



**UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE MÉXICO**



FACULTAD DE INGENIERÍA

PROGRAMA ÚNICO DE ESPECIALIZACIONES DE INGENIERÍA

CAMPO DE CONOCIMIENTO: INGENIERÍA CIVIL

**EVALUACIÓN DE LA SUSCEPTIBILIDAD A LA DEFORMACIÓN  
PERMANENTE EN CONCRETOS ASFÁLTICOS ELABORADOS CON  
ASFALTOS MODIFICADOS.**

**T E S I N A**

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

**ESPECIALISTA EN VÍAS TERRESTRES**

PRESENTA:

**ING. PACIANO SANTIAGO SANTIAGO**

DIRECTOR DE TESINA: DRA. ALEXANDRA OSSA LÓPEZ

CIUDAD DE MÉXICO A 04 DE ABRIL DEL 2017

*A esas dos personas que significan todo para mí, por hacerme parte de su lucha. A mi padre Zósimo Santiago Jiménez, el hombre que más admiro en la vida y a mi madre Epifania Santiago Juárez, la mujer que con amor me enseñó a luchar.*

# TABLA DE CONTENIDO

DEDICATORIA.....	I
TABLA DE CONTENIDO.....	II
ÍNDICE DE FIGURAS.....	IV
ÍNDICE DE TABLAS.....	V
1 INTRODUCCIÓN .....	1
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	1
1.2 DESARROLLO METODOLÓGICO.....	2
1.2.1 PRUEBAS DE LABORATORIO .....	2
1.2.2 ANÁLISIS DE RESULTADOS .....	2
1.2.3 CONCLUSIONES.....	2
2 MARCO TEÓRICO CONCEPTUAL .....	3
2.1 ANTECEDENTES .....	3
2.2 DEFORMACIÓN PERMANENTE.....	3
2.3 CONCEPTO DE CONCRETO ASFÁLTICO.....	5
2.3.1 CEMENTO ASFÁLTICO .....	5
2.3.1 AGREGADO MINERAL.....	6
3 CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES.....	8
3.1 AGREGADO MINERAL.....	8
3.1.1 PROPIEDADES DE CONSENSO .....	8
3.1.2 PROPIEDADES DE ORIGEN .....	9
3.1.3 PRUEBAS DE RUTINA.....	10
3.1.4 SELECCIÓN DE LA ESTRUCTURA DE LA GRANULOMETRÍA .....	12
3.2 CEMENTO ASFÁLTICO.....	14
3.2.1 SELECCIÓN DEL CEMENTO ASFÁLTICO .....	14
3.2.2 CARACTERIZACIÓN DEL CEMENTO ASFÁLTICO.....	14
4 DISEÑO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS .....	20
4.1 MÉTODO SUPERPAVE.....	20
4.2 DISEÑO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE.....	21
4.2.1 REQUISITOS PARA LA COMPACTACIÓN .....	21
4.2.2 DISEÑO VOLUMÉTRICO DE MEZCLAS .....	22
4.2.3 ANÁLISIS DEL DISEÑO ÓPTIMO DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS.....	30
4.3 DETERMINACIÓN DE LA SUSCEPTIBILIDAD AL DAÑO POR HUMEDAD DEL CONCRETO ASFÁLTICO.....	33

5	PRUEBAS DE DESEMPEÑO AL CONCRETO ASFÁLTICO .....	37
5.1	SUSCEPTIBILIDAD A LA DEFORMACIÓN PERMANENTE .....	37
5.1.1	ENSAYO PARA DEFORMACIÓN PERMANENTE.....	38
5.1.2	PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS DE LA PRUEBA DE SUSCEPTIBILIDAD A LA DEFORMACIÓN PERMANENTE .....	39
6	CONCLUSIONES.....	41
6.1	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	42

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Falla en capa estructural y falla en carpeta asfáltica (Asphalt Institute, 1996).....	3
Figura 2. Equipo para ensaye Equivalente de arena.....	9
Figura 3. Densidades del agregado grueso .....	10
Figura 4. Densidades del agregado fino.....	11
Figura 5. Carta granulométrica .....	12
Figura 6. Curva granulométrica.....	13
Figura 7. Recipientes para ensayo y equipo RTFO .....	15
Figura 8. Esquema del funcionamiento del DSR (IMT, 2003) .....	16
Figura 9. Esquema del comportamiento viscoelástico del cemento asfáltico .....	16
Figura 10. Esquema de temperaturas en cemento asfáltico PG .....	17
Figura 11. Carta de Performance Grade (Asphalt Institute, 1998) .....	18
Figura 12. Compactador giratorio SUPERPAVE.....	21
Figura 13. Diagrama de componentes de una HMA (Asphalt Institute, 1996).....	23
Figura 14. Esquema Gravedad específica bruta (Asphalt Institute, 1996) .....	24
Figura 15. Esquema Gravedad específica aparente (Asphalt Institute, 1996) .....	25
Figura 16. Esquema Gravedad específica efectiva (Asphalt Institute, 1996) .....	25
Figura 17. Procedimiento Densidad de RICE.....	28
Figura 18. Determinación de Gmb de los especímenes .....	29
Figura 19. Elección del porcentaje óptimo de cemento asfáltico .....	31
Figura 20. Densificación del espécimen a Nmax.....	32
Figura 21. Muestras con acondicionamiento .....	34
Figura 22. Ensayo de TSR a Subgrupos .....	34
Figura 23. Grafica de prueba TSR (Carga kg vs Deformación mm) .....	35
Figura 24. Rueda cargada de Hamburgo marca TROXLER .....	37
Figura 25. . Equipo compactador utilizado y placas .....	38
Figura 26. Losas ya colocadas en moldes, en acondicionamiento .....	38
Figura 27. Rodera en espécimen después de la prueba .....	39

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Resultado pruebas de consenso _____	11
Tabla 2. Resultado pruebas de origen _____	11
Tabla 3. Resultado Gravedad específica y absorción. _____	11
Tabla 4. Composición granulométrica del material _____	12
Tabla 5. Puntos de Control y Zona restringida _____	13
Tabla 6. Pruebas convencionales _____	18
Tabla 7. Caracterización grado PG a temperatura alta e intermedia _____	19
Tabla 8. Niveles de Diseño _____	20
Tabla 9. Parámetros de compactación _____	21
Tabla 10. Número de giros para ESAL's de diseño _____	22
Tabla 11. Parámetros de diseño volumétrico de la mezcla asfáltica _____	23
Tabla 12. Porcentajes de cemento asfáltico para diseño _____	28
Tabla 13. Gmm para contenidos de cemento asfáltico _____	29
Tabla 14. Parámetros volumétricos de los diferentes contenidos de cemento asfáltico _____	30
Tabla 15. Densificación de los especímenes de comprobación _____	32
Tabla 16 Parámetros volumétricos de los especímenes finales _____	33
Tabla 17 Resultado de la susceptibilidad a la humedad _____	35
Tabla 18. Resultados de ensayo en Rueda cargada de Hamburgo _____	39

# 1 INTRODUCCIÓN

La red carretera de un país es uno de los activos más valiosos, ya que por medio de ella transitan los pasajeros y carga, necesarios para la activación de su economía. Por lo cual es necesario que esta red se encuentre en excelentes condiciones para recibir la creciente demanda del tráfico, y los vehículos modernos cada vez más pesados. Para el año 2015 la red carretera nacional contaba con una longitud de 390,301 km, de acuerdo a la Secretaria de Comunicaciones y Transportes (SCT), se encontraba dividida en: carreteras pavimentadas 39.1%, caminos revestidos 38.2%, terracerías 3% y brechas mejoradas 19.7%. Tan solo la red carretera troncal libre pavimentada contaba con una longitud de 40,739 km, de acuerdo al anuario estadístico de la misma dependencia. Lo cual representa una gran demanda de trabajo de mantenimiento para las obras ya construidas y pavimentación de las vías existentes que solo están revestidas o son terracerías.

Esta demanda creciente del tránsito de vehículos tanto de carga como de pasajeros en todas las carreteras del país, incrementa las cargas críticas dentro de la estructura del pavimento, las cuales en conjunto con las condiciones climáticas tiene gran impacto en el desempeño de los pavimentos.

De ahí la importancia de que los pavimentos de las carreteras deben ser construidos con materiales y procedimientos que garanticen un tránsito seguro, en tiempos considerables, disminuyendo los costos de operación.

## 1.1 Planteamiento del problema

Los pavimentos son diseñados para resistir los efectos del tránsito en un periodo determinado, conocido como periodo de diseño, en el cual se busca mantener dentro de umbrales definidos deterioros que generan la falla de los pavimentos, sin embargo, la realidad es que muchos de estos deterioros ocurren antes de que se cumpla el periodo de diseño, lo cual representa un problema económico y al mismo tiempo de calidad de servicio para los usuarios. En este trabajo de investigación haremos referencia a solo uno de ellos: *La deformación permanente*.

La deformación permanente o rodera, se genera por el efecto de las cargas repetidas del tránsito bajo condiciones específicas de velocidad, intensidad del tránsito y magnitud de la carga aplicada. La combinación de estos factores provoca ondulaciones en el sentido longitudinal de la carretera también conocidas como roderas, lo que a su vez afecta la seguridad, el tiempo y los costos de traslado. En busca de mitigar este tipo de deterioro prematuro se ha incrementado el uso de modificadores en los cementos asfálticos con el objetivo de mejorar el desempeño de los pavimentos flexibles.

Dentro de esta investigación se evaluó la influencia de la incorporación de diferentes modificadores en el cemento asfáltico en el comportamiento a deformación permanente del concreto asfáltico, para lo cual se utilizaron cinco diferentes cementos asfálticos modificados y un cemento asfáltico convencional. Dicha influencia fue evaluada mediante pruebas de susceptibilidad al daño por humedad con el dispositivo Rueda Cargada de Hamburgo.

### **Objetivo general**

Evaluar la susceptibilidad a la deformación permanente de especímenes de concreto asfáltico elaborados mediante 6 diferentes cementos asfálticos, uno de ellos convencional y los demás modificados a partir de la adición de ácido polifosfórico (PPA), polímeros de tipo SBS y EVA.

## 1.2 Desarrollo metodológico

Este trabajo de investigación se realizó en tres etapas, las cuales se describen a continuación.

### 1.2.1 Pruebas de laboratorio

Para esta investigación se utilizó la metodología SUPERPAVE (Instituto de asfalto, 1985) para el diseño de mezclas asfálticas en caliente.

Se efectuó la caracterización de los dos componentes principales de la mezcla asfáltica: agregado mineral y diferentes cementos asfálticos a utilizar. Con los resultados obtenidos se procedió al diseño de la mezcla asfáltica, determinando el porcentaje óptimo de cemento asfáltico a utilizar.

Con el contenido óptimo definido se realizó la fabricación de especímenes de concreto asfáltico los cuales fueron sometidos a la prueba de susceptibilidad a la deformación permanente a través de la rueda de Hamburgo.

### 1.2.2 Análisis de resultados

A partir de los resultados de la prueba de: rueda cargada de Hamburgo se evaluó la influencia de los agentes modificadores en el desempeño ante deformación permanente del concreto asfáltico.

### 1.2.3 Conclusiones

A partir de los resultados de las pruebas de laboratorio, se formularon conclusiones acerca del comportamiento mecánico de los concretos asfálticos elaborado a partir de 6 cementos asfálticos diferentes.



## 2 MARCO TEÓRICO CONCEPTUAL

### 2.1 Antecedentes

El sistema SUPERPAVE (Superior PERforming Asphalt PAVement) nace como producto final del programa de investigación que en 1987 inició el SHRP (Strategic Highway Research Program), el cual buscó generar un método donde el diseño de mezclas asfálticas y su análisis dejaran atrás los aspectos empíricos o poco claros comunes en ese entonces. Aportando no solo el método de diseño, sino también a la predicción del desempeño de los pavimentos, así como en los criterios de evaluación, incluyendo los equipos para los ensayos.

El método SUPERPAVE divide el estudio de las mezclas asfálticas en caliente en dos grandes grupos: *Ligantes asfálticos*, haciendo la evaluación tanto de cementos asfálticos convencionales como modificados; y *agregado mineral*, una evaluación que bajo criterios establecidos permite elegir un material que aportará mejores características al desempeño al pavimento.

En esta investigación se siguieron las recomendaciones y procedimientos especificados por SUPERPAVE, además de los procedimientos de prueba de las normas ASTM y AASHTO los cuales el método recomienda.

### 2.2 Deformación permanente

La deformación permanente es un tipo de deterioro que se presenta en los pavimentos asfálticos donde la sección transversal de la superficie ya no mantiene su configuración original. Se denomina permanente porque es la acumulación de pequeñas deformaciones no recuperables producidas por el paso de los neumáticos sobre la superficie. Los pavimentos asfálticos son estructuras flexibles que al ser sometidos a la acción de cargas se deforman, una parte de esa deformación se recupera y otra porción es irre recuperable ya que no retoman su posición original. La deformación permanente o no recuperable es también conocida como rodera. Las dos causas principales por la cual se forman roderas en un pavimento flexible son la falla de las capas no estabilizadas que puede presentarse en la subrasante, la subbase, o la base; y por otro lado la deformación en la carpeta asfáltica (SHRP, 1995).

La falla de alguna de las capas no estabilizadas o del suelo de apoyo (subrasante) es generado por la aplicación repetida de carga y al exceder su capacidad de soporte se vence, como se observa en la Figura 1A, se aprecia como el concreto asfáltico solo se desplaza hacia abajo, sin presentar desplazamientos laterales.

El segundo caso que se muestra en la Figura 1B, es un concreto asfáltico que tiene poca resistencia al corte, generando pequeñas deformaciones en la carpeta que al ser acumuladas forman roderas, con un desplazamiento descendente y lateral. La falla presentada en la carpeta asfálticas conocidas como roderas es el tipo de falla sobre el que se trabajara en esta investigación.

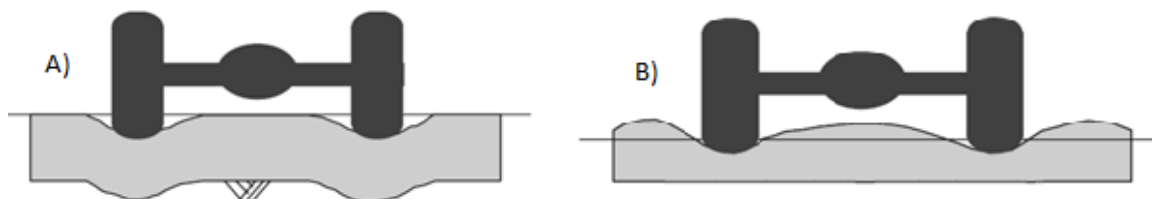


Figura 1. Falla en capa estructural y falla en carpeta asfáltica (Asphalt Institute, 1996)

La Administración Federal de Carreteras de los Estados Unidos (FHWA, por sus siglas en inglés) clasifica la severidad de la profundidad de la rodera como:

Hidroplaneo (0.5 a 0.7 cm)

Baja (0.7 a 1.25 cm)

Media (1.25 a 2.5 cm)

Alta (mayor a 2.5 cm)

Es de suma importancia el estudio de estas deformaciones para ser prevenidas, el caso menos severo de este tipo de deterioros es el hidroplaneo, sin embargo, afecta significativamente la seguridad del tránsito, debido a que a altas velocidades y con la presencia de agua será difícil mantener el control del automóvil.

