



**UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE
HIDALGO**

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

**MAESTRÍA EN INFRAESTRUCTURA DEL TRANSPORTE
EN LA RAMA DE LAS VÍAS TERRESTRES**

TESI DE MAESTRÍA

**MEDICIÓN DE MÓDULOS RESILIENTES EN
MEZCLAS ASFÁLTICAS CON ASFALTOS
MODIFICADOS GRADO PG-76 Y PG-82**

Autor: ING. CHRISTIÁN MENA LEÓN

Asesor: DR. JORGE ALARCÓN IBARRA

Morelia, Mich., Abril del 2008.

MEDICIÓN DE MÓDULOS RESILIENTES EN MEZCLAS ASFÁLTICAS CON ASFALTOS MODIFICADOS GRADO PG-76 Y PG-82

1 INTRODUCCIÓN

2 OBJETIVOS

3. MEZCLAS ASFÁLTICAS

3.1. Componentes de una Mezcla Asfáltica

3.1.1. Características de los Materiales Pétreos

3.1.2. Características de los Asfaltos

3.1.2.1. Cementos Asfálticos

3.1.2.2. Asfaltos Rebajados

3.1.2.3. Emulsiones Asfálticas

3.1.2.4. Clasificación de Cementos Asfálticos Grado PG

3.2. Mezclas Asfálticas en Caliente

3.2.1. Mezclas Asfálticas de Granulometría Densa

3.2.2. Mezclas Asfálticas de Granulometría Abierta

3.3. Mezclas Asfálticas en Frío

3.3.1. Mezclas Asfálticas de Granulometría Densa

3.3.2. Mortero Asfáltico

3.4. Mezclas Asfálticas por el Sistema de Riegos

4. ASFALTOS MODIFICADOS

4.1. Introducción

4.2. Tipos de Polímeros

5. DISEÑO DE MEZCLAS

5.1. Introducción

5.2. Método Marshall

5.3. Método de Hveem

6. MÓDULO RESILIENTE

- 6.1. Introducción
- 6.2. Definición del Concepto de Módulo Resiliente
- 6.3. Forma de la Onda de Carga
- 6.4. Mecanismo de Deformación de un Material Sujeto a Carga Cíclica
- 6.5. Factores que afectan al Módulo Resiliente
 - 6.5.1. Nivel de Esfuerzos
 - 6.5.2. Frecuencia de Carga
 - 6.5.3. Contenido de Asfalto
 - 6.5.4. Tipo de agregado
 - 6.5.5. Porcentaje de Vacíos
 - 6.5.6. Tipo y contenido de modificadores
 - 6.5.7. Tipos de Prueba
 - 6.5.8. Temperatura

7. PRUEBAS DE LABORATORIO

- 7.1. Introducción
- 7.2. Materiales Utilizados
- 7.3. Pruebas realizadas al agregado pétreo.
 - 7.3.1. Composición Granulométrica SCT N-CMT-4-04-01
 - 7.3.2. Equivalente de Arena de Materiales Pétreos para Mezclas Asfálticas.
 - 7.3.3. Partículas Alargadas y Lameadas.
 - 7.3.4. Desgaste mediante la prueba de Los Ángeles de Materiales Pétreos para Mezclas Asfálticas
 - 7.3.5. Densidad Relativa de Materiales Pétreos para Mezclas Asfálticas.
- 7.4. Pruebas Realizadas al Asfalto
- 7.5. Pruebas Realizadas a la Mezcla Asfáltica

- 7.5.1. Prueba Marshall
- 7.5.2. Tracción Indirecta
- 7.5.3. Módulo Resiliente

8. ANÁLISIS DE RESULTADOS

- 8.1. Ensayo de Módulo Resiliente

9. CONCLUSIONES

- 9.1. Valores del Módulo Resiliente en Función del Tipo de Asfalto
- 9.2. Valores del Módulo Resiliente en Función del Contenido de Asfalto
- 9.3. Valores del Módulo Resiliente en Función de la Relación de Vacíos en la Mezcla
- 9.4. Valores del Módulo Resiliente en Función de la Densidad

ANEXOS

- Anexo 1. Resultados de la Prueba Marshall
- Anexo 2. Resultados de la Prueba de Módulo Resiliente
- Anexo 3. Tablas y Figuras
- Anexo 4. Reporte Fotográfico

BIBLIOGRAFÍA

INTRODUCCIÓN

En la actualidad los esfuerzos por construir mejores carreteras y más durables, ha llevado a los ingenieros a investigar nuevos materiales para la construcción de Mezclas Asfálticas mejor diseñadas; es decir, tratar de caracterizarlas de una mejor manera para descifrar su comportamiento en campo.

Lo anterior no es sencillo, ya que los materiales para la construcción de mezclas, tanto el agregado pétreo como el asfalto, son materiales que en conjunto se tornan difíciles de evaluar, ya que su comportamiento depende de la temperatura de la zona de estudio, de las cargas aplicadas, así como de una gran variedad de aspectos.

Es por ello que las metodologías de diseño de pavimentos han ido cambiando con el tiempo, y se han vuelto más exigentes; evolucionando y requiriendo mayor calidad de los materiales, así como variantes que puedan aportar resistencia y durabilidad a los mismos.

Así pues, se han desarrollado materiales que le aportan resistencia a los materiales ya conocidos, mejorando así sus propiedades físicas y estabilizando su comportamiento, proporcionándoles mayor durabilidad y estabilidad.

De lo anterior, se desprende la necesidad de evaluar las diferentes propiedades de los pavimentos. Propiedades que le brinden al ingeniero en diseño de pavimentos una mejor visión para poder seleccionar los materiales que cumplan los requerimientos de acuerdo a la zona de estudio.

Es así, que en la actualidad, se han llevado a cabo diversos estudios, con la finalidad de obtener dichas propiedades; estudios que incorporan el comportamiento apegándose lo mejor posible a las solicitaciones a que estará sujeto el material en campo. Estas metodologías de estudio se basan en el comportamiento resiliente de los materiales, es decir, al comportamiento bajo carga cíclica y dinámica.

El Módulo Resiliente es un parámetro que se suele utilizar para comprobar el estado de un material empleado en una capa de pavimento. Nos da una idea de la calidad de la capa y de la durabilidad, ya que se obtiene al aplicar cargas cíclicas a las probetas, lo cual origina un estado tensional similar al que tendrá el pavimento en servicio. Es un parámetro importante en los estudios de deformación permanente y fatiga, y nos da una idea de la vida útil del pavimento.

Los valores de Módulo Resiliente pueden emplearse para evaluar la calidad relativa de los materiales y generar datos de entrada para el diseño, la evaluación y

el análisis de los pavimentos. El método de laboratorio que usaremos para determinar los valores del Módulo Resiliente se basa en la aplicación del ensayo de tracción indirecta con carga repetida.

La obtención del Módulo Resiliente, se hace mediante un Ensayo no destructivo. No obstante se somete a las probetas a unas tensiones cíclicas que producen deformaciones en éstas.

Para la obtención del Módulo Resiliente es necesario contar con equipos capaces de producir cargas cíclicas en las probetas; capaces de controlar el estado de esfuerzos en la probeta, además de controlar el tiempo, magnitud, y aplicación de las cargas cíclicas. Estos equipos no son muy usuales, por su elevado costo, por lo que la obtención del Módulo Resiliente, se convierte en un parámetro difícil de obtener, no obstante la gran importancia que puede llegar a tener la medición de éste, en la caracterización de las Mezclas Asfálticas.

Además se debe hacer el análisis de los resultados de lo que se está generando con dichas pruebas. Es decir, se vuelve de vital importancia el saber interpretar los resultados, y tener la certeza de que éstos nos están dando datos que sean importantes en el comportamiento de la mezcla.

En el presente trabajo, trataremos de analizar estas propiedades bajo cargas cíclicas en Mezclas Asfálticas, para hacer una clasificación de las propiedades resilientes de las mezclas utilizadas en la Región del estado de Michoacán. En este caso, variaremos el tipo de asfalto (asfalto modificado) utilizado para evaluar el comportamiento del Módulo Resiliente de acuerdo al tipo de ligante empleado, y los contenidos de este.

Para poder realizar la Prueba de Módulo Resiliente, es necesario caracterizar los materiales a utilizar, (agregado pétreo y asfaltos empleados) haciendo las pruebas necesarias para tener la certeza de que cumplan con lo establecido en las Normas SCT. Además será necesario hacer el diseño de la Mezcla, lo cual lo haremos mediante el Método Marshall de diseño de Mezclas. Todo lo anterior para hacer la fabricación de las probetas.

Una vez elaboradas las probetas obtendremos las propiedades geométricas, así como sus densidades, relación de vacíos, etc. para hacer un estudio profundo de estos parámetros con respecto al Módulo Resiliente, es decir, poder hacer una evaluación y determinar las características más importantes que hacen variar al Módulo Resiliente.

2. OBJETIVOS

El objetivo del presente trabajo, es hacer una medición del Módulo Resiliente en Mezclas con asfaltos modificados, para caracterizar el comportamiento de los materiales que se utilizan en el Estado de Michoacán, para hacer diseños más apropiados, tomando en cuenta la naturaleza del comportamiento cíclico de los materiales.

Se elaborarán probetas con Asfaltos Modificados grado PG-76 y PG-82, variando los contenidos de asfalto, con el fin de evaluar sus Módulos. Los ensayos se realizarán en una prensa dinámica NAT.

Se eligió un Banco de Materiales de la región de Morelia, para tener una idea de los Módulos Resilientes obtenidos con estos materiales.

Con lo anterior se pretende contemplar una gama de variantes de Módulo Resiliente, a fin de hacer diseños más apropiados y con mejores resultados, para optimizar al máximo el tipo de material empleado en una zona específica y hacer diseños que se apeguen a las características de tránsito, de clima, etc.

Se analizarán los resultados obtenidos para determinar la influencia del tipo y contenido de asfalto empleado en cada probeta en el Módulo Resiliente. Así como el porcentaje de vacíos, y cómo influyen en el Módulo Resiliente.

3.- MEZCLAS ASFÁLTICAS

Una Mezcla Asfáltica es el producto obtenido de la incorporación y distribución uniforme de un material asfáltico en uno pétreo. Una mezcla asfáltica o carpeta asfáltica es la capa superior de un pavimento flexible que proporciona la superficie de rodamiento para los vehículos.

Las mezclas asfálticas, también reciben el nombre de aglomerados, están formadas por una combinación de agregados pétreos y un ligante hidrocarbonado, de manera que aquellos quedan cubiertos por una película continua de éste. Se fabrican en unas centrales fijas o móviles, se transportan después a la obra y allí se extienden y se compactan. (Kraemer et al, 2004).

Las mezclas asfálticas se utilizan en la construcción de carreteras, aeropuertos, pavimentos industriales, entre otros. Sin olvidar que se utilizan en las capas inferiores de los pavimentos para tráficos pesados intensos.

Las mezclas asfálticas están constituidas aproximadamente por un 90 % de agregados pétreos grueso y fino, un 5% de polvo mineral (filler) y otro 5% de ligante asfáltico. Los componentes mencionados anteriormente son de gran importancia para el correcto funcionamiento del pavimento y la falta de calidad en alguno de ellos afecta el conjunto. El ligante asfáltico y el polvo mineral son los dos elementos que más influyen tanto en la calidad de la mezcla asfáltica como en su costo total.

Las mezclas asfálticas se emplean en la construcción de pavimentos, ya sea en capas de rodadura o en capas inferiores y su función es proporcionar una superficie de rodamiento cómoda, segura y económica a los usuarios de las vías de comunicación, facilitando la circulación de los vehículos, aparte de transmitir adecuadamente las cargas debidas al tráfico a la sub-rasante para que sean soportadas por ésta.

Las mezclas asfálticas como ya hemos visto anteriormente sirven para soportar directamente las acciones de los neumáticos y transmitir las cargas a las capas inferiores, proporcionando unas condiciones adecuadas de rodadura, cuando se emplean en capas superficiales; y como material con resistencia simplemente estructural o mecánica en las demás capas de los pavimentos.

Como material simplemente estructural se pueden caracterizar de varias formas. La evaluación de parte de sus propiedades por la cohesión y el rozamiento interno es comúnmente utilizada; o por un módulo de rigidez longitudinal y un módulo transversal, o incluso por un valor de estabilidad y de deformación. Como

en otros materiales hay que considerar también, la resistencia a la rotura, las leyes de fatiga y las deformaciones plásticas.

El comportamiento de la mezcla depende de circunstancias externas a ellas mismas, tales como son el tiempo de aplicación de la carga y de la temperatura. Por esta causa su caracterización y propiedades tienen que estar vinculadas a estos factores, temperatura y duración de la carga, lo que implica la necesidad del conocimiento de la reología del material.

Las cualidades funcionales del pavimento residen fundamentalmente en su superficie. De su acabado y de los materiales que se hayan empleado en su construcción dependen aspectos tan interesantes y preocupantes para los usuarios como:

1. La adherencia del neumático al pavimento.
2. Las proyecciones de agua en tiempo de lluvia.
3. El desgaste de los neumáticos.
4. El ruido en el exterior y en el interior del vehículo.
5. La comodidad y estabilidad en marcha.
6. Las cargas dinámicas del tráfico.
7. La resistencia a la rodadura (consumo de combustible).
8. El envejecimiento de los vehículos.
9. Las propiedades ópticas.

Estos aspectos funcionales del pavimento están principalmente asociados con la textura y la regularidad superficial del pavimento.

Actualmente la reología de las mezclas está bien estudiada tanto desde el punto de vista experimental como del teórico, con una consecuencia práctica inmediata: la mejor adaptación de las fórmulas de trabajo y de los materiales a las condiciones reales de cada pavimento. Por ejemplo, son fácilmente asequibles estos ajustes, según la región climática o las condiciones de velocidad de los vehículos, en los métodos de diseño de pavimentos.

Como resumen, se puede decir que en una mezcla asfáltica, en general, hay que optimizar las propiedades siguientes:

- **Estabilidad:** Es la carga máxima que puede soportar la mezcla antes de perder sus propiedades mecánicas y sufrir deformaciones permanentes.
- **Durabilidad:** Es la capacidad que tiene la mezcla de soportar el intemperismo.
- **Resistencia a la fatiga:** Es la capacidad que tiene la mezcla para poder soportar las cargas sin sufrir deformaciones permanentes.

Si la mezcla se usa como capa de rodadura hay que añadir las propiedades siguientes:

- Resistencia al deslizamiento.
- Regularidad.
- Permeabilidad adecuada.
- Sonoridad.
- Color, entre otras.

En las capas de rodadura el uso de agregados de alta calidad y de aditivos se justifica por las solicitaciones a que están sometidas. Actualmente la modificación de ligantes se ha generalizado para carreteras importantes persiguiéndose la optimización de la respuesta mecánica y de la durabilidad de la mezcla. Por la misma razón, la calidad de los agregados es absolutamente imprescindible, aunque todo ello suponga un costo mayor para el pavimento.

3.1. COMPONENTES DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA

Como ya se describió, una mezcla está compuesta por un material pétreo, y un componente asfáltico, los cuales describiremos a continuación:

3.1.1. Características de los Materiales Pétreos

Los materiales pétreos para construir mezclas asfálticas son de suelos inertes, provenientes de playones de ríos o arroyos de depósitos naturales denominados minas o rocas, los cuales, por lo general requieren cribados y triturados para mejorar ciertas características de comportamiento. (Olivera, 2002). Figura 3.1.



Fig. 3.1. Agregados, lavados, triturados y separados por tamaños.

Los agregados de textura rugosa, equidimensionales, proporcionan más resistencia interna que los redondeados y de textura lisa, como se muestra en la Figura 3.2. 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 masa de material. Las partículas redondeadas, en lugar de trabarse, tienden a deslizarse una sobre otra. Cuando una masa de agregados es cargada puede generarse dentro de la masa, un plano por el que las partículas sean deslizadas o cizalladas unas respecto a las otras, lo cual resulta en una deformación permanente de la masa. (Olivera, 2002).



Agregado cúbico

Agregado redondeado

Figura 3.2. Tipos de agregados

Las características más importantes que dan satisfacción a los materiales pétreos para mezclas asfálticas son: la granulometría, dureza, forma de partícula y adherencia con el asfalto. La granulometría es de mucha importancia y debe satisfacer las normas correspondientes, pues como los materiales pétreos se cubren por completo con el asfalto, si la granulometría cambia, también cambia la superficie a cubrir. Ya que la superficie a revestir resulta mas afectada al aumentar o disminuir los finos que cuando hay un cambio en las partículas gruesas. (Olivera, 2002).

3.1.2. Características del Asfalto

El asfalto es un material de los llamados termoplásticos, el cual es muy complejo desde el punto de vista químico ya que es obtenido como el residuo en el proceso de refinación del petróleo crudo. Esto hace que el control de calidad de este material sea pobre, además de que sea una mezcla muy compleja de estructuras químicas complicadas. Sin embargo, este es un material de suma importancia para la industria de la construcción por sus propiedades de consistencia, adhesividad, impermeabilidad y durabilidad, y sobre todo por el bajo costo ya que, como se mencionó, es el residuo en el proceso de refinación del petróleo.

El asfalto tiene varios nombres como: asfalto o bitumen, nafta-betunes, betún, cemento asfáltico, chapopote. Este producto fue conocido alrededor del año 2500 a. C. en Egipto, aunque en esa época no se usaba en la construcción de caminos.

El asfalto es un material bituminoso de color negro, constituido principalmente por asfaltenos, resinas y aceites, elementos que proporcionan características de consistencia, aglutinación y ductilidad; es sólido o semisólido y tiene propiedades a temperaturas ambientales normales. Al calentarse se ablanda gradualmente hasta alcanzar una consistencia líquida.

El asfalto tiene una gran variedad de aplicaciones entre las que podemos mencionar: carpetas asfálticas, adhesivos, sellantes, impermeabilizantes, mastiques, etc. Los volúmenes de uso del asfalto son muy grandes, sobre todo en lo referente a la fabricación de carpetas asfálticas en donde es, sin duda, el material más importante. El amplio uso del asfalto en la construcción de carreteras es debido, en gran medida, a su bajo costo y a sus propiedades de hidrofobicidad y una relativa resistencia al intemperismo. (Rodríguez et al, 2001)

El contenido óptimo de asfalto para una carpeta, es la cantidad de asfalto que forma una membrana alrededor de las partículas, del espesor suficiente para resistir los elementos del intemperismo y que así el asfalto no se oxide con rapidez, pero que no sea tan gruesa como para que la mezcla pierda estabilidad o resistencia y no soporte las cargas de los vehículos. (Olivera, 2002).

El asfalto también llamado cemento asfáltico, es el último residuo de la destilación del petróleo como se había mencionado anteriormente y a temperaturas normales es sólido y de color café oscuro. Para mezclarse con los materiales pétreos, normalmente se calienta por lo que es necesaria una planta; el cemento más utilizado en México es el AC-20 (Olivera, 2002).

Los materiales asfálticos se clasifican en cementos asfálticos, asfaltos rebajados y emulsiones asfálticas, dependiendo del vehículo que se emplee para su incorporación o aplicación, como se indica en la Tabla 3.1.

Material Asfáltico	Vehículo para su aplicación	Usos más comunes
Cemento asfáltico	Calor	Se utiliza en la elaboración en caliente de carpetas, morteros y estabilizaciones, así como elemento base para la fabricación de emulsiones asfálticas y asfaltos rebajados.
Emulsión asfáltica	Agua	Se utiliza en la elaboración en frío de carpetas, mortero, riegos y estabilizaciones
Asfalto rebajado	Solventes	Se utiliza en la elaboración en frío de carpetas y para la impregnación de subbases y bases hidráulicas.

Tabla 3.1. Clasificación de los materiales asfálticos.

Fuente: elaboración propia a partir de las Normas SCT NC-MT-4-05-001/05

3.1.2.1. Cementos Asfálticos

Los cementos asfálticos son obtenidos del proceso de destilación del petróleo para eliminar solventes volátiles y parte de sus aceites. Su viscosidad varía con la temperatura y entre sus componentes, las resinas le producen adherencia con los materiales pétreos, siendo excelentes ligantes, pues al calentarlos se licúan, lo que les permite cubrir totalmente las partículas de material pétreo.

Según su viscosidad dinámica a 60 °C, los cementos asfálticos se clasifican como se indica en la Tabla 3.2. en donde se señalan los usos más comunes de cada uno. Ver Figura 3.3.

Clasificación	Viscosidad a 60°C Pa*s (P ^[1])	Usos más comunes
AC-5	50 ± 10 (500 ± 100)	*En la elaboración de carpetas de mezcla en caliente dentro de las regiones indicadas como Zona 1 en la Figura 3.3. *En la elaboración de emulsiones asfálticas que se utilicen para riegos de impregnación, de liga y poreo con arena, así como en estabilizaciones.
AC-10	100 ± 20 (1000 ± 200)	*En la elaboración de carpetas de mezcla en caliente dentro de las regiones indicadas como Zona 2 en la Figura 3.3. *En la elaboración de emulsiones asfálticas que se utilicen en carpetas y morteros de mezcla en frío, así como en carpetas por el sistema de riegos, dentro de las regiones indicadas como Zona 1 en la Figura 3.3.
AC-20	200 ± 40 (2000 ± 400)	*En la elaboración de carpetas de mezcla en caliente dentro de las regiones indicadas como Zona 3 en la Figura 3.3. *En la elaboración de emulsiones asfálticas que se utilicen en carpetas y morteros de mezcla en frío, así como en carpetas por el sistema de riegos, dentro de las regiones indicadas como Zona 2 en la Figura 3.3.
AC-30	300 ± 60 (3000 ± 600)	*En la elaboración de carpetas de mezcla en caliente dentro de las regiones indicadas como Zona 3 en la Figura 3.3. *En la elaboración de emulsiones asfálticas que se utilicen en carpetas y morteros de mezcla en frío, así como en carpetas por el sistema de riegos, dentro de las regiones indicadas como Zona 3 y 4 en la Figura 3.3. *En la elaboración de asfaltos rebajados en general, para utilizarse en carpetas de mezcla en frío, así como riegos de impregnación.

[1] Poises

Tabla 3.2. Clasificación de los Cementos Asfálticos según su viscosidad dinámica a 60°C.

Fuente: Elaboración propia a partir de las Normas SCT, Norma N-CMT-4-05-001/5.



Figura 3.3. Regiones Geográficas para la utilización de asfaltos clasificados según su Viscosidad Dinámica a 60°C. Fuente: Norma N-CMT-4-05-001/5 de la SCT.

3.1.2.2. Asfaltos Rebajados

Con el fin de trabajar con el asfalto a temperaturas menores, es necesario fluidificarlo; para ello se producen los asfaltos rebajados y las emulsiones asfálticas.

Los Asfaltos Rebajados se fabrican diluyendo el asfalto en gasolina, tractolina (también conocida como petróleo diáfano), diesel o aceites ligeros.

En el primer caso se obtienen los rebajados de fraguado rápido, denominado FR; en el segundo caso, los rebajados de fraguado medio o FM; y, por último los de fraguado lento o FL. Todos éstos se pueden producir con diferentes proporciones de cemento asfáltico (de 50 a 80%) y los correspondientes solventes o “fluxes” (de 50 a 20%).

Los asfaltos rebajados, que regularmente se utilizan para la elaboración de carpetas de mezcla en frío, así como en impregnaciones de bases y sub-bases

hidráulicas; son los materiales asfálticos líquidos compuestos por cemento asfáltico y un solvente, clasificados según su velocidad de fraguado como se indica en la Tabla 3.3.

Clasificación	Velocidad de Fraguado	Tipo de solvente
FR-3	Rápida	Nafta, gasolina
FM-1	Media	Queroseno

Tabla 3.3. Clasificación de los Asfaltos Rebajados

Fuente: Elaboración propia a partir de las Normas SCT, Norma N-CMT-4-05-001/5.

Para realizar las mezclas con los agregados pétreos y los cementos o los asfaltos rebajados, es necesario que los primeros estén bien secos, pues de otra manera no hay adherencia con el asfalto. (Olivera, 2002).

3.1.2.3. Emulsiones Asfálticas

Las emulsiones asfálticas son los materiales asfálticos líquidos estables, constituidos por dos fases no miscibles: la fase continua de la emulsión está formada por agua y la fase discontinua por pequeños glóbulos de cemento asfáltico. Se denominan emulsiones asfálticas *aniónicas* cuando el agente emulsificante confiere polaridad electronegativa a los glóbulos y emulsiones asfálticas *catiónicas*, cuando les confiere polaridad electropositiva.

Para tener un producto asfáltico que se pueda aplicar o mezclar con pétreos húmedos, se fabrican las emulsiones asfálticas, en las que el cemento asfáltico se suspende en agua, por medio de un emulsificante y un estabilizador. De acuerdo con el emulsificante usado, se producen emulsiones aniónicas y catiónicas, estas últimas resisten mayores humedades en los pétreos (Figura 3.4.).

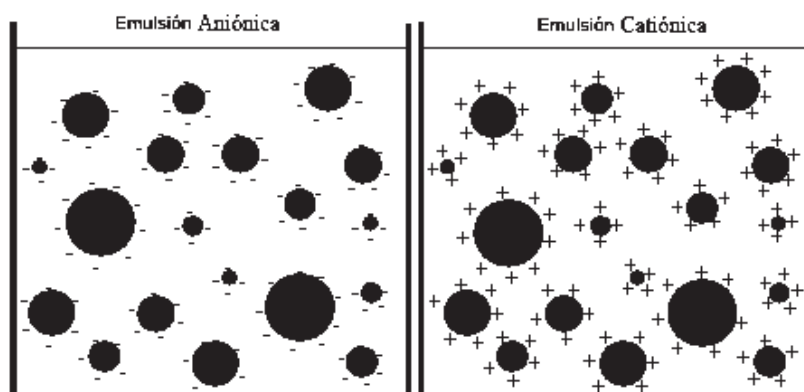


Fig. 3.4. Representación esquemática de las Emulsiones Aniónica y Catiónica.

Fuente: Emulsiones Asfálticas IMT, Documento Técnico No. 23

Las emulsiones asfálticas pueden ser de los siguientes tipos:

- De rompimiento rápido, que generalmente se utilizan para riegos de liga y carpetas por el sistema de riegos, a excepción de la emulsión ECR-60, que no se debe utilizar en la elaboración de estas últimas.
- De rompimiento medio, que normalmente se emplean para carpetas de mezcla en frío elaboradas en planta, especialmente cuando el contenido de finos en la mezcla es igual que 2% o menor, así como en trabajos de conservación tales como bacheos, renivelaciones y carpetas.
- De rompimiento lento, que comúnmente se utilizan para carpetas de mezcla en frío elaboradas en planta y para estabilizaciones asfálticas
- Para impregnación, que particularmente se utilizan para impregnaciones de sub-bases y/o bases hidráulicas.
- Superestables, que principalmente se emplean en estabilizaciones de materiales y en trabajos de recuperación de pavimentos.

Según su contenido de cemento asfáltico en masa, su tipo y polaridad, las emulsiones asfálticas se clasifican como se indica en la Tabla 3.4.

Clasificación	Contenido de cemento asfáltico en masa %	Tipo	Polaridad
EAR-55	55	Rompimiento rápido	Aniónica
EAR-60	60		
EAM-60	60	Rompimiento medio	
EAM-65	65		
EAL-55	55	Rompimiento lento	
EAL-60	60		
EAI-60	60	Para impregnación	Catiónica
ACR-60	60	Rompimiento rápido	
ECR-65	65		
ECR-70	70		
ECM-65	65	Rompimiento medio	
ECL-65	65	Rompimiento lento	
ECI-60	60	Para impregnación	
ECS-60	60	Sobrestabilizada	

Tabla 3.4. Clasificación de las emulsiones asfálticas

Fuente: Elaboración propia a partir de la Norma N-CMT-4-05-001/5 de la SCT.

3.1.2.4. Clasificación de Cementos Asfálticos Grado PG

Son aquellos cuyo comportamiento en los pavimentos está definido por las temperaturas máxima y mínima que se esperan en el lugar de su aplicación, dentro de las cuales se asegura un desempeño (performance) adecuado para resistir deformaciones o agrietamientos por temperaturas bajas o por fatiga en condiciones de trabajo que se han correlacionado con ensayos especiales y simulaciones de envejecimiento a corto y a largo plazo. Estos ensayos miden propiedades físicas que pueden ser directamente relacionadas, mediante principios de ingeniería, con el comportamiento en obra, y forman parte de los productos del Programa de Investigación de Carreteras desarrollado por la Unión Americana, conocida por la tecnología SHRP (Strategic Highway Research Program).

El grado de desempeño, o Grado PG, es el rango de temperaturas, máxima a mínima, entre las que un cemento asfáltico se desempeña satisfactoriamente. El Grado PG permite seleccionar el cemento asfáltico más adecuado para una determinada obra, en función del clima dominante y de la magnitud del tránsito a que estará sujeta durante su vida útil.

Un cemento asfáltico Grado PG 64-22 tendrá un desempeño satisfactorio cuando trabaje a temperaturas tan altas como 64 °C y tan bajas como -22 °C. Las temperaturas máximas y mínimas se extienden tanto como sea necesario con incrementos estandarizados de 6 °C. Sin embargo, generalmente las temperaturas máximas se consideran de 64 a 88 °C, y las mínimas de -40 a -22 °C.

Los Grados PG pueden ser tantos y tan amplios como la gama de temperaturas que se registran en el País, sin embargo, para fines prácticos, es recomendable seleccionar un cemento asfáltico que corresponda a uno de los 3 Grados PG que se indican en la Figura 3.5 indicada en la Norma SCT N-CMT-4-05-004-05-1 (Materiales Asfálticos Grado PG), de acuerdo con el clima de la zona geográfica donde se le pueda utilizar, de entre las zonas en que se ha dividido la República Mexicana que se muestran en la misma Figura, sin embargo, existe otra clasificación un poco más amplia suministrada por la SHRP, Figura 3.6. considerando que dentro de una misma zona, las condiciones de clima en un área determinada pueden variar, siendo esto determinante para elegir el Grado PG adecuado.

La temperatura máxima del Grado PG seleccionado según el clima, se ajusta de acuerdo con la intensidad del tránsito esperada en términos del número de ejes equivalentes de 8.2 Ton, acumulados durante un periodo de servicio del pavimento de 10 años (ΣL_{10}) y de acuerdo con la velocidad de operación, como se indica en la Tabla 3.5.

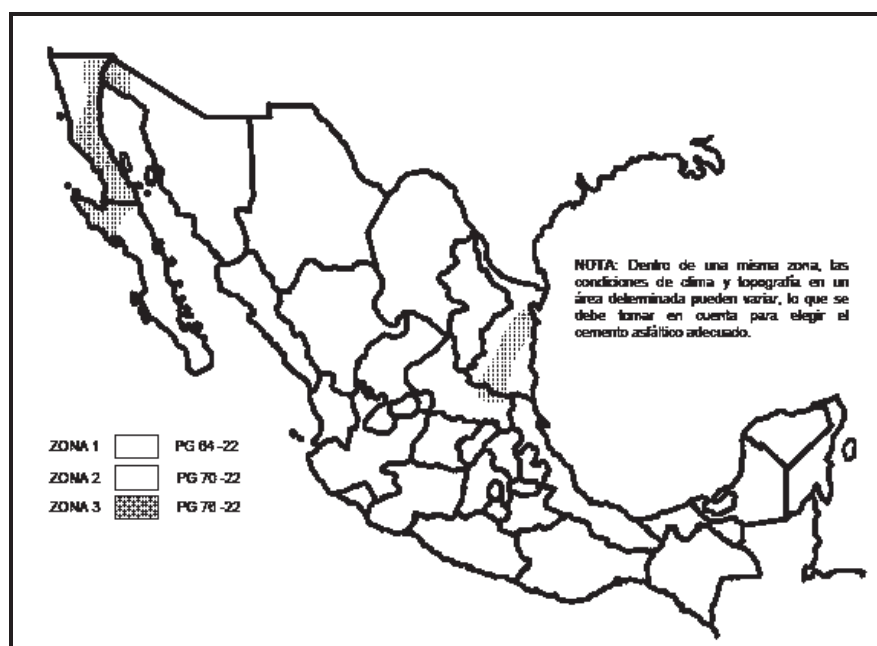


Figura 3.5. Regiones geográficas para la utilización recomendable de cementos asfálticos Grado PG. Fuente: Norma SCT N-CMT-4-05-004-05-1

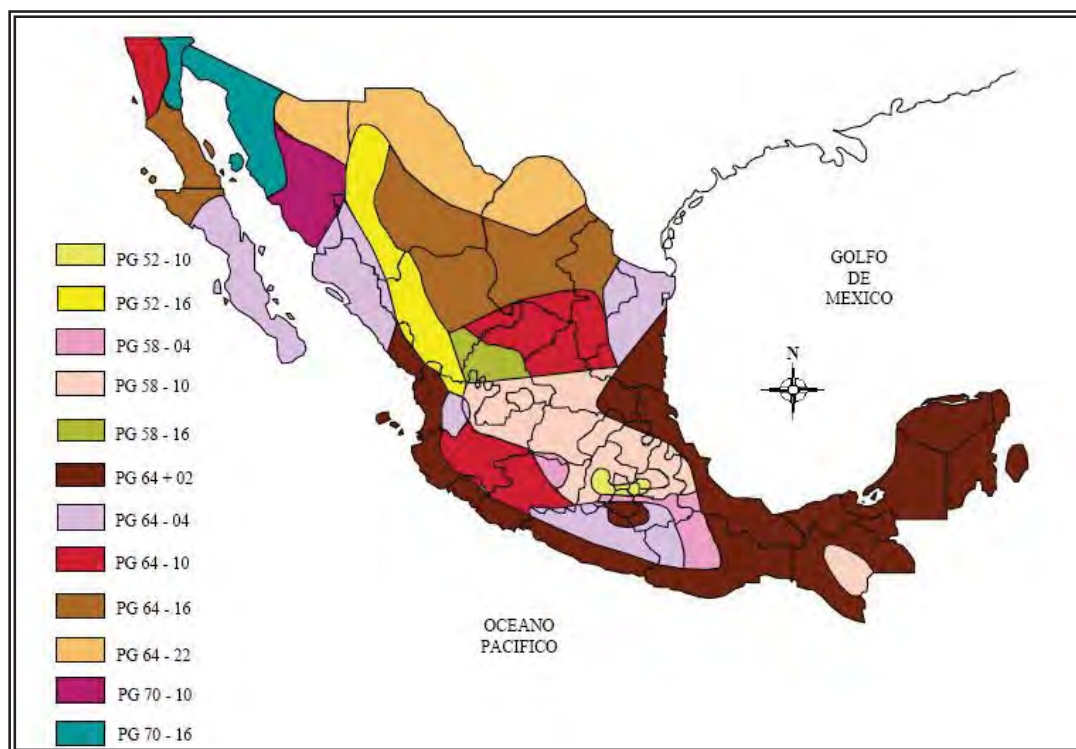


Fig 3.6. Clasificación SHRP de Cementos Asfálticos 98% de Seguridad
Fuente: SHRP proporcionada por laboratorio SURFAX

Tabla 3.5: Ajustes del Grado PG seleccionado por clima de acuerdo con la intensidad del tránsito esperada y con la velocidad de operación.

Fuente: Elaboración Propia a partir de la Norma SCT N-CMT-4-05-004-05-1

Intensidad del tránsito (ΣL_{10}) ^[1]	Grado PG seleccionado por clima	Ajuste por intensidad del tránsito	Ajuste por velocidad lenta (Entre 10 y 30 km/h)	Ajuste por tránsito detenido (Cruceros)
$\Sigma L_{10} < 10^6$	PG 64	PG 64	PG 70	PG 76
	PG 70	PG 70	PG 76	PG 82
	PG 76	PG 76	PG 82	PG 88
$10^6 \leq \Sigma L_{10} \leq 10^7$	PG 64	PG 70	PG 76	PG 82
	PG 70	PG 76	PG 82	PG 88
	PG 76	PG 82	PG 88	PG 88
$\Sigma L_{10} > 10^7$	PG 64	PG 76	PG 82	PG 88
	PG 70	PG 82	PG 88	PG 88
	PG 76	PG 88	PG 88	PG 88

[1] ΣL_{10} = Número de ejes equivalentes de 8,2 t (ESAL), esperado durante un periodo de servicio del pavimento de 10 años

3.2. MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE

Son las elaboradas en caliente, utilizando cemento asfáltico y materiales pétreos, en una planta estacionaria o móvil, provista del equipo necesario para calentar los componentes de la mezcla.

