre el cemento asfáltico AC-20 sin modificar (PG-64), y el modificado con 3% de SBS (PG-88) es bastante amplia, dado los mayores valores de  $G^*/\text{sen } \delta$  que se presentan para este último tipo de ligante, lo que indica que el asfalto modificado presenta una rigidez muy superior a altas temperaturas, que el cemento asfáltico sin modificar.



**Figura 4.5**  
**Caracterización del ligante asfáltico en el DSR; (a) AC-20; (b) SBS-3%**

## 4.2 Características de la mezcla asfáltica

### 4.2.1 Porcentajes de asfalto y niveles de compactación

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

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

**Tabla 4.3**  
**Selección de los contenidos de asfalto**

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

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

Los niveles de compactación aplicados en el experimento se muestran en la Tabla 4.4 y 4.5 para las probetas elaboradas con la metodología Superpave y Marshall respectivamente. Tanto los rangos de nivel de compactación, como los de contenido de asfalto elegidos para cada metodología, contemplan valores típicos que se manejan en la práctica, para el diseño de una mezcla asfáltica en caliente en el laboratorio.

**Tabla 4.4**  
**Características de las probetas Superpave**

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

Nota: se elaboraron tres replicas para cada condición

**Tabla 4.5**  
**Características de las probetas Marshall**

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

Nota: se elaboraron dos replicas para cada condición

### 4.2.2 Elaboración de la mezcla asfáltica

Una vez que los materiales se acondicionan cercanos a la temperatura de mezclado, se dosifica el asfalto en peso con respecto a la mezcla total (Figura 4.6a). Posteriormente se procede al cubrimiento del agregado pétreo, manteniendo la temperatura de mezclado dentro del rango especificado hasta que las partículas más gruesas se hayan cubierto totalmente (Figura 4.6b).

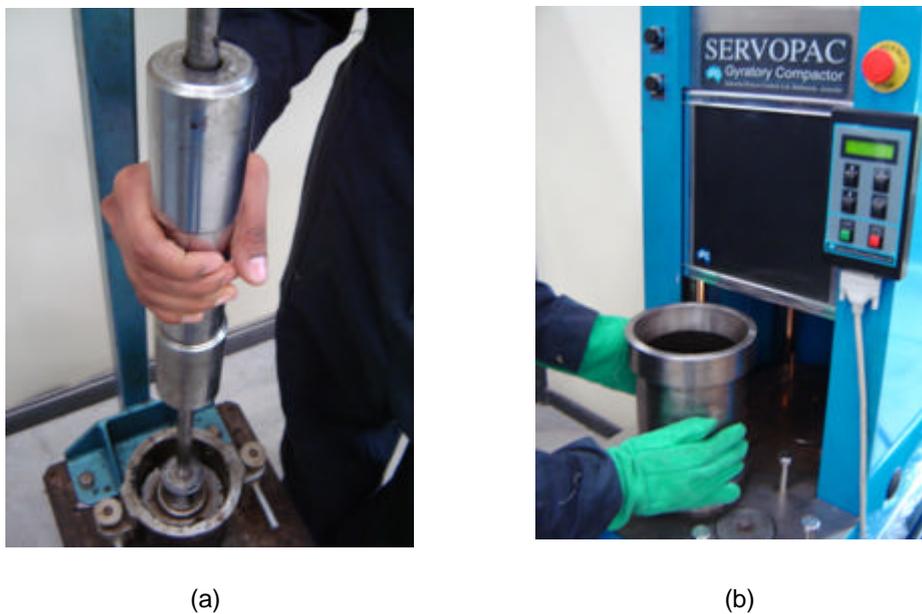
Cuando la mezcla haya alcanzado la temperatura de compactación, se coloca dentro de los moldes donde va ser compactada. Los moldes deberán estar calientes, así como los demás accesorios que se utilicen en el vaciado y acomodo de la mezcla, con el fin de evitar una reducción de temperatura de la mezcla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



**Figura 4.6**  
**Elaboración de la mezcla asfáltica**

### 4.2.3 Compactación

En la compactación de la mezcla asfáltica caliente se utilizó el compactador giratorio para las probetas Superpave, y el martillo de impacto para las probetas Marshall. Los distintos niveles de compactación utilizados son los establecidos en las Tablas 4.4 y 4.5.

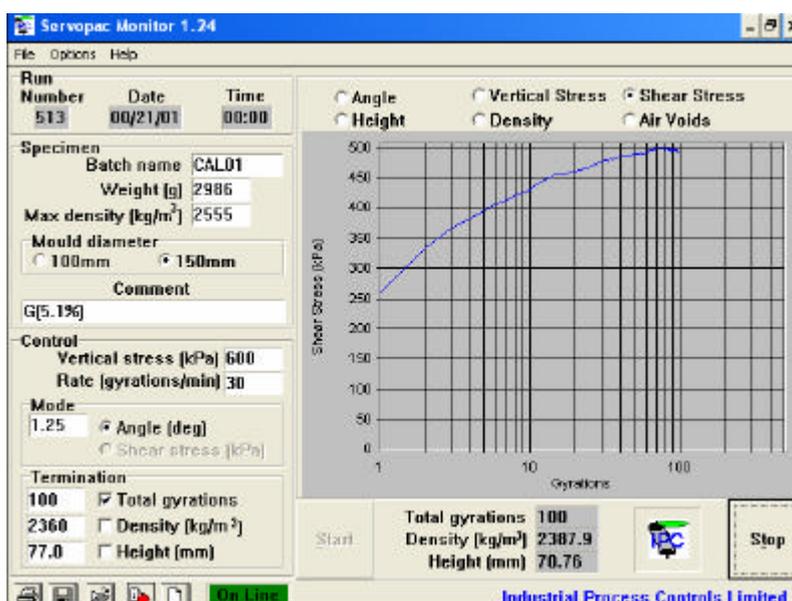


**Figura 4.7**  
**Compactación de la mezcla asfáltica**

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

En la Figura 4.8 se puede observar el desarrollo de los esfuerzos de corte, a medida que aumenta el número de giros.

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



**Figura 4.8**  
**Mediciones de los esfuerzos de corte en el compactador giratorio**

Con el propósito de realizar un análisis comparativo a nivel volumétrico entre las dos metodologías, se tomó como referencia un nivel de tránsito de 10 millones de ejes equivalentes (ESALs). Los niveles de compactación para esta condición se incluyen en la Tabla 4.6 donde se observa que dichos niveles se encuentran dentro de los ya contemplados en el experimento.

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

**Tabla 4.6**  
**Niveles de compactación de diseño para 10 millones de ESALs**

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

En la Figura 4.9 se muestra el aspecto de las probetas fabricadas con cada metodología



**Figura 4.9**  
**Probetas de mezcla asfáltica**

### 4.3 Pruebas fundamentales a la mezcla asfáltica

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

#### 4.3.1 Gravedad específica neta ( $G_{mb}$ )

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

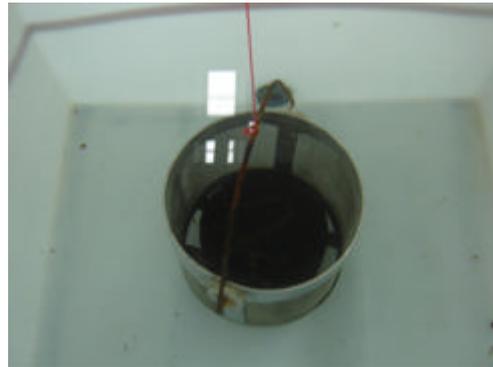
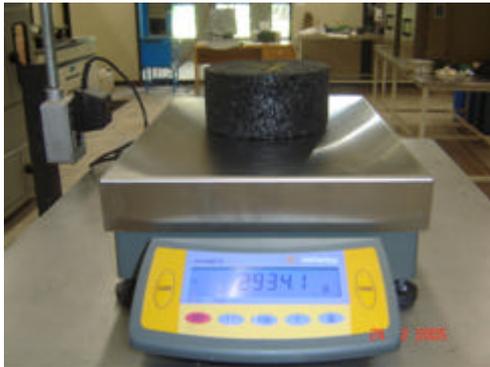
$$G_{mb} = \frac{A}{B - C} \quad (4.1)$$

Donde:

A = masa del espécimen al aire

B = masa del espécimen saturado, y superficialmente seco

C = masa del espécimen sumergido en agua



**Figura 4.10**

**Determinación de la gravedad específica neta de la mezcla compactada**

Para la determinar la gravedad específica de las probetas que presentaron mas del 2 % de absorción se empleó el procedimiento que describe la Norma ASTM D1188, la cual requiere impermeabilizar las probetas de mezcla asfáltica con una película de parafina (Figura 4.11).