Investigaciones sobre deformación permanente como la realizada por la American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO Road Test), concluyeron que existen dos factores principales que generan la deformación permanente en el concreto asfáltico: la densificación de la mezcla y la deformación plástica. Debido a la acción de corte que se aplica al pavimento la deformación plástica es considerada como el principal factor que causa la rodera.

Al evaluar la deformación permanente de un concreto asfáltico se debe considerar su comportamiento reológico, ya que el cemento asfáltico es muy susceptible a la temperatura y la velocidad al momento de la aplicación de la carga. Considerando una temperatura baja y una aplicación de carga en lapsos pequeños, se comporta como un material elástico, en cambio para temperaturas altas y aplicación de cargas en tiempos prolongados se comporta como un material viscoso (Delgado Alamilla, Garnica Anguas, & Sandoval Sandoval, 2005).

La interacción entre el cemento asfáltico y el agregado mineral contribuye a la reducción de las roderas, a continuación, se mencionan algunos factores que pueden contribuir a la formación o mitigación de roderas:

#### **Agregado:**

Cuidando la granulometría de la mezcla se puede ayudar a disminuir la susceptibilidad a la presencia de roderas, se recomienda diseñar mezclas con granulometría densa, pues permiten un contacto mayor entre las partículas. Brown y Pell concluyeron que mezclas fabricadas con granulometría abierta tienden a presentar mayor deformación permanente que las mezclas fabricadas con granulometría densa (Pell & Brown, 1974).

Por otra parte, es conocido que los agregados triturados con una adecuada angularidad permiten una mayor trabazón entre sus partículas al ser sometido a cargas, condición que favorece la resistencia a la formación de roderas.

Con el aumento de las presiones de los neumáticos, las cargas de los ejes y las repeticiones de carga ha despertado el interés por el uso de material granular con tamaños máximos. Se concluyó que el uso de un tamaño de agregado máximo de aproximadamente dos tercios del espesor de la capa sería beneficioso para reducir la propensión a la deformación permanente de las mezclas sometidas a altas presiones por los neumáticos (Davis, 1998).

#### **Ligante asfáltico:**

Los cementos asfálticos menos viscosos hacen la mezcla menos rígida y por lo tanto más susceptible a las deformaciones permanentes, por eso se recomiendan cementos asfálticos más duros para pavimentos en climas calurosos. Adicionalmente el uso de modificadores permite mejorar el

desempeño a la deformación permanente de los concretos asfálticos (B. Sousa, Craus, & L. Monismith, 1991)

El envejecimiento del cemento asfáltico y la densificación del concreto asfáltico de un pavimento flexible en servicio a través de los años van reduciendo. Por lo cual se concluye que el daño a la deformación permanente ocurre en los primeros años de servicio de los pavimentos asfálticos (Matias Mario, 2016).

### 2.3 Concepto de concreto asfáltico.

El concreto asfáltico (algunas veces llamado "mezcla asfáltica") es un material artificial producto del endurecimiento de la mezcla de: ligante asfáltico con agregado pétreo (grava, arena y finos), que es colocada y compactada bajo condiciones de temperatura controlada. El ligante asfáltico, que puede ser un cemento asfáltico convencional o modificado, y actúa como un agente aglutinante de las partículas en una masa cohesiva. Al ser impermeable al agua, el ligante asfáltico también impermeabiliza la mezcla. El agregado mineral, ligado por el material asfáltico, actúa como un esqueleto pétreo que aporta resistencia y rigidez al sistema. Al incluir, tanto ligante asfáltico como material petro al concreto asfáltico, su comportamiento se afecta por las propiedades individuales de cada componente, y por la interrelación de estos sistemas (SHRP, 1995).

Se define como Mezclas asfálticas en caliente o HMA (Hot mix asphalt) por sus siglas en inglés a aquellas que son mezcladas y compactadas a altas temperaturas, mayor a 135°C.

#### 2.3.1 Cemento asfáltico

El cemento asfáltico es un material de color oscuro muy característico por su comportamiento viscoso, del cual proviene su característica más favorable o desfavorable, ya que su comportamiento esta interrelacionado con la temperatura. Es uno de los componentes del concreto asfáltico que al estar mezclado con el agregado mineral genera una estructura sólida, debido a sus características aglutinantes. Un análisis de tipo químico indicaría los siguientes contenidos: predominantemente Carbono, 82%-88%; Hidrogeno, 8%-11%; Azufre, 0%-6%; Oxigeno, 0%-5%; y Nitrógeno, 0%-1%. Aunque puede ser muy variado, dependiendo de la procedencia del crudo. (Rajib, Mallick, & Tahar, 2013).

El cemento asfáltico se puede obtener de diferentes formas, siendo el más común el cemento asfáltico refinado de la destilación fraccionada de crudos, aunque se pueden encontrar de manera natural en rocas y en lagos. El comportamiento característico del cemento asfáltico se define como visco-elástico. A altas temperaturas tiende a fluir más rápido, lo cual permite que se comporte como un material viscoso y a bajas temperaturas este se vuelve un sólido que al ser sometido a una carga y descarga vuelve a su posición original, siendo su comportamiento de tipo elástico.

Otra característica a considerar de los cementos asfálticos es el envejecimiento, la cual se ha intentado simular con distintos procedimientos, con el objetivo de representar los cambios que experimenta el cemento asfáltico y el concreto asfáltico en servicio. El cemento asfáltico al reaccionar con el oxígeno se oxida lo cual provoca que se vuelva duro y frágil, siendo los puntos críticos el calentamiento del cemento asfáltico durante el mezclado y la compactación.

"Los cementos asfálticos modificados son el producto de la disolución o incorporación en el asfalto, de un polímero o de hule molido de neumáticos, que son sustancias estables en el tiempo y a cambios de temperatura, que se le añaden al material asfáltico para modificar sus propiedades físicas y reológicas, y disminuir su susceptibilidad a la temperatura y a la humedad, así como a la oxidación.

Los modificadores producen una actividad superficial iónica, que incrementa la adherencia en la interface entre el material pétreo y el material asfáltico, conservándola aun en presencia de agua. También aumenta la resistencia de las mezclas asfálticas a la deformación y a los esfuerzos de tensión repetidos y por lo tanto a la fatiga y reducen el agrietamiento, así como la susceptibilidad de las capas asfálticas a las variaciones de temperatura. Estos modificadores por lo general se aplican directamente al material asfáltico, antes de mezclarlo con el material pétreo” (N.CMT.4.05.002, 2006).

La composición química del cemento asfáltico es compleja y variable ya que depende mucho del proceso de refinación y de la procedencia del crudo, se pueden obtener buenas propiedades de un cemento asfáltico obtenido del residuo de la refinación del petróleo con procesos de refinación apropiados, pero como los primeros productos de la refinación son con los cuales se obtienen los máximos beneficios económicos, el mejoramiento de los cementos asfálticos, por lo general se deja a los distintos agentes modificadores (Becker, MP, & Rodríguez, 2001)

El cemento asfáltico tiene dos componentes que definen su comportamiento: viscosidad y elasticidad. En un concreto asfáltico a temperaturas de tránsito normal los dos factores son importantes, ya que esta combinación de los dos componentes permite que al transitar un vehículo pesado a una determinada velocidad la carpeta sufre una deformación que después es recuperada. Pero al aumentar el número de repeticiones hay una pequeña deformación que no se recupera y se va acumulando, fenómeno que es conocido como deformación permanente, el cual provoca ondulaciones en el sentido longitudinal de la carrera, siendo una de las razones de que el tránsito por esta zona sea inseguro, pues la superficie pasa de ser uniforme a irregular.

Históricamente se han utilizado diferentes modificadores buscando mejorar el comportamiento del cemento asfáltico ante la formación de roderas, agrietamiento por fatiga, daño por humedad y desempeño a diferentes temperaturas entre los que se encuentran: fillers minerales (cemento Portland), Polímeros Elastómeros (SBS, Estireno Butadieno Estireno), Polímeros Plastómeros (EVA, Acetato de etileno y vinilo), Granos de neumático, Oxidantes (compuestos de manganeso), Hidrocarburos (Asfáltenos), Fibras (Poliéster), Antioxidantes (Zinc), entre otros (Characterization of modified Asphalt Binders in SUPERPAVE Mix Design, 2001)

Los elastómeros y plastómeros son los modificadores de cementos asfálticos más usados. Los elastómeros son usados para mejorar la susceptibilidad a la temperatura, incrementando su resistencia a la alta tensión, así como permitir la cohesión entre en cemento asfáltico y el agredo mineral. Por ejemplo, el SBR (Styrene butadiene rubber) es un elastómero usado para incrementar la susceptibilidad a la deformación permanente del concreto asfáltico a altas temperaturas. Los plastómeros son usados para mejorar la susceptibilidad a la temperatura, incrementar la resistencia a la tensión, por ejemplo, el plastómero EVA (Ethyl vinyl acetate) es usado para modificar la resistencia a la tensión, la rigidez y la trabajabilidad de la mezcla asfáltica. Los polímeros usados para la modificación de los cementos asfálticos pueden ser mezclados con el cemento asfáltico o con la mezcla asfáltica en caliente (Rajib, Mallick, & Tahar, 2013).

### 2.3.1 Agregado Mineral

El agregado mineral es el material presente con mayor porcentaje del volumen dentro del concreto asfáltico, considerando como ejemplo una mezcla con 5% de contenido óptimo de cemento asfáltico, el agregado mineral deberá cumplir el otro porcentaje que será un 95% en masa total de la mezcla.

Es por eso la gran importancia de que el agregado mineral sea de buena calidad y cumpla con cada uno de los requerimientos de las especificaciones de diseño.

El agregado mineral al formar la mayor parte de la estructura del concreto asfáltico debe resistir las cargas a las que será sometida, siendo la resistencia al corte la más crítica. Por ejemplo, si consideramos dos tipos de material, el primero un material pétreo de río que son materiales redondeados predominantemente y el segundo un material 100% triturado se podrá ver inmediatamente el mejor comportamiento del material triturado debido a su angularidad, pues en el concreto asfáltico este parámetro sumado a otros como la forma permitirán una mejor trabazón entre si generando un mejor desempeño.

## 3 CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES

### 3.1 Agregado mineral

El agregado mineral utilizado en este trabajo es un basalto triturado proveniente del banco de materiales ubicado en el km 38.5 de la Carretera Federal México-Cuernavaca el cual es explotado por la Unidad Productora de Triturados Basálticos Parres y transportado a la Planta de Asfaltos del Distrito Federal.

El agregado mineral juega un papel importante dentro del comportamiento del concreto asfáltico ante la deformación permanente.

La metodología SUPERPAVE para el diseño de mezclas asfálticas recomienda realizar una serie de pruebas al agregado pétreo a fin de garantizar que es apto para la elaboración de concretos asfálticos. Estas pruebas se dividen en pruebas de consenso (evalúan la calidad del material), origen (evalúan la calidad de la fuente o banco) y rutina (conducen a determinar parámetros gravimétricos del material).

#### 3.1.1 Propiedades de Consenso

En consenso de los investigadores de la SHRP se concluyó que determinadas características o propiedades del agregado pétreo son imprescindibles para tener un buen desempeño del concreto asfáltico, siendo estas:

#### ***Angularidad del agregado grueso***

Esta prueba determina en peso o en cantidad el porcentaje de caras fracturadas del material grueso, guiado por las especificaciones de la norma ASTM D5821. Al tener mayor porcentaje de angularidad permite una trabazón entre los materiales aumentando su resistencia al corte, ya que hay mayor fricción entre las partículas, así como también una buena fricción y textura de los materiales en las capas superficiales.

#### **Angularidad del agregado fino**

La medición de la angularidad del agregado fino al ser materiales pequeños se utiliza un procedimiento diferente al del agregado grueso. Mediante un embudo que almacena material a cierta altura, se deja caer este material a una medida cilíndrica hasta llenarlo, se enrasa y se determinan sus masas. Mayor contenido de vacíos en el material que recibe la medida cilíndrica significa mayor angularidad, en caso contrario de menos vacíos en el material significa que el agregado mineral tiene menos angularidad, siendo los materiales triturados lo que presentan mayor angularidad, los materiales de río, que son redondeados presentan menos angularidad. La norma ASTM C1252 marca el procedimiento de la realización de esta prueba.

#### **Partículas alargadas y planas**

Esta prueba busca evitar que las partículas de materiales pétreos sean planas o alargadas, lo cual representa un problema en el proceso constructivo, ya que las partículas alargadas tienden a fracturarse al ser manipuladas modificando la granulometría original. Para esta prueba se utiliza un calibrador que en primera instancia compara su largo con lo ancho de la partícula, después su ancho con su espesor, la prueba se realizó siguiendo las consideraciones de la norma ASTM D4791.

En el extremo con el brazo más largo se coloca la roca en su lado más largo, después del otro extremo a la medida que quedo se intenta pasar la roca, pero en su lado ancho, si la roca pasa significa que es

alargada. Lo mismo pasa para determinar si el material es plano, esta vez se comparan su ancho con su espesor.

### **Equivalente de Arena**

Se determina el porcentaje de material arcilloso presente en el material fino a utilizar, mediante la norma ASTM D2419. El material muestreado es vertido en una probeta de acrílico transparente para facilitar su lectura. Después de que el material fue saturado se agita para ayudar a que el material fino se separe de la arcilla y este quede suspendida en el fluido. Se toman dos alturas, lecturas que determinarán el resultado de la prueba: lectura de la altura de la arena entre la lectura de la altura de la arcilla, expresada en porcentaje.

Esta prueba nos permite determinar la cantidad de arcilla permisible en el agregado mineral, ya que si este presenta un gran porcentaje tendremos problemas en la mezcla pues la arcilla ligado al agregado mineral impedirá que la adherencia entre cemento asfáltico y el agregado pétreo sea el adecuado. En la *figura 2* se muestra el equipo utilizado, las probetas con graduación, el pisón para toma de lectura.