Las mezclas asfálticas en caliente se clasifican a su vez en de Granulometría Densa y de Granulometría Abierta.

3.2.1. Mezcla Asfáltica de Granulometría Densa

Es la mezcla en caliente, uniforme y homogénea, elaborada con cemento asfáltico y materiales pétreos bien graduados, con tamaño nominal entre (37.5 mm, 1 1/2") y (9.5 mm, 3/8"), que satisfagan los requisitos de calidad establecidos en la normas SCT para materiales pétreos para mezclas asfálticas. Normalmente se utiliza en la construcción de carpetas asfálticas de pavimentos nuevos en los que se requiere una alta resistencia estructural, o en renivelaciones y refuerzo de pavimentos existentes.

3.2.2. Mezcla Asfáltica de Granulometría Abierta

Es la mezcla en caliente, uniforme, homogénea y con un alto porcentaje de vacíos, elaborada con cemento asfáltico y materiales pétreos de granulometría uniforme, con tamaño nominal entre (12.5 mm. 1/2") y (6.3 mm. 1/4"), que satisfagan los requisitos de calidad establecidos en la norma SCT para materiales pétreos para mezclas asfálticas. Estas mezclas normalmente se utilizan para formar capas de rodadura, no tienen función estructural y generalmente se construyen sobre una carpeta de granulometría densa, con la finalidad principal de satisfacer los requerimientos de calidad de rodamiento del tránsito, al permitir que el agua de lluvia sea desplazada por las llantas de los vehículos, ocupando los vacíos de la carpeta, con lo que se incrementa la fricción de las llantas con la superficie de rodadura, se minimiza el acuaplaneo, se reduce la cantidad de agua que se impulsa sobre los vehículos adyacentes y se mejora la visibilidad del señalamiento horizontal. Las mezclas asfálticas de granulometría abierta no deben colocarse en zonas susceptibles al congelamiento o donde la precipitación sea menor de 600 mm. por año.

3.3. MEZCLAS ASFÁLTICAS EN FRÍO

Son las elaboradas en frío, en una planta mezcladora móvil, utilizando emulsiones asfálticas o rebajados asfálticos y materiales pétreos.

Las mezclas asfálticas en frío se clasifican a su vez en de Granulometría Densa y Morteros Asfálticos.

3.3.1. Mezclas Asfálticas de Granulometría Densa

Es la mezcla en frío, uniforme y homogénea elaborada con emulsión asfáltica o asfalto rebajado y materiales pétreos, con tamaño nominal entre (37.5 mm. 1 1/2") y (9.5 mm. 3/8"), que satisfagan los requisitos de calidad establecidos en la norma SCT para materiales pétreos para mezclas asfálticas. Normalmente se utiliza en los casos en que la intensidad del tránsito (ΣL) es igual a un millón de ejes equivalentes o menor, en donde no se requiera de una alta resistencia estructural, para la construcción de carpetas asfálticas de pavimentos nuevos y en carpetas para el refuerzo de pavimentos existentes, así como para la reparación de baches.

3.3.2. Mortero Asfáltico

Es la mezcla en frío, uniforme y homogénea, elaborada con emulsión asfáltica o asfalto rebajado, agua y arena con tamaño máximo de (2.36 mm. No. 8), que satisfagan los requisitos de calidad establecidos en la norma SCT para materiales pétreos para mezclas asfálticas. Normalmente se coloca sobre una base impregnada o una carpeta asfáltica, como capa de rodadura.

3.4. MEZCLAS ASFÁLTICAS POR EL SISTEMA DE RIEGOS

Son las que se construyen mediante la aplicación de uno, o dos riegos de un material asfáltico, intercalados con una, dos o tres capas sucesivas de material pétreo triturado de tamaños decrecientes que, según su denominación, satisfagan los requisitos de la norma SCT para materiales pétreos para mezclas asfálticas. Las carpetas por el sistema de riegos se clasifican en carpetas de 1 de 2 y de 3 riegos. Las carpetas de un riego o la última capa de las carpetas de 2 ó 3 riegos, pueden ser premezcladas o no. Normalmente se colocan sobre una base impregnada o una carpeta asfáltica, nueva o existente, como capa de rodadura con el objeto de proporcionar resistencia al derrapamiento y al pulimento.

4. ASFALTOS MODIFICADOS

4.1. INTRODUCCIÓN

Los asfaltos convencionales tienen limitaciones en su respuesta ante cargas y sollicitaciones climáticas extremas, y su utilización en algunas situaciones puede presentar problemas importantes.

Además, la agresividad y cantidad del tráfico de vehículos sobre las carreteras se ha incrementado notablemente en el tiempo, sin mostrar signos de que este crecimiento disminuirá en el futuro. En consecuencia, se hace necesario un esfuerzo continuo de búsqueda y desarrollo de materiales más resistentes, que mejoren las características de las carreteras, alarguen su período de servicio y disminuyan los costos de conservación.

Actualmente, los asfaltos modificados han mostrado plenamente su capacidad para mejorar el comportamiento de los ligantes convencionales

La modificación del asfalto a través de aditivos es una técnica utilizada para el aprovechamiento efectivo de asfaltos en la pavimentación de vías. Esta técnica consiste en algunas ocasiones, en la adición de polímeros a los asfaltos convencionales con el fin de mejorar sus características mecánicas, es decir, su resistencia a las deformaciones por factores climatológicos y del tránsito (peso vehicular).

- En 1873 se registró la primera patente de asfalto modificado con caucho.
- 1902: En Francia se extiende por primera vez asfalto modificado con caucho.
- Durante los 50 y los 60 se analizan en el Reino Unido diversos tipos de modificadores.

Aunque en una mezcla asfáltica, el asfalto sea minoritario en proporción, sus propiedades pueden influir de manera significativa en su comportamiento. El tipo de mezcla será el que, en gran medida, determine la contribución hecha por el asfalto sobre todo el conjunto. Generalmente, las propiedades de las mezclas con granulometría continua dependen del enclavamiento o trabazón del agregado pétreo, mientras que las preparadas con altos contenidos de mortero asfáltico dependen más de la rigidez de la proporción de asfalto, polvo mineral y arena.

A altas temperaturas de servicio, puede que el asfalto llegue a reblandecerse, facilitando la deformación de la mezcla (ahuellamiento, Fig. 4.1). El riesgo de aparición de estas deformaciones es aún mayor en pavimentos sometidos a la circulación de vehículos pesados. De manera generalizada y sin tener en cuenta otros factores que pueden influir, se puede disminuir la probabilidad de aparición de estas deformaciones aumentando la rigidez del ligante mediante el empleo de un asfalto más duro.

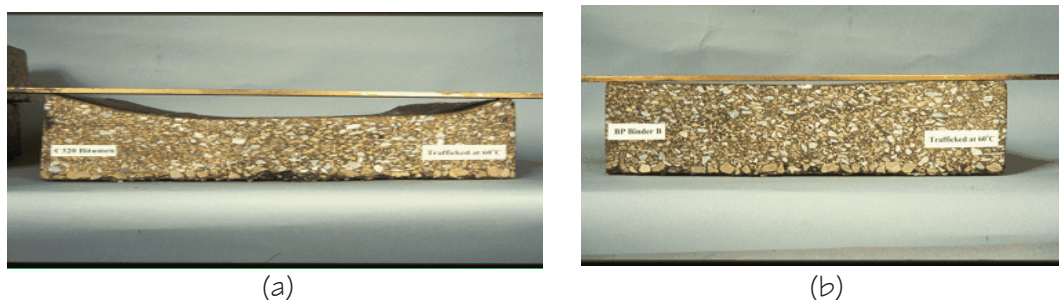


Fig. 4.1. Diferencia del comportamiento de mezclas con asfalto convencional (a), y asfalto modificado (b). Fuente: <http://www.monografias.com>

Por otro lado a temperaturas de servicios bajas, el ligante se vuelve relativamente rígido y va perdiendo poder de resistencia a las tensiones, volviéndose frágil y siendo susceptible de fisuraciones. El grado de susceptibilidad a la fisuración está relacionado con la dureza del asfalto y su capacidad para absorber las solicitaciones inducidas por el tráfico. Disminuyendo la dureza del asfalto, se minimizará el riesgo de fallo por fragilidad.

Entonces, debido a lo dicho anteriormente, a la hora de buscar comportamientos globales satisfactorios de las mezclas bituminosas, la elección del asfalto adecuado para cada tipo de mezclas se vuelve un compromiso entre ambos extremos; ahuellamiento a altas temperaturas y fisuramiento por fragilidad térmica a bajas temperaturas. Donde mejorando el comportamiento a altas temperaturas, se influye negativamente en el comportamiento a bajas temperaturas

Los objetivos que se persiguen con la modificación de los asfaltos, es contar con ligantes más viscosos a temperaturas elevadas para reducir las deformaciones permanentes (ahuellamiento), de las mezclas que componen las capas de rodamiento, aumentando la rigidez. Por otro lado disminuir el fisuramiento por efecto térmico a bajas temperaturas y por fatiga, aumentando su elasticidad. Finalmente contar con un ligante de mejores características adhesivas.

Los materiales 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 interfase entre el material pétreo y el material asfáltico, conservándola aún en presencia del agua. También aumentan la resistencia de las mezclas asfálticas a la deformación y a los esfuerzos de tensión repetidos y por lo tanto a la fatiga y reduce 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. Los principales modificadores utilizados en los materiales asfálticos según las Normas de clasificación de la SCT son:

4.2. TIPOS DE POLIMEROS

A) POLÍMERO TIPO I

Es un modificador de asfaltos que mejora el comportamiento de mezclas asfálticas tanto a altas como a bajas temperaturas. Es fabricado con base en bloques de estireno, de polímeros elastoméricos radiales de tipo bibloque o tribloque, mediante configuraciones como Estireno-Butadieno-Estireno (SBS) o Estireno-Butadieno (SB), entre otras. Se utiliza en mezclas asfálticas para carpetas delgadas y carpetas estructurales de pavimentos con elevados índices de tránsito y de vehículos pesados, en climas fríos y cálidos, así como para elaborar emulsiones que se utilicen en tratamientos superficiales.

B) POLIMERO TIPO II

Es un modificador de asfaltos que mejora el comportamiento de mezclas asfálticas a bajas temperaturas. Es fabricado con base en polímeros elastoméricos lineales, mediante una configuración de caucho de estireno, butadieno-látex, o neopreno-látex. Se utiliza en todo tipo de mezclas asfálticas para pavimentos en los que se requiera mejorar su comportamiento de servicio, en climas fríos y templados, así como para elaborar emulsiones que se utilicen en tratamientos superficiales.

C) POLÍMERO TIPO III

Es un modificador de asfalto que mejora la resistencia al ahuellamiento de las mezclas asfálticas, disminuye la susceptibilidad del cemento asfáltico a la temperatura y mejora su comportamiento a altas temperaturas. Es fabricado con base en un polímero de tipo elastómero, mediante configuraciones como Etil-Vinil-Acetato (EVA) o Polietileno de alta o baja densidad (HDPE, LDPE), entre otras. Se utiliza en climas calientes, en mezclas asfálticas para carpetas estructurales pavimentos con elevados índices de tránsito, así como para elaborar emulsiones que se utilicen en tratamientos superficiales.

D) HULE MOLIDO DE NEUMÁTICOS

Es un modificador de asfaltos que mejoran la flexibilidad y resistencia a la tensión de las mezclas asfálticas, reduciendo la aparición de grietas por fatiga o por cambios de temperatura. Es fabricado con base en el producto de la molienda de neumáticos. Se utiliza en carpetas delgadas de granulometría abierta, y tratamientos superficiales.

El efecto principal de añadir polímeros a los asfaltos es el cambio en la relación viscosidad-temperatura (sobre todo en el rango de temperaturas de servicio de las mezclas asfálticas) permitiendo mejorar de esta manera el comportamiento del asfalto tanto a bajas como a altas temperaturas. (Fig. 4.2.)

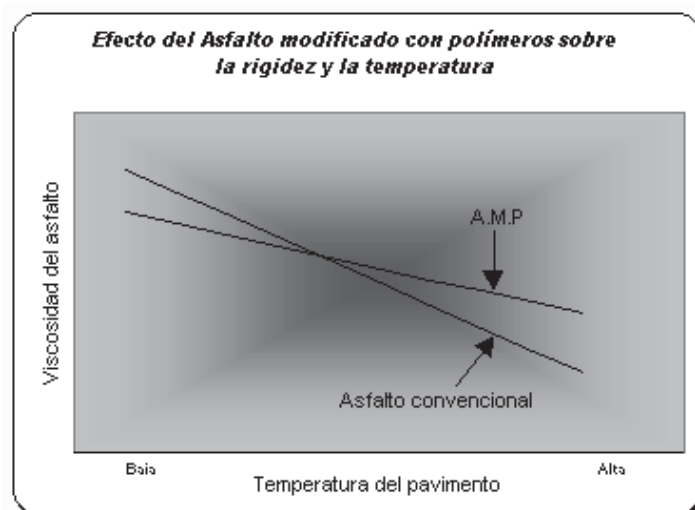


Fig. 4.2. Gráfica de comportamiento de la viscosidad del asfalto (modificado vs. Convencional) con respecto a la temperatura. Fuente: <http://www.monografias.com>

Otras propiedades que el asfalto modificado mejora respecto del asfalto convencional son:

- Mayor intervalo de plasticidad (diferencia entre el punto de reblandecimiento y el Fraass).
- Mayor cohesión.
- Mejora de la respuesta elástica.
- Mayor resistencia a la acción del agua.
- Mayor resistencia al envejecimiento.

Las propiedades que estos imparten dependen de los siguientes factores:

- Tipo y composición del polímero incorporado.
- Característica y estructura coloidal del asfalto base.
- Proporción relativa de asfalto y polímero.

Para que los asfaltos con polímeros consigan las prestaciones óptimas, hay que seleccionar cuidadosamente el asfalto base (es necesario que los polímeros sean compatibles con el material asfáltico), el tipo de polímero, la dosificación, la elaboración y las condiciones de almacenaje. Cada polímero tiene un tamaño de partícula de dispersión óptima para mejorar las propiedades reológicas, donde por encima de ésta, el polímero solo actúa como un filler; y por debajo de ésta, pasan a estar muy solubilizados y aumentan la viscosidad, sin mejorar la elasticidad y la resistencia.

5. DISEÑO DE MEZCLAS

5.1. INTRODUCCIÓN

El diseño de mezclas asfálticas, así como el diseño de otros materiales de ingeniería, consiste principalmente en seleccionar y hacer proporciones de los componentes, para obtener las propiedades deseadas o especificadas en la construcción. El objetivo general para el diseño de mezclas asfálticas, es el determinar la granulometría de los agregados (dentro de los límites especificados), y el asfalto que resulte en una mezcla económica que tenga:

- Suficiente asfalto para asegurar durabilidad.
- Suficiente estabilidad para satisfacer las demandas de tráfico sin distorsión o desplazamientos.
- Suficientes vacíos en la mezcla compactada total, que permita una pequeña cantidad de compactación adicional bajo cargas de servicio sin sangrar o perder estabilidad, pero lo suficientemente bajo para mantener afuera los efectos dañinos de aire y agua.
- Suficiente manejabilidad para permitir la colocación de la mezcla sin segregación.

Frecuentemente, en el proceso de desarrollar un diseño de mezcla específico, es necesario hacer varias muestras de mezclas para encontrar la que mejor satisfaga el criterio del método de diseño usado.

Previo a utilizar un método de diseño para mezclas asfálticas es necesario que:

- Los materiales propuestos a usarse satisfagan los requisitos de las especificaciones del proyecto.
- Las combinaciones de agregados satisfagan la granulometría requerida en las especificaciones.
- Las gravedades específicas de masa de todos los agregados usados y la gravedad específica del asfalto sean determinados para poderse usar en los análisis de densidad y vacíos.

Estos requerimientos son materia de pruebas de rutina, especificaciones y técnicas de laboratorio que deben ser considerados, pero que no son técnicas para cualquier método de diseño en particular. Por lo que existen varios Métodos de Diseño de Mezclas, que describiremos a continuación.

5.2. MÉTODO MARSHALL

Los conceptos originales para el Diseño Marshall fueron desarrollados por Bruce Marshall del Departamento de Caminos del Estado de Mississippi, y rediseñado por El Cuerpo de Ingenieros de la Armada de los Estados Unidos en los años 40. Después se hicieron avances y el desarrollo de especificaciones de materiales por organizaciones como el Cuerpo de Ingenieros y el Instituto del Asfalto.

Como cualquier otro método de diseño de pavimentos, el punto de partida es obtener muestras de materiales representativos de aquellos que serán usados para el proyecto.

Este método usa unas muestras estándar de 2 1/2 pulgadas de alto y 4 pulgadas de diámetro. Estos se preparan usando un procedimiento específico para calentamiento, mezclado y compactado de las mezclas de agregado y asfalto. Las dos características principales del método de Marshall, son las de análisis de densidad y vacíos en la mezcla y los resultados de estabilidad y flujo de las muestras compactadas.

Procedimiento:

- Previamente a la preparación de las mezclas, se determina el peso específico relativo aparente por inmersión en agua del material pétreo seleccionado, así como, del cemento asfáltico.
- La preparación de las mezclas de prueba para fines de diseño, se lleva a cabo con la cantidad necesaria de material pétreo para que el espécimen tenga una altura aproximada de 63.5 mm; 1,000 grs. de material pétreo generalmente pueden resultar adecuados. Las proporciones de cemento asfáltico que se deben utilizar para elaborar estas mezclas se definen con base al contenido óptimo aproximado. En este caso, para el presente trabajo, se hicieron las mezclas iniciando con un contenido de 4.5% de asfalto.

- Las mezclas se preparan por triplicado para elaborar cada espécimen, con los siguientes contenidos de cemento asfáltico: 4.5, 5.0, 5.5, 6.0 y 6.5%.
- Al terminar la operación de mezclado se tendrá en la mezcla la temperatura de compactación, pudiendo, para lograrlo aplicar calor durante el mezclado, y además, en el caso de rebajados, se tendrá una relación solvente de cemento asfáltico (K) de 0.08 para rebajados de fraguado rápido y de 0.12 para rebajados de fraguado medio. Cuando se trate de mezclas elaboradas con emulsiones, se mezclarán lo suficiente para homogeneizarlas, verificando frecuentemente el peso de la mezcla, a fin de lograr que por decantación y evaporación sucesiva se elimine el 80%, aproximadamente, del agua y solventes que originalmente tenía la emulsión agregada. La humedad que conserve la mezcla será cercana a la óptima de compactación y se precisará elaborando la respectiva curva peso volumétrico de la muestra-humedad.
- Se limpia la placa de compactación del pisón y los moldes de compactación y junto con el collarín, la espátula y la placa de base respectivos, se calientan a 90° C utilizando para ello un recipiente con agua calentada a dicha temperatura.
- Se prepara una de las mezclas de prueba de uno de los contenidos de asfalto seleccionados y estando a la temperatura de compactación indicada, se saca del horno un molde con su collarín y base, y se arma sobre una mesa poniendo en el fondo una hoja de papel de filtro circular. Se vacía la mezcla asfáltica dentro del molde y se acomoda con la espátula, previamente calentada, introduciéndola 15 veces en la parte cercana al contacto con la mezcla con el molde; y 10 veces en la porción central de la misma, para acomodarla sin que se calcifique. Por último, se acomoda la parte superior del espécimen procurando dejar la superficie ligeramente ablandada, sobre la cual se coloca otra de las hojas de papel filtro circular.
- A continuación se coloca el molde con su base y collarín montados, conteniendo la mezcla de prueba sobre el pedestal de compactación y se ajusta el dispositivo de éste, que sostiene el molde; y se aplican 75 golpes, para nuestro caso (esta puede variar de 50 a 75 golpes por cara, de acuerdo al tránsito promedio anual esperado) por cara con el compactador Marshall.
- Se separa del molde que contiene el espécimen, la placa de base y su collarín y se deja enfriar dicho espécimen en el molde el tiempo necesario para que al ser sustraído no sufra deformaciones para lo cual se introduce en caso necesario, durante un hora, en un baño de aire acondicionado a

25°C, a continuación, utilizando el extractor de especímenes, se saca este cuidadosamente del molde y se coloca sobre una superficie horizontal y plana en donde permanecerá en reposo 24 hrs. aproximadamente a la temperatura ambiente, antes de ser probadas.

- Se determina con el calibrador la altura del espécimen, y se anota en mm en la columna de la hoja de registro.
- Transcurrido el proceso de enfriamiento, se determina el peso volumétrico de cada uno de los especímenes de prueba, utilizando el método de la parafina. Los datos obtenidos se anotan en la hoja de registro.
- A continuación, se sumergen todos los especímenes de prueba en el baño de agua, a una temperatura de $60\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ durante un lapso de 30 minutos, excepto en el caso de mezclas elaboradas con asfaltos rebajados o emulsiones, en que los especímenes antes de ser probados, se colocan en un ambiente con aire a una temperatura de $25^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ permaneciendo en estas condiciones durante 2 horas. La determinación de la estabilidad y flujo se iniciará pasados los 30 minutos de inmersión, para lo cual se van extrayendo sucesivamente los especímenes del baño, debiendo sacar y probar el último a los 30 minutos de haber sido introducido en el baño. Esto se garantiza metiendo los especímenes a diferentes intervalos, para garantizar que todos y cada uno de ellos permanezcan los 30 minutos dentro del baño.
- Se lubrican las guías de los cabezales de prueba, se limpian sus superficies interiores y se mantienen estos a una temperatura de $35^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$, en el caso de mezclas con rebajados o emulsiones. Se verifica que el extensómetro del anillo de carga instalado en la máquina de compresión marque cero cuando no se éste aplicando carga.
- Se saca el espécimen del baño, y se elimina la humedad superficial que presente, se coloca sobre el cabezal inferior y se centra en el mismo; se monta y coloca sobre el espécimen el cabezal superior y en esta forma se lleva el conjunto a la máquina de compresión, en donde se coloca y se centra. Se instala sobre la varilla guía el extensómetro para medir el flujo, se ajusta a cero la carátula y durante la aplicación de la carga se sujeta por el casquillo, oprimiéndolo por el cabezal.
- Se aplica la carga al espécimen a una velocidad de deformación constante de 50.8 mm por minuto, hasta que se presenta la carga máxima, o sea, la necesaria para producir la falla del espécimen a la temperatura de prueba. Dicha carga es el valor de **Estabilidad Marshall** y se anotará en KN en la columna de la hoja de registro. Como se mencionó anteriormente, mientras

la carga se está aplicando se sostiene firmemente el extensómetro medidor de flujo sobre la varilla guía y al presentarse la carga máxima, se toma la lectura correspondiente y se registra con aproximación de 0.1 mm. La deformación del espécimen en mm, es el valor del flujo, el cual se anota en la columna de la hoja de registro. Todo el procedimiento para realizar las pruebas de estabilidad y flujo del espécimen deberá completarse en un periodo de 30 segundos contados a partir del momento en que el espécimen se retire del baño.

- Se determina sucesivamente la estabilidad y el flujo de cada uno de los especímenes restantes del contenido de asfalto con que se inició la prueba; después de los cuales, aplicando este mismo procedimiento, se determinan los valores correspondientes a los especímenes de cada uno de los demás contenidos de asfalto considerados en este estudio.
- Se verifica en forma sucesiva en cada espécimen del estudio el porcentaje de asfalto que realmente contiene, de no requerirse mucha precisión, se restará 0.3% a cada uno de los contenidos de asfalto considerados al elaborar las mezclas, para corregir dichos contenidos por pérdidas durante el mezclado. Los contenidos de cemento asfáltico así corregidos se anotan en la hoja de registro.
- Se calculan todas las columnas de la hoja de registro, de donde se dibujarán las gráficas que se indican a continuación: Contenido de asfalto-Peso volumétrico, Contenido de asfalto-% de vacíos de la mezcla, contenido de asfalto-% de vacíos del material pétreo, Contenido de asfalto-Estabilidad, Contenido de asfalto-Flujo.
- De cada gráfica se define cual es el contenido de asfalto que mejor satisface los requisitos de proyecto para cada una de las características que se graficaron y se promedian dichos contenidos para así determinar el **contenido óptimo de asfalto**.

5.3. MÉTODO DE DISEÑO HVEEM

El método de Hveem para proyecto y comprobación de mezclas asfálticas comprende los tres ensayos principales siguientes:

- Ensayo del estabilómetro
- Ensayo del cohesiómetro
- Ensayo del equivalente centrífugo en queroseno (CKE)

Los ensayos del estabilómetro y del cohesiómetro son aplicables a mezclas que contengan cemento asfáltico o asfaltos líquidos y agregados cuyo tamaño no exceda de 1". Las probetas de 2 1/2" de altura y 4" de diámetro se compactan por procedimientos normalizados en un compactador por amasado.

PROCEDIMIENTO ESTABILÓMETRO

Se determina la densidad y huecos de la probeta compactada, que se calienta después a 60°C y se somete a ensayo en el estabilómetro de Hveem. Este ensayo es un tipo de ensayo triaxial en que se aplican cargas verticales y se miden las presiones laterales desarrolladas para determinados valores de la carga vertical. El ensayo se representa esquemáticamente en la Figura 5.1.

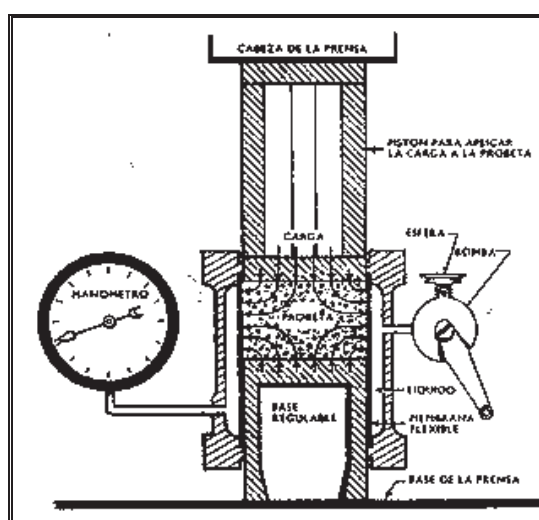


Figura 5.1. Esquema del ensayo del Estabilómetro de Hveem. Fuente: www.ingenieriacivil.blogstop.com

La probeta está encerrada en una membrana de goma rodeada por un líquido que transmite la presión lateral desarrollada durante el ensayo. Los valores obtenidos durante el ensayo son de carácter relativo. Se ha establecido la escala sobre la base de que, si la probeta fuera un líquido, la presión lateral sería igual a la presión vertical, en cuyo caso se considera que la estabilidad relativa es nula. En el otro extremo de la escala se considera un sólido incompresible, que no transmite presión lateral, y al que se atribuye una estabilidad relativa de 90. Los ensayos sobre las mezclas asfálticas para pavimentación dan valores comprendidos en el intervalo 0-90. La estabilidad relativa de la probeta se calcula por fórmula establecida.

$$R = \frac{100}{\frac{2.5}{D} * \left(\frac{P_v}{P_h} - 1 \right) + 1}$$

Donde:

P_v= Presión Vertical Aplicada

P_h= Presión horizontal en el manómetro

D= Desplazamiento horizontal de la muestra, registrado por el número de vueltas de la manivela para pasar de P_h a 7 kg/cm²

R= Se mide para P_v = 11.2 Kg/cm²

Usualmente, después de realizado el ensayo del estabilómetro, se somete la probeta al ensayo del cohesiómetro, que es un ensayo de flexión en el que la probeta se rompe por tracción.

6. EL MÓDULO RESILIENTE

6.1. INTRODUCCIÓN

Las metodologías actuales para el diseño de pavimentos son en la mayoría de los casos, de carácter empírico, es decir, no incorporan directamente en el diseño el conocimiento actual del comportamiento de los materiales bajo condiciones de prueba representativas.

Los materiales que constituyen los pavimentos, incluyendo las terracerías y el terreno de cimentación, se ven sometidos a cargas dinámicas de diversas magnitudes que le son transmitidas por el tránsito vehicular. Con el fin de tomar en cuenta la naturaleza cíclica de las cargas que actúan en los materiales que conforman la estructura del pavimento, así como el comportamiento no lineal y resiliente de los materiales, se han realizado en el mundo varios trabajos experimentales, tanto en modelos a escala natural como en muestras de material probadas en el laboratorio, obteniéndose valiosa información sobre el comportamiento esfuerzo-deformación de los materiales.

Las deformaciones resilientes o elásticas son de recuperación instantánea y suelen denominarse plásticas a las que permanecen en el pavimento después de cesar la causa deformadora. Bajo carga móvil la deformación permanente se va acumulando; debe hacerse notar el hecho de que en ciclos intermedios la deformación permanente para cada ciclo disminuye, hasta que prácticamente desaparece en los ciclos finales. La muestra llega así a un estado tal en que toda la deformación es recuperable, en ese momento se tienen un comportamiento resiliente.

En la Figura 6.1 se ilustra el mecanismo por el cual la deformación permanente se va acumulando; debe hacerse notar que en los ciclos intermedios la deformación permanente para cada ciclo disminuye, hasta que prácticamente desaparece en los ciclos finales.

Así entonces, el concepto de Módulo de Resiliencia está ligado invariablemente a un proceso de carga repetida.

Como se ha observado en los estudios llevados a cabo sobre Módulo de Resiliencia, este parámetro no es una propiedad constante de los materiales, sino que depende de muchos factores.

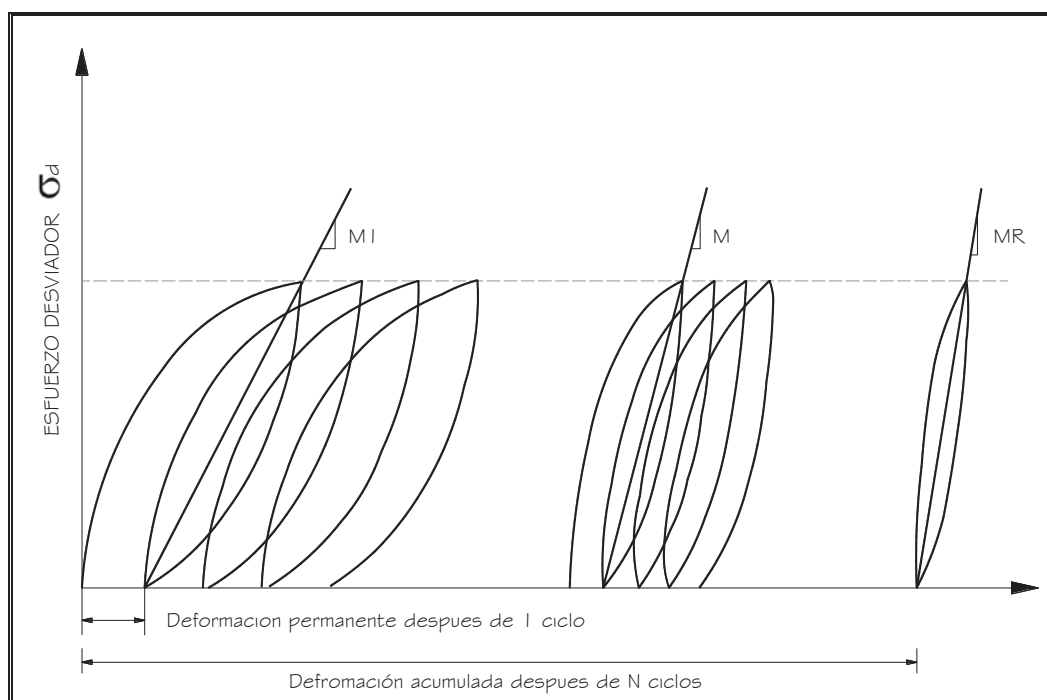


Fig. 6.1. Mecanismo de deformación permanente
Fuente: Elaboración propia; a partir de Moreno Rubio (2005)

Dependiendo del material en estudio, algunos de los factores más importantes son: parámetros de compactación (peso volumétrico); método de compactación, número de aplicaciones de carga, magnitud del esfuerzo, tipo y contenido de estabilizador, tipo y contenido de modificaciones, temperatura, etc.

Pareciera que la aplicación del Módulo de Resiliencia es simple, pero su uso se complica, ya que no existe un valor único para un material, sino que hay un número infinito de valores dependiendo de las condiciones de prueba.

Aunque generalmente una carga simple no genera grietas en el pavimento, las repeticiones de carga pueden inducir a agrietamientos en las capas confinadas. Los esfuerzos cortantes y de tensión, así como las deformaciones en las capas confinadas causan la formación de micro grietas. Estas micro grietas acumuladas con la repetición de cargas pueden generar micro grietas visibles. Este proceso es llamado fatiga.

La metodología actual para el diseño de pavimentos utilizada por el método AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials) considera que la propiedad fundamental para caracterizar los materiales constitutivos de la sección de una carretera es el parámetro denominado Módulo Resiliente.

Es por ello que el especialista encargado del diseño, construcción y conservación de dichas estructuras, debe tener el conocimiento básico de lo que el parámetro Módulo Resiliente representa, de la prueba de laboratorio a partir de la cual se obtiene y de los factores que hay que considerar para la selección del valor adecuado para su uso en una determinada metodología de diseño.

6.2. DEFINICIÓN DEL CONCEPTO DE MÓDULO RESILIENTE

Cuando los materiales que conforman la sección estructural de un pavimento se ven sometidos a un gran número de aplicaciones de carga, es decir son afectados por esfuerzos de fatiga, debido a repetidas solicitaciones, estos materiales empiezan a fracturarse o bien a acumular deformaciones dependiendo de su rigidez inicial, y esta es la principal causa del deterioro observado en la superficie de los pavimentos. De hecho, podemos mencionar que dichos agrietamientos y deformaciones aparecen para esfuerzos muy por debajo de los que se supone debería resistir el material por sí mismo.

Debido al paso de los vehículos por la superficie de rodamiento de un pavimento, esta empieza a distribuir los esfuerzos hacia las capas inferiores, las cuales, por esta razón se ven sujetas a esfuerzos cíclicos de compresión σ_c y luego de tensión σ_t ; los cuales van provocando deformaciones en toda la estructura del pavimento. La curva esfuerzo-deformación obtenida en un espécimen de material de los que constituyen generalmente un pavimento, ya sea concreto asfáltico o hidráulico, o algún material granular, o un suelo cohesivo es cualitativamente la representada en la Figura 6.2.

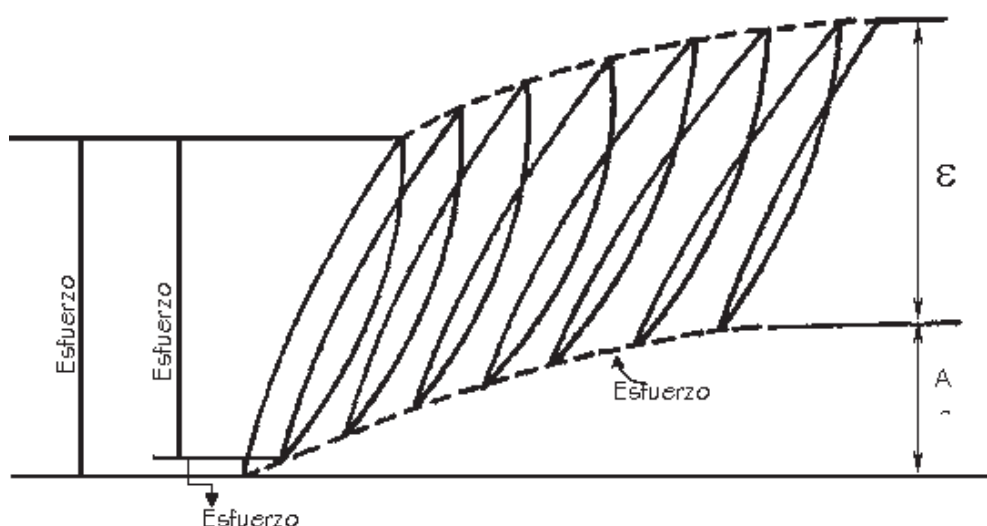


Figura 6.2. Curva Esfuerzo Deformación Cíclica
Fuente: Elaboración propia; a partir de Moreno Rubio, (2005)

En dicha gráfica podemos observar que después de descargar gradualmente el espécimen casi toda la deformación a que se vio sometida la muestra se recupera, sin embargo existe una pequeña deformación permanente, la cual al someter la muestra a un número N de ciclos de carga y descarga se va acumulando, aunque dicha deformación permanente es cada ciclo consecutivo menor, hasta llegar al ciclo N donde prácticamente se recupera toda la deformación. Aún así debido a que el material describe prácticamente la misma curva y que la deformación permanente es muy pequeña, se considera para fines de análisis que el comportamiento de los materiales es fundamentalmente elástico durante cada ciclo de carga y por lo tanto se le puede caracterizar con el denominado módulo de Resiliencia.