**Figura 4.11**

**Probetas de mezcla asfáltica parafinadas**

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

$$G_{mb} = \frac{A}{D - E - \left( \frac{D - A}{F} \right)} \quad (4.2)$$

Donde:

D = masa al aire del espécimen parafinado

E = masa del espécimen sumergido en agua

F = gravedad específica de la parafina

### 4.3.2 Gravedad específica teórica máxima (Gmm)

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



(a)



(b)

**Figura 4.12**  
**Determinación de la gravedad específica teórica máxima.**  
**(a) picnómetro (b) mezcla asfáltica en estado suelto**

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

$$G_{mm} = \frac{G}{G + H - I} \quad (4.3)$$

Donde:

G = masa de la mezcla asfáltica (estado suelto)

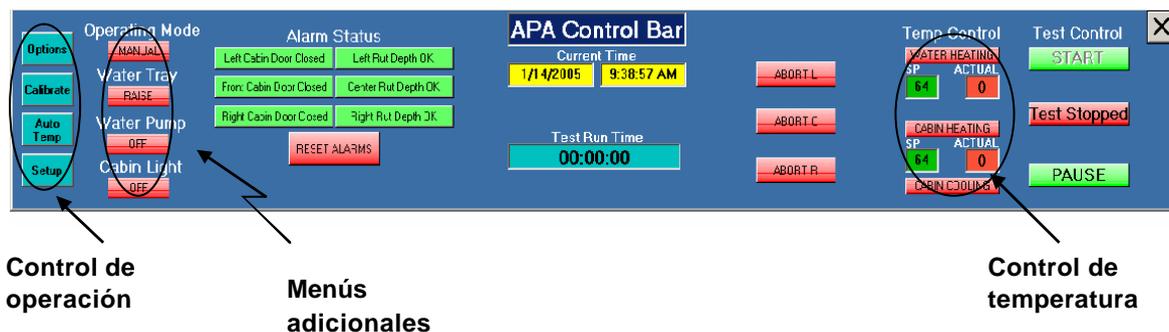
H = masa del picnómetro + agua

I = masa del picnómetro + mezcla + agua

## 4.4 Susceptibilidad a la deformación permanente en el APA

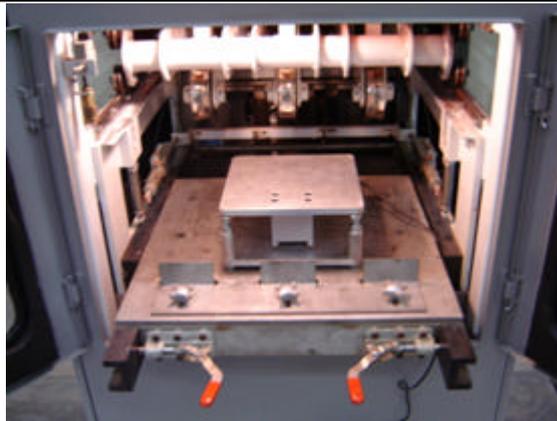
La evaluación de la susceptibilidad de la mezcla asfáltica a la deformación permanente, se realizó mediante el ensayo de rueda cargada en el APA. El procedimiento de la prueba se describe a continuación:

1. Las probetas se acondicionan en el horno a la temperatura de prueba (64°C) por un espacio de 6 h previo al ensaye.
2. Se enciende el equipo, y desde el software de operación se introduce la temperatura de prueba en el panel de control principal (Figura 4.13).



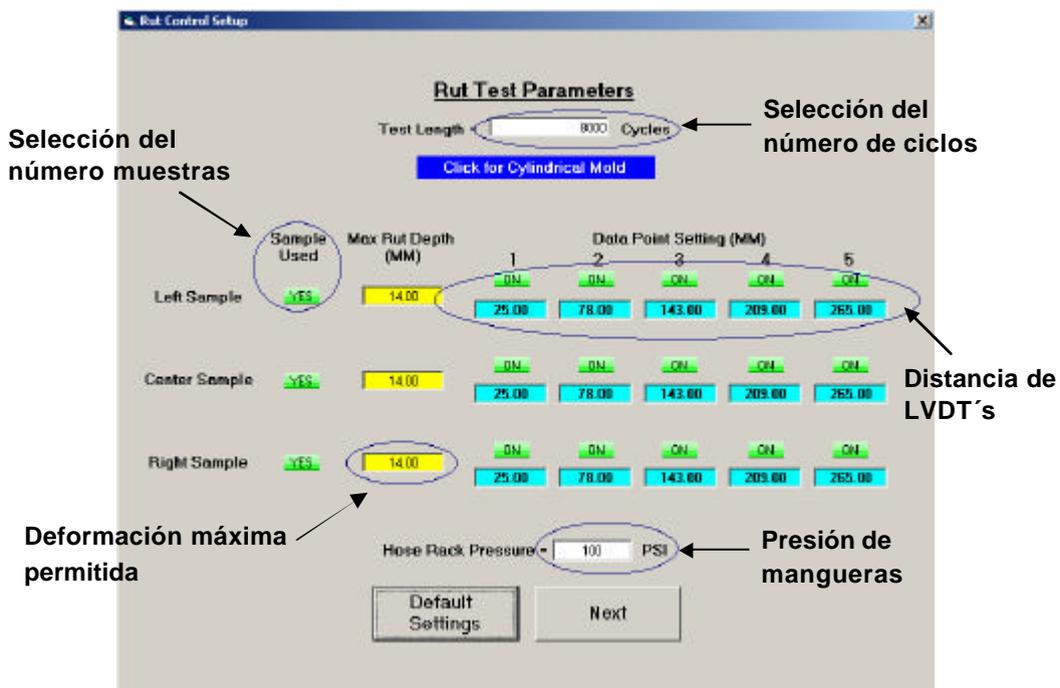
**Figura 4.13**  
**Panel de control principal del APA**

3. Se lleva a cabo la calibración de las ruedas del APA mediante una celda de carga (Figura 4.14), a fin de asegurar que cada rueda aplique un fuerza de 100 lb durante el desarrollo de la prueba.



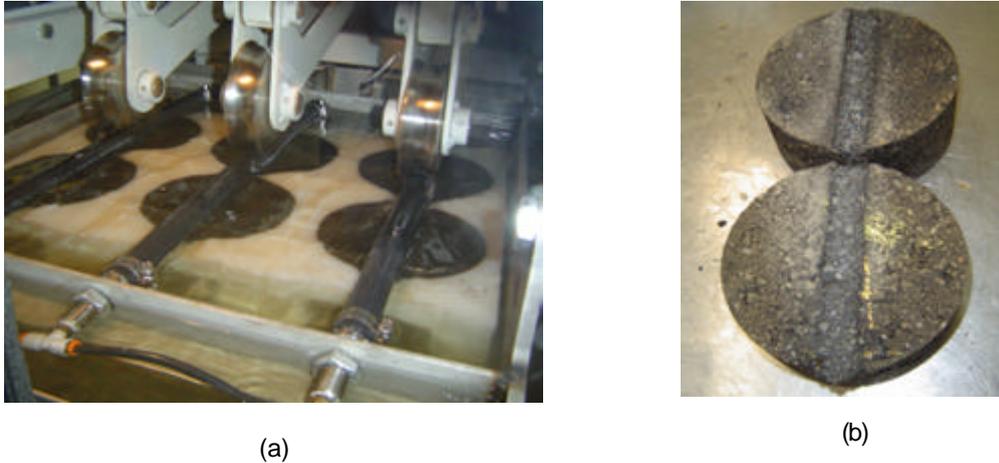
**Figura 4.14**  
**Calibración de las ruedas del APA**

4. En el panel de control del ensayo de deformación permanente (Figura 4.15), se especifica el tipo de probeta (viga o moldes cilíndricos); número de ciclos; presión de las mangueras; posición de los medidores de deformación (LVDT,s), entre otros parámetros. La prueba se ejecutó a 8 000 ciclos, con una presión de aire en las mangueras de 100 lb/pulg<sup>2</sup>.