**Figura 2. Equipo para ensayo Equivalente de arena**

### **3.1.2 Propiedades de origen**

Son propiedades que no necesariamente deben cumplir con un estricto rango o parámetro ya que depende del origen del material, no obstante, da un criterio para la aceptación o rechazo del agregado mineral, las más comunes se enlistan a continuación, estas propiedades pueden variar de acuerdo a las especificaciones de cada dependencia.

### **Desgaste de los Ángeles**

Esta prueba permite saber en porcentaje la pérdida de material por abrasión y degradación mecánica, que se realiza por medio de impacto y triturado en un tambor (equipo de desgaste de los ángeles) con el movimiento de un número determinado de esferas de acero dentro del tambor, según la norma ASTM C 131. Se determina el peso del material grueso que se coloca en la máquina de los ángeles, debe ser un material de granulometría específica y lavado para no presentar material fino que después de la prueba pueda distorsionar el resultado, se somete a un número determinados de giros donde el material es golpeado por las esferas, después se vuelve a pasar el material por el tamiz

correspondiente para determinar la cantidad de material perdido en el manipuleo. Con esto se determina el porcentaje de pérdida de material.

### **Intemperismo acelerado**

Esta prueba está guiada por la norma ASTM C 88 que permite obtener información para determinar la calidad de los agregados pétreos que han de ser sometidos a la acción de agentes atmosféricos. El ensayo consiste en exponer la muestra del agregado pétreo a ciclos alternativos de baño de inmersión en solución de sulfato de sodio y secado al horno. Durante el secado las sales se precipitan en los vacíos del agregado y en la inmersión las sales se rehidratan y ejercen fuerza de expansión internas que simulan el material en un estado de congelamiento. El parámetro de esta prueba está dado en porcentaje de pérdida de peso después de ser sometida a estas condiciones.

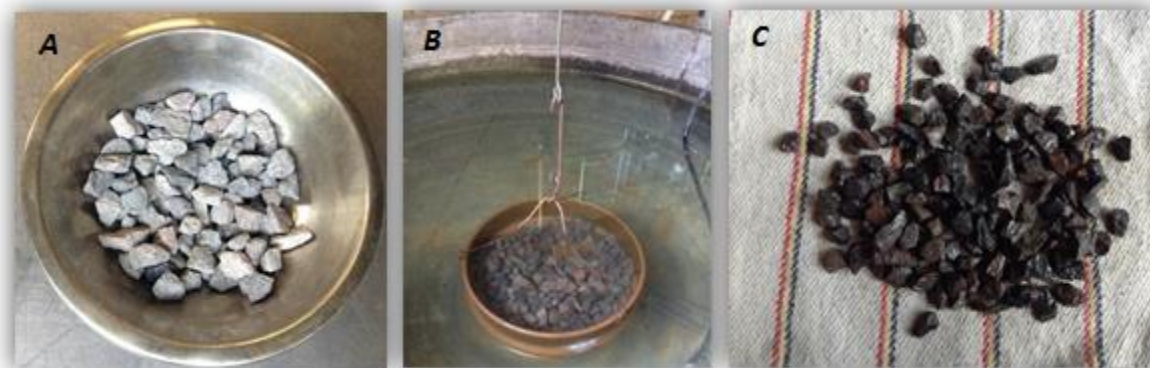
#### 3.1.3 Pruebas de rutina

### **Gravedad específica bruta y aparente**

Mediante la Norma ASTM C 127 y ASTM C 128 se determinan la gravedad específica bruta y aparente (bulk specific gravity y apparent specific gravity) del agregado pétreo, para materiales gruesos y materiales finos respectivamente. Así como también la absorción que presentan el material pétreo. Para esta prueba el material debe estar seleccionado por los diferentes tamices a utilizar.

En las imágenes de la *Figura 3*, se ven los tres estados en el cual el material pétreo fue tomado su masa, su masa al aire en condición seca (3A), masa del material pétreo sumergido (3B) y masa del material pétreo al aire superficialmente seco (3C). Mediante expresiones matemáticas las gravedades bruta y aparente fueron determinados.

El material fino es saturado a un 5% de agua durante 24 horas, después se seca poco a poco para obtener la condición superficialmente seca. Para cada disminución de humedad al irse secando el material es compactado por medio de un pisón en un cono (4A), el cono es retirado y al presentar el primer desmoronamiento significara que el material está en condición superficialmente seco (4B). Después 500 gr del material en condición superficialmente seca es vertido en un matraz (4C), para ser desairado y obtener diferentes masas para determinar la gravedad específica requerida.



**Figura 3. Densidades del agregado grueso**





**Figura 4. Densidades del agregado fino**

**Resultados de las pruebas correspondientes a los agregados minerales.**

En *Tablas 1, 2 y 3* se presentan los resultados de las pruebas de consenso y pruebas de origen y de rutina del agregado mineral utilizado en este estudio.

**Tabla 1. Resultado pruebas de consenso**

ENSAYOS	RESULTADOS	ESPECIFICACION	NORMA
Angularidad del agregado grueso (%)	100/100	90% min	ASTM D 5821
Angularidad del agregado fino (%)	50%	45% min	ASTM C 1252
Partículas alargadas y planas	1%	10% máx	ASTM D 4791
Equivalente de arena (%)	73	45% min	ASTM D 2419

**Tabla 2. Resultado pruebas de origen**

ENSAYOS	RESULTADOS	ESPECIFICACION	NORMA
Desgaste de los ángeles (%)	17%	35% máx	ASTM C 131
Intemperismo acelerado agregado grueso	7%	10% máx	ASTM C 88

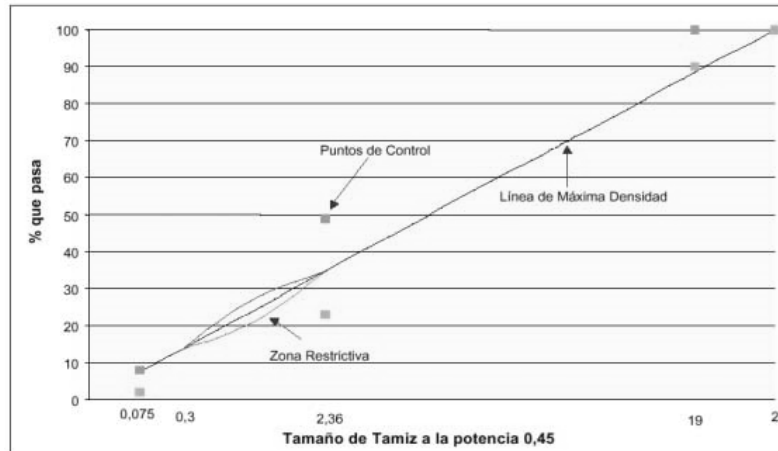
**Tabla 3. Resultado Gravedad específica y absorción.**

TAMIZ	Gsb (neta del agregado)	Gss (saturada superficialmente seca)	Gsa (aparente del agregado)	% absorción de agua	MÉTODO DE ENSAYO
1/2" (9.5 mm)	2.60	2.64	2.70	1.46	ASTM C 127
3/8" ( mm)	2.62	2.65	2.70	1.09	
No. 4 (4.75mm)	2.59	2.63	2.71	1.79	
No. 8 a Filler	2.581	2.641	2.746	2.326	ASTM C 128
<b>Prom Pon</b>	<b>2.591</b>	<b>2.640</b>	<b>2.724</b>	<b>1.879</b>	

### 3.1.4 Selección de la estructura de la granulometría

Del muestreo del bando de materiales se realizó en dos grupos, separando la fracción de gruesos y de finos. Ambos grupos de materiales fueron cribados y se determinó su granulometría.

SUPERPAVE en su carta granulométrica maneja el exponente 0.45 para definir gráficamente la distribución de tamaños del agregado tal como se muestra en la *Figura 5*. Donde en el eje de las ordenadas se presentan los porcentajes que pasan de cada tamiz, mientras que en el eje de las abscisas se encuentran los tamaños de cada tamiz en una escala logarítmica.



**Figura 5. Carta granulométrica**

En la *Tabla 4* se presenta la composición granulométrica del agregado mineral utilizado en esta investigación para la elaboración de concretos asfálticos.

**Tabla 4. Composición granulométrica del material**

Tamices		Porcentaje que pasa		
		Agregado 1 (Fino)	Agregado 2 (Grueso)	Composición
mm	pulg	45%	55%	100%
50	2"	100	100	100
37.5	1 1/2"	100	100	100
25	1"	100	100	100
19	3/4"	100	96.6	98.1
12.5	1/2"	100	64.4	80.4
9.5	3/8"	100	45	69.8
4.75	#4	94.6	4.2	44.9
2.36	#8	65.1	1.4	30.1
1.18	#16	43.3	1.2	20.1
0.6	#30	29.3	1.2	13.8
0.3	#50	20.6	1.2	9.9
0.15	#100	14.7	1.1	7.2
0.075	#200	10.9	1	5.5

La información presentada en la tabla 4 indica que el agregado utilizado en esta investigación posee un tamaño máximo nominal es de 19mm (3/4") y un tamaño máximo de 25mm (1").

En la Figura 6 se presentan la gráfica de la distribución granulométrica utilizada en esta investigación. Dicha gráfica incluye los puntos de control definidos en la Tabla 5.

Tabla 5. Puntos de Control y Zona restringida

Criterio granulométrico para tamaño máximo nominal 19 mm			
Ítem de control	Tamaño del tamiz, mm	Mínimo, %	Máximo, %
Puntos de control	25	100	100
	19	90	100
	2.36	23	49
	0.075	2	8
Zona restringida	2.36	34.6	34.6
	1.18	22.3	28.3
	0.6	26.7	20.7
	0.3	13.7	13.7

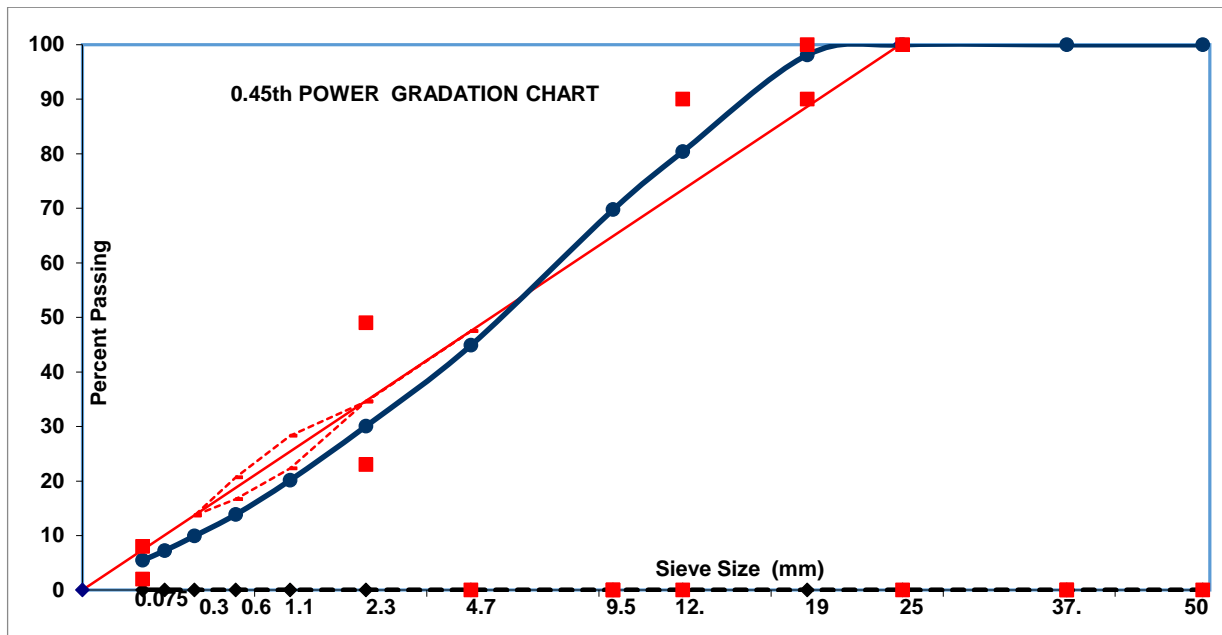


Figura 6. Curva granulométrica

Como podemos apreciar la curva granulométrica presentada en la Figura 6 cumple con las recomendaciones de SUPERPAVE, entre ellos que por la zona restringida la curva pase por debajo de la joroba.

## 3.2 Cemento asfáltico

### 3.2.1 Selección del cemento asfáltico

En esta investigación se utilizó un cemento asfáltico proveniente de la refinería Miguel Hidalgo ubicada en el estado de Hidalgo Municipio de Tula de Allende. A partir de la adición de diferentes porcentajes de agentes modificadores: SBS (Styrene Butadiene Styrene), EVA (Ethylene Vinyl Acetate), además de un ácido Polifosfórico PPA (Polyphosphoric acid). Se obtuvieron cinco cementos asfálticos adicionales. El proceso de modificación de los cementos asfálticos fue llevado a cabo por la empresa SEM Materials.

De esta manera en esta investigación se utilizarán 5 cementos asfálticos modificados y uno convencional, los cuales se mencionan a continuación:

- 1 cemento asfáltico convencional
- 2 cementos asfálticos modificados con polímeros SBS
- 2 cementos asfálticos modificados con polímero EVA
- 1 cemento asfáltico modificado con ácido polifosfórico (PPA)

### 3.2.2 Caracterización del cemento asfáltico

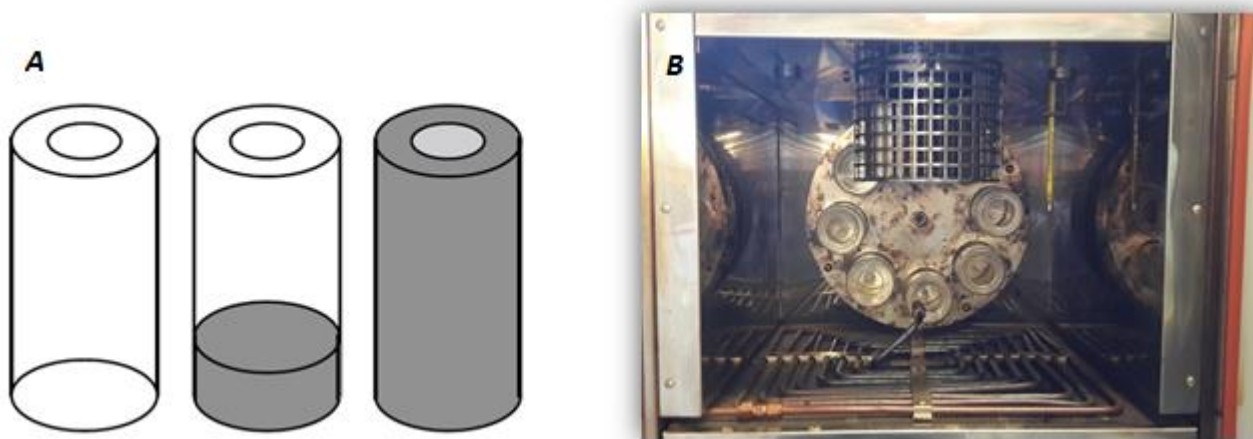
#### **Punto de inflamación**

Es un ensayo que permite evaluar el peligro de inflamabilidad del cemento asfáltico, esto para evitar accidentes al ser manipulado durante las diversas pruebas o construcción del pavimento asfáltico. La carta PG que presenta la metodología SUPERPAVE determina que la temperatura mínima del punto de inflamación que debe presentar el cemento asfáltico original es de 230°C. Una muestra de cemento asfáltico original vertido en una copa abierta de Cleveland es calentado a temperatura controlada, el punto de inflamación es la temperatura que al pasar una flama sobre la superficie de la muestra este produzca unas llamas instantáneas. La norma ASTM D92-02b guía este ensayo.

