



ISSN 0188-7297



ALGUNOS ASPECTOS DE LA DENSIFICACIÓN DE MEZCLAS ASFÁLTICAS CON EL COMPACTADOR GIRATORIO

Paul Garnica Anguas
José Antonio Gómez López
Horacio Delgado Alamilla

Publicación Técnica No. 228
Sanfandila, Qro, 2003

SECRETARÍA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTES
INSTITUTO MEXICANO DEL TRANSPORTE

**Algunos aspectos de la densificación
de mezclas asfálticas con el
compactador giratorio**

Publicación Técnica No. 228
Sanfandila, Qro. 2003

Este trabajo fue realizado por el Jefe de la División de Laboratorios, Dr. Paul Garnica Anguas y los investigadores M. en I. José Antonio Gómez López e Ing. Horacio Delgado Alamilla, en la Coordinación de Infraestructura del Instituto Mexicano del Transporte.

Se agradece la participación de la Ing. Mayra Flores Flores y del Técnico Mario Antonio Pérez González en los ensayos de laboratorio.

Índice

| | |
|--|------------|
| Resumen | III |
| Abstract | V |
| Resumen ejecutivo | VII |
| Introducción | 1 |
| 1 Historia del compactador giratorio | 3 |
| 1.1 Primeras compactaciones giratorias | 3 |
| 1.2 Compactador giratorio del Texas Highway Department | 3 |
| 1.3 Máquina de pruebas giratorias del cuerpo de ingenieros (GTM) | 4 |
| 1.4 Compactador giratorio LCPC (francés) | 5 |
| 1.5 Compactador giratorio Superpave | 6 |
| 1.6 Compactador giratorio australiano | 6 |
| 1.6.1 Compactador giratorio SERVOPAC | 7 |
| 2 Antecedentes de la metodología Superpave | 9 |
| 2.1 Comportamiento del cemento asfáltico | 9 |
| 2.1.1 Comportamiento a altas temperaturas | 10 |
| 2.1.2 Comportamiento a baja temperatura | 11 |
| 2.1.3 Envejecimiento | 12 |
| 2.2 Comportamiento del agregado mineral | 12 |
| 2.3 Comportamiento de la mezcla asfáltica | 14 |
| 2.3.1 Deformación permanente | 15 |
| 2.3.2 Fisuración por fatiga | 17 |
| 2.3.3 Fisuración por baja temperatura | 18 |
| 3 Especificación de la metodología Superpave | 19 |
| 3.1 Especificación de cemento asfáltico | 19 |
| 3.1.1 Procedimiento para envejecimiento de la muestra | 21 |
| 3.1.1.1 Horno rotatorio de película delgada (RTFO) | 21 |
| 3.1.1.2 Vasija de envejecimiento a presión (PAV) | 22 |
| 3.1.2 Pruebas Superpave para cementos asfálticos | 22 |
| 3.1.2.1 Reómetro de corte dinámico (DSR) | 23 |
| 3.1.2.2 Viscosímetro rotacional (RV) | 25 |
| 3.1.2.3 Reómetro de flexión en vigas (BBR) | 26 |
| 3.1.2.4 Equipo de tensión indirecta (DT) | 27 |
| 3.2 Especificaciones de agregados minerales | 28 |
| 3.2.1 Propiedades de consenso | 28 |
| 3.2.1.1 Angularidad del agregado grueso | 28 |