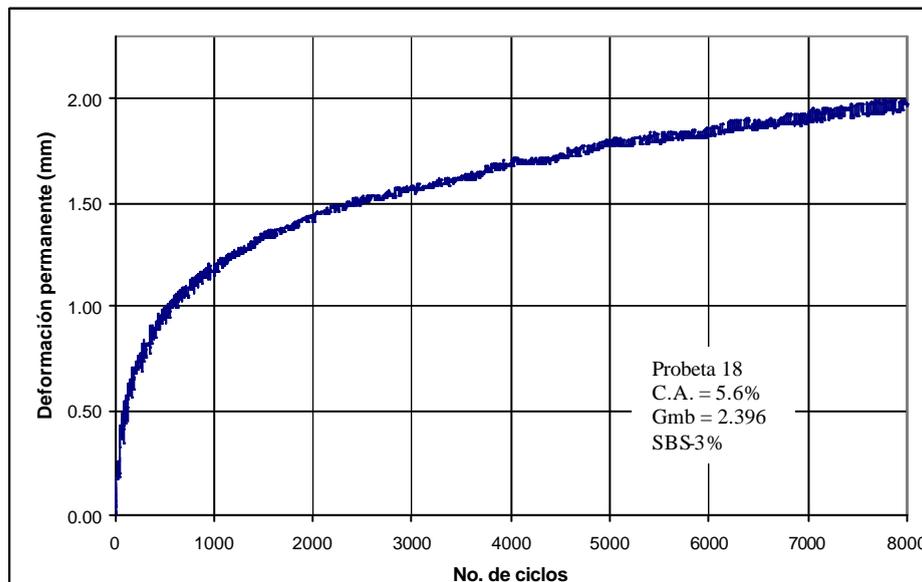
**Figura 4.15**  
**Panel de control para el ensayo de deformación permanente en el APA**

5. Una vez que el equipo ha alcanzado los 64 °C se sacan las probetas del horno y se colocan las probetas dentro de los moldes de plástico, mismos que se introducen en el APA de tal forma que queden centrados por debajo de cada rueda (Figura 4.16a).



**Figura 4.16**  
**Evaluación de la deformación permanente en el APA**

La prueba termina una vez completados los 8 000 ciclos, la Figura 4.16b muestra la apariencia de las probetas después del ensayo de deformación permanente en el Analizador de Pavimentos Asfálticos. En la Figura 4.17 se aprecia una curva típica de la evolución de la deformación permanente durante la prueba.



**Figura 4.17**  
**Evolución de la deformación permanente en el APA**



## 5 Análisis de los resultados

---

Dada la gran cantidad de información que se manejó en esta parte del estudio, se optó por realizar un análisis estadístico para destacar las características de la mezcla asfáltica compactada que más influyen en los resultados de los ensayos.

### 5.1 Análisis estadístico

Con objeto de determinar cuales son los factores de importancia en el estudio, y en que forma interactúan y afectan la respuesta, se realizó el análisis de varianza y de residuales para el experimento factorial en cuestión.

#### 5.1.1 Análisis de varianza

El análisis de varianza permite ajustar un modelo completo que incluye los factores principales y las combinaciones entre estos. Una forma de interpretar los resultados de un análisis de varianza para determinar cuales efectos son los más significativos en un experimento, es mediante un **estadístico de prueba** ( $F_o$ ) que permite aceptar o rechazar la hipótesis nula ( $H_o$ ) de que cierta variable no influye en el resultado.  $H_o$  deberá rechazarse cuando:

$$F_o > F_{(a, a-1, N-a)}$$

Donde:

$F_{a, a-1, N-a}$  = puntos porcentuales de la distribución F

$a$  = nivel de significancia

$v_1$  = grados de libertad para la variable en cuestión

$v_2$  = grados de libertad correspondiente al error

Para el análisis de los resultados en este experimento, se empleó un nivel de significancia de 0.05.

Las hipótesis que se manejan en los análisis de varianza que se realizaron en este experimento son:

$H_o$  = la variable no influye en la respuesta

$H_1$  = la variable tiene influencia en la respuesta

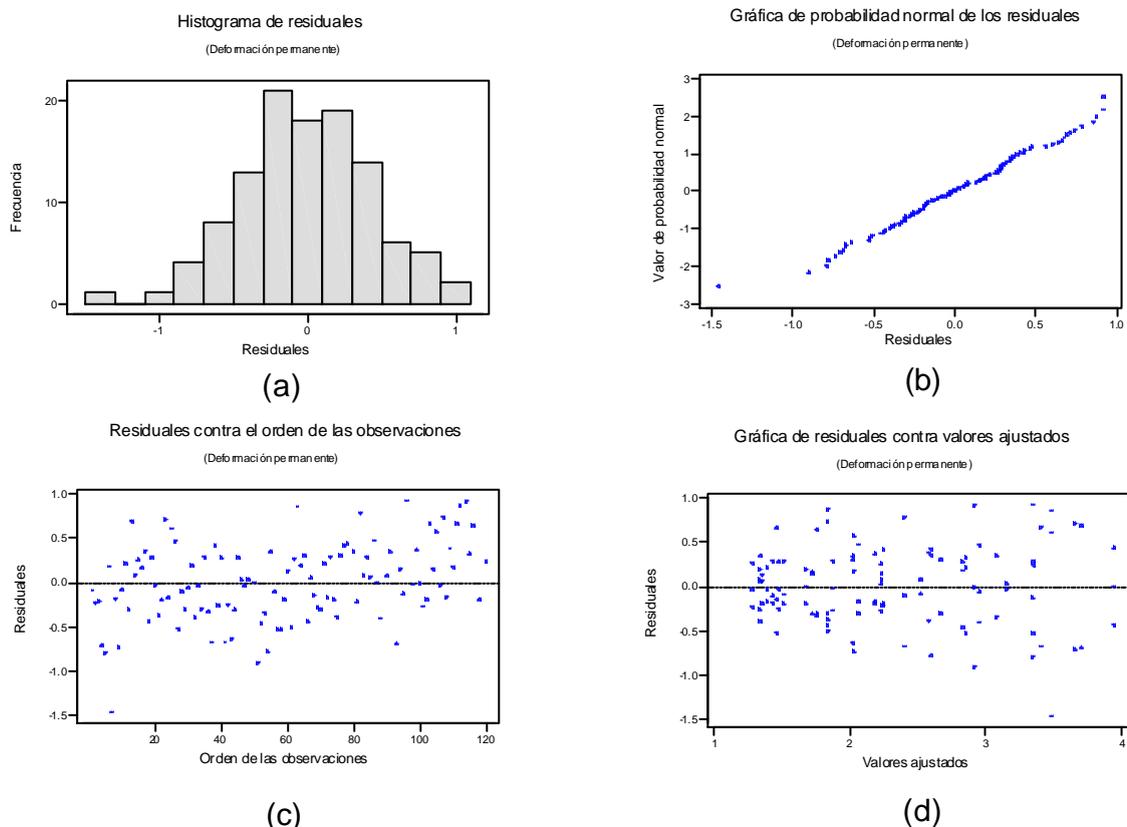
La *respuesta* se define como los resultados que se obtuvieron de la experimentación; en este caso, deformación permanente, resistencia a la tensión indirecta, y esfuerzos de corte medidos en el compactador giratorio.

## 5.1.2 Análisis de residuales

El uso de un análisis de varianza para resaltar los factores que influyen significativamente en una respuesta, requiere que se cumplan ciertos supuestos. Específicamente, estos supuestos son que el modelo describe de manera adecuada las observaciones, y que los errores siguen una distribución normal e independiente con media cero y varianza  $s^2$  constante, pero desconocida. Si estos supuestos se satisfacen, el procedimiento del análisis de varianza es una prueba exacta de la hipótesis de que no hay diferencia en las medias de los factores (Montgomery).

Sin embargo, es común que en la práctica estos supuestos no se satisfagan exactamente. Por consiguiente, en general no es prudente confiar en el análisis de varianza hasta haber verificado tales supuestos. Las violaciones de los supuestos básicos y la adecuación del modelo pueden investigarse con facilidad mediante el análisis de los residuales. Los residuales se definen como la diferencia entre las observaciones reales y las observaciones predichas por el modelo.

En la Figura 5.1 se presenta como ejemplo el examen de residuales del análisis de varianza del experimento realizado para evaluar la deformación permanente en mezclas asfálticas densas, con el analizador de pavimentos asfálticos (APA)



**Figura 5.1**  
**Examen de residuales del análisis de varianza realizado**

La verificación del supuesto de normalidad puede hacerse mediante un histograma de residuales (Figura 5.1a), donde se observa que los residuales, siguen prácticamente una distribución de tipo normal. Un procedimiento en extremo útil es construir una gráfica de probabilidad normal de los residuales (Figura 5.1b).

Si la distribución fundamental de los errores es normal, esta gráfica tendrá la apariencia de una línea recta, pero para poderla visualizar deberá prestarse más atención a los valores centrales de la gráfica que a los valores extremos. La Figura 5.1b indica que se cumple considerablemente bien el supuesto de normalidad.

En ocasiones las habilidades del experimentador, o la exactitud en las mediciones de los equipos, puede cambiar conforme el experimento avanza, debido a esto el proceso bajo estudio puede volverse más errático, esto suele producir con frecuencia un cambio en la varianza del error con el tiempo. Lo cual puede conllevar a una gráfica de los residuales contra el tiempo, que muestre una dispersión mayor en uno de sus extremos.