Para conocer las características del cemento asfáltico, la metodología SUPERPAVE considera la ejecución de pruebas para diferentes envejecimientos del material, las cuales simulan su estado durante la transportación, almacenamiento y su manipuleo; durante la fabricación de la mezcla asfáltica; y el envejecimiento al que será sometida el concreto asfáltico después de ser colocado.

#### **RTFO (Rolling Thin Film Oven Test)**

La norma ASTM D 2872 marca las pautas para la realización de esta prueba, que simula el envejecimiento del cemento asfáltico en la etapa de fabricación y construcción de las mezclas asfálticas. Se necesitan muestras de cemento asfáltico que son colocados en recipientes de vidrio, para ser colocados dentro de los espacios habilitados en el equipo. Un carro es accionado mecánicamente, que gira sobre su propio eje a razón de  $15 \pm 0.2$  rev/min, el horno también contiene un chorro de aire ubicado en cierta posición para suministrar aire a presión a los recipientes de vidrio a una velocidad de  $400 \pm 200$  ml/min. La película de cemento asfáltico es entonces sometida a condiciones de calor y aire a presión durante 85 minutos.



**Figura 7. Recipientes para ensayo y equipo RTFO**

En la Figura 7A se muestran los recipientes vacíos, con muestra para ensayo y recipiente después del ensayo respectivamente. En la figura 7B se muestra el equipo, en su interior se muestra colocado los recipientes vacíos. De este ensayo se puede obtener un porcentaje de la pérdida de masa.

### **PAV (Pressure Aging Vessel)**

Con la Cámara de envejecimiento a presión se busca simular el envejecimiento que sufre un pavimento de concreto asfáltico ya durante su vida útil, en cuestión de horas se simula lo que sucedería durante años en una losa de concreto asfáltico en servicio.

Para la muestra de cemento asfáltico al PAV, deben ser muestras que con anterioridad ya sufrieron un envejecimiento a corto plazo en el RTFO. En un bastidor son colocadas los especímenes para después ser colocado en la cámara. La cámara es sellada herméticamente para que la presión suministrada por tanque de aire comprimido sea dosificada. Después de alcanzar la temperatura de prueba, la presión es liberada para después iniciar la prueba que dura 20 horas. Al termino del ensayo la presión es liberado mediante válvula de liberación, que será gradualmente y así evitar que las muestras presenten burbujas.

### **Viscosímetro Rotacional**

Mediante el ensaye en el viscosímetro rotacional que se basa de la norma ASTM D 4402 se evalúa la trabajabilidad del cemento asfáltico a altas temperaturas. La viscosidad a elevadas temperaturas se realiza para asegurar que el cemento asfáltico sea bombeable y manejable para el mezclado. Mediante la gráfica viscosidad versus temperatura se podrá determinar entonces las temperaturas correspondientes para el mezclado y la compactación de la mezcla asfáltica.

Las muestras para ser ensayadas deben ser del cemento asfáltico original, sin ser envejecidos con anterioridad. La viscosidad de rotación es medida como la torsión necesaria para que un husillo cilíndrico mantenga una velocidad mientras está sumergida en una muestra a temperatura constante.

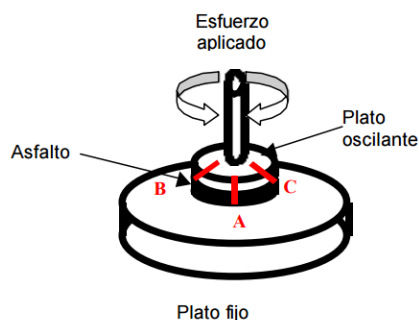
### **DSR (Dynamic Shear Rheometer)**

La norma ASTM D 7175 nos determina los requerimientos y procedimientos para este ensaye. Mediante el Reómetro de Corte Dinámico se caracteriza el comportamiento visco-elástico del cemento asfáltico. Se utilizan unas pastillas o discos de cemento asfáltico envejecido para realizar la

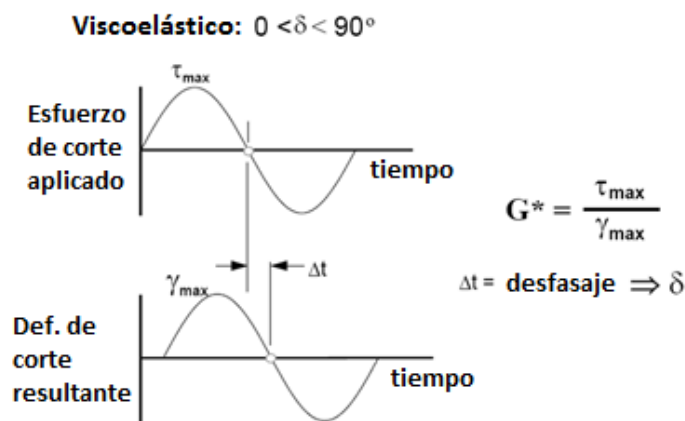
prueba, que pueden tener diferentes espesores: cemento asfáltico envejecido en RTFO probado en alta temperatura de 46°C o mayores requiere una muestra de 1mm (1000 micras) y para cementos asfálticos envejecidos en PAV a temperaturas de ensayo intermedios de 4° a 40°C requiere de 2 mm (2000 micras).

Se determina entonces el componente viscoso y el componente elástico del cemento asfáltico, a través de los dos parámetros:  $G^*$  Modulo de corte complejo y  $\delta$  el ángulo de fase.

El disco de cemento asfáltico se coloca entre dos platos, uno fijo y uno oscilatorio, al que le es aplicado un esfuerzo de corte y la relación entre el esfuerzo aplicado y el resultado de la deformación nos dará la información para calcular el  $G^*$  y  $\delta$ . La pastilla de cemento asfáltico es comprimida entre dos placas paralelas. La placa oscilante va hacia adelante y hacia atrás haciendo un ciclo en su recorrido. Partiendo de un punto A, va hacia el punto B, desde ese punto regresa hasta un punto C para después volver al punto A donde el ciclo es cerrado, como se ilustra en la *Figura 8*.



**Figura 8. Esquema del funcionamiento del DSR (IMT, 2003)**



**Figura 9. Esquema del comportamiento viscoelástico del cemento asfáltico**

Para un material totalmente elástico la carga aplicada coincide con la respuesta inmediata donde el desfase en tiempo y el ángulo  $\delta$  sería cero. En el caso de un material totalmente viscoso habrá un desfase grande en el tiempo contra la aplicación de la carga y su respuesta, dándonos un ángulo  $\delta$  cercano a 90°. En la *Figura 9* apreciamos lo que sería de un material viscoelástico donde tenemos los dos componentes elástico y viscoso, que es la característica de un concreto asfáltico en funcionamiento.

La metodología SUPERPAVE usa estos dos valores de  $G^*$  y  $\delta$  para sus especificaciones. Donde la deformación permanente se controla limitando el valor mínimo de  $G^*/\sin \delta$  a 1.0 KPa antes del envejecimiento y a 2.2 KPa luego del envejecimiento en RTFO.

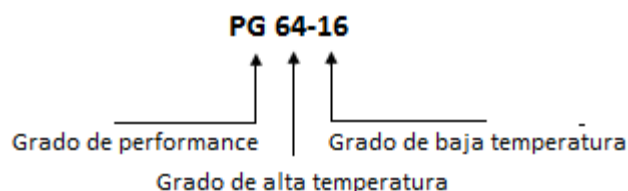
### BBR (Bending Beam Rheometer)

El Reómetro de Viga a Flexión es usada para determinar la rigidez del cemento asfáltico a bajas temperaturas, valiéndose de la teoría de vigas, ensayando una pequeña viga de cemento asfáltico simplemente apoyada. Con el BBR se miden la rigidez a la fluencia y el valor-m que representa la variación de la rigidez al recibir las cargas.

La muestra de cemento asfáltico se prepara mediante un molde prismático de medidas: 125mm de largo, 6.25mm de ancho y 12.5 mm de alto. La viga es colocada en el equipo en un fluido que está compuesto por glicol etileno, metanol y agua. Después de ser acondicionada a la temperatura de prueba se hará la aplicación de la carga en tres tiempos, una precarga de 2.5 a 3.5 gramos ( $30 \pm 5$  mN) esto para asegurar el contacto de la viga con el soporte, luego una carga de 100 gr (980mN) se aplica durante un segundo y la carga es automáticamente retirada durante 20 segundos para permitir el periodo de recuperación, para después aplicar una carga de 100 gramos ( $980 \pm 5$  mN) por un periodo de 240 segundos, la deflexión de la vida es medida por el equipo durante estos intervalos.

### Carta Performance Grades

La especificación SUPERPAVE está basada en el desempeño (Performance) del cemento asfáltico. Dicha carta clasifica los ligantes asfálticos con base al clima y a la temperatura prevista en el pavimento asfáltico. El grado PG (Performance Grade) presenta las temperaturas a las cuales el ligante asfáltico poseería propiedades físicas adecuadas. Considerando como ejemplo un PG 64-16, mostrado en la *Figura 10*, los dos primeros dígitos son llamado *grado de alta temperatura* (high temperatura grade) lo que quiere decir que ese cemento asfáltico hasta los  $64^{\circ}\text{C}$  presentara un buen comportamiento físico. Pasa lo mismo con los dos digito siguientes (-16) que es el *grado de baja temperatura* (low temperatura grade) siendo este la temperatura más baja a al cual su comportamiento sería adecuado.



**Figura 10.** Esquema de temperaturas en cemento asfáltico PG

Para realizar la clasificación del cemento asfáltico se debe realizar las pruebas indicadas en la carta PG, presentada en la *Figura 11*. Realizando pruebas a tres condiciones del cemento asfáltico: Al cemento asfáltico original, envejecido por equipo RTFO y envejecido en equipo PAV.

The Asphalt Institute  
**National  
Binder Technician  
Certification  
PROGRAM**

## Performance Grades

Max. Design Temp.	PG 52					PG 58					PG 64					PG 70					PG 76								
Min. Design Temp.	-10	-16	-22	-28	-34	-40	-46	-16	-22	-28	-34	-40	-10	-16	-22	-28	-34	-40	-10	-16	-22	-28	-34	-40	-10	-16	-22	-28	-34
<b>Original</b>																													
≥ 230 °C	<b>Flash Point</b>																												
≤ 3 Pa·s @ 135 °C	<b>Rotational Viscosity</b>																												
≥ 1.00 kPa	<b>DSR G*/sin δ (Dynamic Shear Rheometer)</b>																												
	52					58					64					70					76								
<b>(Rolling Thin Film Oven) RTFO, Mass Change ≤ 1.00%</b>																													
≥ 2.20 kPa	<b>DSR G*/sin δ (Dynamic Shear Rheometer)</b>																												
	52					58					64					70					76								
<b>(Pressure Aging Vessel) PAV</b>																													
20 hours, 2.10 MPa	90					100					100					100(110)					100(110)								
≤ 5000 kPa	<b>DSR G*·sin δ (Dynamic Shear Rheometer)</b>																												
	Intermediate Temp. = ((Max. + Min.)/2) + 4																												
S ≤ 300 MPa m ≥ 0.300	<b>BBR S (creep stiffness) &amp; m-value (Bending Beam Rheometer)</b>																												
	0 -6 -12 -18 -24 -30 -36 -6					-12 -18 -24 -30 0 -6 -12 -18 -24 -30					0 -6 -12 -18 -24 -30 0 -6 -12 -18 -24 -30					0 -6 -12 -18 -24 -30													
If BBR m-value ≥ 0.300 and creep stiffness is between 300 and 600, the Direct Tension failure strain requirement can be used in lieu of the creep stiffness requirement.																													
ε <sub>t</sub> ≥ 1.00%	<b>DTT (Direct Tension Tester)</b>																												
	0 -6 -12 -18 -24 -30 -36 -6					-12 -18 -24 -30 0 -6 -12 -18 -24 -30					0 -6 -12 -18 -24 -30 0 -6 -12 -18 -24 -30					0 -6 -12 -18 -24													

asphaltinstitute.org bindertechnician.com

Figura 11. Carta de Performance Grade (Asphalt Institute, 1998)

En las Tablas 6 y 7 se presenta los resultados de la caracterización por grado PG de los diferentes cementos asfálticos a utilizar.

Tabla 6. Pruebas convencionales

Tipo de cemento asfáltico	Penetración <sup>1</sup>	Punto de inflamación	Viscosidad Rotacional <sup>2</sup>	Cambio de masa
	(mm x 10 <sup>-1</sup> )	(°C)	(Pa·s)	(%)
PG 64 -16	68	305	0.383	0.43
PG 76 -16 (PPA)	40	314	0.743	0.36
PG 76 -16 (EVA V EGA S)	46	312	1.37	0.38
PG 76 -16 (EVA E ELVALOY)	47	270	1.49	0.5
PG 76-16 (SBS V)	56	292	2.335	0.33
PG 76-16 (SBS E)	48	280	3.648	0.53

<sup>1</sup>Ensayo realizado a 25 °C, <sup>2</sup>Ensayo realizado a 135 °C



**Tabla 7. Caracterización grado PG a temperatura alta e intermedia**

Parámetro	PG64-16	PG76-16	PG76-16	PG76-16	PG 76-16	PG76-16
	CONVENCIONAL	(PPA)	(EVA V EGA S)	(EVA E ELVALOY)	(SBS V)	(SBS E)
Temperatura de prueba (°C)	64 (25) <sup>4</sup>	76 (31) <sup>4</sup>	76 (31) <sup>4</sup>	76 (31) <sup>4</sup>	76(31) <sup>4</sup>	88 (31) <sup>4</sup>
Original G*/Senδ (kPa) <sup>1</sup>	1.73	1.23	1.48	1.29	2.54	1.68
RTFOT G*/Senδ (kPa) <sup>2</sup>	5.02	3.99	4.46	4.1	4.04	2.22
PAV G*Senδ (kPa) <sup>3</sup>	3286	1083	1682	1682	1318	1135
<sup>1</sup> Min. 1.0 kPa, <sup>2</sup> Min. 2.2 kPa, <sup>3</sup> Max. 5000.0 kPa, <sup>4</sup> Temperatura de prueba para G*Senδ						

## 4 DISEÑO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS

### 4.1 Método SUPERPAVE

El SHRP (Strategic Highway Research Program) obtuvo como producto final el sistema que se conoce como SUPERPAVE, que permite un análisis más enfocado a los diferentes procedimientos y normas que se venían haciendo de una manera empírica. Para obtener una excelente mezcla se hace hincapié en la caracterización de los dos grupos de elementos de una mezcla: los ligantes asfálticos y agregados minerales.