Hveem y Carmany (1948) reconocieron que el módulo dinámico de elasticidad para subrasantes es un parámetro de gran importancia para entender el agrietamiento (por fatiga) de las superficies de asfalto y que la carga monotónica podría no ser la adecuada para su determinación.

En 1955, Hveem desarrolló el tema “Comportamiento resiliente de los pavimentos”. Él propuso la prueba del estabilómetro para caracterizar a las subrasantes.

Brown (1996), reporta gráficas de esfuerzos y deformaciones obtenidas mediante la instrumentación de una estructura de pavimento sujeta a la aplicación de carga repetida, por medio del paso de un tractocamión.

Seed y sus colegas de la Universidad de Berkeley siguieron lo establecido por Hveem. Desarrollaron pruebas de carga repetida e introdujeron el término de Módulo de Resiliencia.

Este término fue cambiado más tarde por el de Módulo Resiliente (Seed et al, 1962), el cual fue definido como la magnitud del esfuerzo desviador repetido en compresión, dividido entre la deformación axial recuperable; siendo este equivalente al Módulo de Young (módulo de elasticidad) y se representa como sigue:

$$M_R = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\epsilon_{axial}} = \frac{\sigma_d}{\epsilon_{axial}}$$

Donde:

M_R : Módulo de Resiliencia

σ_1 : Esfuerzo principal mayor

σ_3 : Esfuerzo principal menor

ϵ_{axial} : Deformación recuperable

Durante pruebas de carga repetida se observa que después de un cierto número de ciclos de carga, el módulo llega a ser aproximadamente constante y la respuesta del material puede asumirse como elástica. Al módulo que permanece constante se le llama Módulo de Resiliencia. Este concepto aplica tanto para suelos como para Mezclas Asfálticas.

Se obtienen dos valores de Módulo Resiliente, uno instantáneo y otro total, debido a que se registran dos deformaciones durante el ciclo de carga, una al finalizar el ciclo de carga aplicado (deformación instantánea) y la otra al terminar el periodo de relajación (deformación total) y se utilizan las siguientes ecuaciones para el cálculo:

$$E_i = \frac{P(v+.027)}{t \cdot D_i}$$

$$E_t = \frac{P(v+.027)}{t \cdot D_t}$$

Donde:

- E_i : Módulo Resiliente Instantáneo
- E_t : Módulo Resiliente Total
- V : Coeficiente de Poisson
- t : Espesor de la probeta
- D_i : Deformación Resiliente Instantánea
- D_t : Deformación Resiliente Total

El parámetro Módulo de Resiliencia, a través de las investigaciones, se ha constituido como un elemento fundamental en el diseño de pavimentos, y ha despertado un gran interés en el desarrollo de procedimientos de diseño con bases mecanicistas; los cuales lo introducen como un elemento que caracteriza de manera racional el comportamiento esfuerzo-deformación de los materiales que conforman la estructura. Otra gran ventaja es, que con el avance en la computación, se han podido someter al análisis teorías que pueden aplicarse en forma práctica a las condiciones de diseño.

Actualmente existe una gran tendencia a utilizar los métodos de diseño mecanicistas, ya que muchas agencias están incorporando este parámetro para sus diseños; una de ellas es la guía AASHTO (1993), en cuya aplicación se emplean y se toman en cuenta muchos aspectos como: tránsito, comportamiento del pavimento durante su vida útil, características del suelo que es empleado en las diferentes capas, condiciones ambientales, de drenaje, confiabilidad, etc.

6.3. FORMA DE LA ONDA DE CARGA

El tipo y duración de la carga usados en la prueba de carga repetida, debe simular a aquella que de hecho ocurre en campo. Cuando la carga de una rueda está a una distancia considerable de un punto dado sobre el pavimento, el esfuerzo en ese punto es cero. Cuando la carga está directamente sobre el punto dado, el esfuerzo sobre el punto será máximo. Es por ello razonable asumir el pulso de esfuerzo como una carga senoidal o triangular, de una duración que depende de la velocidad del vehículo y de la profundidad del punto debajo de la superficie del pavimento.

Barksdale (1971) investigó los pulsos de esfuerzo vertical a diferentes puntos en los pavimento flexibles. Los pulsos de carga pueden aproximarse mediante una función triangular o senoidal, como se muestra en la Figura 6.3. Después de considerar los efectos viscosos basados en los pulsos de esfuerzos verticales medidos en el Camino de Prueba de AASHO, el esfuerzo del pulso de tiempo puede ser relacionado a la velocidad del vehículo y a la profundidad, como se muestra en la Figura 6.4. Debido a estos efectos, el tiempo de la carga no es inversamente proporcional a la velocidad del vehículo.

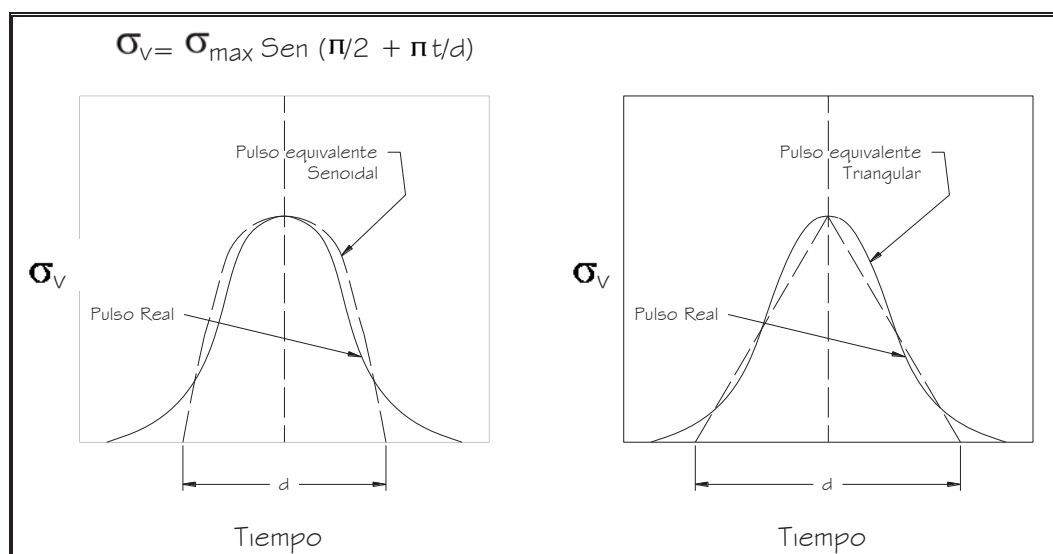


Figura 6.3. Pulsos Equivalentes Senoidal y Triangular
Fuente: Elaboración propia a partir de H. Huang (1993)

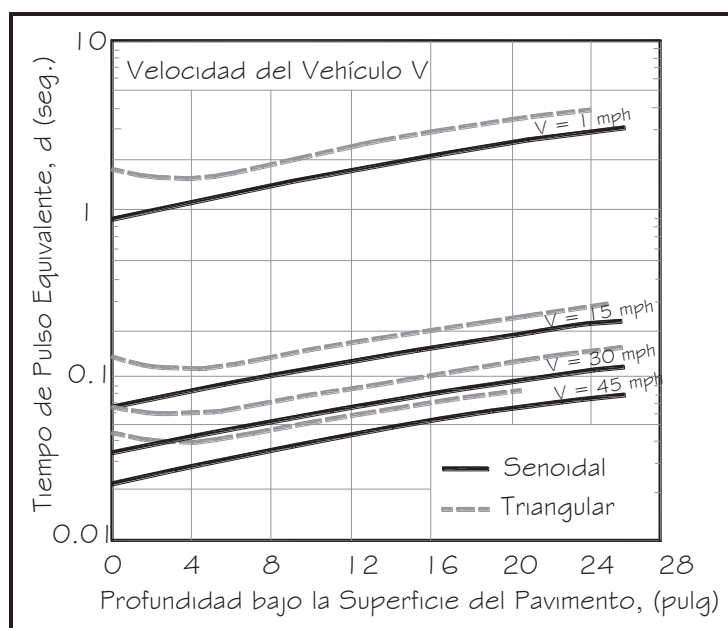


Figura 6.4. Pulsos de Tiempo de Esfuerzos Verticales bajo Cargas Sinodales y Triangulares (1 in. = 25.4 mm. 1 mph = 1.6 Km/hr.) Después de Barksdale 1971).

Fuente: Elaboración propia a partir de H. Huang (1993)

Brown (1973) derivó el tiempo de carga para una capa asfáltica como una función de la velocidad del vehículo y el espesor de la capa. El tiempo de la carga está basado en el promedio de tiempo de pulsos para el esfuerzo en las direcciones vertical y horizontal a varias profundidades en la capa asfáltica. Para capas más delgadas, los tiempos de carga son ligeramente más pequeños, que aquellos obtenidos por Barksdale.

McLean (1974) determinó el tiempo de carga para una onda cuadrática equivalente de pulso vertical, como se muestra en la Figura 6.5. en la cual los resultados de Barksdale para 30 mph (48 Km/hr) de carga triangular, se superpusieron para su comparación. Se puede observar que el pulso de tiempo basado en la onda cuadrática es más pequeño comparado con la curva triangular, tal y como se esperaba.

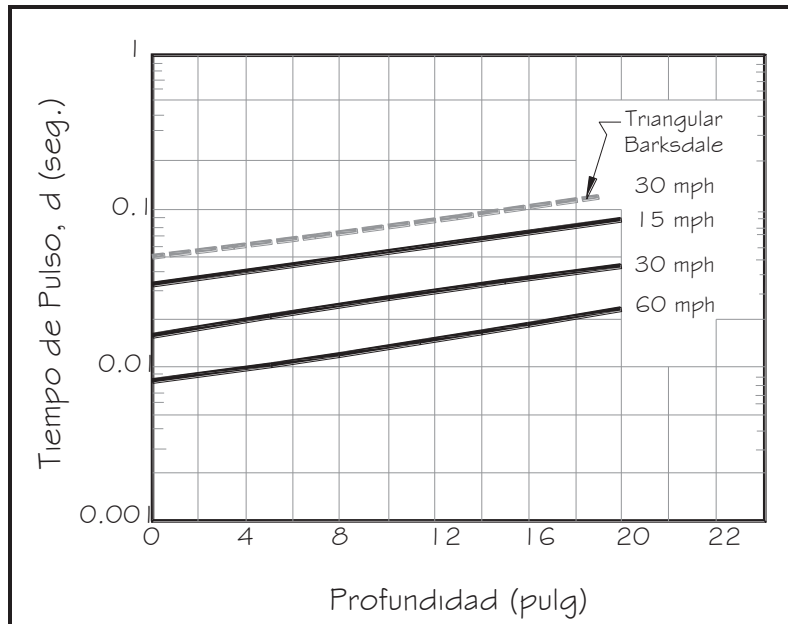


Figura 6.5. Pulsos de Tiempo de Esfuerzos Verticales, da carga de onda cuadrática (1 in. = 25.4 mm. 1 mph = 1.6 Km/hr.) Después de McLean (1974).
Fuente: Elaboración propia a partir de H. Huang (1993)

6.4. FACTORES QUE AFECTAN AL MÓDULO RESILIENTE

Como se ha observado en los estudios llevados a cabo sobre Módulo Resiliente, este parámetro no es una propiedad constante del pavimento, sino que depende de muchos factores. Algunos de estos factores se describen a continuación:

- Nivel de esfuerzos
- Frecuencia de carga
- Contenido de asfalto
- Tipo de agregado
- Contenido de vacíos de la mezcla
- Tipo y contenido de Modificadores
- Tipos de prueba
- Temperatura

6.4.1. Nivel de esfuerzos

Monismith et al. (1994) en el reporte denominado SHRP-A-388, referente a la determinación de Módulos Resilientes, analizaron el efecto del nivel de esfuerzos sobre el comportamiento de las mezclas asfálticas. Para esto utilizaron dos métodos de prueba (axial y diametral), dos niveles de esfuerzos (alto y bajo) y tres temperaturas de prueba (0°C, 20°C y 40°C), y observaron el comportamiento del módulo resiliente. En la figura 6.6. podemos observar que existe muy poca influencia del nivel de esfuerzos sobre el módulo resiliente, existiendo sólo ligeras variaciones entre ambos niveles de esfuerzos a medida que la temperatura de prueba se va incrementando. Por su parte, dichos incrementos en la temperatura de prueba reflejan una disminución notoria en los valores de Módulo Resiliente. Por otro lado, se observa que las pruebas diametrales arrojan valores mayores de Módulo Resiliente con respecto a los obtenidos mediante pruebas axiales.

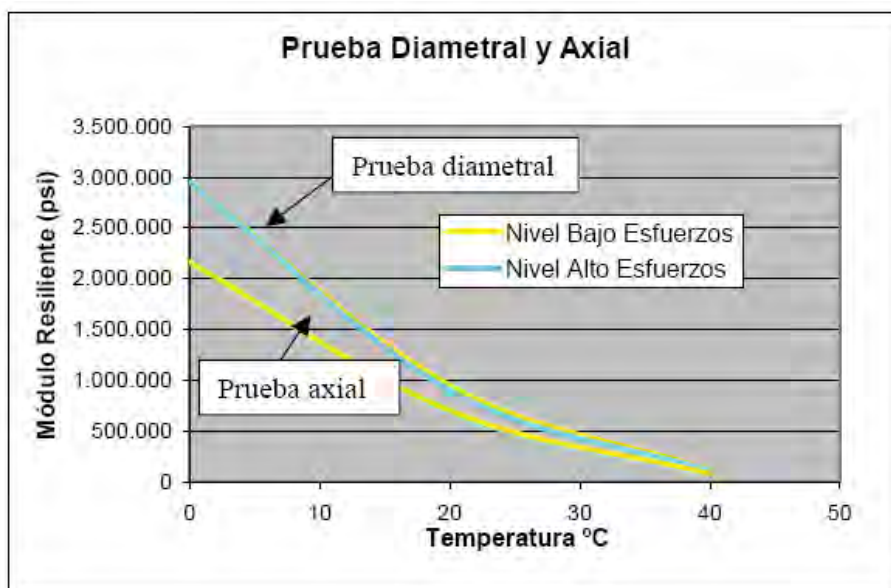


Figura 6.6. Valores del Mr para diferentes niveles de esfuerzo en función de la temperatura.
Fuente: Moreno Rubio, Año (2005).

6.4.2. Frecuencia de carga

Almudaiheem y Al-Sugair (1991) analizaron el efecto de la magnitud de la carga sobre el Módulo Resiliente. Mediante pruebas diametrales de Módulo Resiliente encontraron que los valores de Módulo Resiliente son mayores para niveles de carga más bajos.

Monismith et al. (1994) contemplaron en su estudio el efecto de la variación de la frecuencia de carga sobre las mezclas asfálticas. El desarrollo de los estudios fue similar al utilizado para el análisis del nivel de esfuerzos.

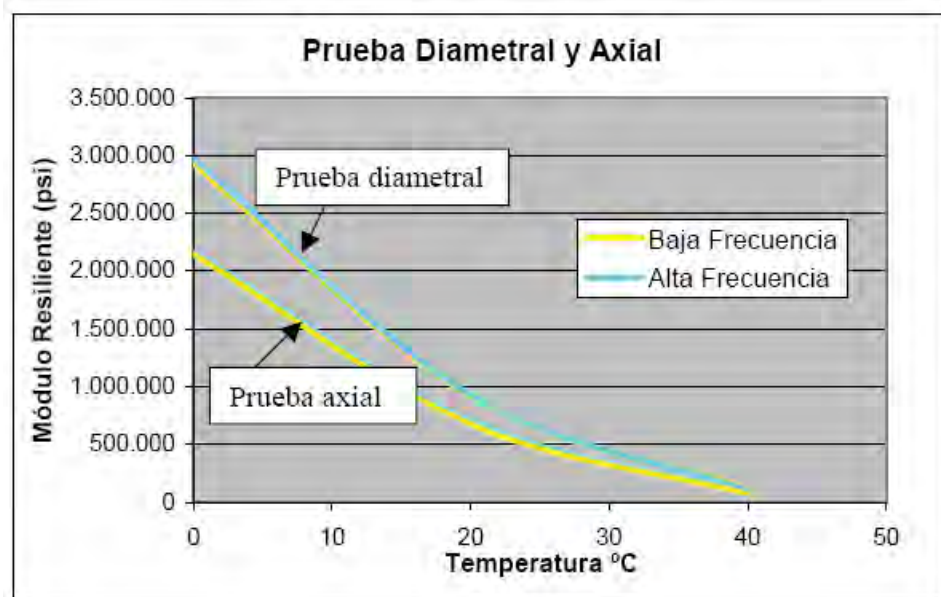


Figura 6.7. Valores del Mr para distintas frecuencias, en función de la temperatura.
Fuente: Moreno Rubio,(2005)

Al igual que en el caso del análisis de los niveles de esfuerzos, como podemos ver en la Figura 6.7. existe muy poca influencia de la frecuencia de carga sobre el Módulo Resiliente, solamente que en este caso, los valores de Módulo Resiliente tienen un ligero incremento en función del aumento en las frecuencias de carga. Nuevamente, se observa el efecto del tipo de método y temperatura de prueba utilizada sobre el Módulo Resiliente. Los valores de Módulo Resiliente disminuyen con un incremento en la temperatura de prueba y muestran un aumento con la utilización de las pruebas diametrales comparadas con los valores obtenidos mediante pruebas axiales.

6.4.3. Contenido de Asfalto

Almudaiheem y Al-Sugar (1991) analizaron el efecto del contenido de asfalto sobre el Módulo Resiliente. Mediante pruebas diametrales de Módulo Resiliente encontraron que los valores de Módulo Resiliente decrecen con un incremento en el contenido de asfalto.

Monismith et al. (1994) utilizaron dos contenidos de asfalto. Primero, el más bajo (óptimo), que fue determinado con el procedimiento estándar de Hveem. El segundo contenido de asfalto fue fijado 0.6% mayor, correspondiendo aproximadamente al contenido de asfalto óptimo que se obtiene utilizando el procedimiento de diseño del Cuerpo de Ingenieros (método Marshall). Considerando nuevamente los dos métodos (axial y diametral) y tres temperaturas de prueba (0°C, 20°C y 40°C).

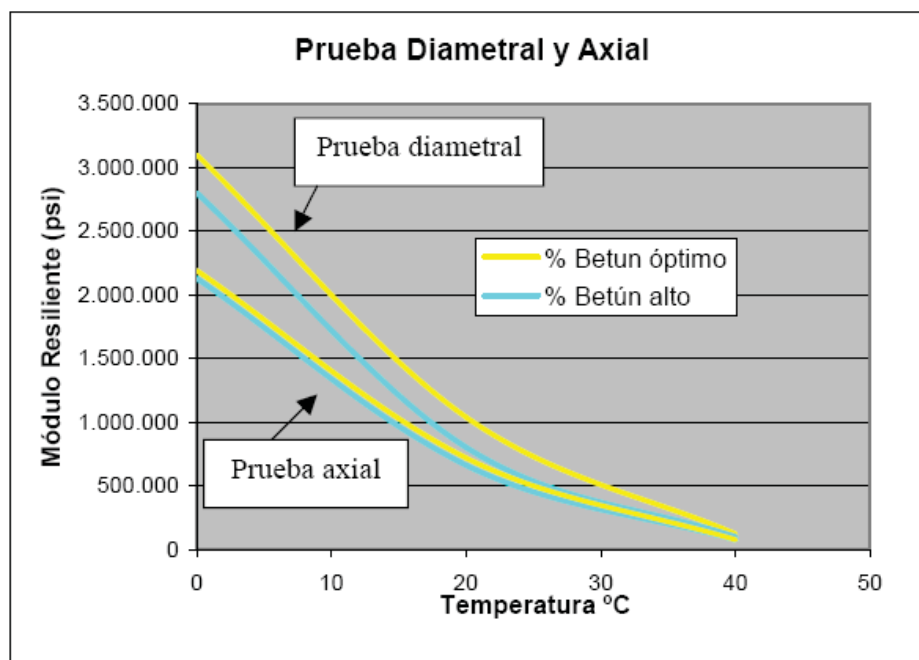


Figura 6.8. Valores de Mr. para diferentes contenidos de asfalto, en función de la temperatura.
Fuente: Moreno Rubio, (2005).

En la figura 6.8. se observa de manera general que disminuyen los valores de Módulo Resiliente para contenidos de betún altos en relación con los contenidos de betún óptimos. Se obtiene una disminución del módulo resiliente con respecto al incremento de las temperaturas de prueba.

6.4.4. Tipo de agregado

Elliott et al. (1992) condujeron un estudio donde seis mezclas de concreto asfáltico fueron ensayadas para investigar los efectos de la variación en la granulometría de los agregados sobre las propiedades de las mezclas. Utilizaron cinco granulometrías diferentes para cada mezcla (mezcla de trabajo, fina, granular, granular-fina y fina-granular).

Los análisis de la información obtenida revelaron que las variaciones en las granulometrías fina-granular y granular-fina tienen el mayor impacto sobre las propiedades de las mezclas pero que ninguna de las variaciones tiene un efecto significativo sobre el Módulo Resiliente. Los análisis de toda la información indicaron efectos significativos atribuibles al tipo de agregado y tipo de mezcla, pero ningún efecto causado por la granulometría. En general, dentro del rango utilizado en este estudio, la variación de la granulometría parece tener un pequeño efecto sobre el módulo resiliente de la mezcla.

Monismith et al. (1994) analizaron dos diferentes tipos de agregados, uno granítico y el otro pedernal, que es una variedad de cuarzo con pequeñas cantidades de sílice. En la figura 6.9. se observa de manera general, que el granito presenta valores mayores de módulo resiliente con relación a los obtenidos para el pedernal. Nuevamente se obtiene una disminución del módulo resiliente con respecto al incremento en las temperaturas de prueba.

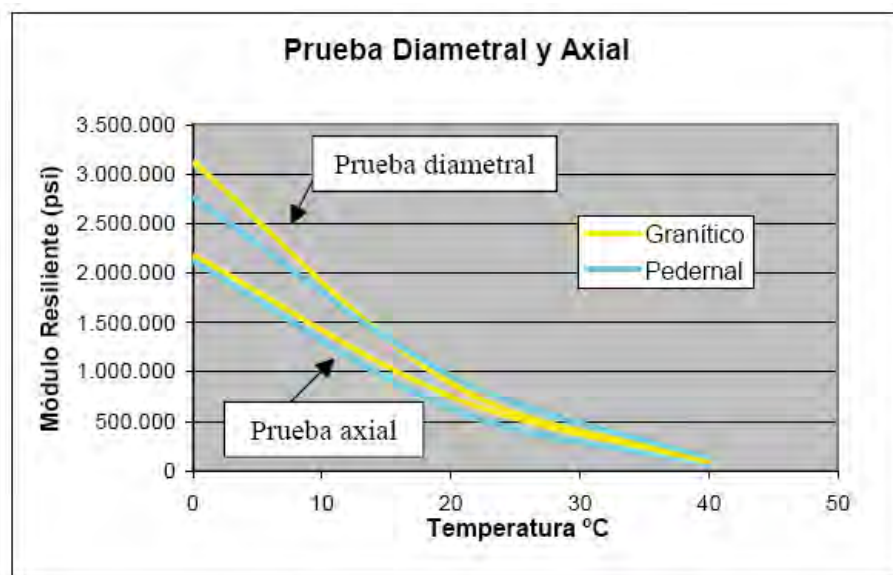


Figura 6.9. Valores del Mr. para distintos agregados, en función de la temperatura.
Fuente: Moreno Rubio, Año (2005).

Abdulshafi et al. (1999) realizaron un estudio con el fin de observar el comportamiento de diferentes tipos de agregados utilizados en la elaboración de mezclas asfálticas. Este estudio consistió de 10 mezclas de concreto asfáltico, con 5 diferentes granulometrías para dos tipos de agregados: grava natural (redondeada) y caliza triturada (angular). Las 5 granulometrías (tamaño máximo del agregado nominal, 2.5 cm) fueron: fina, media, granular, modificada (tipo 2) y de límite superior. Los resultados indicaron que las granulometrías granulares lograron los valores más bajos de módulo resiliente para ambos tipos de agregados.

La graduación en el límite superior de la curva granulométrica logró valores altos para ambos tipos de agregados. Para la granulometría media, los valores altos de módulo resiliente para las mezclas con gravas se consideraron anormales, porque ésta fue la única granulometría de las cinco para la cual existió una gran disparidad entre las mezclas de caliza y gravas naturales. Los valores de módulo resiliente para mezclas con agregados grandes oscilaron entre 3280 y 5140 MPa. Este rango es considerablemente mayor que el rango de 2070 a 3450 MPa, que debería ser esperado para mezclas asfálticas convencionales.

6.4.5. Porcentaje de vacíos

Monismith et al. (1994) emplearon dos niveles de esfuerzos de compactación para generar contenidos de vacíos del 4 y 8%. En la figura 6.10. se observa de manera general una disminución considerable en los valores de Módulo Resiliente con respecto al aumento en el contenido de vacíos de la mezcla analizada. Nuevamente se obtiene una disminución del MR con respecto al incremento en las temperaturas de prueba.

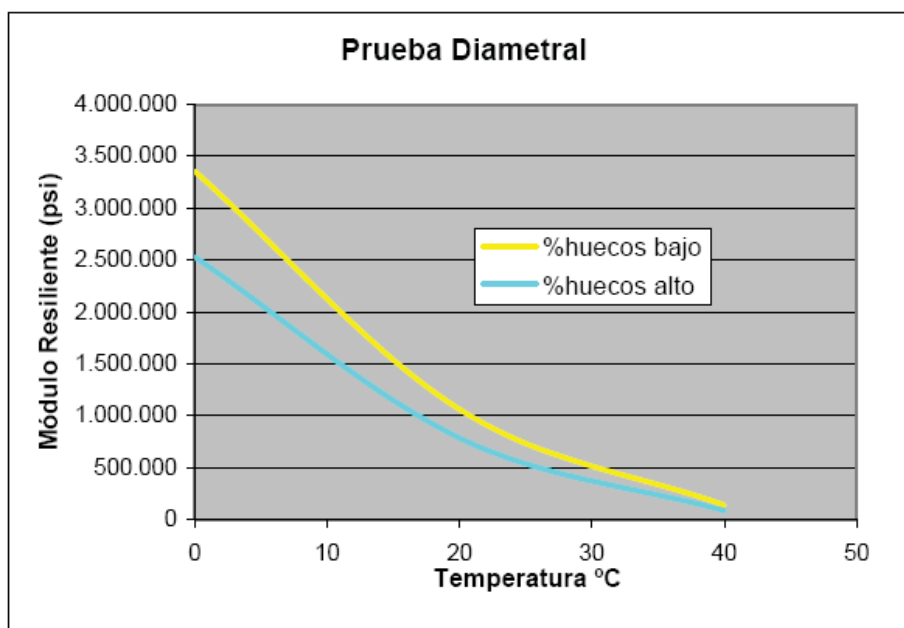


Figura 6.10. Valores del Mr. para diferentes % de vacíos en función de la temperatura.

Fuente: Tesis Javier Moreno Rubio, Año (2005)

6.4.6. Tipo y contenido de modificadores

Jiménez (1962) mostró que los Módulos Resilientes de mezclas asfálticas con caucho están cerca del 75% del valor para mezclas convencionales. Además, estudió el efecto de una adición extra del 2% de caucho fino reciclado para tres mezclas asfálticas con contenidos de caucho de 2.5, 3 y 3.5%. Los valores de Módulo Resiliente se incrementaron en las tres mezclas cuando se adicionó el 2% extra de caucho. La mayor mejora ocurrió para un contenido del 2.5% de caucho reciclado, que mostró un incremento de cerca del 60%.

Vallerga et al. (1980) mostraron que los valores de Módulo Resiliente para mezclas asfálticas modificadas con caucho son más bajos que los obtenidos para mezclas convencionales pero sólo para temperaturas bajas (debajo de 75°F). Para temperaturas mayores, los valores de Módulo Resiliente de las mezclas modificadas son mayores que los obtenidos para mezclas convencionales. Además, encontraron que las mezclas modificadas con caucho fino reciclado presentan valores mayores de Módulo Resiliente que para mezclas modificadas con cauchos granulares.

Zhou et al. (1994) consideraron en su estudio la utilización de tres modificadores para observar el comportamiento del módulo resiliente en mezclas asfálticas. Al igual que en el análisis de fatiga, los modificadores empleados fueron: Styrelf, AC-20R y CA (P)- I. Estos asfaltos modificados fueron comparados con un asfalto convencional AC-20.

Las pruebas de módulo resiliente fueron realizadas en corazones obtenidos en el lugar, siguiendo el procedimiento de prueba ASTM D4123 (1995). Los resultados de las pruebas indicaron que las mezclas con AC-20R tenían valores de Módulo Resiliente más bajos; las mezclas con AC-20 y CA (P)-I tenían valores de Módulo Resiliente similares; mientras que las mezclas con Styrelf tenían valores de MR entre los obtenidos para las mezclas AC-20 y AC-20 R.

Kamel y Miller (1994) realizaron un estudio donde observaron el efecto de los modificadores sobre el Módulo Resiliente para mezclas asfálticas. Utilizaron dos tipos de betunes: uno convencional y otro modificado mediante un proceso de refinamiento sin el uso de polímeros, denominado premium. Además, se consideraron tres temperaturas de prueba: 5, 25 y 40°C. Observaron la susceptibilidad a la temperatura que presentan los betunes modificados. Se obtuvieron mejoras en los valores de Módulo Resiliente para temperaturas altas y bajas en los betunes tipo premium. El módulo de las mezclas de pavimentos a 5°C fue 15% menor y a 40°C fue 25% mayor para el asfalto Premium comparado con el asfalto convencional. Estos resultados confirman el comportamiento superior de los pavimentos a las roderas y el comportamiento mejorado a bajas temperaturas observado en los pavimentos con asfalto tipo premium.

Khattak y Baladi (1998) (2001) desarrollaron un programa de investigación, patrocinado por el Departamento de Transporte de Michigan, diseñado para evaluar el efecto de la modificación mediante el uso de polímeros sobre las propiedades de las mezclas asfálticas. Utilizaron dos tipos de asfaltos (AC-5 y AC-10), dos tipos de polímeros (estireno-butadieno-estireno, SBS y estireno-etileno-butileno-estireno, SEBS) y tres temperaturas de prueba (-5, 25 y 60°C). Los resultados obtenidos concluyeron, de manera general, que los asfaltos modificados con polímeros exhiben valores de Módulo Resiliente mayores comparados con los asfaltos convencionales.

6.4.7. Tipos de prueba

Como parte del proyecto A-003A, Tayebali et al. (1995) realizaron una comparación entre los métodos de pruebas axiales y diametrales para la determinación del Módulo Resiliente en mezclas asfálticas. Los resultados de este estudio indicaron que ambos tipos de pruebas son sensibles a la mezcla y a las variables involucradas en dichas pruebas, tipo de asfalto, tipo de agregado, contenido de vacíos, temperatura, etc.

Además, encontraron que, utilizando las pruebas diametrales, se obtienen valores promedio de Módulo Resiliente aproximadamente entre un 35 y 45% mayores comparados con los valores obtenidos mediante las pruebas axiales.

6.4.8. Temperatura

Cochran y Furber (1989) indicaron que el Módulo Resiliente depende mucho de la temperatura a la cual se ensayan los especímenes de mezclas asfálticas. Ellos observaron que con un incremento en la temperatura se genera un decremento notable en los valores de módulo resiliente.

Boudreau et al. (1992) realizaron un estudio paramétrico con el fin de observar, entre otras cosas, el efecto de la temperatura y la duración de la carga en las mezclas asfálticas. Utilizaron dos mezclas asfálticas en caliente compactadas con dos niveles diferentes de contenido de vacíos (4 y 10%), obtenidos mediante la utilización del método Marshall de compactación. Empleando ensayos diametrales de carga repetida, se consideró una duración de carga de 0.1 a 0.4 segundos; un nivel de esfuerzos inducido de 10 a 50% de la resistencia a la tensión; tres temperaturas de prueba (41, 77 y 104°F) y tres frecuencias de carga (0.33, 0.5 y 1 Hz). Los resultados mostraron que los valores de Módulo Resiliente decrecen con el incremento en la temperatura y duración de la carga.

Mohammad y Paul (1992) muestran en su estudio realizado mediante pruebas de tensión indirecta sobre mezclas asfálticas, el efecto de la temperatura sobre el Módulo Resiliente. Encontraron que los valores de Módulo Resiliente disminuyen a medida que se incrementa la temperatura, independientemente del valor que se considere para dichas temperaturas de prueba.

Monismith et al. (1994) observaron el gran efecto que tiene la temperatura de prueba sobre los valores de Módulo Resiliente. Este punto ha sido mencionado en el análisis de resultados mostrados en los puntos anteriores. Los valores de Módulo Resiliente disminuyen con un incremento en la temperatura de prueba. Al aumentar la temperatura de 0 a 20°C, se tiene un decremento del 60 al 70% en los valores de Módulo Resiliente y alrededor del 90% de disminución de los valores de Módulo Resiliente cuando se varía la temperatura de prueba de 20 a 40°C.

7. PRUEBAS DE LABORATORIO

7.1. INTRODUCCIÓN

Para la realización de esta tesis, se llevaron a cabo las diferentes pruebas a los materiales utilizados, en el Laboratorio de Materiales de la U. M. S. N. H., y en los laboratorios de las Empresas SURFAX y PACCSA. Todas las pruebas se realizaron de acuerdo a lo especificado en la Normatividad de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes SCT NORM-SCT vigentes.

En este capítulo se explican los trabajos realizados, a los materiales utilizados y los procedimientos llevados a cabo para la elaboración de las probetas y la correcta realización de los ensayos utilizados para el estudio.

7.2. MATERIALES UTILIZADOS

El agregado utilizado para este trabajo, fue un agregado triturado de tipo Basáltico de donde se obtuvieron los diferentes tamaños para el ajuste de la curva de uso granulométrico de la Normativa SCT. Se eligió un banco de la región que es altamente utilizado, denominado “Triturados, Acarreos y Concretos S.A. de C.V” ubicado en la carretera Morelia-Salamanca Km 7, en el Municipio de Tarímbaro, Michoacán.

Se eligieron dos tipos de asfaltos modificados para la realización de las probetas. Se utilizó un Asfalto AC-20 como base, y se modificó con un POLÍMERO TIPO I, el primero fue un asfalto PG-76 y el segundo un PG-82. De las probetas elaboradas, la mitad se fabricó con el asfalto Grado PG-76, variando el contenido de asfalto. Se fabricaron probetas para cada contenido de asfalto; siendo los siguientes contenidos los utilizados: 4.5%, 6.0% y 7.0%. Se hizo lo mismo para el asfalto Grado PG-82. La Tabla 7.1. muestra las probetas con sus contenidos de asfalto y tipo de asfalto. La probeta 19, se utilizó para el ensayo de Tracción Indirecta.

No. Probeta	Contenido de Asfalto	Tipo de Asfalto
1, 2 y 3	4.50%	PG-76
4, 5 y 6	6.00%	PG-76
7, 8 y 9	7.00%	PG-76
10, 11 y 12	4.50%	PG-82
13, 14 y 15	6.00%	PG-82
16, 17, 18 y 19	7.00%	PG-82

Tabla 7.1. Características de las Probetas fabricadas.

Los asfaltos utilizados en esta Tesis fueron proporcionados por la Empresa SURFAX. Las características fueron proporcionadas también por el fabricante y en general cumplen con lo establecido en las Normas SCT para Cementos Asfálticos para Mezclas. Tabla 7.2.