Si el modelo es correcto y se satisfacen los supuestos, los residuales deberán estar sin estructura; es decir, no deberán mostrar ningún patrón obvio. Para identificar la presencia de **varianzas no constantes** se utilizan gráficas de residuales contra el orden de las observaciones en el experimento (Figura 5.1c), así como gráficas de residuales contra los valores ajustados del modelo (Figura 5.1d). Si existe una varianza no constante, la varianza de las observaciones se incrementa conforme la magnitud de la observación se incrementa.

Si éste fuera el caso, los residuales se harían mayores conforme el número de observaciones fuera más grande y la gráfica de los residuales se vería como un embudo o un megáfono con la boca hacia afuera. Analizando la Figura 5.1c y 5.1d, se concluye que no hay razón para sospechar cualquier violación a los supuestos de una varianza constante.

El examen de residuales se llevó a cabo para todos los análisis de varianza que se presentan en este capítulo.

## 5.2 Deformación permanente

En la Tabla 5.1 se presenta el resumen del análisis de varianza para los datos de deformación permanente medidos en el analizador de pavimentos asfálticos.

Se puede observar que los factores que más influyen en los resultados de la respuesta (deformación permanente) son el nivel de compactación y el tipo de asfalto, así como la interacción nivel de compactación-tipo de asfalto y contenido de asfalto-tipo de asfalto.

Una manera de visualizar los efectos de los factores significativos en una respuesta es mediante gráficas de factores principales, y/o gráficas de interacción.

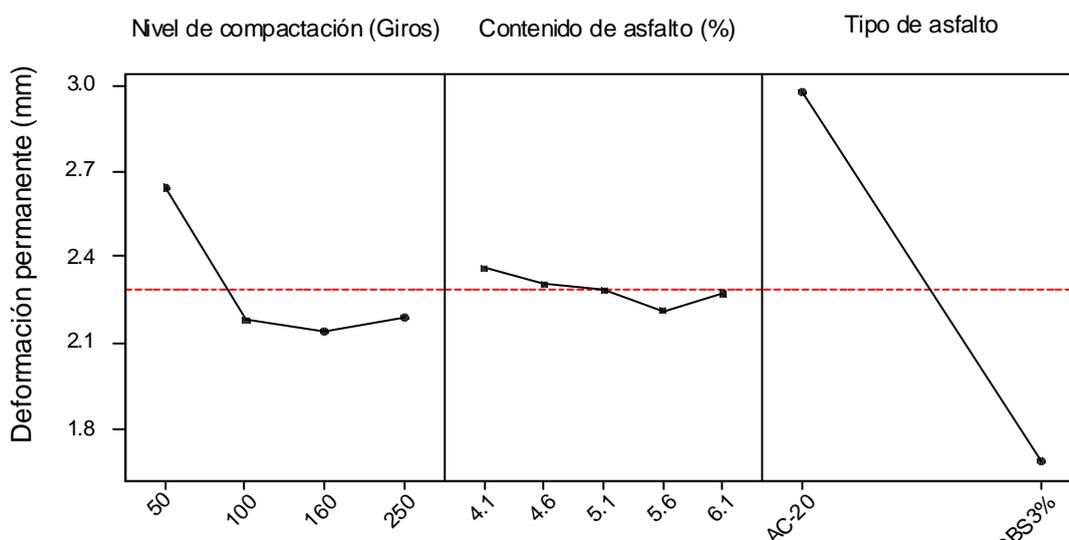
**Tabla 5.1**

**Análisis de varianza para la deformación permanente medida en el APA**

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	F <sub>o</sub>	F (α=0.05)	Se rechaza H <sub>o</sub>
Nivel compactación (A)	4.75	3	1.81	6.18	2.73	<b>SI</b>
Contenido de asfalto (B)	0.19	4	0.03	0.10	2.50	NO
Tipo de asfalto (C)	46.70	1	46.42	157.81	3.97	<b>SI</b>
AB	1.88	12	0.16	0.54	1.89	NO
AC	2.43	3	0.82	2.80	2.73	<b>SI</b>
BC	5.66	4	1.38	4.68	2.50	<b>SI</b>
ABC	2.78	12	0.23	0.79	1.89	NO
Error	21.18	72	0.29			
Total	85.57	111				

*H<sub>o</sub>: La variable no influye en la respuesta*

En la Figura 5.2 se muestra una gráfica de efectos principales en la que se exponen los tres factores que intervienen en el experimento, con sus respectivos niveles; la línea discontinua representa la gran media (el promedio de todos los valores medidos de la respuesta); y los puntos en cada nivel representan los promedios de la respuesta (deformación permanente) para dicho nivel.



**Figura 5.2**

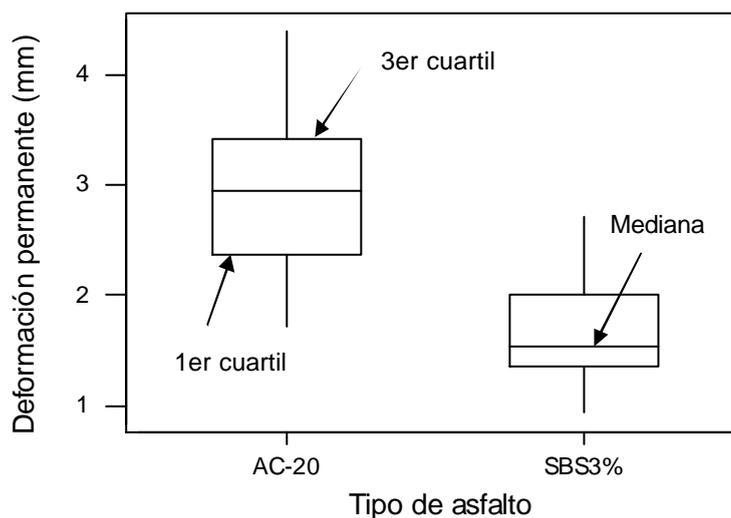
**Gráfica de efectos principales de los valores medios de la deformación**

La magnitud de los efectos en la gráfica se puede interpretar por la pendiente entre las medias de cada nivel. Una pendiente poco pronunciada indica un efecto bajo de cierto factor con respecto a otro. Conforme el criterio anterior, se observa que el tipo de asfalto es el factor que más influye en la deformación permanente, y que los menores valores de deformación se presentaron para las mezclas asfálticas elaboradas con cemento asfáltico modificado con SBS al 3%.

Esto último se atribuye a que las probetas elaboradas con el cemento asfáltico modificado con SBS, exhibieron mayor rigidez a la temperatura de prueba (64°C), que las probetas a base de AC-20 sin modificar.

También se puede observar que las probetas elaboradas con 50 giros presentan los mayores valores de deformación permanente en comparación con los otros tres niveles de compactación, en los que no parece haber una diferencia apreciable entre ellos en cuanto a valores medios de la deformación. En lo que respecta al contenido de asfalto, los valores promedio para cada contenido oscilan muy cerca de la gran media; esto es un indicador de que la prueba de deformación permanente para la granulometría y tipo de agregado utilizado resultó poco sensible al contenido de asfalto.

Otra forma de ilustrar los efectos de un factor es mediante el uso de *diagramas de caja* (Figura 5.3) en donde se puede observar a simple vista por la posición relativa de los recuadros por ejemplo, que las mezclas elaboradas con AC-20 sin modificar producen los mayores valores de la deformación permanente. La línea a través de los recuadros representa la mediana de los datos. La parte de abajo y superior del recuadro representan el primer (25 percentil) y tercer cuartil (75 percentil), respectivamente.



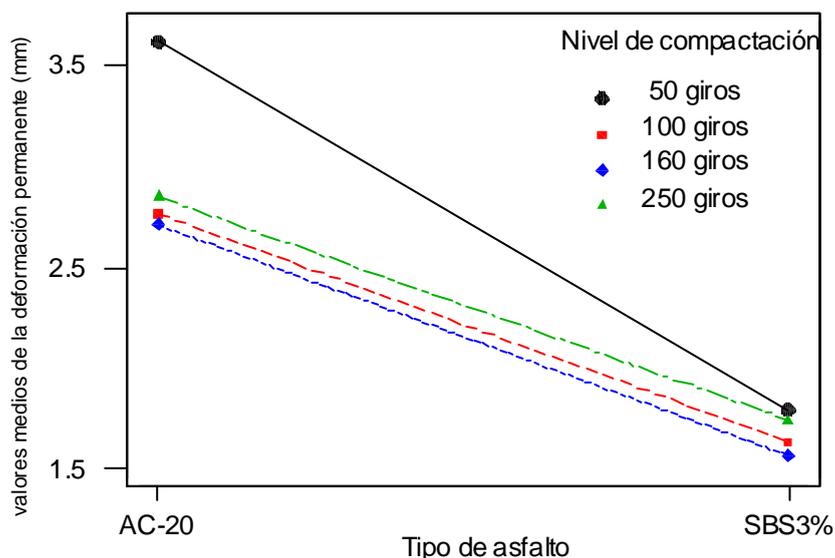
**Figura 5.3**  
**Diagramas de caja**

Hasta ahora se ha analizado solamente el efecto que tienen los factores en forma individual en la respuesta de la mezcla asfáltica, en términos de la deformación permanente. Sin embargo, siempre es necesario examinar cualquier interacción que sea importante; en este caso, examinaremos las interacciones significativas que resultaron del análisis de varianza.