Para tener un concreto asfáltico con un excelente comportamiento se debe encontrar la congruencia entre lo que se diseña con lo que se fabrica en campo, lo complicado de los análisis en laboratorio anteriores a esta metodología era que no se podía simular de manera realista los procesos constructivos hechos en campo, por lo cual SUPERPAVE también hizo un profundo estudio para determinar los equipos a utilizar, como se sabe el procedimiento más difícil de simular era la compactación de los especímenes, para que las pruebas o evaluaciones a las muestras compactadas sean representativas. En el laboratorio se utilizó el Compactador Giratorio SUPERPAVE (SUPERPAVE Gyrotory Compactor, SGC)

SUPERPAVE presenta tres niveles para el diseño de mezclas en caliente, este dependiendo del número de ejes equivalentes que pasaran por la carretera en diseño. En la *Tabla 8* se presentan los tres niveles con los respectivos requerimientos necesarios a cumplir, siendo el nivel uno el de menor demanda de requerimientos no obstante cada uno de ellos debe cumplir con el estricto parámetro necesario para tener un concreto asfáltico buscado en el diseño.

*Tabla 8. Niveles de Diseño*

Tránsito (ESAL'S)	Nivel de diseño	Requerimientos de ensayo*
ESAL's <10 <sup>6</sup>	1° Nivel Análisis básico	Diseño Volumétrico
10 <sup>6</sup> < ESAL's < 10 <sup>7</sup>	2° Nivel Análisis Intermedio	<b>Diseño volumétrico + pruebas de predicción de comportamiento</b>
10 <sup>7</sup> >ESAL's	3° Nivel Análisis Avanzado	Diseño volumétrico + pruebas de predicción de comportamiento + pruebas adicionales

(ESAL'S) Número total de ejes equivalentes  
\* En todos los casos, las susceptibilidades a la humedad deben ser evaluada usando la norma correspondiente.

#### *Nivel 1 (Análisis básico)*

En este nivel básico solo se solicita el diseño volumétrico de la mezcla, que corresponde a la caracterización del agregado pétreo, la caracterización del cemento asfáltico y la selección del contenido óptimo de cemento asfáltico. En este nivel y en los dos siguientes es necesario el ensayo de la susceptibilidad al daño por humedad.

#### *Nivel 2 (Análisis intermedio)*

Para este nivel dos, se requerirá de los datos obtenidos previamente en el nivel uno además de pruebas de predicción de comportamiento, como el ensayo de corte (SST, Superpave Shear tester) y el ensayo de tracción indirecta (IDT, Indirect tensile test).

#### *Nivel 3 (Análisis avanzado)*

Este nivel abarca las pruebas y valores obtenidos en los niveles anteriores uno y dos. Es el único protocolo que realiza el ensayo de SST (SUPERPAVE Shear tester) con muestras confinadas. Este nivel permite hacer una predicción más detallada del desempeño del concreto asfáltico.

**En esta investigación se llevó a cabo el diseño de mezclas asfálticas asumiendo un tránsito de en  $10^6 < ESAL's < 10^7$ , que corresponde al Nivel 2 de acuerdo a la metodología SUPERPAVE.**

## 4.2 Diseño de mezclas asfálticas en caliente

### 4.2.1 Requisitos para la compactación

El SGC (Compactador giratorio SUPERPAVE) es un dispositivo diseñado para simular la compactación por amasado a la cual son sometidas las mezclas en la construcción, para esto los investigadores del SHRP modificaron el dispositivo de Texas para que cumpliera con este requisito, modificando principalmente su ángulo de inclinación, la velocidad de giro y el registro de altura de la muestra en tiempo real. Con esto se logra apreciar la densificación de las muestras en el mismo instante de la prueba.

EL Compactador Giratorio SUPERPAVE debe tener calibrado ciertos parámetros para realizar la compactación por amasado que se presentan en la *Tabla 9*.

**Tabla 9. Parámetros de compactación**

Parámetro	Especificación
F=Esfuerzo vertical	600 Kpa
$\alpha$ =Ángulo de inclinación	1.25°
n=Velocidad de giro	30 rpm

La densidad del especimen se puede medir durante el proceso de compactación, dividiendo la masa por el volumen de la muestra. Cabe mencionar que el volumen del especimen se considera con sus lados lisos, el molde utilizado tiene una diametro de 150mm y la altura medida por el equipo. En un ordenador conectado al compactador se puede apreciar mediante una grafica la altura que presenta el especimen contra el numero de giros. En la *Figura 12* se muestra el compactador que se utilizo para la fabricacion de los especimenes.



**Figura 12. Compactador giratorio SUPERPAVE**

Para la fabricación de la mezcla se utiliza un mezclador mecánico, con los datos obtenidos del viscosímetro se determinan las temperaturas de mezclado y las temperaturas de compactación. Para los cementos asfálticos modificados el proveedor dispone de las temperaturas correspondientes.

Las mezclas cumplieron con un periodo de curado para simular el tiempo de transporte a zona de construcción, debe colocarse la mezcla al horno durante dos horas a 135°C, a intervalos de una hora se mezcló para permitir que el envejecimiento a corto plazo se de. Para mantener la temperatura de compactación se pusieron los moldes al horno para que se acondicionara a la misma temperatura durante 30 a 45 minutos.

Para el diseño de las mezclas asfálticas se fabricaron especímenes cilindricos de 150 mm de diametro. Tras el curado de la mezcla asfáltica se procedio a la compactación, para lo cual es de suma importancia determinar el numero de giros a plicar para los especímenes durante este proceso. Los numeros de giros necesarios para determinar los parametros volumetricos son:

- Número de giros de diseño ( $N_{\text{diseño}}$ )
- Número de giros inicial ( $N_{\text{inicial}}$ )
- Máximo número de giros ( $N_{\text{maximo}}$ )

Por el nivel de diseño que se eligió previamente, el número de ejes equivalentes de diseño sera  $3 \times 10^6 < \text{ESAL}'s < 3 \times 10^7$  como se presenta en el siguiente cuadro.

**Tabla 10. Número de giros para ESAL's de diseño**

Numero de ejes equivalentes de diseño	Parámetros de compactación número de giros en el compactador giratorio		
	N inicial	N diseño	N máximo
ESAL's < $3 \times 10^5$	6	50	75
$3 \times 10^5 < \text{ESAL}'s < 3 \times 10^6$	7	75	115
<b><math>3 \times 10^6 &lt; \text{ESAL}'s &lt; 3 \times 10^7</math></b>	<b>8</b>	<b>100</b>	<b>160</b>
ESAL's > $3 \times 10^7$	9	125	205

Como los parametros de compactacion estan determinados por el Numero de ejes equivalentes se considero usar los valores de  $3 \times 10^6 < \text{ESAL}'s < 3 \times 10^7$   $N_{\text{inicial}} = 8$   $N_{\text{diseño}} = 100$   $N_{\text{máximo}} = 160$  donde el número de giros inicial representa el acomodo inicial de la mezcla en campo para su posterior compactación, en seguido el número de giros de diseño representa la compactación a la que es sometida la mezcla en campo, finalmente el número de giros máximo nos muestra la compactación que tendrá el concreto hidráulico al final de su vida útil.

#### 4.2.2 Diseño volumétrico de mezclas

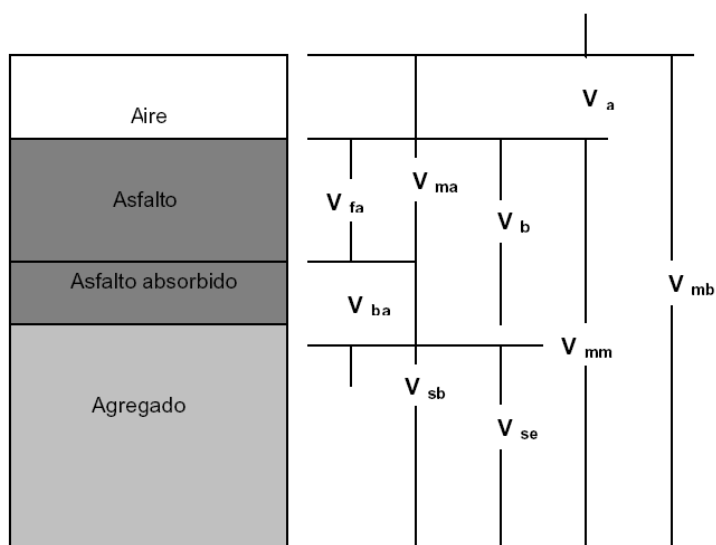
Los especímenes de concreto asfáltico deben cumplir con ciertos criterios de volumetría los cuales son: Vacíos de aire ( $V_a$ ), Vacíos del agregado mineral (VAM), Vacíos llenos de cemento asfáltico (VFA), Porcentaje efectivo de cemento asfáltico (Pbe), así como también una proporción de polvo que es la relación del porcentaje en peso de filler (finos que pasan la malla #200) entre el contenido de cemento asfáltico efectivo en porcentaje del peso de la mezcla. Todos esos parámetros resumidos en la *Tabla 11*.

**Tabla 11. Parámetros de diseño volumétrico de la mezcla asfáltica**

Número de ejes equivalentes de diseño	Densidad requerida (% de la densidad teórica máxima) Gmm			VAM mínimo en %	Vacíos llenos de asfalto en %	Proporción de polvo
	Nivel de compactación			Tamaño máximo nominal (mm)		
	N inicial	N diseño	N máximo	19(3/4)		
$3 \times 10^6 < \text{ESAL's} < 3 \times 10^7$	8	100	160	13	65-75	0.6-1.6

### Relaciones volumétricas y gravimétricas en mezclas asfálticas

En la *Figura 13* se presenta el diagrama de componentes volumétricos del concreto asfáltico (Mezcla en estado compacto).



**Figura 13. Diagrama de componentes de una HMA (Asphalt Institute, 1996)**

A continuación, se definen cada uno de los componentes del concreto asfáltico. Considerando las tres fases de esta: la sólida determinada por el agregado mineral; la líquida, formada por el cemento asfáltico; y la fase gaseosa, comprendida por el aire.

$VMA$  = Vacíos del agregado mineral.

$Vmb$  = Volumen total de la mezcla asfáltica.

$Vmm$  = Volumen de la mezcla asfáltica sin vacíos.

$VFA$  = Vacíos llenos de cemento asfáltico.

$Va$  = Vacíos de aire.

$Vb$  = Volumen de cemento asfáltico.

$Vbe$  = Volumen efectivo de cemento asfáltico.

$Vba$  = Volumen de cemento asfáltico absorbido.

$Vsb$  = Volumen total del agregado

$Vse$  = Volumen efectivo de agregado

## Relaciones de masa y volumen

Relacionar la masa y el volumen es muy importante para poder obtener los diferentes componentes del diagrama volumétrico. La gravedad específica está dada por la densidad del material entre la densidad del agua. Si la densidad del agua a 25°C es 1 g/cm<sup>3</sup>, la gravedad específica de cualquier material u objeto a 25°C es su peso dividido entre su volumen. Por ende, al conocer la gravedad específica del objeto se puede conocer su volumen o su masa conociendo uno de estas dos medidas.

$$V = \frac{P}{G * 1} \quad (1)$$

Dónde: P= Peso del material

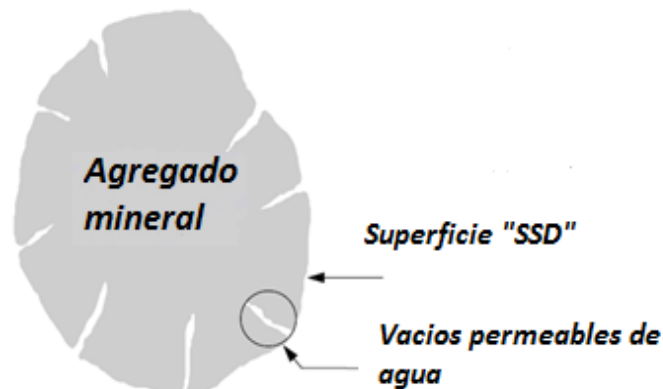
V= Volumen del material

G=Gravedad específica del material

1= Peso específico del agua a 25°C en g/cm<sup>3</sup>

## Gravedad específica bruta

El agregado al ser triturado tiene superficies irregulares que no permite obtener medidas exactas para eso la gravedad específica bruta considera su peso y el volumen bruto de la muestra: este volumen incluye el volumen del agregado más el volumen del agua en los poros superficiales como se aprecia en la *Figura 14*. Para esta condición del agregado se obtiene las medidas estando saturado superficialmente seca.



*Figura 14. Esquema Gravedad específica bruta (Asphalt Institute, 1996)*

$$Gsb = \left( \frac{\text{Peso seco}}{\text{Vol. bruto}} \right) / (1g/cm^3) \quad (2)$$

Volumen bruto = Volumen sólido + vol. Del poro permeable al agua

## Gravedad específica aparente

Este parámetro está determinado por el volumen del agregado no incluyendo el volumen de los poros de la superficie como se aprecia en la *Figura 15*. Se obtiene midiendo la masa seca y el volumen aparente de la muestra mediante la siguiente formula es determinada.