Grado de Comportamiento	PG 64				PG 70				PG 76			PG 82			PG 88		
	-22	-28	-34	-40	-22	-28	-34	-40	-22	-28	-34	-22	-28	-34	-22	-28	-34
Temperatura máxima de diseño del pavimento (promedio de 7 días). °C	64				70				76			82			88		
Temperatura mínima de diseño del pavimento. °C	>-22	>-28	>-34	>-40	>-22	>-28	>-34	>-40	>-22	>-28	>-34	>-22	>-28	>-34	>-22	>-28	>-34
Asfalto original																	
Punto de inflamación: Cleveland ^[1] ; °C, min	230																
Viscosidad dinámica a 135°C ^[1] ; Pa·s (P ^[2]), máximo	3																
Módulo reológico de corte dinámico (G*/senδ) ^[1] ; kPa, mínimo	1																
Temperatura de prueba @ 10 rad/s; °C	64				70				76			82			88		
Después de prueba de película delgada y aire de horno ^[1]																	
Pérdida por calentamiento; %, máximo	1																
Módulo reológico de corte dinámico (G*/senδ) ^[1] ; kPa, mínimo	2,2																
Temperatura de prueba @ 10 rad/s; °C	64				70				76			82			88		
Después de envejecimiento en vasija de presión temperatura y aire																	
Temperatura de envejecimiento PAV; °C																	
En climas normales	100				100				100			100			100		
En climas desérticos	100				110				110			110			110		
Índice de endurecimiento Falco [1], máximo	Reportar																
Módulo reológico de corte dinámico (G*/senδ) ^[1] ; kPa, mínimo	5 000																
Temperatura de prueba @ 10 rad/s; °C	25	22	19	16	25	22	19	31	25	25	34	31	25	34	31	25	
Rigidez de Flexión S _g ; Mpa, máximo (m= 0,3 m)	300																
Temperatura de prueba @ 60 s; °C	-12	-18	-24	-30	-12	-18	-24	-30	-12	-18	-24	-12	-18	-24	-12	-18	-24

Tabla 7.2. Requisitos de Calidad para Cementos Asfálticos Grado PG.

Fuente: Elaboración propia, a partir de Normas SCT Norma N-CMT-4-05-004-05-1.

A continuación detallaremos las pruebas y los resultados que se obtuvieron al analizar el agregado antes mencionado.

7.3. PRUEBAS REALIZADAS AL AGREGADO PÉTREO

La explotación del banco “Triturados, Acarreos y Concretos S.A. de C.V” (Figura 7.1.) se realiza mediante maquinaria D-55-A similar al Caterpillar 8, teniendo dos frentes de ataque. Este banco proporciona materiales pétreos obtenidos mediante el proceso de trituración realizada por medio de trituradoras primarias (muela) y secundarias (molino de impacto), además de tener bandas de transportación de materiales y elevadores de material.



Figura 7.1. Localización del Banco de Materiales.

El banco proporcionó para esta investigación materiales pétreos con tamaños máximos de $\frac{1}{2}$ " y $\frac{3}{4}$ " para la elaboración de especímenes de concreto asfáltico.

Este banco fue elegido para continuar con una serie de caracterizaciones de los materiales de la Región, en complemento al trabajo de Tesis elaborado por Laura Isela González Martínez (2007), sobre Módulos Resilientes con Asfaltos convencionales.

El material muestreado debe ser una representación del material en su conjunto, por esto, el muestreo en los bancos en estudio, se realizó abriendo canales verticales con sección de 20 a 30 cm. de ancho y de 15 a 20 cm. de profundidad, recolectando de estos canales el material a utilizar de acuerdo con la Norma SCT M MMM 4-04-001/02. Cuidándose también la correcta reducción del material, utilizando un método de cuarteo adecuado siguiendo la Norma SCT M MMM 4-04-001/02.

Para esta investigación las características de los materiales pétreos estudiados deberán cumplir con lo referente a mezclas densas, fabricadas en caliente, en función de su tamaño nominal y para más de 1 millón de ejes equivalentes, acumulados esperados durante la vida útil del pavimento (ΣL). Los materiales pétreos deberán cumplir con lo establecido en la Norma SCT N-CMT-4-04/01, Requisitos de Calidad de Materiales Pétreos para Mezclas Asfálticas. Los requisitos son los mostrados en la Tabla 7.3.

Característica	Valor
Densidad relativa, mínimo	2.4
Desgaste Los Ángeles, % máximo	35
Partículas alargadas, % máximo	40
Partículas lajeadas, % máximo	40
Equivalente de arena, % mínimo	50
Pérdida de estabilidad por inmersión en agua, % máximo	25

Tabla 7.3. Requisitos del material pétreo para carpetas asfálticas de granulometría densa (para $\Sigma L \leq 10^6$). Fuente: Elaboración propia de Normas SCT N-CMT-4-04/01.

7.3.1. Composición granulométrica SCT N-CMT-4-04-01

Esta prueba permite determinar la composición por tamaños de las partículas del material pétreo empleado en mezclas asfálticas, mediante su paso por una serie de mallas con aberturas determinadas. El paso del material se hace primero a través de las mallas con la abertura más grande, hasta llegar a las más cerradas, de tal forma que los tamaños mayores se van reteniendo. Para así poder obtener la masa que se retiene en cada malla, calcular su porcentaje al total y definir la masa que pasa.

Para este estudio se trabajó con los tamaños nominales del pétreo de 3/4" y 1/2" y para una intensidad de tránsito esperada (ΣL) mayor a 1 millón de ejes equivalentes. Los requisitos de granulometría se muestran en la Tabla 7.4.

Malla		Tamaño nominal del material	
		mm(in)	
Abertura (mm)	Designación	12.5 (1/2")	19 (3/4")
		Porcentaje que pasa	
25	1"		100
19	3/4"	100	90-100
12.5	1/2"	90-100	72-90
9.5	3/8"	76-90	60-76
6.3	1/4"	56-69	44-57
4.75	Nº4	45-59	37-48
2	Nº10	25-35	20-29
0.85	Nº20	15-22	12-19
0.425	Nº40	11-16	8-14
0.25	Nº60	8-13	6-11
0.15	Nº100	5-10	4-8
0.075	Nº200	2-6	2-5

Tabla 7.4. Requisitos de granulometría. Fuente Elaboración propia, Norma SCT N-CMT-4-04-1

En las Tablas siguientes, se muestran los resultados obtenidos de las granulometrías del material de banco, de las diferentes porciones seleccionadas.

Peso Bruto =	18,600	grs.
Tara =	4,600	grs.
Peso Neto =	8,767	grs.

Malla No.	Peso Ret. (grs.)	% Ret. Parcial	% Ret. Acumulado	% que Pasa la Malla
1"	1,774	20.23	20	80
3/4"	3,229	37.97	58	42
1/2"	2,621	29.89	88	12
3/8"	1,043	11.89	100	0

Tabla 7.5. Granulometría del material de 3/4"-1/2".

Peso Inicial = grs.

Malla No.	Peso Ret. (grs.)	% Ret. Parcial	% Ret. Acumulado	% que Pasa la Malla
3/8"	0	0	0	100
1/4"	1,212	40	40	60
No.4	926	31	71	29
No.10	862	29	100	0

Tabla 7.6. Granulometría del Material que pasa la malla 3/8" y retiene No. 10.

Peso Inicial = grs.

Malla No.	Peso Ret. (grs.)	% Ret. Parcial	% Ret. Acumulado	% que Pasa la Malla
10	0	0	0	100
20	186	37	37	63
40	127	25	63	37
60	49	10	72	28
100	28	6	78	22
200	42	8	86	14
Pasa 200	68	14	100	0

T

Tabla 7.7. Granulometría del Material que pasa Malla No. 10.

De los resultados obtenidos anteriormente, se determinó que no era posible ajustar la Curva al huso Granulométrico, proporcionado en las Normas SCT para materiales de Mezclas Asfáltica, por lo que se procedió a dividir el material en diferentes fracciones, lo anterior para hacer el ajuste a la Curva Granulométrica, y estar dentro de lo establecido en las Normativa.

El material se cribó y separó en las siguientes fracciones, tal y como se muestra en la Tabla 7.8.

Pasa 3/4-Retiene 1/2
Pasa 1/2-Retiene 3/8
Pasa 3/8-Retiene 10
Pasa 10-Retiene 40
Pasa 40

Tabla 7.8. Fracciones del Material para ajustar la Curva Granulométrica

Posteriormente, se procedió a obtener las granulometrías de cada una de las fracciones en que se dividió el material, para hacer su ajuste a la curva granulométrica. En la Tabla 7.9. se muestra el ajuste de la curva, y en la Figura 7.2. la curva granulométrica ajustada.

Abertura (mm)	Malla	Límites		3/4-1/2	1/2-3/8	3/8-10	10-40	pasa 40	Curva ajustada
25.400	1"	100	100	100	100	100	100	100	100.0
19.050	3/4"	100	100	100	100	100	100	100	100.0
12.700	1/2"	90	100	0	100	100	100	100	95.0
9.520	3/8"	76	90	0	0	100	100	100	80.0
6.350	1/4"	56	69	0	0	77	100	100	68.5
4.760	No. 4	45	59	0	0	50	100	100	55.0
2.000	No. 10	25	35	0	0	1	100	100	30.5
0.840	No. 20	15	22	0	0	0	52	100	20.4
0.420	No. 40	11	16	0	0	0	0	100	10.0
0.250	No. 60	8	13	0	0	0	0	87	8.9
0.149	No. 100	5	10	0	0	0	0	77	7.9
0.074	No. 200	2	6	0	0	0	0	63	6.5

Tabla 7.9. Ajuste de la curva granulométrica.

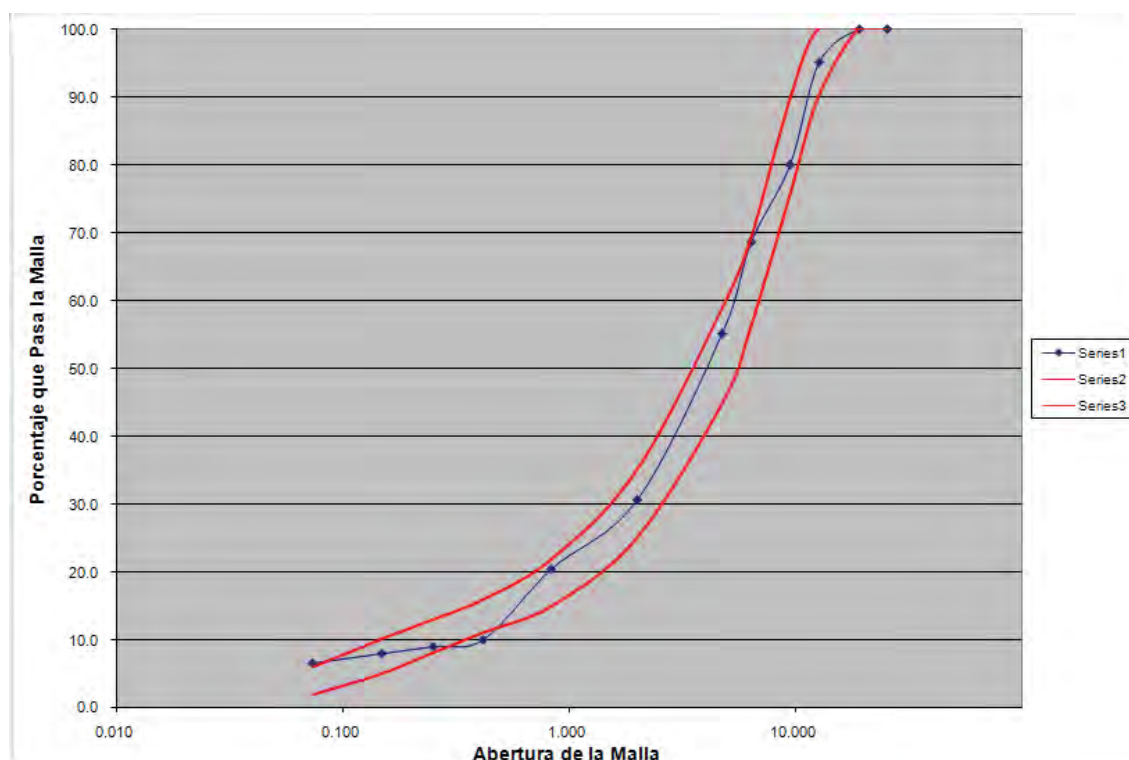


Figura 7.2. Curva Granulométrica del Material Ajustada

Con el ajuste anterior, se cumple la Granulometría establecida en Normas SCT para materiales pétreos, para Mezclas Asfálticas.

7.3.2. Equivalente de Arena de Materiales Pétreos para Mezclas Asfálticas

Esta prueba permite determinar el contenido y actividad de los materiales finos o arcillosos presentes en los materiales pétreos empleados en mezclas asfálticas, y se llevó a cabo de acuerdo a lo descrito en la Norma M-MMP-4-04-004/02. La prueba consiste en agitar un cilindro, que contiene una muestra de material pétreo que pasa la Malla No. 4, mezclada con una solución que permite separar la arena de la arcilla.

A continuación se muestran los resultados de las pruebas de Equivalente de Arena al material del banco, obtenidas de laboratorio. Tabla 7.10.

EQUIVALENTE DE ARENA			
No. Prueba	1	2	3
Lectura de Arcilla	5.70	4.80	4.70
Lectura de Arena	3.50	3.90	3.60

Tabla 7.10. Resultados de la prueba de equivalente de arena.

Cálculos:

$$\text{Equivalente de Arena} = \frac{\text{Lectura de arena}}{\text{Lectura de arcilla}} * 100$$

EQUIVALENTE DE ARENA			
No. Prueba	1	2	3
Equiv. Arena	61.40	81.25	76.60

Tabla 7.11. Resultados de la prueba de equivalente de arena

Se promedian los valores anteriores, descartando el valor más bajo; por lo tanto el valor queda de la siguiente manera:

$$\text{EQUIVALENTE DE ARENA} = 78.93\%$$



Figura 7.3. Probetas para el ensayo de Equivalente de Arena.

7.3.3. Partículas Alargadas y Lajeadas

Esta prueba permite determinar el contenido de partículas de formas alargadas y lajeadas presentes en los materiales pétreos empleados en mezclas asfálticas. La prueba consiste en separar el retenido en la malla No.4 de una muestra de materiales pétreos, para determinar la forma de cada partícula, empleando calibradores de espesor y longitud, tal y como se muestra en la Figura 7.4. las pruebas se llevaron a cabo de acuerdo a lo establecido en la Norma M-MMP-4-04-005/02.



Figura 7.4. Calibradores de espesor y longitud para la prueba.

En las tablas siguientes muestran los resultados de las pruebas realizadas a los materiales.

M ₁ = 225 grs.		
PARTICULAS ALARGADAS		
Malla No.	Pasa (grs)	No pasa (grs)
3/4"	0.0	0.0
1/2"	0.0	0.0
3/8"	27.9	8.0
1/4"	95.0	94.1

Tabla 7.12. Resultado de prueba de partículas alargadas, muestra No. 1.

M ₁ = 225 grs.		
PARTICULAS LAJEADAS		
Malla No.	Pasa (grs)	No pasa (grs)
3/8"	16.1	19.7
1/4"	73.8	115.5

Tabla 7.13. Resultado de prueba de partículas lajeadas, muestra No. 1.

M ₂ = 170 grs.		
PARTICULAS ALARGADAS		
Malla No.	Pasa (grs)	No pasa (grs)
3/4"	0.0	0.0
1/2"	0.0	0.0
3/8"	18.7	2.4
1/4"	74.3	74.6

Tabla 7.14. Resultado de prueba de partículas alargadas, muestra No.2.

$M_1 = 225 \text{ grs.}$		
PARTICULAS LAJEADAS		
Malla No.	Pasa (grs)	No pasa (grs)
3/8"	12.4	8.7
1/4"	69.7	79.4

Tabla 7.15. Resultado de prueba de partículas lajeadas, muestra No.2.

Cálculo:

$$Ca = (ma/M) * 100$$

- Ca = por ciento en masa de partículas con forma alargada (%)
- ma = masa total de la muestra para c/u de las muestras de prueba, según corresponda en (grs).
- M = masa total de la muestra para c/u de las muestras de prueba, es decir, M_1 ó M_2 según corresponda, en (grs)

$$\left. \begin{array}{l} Ca_1 = (122.9/225) * 100 = 54.62\% \\ Ca_2 = (93.0/170) * 100 = 54.71\% \end{array} \right\} \text{Partículas Alargadas} = 54.67\%$$

$$\left. \begin{array}{l} Cp_1 = (89.8/225) * 100 = 39.91\% \\ Cp_2 = (82.0/170) * 100 = 48.23\% \end{array} \right\} \text{Partículas Lajeadas} = 44.07\%$$

7.3.4. Desgaste Mediante la Prueba de Los Ángeles de Materiales Pétreos para Mezclas Asfálticas

El objetivo de la prueba es determinar la resistencia a la trituración de los materiales pétreos empleados en Mezclas Asfálticas. La prueba consiste en colocar una muestra del material con características granulométricas específicas dentro de un cilindro giratorio, (Figura 7.5.) en donde es sometida al impacto de esferas metálicas durante un tiempo determinado, midiendo la variación granulométrica de la muestra como la diferencia entre la masa que pasa la Malla No.12 (1.7 mm de

abertura), antes y después de haber sido sometida a este tratamiento. La prueba se realizó siguiendo lo señalado en la Norma M-MMP-4-04-006/02.

A continuación se describen los resultados obtenidos de las pruebas de laboratorio realizadas al material.

- Peso Inicial; $P_i = 5,000$ grs.
- Peso Final; $P_f = 4,323$ grs.

Cálculo:

$$Pa = (P_i - P_f / P_i) * 100$$

- Pa = desgaste por trituración Los Ángeles (%).
- P_i = peso inicial de la muestra de prueba (grs.)
- P_f = peso final del material de la muestra de prueba, mayor de 1.7 mm (Malla No. 12) en (grs.)

$$Pa = \frac{5000 - 4323}{5000} * 100 = 13.54\%$$

$$\text{DESGASTE DE LOS ÁNGELES} = 13.54\%$$



Figura 7.5. Cilindro giratorio empleado para la prueba de desgaste de Los Ángeles.

7.3.5. Densidad Relativa de Materiales Pétreos para Mezclas Asfálticas

Esta prueba permite determinar la densidad relativa de los materiales pétreos empleados en mezclas asfálticas con el fin de conocer la masa de sólidos por unidad de volumen de dichos sólidos sin vacíos en cada una de sus fracciones, ya sea arena con finos o grava, respecto a la densidad del agua. La prueba se realizó de acuerdo a lo establecido en la Norma M-MMP-4-04-003/02.

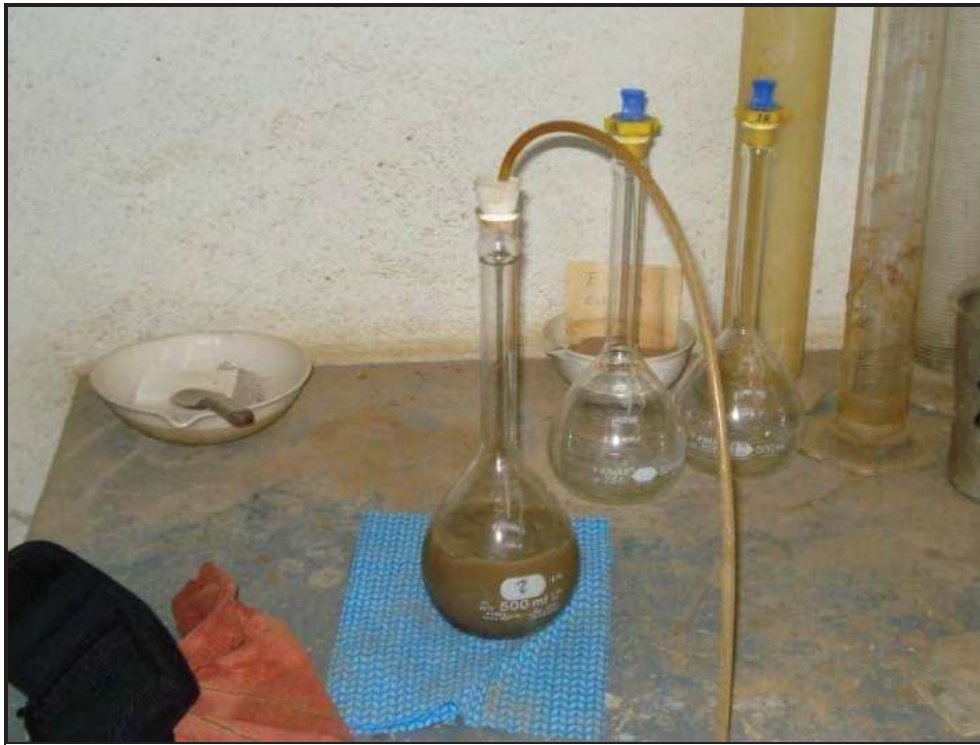


Figura 7.6. Prueba de Densidad de Sólidos



Figura 7.7. Densidad de Sólidos del Material que pasa la Malla No. 4

A continuación se muestran los resultados de las pruebas realizadas al material en el laboratorio. Tabla 7.16.

• MATERIAL QUE PASA LA MALLA No.4

MATERIAL QUE PASA LA MALLA No.4			
Matraz	11	7	8
P ₂ (grs.)	755	745	755
P ₁ (grs.)	691.42	680.84	690.42
t _p (°C)	35	39	35

Tabla 7.16. Resultados del material que pasa la Malla No.4

Cálculo:

$$D = P_s / (P_s + P_1 - P_2)$$

- D = densidad del material que pasa la Malla No.4
- P_s = Peso del material seco en (grs.)
- P₁ = Peso obtenido de la curva de calibración del matraz aforado
- P₂ = Peso del material + matraz sin aire en (grs.)

DENSIDADES			
No. Prueba	1	2	3
Densidad	2.75	2.78	2.82

Tabla 7.17. Resultados de los cálculos de las densidades.

DENSIDAD DEL MATERIAL QUE PASA LA MALLA No. 4 = 2.76

- MATERIAL RETENIDO EN LA MALLA 3/8"

Vol. Inicial = 500 ml

Vol. Final = 700.8 ml

Vol. Desalojado = 700.8 - 500 = 200.8 ml.

Peso seco del mat = 490 grs.

Peso húmedo = 500 grs.

Absorción = 2.04%

Cálculo:

$D = \text{Peso seco} / \text{Vol. Desalojado}$

DENSIDAD DEL MATERIAL RETENIDO EN LA MALLA 3/8" = 2.49

Como se puede observar en la Tabla 7.18., el material cumple en general con los requisitos de calidad para Mezclas Asfálticas de las Normas SCT.

Característica	Valor	Del Material
Densidad relativa, mínimo	2.4	2.49
Desgaste Los Ángeles, % máximo	35	13.5
Partículas alargadas, % máximo	40	54
Partículas lajeadas, % máximo	40	44
Equivalente de arena, % mínimo	50	78
Pérdida de estabilidad por inmersión en agua, % máximo	25	-

Tabla 7.18. Comparaciones de las características de calidad del material pétreo.

7.4. PRUEBAS REALIZADAS AL ASFALTO

Como se comentó anteriormente el Asfalto para este trabajo de Tesis, fue proporcionado por la Empresa **SURFAX**, misma que realizó las pruebas necesarias para garantizar lo dispuesto en la Norma SCT N-CMT-4-05-001-05_1 de la calidad de los asfaltos utilizados.

Las pruebas que se realizaron al Asfalto cumplen en general con establecido en la Norma antes mencionada, tal y como se muestra en la Tabla 7.19.

Grado de Comportamiento	PG 64				PG 70				PG 76			PG 82			PG 88		
	-22	-28	-34	-40	-22	-28	-34	-40	-22	-28	-34	-22	-28	-34	-22	-28	-34
Temperatura máxima de diseño del pavimento (promedio de 7 días). °C	64				70				76			82			88		
Temperatura mínima de diseño del pavimento. °C	>-22	>-28	>-34	>-40	>-22	>-28	>-34	>-40	>-22	>-28	>-34	>-22	>-28	>-34	>-22	>-28	>-34
Asfalto original																	
Punto de inflamación: Cleveland ^[1] ; °C, min	230																
Viscosidad dinámica a 135°C ^[1] ; Pa·s (P ^[2]), máximo	3																
Módulo reológico de corte dinámico (G*/senδ) ^[1] ; kPa, mínimo	1																
Temperatura de prueba @ 10 rad/s; °C	64				70				76			82			88		
Después de prueba de película delgada y aire de horno ^[1]																	
Pérdida por calentamiento; %, máximo	1																
Módulo reológico de corte dinámico (G*/senδ) ^[1] ; kPa, mínimo	2,2																
Temperatura de prueba @ 10 rad/s; °C	64				70				76			82			88		
Después de envejecimiento en vasija de presión temperatura y aire																	
Temperatura de envejecimiento PAV; °C																	
En climas normales	100				100				100			100			100		
En climas desérticos	100				110				110			110			110		
Índice de endurecimiento físico [1], máximo	Reportar																
Módulo reológico de corte dinámico (G*/senδ) ^[1] ; kPa, mínimo	5 000																
Temperatura de prueba @ 10 rad/s; °C	25	22	19	16	25	22	19	16	31	28	25	34	31	28	34	31	28
Rigidez de Flexión S _f ; MPa, máximo (m= 0.3 m)	300																
Temperatura de prueba @ 60 s; °C	-12	-18	-24	-30	-12	-18	-24	-30	-12	-18	-24	-12	-18	-24	-12	-18	-24

Tabla 7.19. Requisitos de Calidad para Cementos Asfálticos Grado PG.
Fuente: Elaboración propia, a partir de Normas SCT Norma N-CMT-4-05-004-05-1.

7.5. PRUEBAS REALIZADAS A LA MEZCLA ASFÁLTICA

7.5.1. PRUEBA MARSHALL

Una vez que se realizaron las pruebas al agregado pétreo, se procedió a la elaboración de las probetas, para obtener el Diseño de la Mezcla para encontrar el contenido óptimo de asfalto para nuestro caso, de acuerdo a lo descrito en el Capítulo 4.2.

Las probetas fueron elaboradas de acuerdo al procedimiento Marshall. Se elaboraron un total de 15 probetas, con contenidos de asfalto del 4.5, 5.0, 5.5, 6.0 y 6.5 %. Las probetas se elaboraron con Asfalto AC-20 Modificado con un polímero Tipo I, con un Grado PG-76, para obtener un diseño similar al asfalto que finalmente fue utilizado para la obtención de los Módulos Resilientes.

Una vez que fueron fabricadas las probetas, se procedió a determinar los pesos secos, y sumergidos de las probetas con el fin de determinar las relaciones de vacíos de éstas, así como las densidades de las probetas para los cálculos de de la prueba Marshall.

La densidad que calculamos es la densidad relativa aparente, es decir, la relación entre la masa de aire de un volumen dado de material permeable, y la masa del mismo volumen de agua destilada, ambas a la misma temperatura.

El material permeable en nuestro caso, las probetas, es considerado en volumen total, es decir, con los vacíos tanto accesible, como inaccesibles.

En primer lugar se pesa la probeta seca en el aire y se registra como Peso seco (P_{seco}). Después, se sumerge la muestra en agua a 25 °C durante unos minutos, hasta que el agua penetre en los vacíos de la probeta. A continuación, se pesa la masa sumergida utilizando un dispositivo que tiene la balanza y se registra el Peso sumergido (P_{sum}). Figura 7.8.

Una vez pesada, se saca la muestra del agua y se seca rápidamente con un trapo hasta eliminar la película de agua de la superficie. Seguidamente se seca y se obtiene el peso húmedo (P_{hum}).

La expresión para calcular la densidad relativa aparente se define como:

$$Densidad = \frac{P_{seco}}{P_{humedo} - P_{sumergido}}$$

El cálculo de las Densidades de las probetas se encuentra en el Anexo I de este trabajo.



Figura 7.8. Obtención del Peso sumergido de las probetas (P_{sum}).

Una vez obtenidos los pesos y las propiedades geométricas de las probetas, se sumergen en agua a 60 °C (Figura 7.9.) tal como se establece en la Norma para diseño Marshall, y posteriormente se probaron para obtener su estabilidad y flujo, como se muestra en la Figura 7.10.



Figura 7.9. Probetas sumergidas en agua a 60 °C, para la obtención del flujo y estabilidad.

Una vez que se realizaron los ensayos en las probetas, se hicieron los cálculos para la obtención del contenido óptimo de asfalto teniendo para nuestro caso particular un **Contenido Óptimo del 6.0%**. En el Anexo I de este trabajo se encuentran las Tablas y Gráficas del cálculo con los resultados de las pruebas realizadas a la mezcla.

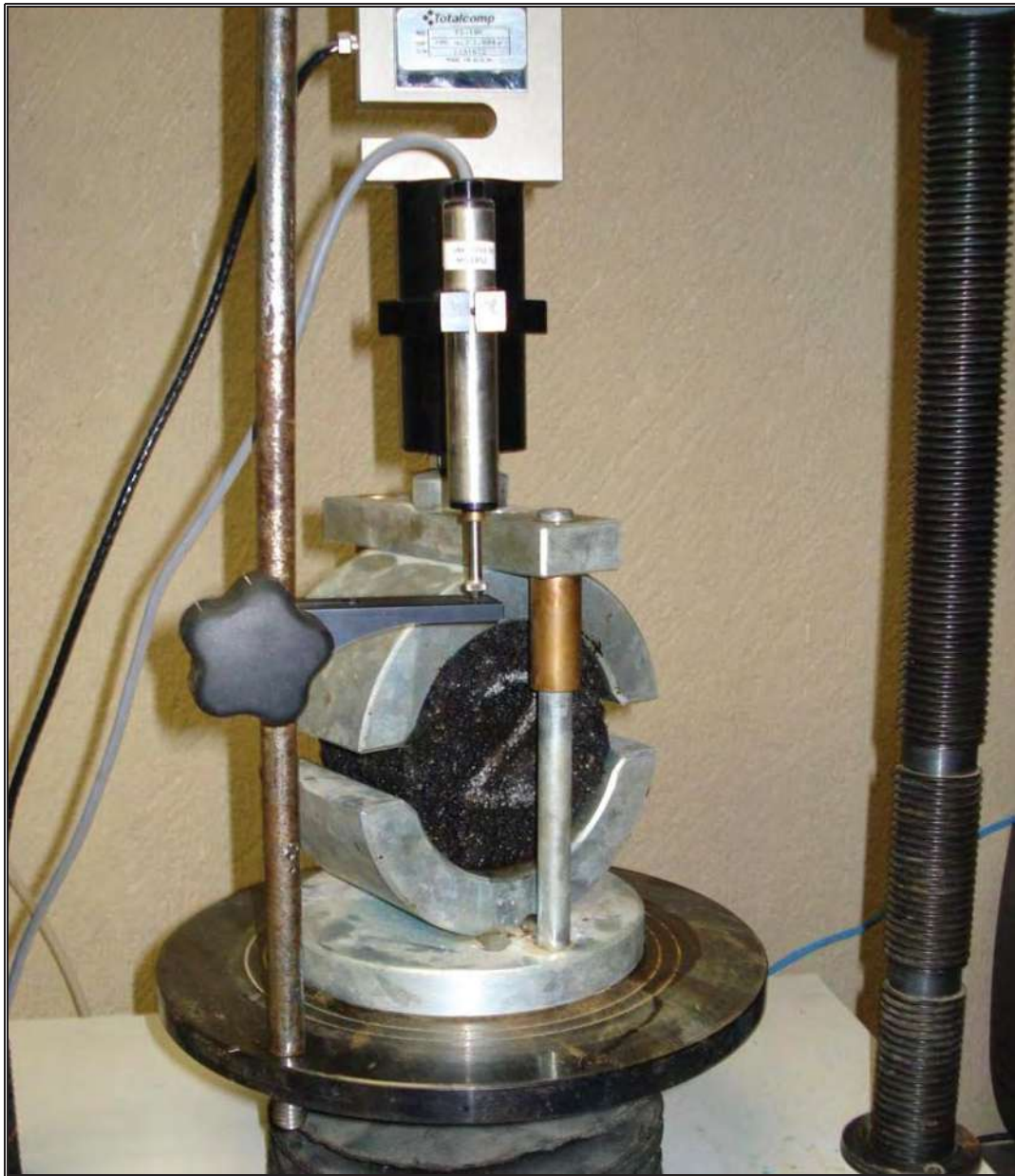


Figura 7.10. Montaje de las probetas en la prensa Marshall, para la obtención del flujo y la estabilidad de las probetas.

7.5.2. TRACCIÓN INDIRECTA

El ensayo de Tracción Indirecta reproduce el estado de tensiones en la fibra inferior de la capa asfáltica o zona de tracción. Es un método sencillo y práctico para caracterizar las propiedades de las mezclas asfálticas o evaluar el fallo provocado por tensiones de tracción.

El ensayo consiste en cargar una probeta cilíndrica, igual a la definida por el ensayo Marshall, con una carga de compresión diametral a lo largo de 2 generatrices opuestas, tal y como se muestra en la Figura 7.11 (a). Esta configuración de carga, que puede ser sencilla o repetida, provoca un esfuerzo de tracción relativamente uniforme en todo el diámetro del plano de carga vertical y esta tracción es la que agota la probeta y desencadena la rotura en el plano diametral; Figura 7.11 (b).

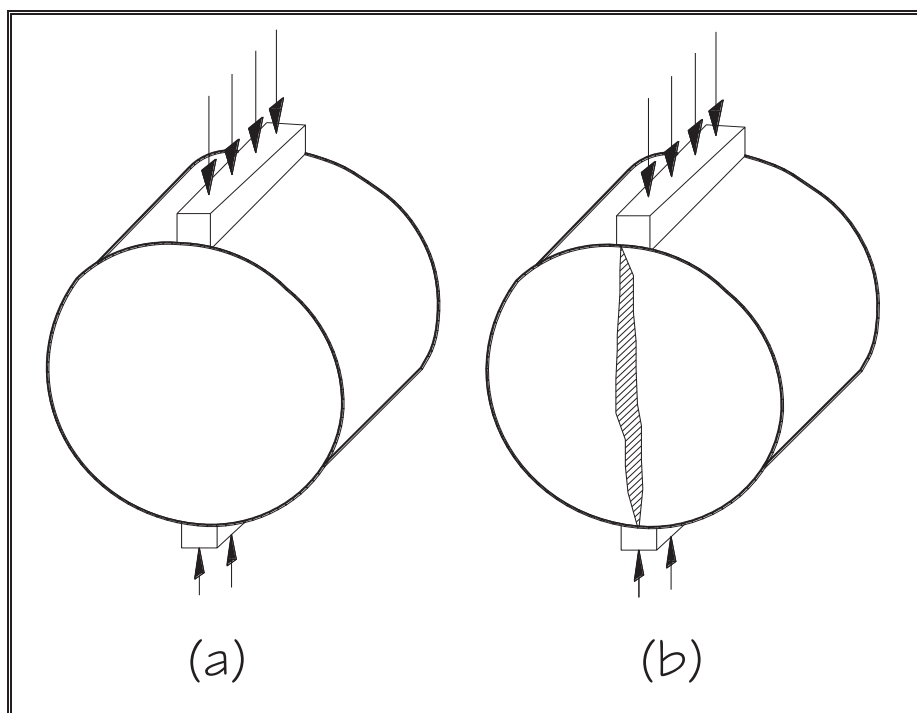


Figura 7.11. Configuración de la carga (a) y rotura del ensayo de tracción indirecta (b).
Fuente: Elaboración propia; a partir de Moreno Rubio, (2005).

El parámetro a medir es la carga de rotura de la probeta Figura 7.12., también se puede determinar el desplazamiento vertical y la deformación horizontal del diámetro de la probeta durante la realización del ensayo si se dispone de los

sistemas necesarios para medirlos. El procedimiento se usa tanto para probetas fabricadas en laboratorio como para las extraídas del pavimento.