Para distinguir en qué nivel(es), la magnitud de los efectos es importante entre factores que se relacionan entre sí, es usual observar en la gráfica de interacción las pendientes de las líneas. De manera análoga que en las gráficas de efectos especiales pendientes más pronunciadas, indican mayor influencia de un factor para determinado nivel.

En la Figura 5.4 se muestra la influencia del tipo de ligante en los valores medios de la deformación permanente para diferentes niveles de compactación. Se observa que el nivel de compactación correspondiente a los 50 giros para las probetas elaboradas con AC-20, influye de manera importante en los valores de la deformación permanente.

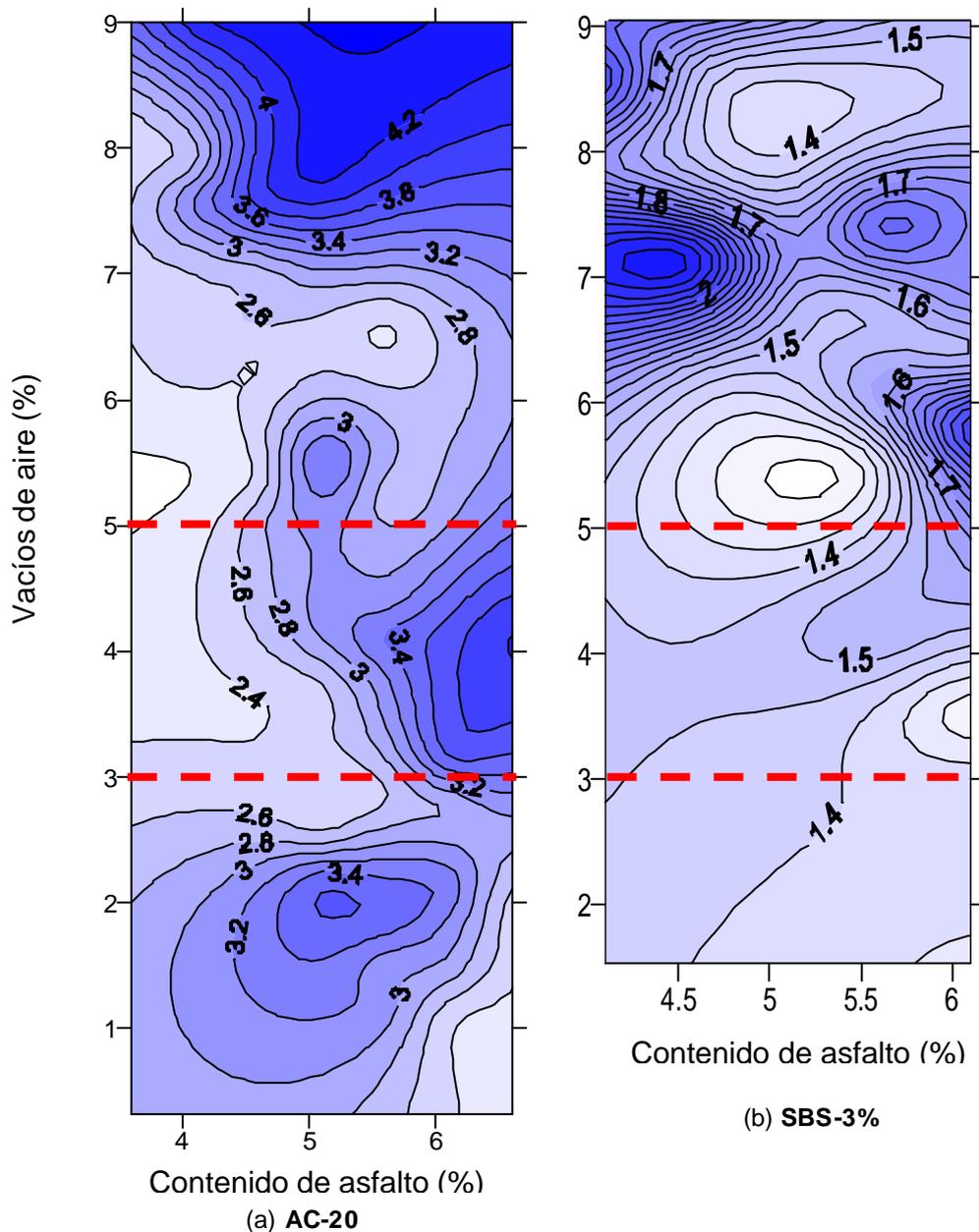
El hecho de que se hayan obtenido valores más altos de deformación en las probetas elaboradas en el compactador giratorio con 50 giros parece ser bastante razonable; dado que estas probetas tenían un porcentaje de vacíos de aire altos (densidades bajas), lo cual permite una consolidación adicional de la probeta durante el ensayo de rueda cargada en el APA. En lo que corresponde a los demás niveles de compactación, 100, 160 y 250 giros, parece no haber una relación muy definida, ya que los valores de deformación oscilan dentro de un rango muy estrecho tanto para las probetas elaboradas con cemento asfáltico modificado y sin modificar.



**Figura 5.4**  
**Gráfica de interacción, tipo de asfalto-nivel de compactación**

De acuerdo con el análisis de varianza realizado, otra interacción que resulta estadísticamente significativa es la del tipo de asfalto contra el contenido de asfalto. Esta interacción se decidió explicar mediante gráficas de contorno, analizando por separado para cada tipo de asfalto, el efecto que tiene en la deformación permanente la densidad de la mezcla asfáltica compactada ( $G_{mb}$ ), y los vacíos de aire contra el contenido de asfalto.

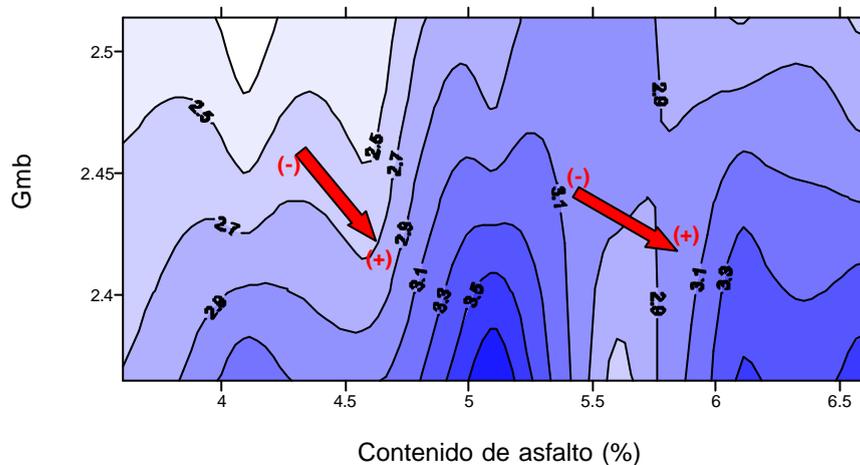
En las Figura 5.5 y 5.6 se presentan los mapas de contorno para ilustrar el efecto de los vacíos de aire, densidad de la mezcla, y el contenido de asfalto en la deformación permanente de la mezcla asfáltica elaborada con los distintos tipos de ligante.