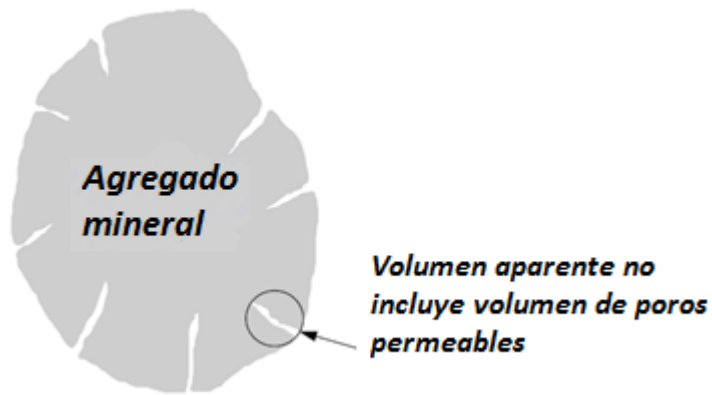


Figura 15. Esquema Gravedad específica aparente (Asphalt Institute, 1996)

$$Gsa = \left( \frac{\text{Peso seco}}{\text{Vol. aparente}} \right) / (1g/cm^3) \quad (3)$$

Volumen aparente= volumen de partículas de agregado sólido

### Gravedad específica efectiva

Este parámetro es medido sobre una mezcla asfáltica ya que depende del volumen de cemento asfáltico absorbido. Es necesario tener como dato la gravedad específica teórica máxima (Gmm) de la mezcla. El volumen efectivo del agregado incluye el volumen de los sólidos del agregado y el volumen de los poros llenos con agua, pero no con cemento asfáltico como se aprecia en la Figura 16.

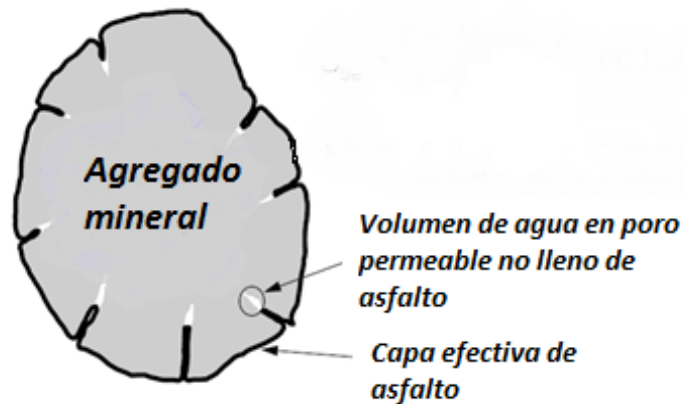


Figura 16 Esquema Gravedad específica efectiva (Asphalt Institute, 1996)

$$Gse = \left( \frac{\text{Peso seco}}{\text{Vol. efectivo}} \right) / (1g/cm^3) \quad (4)$$

Volumen efectivo= volumen de partículas de agregado sólido + volumen de poros permeables al agua no llenos de cemento asfáltico.

## Parámetros volumétricos

### Va= Vacíos de aire

Representa el volumen de los espacios de aire que se encuentran entre las partículas del agregado cubierto por cemento asfáltico, en una mezcla asfáltica compactada. La expresión matemática para su cálculo respecto al esquema presentado en la *Figura 13* sería:

$$Va = \frac{V_{aire}}{V_{mb}} \times 100 \quad (5)$$

### VMA= Vacíos en el agregado mineral

Representa el volumen de espacio vacío intergranular entre las partículas del agregado en una mezcla asfáltica compactada. La expresión matemática para su cálculo respecto al esquema presentado en la *Figura 13* sería:

$$VMA = \frac{V_{be} + V_{aire}}{V_{mb}} \times 100 \quad (6)$$

### VFA= Vacíos llenos con cemento asfáltico

Representa la porción del volumen de espacio vacío intergranular (VMA) ocupado por el cemento asfáltico efectivo. La expresión matemática para su cálculo respecto al esquema presentado en la *Figura 13* sería:

$$VFA = \frac{V_{be}}{V_{be} + V_{aire}} = \frac{V_{be}}{VMA} = \frac{VMA - Va}{VMA} \times 100 \quad (7)$$

Tomando en cuenta lo anterior se fabricaron especímenes cilíndricos mediante el compactador giratorio SUPERPAVE a fin de determinar las propiedades volumétricas y a partir de ellas encontrar el porcentaje óptimo de cemento asfáltico para la mezcla. A través del siguiente procedimiento se estimó un porcentaje inicial de cemento asfáltico el cual sirvió como base para el diseño de dicha mezcla.

La gravedad específica efectiva de la mezcla está dada por:

$$Gse = Gsb + 0.8x(Gsa - Gsb) \quad (8)$$

No obstante, se tomó como valor representativo un valor de  $Gse = 2.69$

El volumen del ligante asfáltico absorbido en el agregado está dado por:

$$Vba = \frac{Psx(1 - Va)}{\left(\frac{Pb}{Gb} + \frac{Ps}{Gse}\right)} \times \left(\frac{1}{Gsb} - \frac{1}{Gse}\right) \quad (9)$$



Donde:

Vba = Volumen absorbido del ligante asfáltico

Ps = Porcentaje de agregado (0.95)

Pb = Porcentaje de ligante (0.05)

Gb = Gravedad específica del ligante (1.03)

Va = Volumen de vacíos de aire (0.04)

Vba = 0.035

El volumen del ligante asfáltico está dado por la siguiente fórmula matemática

$$Vbe = 0.081 - 0.02931x[\ln(S_n)] \quad (10)$$

Vbe = 0.101

El peso del agregado en gramos

$$Ws = \frac{Ps \times (1 - Va)}{\left(\frac{Pb}{Gb} + \frac{Ps}{Gse}\right)} \quad (11)$$

Ws = 2.275

Finalmente, el porcentaje inicial de diseño está dada por la siguiente formula

$$Pbi = \frac{Gbx(Vbe + Vba)}{(Gbx(Vbe + Vba)) + Ws} \times 100 \quad (12)$$

**Pbi = 5.7%**

A continuación, se fabricaron los especímenes con el porcentaje inicial de cemento asfáltico compactados con el compactador giratorio SUPERPAVE, con 4500 gramos de agregado son suficientes para estos especímenes cilíndricos. Otros especímenes con 2000 gramos aproximadamente de agregado serán preparados para determinar la gravedad específica teórica máxima de la mezcla (Gmm).

Como ya mencionamos anteriormente las temperaturas de mezclado y compactación son muy importantes ya que con ello nos aseguramos que la viscosidad del cemento asfáltico es el adecuado para el procedimiento a realizar. En nuestro caso por medio del viscosímetro rotacional se determinaron las temperaturas de: 154°C mezclado y 143°C compactación. Después del mezclado este debe ser sometido a un envejecimiento a corto plazo de dos horas y ser homogenizado a intervalos de una hora, después de este tiempo se prosigue con la compactación, recordando que los moldes también debieron ser ambientados a la temperatura de compactación durante media hora, de este modo aseguramos mantener la temperatura durante la manipulación del material.

SUPERPAVE recomienda que para tener un amplio rango del cual elegir el contenido óptimo de cemento asfáltico, del porcentaje calculado teóricamente se propondrán  $\pm 0.5\%$  y  $\pm 1\%$  de cemento asfáltico, teniendo finalmente los siguientes porcentajes. En la *Tabla 12* se presenta los diferentes

porcentajes de cemento asfáltico a utilizar, así como las masas del agregado pétreo y el cemento asfáltico.

**Tabla 12. Porcentajes de cemento asfáltico para diseño**

%Pb	Masa total de la mezcla	Masa del agregado pétreo	Masa de cemento asfáltico
4.70%	4703	4482	221
5.20%	4731	4485	246
5.70%	4758	4487	271
6.20%	4776	4480	296

**Gravedad específica teórica máxima Gmm (Densidad de RICE)**

De acuerdo a la norma ASTM D 2041 se realizó el ensayo para determinar la densidad de RICE de la mezcla asfáltica, 2000 gramos de material pétreo fue suficiente para cada una de las mezclas, después del mezclado se vació en una charola donde se procedió al envejecimiento a corto plazo de dos horas, después de este curado se dejó enfriar a temperatura ambiente, pero moviéndolo continuamente para que la mezcla quedara suelta, sin grumos. Las siguientes imágenes de la *Figura 17* muestran parte del procedimiento.



**Figura 17. Procedimiento Densidad de RICE**

Se deja la muestra asfáltica 24 horas para después determinar el valor de la Gmm, como lo marca la norma la prueba debe ser realizada con agua a 25°C donde la densidad del agua es igual a uno, facilitando los cálculos mediante la siguiente expresión:

$$Gmm = \frac{A}{A + D - E} \tag{13}$$

Donde:

A = Masa de la muestra seca al aire

D = Masa del picnómetro + agua + tapa

E = Masa del picnómetro + agua + muestra + tapa

En la siguiente *Tabla 13* se presenta los resultados de la Gravedad específica teórica máxima para cada uno de los contenidos de cemento asfáltico.

**Tabla 13. Gmm para contenidos de cemento asfáltico**

%Pb	Densidad teórica máxima Gmm
4.70%	2.515
5.20%	2.496
5.70%	2.477
6.20%	2.459

### Gravedad específica neta Gmb

Bajo el procedimiento que señala la norma ASTM D 2726 se determinaron la Gravedad específica de cada una de las muestras. La temperatura del agua debe estar en  $23 \pm 2$  °C para poder realizar la prueba. Se obtendrán tres medidas de cada espécimen: masa del espécimen en el aire (seco), masa del espécimen sumergido, después de quince minutos bajo el agua (Figura 18A), la masa del espécimen superficialmente seca (Figura 18B), con estos datos obtener el Gmb mediante la siguiente expresión:

$$Gmb = \frac{W_a}{W_{ss} - W_w} \quad (14)$$

$W_a$  = Masa al aire de la probeta

$W_{ss}$  = Masa al aire y superficialmente seca de la probeta

$W_w$  = Masa de la probeta en agua



**Figura 18. Determinación de Gmb de los especímenes**

En la *Tabla 14*, se presentan los resultados de las propiedades volumétricas y gravimétricas del concreto asfáltico elaborado con el cemento asfáltico convencional PG 64-16.

**Tabla 14. Parámetros volumétricos de los diferentes contenidos de cemento asfáltico**

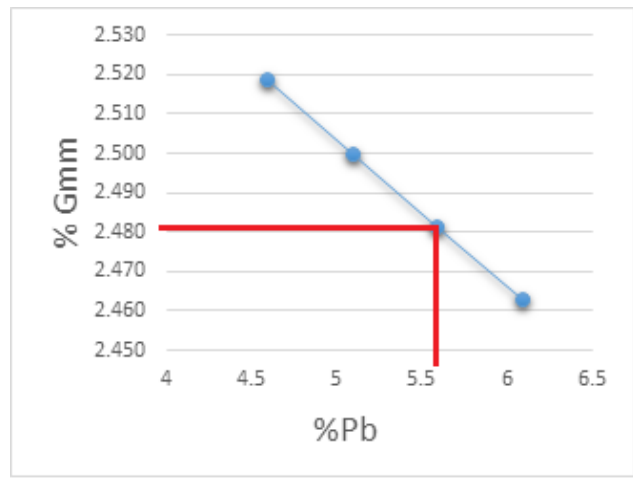
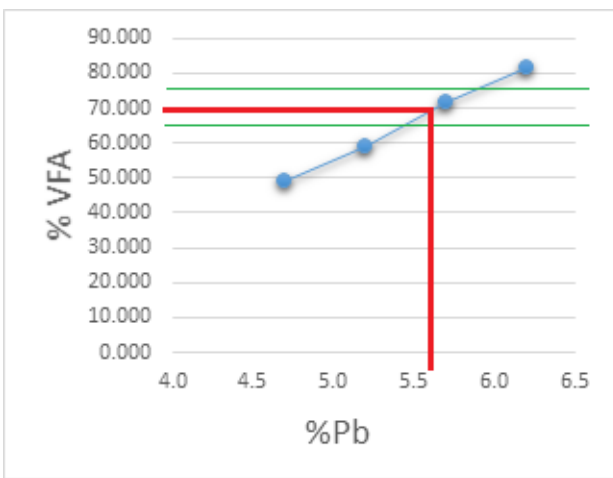
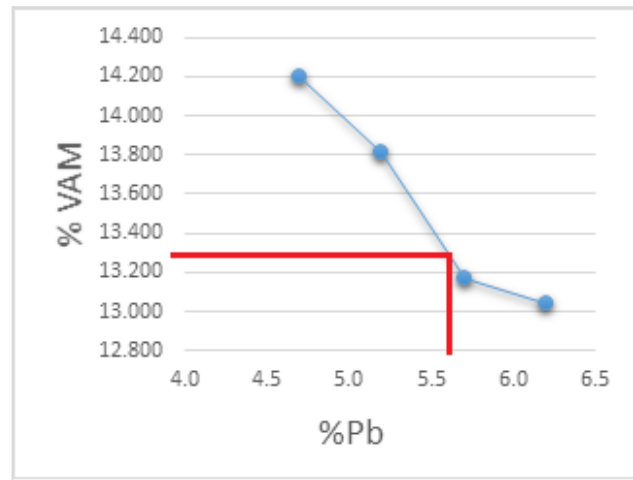
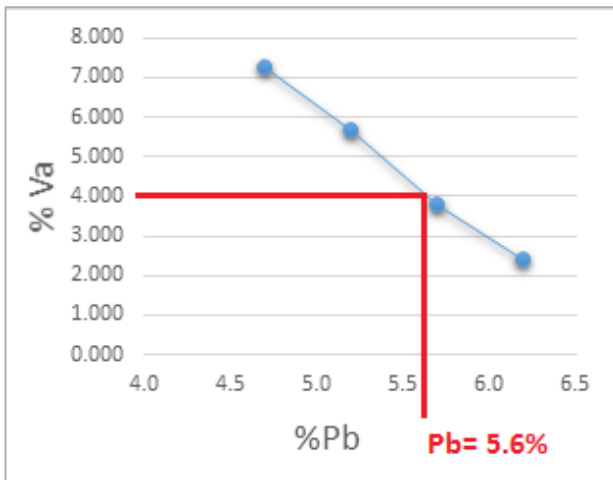
Pb %	Gsb (g/cm <sup>3</sup> )	Gse (g/cm <sup>3</sup> )	Gmm (g/cm <sup>3</sup> )	Gmb (g/cm <sup>3</sup> )	Va %	VAM %	VFA %	Proporción polvo
4.7	2.591	2.707	2.515	2.301	7.2	14.1	48.9	1.27
5.2			2.496	2.324	5.6	13.8	59.1	1.15
5.7			2.477	2.354	3.7	13.1	71.6	1.05
6.2			2.459	2.371	2.4	13.1	81.7	0.96

#### 4.2.3 Análisis del diseño óptimo de las mezclas asfálticas

De acuerdo a la metodología SUPERPAVE, el porcentaje óptimo de cemento asfáltico esta dado para aquella mezcla asfáltica que nos proporcione un concreto de 4% de vacíos de aire. La selección del porcentaje optimo más allá de una cuestión económica impacta en el comportamiento del concreto asfáltico, pues un exceso de cemento asfáltico puede provocar un mal desempeño a la deformación permanente ya que el cemento asfáltico al ser transitado a altas temperaturas se comportaría como un lubricante, y en caso contrario donde el porcentaje sea muy poco no se permitirá que la estructura quede completamente compacto pues el agregado mineral no se verá cubierto por la película de cemento asfáltico que le permita tener la cohesión necesaria para formar la estructura estable.