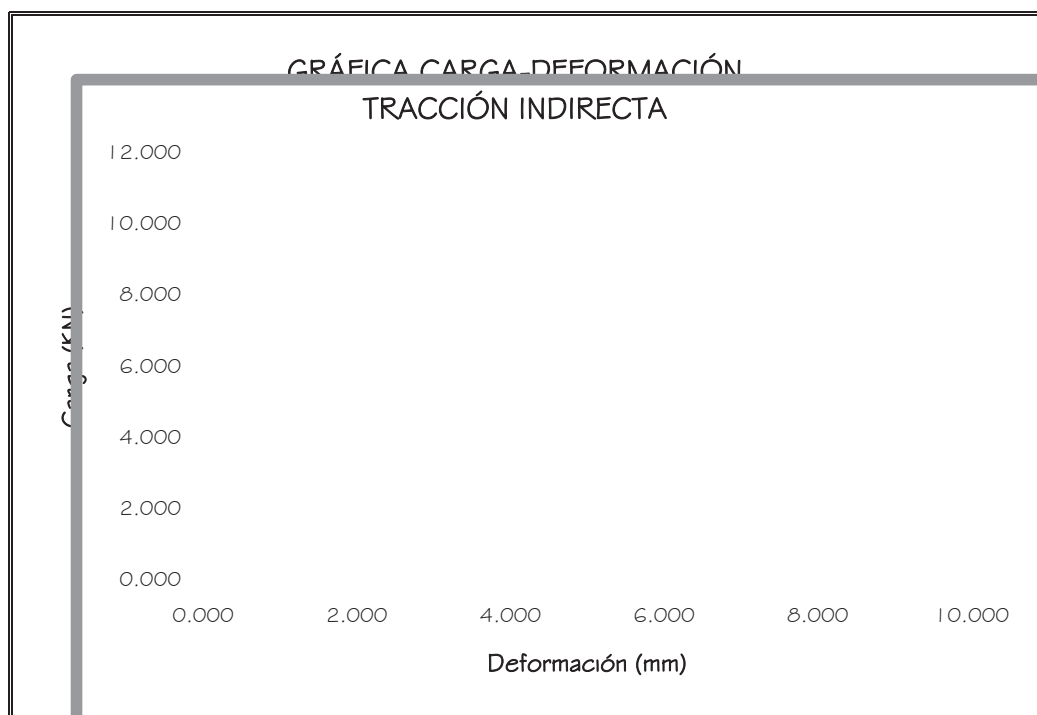


Figura 7.12. Curva de la Gráfica Carga-Deformación resultante de la prueba de Tracción Indirecta.

Hasta 1975, de este ensayo sólo se obtenía la fuerza de tracción indirecta pero desde entonces hasta ahora se ha profundizado en el estudio debido a las ventajas que presenta el ensayo. La más obvia es la simplicidad de la metodología, y este es un factor muy valorado por todas aquellas instituciones que necesitan caracterizar de una forma rápida, fiable y económica los pavimentos que gestionan.

El ensayo da información sobre propiedades elásticas resilientes, de fisuración térmica, de fisuración por fatiga, de deformación permanente y puede utilizarse para evaluar el efecto de la humedad en Mezclas Asfálticas.

Una vez que se hicieron las diversas pruebas a la Mezcla Asfáltica, se procedió a la elaboración de las Probetas para el ensayo de Módulo Resiliente, siguiendo lo establecido para la elaboración de las probetas del ensayo Marshall.

Se fabricaron un total de 19 Probetas con diferentes contenidos de Asfalto, variando desde el 4.5%, 6.0% (contenido óptimo) y 7.0%. Se fabricaron 3 probetas para cada contenido de Asfalto, y con los diferentes tipos de asfalto, PG-76 y PG-82, respectivamente. La probeta 19 se probó a Tracción Indirecta,

para determinar la magnitud de la carga empleada para el ensayo de Módulo Resiliente.

7.5.3. MÓDULO RESILIENTE

Una vez realizadas las pruebas anteriores, se procedió a la determinación de los Módulos Resilientes, mediante el equipo CRT-NU14. El ensayo se realizó a una temperatura de 20 °C; lo anterior mediante el empleo de una cámara que regula la temperatura de prueba en el equipo NU de Copper, y siguiendo la Norma AASHTO T-161, para la determinación del Módulo Resiliente.

El equipo CRT-NU14 de Copper es un equipo servo-neumático que permite determinar de una forma directa el Módulo Resiliente de las probetas ensayadas. Se basa en el Método AASHTO-T-161, de determinación del Módulo Resiliente mediante el ensayo de Tracción Indirecta en probetas cilíndricas. Este equipo cuenta con un software que calcula directamente el Módulo Resiliente y aplica los pulsos de carga con una frecuencia de 0.33 Hz. Los ensayos fueron realizados en el **Laboratorio de Materiales de la Empresa PACCSA (Proyectos, Asesoría y Control de Calidad, S.A.)**, en la Cd. de México. En la Figura 7.13. se muestra la probeta durante el ensayo de Modulo Resiliente.

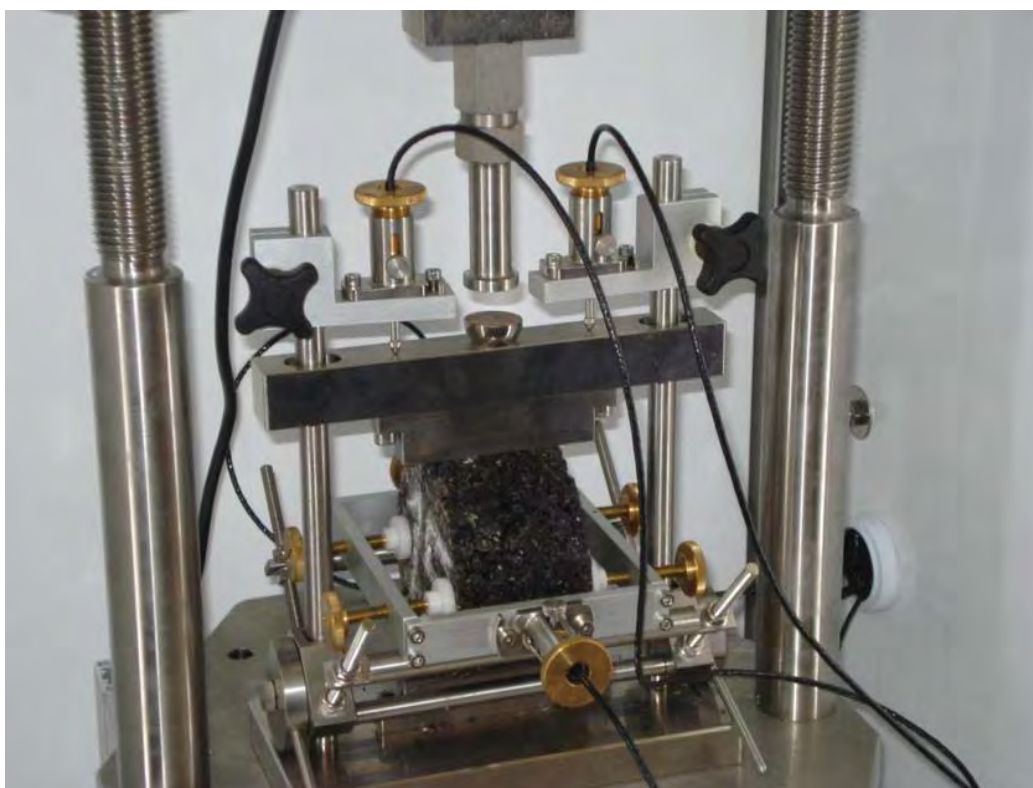


Figura 7.13. Montaje de la Probeta durante el ensayo de Módulo Resiliente.

En el Anexo I de esta Tesis, se muestran los cálculos de los resultados obtenidos del ensayo de Módulo Resiliente con la Prensa CRT-NU 14.

A continuación describiremos brevemente el procedimiento de ensayo, para la obtención del Módulo Resiliente.

- Primero se colocan las probetas dentro de la cámara térmica del Equipo CRT-NU 14, a fin de estabilizarlas a la temperatura de ensayo, que es de 20 °C; y se dejan durante un periodo de 2 hrs.
- Posteriormente se coloca la probeta dentro de las mordazas para hacer el ensayo de Módulo Resiliente, mediante compresión diametral. Se debe tener cuidado al centrar la probeta en las mordazas, tal como se muestra en la Figura 7.14., para garantizar una correcta obtención del Módulo Resiliente.

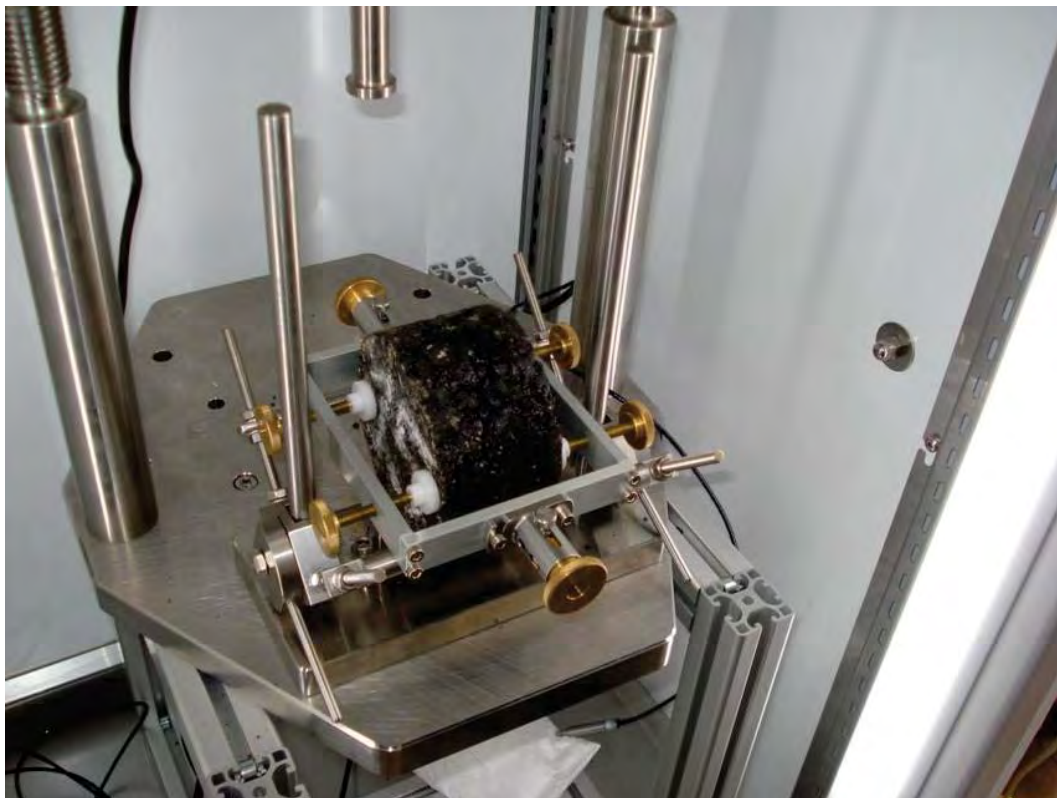


Figura 7.14. Sujeción de la probeta en las mordazas, previo al ensayo de Módulo Resiliente.

- Una vez asegurada la probeta, se monta el dispositivo de sujeción y se coloca dentro de la prensa para hacer el acomodo de los dispositivos de lectura de deformación en la probeta; llamados LVDT's. Estos son colocados en el plano diametral de la probeta, uno por cada plano diametral de ésta.
- Se debe revisar que los LVDT's estén en la posición correcta para hacer las mediciones; para lo cual el equipo CRT-NU14 cuenta con un Software que puede verificar que la disposición de estos sea la correcta.
- Una vez asegurados correctamente los dispositivos, se procede a aplicar la carga de pre-acondicionamiento a la probeta. En este momento la prueba da inicio a la parte del Software de la prensa CRT-NU14, por lo que el ajuste lo hace automáticamente, así como el ensayo del Módulo Resiliente.
- Antes de que el Software empiece a correr el programa, es necesario ingresar los datos de la probeta. Datos tales como: número de probeta, densidad, tipo de asfalto, método de compactación, etc.
- Ingresados los datos, se aplica la carga de pre-acondicionamiento y la prensa empieza el ensayo de Módulo Resiliente. La prensa realiza la aplicación de varios pulsos de carga, después de lo cual se pide hacer un giro de 90° a la probeta una vez que ha concluido el ensayo sobre el primer diámetro de la probeta. Para lo cual, se desmonta la probeta, y se gira 90° sobre su eje, y se vuelve a colocar en las mordazas siguiendo el mismo procedimiento descrito anteriormente. Se vuelve a montar el dispositivo de sujeción y se continúa con el ensayo.
- Se vuelve a hacer el cálculo del Módulo en la otra cara diametral de la probeta, y una vez hecho lo anterior; se concluye con el ensayo. El equipo CRT-NU14, hace el cálculo con el Software, haciendo un ajuste de los Módulos obtenidos y entrega un reporte impreso con los datos calculados, en donde se especifican el Módulo Resiliente Instantáneo y Módulo Resiliente Ajustado, así como la deformación horizontal en la probeta y el tiempo total de carga.

8. ANÁLISIS DE RESULTADOS

La presente Tesis, se enfoca a la Determinación de los Módulos Resilientes en Mezclas Asfálticas con asfaltos modificados, a fin de complementar el estudio realizado por Laura Isela (2007), en donde se determinaron los Módulos Resilientes en Mezclas Asfálticas con Asfalto AC-20. Lo anterior a fin de determinar la variación que existe del Módulo, con respecto al tipo y contenido de asfalto de la mezcla.

A continuación haremos el análisis de los resultados obtenidos de las pruebas de Módulo Resiliente, que fueron realizadas en el Laboratorio de Materiales de la **Empresa PACCSA (Proyectos, Asesoría y Control de Calidad, S.A.)**. En el Anexo 2 de esta Tesis, se presentan los resultados obtenidos del ensayo de Módulo Resiliente.

8.1. ENSAYO DE MÓDULO RESILIENTE

De los resultados obtenidos, se puede observar que la respuesta del Módulo fue un tanto como se esperaba; es decir, en general, de acuerdo a lo que se comentó en el Capítulo 6 de este trabajo, se sabe que el Módulo Resiliente decrece con el aumento en el contenido de asfalto, como se puede observar en la Figuras 8.1. y 8.2.

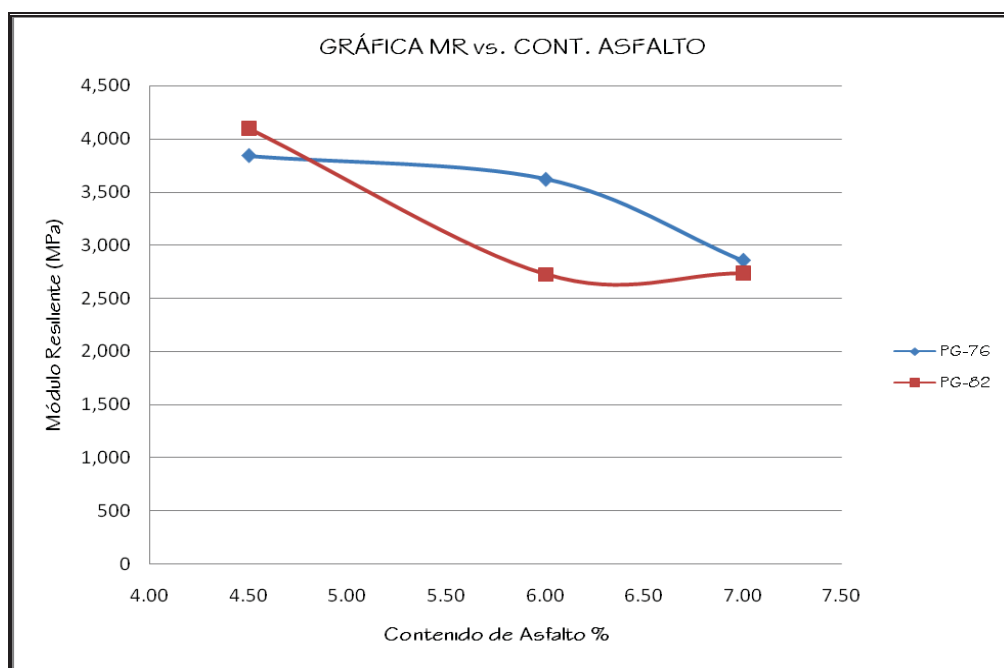


Figura 8.1. Grafica del Módulo Resiliente vs. Contenido de Asfalto.

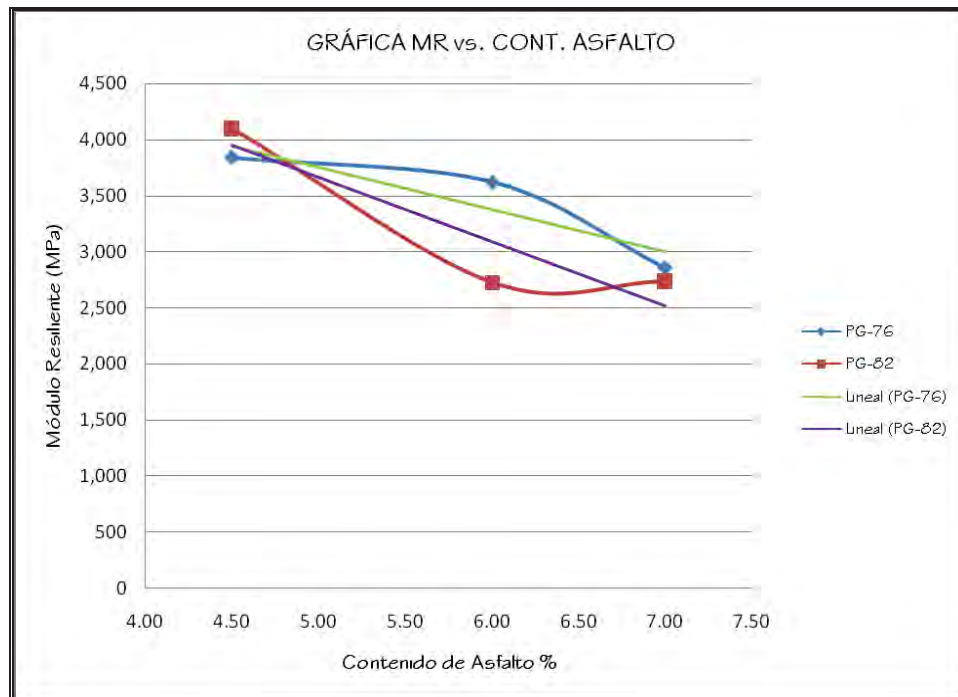


Figura 8.2. Gráfica con línea de Tendencia del Módulo Resiliente vs. Contenido de Asfalto.

De estas gráficas podemos observar además, que los Módulos obtenidos del Asfalto PG-82 resultaron menores que los Módulos del Asfalto PG-76; esto es debido a que las temperaturas de compactación para ambas probetas fueron iguales, y el asfalto PG-82 es un asfalto más duro, es decir, para lograr el mismo grado de compactación, se requiere de una temperatura más elevada, por lo que los vacíos en las probetas con dicho asfalto resultaron mayores. Esto se puede comprobar en la Figura 8.3.

Otra anotación importante es que, a menor contenido de vacíos en la probeta, mayor es el Módulo Resiliente, que también queda de manifiesto en la Figura 8.4. en donde se puede apreciar la tendencia del Módulo con respecto a la Relación de Vacíos en las probetas. Aunque el comportamiento no resultó del todo ideal para los contenidos de asfalto del 4.5%, (para los Asfaltos PG-76 y PG-82 respectivamente) en los contenidos del 6.0 y el 7.0% de asfalto, se puede observar en la línea de tendencia, que efectivamente el Módulo Resiliente decrece al aumentar las relaciones de vacíos en las probetas. Figuras 8.5 y 8.6.

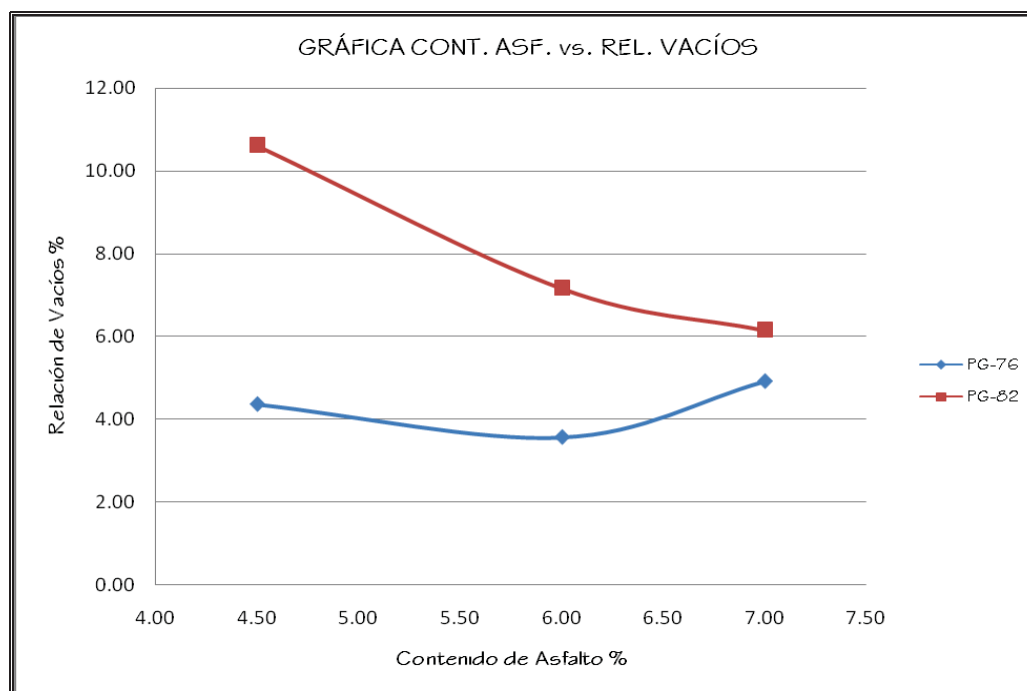


Figura 8.3. Gráfica del Contenido de Asfalto vs. Relación de Vacíos en las probetas.

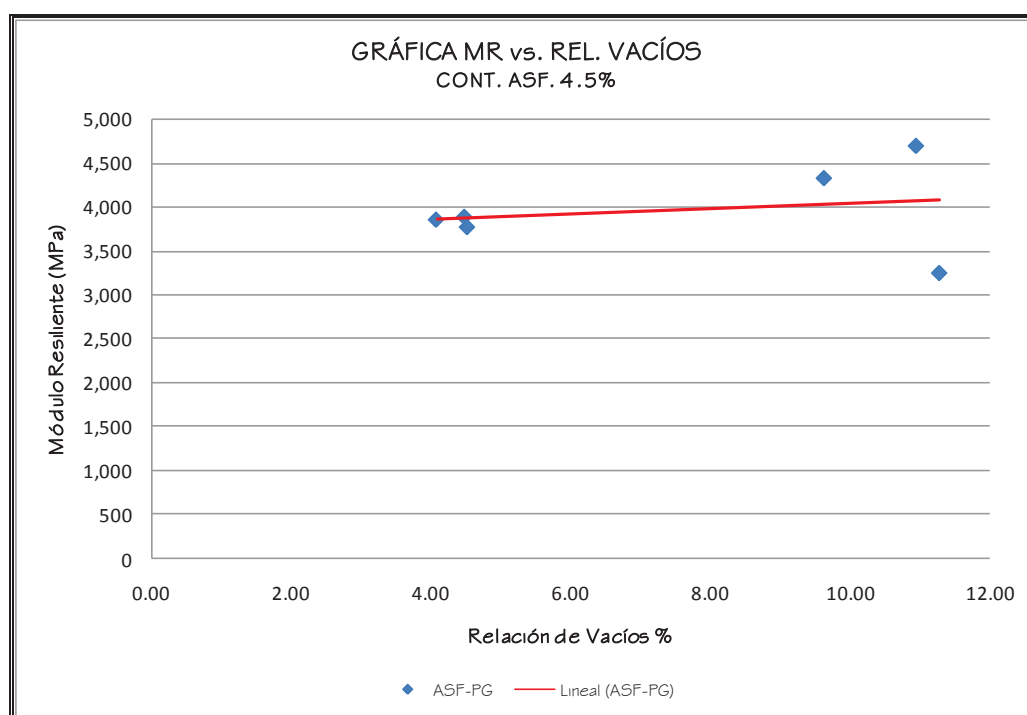


Figura 8.4. Gráfica del Módulo Resiliente vs. Relación de Vacíos, para un contenido de asfalto del 4.5%, para los Asfaltos PG-76 y PG-82.

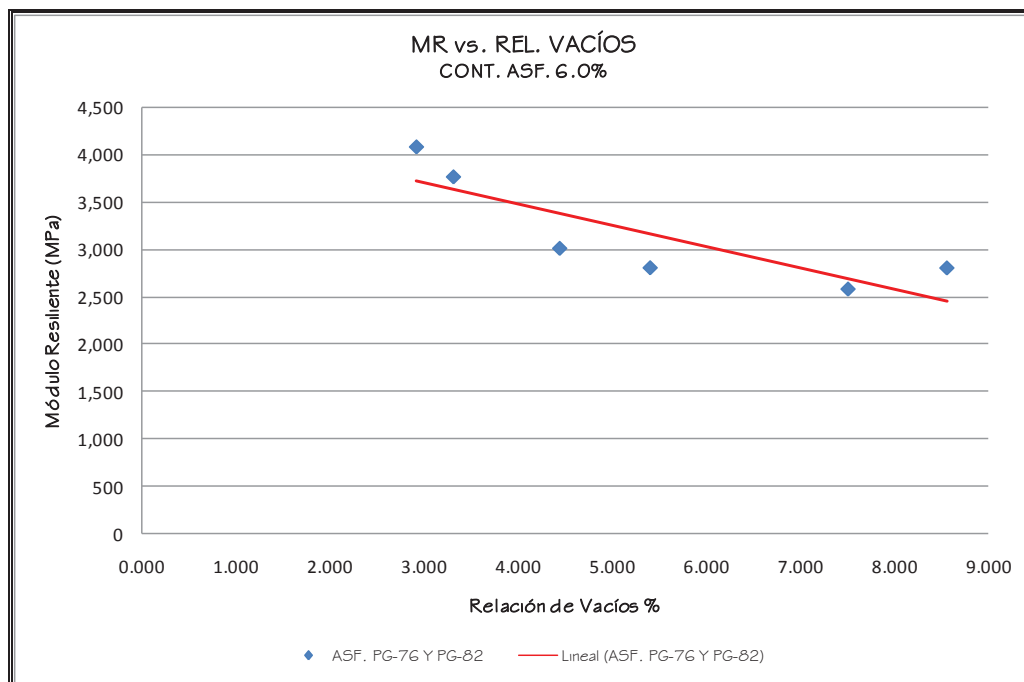


Figura 8.5. Gráfica del Módulo Resiliente vs. Relación de Vacíos, para un contenido de asfalto del 6.0%, para los Asfaltos PG-76 y PG-82.

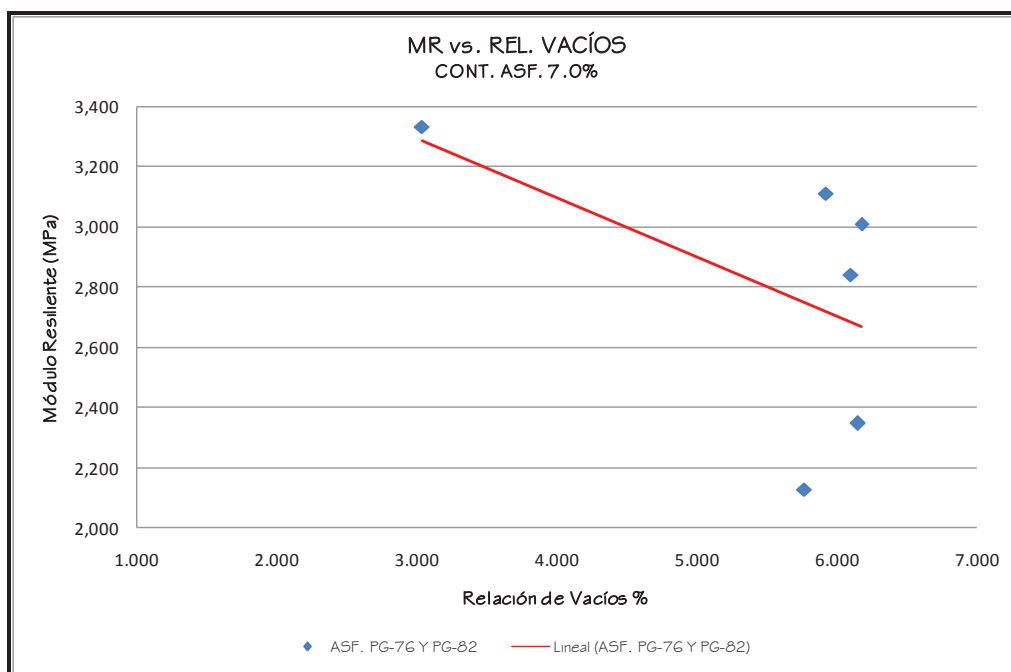


Figura 8.6. Gráfica del Módulo Resiliente vs. Relación de Vacíos, para un contenido de asfalto del 7.0%, para los Asfaltos PG-76 y PG-82.

Otro parámetro importante es la Densidad de la Mezcla. Aunque la ésta es similar en casi todas las probetas, en las Figuras 8.7, 8.8 y 8.9., se puede observar que al aumentar la Densidad, aumenta el Módulo. Sin embargo, se puede ver que para un Contenido de Asfalto del 4.5%, nuevamente la tendencia sale de los parámetros deseados. Para los contenidos del 6.0 y 7.0% el comportamiento es el esperado.

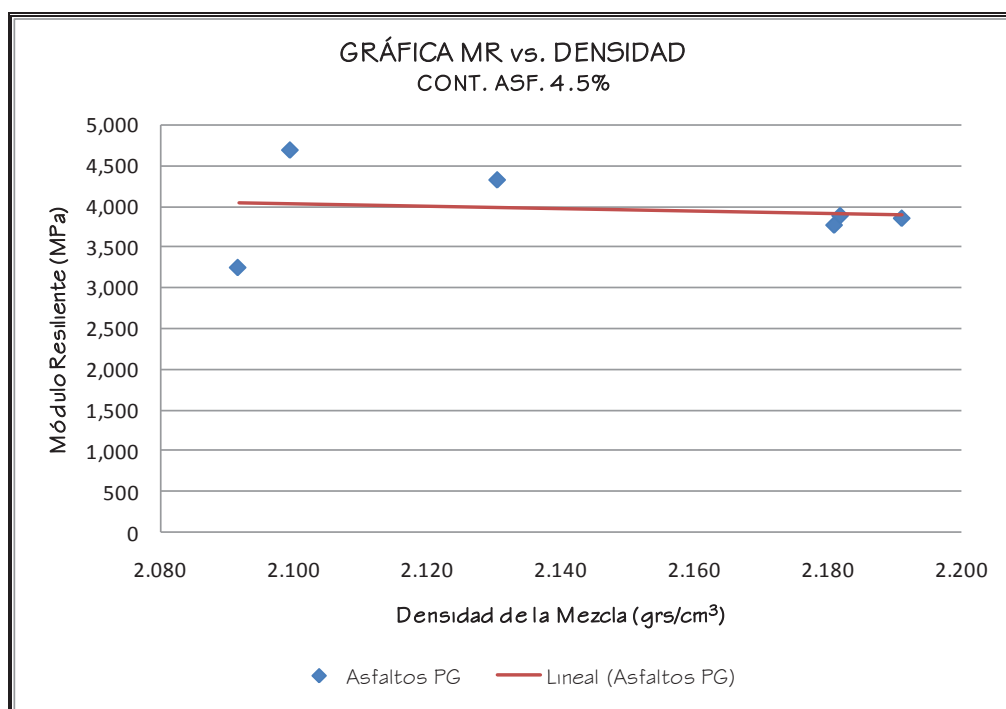


Figura 8.7. Gráfica del Módulo Resiliente vs. Densidad de las probetas, para un contenido de asfalto del 4.5%, para los Asfaltos PG-76 y PG-82.

En esta Gráfica se observa que no se cumple con los valores esperados; (a mayor Densidad, mayor Módulo Resiliente) esto puede ser debido a que la temperatura de compactación en las probetas para los Contenidos de Asfalto del 4.5% no fue la ideal, es decir, probablemente se enfrió la mezcla antes, y al compactar quedaron mayores huecos en la probeta. Al tener mayor densidad, se tiene menor porcentaje de huecos, lo que hace que la deformabilidad de las probetas sea menor; y en este caso se tuvieron mayores porcentajes de huecos, lo que hace que los valores del Módulo sean menores.

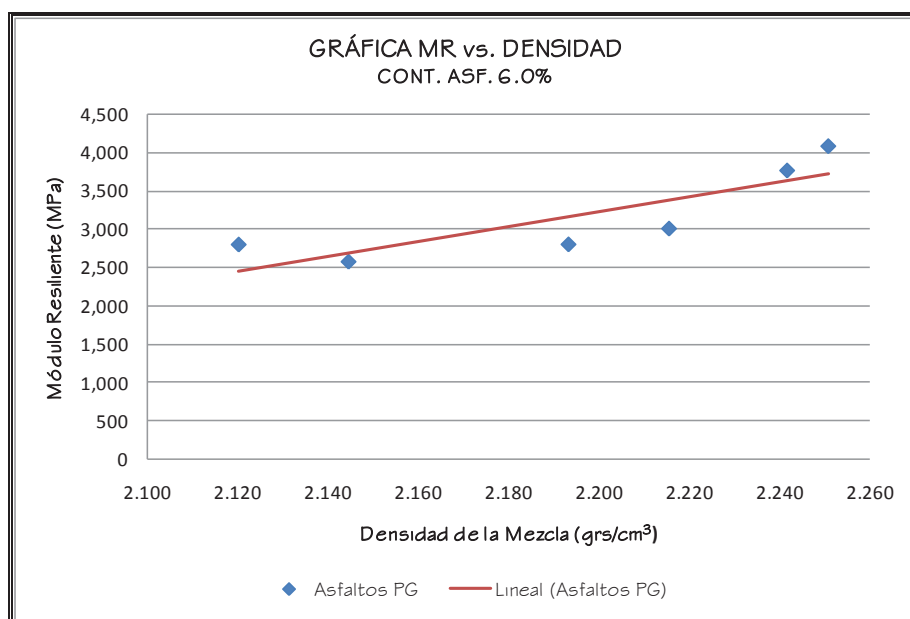


Figura 8.8. Gráfica del Módulo Resiliente vs. Densidad de las probetas, para un contenido de asfalto del 6.0%, para los Asfaltos PG-76 y PG-82.

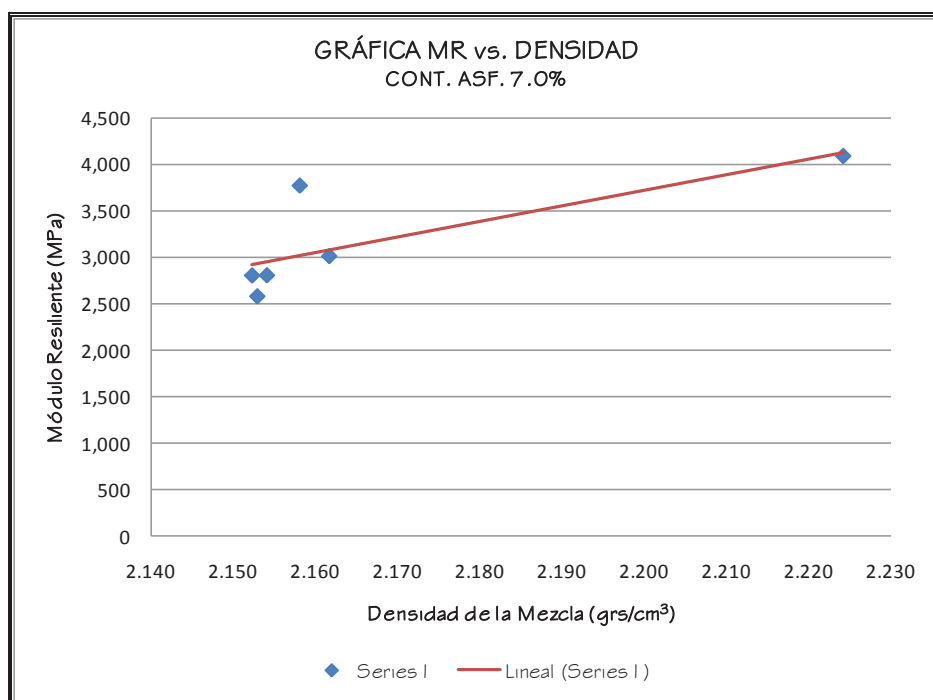


Figura 8.8. Gráfica del Módulo Resiliente vs. Densidad de las probetas, para un contenido de asfalto del 7.0%, para los Asfaltos PG-76 y PG-82.

En las Figuras 8.8 y 8.9., se puede observar que el Módulo crece al aumentar la densidad en la mezcla, por lo tanto se cumple con los resultados esperados.

Con lo anterior podemos observar que el valor del Módulo Resiliente depende de muchos factores, por lo que no resulta fácil considera un valor único del Módulo para un material en general, al menos que se pueda asegurar que tiene las mismas características.