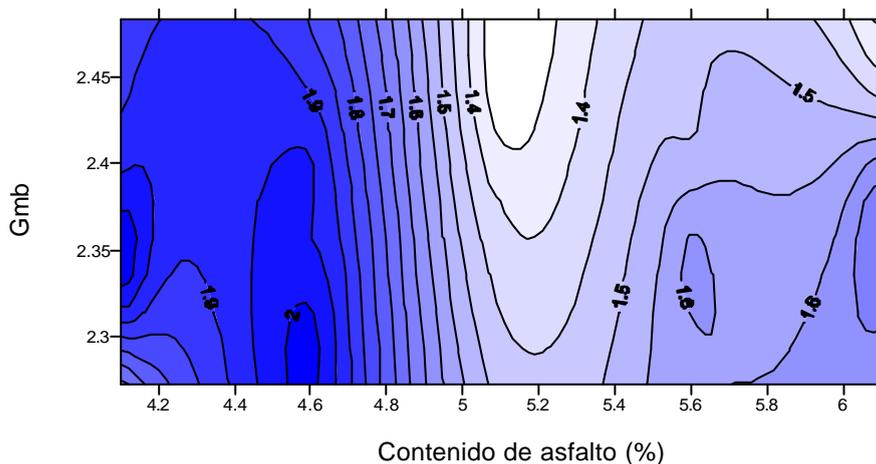
**Figura 5.5**  
Mapas de contorno para ilustrar la variación de la deformación

Cabe mencionar que para definir los mapas de contorno para la mezcla asfáltica elaborada con cemento asfáltico AC-20 sin modificar, se fabricaron probetas con contenidos de asfalto de 3.6 y 6.6%, porcentajes de asfalto adicionales a los definidos en el experimento.

Se puede observar en la Figura 5.5<sup>a</sup>, que los valores más altos de la deformación permanente se presentan para los porcentajes de vacíos más altos, específicamente arriba del 7 %. Con líneas discontinuas se señala el rango de vacíos de aire (3 a 5 %) establecido por los métodos de diseño de mezclas asfálticas de uso actual. Se puede observar que para este rango de vacíos, a medida que aumenta el contenido de asfalto se incrementan los valores de la deformación permanente.



(a) AC-20



(a) SBS-3%

**Figura 5.6**  
**Mapas de contorno para ilustrar la variación de la deformación**

En la Figura 5.6a se observa que para densidades más altas de la mezcla compactada y los contenidos de asfalto más bajos, es donde se presentan los menores valores de la deformación permanente (esquina superior izquierda). Las flechas superpuestas en el mapa indican una tendencia bien marcada en donde se observa que a medida que la densidad disminuye y el contenido de asfalto se incrementa, los valores de la deformación permanente tienden a aumentar.

Los mapas de contorno para las mezclas elaboradas con cemento asfáltico modificado con 3% de SBS (gráficas 5.5b y 5.6b), no parecen tener un patrón bien definido, ya que cualquier variación de la deformación permanente que pudiese haber por la densidad de la mezcla, los vacíos de aire o el contenido de asfalto, parece ser absorbido por la rigidez que el ligante modificado aporta a la mezcla con polímero SBS para las altas temperaturas del ensaye.

### 5.3 Esfuerzos de corte

Los esfuerzos de corte medidos durante la compactación giratoria, difícilmente son capaces de identificar los efectos de la rigidez del asfalto o su grado de desempeño; este parámetro aparentemente solo indica los efectos de la estructura del agregado y volumen de asfalto. Es decir, variaciones en la distribución granulométrica o cambios en el contenido de asfalto pueden ser identificados, un cambio en la rigidez es difícil de identificar, dado que la compactación de la mezcla se lleva a cabo dentro de un mismo rango de viscosidades, independientemente del tipo de ligante asfáltico.

El análisis de varianza para los esfuerzos de corte (Tabla 5.3) muestra cierta dependencia del contenido de asfalto y el tipo de asfalto en los valores obtenidos de los esfuerzos de corte medidos.

**Tabla 5.3**  
**Análisis de varianza para las mediciones de los esfuerzos de corte**

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	F <sub>o</sub>	F (α=0.05)	Se rechaza Ho
Nivel compactación (A)	3629	3	1249.5	1.94	2.86	<b>NO</b>
Contenido de asfalto (B)	22754	4	5155.5	8.02	2.63	<b>SI</b>
Tipo de asfalto (C)	4071	1	4340.9	6.75	4.11	<b>SI</b>
AB	3670	12	312.2	0.49	2.02	<b>NO</b>
AC	5957	3	2026.6	3.15	3.86	<b>NO</b>
BC	390	4	88.5	0.14	2.63	<b>NO</b>
ABC	820	12	68.3	0.11	2.02	<b>NO</b>
Error	23791	39	643.0			
Total	65083	78				

*Ho: La variable no influye en la respuesta*

Para ilustrar los resultados del análisis de varianza, en la figura 5.14 se presentan las gráficas de efectos principales, donde se observa el marcado efecto del contenido de asfalto en los esfuerzos de corte medidos durante la compactación giratoria.

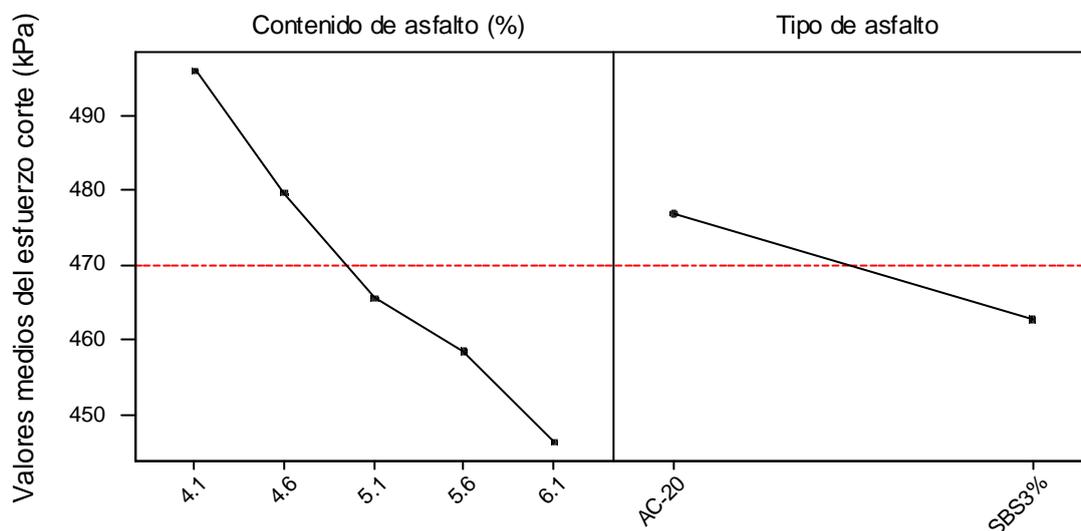


Figura 5.15

#### Efectos principales para los valores medios de los esfuerzos de corte

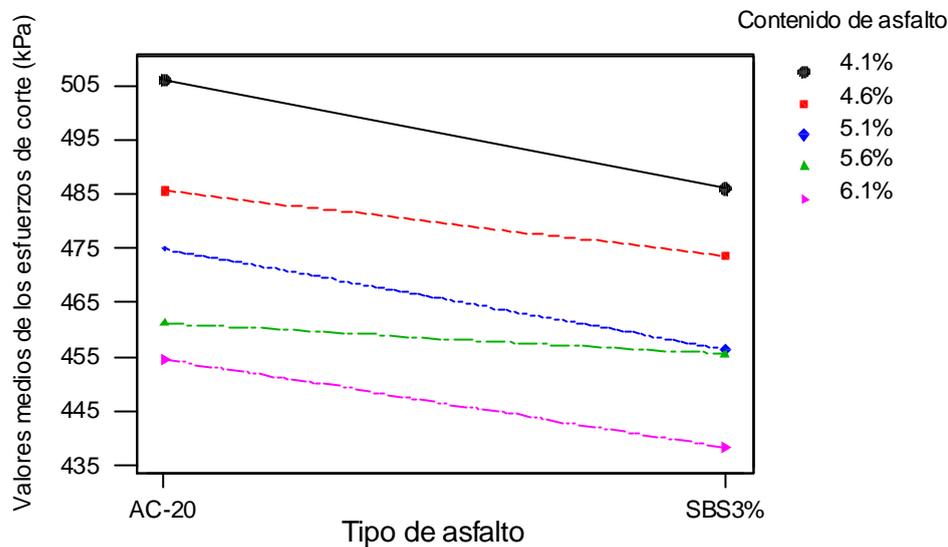
Los valores medios del esfuerzo de corte descienden a medida en que aumenta el contenido de asfalto, esto puede atribuirse a que a la temperatura de mezclado, el ligante actúa como un lubricante que afecta notablemente el contacto entre partículas, y por ende a la resistencia al corte de la mezcla.

Se obtuvo un valor medio de esfuerzos de corte más alto para las probetas elaboradas con cemento asfáltico AC-20 sin modificar, que las que contenían un 3% de SBS. Estos resultados se deben a una variación de la granulometría más que al tipo de asfalto utilizado, ya que aunque durante la compactación se manejaron distintas temperaturas, ambos tipos de ligante tenían aproximadamente la misma viscosidad. Cabe destacar entonces, que las mediciones de los esfuerzos de corte en el compactador giratorio fueron sensibles a esta variación de la granulometría.