En la *Figura 19* se presentan las propiedades volumétricas y gravimétricas del concreto asfáltico elaborado con cemento asfáltico convencional PG 64-16 en diferentes proporciones respecto a la masa total de la mezcla.

**De estos resultados obtenidos a diferentes porcentajes de cemento asfáltico se pudo determinar que el 5.6% de cemento asfáltico cumple con los requerimientos definidos en la tabla para el nivel de diseño 2, por lo tanto, se adoptó este valor como óptimo para la elaboración de todas las mezclas asfálticas estudiadas.**



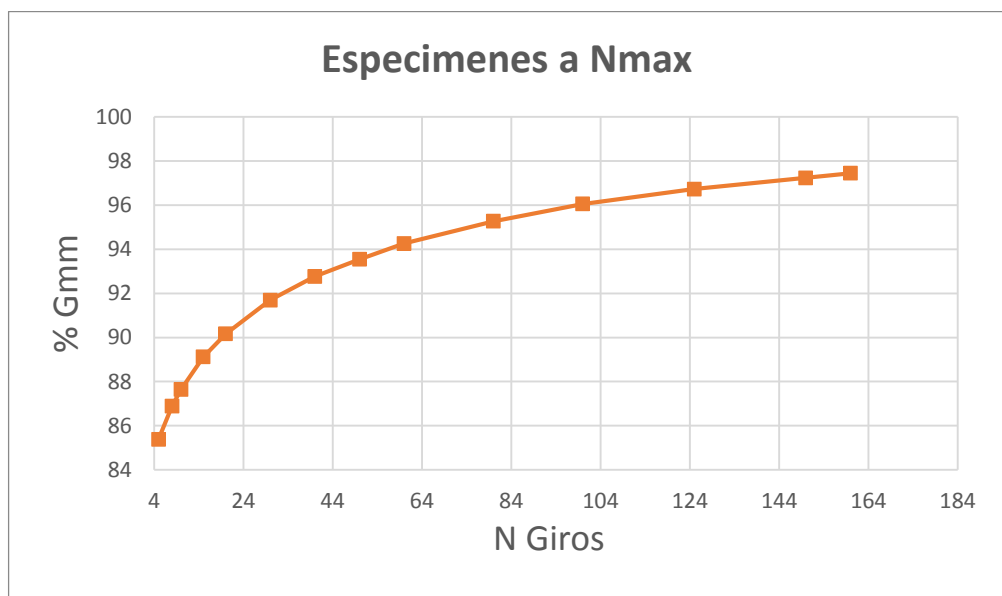
**Figura 19. Elección del porcentaje óptimo de cemento asfáltico**

Una vez definido el contenido de cemento asfáltico óptimo, para comprobar este resultado se fabricaron dos especímenes más, compactados con el número de giros máximo. En la *Tabla 15* se aprecia cómo fue la aumentando la densificación de los dos especímenes de comprobación al ser compactados.

**Tabla 15. Densificación de los especímenes de comprobación**

Densificación de los especímenes a 5.6% de cemento asfáltico						
	Muestra A		Muestra B			
N Giros	Ht, mm	%Gmm	N Giros	Ht, mm	%Gmm	Prom % Gmm
5	129.8	85.46248458	5	130.2	85.29818	85.38033245
8	127.5	87.00416077	8	128	86.76424	86.88420179
10	126.5	87.6919407	10	126.8	87.58536	87.63864811
15	124.5	89.10064658	15	124.6	89.13181	89.11622649
20	123	90.18723983	20	123.2	90.14467	90.16595384
30	121	91.67793801	30	121.1	91.70787	91.69290409
40	119.6	92.75109113	40	119.7	92.78048	92.76578399
50	118.6	93.5331408	50	118.7	93.56212	93.54762802
60	117.7	94.24834748	60	117.8	94.27694	94.26264182
80	116.4	95.3009493	80	116.6	95.2472	95.27407276
100	115.5	96.0435541	100	115.6	96.07113	96.057344
125	114.7	96.71343068	125	114.8	96.74062	96.72702491
150	114.1	97.22200262	150	114.2	97.24889	97.23544561
160	113.9	97.39271728	160	113.9	97.50503	97.44887435
Gmb=	2.408		Gmb=	2.402		
Gmm=	2.481		Gmm=	2.481		
W seco=	4740.4		W seco=	4714.1		

En la *Figura 20* se puede ver cómo fue la evolución de la densificación del espécimen el cual debe ser menor a 98% cuando alcance el número máximo de giros, condición que si se cumple.



**Figura 20. Densificación del espécimen a Nmax.**

En la *Tabla 16* se muestra los resultados de la comprobación, lo cual se consideran consistentes con los resultados obtenidos previamente.

**Tabla 16 Parámetros volumétricos de los especímenes finales**

Parámetros volumétricos del porcentaje óptimo										
Pb % Opt	Pbe % afectivo	Pba % absorbido	Gsb (g/cm <sup>3</sup> )	Gse (g/cm <sup>3</sup> )	Gmm (g/cm <sup>3</sup> )	Gmb (g/cm <sup>3</sup> )	Va (%)	VAM (%)	VFA (%)	Proporción de polvo
5.6	3.47	2.25	2.591	2.707	2.481	2.405	3.9	13	67	1.5

### 4.3 Determinación de la Susceptibilidad al daño por humedad del concreto asfáltico.

Este daño se presenta en el pavimento cuando está en contacto con el agua, siendo la temporada de lluvias la más crítica, pudiendo ser tan severo que provoque la falla estructural del pavimento, se puede apreciar en las carpetas asfálticas en forma de baches (Liddle G. Choi Y., 2007).

La prueba de susceptibilidad al daño por humedad, forma parte del procedimiento de diseño de las mezclas asfálticas de la metodología SUPERPAVE que permite estimar el potencial de pérdida de resistencia del material debido a la interacción del agua con el cemento asfáltico y el agregado. La norma AASHTO T 283 nos proporciona las condiciones para realizar la prueba. Se fabrican 6 especímenes con vacíos de aire de entre 6 y 8%. Se harán dos sub-grupos de 3 especímenes, un sub-grupo será para los especímenes no acondicionados y el otro sub-grupo para los especímenes acondicionados.

La susceptibilidad al daño por humedad (TSR) es el cociente entre la resistencia a la tensión indirecta del sub-grupo acondicionado y la resistencia a la tensión indirecta del sub-grupo no acondicionado.

Para que la prueba sea aceptada debe cumplir con un TSR mínimo de 80%.

Mediante la siguiente expresión se calcula la resistencia a la tensión indirecta:

$$St = \frac{200P}{\pi tD} \quad (155)$$

St = Resistencia a la tensión indirecta (KPa)

P = Carga máxima (N)

T = Altura del espécimen (mm)

D = Diámetro del espécimen (mm)

El porcentaje de TSR que se expresa mediante la siguiente expresión está dada por la relación de la resistencia a tensión indirecta de los especímenes acondicionados y los no acondicionados.

$$TSR = \frac{S2}{S1} \times 100 \quad (16)$$

TSR = Relación de resistencias a la tensión indirecta

S1 = Resistencia a la tensión indirecta promedio de la muestra no acondicionada

S2 = Resistencia a la tensión indirecta de la muestra acondicionada

Las muestras no acondicionadas se mantendrán a temperatura ambiente para su prueba, dos horas antes de la prueba de resistencia a la tensión indirecta se acondicionarán a 25°C. Para ello se colocan



dentro de una bolsa al interior de un baño maría a dicha temperatura, procurando no dejar que las muestras entren en contacto con el agua para mantener su condición seca.

Las muestras acondicionadas como primer paso se saturaron parcialmente de 70% a 80% sumergiendo la muestra en agua y mediante aplicación de vacío a una presión absoluta de 13 a 67 KPa (10-26 mmHg) como se muestra en la *Figura 21A*. Después de lograr la saturación deseada se cubrió con un plástico para después ser colocado en una bolsa, en el interior de la bolsa previamente se le agrego 10 mililitros de agua para mantener la humedad adecuada *Figura 21C*, las bolsas se amarraron y fueron colocadas inmediatamente a congelamiento (procedimiento opcional), permanecieron a  $-18^{\circ}\text{C}$  durante 16 horas.

En seguida del ciclo de congelamiento los especímenes se pasaron a un baño maría de  $60^{\circ}\text{C}$ , dejando que el hielo superficial se derrita dentro del baño maría después se quitaron la película de plástico *Figura 21B*, esta etapa del acondicionamiento fue durante 24 horas, terminado este periodo las muestras se llevaron a  $25^{\circ}\text{C}$  en la misma condición de baño maría durante 2 horas para después proceder a la prueba de tensión indirecta como se muestra en la *Figura 22*.



**Figura 21. Muestras con acondicionamiento**

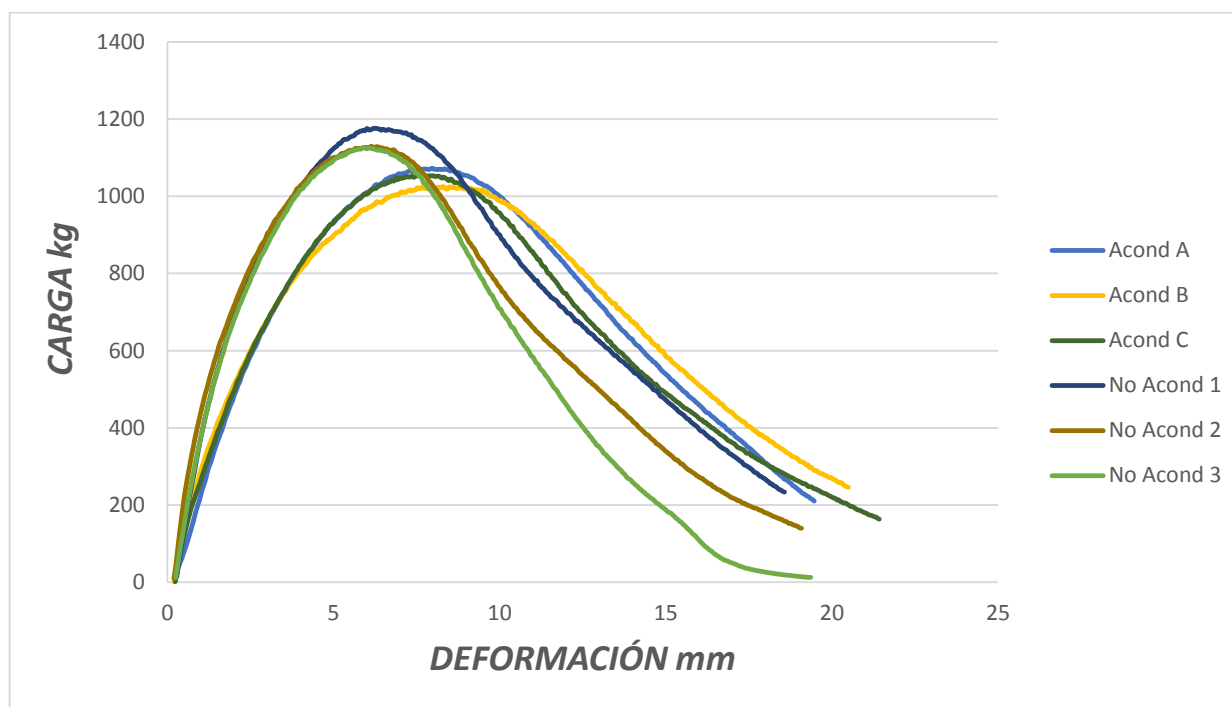


**Figura 22. Ensayo de TSR a Subgrupos**

En la *Figura 23* se aprecian las cargas que se fueron aplicando a cada uno de los especímenes, así como las deformaciones que se fueron produciendo hasta alcanzar el estado de falla de cada uno de



ellos. En dicha grafica se observan además que los especímenes del sub-grupo de los no acondicionados presentaron mayor resistencia a la tensión indirecta.



**Figura 23. Grafica de prueba TSR (Carga kg vs Deformación mm)**

En la *Tabla 17* se presentan los resultados de la prueba a la susceptibilidad al daño por humedad de los dos sub-grupos de concreto asfáltico elaborados con el concreto asfáltico convencional PG 64-16.

**Tabla 17 Resultado de la susceptibilidad a la humedad**

Sub-grupo	Espécimen	%Va	Carga máx N	Resistencia a la tensión indirecta (Kpa)	Promedio resistencia a la tensión indirecta (Kpa)
Acondicionadas	TSR A	7.3	10276.5	45.9	44.9
	TSR B	7.2	9818.5	43.9	
	TSR C	7.3	10103.1	45.1	
No acondicionadas	TSR 1	7.4	11267.0	50.3	48.9
	TSR 2	7.3	10821.6	48.3	
	TSR 3	7.1	10790.9	48.2	
<b>%TSR</b>					<b>91.8</b>

En la *Tabla 17* se aprecia la relación de resistencias a la tensión indirecta de los especímenes acondicionados y no acondicionados (TSR) que es de 91.8%, cumpliendo con el valor mínimo requerido de 80%.

Los resultados anteriores indican que los concretos asfálticos elaborados con la distribución granulométrica mostrada en la *Figura 6* y con un contenido de cemento asfáltico de 5.6%, presentaran

las condiciones volumétricas requeridas para un nivel de tránsito II de acuerdo a la metodología SUPERPAVE. Así mismo, dichos concretos asfálticos tendrán una buena resistencia al daño por humedad.

## 5 PRUEBAS DE DESEMPEÑO AL CONCRETO ASFÁLTICO

### 5.1 Susceptibilidad a la deformación permanente

Una forma de evaluar el comportamiento de las mezclas asfálticas con respecto a la deformación permanente (roderas), consiste en analizar la respuesta del material en estado sólido bajo (concreto asfáltico) condiciones desfavorables, es decir, cuando presenta una rigidez baja (situación que se presenta generalmente a altas temperaturas) bajo una carga de tránsito elevada. Existe una gran variedad de ensayos de rodadura (El analizador de pavimentos asfálticos (APA), la rueda cargada de Georgia; la rueda cargada de Hamburgo (HWDT), el evaluador de pavimentos de la Universidad de Nottingham y la rueda de pista Española) que son ampliamente utilizados para determinar la resistencia a las deformaciones permanentes en el concreto asfáltico. En estos ensayos se mide la profundidad de la rodera que se forma en una probeta o placa prismática sometida al paso repetido de una rueda cargada bajo una determinada temperatura de ensayo. Las roderas en el espécimen de ensayo se correlacionan con respecto a las roderas del pavimento en servicio.