Una vez que hemos observado los comportamientos del Módulo, y a pesar de que se ha iniciado con una serie de estudios sobre el Módulo Resiliente en la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, podemos decir que falta mucho por investigar con los materiales de la región, ya que no es posible homogenizar el valor del Módulo para un material, sin tomar en cuenta las características de las diferentes regiones del Estado, tales como el clima.

9. CONCLUSIONES

Durante el desarrollo de esta Tesis, se ha hablado de la utilidad que tiene la obtención del Módulo Resiliente como parámetro para la caracterización de las Mezclas Asfálticas; así mismo se han analizado los diferentes componentes de una Mezcla Asfáltica. Lo anterior nos lleva a poder determinar el análisis de los resultados obtenidos en este trabajo, y evaluar los diferentes componentes y cómo actúan éstos en la obtención del Módulo Resiliente. A continuación se hace una breve descripción y un análisis de los datos y resultados obtenidos.

Se determinaron los Módulos Resilientes en Mezclas Asfálticas con granulometría Densa, variando en tipo de asfalto; el primero con un asfalto PG-76 y el segundo con un asfalto PG-82. Además se variaron los contenidos de asfalto en las probetas, con puntos por arriba y abajo del contenido óptimo de asfalto, determinado mediante el Diseño Marshall; estos fueron: 4.5%, 6.0% y 7.0%.

De los resultados obtenidos, podemos decir que el comportamiento que se esperaba de las mezclas, fue en general el esperado en comparación a los resultados de otros trabajos de investigación realizados en diferentes lugares, y a los cuales se hizo mención en este trabajo. Pero son resultados que aportan mucho al campo de investigación para caracterizar los materiales empleados para la elaboración de Mezclas en la región de Morelia.

Analizaremos los resultados de Módulo Resiliente, en función de las diferentes variantes en los componentes de la Mezcla.

9.1. VALORES DEL MÓDULO RESILIENTE EN FUNCIÓN DEL TIPO DE ASFALTO

Los valores del Módulo Resiliente resultaron mayores para el Asfalto PG-76, debido a que las temperaturas de compactación para las Mezclas en ambos casos fueron iguales, y el Asfalto PG-82 es un asfalto más duro; por lo que existieron mayores contenidos de vacíos en la mezcla lo que resulta en valores del Módulo Resiliente menores. Aunque en general, los valores del Módulo obtenidos para ambos asfaltos fueron muy similares para los contenidos del 4.5 y 7.0%, se observó que para el contenido óptimo (6.0%) los valores distaron mucho entre sí. Esto puede ser debido a la variación de la temperatura en la compactación de las probetas, aunque en general en los Módulos Resilientes resultaron mayores para el Asfalto PG-76, como ya se mencionó.

Sin embargo hay que recordar que ambos asfaltos tienen propiedades diferentes, que les confieren resistencia de acuerdo al lugar en donde se vayan a emplear. Por lo que se puede esperar que el valor del Módulo Resiliente sea mayor para el Asfalto PG-82 en temperaturas mayores, del valor que se puede esperar para el Asfalto PG-76.

9.2. VALORES DEL MÓDULO RESILIENTE EN FUNCIÓN DEL CONTENIDO DE ASFALTO

En el caso del Contenido de Asfalto, se pudo observar que a medida que el contenido de asfalto aumenta, el Módulo Resiliente decrece. Este comportamiento se presentó para ambos tipos de asfalto (PG-76 y PG-82) con lo que queda comprobado lo anterior.

Esto es debido a que al aumentar el Contenido de Asfalto, la Mezcla tiende a ablandarse, es decir, aunque hay menor contenido de vacíos; existe mayor asfalto en la probeta, y las deformaciones son absorbidas por el asfalto en vez del agregado pétreo lo que hace que el Módulo disminuya.

9.3. VALORES DEL MÓDULO RESILIENTE EN FUNCIÓN DE LA RELACIÓN DE VACÍOS EN LA MEZCLA

La relación de vacíos en la mezcla, resulta ser un parámetro muy importante para la obtención del Módulo Resiliente.

Al aumentar el porcentaje de vacíos en la Mezcla, disminuye el Módulo Resiliente. Este comportamiento se presentó para ambos tipos de Asfalto (PG-76 y PG-82), con lo que se puede observar que no importa el tipo de asfalto, ya que éste parámetro va de la mano con el Contenido y no con el Tipo de Asfalto de la Mezcla, como se pudo observar en el Capítulo 8 de esta Tesis, el porcentaje de huecos en la Mezcla decrece a medida que el Contenido de Asfalto aumenta.

Sin embargo, esto no quiere decir que al aumentar el Contenido de Asfalto (y por lo tanto disminuir el porcentaje de huecos en la Mezcla) aumenten los valores del Módulo Resiliente, ya que como se pudo observar, al aumentar el Contenido de Asfalto, decrecen los valores del Módulo. Es por eso que se debe tener especial cuidado al hacer el diseño de la Mezcla, ya que los valores del Módulo Resiliente serán mayores para el CONTENIDO ÓPTIMO DE ASFALTO.

9.4. VALORES DEL MÓDULO RESILIENTE EN FUNCIÓN DE LA DENSIDAD

De los resultados obtenidos, se pudo observar que los valores del Módulo Resiliente, aumentan al aumentar la densidad de la mezcla. Esto es debido a que al aumentar la densidad, disminuye el porcentaje de huecos en la mezcla lo que lleva a obtener valores del Módulo Resiliente mayores.

Podemos concluir de acuerdo a los resultados obtenidos en esta Tesis, que el valor del Módulo Resiliente, es un parámetro muy importante en la caracterización de las Mezclas Asfálticas que ayuda a obtener mejor diseño más durable y con por lo tanto con un mejor desempeño.

Aunque se está avanzando en este aspecto, todavía falta mucho por hacer en el campo de investigación para caracterizar los materiales de la región de Morelia. Y por supuesto, será necesario normalizar el ensayo de Módulo Resiliente, adaptándolo a las condiciones imperantes en el País.

Hay que reconocer que a pesar de que el Módulo Resiliente es un parámetro muy importante para la caracterización de las Mezclas, su obtención mediante pruebas de laboratorio se hace difícil, ya que a pesar de que el ensayo no es complicado de llevar a cabo, el equipo con el que se obtienen éstos valores es muy costoso y algo complejo en su funcionamiento, por lo que resulta complicado su obtención para el diseño de Mezclas.

Sin embargo, en el **Laboratorio de Materiales de la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo**, se está fabricando un equipo diseñado por los Doctores Carlos Chávez Negrete y Jorge Alarcón Ibarra, a fin de poder obtener Módulos Resilientes tanto en Mezclas Asfálticas como en suelos granulares para poder hacer mejores diseños, que resulten en caminos más resistentes y durables.

A N E X O S

ANEXO I

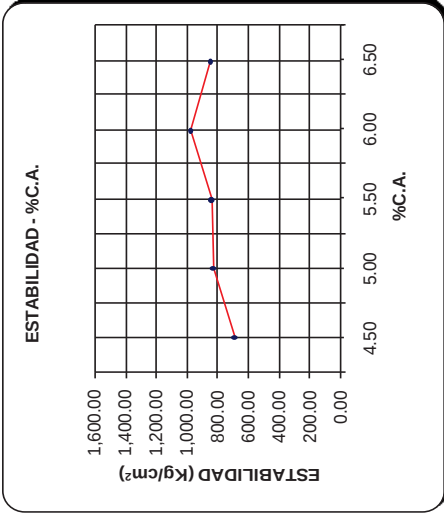
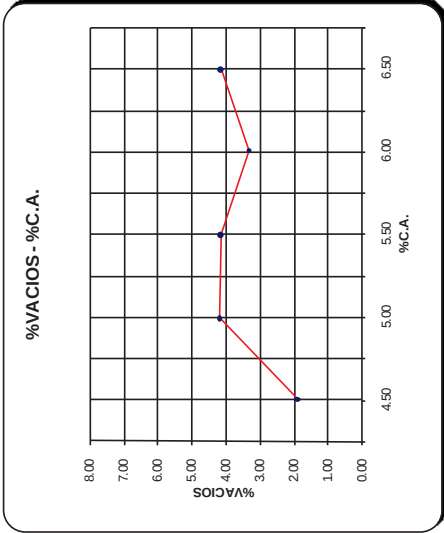
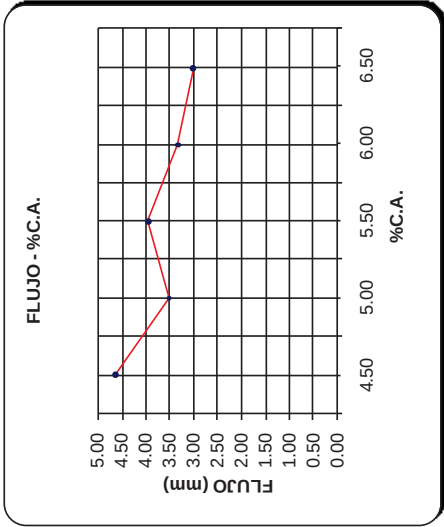
Medición de Módulos Resilientes en Mezclas Asfálticas con Asfaltos Modificados Grado PG-76 y PG-82

A continuación, se muestran los cálculos de las pruebas realizadas a la Mezcla Asfáltica. Se realizó la medición de las probetas, además de cálculo de los pesos húmedo y superficialmente seco, para la obtención de las Densidades de éstas. La tabla siguiente, muestra el cálculo de la Prueba Marshall, así como las Gráficas para la obtención del Contenido Óptimo de Asfalto.

[illegible]

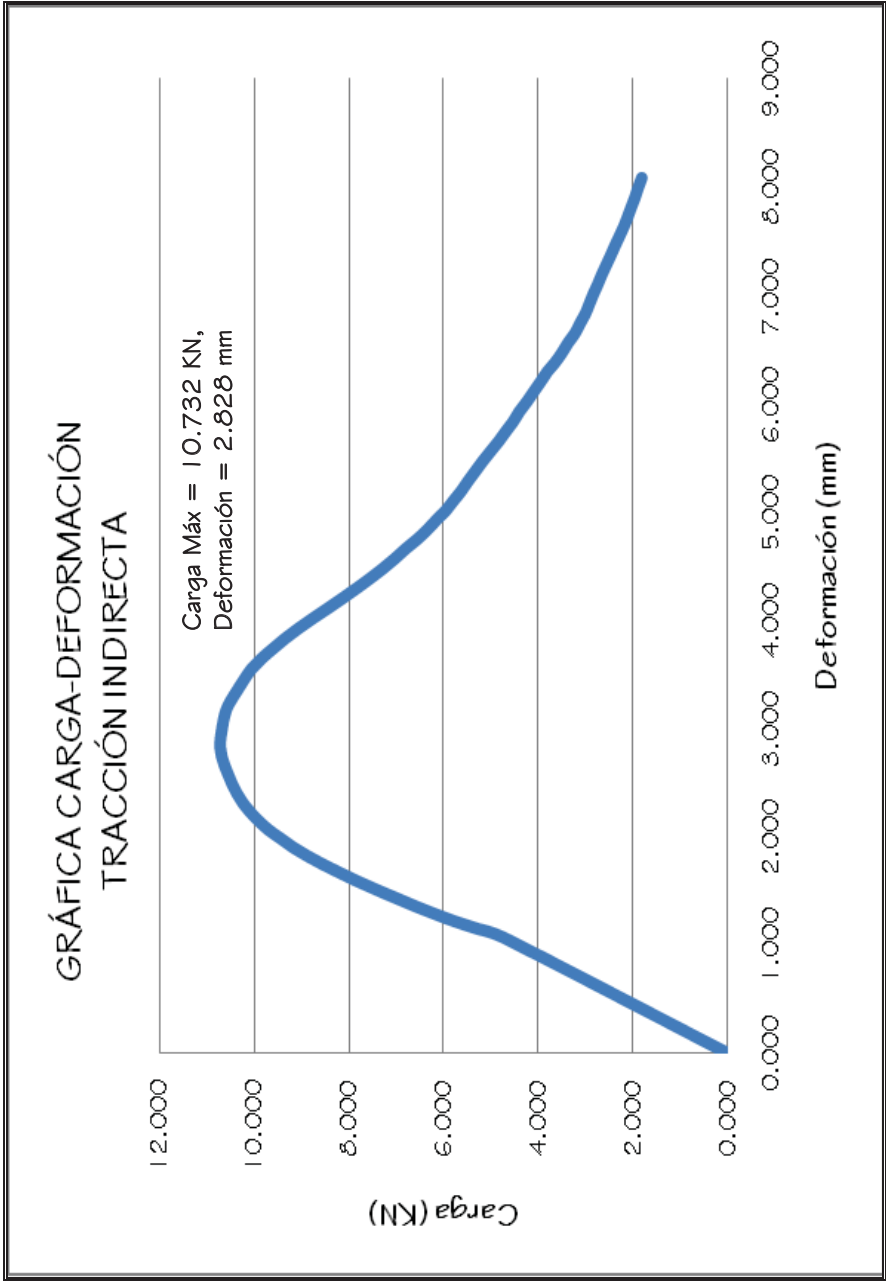
La mezcla debe cumplir con lo siguiente:

CONCEPTO	NORMA SCT.	Unidad
ESTABILIDAD	800.00 Kg Mínimo	Kg
FLUJO	2.0 a 3.5 mm	mm
%VACIOS	3.0 a 5.0 %	%
%V.A.M.	14.0 % Mínimo	%
P.V.M.	SIN NORMA	Kg/m ³
%VACIOS LLENADOS POR EL C.A.	65.0 a 75.0 %	%



I.- La mezcla asfáltica cumple satisfactoriamente con los requisitos de calidad siguientes, para un contenido optimo de 6.0%

Gráfica de resultados de la prueba de Tracción Indirecta.



Los resultados obtenidos de la prueba de Tracción Indirecta, arrojan una Carga Máxima de 10.732 KN, y una Deformación de 2.828 mm. Estos resultados sirven para obtener la carga máxima que será aplicada en el ensayo de Módulo Resiliente. Esta será menor a la obtenida, para asegurar que los esfuerzos dentro de la probeta no sobrepasen a los máximos, ya que la prueba de Módulo Resiliente es una prueba no destructiva.

Medición de Módulos Resilientes en Mezclas Asfálticas con Asfaltos Modificados Grado PG-76 y PG-82

A continuación se presenta el cálculo de las densidades y los porcentajes de vacíos de las probetas elaboradas, para la obtención del Módulo Resiliente, obtenidas con el método de la parafina.

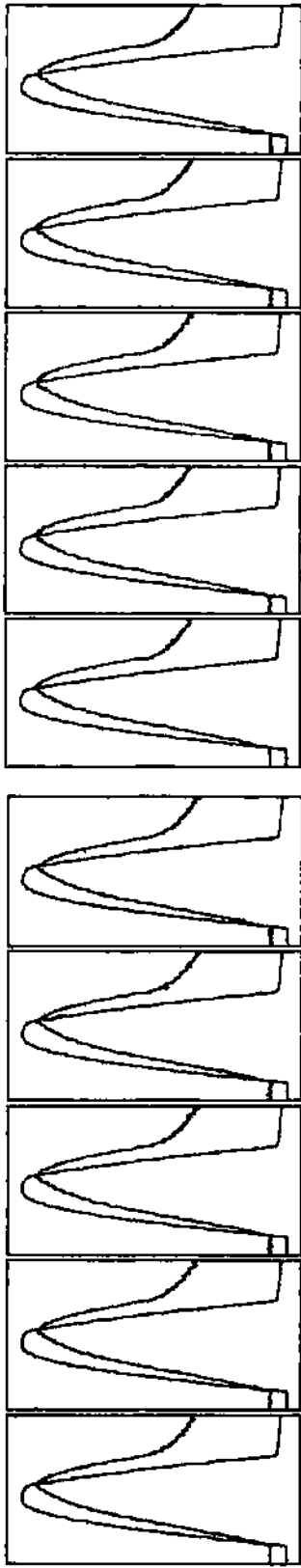
Probeta No.	CONT. ASF %	TIPO ASF.	Peso Seco (grs)	Peso c/parafina (grs)	Peso Parafina (grs)	Peso sumergido (grs)	Vol parafina	Vol Probeta	Densidad Probeta	% Asf. Por Peso de Mezcla	Peso Vol. Probeta	% Vol. Cem. Asf.	% Vol. Mat. Pétreo	VACIOS EN LA MEZCLA %
1	4.50	PG-76	1.002	1.021	19.00	549	12.756	459.244	2.182	4.306	2.182	8.700	83.851	7.449
2	4.50		1.015	1.034	19.00	558	12.756	463.244	2.191	4.306	2.191	8.736	84.206	7.058
3	4.50		1.030	1.043	13.00	562	8.728	472.272	2.181	4.306	2.181	8.696	83.816	7.488
4	6.00	PG-76	1.033	1.048	15.00	579	10.071	458.929	2.251	5.660	2.251	11.797	85.280	2.922
5	6.00		1.034	1.053	19.00	579	12.756	461.244	2.242	5.660	2.242	11.749	84.935	3.316
6	6.00		1.036	1.050	14.00	573	9.399	467.601	2.216	5.660	2.216	11.612	83.942	4.446
7	7.00	PG-76	1.040	1.063	23.00	580	15.442	467.558	2.224	6.542	2.224	13.474	83.486	3.040
8	7.00		1.045	1.067	22.00	568	14.770	484.230	2.158	6.542	2.158	13.072	80.999	5.928
9	7.00		1.046	1.070	24.00	570	16.113	483.887	2.162	6.542	2.162	13.094	81.134	5.772
10	4.50	PG-82	1.021	1.043	22.00	549	14.770	479.230	2.131	4.306	2.131	8.495	81.878	9.627
11	4.50		1.010	1.037	27.00	536	18.127	482.873	2.092	4.306	2.092	8.340	80.385	11.276
12	4.50		1.004	1.029	25.00	534	16.784	478.216	2.099	4.306	2.099	8.371	80.685	10.944
13	6.00	PG-82	1.037	1.057	20.00	560	13.427	483.573	2.144	5.660	2.144	11.239	81.248	7.513
14	6.00		1.028	1.052	24.00	551	16.113	484.887	2.120	5.660	2.120	11.112	80.324	8.564
15	6.00		1.035	1.056	21.00	570	14.099	471.901	2.193	5.660	2.193	11.495	83.097	5.408
16	7.00	PG-82	1.046	1.076	30.00	570	20.141	485.859	2.153	6.542	2.153	13.041	80.805	6.154
17	7.00		1.050	1.080	30.00	572	20.141	487.859	2.152	6.542	2.152	13.037	80.782	6.181
18	7.00		1.043	1.071	28.00	568	18.798	484.202	2.154	6.542	2.154	13.048	80.849	6.103
														6.146

Densidad Asfalto = 1.08
Densidad Pétreo = 2.49
Densidad Parafina = 1.489

ANEXO 2

Medición de Módulos Resilientes en Mezclas Asfálticas con Asfaltos Modificados Grado PG-76 y PG-82

Fecha:	09/02/2008	
Referencia:	Probeta No. 1	Para Carpeta
Temperatura de la probeta:	20°C	AC-20
Diámetro de la probeta:	100 mm	Marshall
Espesor de la probeta:	58.4 mm	2.184 (g/ml ³)
Coefficiente de Poisson:	0.35	AAASHO T-161
Tiempo de subida deseado (ms):	124 m. secs	4.5 %
Deformación horiz. Deseada:	5 microns	PG 76
Ensayo sobre el primer diámetro		
Ensayo sobre el segundo diámetro		



Pulse No	Fuerza vertical (KN)	Esfuerzo horizontal (Kpa)	Factor de Pulso		Tiempo (m. secs)		Modulo de Ambró -I (Mpa)	
			Deseada	Real	Deseada	Real	Deseada	Ajustado
1	1.87	203.8	0.60	0.65	5.0	5.0	125.0	3927
2	1.87	203.6	0.60	0.66	5.0	5.0	125.0	3927
3	1.87	203.6	0.60	0.66	5.0	5.0	125.0	3960
4	1.87	203.7	0.60	0.66	5.0	5.0	125.0	3939
5	1.87	203.5	0.60	0.66	5.0	5.0	125.0	3944
Media	1.87	203.6	0.60	0.66	5.0	5.0	124.8	3948

Pulse No	Fuerza vertical (KN)	Esfuerzo horizontal (Kpa)	Factor de Pulso		Tiempo (m. secs)		Modulo de Ambró -I (Mpa)	
			Deseada	Real	Deseada	Real	Deseada	Ajustado
1	1.66	181.2	0.6	0.66	5.0	4.9	126.0	3699
2	1.66	180.9	0.6	0.67	5.0	5.0	127.0	3672
3	1.66	180.8	0.6	0.66	5.0	4.9	123.0	3723
4	1.66	180.9	0.6	0.67	5.0	4.9	127.0	3611
5	1.66	180.9	0.6	0.68	5.0	5.0	128.0	3537
Media	1.66	180.9	0.6	0.67	5.0	4.9	126.2	3706

Media de los ensayos

Tiempo de carga (subida) (ms): 125.0

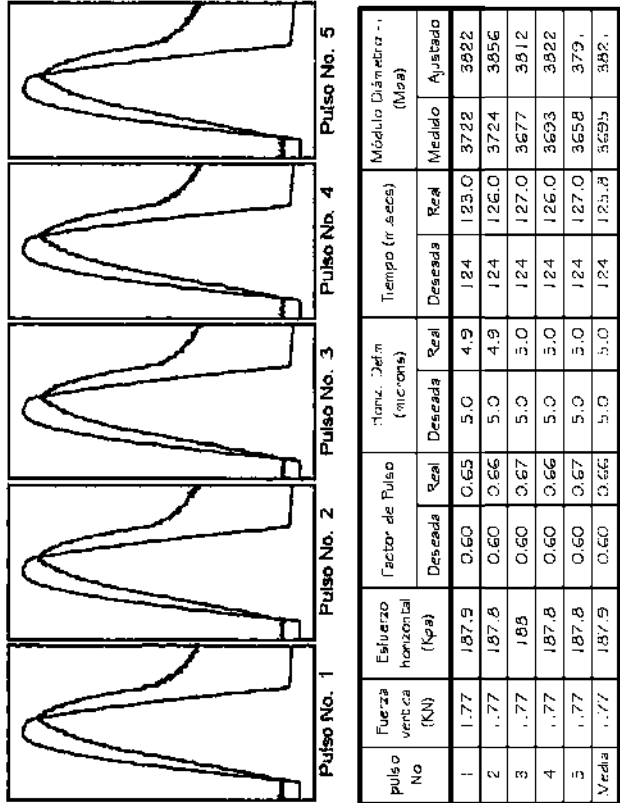
Deformación horizontal (µm): 5.0

Módulo medio (Mpa): 3759

Módulo Ajustado (Mpa): 3892

Fecha:	09/02/2008	
Referencia:	Probeta No 2	Para Carretera
Temperatura de la probeta:	20°C	AC-20
Diámetro de la probeta:	100 mm	Marshall
Espesor de la probeta:	59.9	2.19 g/cm ³
Coefficiente de Poisson:	0.35	AASHTO T-161
Tiempo de subida deseado (ms):	124 m. secs	4.5 %
Deformación horiz. Deseada:	5 microns	PG 76

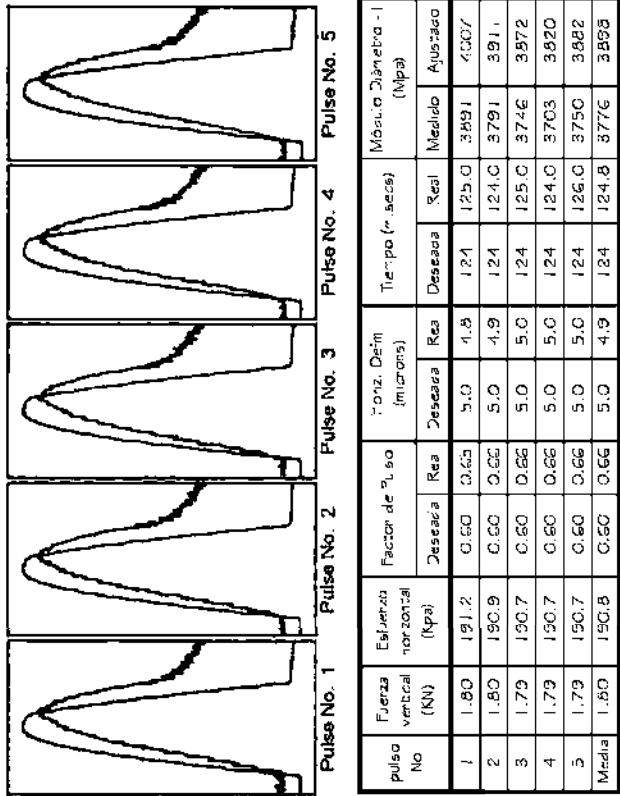
Ensayo sobre el primer diámetro



Media de los ensayos

Tiempo de carga (subida) (ms):	125.3
Deformación horizontal (µm):	4.9
Módulo medido (Mpa):	3736
Módulo Ajustado (Mpa):	3860

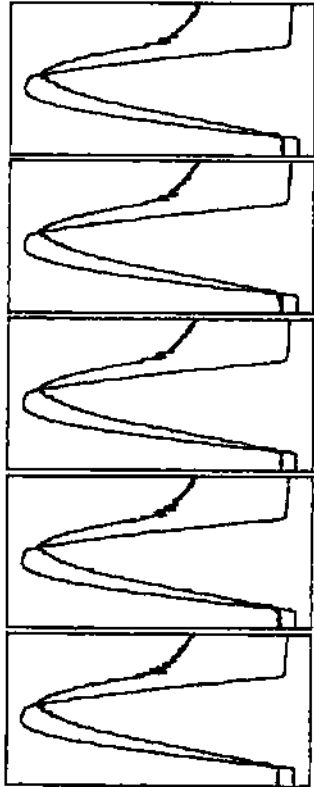
Ensayo sobre el segundo diámetro



Medición de Módulos Resilientes en Mezclas Asfálticas con Asfaltos Modificados Grado PG-76 y PG-82

Fecha:	09/02/2008	
Referencia:	Probeta No. 3	Para Carpetas
Temperatura de la probeta:	20°C	AC-20
Diámetro de la probeta:	100 mm	Marsall
Espesor de la probeta:	59.9	2.188 gr/cm ³
Coefficiente de Poisson:	0.35	AASHTO T-161
Tiempo de subida deseado (ms):	124 m. secs	4.5 %
Deformación por z. Deseada:	5 microns	PG 76

Ensayo sobre el primer diámetro

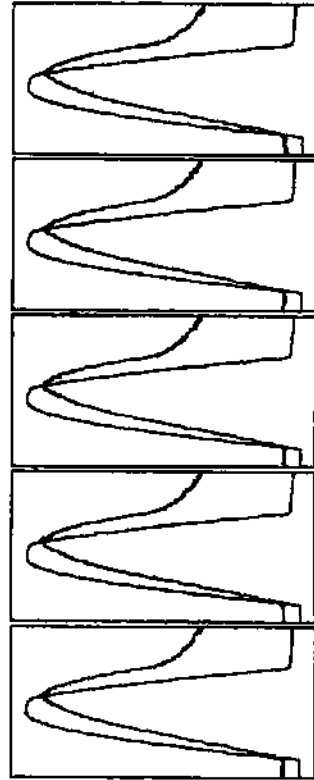


Pulse No.	Fuerza vertical (KN)	Esfuerzo horizontal (Kpa)	Factor de Pulso		Horiz. Deform (microns)		Tiempo (r. secs)		Módulo Diámetro -1 (Mpa)	
			Deseada	Real	Deseada	Real	Deseada	Real	Medido	Ajustado
1	1.82	193.6	0.60	0.67	5.0	5.1	124	125.0	3709	3846
2	1.82	193.3	0.60	0.66	5.0	5.0	124	122.0	3757	3890
3	1.82	193.1	0.60	0.66	5.0	5.1	124	122.0	3703	3824
4	1.82	193.2	0.60	0.65	5.0	5.0	124	121.0	3729	3841
5	1.82	193.1	0.60	0.65	5.0	5.1	124	124.0	3709	3818
Media	1.82	193.3	0.60	0.66	5.0	5.1	124	122.8	3721	3842

Media de los ensayos

Tiempo de carga (subida) (ms):	124.1
Deformación horizontal (µm):	5.0
Módulo medido (Mpa):	3655
Módulo Ajustado (Mpa):	3776

Ensayo sobre el segundo diámetro



Pulse No.	Fuerza vertical (KN)	Esfuerzo horizontal (Kpa)	Factor de Pulso		Horiz. Deform (microns)		Tiempo (r. secs)		Módulo Diámetro -1 (Mpa)	
			Deseada	Real	Deseada	Real	Deseada	Real	Medido	Ajustado
1	1.73	184.3	0.60	0.66	5.0	5.0	124	127.0	3599	3723
2	1.73	184.2	0.60	0.67	5.0	5.0	124	128.0	3596	3734
3	1.73	184.0	0.60	0.66	5.0	5.0	124	124.0	3582	3695
4	1.73	183.9	0.60	0.66	5.0	5.0	124	124.0	3591	3703
5	1.73	183.9	0.60	0.65	5.0	5.0	124	124.0	3584	3694
Media	1.73	184.1	0.60	0.66	5.0	5.0	124	125.4	3588	3710

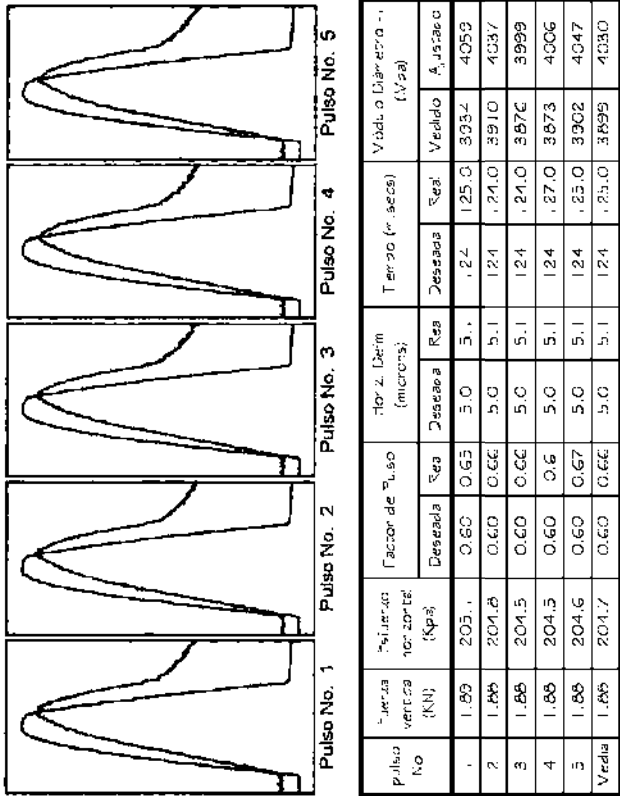
Fecha:
Referencia:
Temperatura de la probeta:
Diámetro de la probeta:
Espesor de la probeta:
Coeficiente de Poisson:
Tiempo de subida deseado (ms):
Deformación por 2. Deseada:

09/02/2008
Probeta No 4
20°C
100 mm
58.6
0.35
124 ms
5 microns

Tipo y origen de la mezcla bituminosa:
Método de fabricación de la mezcla bituminosa:
Método de compactación:
Densidad aparente:
Método de determinación:
Contenido de Asfalto:
Tipo de Asfalto

Para Carpeta
AC-20
Marshall
2.221 g/ccm³
AASHTO T-161
6.0 %
PG 76

Ensayo sobre el primer diámetro



Media de los ensayos

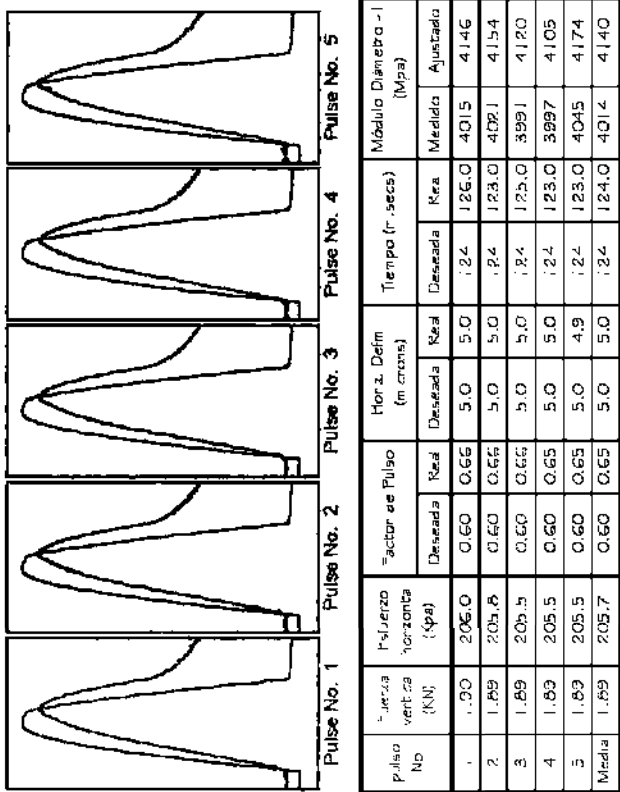
Tiempo de carga (subida) (ms): 124.5

Deformación horizontal (µm): 5.1

Módulo medido (Mpa): 3957

Módulo Ajustado (Mpa): 4085

Ensayo sobre el segundo diámetro



Medición de Módulos Resilientes en Mezclas Asfálticas con Asfaltos Modificados Grado PG-76 y PG-82

Fecha:

09/02/2008

Referencia:

Probeta No 5

Temperatura de la probeta:

20°C

Diámetro de la probeta:

100 mm

Espesor de la probeta:

59.8

Coefficiente de Poisson:

0.35

Tiempo de subida deseado (ms):

124 ms

Deformación horz. Deseada:

5 microns

Tipo y origen de la mezcla bituminosa:

Para Carpetas

Método de fabricación de la mezcla bituminosa:

AC-20

Método de compactación:

Marshall

Densidad aparente:

2.195 g/cm³

Método de determinación:

ASTM C-161

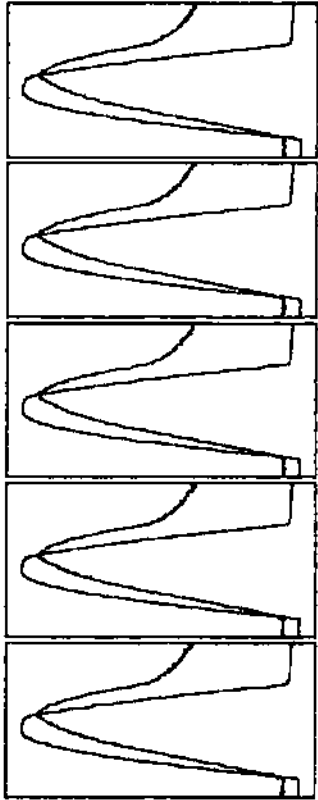
Contenido de Asfalto:

6.0 %

Tipo de Asfalto:

PG 76

Ensayo sobre el primer diámetro



Pulso No. 1	Pulso No. 2	Pulso No. 3	Pulso No. 4	Pulso No. 5
Pulso No	Fuerza vertical (KN)	Factor de Pulso	Tiempo Def. (microns)	Módulo Diametro -1 (Mpa)
1	1.75	0.65	5.0	3546
2	1.75	0.65	5.0	3546
3	1.74	0.65	5.0	3546
4	1.74	0.65	5.0	3546
5	1.75	0.65	5.0	3546
Media		0.65	5.0	3546

Media de los ensayos

Tiempo de carga (subida) (ms):

124.6

Deformación horizontal (µm):

5.1

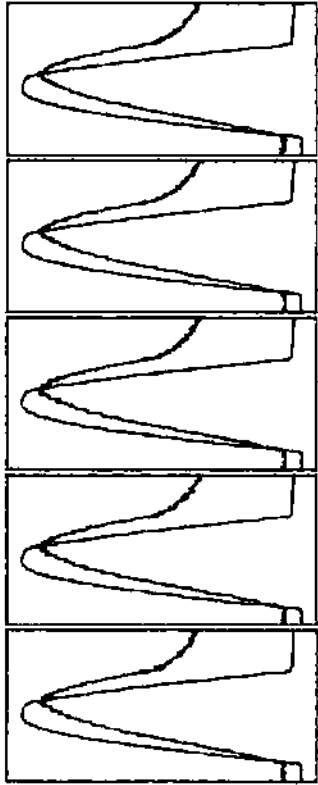
Módulo medido (Mpa):