En la Figura 5.16 se muestra el efecto del tipo de asfalto en los valores medios de los esfuerzos de corte para diferentes contenidos de asfalto.

Se observa, que independientemente del tipo de asfalto y de la variación de la granulometría que se comentaba, los valores de los esfuerzos de corte disminuyen a medida que se incrementa el contenido de asfalto. Se puede ver que para esta

mezcla asfáltica densa, el contenido de asfalto es un parámetro identificable durante la compactación giratoria.



**Figura 5.16**

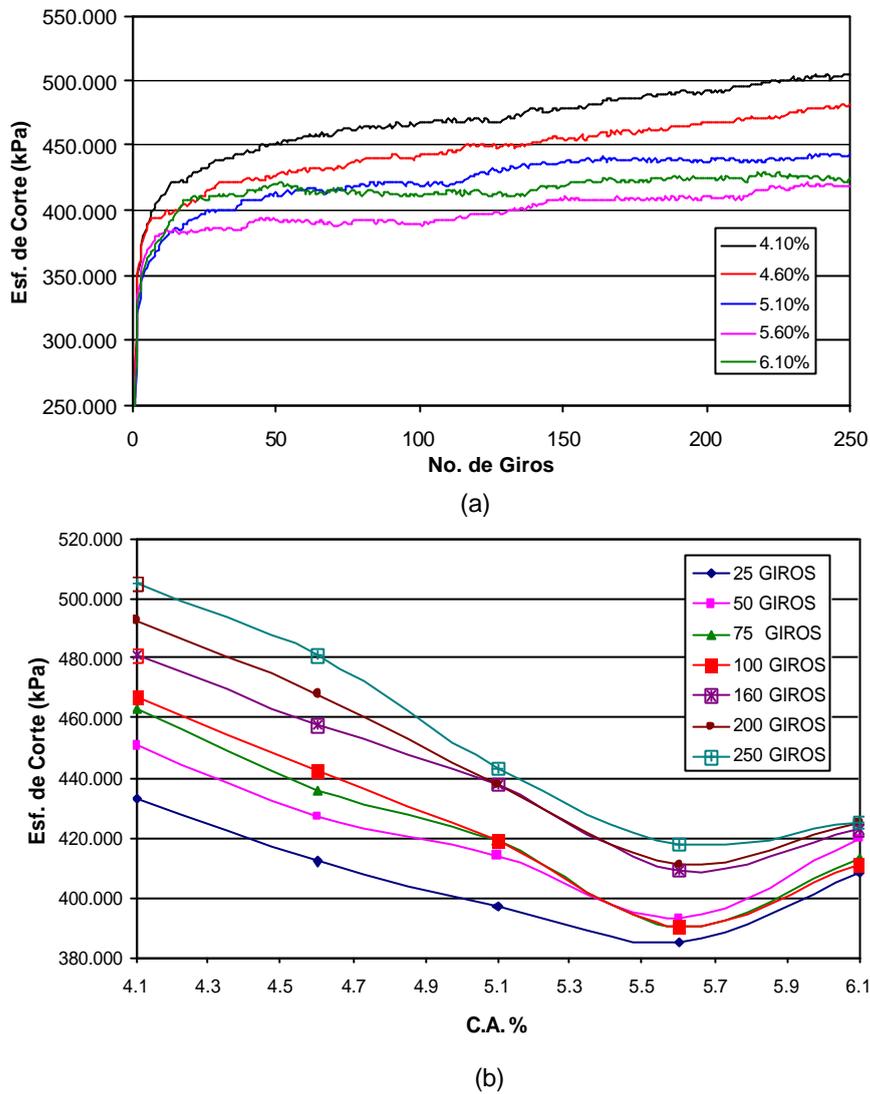
**Gráfica de interacción contenido de asfalto – tipo de asfalto**

En la Figura 5.17 se muestra el desarrollo de los esfuerzos de corte durante la compactación giratoria. Para elaborar esta gráfica se utilizaron los especímenes compactados a 250 giros, ya que de esta forma se obtiene un barrido completo de los niveles de compactación utilizados en el experimento.

Por su parte en la Figura 5.17a se puede apreciar que aparte del efecto del contenido de asfalto que se comentaba, también se observa en esta gráfica el incremento de los esfuerzos de corte, a medida que aumenta el nivel de compactación sobre todo para los contenidos de asfalto más bajos.

A su vez, en la gráfica de la Figura 5.17b se puede ver que todavía hasta los 250 giros, se sigue presentando un incremento en los esfuerzos de corte para cada contenido de asfalto empleado. Bajo las condiciones en que se realiza la compactación giratoria, es el agregado el que más resistencia al corte aporta a la mezcla asfáltica; es por ello que podemos decir que para este número de giros, la mezcla se sigue densificando y el comportamiento del agregado, bajo este nivel de esfuerzos es satisfactorio.

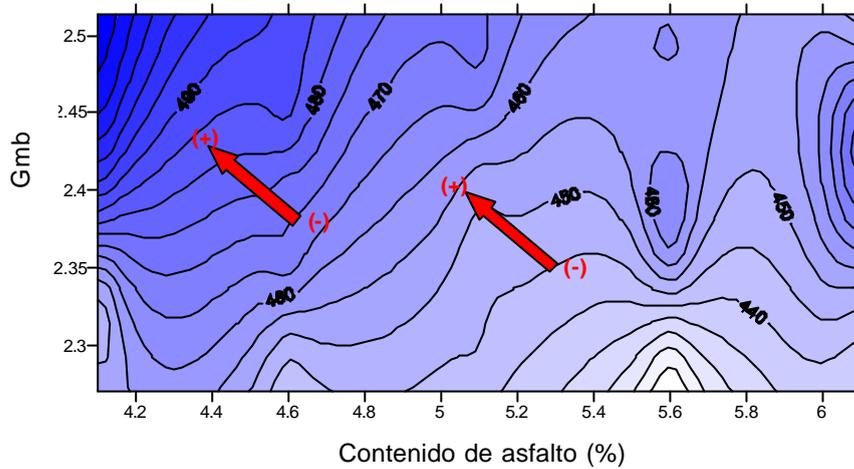
A pesar del análisis de varianza obtenido en esta parte de la interpretación de los resultados al no parecer destacar un efecto importante del nivel de compactación en los esfuerzos de corte, se decidió explicar este efecto mediante un parámetro más fundamental de la mezcla asfáltica compactada, como lo es su densidad (Gmb), en vez de utilizar el número de giros.



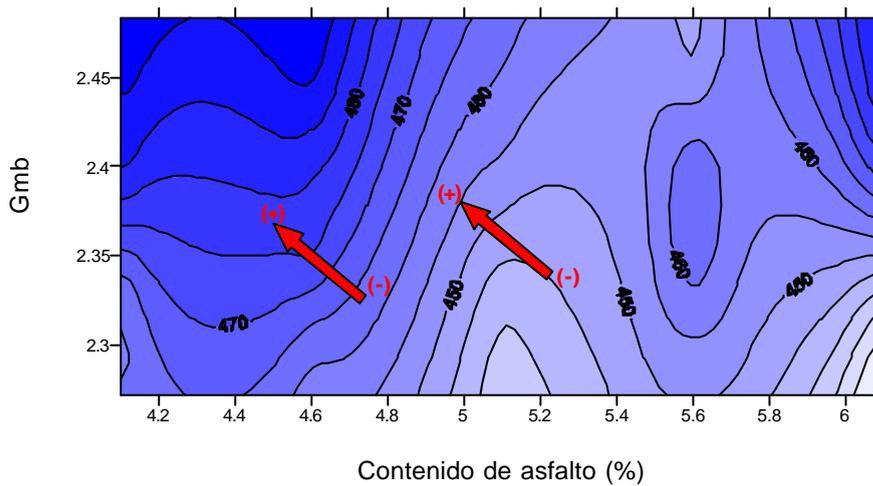
**Figura 5.17**  
**Evolución de los esfuerzos de corte durante la compactación giratoria**

Una forma de ver de una manera más clara el efecto del contenido de asfalto y el nivel de densificación de la mezcla en los esfuerzos de corte medidos en el compactador giratorio, es mediante gráficas de contorno a cuales devuelven una visión más clara de la interacción de dos factores en una determinada respuesta.

En la figura 5.18 se muestran los mapas de contorno que ilustran el efecto de la densidad, y el contenido de asfalto en los esfuerzos de corte medidos en el compactador giratorio.