En esta investigación, se decidió utilizar el dispositivo de Rueda de Hamburgo mostrado en la *Figura 24* de acuerdo a la norma AASHTO T 324, para determinar la susceptibilidad a la deformación permanente de los concretos elaborados a partir de 6 cementos asfálticos diferentes. Para ello se fabricaron 2 placas de concreto asfáltico para cada cemento asfáltico, con un porcentaje de vacíos de aire cercano a 7%, de 320 mm y 260 mm de largo y ancho respectivamente, y un espesor medio de 50 mm mostrado en la *Figura 25 B*, siendo fabricados mediante el compactador de rodillo mostrado en la *Figura 25A*. Dichas placas fueron ensayadas aplicando una carga cíclica de  $705 \pm 4.5$  KN mediante una rueda de acero de 203.2mm de diámetro con 47mm de espesor a una razón de 52 pases por minuto (0.305 m/s) y para un rango de temperatura de 25°C a 70°C con una variación no más de 1°C



**Figura 24. Rueda cargada de Hamburgo marca TROXLER**



**Figura 25. . Equipo compactador utilizado y placas**

### 5.1.1 Ensayo para deformación permanente

La norma AASTHO T 324 indica el procedimiento para la realización de esta prueba. Se realizó el vaciado de datos al programa: número de pasadas 20000, deformación máxima 20mm, temperatura de prueba 50°C, 1 hora de acondicionamiento (incluye tiempo a que la muestra alcance los 50°C), datos generales (proyecto, identificación y especímenes).

La prueba consistirá en determinar cuánto se deforma la placa de concreto asfáltico conforme el número de pasadas aumenta. El ensayo dará fin cuando se cumplan las 20000 pasadas o cuando la deformación rebase los 20mm, cualquiera de las dos condiciones que ocurra primero. En la *Figura 26* se puede ver los dos especímenes de un mismo cemento asfáltico ya colocado en los moldes correspondientes para ser ensayados simultáneamente.



**Figura 26. Losas ya colocadas en moldes, en acondicionamiento**

### 5.1.2 Presentación y análisis de resultados de la prueba de susceptibilidad a la deformación permanente

En la *Figura 28* y *Tabla 18*, se presenta la evolución de las deformaciones promedio obtenidas mediante las pruebas de Rueda de Hamburgo realizadas en placas de concreto asfáltico elaboradas a partir de seis cementos asfálticos diferentes (Convencional, PPA H, EVA V, EVA E, SBS V Y SBS E).

En esta Figura se observa que el concreto asfáltico que presenta mayor deformación por el paso repetido de la rueda de Hamburgo, es el elaborado con el cemento asfáltico convencional, cabe mencionar que, aunque sufrió la mayor deformación este sólo se ensayó a 10000 pasadas debido a que este número de pases, el material alcanza una deformación mayor a los 13 mm condición que impidió el correcto funcionamiento del equipo de prueba.

Seguidos de mayor a menor deformación por el concreto asfáltico elaborado con PPA H, EVA E, EVA V, SBS V y SBS E. En la *Tabla 18*, se observa además que los concretos asfálticos elaborados a partir de cementos asfálticos modificados SBS y EVA presentan deformaciones en el ciclo 20000 menores a 10mm, mientras que los concretos asfálticos fabricados con cemento asfáltico convencional y con ácido polifosfórico (PPA) presentan deformaciones mayores a los 10mm. Los resultados de deformación permanente no son consistentes con los valores del parámetro  $G^*/\text{sen}\delta$  indicado en la *Tabla 7*, estimado a través de pruebas reológicas del cemento asfáltico y el cual es comúnmente utilizado para estimar el comportamiento ante deformación permanente de los concretos asfálticos.

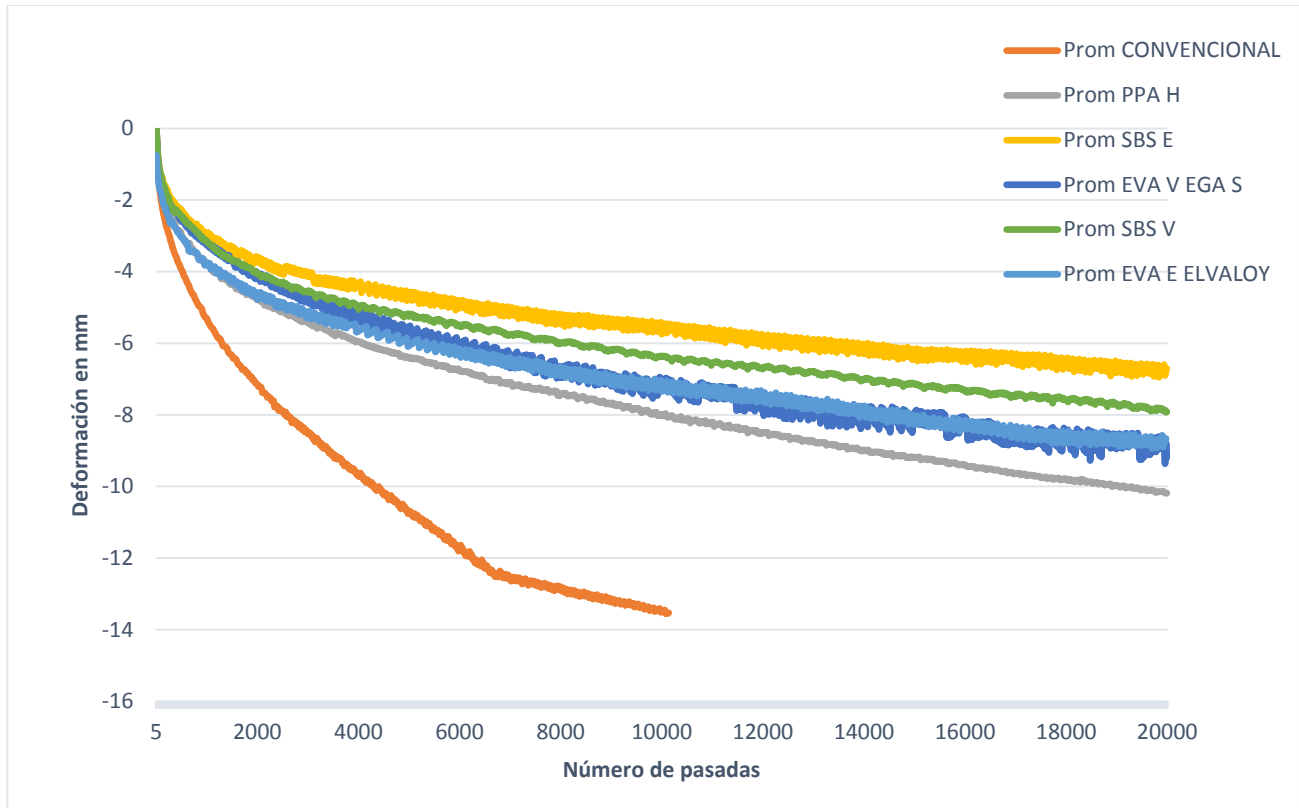
En la *Figura 32* se puede apreciar el aspecto visual de un espécimen de concreto asfáltico luego de ser sometido a la prueba de rueda de Hamburgo.



*Figura 27. Rueda en espécimen después de la prueba*

*Tabla 1818. Resultados de ensayo en Rueda cargada de Hamburgo*

<b>Espécimen</b>	<b>Gmb</b>	<b>Waire</b>	<b>Va</b>	<b>Espesor (mm)</b>	<b>Deformación (mm)</b>
Convencional	2.302	13217	7.1	50	13.5
PPA H	2.314	13258	6.9	50	10.19
EVA V EGA S	2.310	13283	6.9	50	9.18
EVA E ELVALOY	2.303	13282	7.1	50	8.66
SBS V	2.307	13260	7.0	50	7.92
SBS E	2.310	13254	6.9	50	6.71



**Figura 28. Gráfica de desempeño de los diferentes cementos asfálticos**

En cada una de las curvas de la *Figura 28* se puede apreciar que no presentaron puntos de inflexión lo cual significa que los especímenes no son susceptibles al daño por humedad, consistente con los datos obtenidos de la prueba de resistencia a la tensión indirecta (TSR) descrita anteriormente. Se podría apreciar un punto de inflexión en la curva del cemento asfáltico convencional, pero no se consideró como tal, ya que el equipo de ensayo a los 13 mm de deformación llegó a un punto crítico de lectura tal como se mencionó anteriormente.

Todas las placas de concreto asfálticos fabricados con cementos asfálticos modificados presentaron un mejor desempeño que el concreto convencional, dejando claro la mejora en el comportamiento que estos agentes modificadores le hacen al concreto asfáltico.

## 6 CONCLUSIONES

Mediante la prueba de la Rueda Cargada de Hamburgo se pudo evaluar el desempeño ante la formación de roderas de placas de concreto asfálticos fabricados con diferentes cementos asfálticos.

Los resultados de esta investigación permitieron identificar que los concretos asfálticos elaborados a partir de cementos asfálticos modificados (con polímero) presentan mejor comportamiento ante la deformación permanente que aquellos elaborados con un ligante convencional.

Concretos asfálticos elaborados con cementos asfálticos modificados presentaron desempeños diferentes ante la formación de roderas siendo el de mejor comportamiento el elaborado a partir de la adición de polímero: SBS E y seguidos por los adicionados con, SBS V, EVA V EGA S, EVA E, PPA H.

Los resultados de las pruebas reológicas en el cemento asfáltico indican que el parámetro  $G^*/\sin\delta$  asfáltico no representa en forma adecuada la contribución de este material en el desempeño del concreto asfáltico ante la formación de roderas.

El ensayo de la rueda cargada de Hamburgo brinda buenos elementos para la evaluación de los concretos asfálticos ante deformación permanente, pero por ser un ensayo de origen empírico (se acepta/se rechaza) es recomendable realizar ensayos extras que permitan hacer una correlación ante la deformación permanente entre el cemento asfáltico y el concreto asfáltico. Siendo un posible ensayo para la evaluación del cemento asfáltico el ensayo MSCR (Multiple Stress Creep and Recovery), que proporciona parámetros para evaluar el comportamiento elástico de los ligantes asfálticos.



## 6.1 Referencias bibliográficas

*B. Sousa, J., Craus, J., & L. Monismith, C. (1991). Summary Report on Permanent Deformation in Asphalt Concrete. Berkeley California: Strategic Highway Research Program.*

*Becker, Z., MP, M., & Rodríguez. (2001). Polymer modified asphalt Vis. Technol.*

*Characterizacion of modified Asphalt Binders in SUPERPAVE Mix Design. (2001). CNHRP Report 459.*

*Davis, R. (1998). Large Stone mixes: An historical hrsight IS-103. Asphalt Paving Association .*

*Delgado Alamilla, H., Garnica Anguas , P., & Sandoval Sandoval, C. D. (2005). Análisis de varianza del efecto de algunos factores que influyen en la deformación permanente de mezclas asfálticas. Queretaro.*

*Federal Highway Administración, U. D. (2013). SUPERPAVE Fundamentals (Vol. NHI Course #131053).*

*Matias Mario, M. L. (2016). Analytical modeling of ruttinf potencial of asphalt mixes using hamburg wheel tracking device. University of New México UNM Digital Repository.*

*Morgan, B., & Mulder, A. (1995). The shell bitumen industrial handbook surrey: Shell bitumen.*

*N.CMT.4.05.002. (2006). Calidad de Materiales Asfálticos Modificados.*

*Pell, P. S., & Brown, S. (1974). Repeated Loading of Bituminous Materials. Republic of South Africa, Durban: National Institute for Road Research.*

*Rajib, A., Mallick, B., & Tahar, E.-K. (2013). Pavement Engineering, Asphalt and Emulsions. CRC Press.*

*SHRP. (1995). Antecedentes del diseño y analisis de mezclas asfálticas de SUPERPAVE. SUPERPAVE.*

*ZN, K., MR, K., & A, M. (2012). A review of using waste and virgin polymer in pavement. Constr Build Mater.*

*ASTM, (2005). Standard Test Method for Resistance to degradation of small-size Coarse Agregate by Abrasion and Impact in the Los Ángeles Machine, ASTM designation C 131-03.*

*ASTM,(2005). Standad test method for density, relative density (Specific Gravity) and absorption of fine aggregate, ASTM designation C 128-04a.*

*ASTM, (2005). Standard test method for density, relative density (Specific Gravity) and absorption of coarse aggregate, ASTM designation C 127-04.*

*ASTM (2007). Standard test method for ductility of bituminous materials, ASTM designation D 113.*

*ASTM, (2003). Standard test method for theorical maximum specific gravity and density of bituminous paving mixtures, ASTM designation D 2041*

*ASTM, (2005). Standard test method for sand equivalent value of soils and fine aggregate, ASTM designation D 2419.*

*ASTM, (2012). Standard test method for effect of heat and air on a moving film of asphalt (Rolling Thin-Film Oven Test), ASTM designation D 2872.*



*ASTM, (2005). Standard test method for soundness of aggregate by use of sodium sulfate or magnesium sulfate, ASTM designation C 88-99.*

*ASTM, (2005). Standard test method for sieve analysis of fine and coarse aggregates, ASTM designation C 136-05.*

*ASTM (2012). Standard test method for flash and fire points by cleveland open cup tester, ASTM designation D 92.*

*ASTM, (2005). Standard test method for flat particles, elongated particles, or flat and elongated particles in coarse aggregate, ASTM designation D 4791-99.*

*ASTM, (2005). Standard test method for determining the percentage of fractured particles in coarse aggregate, ASTM designation D 5821-01.*

*ASTM, (2008). Standard test method for determining the rheological properties of asphalt binder using a Dynamic Shear Rheometer, ASTM designation D 7175-08.*

*ASTM, (2011). Standard test method for compaction and shear properties of bituminous mixture by means of the U.S. Corps of Engineers Gyratory Testing Machine (GTM), ASTM designation D 3387.*

*ASTM, (1995). Standard test method for indirect tension test for resilient modulus of bituminous mixtures, ASTM designation D 4123-82.*

*ASTM, (2005). Standard test method for viscosity determination of asphalt at elevated temperatures using rotational viscosimeter, ASTM designation D 4402-02.*

*AASHTO, (2014). Performance-Graded Asphalt Binder Using Multiple Stress Creep Recovery (MSRC) test, AASHTO designation M 332-14.*

*AASHTO, (2014). Multiple Stress Creep Recovery (MSCR) Test of Asphalt Binder Using a Dynamic Shear Rheometer (DSR), AASHTO designation T 350-14.*