3653

Módulo Ajustado (Mpa):

3767

Ensayo sobre el segundo diámetro

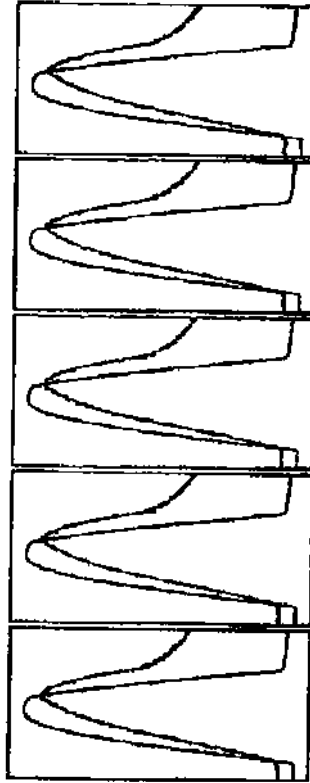


Pulso No. 1	Pulso No. 2	Pulso No. 3	Pulso No. 4	Pulso No. 5
Pulso No	Fuerza vertical (KN)	Factor de Pulso	Tiempo Def. (microns)	Módulo Diametro -1 (Mpa)
1	1.83	0.66	5.0	3684
2	1.83	0.66	5.0	3684
3	1.82	0.66	5.0	3684
4	1.82	0.66	5.0	3684
5	1.82	0.66	5.0	3684
Media		0.66	5.0	3684

Medición de Módulos Resilientes en Mezclas Asfálticas con Asfaltos Modificados Grado PG-76 y PG-82

Fecha:	09/02/2008	
Referencia:	Probeta No 6	Para Carpeta
Temperatura de la probeta:	20°C	AC-20
Diámetro de la probeta:	100 mms	Marshall
Espesor de la probeta:	59.8	2.189 gr/cm ³
Coefficiente de Poisson:	0.35	AASHTO T-161
Tiempo de subida deseado (ms):	124 m. secs	6.0 %
Deformación horiz. Deseada:	5 microns	PG 76

Ensayo sobre el primer diámetro

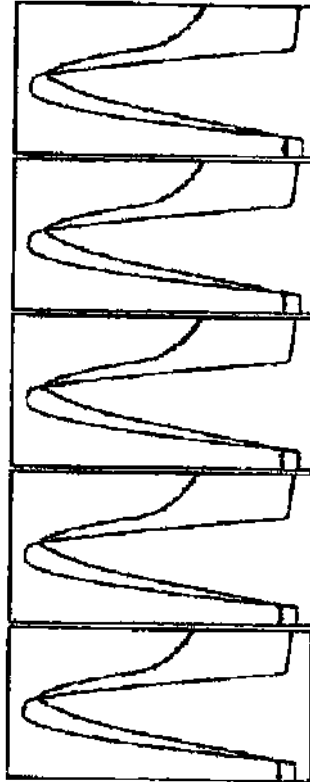


Pulso No	Fuerza vertical (KN)	Esfuerzo horizontal (Kpa)	Factor de Pulso		Horiz. Defm (microns)		Tiempo (m.secs)		Módulo Diámetro - (Mpa)	
			Deseada	Real	Deseada	Real	Deseada	Real	Medido	Ajustado
1	1.43	152.6	0.60	0.68	5.0	5.0	124	133.0	2958	3080
2	1.43	152.6	0.60	0.66	5.0	5.0	124	125.0	3001	3103
3	1.43	152.5	0.60	0.67	5.0	5.0	124	128.0	2993	3103
4	1.43	152.6	0.60	0.65	5.0	4.9	124	124.0	3021	3106
5	1.43	152.5	0.60	0.66	5.0	5.0	124	126.0	2942	3035
Media	1.43	152.6	0.60	0.66	5.0	5.0	124	127.2	2983	3085

Media de los ensayos

Tiempo de carga (subida) (ms):	124.9
Deformación horizontal(m):	5.0
Módulo medido (Mpa):	2905
Módulo Ajustado (Mpa):	3008

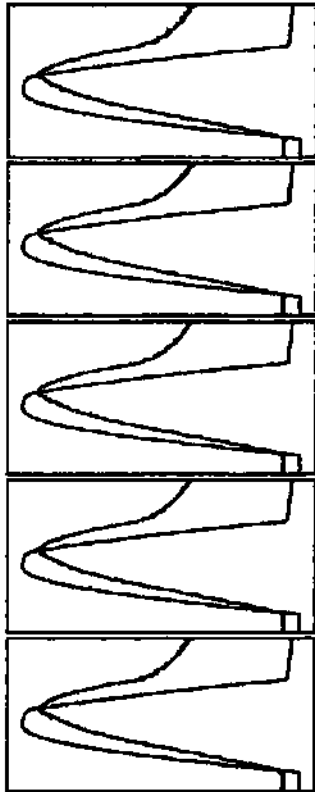
Ensayo sobre el segundo diámetro



Pulso No	Fuerza vertical (KN)	Esfuerzo horizontal (Kpa)	Factor de Pulso		Horiz. Defm (microns)		Tiempo (m.secs)		Módulo Diámetro - (Mpa)	
			Deseada	Real	Deseada	Real	Deseada	Real	Medido	Ajustado
1	1.36	144.8	0.60	0.67	5.0	5.0	124	120.0	2814	2914
2	1.36	144.8	0.60	0.67	5.0	5.0	124	123.0	2826	2934
3	1.36	144.7	0.60	0.66	5.0	5.0	124	121.0	2829	2917
4	1.36	144.6	0.60	0.67	5.0	5.0	124	124.0	2833	2935
5	1.36	144.6	0.60	0.68	5.0	5.0	124	125.0	2835	2950
Media	1.36	144.7	0.60	0.67	5.0	5.0	124	122.6	2827	2930

Fecha:	09/02/2008	
Referencia:	Probeta No 7	Para Carqueta
Temperatura de la probeta:	20°C	AC-20
Diámetro de la probeta:	100 mm	Marshall
Espesor de la probeta:	58.6	2.254 gr/cm ³
Coefficiente de Poisson:	0.35	AASHTO T-161
Tiempo de subida deseado (ms):	124 m. secs	7.0 %
Deformación horiz. Deseada:	5 microns	PG 76

Ensayo sobre el primer diámetro

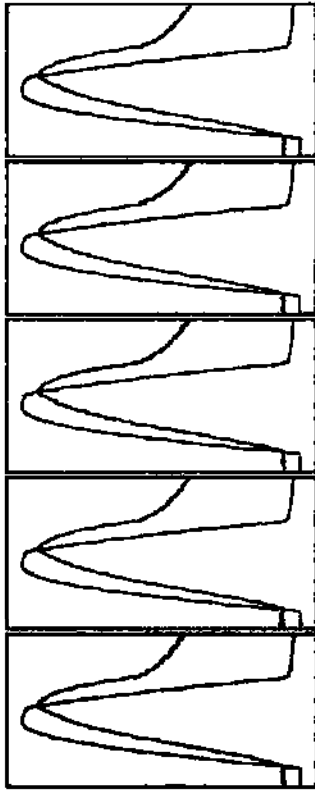


Pulse No	Fuerza vertical (KN)	Esfuerzo horizontal (Kpa)	Factor de Pulso		Horiz. Defm (microns)	Tiempo (m.secs)	Módulo Diámetro -1 (Mpa)	
			Deseada	Real	Deseada	Real	Deseada	Ajustado
1	1.53	166.3	0.60	0.66	5.0	5.1	124.0	3175
2	1.53	166.4	0.60	0.66	5.0	5.1	124.0	3190
3	1.53	166.4	0.60	0.66	5.0	5.0	124.0	3221
4	1.53	166.2	0.60	0.67	5.0	5.0	127.0	3225
5	1.53	166.3	0.60	0.66	5.0	5.1	125.0	3202
Media	1.53	166.3	0.60	0.66	5.0	5.1	124.6	3202

Media de los ensayos

Tiempo de carga (subida) (ms):	124.4
Deformación horizontal (µm):	5.0
Módulo medido (Mpa):	3217
Módulo Ajustado (Mpa):	3332

Ensayo sobre el segundo diámetro



Pulse No	Fuerza vertical (KN)	Esfuerzo horizontal (Kpa)	Factor de Pulso		Horiz. Defm (microns)	Tiempo (m.secs)	Módulo Diámetro -1 (Mpa)	
			Deseada	Real	Deseada	Real	Deseada	Ajustado
1	1.50	163.0	0.60	0.66	5.0	4.9	122.0	3236
2	1.50	163.1	0.60	0.66	5.0	4.9	125.0	3245
3	1.50	163.0	0.60	0.67	5.0	4.9	122.0	3221
4	1.50	162.9	0.60	0.66	5.0	4.9	120.0	3240
5	1.50	163	0.60	0.66	5.0	4.9	127.0	3219
Media	1.50	163	0.60	0.67	5.0	4.9	123.2	3232

Medición de Módulos Resilientes en Mezclas Asfálticas con Asfaltos Modificados Grado PG-76 y PG-82

Fecha:	09/02/2008	
Referencia:	Probeta No. 8	Para Carpetas
Temperatura de la probeta:	20°C	AC-20
Diámetro de la probeta:	100 mm	Varita
Espesor de la probeta:	60.4	2.185 g/cm ³
Coefficiente de Poisson:	0.35	ASFTO 1-161
Tiempo de subida deseado (ms):	124 m. secs	7.0 %
Deformación por 2. Deseada:	5 microns	PG 76

Ensayo sobre el primer diámetro

Pulso No. 1		Pulso No. 2		Pulso No. 3		Pulso No. 4		Pulso No. 5		
Pulso No	Fuerza vertical (KN)	Esfuerzo horizontal (Npa)	Factor de Pulso		Horiz. Deform (microns)		Tiempo (r. secs)		Velocidad Diámetro (Mpa)	
			Deseada	Real	Deseada	Real	Deseada	Real	Medido	Ajustado
1	1.52	159.8	0.60	0.63	5.0	5.0	124	120.0	3123	3206
2	1.52	159.8	0.60	0.65	5.0	4.9	124	120.0	3171	3261
3	1.51	159.7	0.60	0.66	5.0	4.9	124	126.0	3189	3297
4	1.52	159.8	0.60	0.66	5.0	5.0	124	126.0	3112	3220
5	1.51	159.7	0.60	0.66	5.0	5.0	124	122.0	3132	3230
Media	1.52	159.8	0.60	0.66	5.0	4.9	124	122.8	3145	3243

Media de los ensayos

Tiempo de carga (subida) (ms):	123.4
Deformación horizontal (µm):	5.1
Módulo medido (Mpa):	3015
Módulo Ajustado (Mpa):	3112

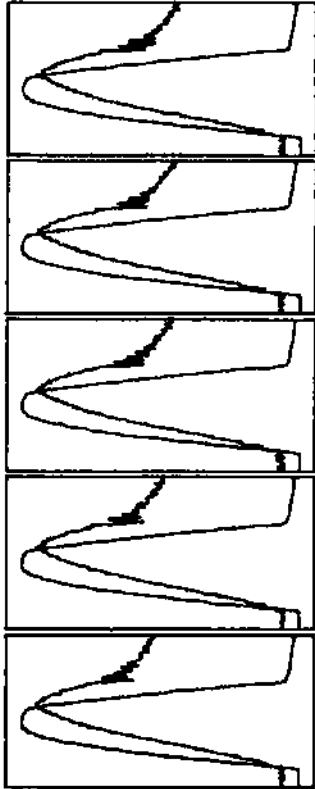
Ensayo sobre el segundo diámetro

Pulse No. 1		Pulse No. 2		Pulse No. 3		Pulse No. 4		Pulse No. 5		
Pulse No	Fuerza vertical (KN)	Esfuerzo horizontal (Kpa)	Factor de Pulso		Horiz. Deform. (in inches)		Tiempo (m. secs)		Vóculo Diámetro (Voz)	
			Deseada	Real	Deseada	Real	Deseada	Real	Medido	Ajustado
1	1.47	154.9	0.60	0.66	5.0	5.0	124	122.0	3082	3127
2	1.47	154.9	0.60	0.66	5.0	5.3	124	123.0	2934	2980
3	1.47	154.9	0.60	0.67	5.0	5.3	124	126.0	2849	2891
4	1.47	154.9	0.60	0.67	5.0	5.3	124	125.0	2963	2962
5	1.47	154.9	0.60	0.66	5.0	5.3	124	124.0	2934	2934
Media	1.47	154.9	0.60	0.66	5.0	5.2	124	124.0	2984	2984

Fecha: 09/02/2008
Referencia: Probeta No 9
Temperatura de la probeta: 20°C
Diámetro de la probeta: 100 mm
Espesor de la probeta: 60.4
Coeficiente de Poisson: 0.35
Tiempo de subida deseado (ms): 124 m. secs
Deformación horiz. Deseada: 5 microns

Tipo y origen de la mezcla estructural: Para Carqueta
Método de fabricación de la mezcla bituminosa: AC-20
Método de compactación: Varsna
Densidad aparente: 2.192 g/cm³
Método de determinación: AASHTO T-161
Contenido de Asfalto: 7.0 %
Tipo de Asfalto: PG 76

Ensayo sobre el primer diámetro

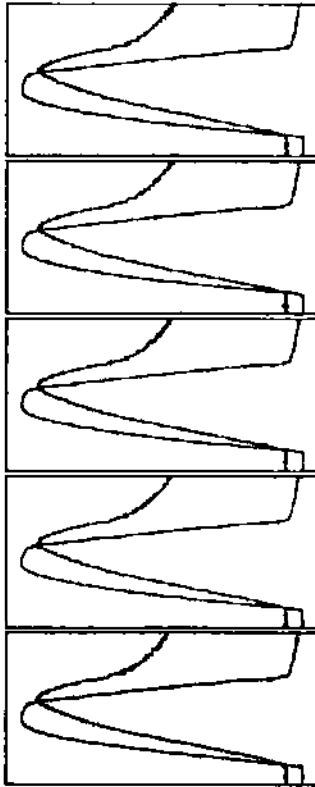


Pulso No. 1		Pulso No. 2		Pulso No. 3		Pulso No. 4		Pulso No. 5		
pulso No	Fuerza vertical (KN)	Esfuerzo horizontal (Kpa)	Factor de Pulso		Horiz. Deform (microns)		Tiempo (m.secs)		Modulo Diámetro -1 (Mpa)	
			Deseada	Real	Deseada	Real	Deseada	Real	Medido	Ajustado
1	1.10	116.3	0.60	0.67	5.0	5.5	124	118.0	2072	2142
2	1.10	116.4	0.60	0.66	5.0	5.2	124	118.0	2178	2245
3	1.10	116.4	0.60	0.68	5.0	5.2	124	126.0	2194	2283
4	1.10	116.3	0.60	0.65	5.0	5.1	124	116.0	2233	2293
5	1.10	116.5	0.60	0.67	5.0	5.1	124	121.0	2221	2296
Media	1.10	116.4	0.60	0.67	5.0	5.2	124	119.8	2180	2252

Media de los ensayos

Tiempo de carga (subida) (ms): 122.2
Deformación horizontal (µm): 5.1
Módulo medido (Mpa): 2058
Módulo Ajustado (Mpa): 2127

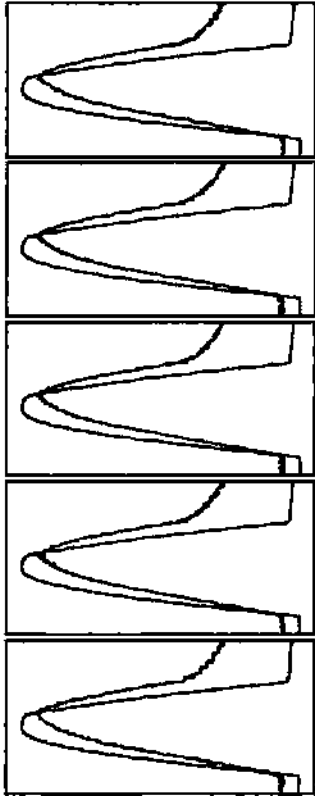
Ensayo sobre el segundo diámetro



Pulso No. 1	Pulso No. 2	Pulso No. 3	Pulso No. 4	Pulso No. 5						
Pulso No	Fuerza vertical (KN)	Esfuerzo horizontal (Mpa)	Factor de Pulso		Horiz. Deform. (microns)	Tiempo (m.secs)		Módulo Diámetro -1 (Mpa)		
			Deseada	Real		Deseada	Real	Deseada	Real	
1	0.94	99.0	0.60	0.67	5.0	5.0	124	130.0	1927	1991
2	0.94	99	0.60	0.67	5.0	5.0	124	123.0	1936	2008
3	0.94	98.8	0.60	0.67	5.0	5.0	124	124.0	1941	2005
4	0.94	98.8	0.60	0.67	5.0	4.9	124	120.0	1955	2016
5	0.94	98.7	0.60	0.68	5.0	5.0	124	126.0	1916	1990
Media	0.94	98.8	0.60	0.67	5.0	5.0	124	124.6	1935	2001

Fecha:	09/02/2008	
Referencia:	Probeta No. 10	Para Carqueta
Temperatura de la probeta:	20°C	AC-20
Diámetro de la probeta:	100 mm	Marsall
Espesor de la probeta:	60.6	2.187 gr/cm ³
Coefficiente de Poisson:	0.35	AASHTO T-161
Tiempo de subida deseado (ms):	124 m. secs	4.5 %
Deformación horiz. Deseada:	5 microns	PG 82

Ensayo sobre el primer diámetro

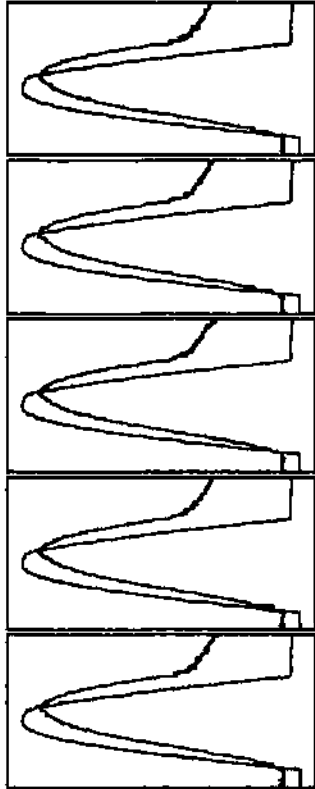


Pulse No. 1			Pulse No. 2		Pulse No. 3		Pulse No. 4		Pulse No. 5	
Pulse No	Fuerza vertical (KN)	Esfuerzo horizontal (Kpa)	Factor de Pulso		Horiz. De'rm (microns)		Tiempo (m.secs)		Módulo Diámetro -1 (Mpa)	
			Deseada	Real	Deseada	Real	Deseada	Real	Medido	Ajustado
1	1.91	200.8	0.60	0.65	5.0	4.9	124	124.0	401.6	414.1
2	1.91	200.1	0.60	0.66	5.0	4.9	124	125.0	395.0	407.9
3	1.91	200.3	0.60	0.67	5.0	4.9	124	126.0	397.7	412.7
4	1.91	200.2	0.60	0.65	5.0	5.0	124	121.0	393.3	403.7
5	1.91	200.3	0.60	0.65	5.0	5.0	124	122.0	390.5	402.2
Media	1.91	200.1	0.60	0.65	5.0	4.9	124	124.0	395.6	409.1

Media de los ensayos

Tiempo de carga (subida) (ms):	123.4
Deformación horizontal (µm):	5.0
Módulo medido (Mpa):	4200
Módulo Ajustado (Mpa):	4331

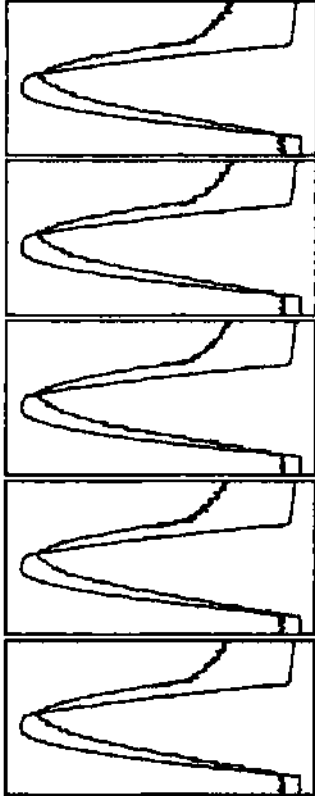
Ensayo sobre el segundo diámetro



Pulse No. 1		Pulse No. 2		Pulse No. 3		Pulse No. 4		Pulse No. 5	
Pulse No	Fuerza vertical (KN)	Esfuerzo horizontal (Kpa)	Factor de Pulso		Horiz. Deform (microns)		Tiempo (r-secs)		Módulo Diámetro -1 (Mpa)
			Deseada	Real	Deseada	Real	Deseada	Real	
1	2.22	233.1	0.60	0.65	5.0	5.0	124	452.6	466.7
2	2.22	233.0	0.60	0.65	5.0	5.1	124	444.7	459.1
3	2.22	232.8	0.60	0.65	5.0	5.1	124	443.6	456.8
4	2.22	232.9	0.60	0.65	5.0	5.2	124	440.2	454.0
5	2.22	233.0	0.60	0.65	5.0	5.1	124	441.1	455.0
Media	2.22	233.0	0.60	0.65	5.0	5.1	124	444.4	458.1

Fecha:	09/02/2008	
Referencia:	Probeta No. 11	Para Carqueta
Temperatura de la probeta:	20°C	AC-20
Diámetro de la probeta:	100 mm	Marsall
Espesor de la probeta:	61.1	2.149 gr/cm ³
Coefficiente de Poisson:	0.35	AASHTO T-161
Tiempo de subida deseado (ms):	124 m. secs	4.5 %
Deformación horiz. Deseada:	5 microns	PG 82

Ensayo sobre el primer diámetro

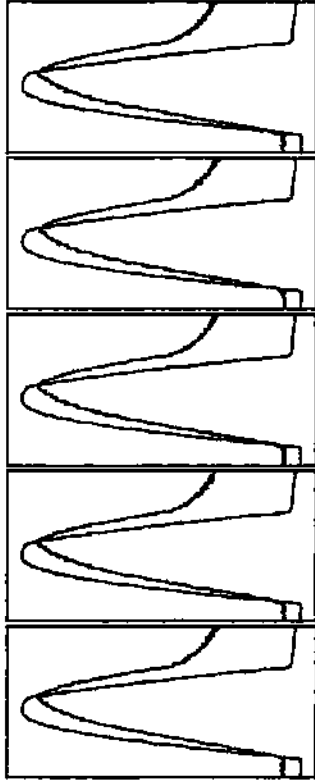


Pulse No. 1		Pulse No. 2		Pulse No. 3		Pulse No. 4		Pulse No. 5		
Pulse No	Fuerza vertical (KN)	Esfuerzo horizontal (Kpa)	Factor de Pulso		Honz. Deim (microns)		Tiempo (m.secs)		Modulo Diámetro -1 (Mpa)	
			Deseada	Real	Deseada	Real	Deseada	Real	Medido	Ajustado
1	1.54	160.7	0.60	0.67	5.0	4.8	124	125.0	323.8	335.6
2	1.54	160.5	0.60	0.66	5.0	5.0	124	123.0	312.4	322.6
3	1.54	160.4	0.60	0.67	5.0	5.0	124	126.0	314.8	326.1
4	1.54	160.4	0.60	0.67	5.0	5.0	124	124.0	314.9	326.0
5	1.54	160.4	0.60	0.65	5.0	5.0	124	119.0	315.6	324.0
Media	1.54	160.4	0.60	0.66	5.0	4.9	124	123.4	316.3	326.8

Media de los ensayos

Tiempo de carga (subida) (ms):	124.9
Deformación horizontal (µm):	5.0
Módulo medido (Mpa):	314.4
Módulo Ajustado (Mpa):	325.5

Ensayo sobre el segundo diámetro

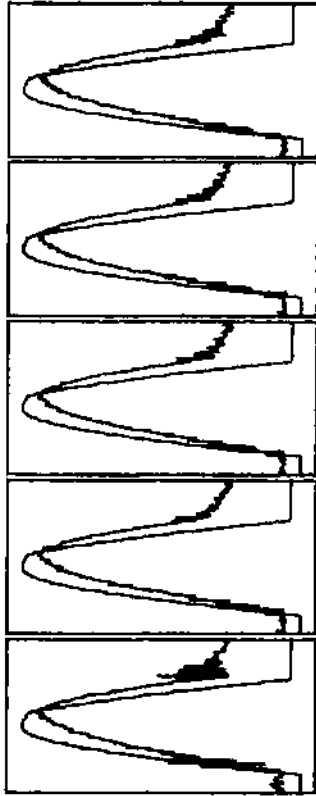


Pulse No. 1		Pulse No. 2		Pulse No. 3		Pulse No. 4		Pulse No. 5		
Pulse No	Fuerza vertical (KN)	Esfuerzo horizontal (Kpa)	Factor de Pulso		Horiz. Defm (m. crons)		Tiempo (r-secs)		Módulo Diametra -1 (Mpa)	
			Deseada	Real	Deseada	Real	Deseada	Real	Medido	Ajustado
1	1.54	160.7	0.60	0.67	5.0	4.9	124	131.0	317.6	330.4
2	1.54	160.6	0.60	0.67	5.0	5.0	124	127.0	310.7	322.7
3	1.54	160.4	0.60	0.66	5.0	5.0	124	123.0	312.3	322.7
4	1.54	160.5	0.60	0.68	5.0	5.0	124	128.0	310.3	322.8
5	1.54	160.5	0.60	0.66	5.0	5.0	124	123.0	311.3	321.7
Media	1.54	160.5	0.60	0.67	5.0	5.0	124	126.4	312.4	324.1

Medición de Módulos Resilientes en Mezclas Asfálticas con Asfaltos Modificados Grado PG-76 y PG-82

Fecha:	09/02/2008	
Referencia:	Probeta No. 12	Para Carpetas
Temperatura de la probeta:	20°C	AC-20
Diámetro de la probeta:	100 mm	Marshall
Espesor de la probeta:	61.4	2.167 g/cm ³
Coefficiente de Poisson:	0.35	AASHTO T-161
Tiempo de subida deseado (ms):	124 m. secs	4.5 %
Deformación por 2. Deseada:	5 microns	PG 82

Ensayo sobre el primer diámetro

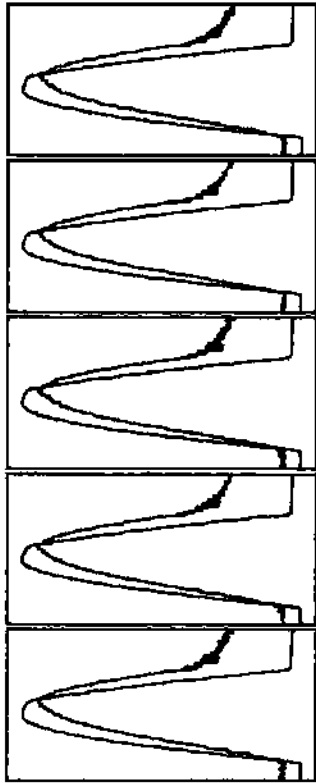


Pulso No.	Fuerza vertical (KN)	Factor de Pulso		Horiz. Deform (microns)	Tiempo (m. secs)		Módulo Diámetro -1 (Mpa)	
		Deseada	Real		Deseada	Real	Medido	Ajustado
1	2.52	0.60	0.65	5.0	124	124.0	5039	5185
2	2.53	0.60	0.65	5.0	124	123.0	4962	5106
3	2.52	0.60	0.65	5.0	124	124.0	4972	5120
4	2.52	0.60	0.65	5.0	124	123.0	4894	5037
5	2.52	0.60	0.65	5.0	124	124.0	4833	4975
Media	2.52	0.60	0.65	5.0	124	123.6	4940	5085

Media de los ensayos

Tiempo de carga (subida) (ms):	124.7
Deformación horizontal (µm):	5.1
Módulo medido (Mpa):	4562
Módulo Ajustado (Mpa):	4697

Ensayo sobre el segundo diámetro



Pulso No.	Fuerza vertical (KN)	Factor de Pulso		Horiz. Deform (microns)	Tiempo (m. secs)		Módulo Diámetro -1 (Mpa)	
		Deseada	Real		Deseada	Real	Medido	Ajustado
1	2.58	0.60	0.65	5.0	124	124.0	4258	4368
2	2.58	0.60	0.65	5.0	124	127.0	4.41	4263
3	2.57	0.60	0.66	5.0	124	126.0	4232	4374
4	2.58	0.60	0.64	5.0	124	123.0	4.78	4265
5	2.57	0.60	0.65	5.0	124	127.0	4.27	4253
Media	2.58	0.60	0.65	5.0	124	125.8	4.83	4309

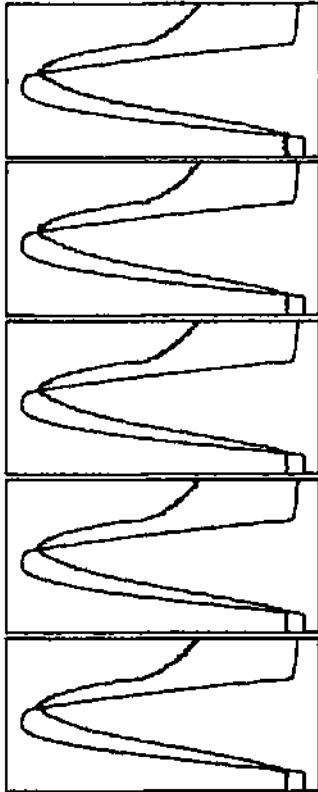
Fecha:
Referencia:
Temperatura de la probeta:
Diámetro de la probeta:
Espesor de la probeta:
Coeficiente de Poisson:
Tiempo de subida deseado (ms):
Deformación horiz. Deseada:

09/02/2008
Probeta No. 13
20°C
100 mm
6.11
0.35
124 m. secs
5 microns

Tipo y origen de la mezcla estructural:
Método de fabricación de la mezcla bituminosa:
Método de compactación:
Densidad aparente:
Método de determinación:
Contenido de Asfalto:
Tipo de Asfalto

Para Carqueta
AC-20
Viasa
2.162 g/cm³
AASHTO T-161
6.0 %
PG 82

Ensayo sobre el primer diámetro



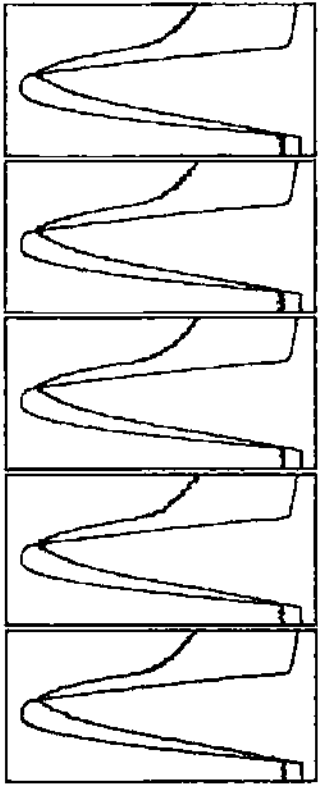
Pulse No. 1	Pulse No. 2		Pulse No. 3		Pulse No. 4		Pulse No. 5	
	Fuerza vertical (KN)	Esfuerzo horizontal (Kpa)	Factor de Pulso	Horiz. Deform (microns)	Tempo (m.secs)	Módulo Diámetro -1 (Mpa)		
Pulse No	Real	Deseada	Real	Deseada	Real	Medido	Ajustado	
1	1.39	145.2	0.60	0.65	5.0	121.0	2830	2806
2	1.39	141.9	0.60	0.69	5.0	130.0	2807	2918
3	1.39	145.1	0.60	0.67	5.0	126.0	2766	2860
4	1.39	145	0.60	0.67	5.0	126.0	2762	2856
5	1.39	145.2	0.60	0.67	5.0	128.0	2747	2851
Media	1.39	145.1	0.60	0.67	5.0	126.2	2782	2878

Media de los ensayos

Tiempo de carga (subida) (ms):
Deformación horizontal (µm):
Módulo medido (Mpa):
Módulo Ajustado (Mpa):

125.7
5.0
2487
2576

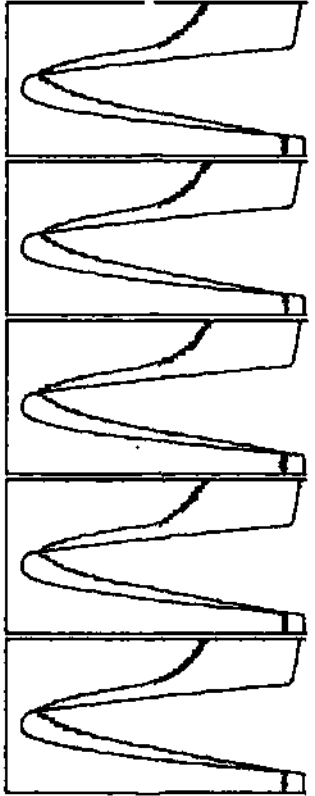
Ensayo sobre el segundo diámetro



Pulse No. 1	Pulse No. 2		Pulse No. 3		Pulse No. 4		Pulse No. 5	
	Fuerza vertical (KN)	Esfuerzo horizontal (Kpa)	Factor de Pulso	Horiz. Deform (microns)	Tempo (m.secs)	Módulo Diámetro -1 (Mpa)		
Pulse No	Real	Deseada	Real	Deseada	Real	Medido	Ajustado	
1	1.06	110.7	0.60	0.68	5.0	125.0	2186	2272
2	1.06	110.7	0.60	0.68	5.0	119.0	2184	2251
3	1.06	110.8	0.60	0.68	5.0	124	2190	2278
4	1.06	110.4	0.60	0.68	5.0	124	2195	2283
5	1.06	110.4	0.60	0.68	5.0	125.0	2208	2285
Media	1.06	110.6	0.60	0.68	5.0	124	2212	2274

Fecha:	09/02/2008	
Referencia:	Probeta No 14	Para Carpeta
Temperatura de la probeta:	20°C	AC-20
Diámetro de la probeta:	100 mm	Marsall
Espesor de la probeta:	61.6	2.149 g/ccm ³
Coefficiente de Poisson:	0.35	AASHTO T-161
Tiempo de subida deseado (ms):	124 m. secs	6.0 %
Deformación horiz. Deseada:	5 microns	PG 82

Ensayo sobre el primer diámetro

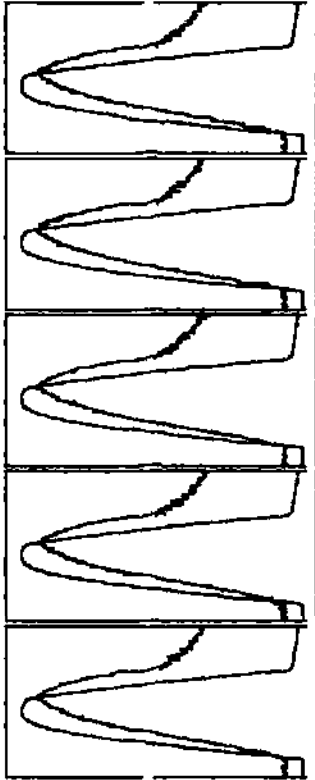


Pulso No. 1		Pulso No. 2		Pulso No. 3		Pulso No. 4		Pulso No. 5		
pulso No	Fuerza vertical (KN)	Esfuerzo horizontal (Kpa)	Factor de Pulso		Horiz. Deform (microns)		Tiempo (r. secs)		Modulo Diámetro -1 (Mpa)	
			Deseada	Real	Deseada	Real	Deseada	Real	Medido	Ajustado
1	1.08	112.1	0.60	0.68	5.0	5.0	124	121.0	2172	2253
2	1.08	111.6	0.60	0.68	5.0	5.0	124	125.0	2171	2250
3	1.08	111.6	0.60	0.68	5.0	4.9	124	126.0	2226	2315
4	1.08	111.9	0.60	0.67	5.0	5.1	124	119.0	2131	2205
5	1.08	111.7	0.60	0.68	5.0	5.1	124	126.0	2144	2229
Media	1.08	111.8	0.60	0.68	5.0	5.0	124	126.2	2169	2252

Media de los ensayos

Tiempo de carga (subida) (ms):	125.9
Deformación horizontal (µm):	5.2
Módulo medido (Mpa):	2240
Módulo Ajustado (Mpa):	2328