(a) AC-20



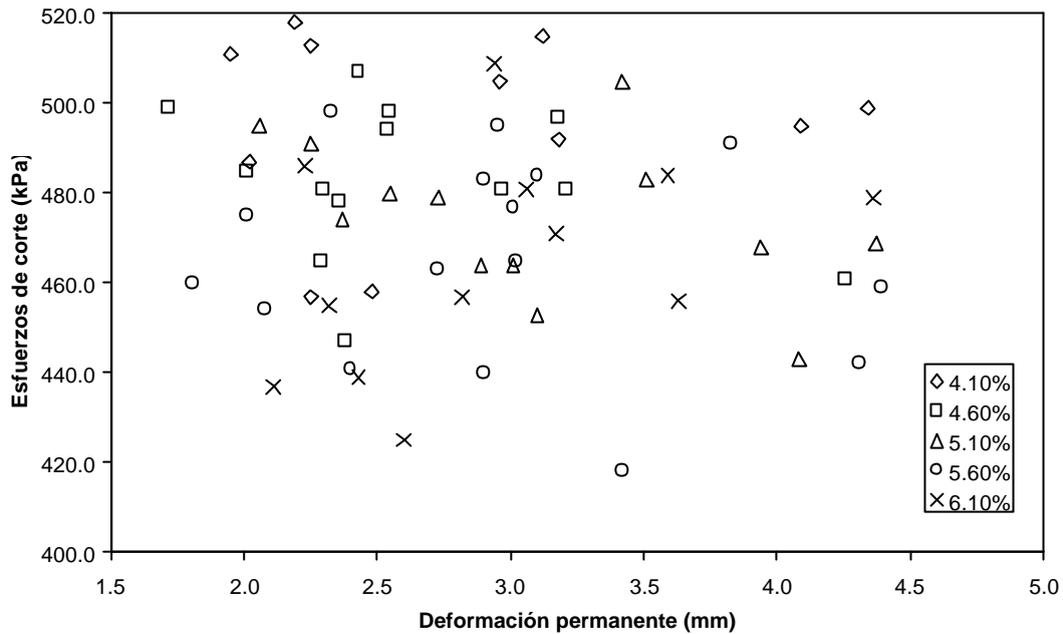
(b) SBS-3%

**Figura 5.18****Mapas de contorno para ilustrar la variación de los esfuerzos de corte**

Las flechas en el mapa de contorno indican una tendencia que muestra que tanto para las probetas elaboradas con asfalto AC-20 sin modificar (Figura 5.18-a) como con asfalto modificado con SBS (Figura 5.18-b), los valores de los esfuerzos de corte son mayores para los contenidos de asfalto más bajos y las densidades más altas. La influencia de la densidad de la mezcla compactada para ser menos marcada en los contenidos de asfalto más altos.

Durante el análisis de los resultados se buscó alguna relación entre los esfuerzos de corte y algún ensaye mecánico; en este caso, la de deformación permanente

en el analizador de pavimentos asfálticos (APA). La figura 5.19 muestra los datos de los esfuerzos de corte y su correspondiente valor de deformación permanente para distintos contenidos de asfalto para las probetas elaboradas con AC-20 sin modificar. La dispersión de estos datos parece indicar que no existe un patrón claro a seguir.



**Figura 5.19**  
**Relación entre los esfuerzos de corte, y la deformación permanente**

Si bien en la actualidad no se ha logrado correlacionar claramente los esfuerzos de corte medidos durante la compactación giratoria con alguna prueba de desempeño, parece haber una clara sensibilidad de las mediciones al volumen del asfalto y a las variaciones de la granulometría en la mezcla.

## Conclusiones

---

El ensayo de rueda cargada en el analizador de pavimentos asfálticos (APA) resulta una práctica de simulación de gran utilidad para adoptar criterios de aceptación y rechazo en actividades de control de calidad, así como de prueba complementaria en el diseño de mezclas asfálticas.

El cemento asfáltico modificado con polímero SBS al 3%, demostró una considerable aportación en la resistencia a la deformación permanente en la mezcla asfáltica evaluada en el APA, como consecuencia de la alta rigidez que presentó este tipo de ligante a la temperatura de prueba con respecto al cemento asfáltico sin modificar.

El análisis de varianza destacó poca influencia del contenido de asfalto en los valores de deformación permanente de la mezclas asfáltica en estudio, para los 8 mil ciclos aplicados en el ensayo de rueda cargada en el APA.

Las probetas con AC-20 sin modificar elaboradas con 50 giros en el compactador giratorio mostraron valores más altos de deformación permanente con respecto a los demás niveles de giros; esto debido a una consolidación adicional de éstas durante el ensayo, dadas sus bajas densidades.

Los mapas de contorno elaborados para las probetas con cemento asfáltico AC-20 sin modificar, demostraron una tendencia en el aumento de los valores de deformación permanente a medida que disminuye la densidad, y aumenta el contenido de asfalto. De manera similar, los valores de deformación son más altos para las probetas que presentaron altos contenidos de vacíos de aire.

Debe señalarse que características del agregados como su origen (basalto); tratamiento (100 % de trituración); granulometría (densa); y tamaño máximo de agregado (3/4"), así como la alta viscosidad del ligante exhibida durante el ensayo en el APA, propiciaron que las probetas elaboradas con cemento asfáltico modificado con SBS, mostraran una alta resistencia a la deformación permanente para cualquier condición de la mezclas asfáltica compactada; por lo que para éstas probetas, no parece haber un patrón definido en los valores de la deformación permanente a mediada que varía la densidad, o el contenido de asfalto en la mezcla.

Los esfuerzos de corte registrados durante la compactación giratoria, difícilmente identifican los efectos de rigidez del asfalto o su grado de desempeño, ya que aunque se manejaron distintas temperaturas, los tipos de ligante (modificado y sin modificar) tienen aproximadamente la misma viscosidad durante el desarrollo de la compactación.

El contenido de asfalto, así como ligeras variaciones de la granulometría como las que se presentaron durante la experimentación, parecen ser parámetros

identificables de la mezcla asfáltica por los esfuerzos de corte medidos durante la compactación giratoria.

El análisis de varianza resultó de gran utilidad para destacar las características de la mezcla asfáltica que más influyen en determinada respuesta; en este caso, la deformación permanente evaluada en el APA, y las mediciones de los esfuerzos de corte durante la compactación giratoria.

## Bibliografía

---

1. Annual Book of ASTM Standard, 4.03 Roofing and Paving Material; Vehicle-Pavement System (2001).
2. Asphalt Institute Performance Graded Asphalt Binder Specification and Testing, Series No 1 (SP-1), (1996).
3. Asphalt Institute, Superpave Mix Design, Series No 2 (SP-2), (1996).
4. Centros de Estudios Experimentales de Obras Públicas – Centro de Estudios de Carreteras, Normas NLT1-Ensayos de carreteras.
5. Garnica P, Delgado H, Gómez J A, Alonso S, Alarcón H A, Aspectos del diseño volumétrico de mezclas asfálticas, Publicación Técnica No 246, Instituto Mexicano del Transporte (2004)
6. Garnica P, Delgado H, Gómez J A, Análisis de la influencia del método de compactación en el comportamiento mecánico de mezclas asfálticas, Publicación Técnica No 255, Instituto Mexicano del Transporte (2004).
7. Ronald Walpole y Raymond Mayers, Probabilidad y estadística, Cuarta, Edición Edit Mc Graw Hill.
8. Douglas C Montgomery, Control estadístico de la calidad, Tercera edición, Edit Limusa Wiley.
9. Douglas C Montgomery, Diseño y análisis de experimentos, Segunda Edición, Edit Limusa Wiley.
10. Dale Alan Rand, Comparative Analysis of Superpave Gyratory Compactors and TxDoT Gyratory Compactors. Texas Department of Transportation.
11. 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).
12. Sánchez-Leal FJ, Garnica Anguas P, Gómez López JA, Pérez García N, RAMCODES: Metodología racional para el análisis de densificación y resistencia de geomateriales compactados, Publicación Técnica No 200, Instituto Mexicano del Transporte (2002).
13. Instituto Mexicano del Transporte, Manual de Calidad de los Materiales en Secciones Estructurales de Pavimentos Carreteros, Documento Técnico, No 1 (1990).

14. Jorge B Sousa, George Way, John T Harvey and Mickey Hines, Comparison of Mix Design Concepts, Transportation Research Record No 1492.
15. National Asphalt Training Center, Background of Superpave Asphalt Mixtures Design and Analysis, SHRP-A-379, FHWA-SA-95-003.
16. Strategic Highway Research Program, Superior Performing Asphalt Pavement: The Product of the SHRP Asphalt Research Program, SHRP-A-410.
17. Thomas W Kennedy, Ensayos y especificaciones de los ligantes asfálticos en el sistema Superpave, Superpave Center at Austin, Texas, USA, (1996).



‡ **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)