Ensayo sobre el segundo diámetro



Pulse No. 1		Pulse No. 2		Pulse No. 3		Pulse No. 4		Pulse No. 5		
Pulse No	Fuerza vertical (KN)	Esfuerzo horizontal (Kpa)	Factor de Pulso		Horiz. Deform (microns)		Tiempo (r-secs)		Módulo Diámetro -1 (Mpa)	
			Deseada	Real	Deseada	Real	Deseada	Real	Medido	Ajustado
1	1.22	125.7	0.60	0.67	5.0	5.2	124	125.0	2356	2418
2	1.22	125.9	0.60	0.67	5.0	5.2	124	125.0	2352	2433
3	1.22	125.8	0.60	0.69	5.0	5.4	124	130.0	2275	2376
4	1.22	125.8	0.60	0.68	5.0	5.3	124	127.0	2309	2404
5	1.22	125.7	0.60	0.69	5.0	5.4	124	135.0	2281	2380
Media	1.22	125.8	0.60	0.68	5.0	5.3	124	128.4	2311	2403

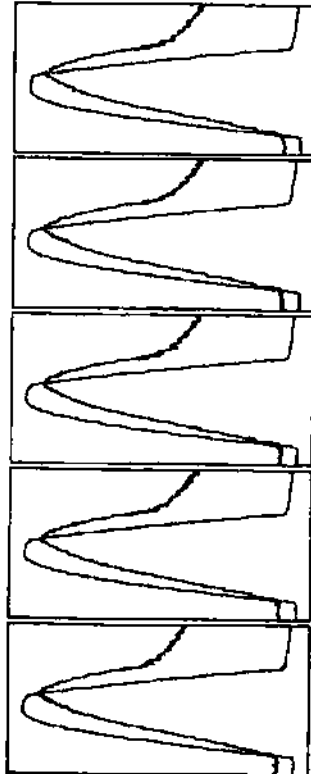
Fecha:
Referencia:
Temperatura de la probeta:
Diámetro de la probeta:
Espesor de la probeta:
Coeficiente de Poisson:
Tiempo de subida deseado (ms):
Deformación por 2. Deseada:

09/02/2008
Probeta No. 15
20°C
100 mm
59.5
0.35
124 ms
5 microns

Tipo y origen de la mezcla bituminosa:
Método de fabricación de la mezcla bituminosa:
Método de compactación:
Densidad aparente:
Método de determinación:
Contenido de Asfalto:
Tipo de Asfalto

Para Carpetas
AC-20
Viasera
2.210 g/cm³
AASHTO T-161
6.0 %
PG 82

Ensayo sobre el primer diámetro



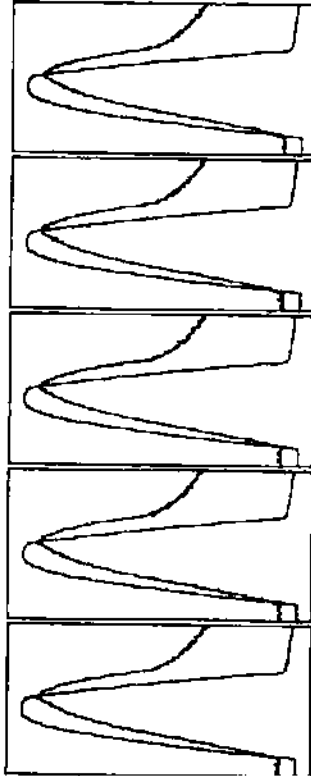
Pulse No. 1 Pulse No. 2 Pulse No. 3 Pulse No. 4 Pulse No. 5

Pulse No	Fuerza vertical (KN)	Fuerza horizontal (Kpa)	Factor de Pulso		Hor. z. Deform. (microns)		Tiempo (ms)		Vado o Diámetro (mm)	
			Deseada	Real	Deseada	Real	Deseada	Real	Vuelto	Ajustado
1	1.30	139.4	0.60	0.66	5.0	5.0	124	120.0	2732	2814
2	1.30	139.3	0.60	0.66	5.0	4.9	124	121.0	2792	2882
3	1.30	139.3	0.60	0.67	5.0	4.9	124	126.0	2771	2877
4	1.30	139	0.60	0.66	5.0	4.8	124	120.0	2805	2888
5	1.30	139.2	0.60	0.67	5.0	4.9	124	126.0	2758	2863
Media	1.30	139.2	0.60	0.66	5.0	4.9	124	123.0	2772	2863

Media de los ensayos

Tiempo de carga (subida) (ms): 122.8
Deformación horizontal (µm): 5.0
Módulo medido (Mpa): 2703
Módulo Ajustado (Mpa): 2802

Ensayo sobre el segundo diámetro

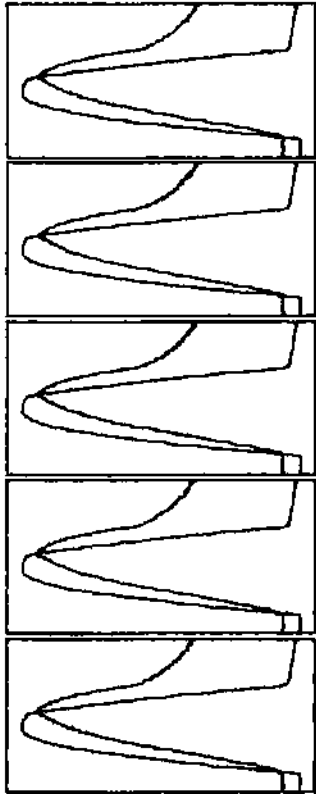


Pulse No. 1 Pulse No. 2 Pulse No. 3 Pulse No. 4 Pulse No. 5

Pulse No	Fuerza vertical (KN)	Fuerza horizontal (Kpa)	Factor de Pulso		Hor. z. Deform. (microns)		Tiempo (ms)		Vado o Diámetro (mm)	
			Deseada	Real	Deseada	Real	Deseada	Real	Vuelto	Ajustado
1	1.28	137.0	0.60	0.68	5.0	4.9	124	120.0	2711	2817
2	1.28	137.2	0.60	0.67	5.0	5.1	124	121.0	2611	2703
3	1.28	137.0	0.60	0.69	5.0	5.1	124	121.0	2619	2737
4	1.28	137.1	0.60	0.68	5.0	5.1	124	122.0	2617	2723
5	1.28	137.3	0.60	0.67	5.0	5.1	124	125.0	2608	2706
Media	1.28	137.1	0.60	0.68	5.0	5.1	124	122.6	2633	2738

Fecha:	09/02/2008			Para Carqueta
Referencia:	Probeta No 16			AC-20
Temperatura de la probeta:	20°C			Marsall
Diámetro de la probeta:	100 mm			2.123 gr/cm ³
Esesor de la probeta:	60.8			AASHTO T-161
Coefficiente de Poisson:	0.35			1.0 %
Tiempo de subida deseado (ms):	124 m. secs			PG 82
Deformación por 2. Deseada:	5 microns			

Ensayo sobre el primer diámetro

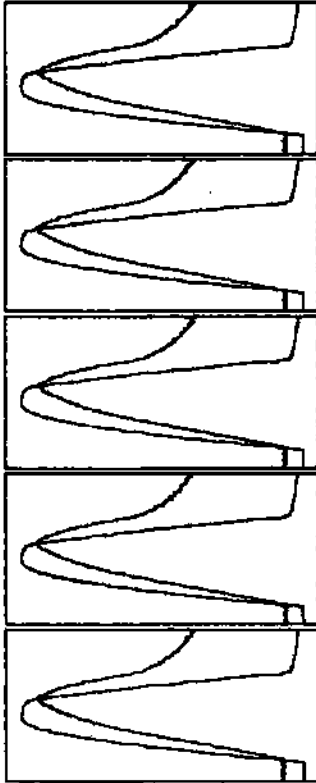


Pulse No	Fuerza vertical (kN)	Esfuerzo horizontal (Kpa)	Factor de Pulso		Horiz. Deform (microns)		Tiempo (r. secs)		Módulo Diámetro - 1 (Mpa)	
			Deseada	Real	Deseada	Real	Deseada	Real	Medido	Ajustado
1	1.13	1.80	0.60	0.67	5.0	5.0	124	121.0	2293	2372
2	1.13	1.79	0.60	0.66	5.0	5.0	124	116.0	2291	2355
3	1.13	1.78	0.60	0.67	5.0	5.0	124	119.0	2288	2369
4	1.13	1.78	0.60	0.66	5.0	5.0	124	116.0	2300	2371
5	1.13	1.80	0.60	0.66	5.0	5.0	124	120.0	2302	2367
Media	1.13	1.79	0.60	0.66	5.0	5.0	124	118.1	2295	2367

Media de los ensayos

Tiempo de carga (subida) (ms):	121.2
Deformación horizontal (µm):	5.0
Módulo medido (Mpa):	2274
Módulo Ajustado (Mpa):	2347

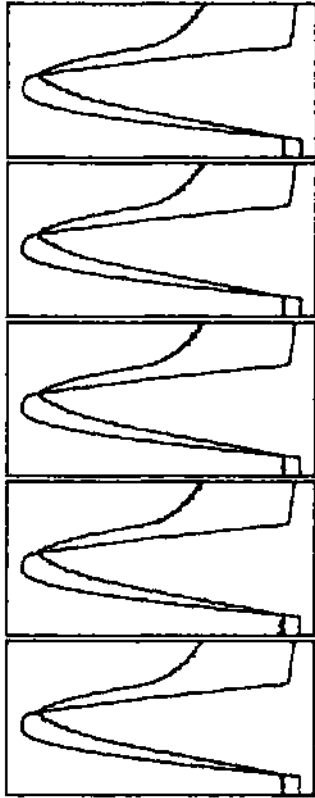
Ensayo sobre el segundo diámetro



Pulse No	Fuerza vertical (KN)	Esfuerzo horizontal (Mpa)	Factor de Pulso		Horiz. Deform (m.crons)	Tiempo (r-secs)		Módulo Diámetro - I (Mpa)	
			Deseada	Real		Deseada	Real	Medido	Ajustado
1	1.09	1.43	0.60	0.66	5.0	4.9	124	2290	2362
2	1.09	1.41	0.60	0.67	5.0	5.0	124	2299	2304
3	1.09	1.39	0.60	0.67	5.0	4.9	124	2261	2342
4	1.09	1.38	0.60	0.65	5.0	5.0	124	2230	2288
5	1.09	1.41	0.60	0.68	5.0	4.9	124	2251	2339
Media	1.09	1.41	0.60	0.67	5.0	4.9	124	2252	2327

Fecha:	09/02/2008	
Referencia:	Probeta No. 17	Para Carpetas
Temperatura de la probeta:	20°C	AC-20
Diámetro de la probeta:	100 mm	Marshall
Espesor de la probeta:	60.5	2.200 gr/cm ³
Coefficiente de Poisson:	0.35	AASHTO T-161
Tiempo de subida deseado (ms):	124 m. secs	10 %
Deformación horiz. Deseada:	5 microns	PG 82

Ensayo sobre el primer diámetro

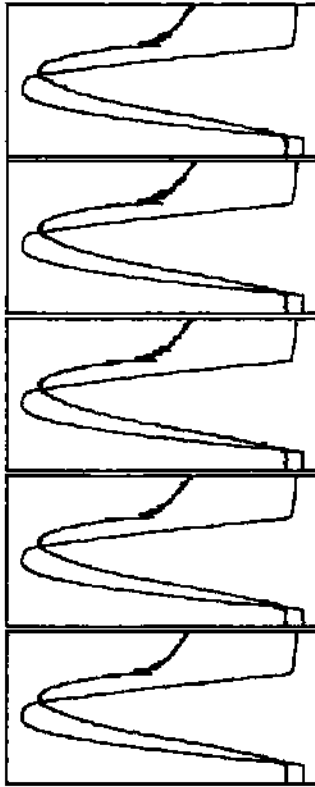


Pulse No. 1	Pulse No. 2		Pulse No. 3		Pulse No. 4		Pulse No. 5	
	Fuerza vertical (KN)	Esfuerzo horizontal (Kpa)	Factor de Pulso	Horiz. Deform (microns)	Tiempo (m.secs)	Módulo Diámetro -1 (Vpa)		
1	1.37	144.4	0.60	5.0	124	2770	Medido	Ajustado
2	1.37	144.5	0.60	5.0	124	2741	2844	2844
3	1.37	144.2	0.60	5.0	124	2780	2871	2871
4	1.37	144.5	0.60	5.0	124	2770	2864	2864
5	1.37	144.4	0.60	5.0	124	2763	2860	2860
Media	1.37	144.4	0.60	5.0	124	2765	2864	2864

Media de los ensayos

Tiempo de carga (subida) (ms):	125.0
Deformación horizontal (µm):	5.1
Módulo medido (Mpa):	2907
Módulo Ajustado (Mpa):	3010

Ensayo sobre el segundo diámetro



Pulse No. 1	Pulse No. 2		Pulse No. 3		Pulse No. 4		Pulse No. 5	
	Fuerza vertical (KN)	Esfuerzo horizontal (Kpa)	Factor de Pulso	Horiz. Deform (microns)	Tiempo (m.secs)	Módulo Diámetro -1 (Mpa)		
1	5.10	158.1	0.60	5.0	124	3061	Medido	Ajustado
2	5.50	158.00	0.60	5.0	124	3061	3168	3168
3	5.50	157.8	0.60	5.0	124	3049	3157	3157
4	5.50	157.8	0.60	5.0	124	3041	3162	3162
5	5.50	157.8	0.60	5.0	124	3034	3136	3136
Media	5.50	157.9	0.60	5.0	124	3049	3156	3156

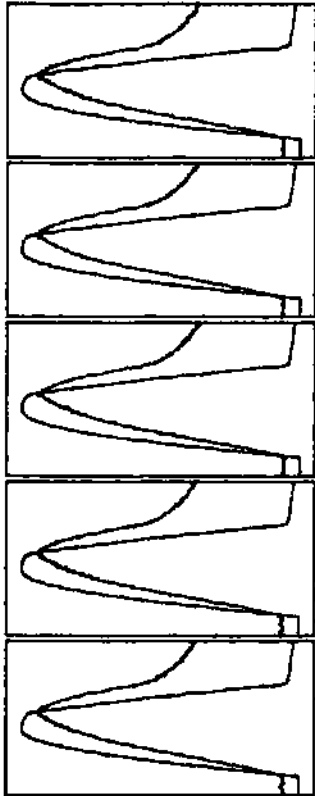
Fecha:
Referencia:
Temperatura de la probeta:
Diámetro de la probeta:
Espesor de la probeta:
Coeficiente de Poisson:
Tiempo de subida deseado (ms):
Deformación horiz. Deseada:

09/02/2008
Probeta No 18
20°C
100 mm
59.9
0.35
124 m. secs
5 microns

Tipo y origen de la mezcla estructural:
Método de fabricación de la mezcla bituminosa:
Método de compactación:
Densidad aparente:
Método de determinación:
Contenido de Asfalto:
Tipo de Asfalto

Para Carqueta
AC-20
Marsa
2,204 g/cm³
AASHTO T-161
7.0 %
PG 82

Ensayo sobre el primer diámetro



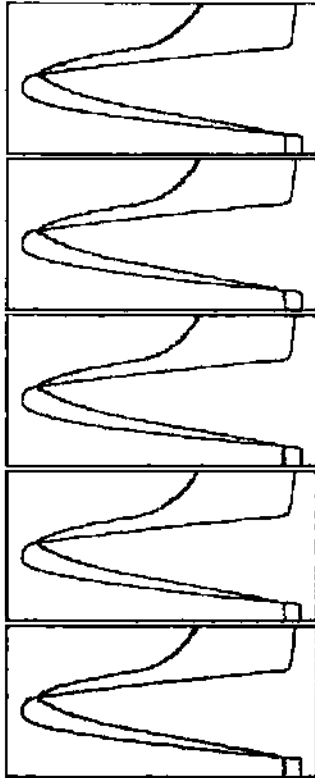
Pulso No. 1		Pulso No. 2		Pulso No. 3		Pulso No. 4		Pulso No. 5		
Pulso No	Fuerza vertical (KN)	Esfuerzo horizontal (Kpa)	Factor de Pulso		Horiz. Deform (microns)		Tiempo (m.secs)		Modulo Diámetro -1 (Mpa)	
			Deseada	Real	Deseada	Real	Deseada	Real	Medido	Ajustado
1	1.29	136.9	0.60	0.65	5.0	5.0	124	122.0	2679	2755
2	1.29	136.9	0.60	0.66	5.0	5.0	124	120.0	2659	2736
3	1.29	136.9	0.60	0.66	5.0	5.0	124	125.0	2646	2732
4	1.29	136.7	0.60	0.66	5.0	5.0	124	123.0	2674	2751
5	1.29	136.8	0.60	0.66	5.0	5.0	124	125.0	2682	2767
Media	1.29	136.8	0.60	0.66	5.0	5.0	124	123.0	2668	2749

Media de los ensayos

Tiempo de carga (subida) (ms):
Deformación horizontal (µm):
Módulo medido (Mpa):
Módulo Ajustado (Mpa):

122.6
5.0
2755
2642

Ensayo sobre el segundo diámetro



Pulso No. 1		Pulso No. 2		Pulso No. 3		Pulso No. 4		Pulso No. 5		
Fuerza vertical (KN)	Esfuerzo horizontal (N/m²)	Factor de Pulso		Horiz. Deform. (microns)		Tiempo (m. secs)		Módulo Diámetro -1 (Voz)		
		Deseada	Real	Deseada	Real	Deseada	Real	Medido	Ajustado	
1	1.37	145.7	0.60	0.66	5.0	5.0	124	120.0	2652	2740
2	1.37	145.6	0.60	0.67	5.0	5.0	124	126.0	2629	2740
3	1.37	145.5	0.60	0.66	5.0	4.9	124	120.0	2673	2763
4	1.37	145.4	0.60	0.66	5.0	5.0	124	123.0	2606	2697
5	1.37	145.2	0.60	0.66	5.0	5.0	124	120.0	2644	2732
Media	1.37	145.5	0.60	0.66	5.0	5.0	124	122.2	2641	2733

ANEXO 3

TABLAS Y GRAFICAS

TABLAS:

- Tabla 7.1. Características de las Probetas fabricadas
- Tabla 7.2. Requisitos de Calidad para Cementos Asfálticos Grado PG
- Tabla 7.3. Requisitos del material pétreo para carpetas asfálticas de granulometría densa
- Tabla 7.4. Requisitos de granulometría
- Tabla 7.5. Granulometría del material de 3/4"-1/2".
- Tabla 7.6. Granulometría del Material que pasa la malla 3/8" y retiene No.10.
- Tabla 7.7. Granulometría del Material que pasa Malla No.10.
- Tabla 7.8. Fracciones del Material para ajustar la Curva Granulométrica
- Tabla 7.9. Ajuste de la curva granulométrica.
- Tabla 7.10. Resultados de la prueba de equivalente de arena.
- Tabla 7.11. Resultados de la prueba de equivalente de arena
- Tabla 7.12. Resultado de prueba de partículas alargadas, muestra No.1.
- Tabla 7.13. Resultado de prueba de partículas lajeadas, muestra No.1.
- Tabla 7.14. Resultado de prueba de partículas alargadas, muestra No.2.
- Tabla 7.15. Resultado de prueba de partículas lajeadas, muestra No.2.
- Tabla 7.16. Resultados del material que pasa la Malla No.4
- Tabla 7.17. Resultados de los cálculos de las densidades.
- Tabla 7.18. Comparaciones de las características de calidad del material pétreo.
- Tabla 7.19. Requisitos de Calidad para Cementos Asfálticos Grado PG.

GRÁFICAS Y FIGURAS:

- Figura 3.1. Agregados, lavados, triturados y separados por tamaños.
- Figura 3.2. Tipos de agradados
- Figura 3.3. Regiones Geográficas para la utilización de asfaltos clasificados según su Viscosidad Dinámica a 60°C. Fuente: Normas SCT, Norma N-CMT-4-05-001/5.
- Fig. 3.4. Representación esquemática de las Emulsiones Aniónica y Catiónica
- Figura 3.5. Regiones geográficas para la utilización recomendable de cementos asfálticos Grado PG.

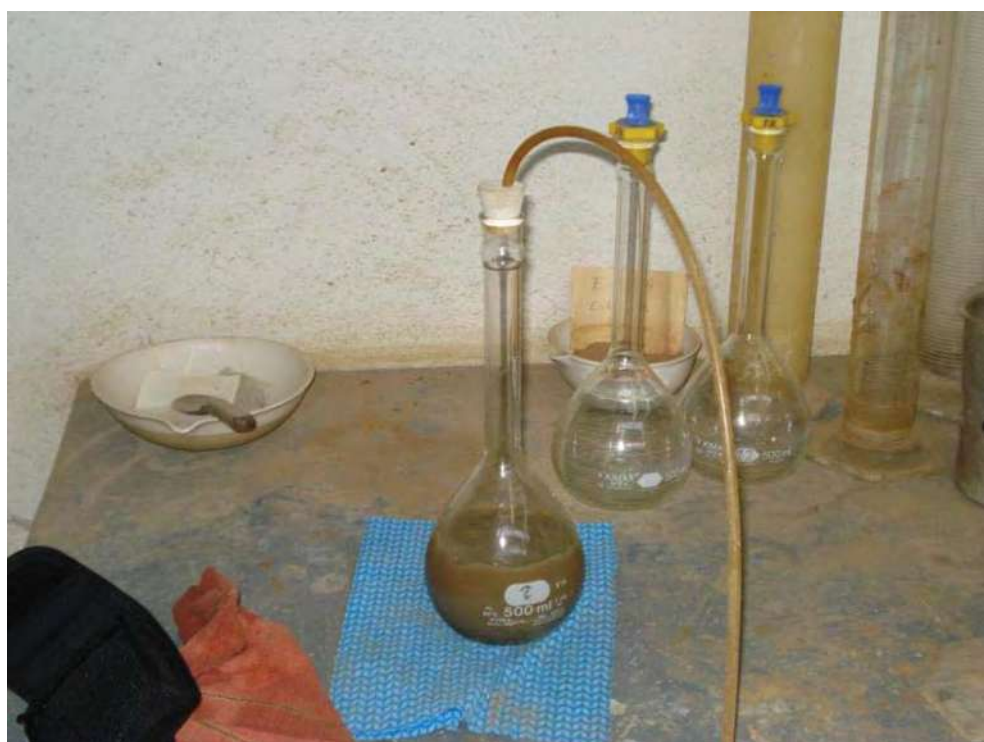
- Fig. 4.1. Diferencia del comportamiento de mezclas con asfalto convencional (a), y asfalto modificado (b).
- Fig. 4.2. Gráfica de comportamiento de la viscosidad del asfalto (modificado vs. Convencional) con respecto a la temperatura.
- Figura 5.1. Esquema del ensayo del Estabilómetro de Hveem.
- Fig. 6.1. Mecanismo de deformación permanente
- Figura 6.2. Curva Esfuerzo Deformación Cíclica
- Figura 6.3. Pulsos Equivalentes Senoidal y Triangular
- Figura 6.4. Pulsos de Tiempo de Esfuerzos Verticales bajo Cargas Sinodales y Triangulares (1 in. = 25.4 mm. 1 mph = 1.6 Km/hr.) Después de Barksdale 1971).
- Figura 6.5. Pulsos de Tiempo de Esfuerzos Verticales, da carga de onda cuadrática (1 in. = 25.4 mm., 1 mph = 1.6 Km/hr.) Después de McLean (1974).
- Figura 6.6. Valores del Mr para diferentes niveles de esfuerzo en función de la temperatura
- Figura 6.7. Valores del Mr para distintas frecuencias, en función de la temperatura
- Figura 6.8. Valores de Mr. para diferentes contenidos de asfalto, en función de la temperatura
- Figura 6.9. Valores del Mr. para distintos agregados, en función de la temperatura
- Figura 6.10. Valores del Mr. para diferentes % de vacíos en función de la temperatura
- Figura 7.1. Localización del Banco de Materiales.
- Figura 7.2. Curva del Material Ajustada
- Figura 7.3. Probetas para el ensayo de Equivalente de Arena
- Figura 7.4. Calibradores de espesor y longitud para la prueba.
- Figura 7.5. Cilindro giratorio empleado para la prueba del Desgaste de Los Angeles.
- Figura 7.6. Prueba de Densidad de Sólidos
- Figura 7.7. Densidad de Sólidos del Material que pasa la Malla No. 4
- Figura 7.8. Obtención del peso sumergido de las probetas (Psum)
- Figura 7.9. Probetas sumergidas en agua a 60°C, para la obtención del flujo y estabilidad.
- Figura 7.10. Montaje de las probetas en la prensa Marshall, para la obtención del flujo y la estabilidad de las probetas-

- Figura 7.11. Configuración de la carga (a) y rotura del Ensayo de Tracción Indirecta (b).
- Figura 7.12. Curva de la gráfica carga-deformación resultante de la prueba de Tracción Indirecta.
- Figura 7.13. Montaje de la probeta durante el ensayo de Módulo Resiliente.
- Figura 7.14. Sujeción de la probeta en las mordazas previo al ensayo del Módulo Resiliente.
- Figura 8.1. Gráfica del Módulo Resiliente vs. Contenido de Asfalto.
- Figura 8.2. Gráfica con línea de tendencia del Módulo Resiliente vs. Contenido de Asfalto.
- Figura 8.3. Gráfica del Contenido de Asfalto vs.. Relación de Vacíos en las probetas.
- Figura 8.4. Gráfica del Módulo Resiliente vs. Relación de Vacíos, para un contenido de asfalto del 4.5% para los asfaltos PG-76 y PG-82.
- Figura 8.5. Gráfica del Módulo Resiliente vs. Relación de Vacíos, para un contenido de asfalto del 6.0% para los asfaltos PG-76 y PG-82.
- Figura 8.6. Gráfica del Módulo Resiliente vs. Relación de Vacíos, para un contenido de asfalto del 7.0% para los asfaltos PG-76 y PG-82.
- Figura 8.7. Gráfica del Módulo Resiliente vs. Densidad de las probetas, para un contenido de asfalto del 4.5% para los asfaltos PG-76 y PG-82
- Figura 8.8. Gráfica del Módulo Resiliente vs. Densidad de las probetas, para un contenido de asfalto del 6.0% para los asfaltos PG-76 y PG-82
- Figura 8.9. Gráfica del Módulo Resiliente vs. Densidad de las probetas, para un contenido de asfalto del 7.0 % para los a

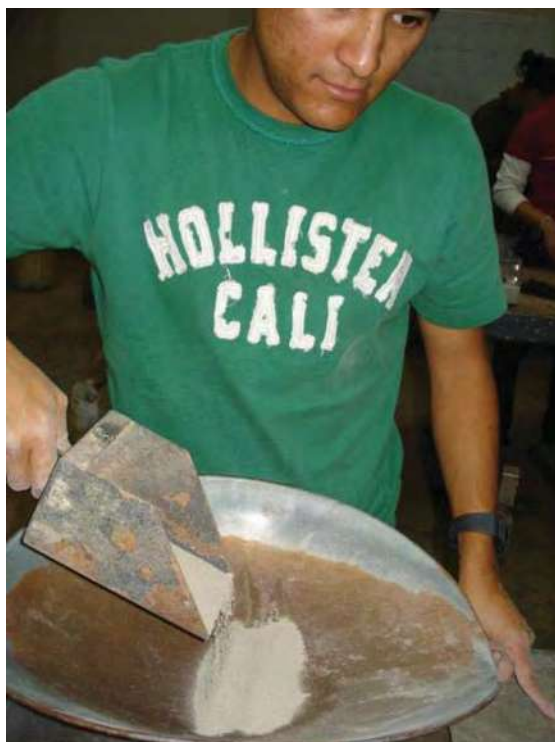
ANEXO 4



Cribado del Material de Banco, para la caracterización.



Prueba de Densidad de Sólidos del Material Pétreo



Pesos de las diferentes fracciones para la elaboración de las Probetas.



Material pesado por fracciones para la elaboración de las Probetas Marshall



Adición del contenido de asfalto para la elaboración de las pastillas



Mezclado en caliente de los materiales



Mezcla lista para vaciar al molde



Colocación de la Mezcla en los Moldes



Vaciado de las mezcla en los moldes para su compactación



Compactación de la Mezcla en el Compactador Marshall



Probeta terminada para el desmolde



Probetas fabricadas



Inmersión de las Probetas para la prueba Marshall



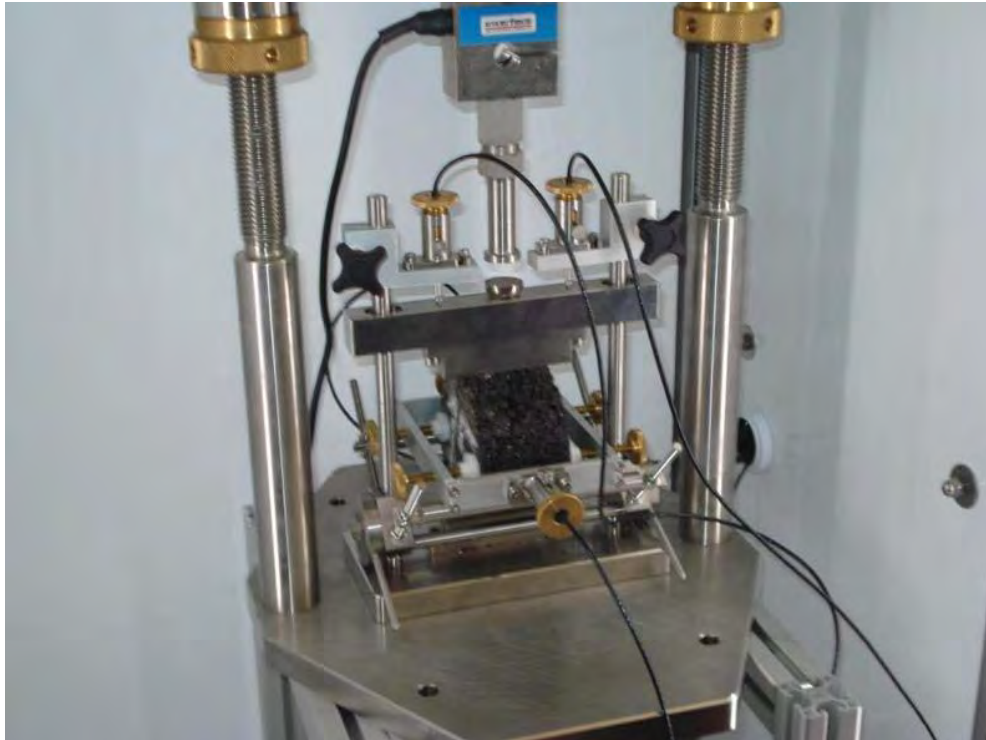
Ensayo de las probetas en la prensa Marshall



Pastilla fallada después de la prueba Marshall



Prueba de Tracción Indirecta para la obtención de la carga para la prueba de Módulo Resiliente



Prueba de Módulo Resiliente

BIBLIOGRAFIA

- Garnica, et al. Algunos aspectos de la densificación de las mezclas asfálticas con el compactador giratorio, Instituto mexicano del Transporte, Documento técnico No. 228, Sanfandila, Qto. 2003, pp. 62
- Olivera B. Fernando, Estructuración en las vías terrestres, Ed. CECSA, México, 2002, pp. 413
- Padilla R. Alejandro, Mezclas asfálticas, Universidad Politécnica de Catalunya, España, Capítulo 3, pp. 34- 69
- Rico et al, La ingeniería de los suelos en las vías terrestres, Ed. LIMUSA, México DF., 2000, pp.643.
- Rodríguez, et al, Emulsiones asfálticas, Instituto Mexicano del Transporte, Documento Técnico No 23, Sanfandila, Qto. 2001, 41.
- MANUAL DE NORMAS SCT, Libro CMT. Características de los Materiales. 4. Materiales para Pavimentos. N-CMT-4-05-002-01. Calidad de Materiales Asfálticos Modificados.
- MANUAL DE NORMAS SCT, Libro CMT. Características de los Materiales. 4. Materiales para Pavimentos. N-CMT-4-05-004-05-1. Materiales Asfálticos Grado PG.
- PAVEMENT ANALYSIS AND DESIGN, Yang H. Huang. University of Kentucky. Prentice Hall. Englewood Cliffs, New Jersey, 1993. pp. 316-325
- PRINCIPLES OF PAVEMENT DESIGN, Yoder Witczak. Second Edition. Wiley Interscience, 1975. pp. 262-265.
- Moreno Rubio Javier (2005). Efecto de Equipo y procedimiento de Medida en la determinación del Módulo Resiliente y resistencia a Tracción Indirecta de las Mezclas Bituminosas. Universidad Politécnica de Cataluña.
- A INGENIERÍA DE SUELOS EN LAS VÍAS TERRESTRES Vol. 2. Alfonso Rico Rodríguez y Hermilo del Castillo. Editorial LIMUSA, 2 Edición, 2000.
- Barksdale, R.G., (1971). "Compressive Stress Pulse Times in Flexible Pavements for Use in Dynamic Testing", Highway Research Record 345, Highway Research Board, pp. 32-44.

- Brown, S. F. (1973). "Determination of Young's Modulus for Bituminous Materials in Pavement Design", Highway Research Record 431, Highway Research Board, pp. 38-49.
- McLean, D. B. (1974). Permanent Deformation Characteristics of Asphalt Concrete, Ph. D. Dissertation, University of California, Berkeley.
- C. L. Monismith, C.L., Tsai B. Tayebali, A. A. (1994). Stiffness of Asphalt Aggregate Mixes. Report prepared for SHRP Project A-338, Asphalt Research Program, Institute of Transportation Studies, University of California, Berkeley.
- Almudaiheem J. A., Al-Sugair F. H. (1991). Effect of Loadind Magnitude on Measured Resilient Modulus of Asphaltic Concrete Mixes. Transportation Research Record No. 1317, pp. 139-144.
- Elliot R. P., Ford M. C, M. Ghanim, M. (1992). Effect of Aggregate Gradation Variant on Asphalt Concrete Mix Properties. In Transportation Research Record 1317, TRB, National Research Council. Washington D. C., pp. 52-60.
- Abdulshafai O. A., Fitch, M. G. Kedzierski, B. Powers D. B. (1999). Laboratory Optimization of Asphalt Concrete Intermediate Course Mixes to Improve Flexible Pavement Performance. Transportation Research Record No. 1681, pp. 69-75.
- Jimenez, R. A. (1962). Behavior of Asphaltic Concrete Diaphragms to Repetitive Loads. International Conference on Structural Design of Asphalt Pavements.
- [6] Vallergera, B. A. , Morris, G. R. Huffman, J. E. and Huff, B. J. (1980). Applicability of Asphalt-Rubber Membranes in Reducing Reflection Cracking. AAPT, Volume 49.
- [7] Zhou, H., Scott E., Nichols, J. E. (1994). Evaluation of three Polymer Modified Asphalt Concretes. Transportation Research Record, No. 1454, pp. 181-192.
- Standard Test Method for Indirect Tension Test for Resilient Modulus of Bituminous Mixtures. American Society testing Material, Reapproved, 1995.
- Kamel, N. I., Miller, L. J. (1994). Comparative Performance of Pavement Mixes Containing Conventional and Engineered Asphalts. Transportation Research Record, No. 1454, pp. 172-180.

- Khattak, M. J., Baladi, G. (1998). Engineered Properties of Polymer-Modified Asphalt Mixtures. Transportation Research Record, No. 1638, pp. 12-22.
- Khattak, M. J., Baladi G. (2001). Fatigue and Permanent Deformation Models for Polymer-Modified Asphalt Mixtures. Transportation Research Record No. 1767, pp. 135-145.
- Tayebali, A. A. Deacon, J. A. and Monismith, C. L. (1995). Comparison of Axial and Diametral Resilient Stiffness of Asphalt-Aggregate Mixes. Transportation Research Record 1492, Transportation Research Board, National Research Council, Washington D.C., pp. 135-143.
- Cochran, G. R. Furber, B. (1989). Experience with Laboratory MR Testing. Proceedings of Workshop on Resilient Modulus Testing. Minnesota Department of Transportation. Oregon State University. Corvallis, Oregon.
- Boudreau, R.L., Hicks, R.G. Furber, A.M. (1992). Effects of Test Parameters on Resilient Modulus of Laboratory-Compacted Asphalt Concrete Specimen. Transportation Research Record No. 1353, pp. 62-68.
- Mohammad, L. N., Paul H.R. (1992). Evaluation of a New Indirect Tension Test Apparatus. Transportation Research Record No. 1353, pp. 62-68.