| | | |
|----------|---|-----------|
| 3.2.1.2 | Angularidad del agregado fino | 28 |
| 3.2.1.3 | Partículas planas y alargadas | 29 |
| 3.2.1.4 | Equivalente de arena | 30 |
| 3.2.2 | Propiedades de la fuente de origen | 30 |
| 3.2.2.1 | Tenacidad (prueba de desgaste de Los Ángeles) | 31 |
| 3.2.2.2 | Durabilidad (intemperismo acelerado) | 31 |
| 3.2.2.3 | Materiales deletéreos | 31 |
| 3.2.3 | Granulometría | 31 |
| 3.3 | Mezclas asfálticas | 32 |
| 4 | Descripción del experimento | 35 |
| 4.1 | Cemento asfáltico | 35 |
| 4.1.1 | Viscosímetro rotacional (RV) | 35 |
| 4.1.2 | Reómetro de corte dinámico (DSR) | 37 |
| 4.2 | Agregado mineral | 38 |
| 4.2.1 | Pruebas de consenso | 39 |
| 4.2.2 | Pruebas de origen | 40 |
| 4.3 | Parámetros del compactador giratorio | 41 |
| 4.4 | Preparación de la mezcla asfáltica compactada | 42 |
| 4.5 | Pruebas a las mezclas asfálticas | 44 |
| 5 | Resultados obtenidos | 47 |
| 5.1 | Efecto del ángulo de giro | 47 |
| 5.2 | Efecto de la presión vertical | 49 |
| 5.3 | Resistencia al corte | 51 |
| 5.3.1 | Efecto del ángulo de giro y presión vertical | 52 |
| 5.3.2 | Efecto del porcentaje de vacíos | 53 |
| 5.4 | Pruebas de compresión simple | 56 |
| | Conclusiones | 59 |
| | Bibliografía | 61 |

Resumen

Se hace una revisión del uso del compactador giratorio en la metodología SUPERPAVE para diseñar mezclas asfálticas. Se ilustra el efecto en la densificación de factores propios al compactador giratorio, tales como número de giros, nivel de esfuerzo, ángulo de giro y velocidad de rotación, así como la influencia de la granulometría. Se presentan en especial, mediciones de los esfuerzos de corte durante la densificación y se discute con interés, su potencial contribución a la mejora del proceso de diseño de mezclas.

Abstract

In this work the authors makes a review of the use of gyratory compactor in the methodology Superpave for design asphalt mixes. It is shows the effect in the densification of own factors on gyratory compactor, such as, number of gyrations, vertical stress, gyratory angle, speed of gyration, as well as the influence of the blend gradation. It is presented measured specially of the shear during the densification and argue with interest their potential contribution to the improvement of the process of the mix design.

Resumen ejecutivo

Debido al surgimiento del programa SHRP (Strategic Highway Research Program), la práctica actual de diseño de mezclas asfálticas en caliente (HMA) se encuentra en una etapa de redefinición.

El método Superpave (*Superior Performing Asphalt Pavement*) es el resultado de las investigaciones realizadas por el SHRP. Este sistema de diseño está provisto para especificar ligantes asfálticos y agregado mineral, desarrollar diseños de mezclas, analizar y establecer predicciones de desempeño.

Junto con el desarrollo del sistema surgen nuevos equipos tanto para ensayos de ligantes asfálticos, como para la elaboración de la compactación de la mezcla asfáltica.

Teniendo como fin la sustitución de los métodos antiguos de diseño de mezclas asfálticas de ahí la importancia del estudio de esta nueva metodología.

En el primer capítulo se aborda uno de los conceptos más innovadores de la metodología Superpave que es la compactación giratoria, así como la evolución histórica de la misma, que da como resultado la elaboración de un nuevo equipo de compactación denominado compactador giratorio. El cual simula, mediante su compactación a base de amasado, las características de densificación de la mezcla asfáltica observadas en el campo.

De igual manera se observan los factores que afectan a la compactación giratoria, como pueden ser el ángulo de giro, esfuerzo vertical, la velocidad de rotación y el tipo de molde, los cuales se abordan con más detalle en capítulos posteriores.

El capítulo 2 presenta los antecedentes que llevaron a la elaboración de este método de diseño. Estos antecedentes están basados en el comportamiento del ligante asfáltico, agregado mineral y su interacción cuando están mezclados y compactados.

Presentando sus características individuales y en conjunto más importantes, así como los factores que afectan su comportamiento y presentando en forma breve las fallas que se podrían presentar debido a su interacción con el medio ambiente y el tránsito vehicular.

El capítulo 3 presenta las especificaciones de esta metodología, que al igual que el capítulo anterior se encuentra dividido en 3 parámetros; pruebas al ligante asfáltico, pruebas al agregado mineral y pruebas a la mezcla asfáltica compactada.

Se mencionan las pruebas y equipos establecidos para la evaluación de los tres parámetros, de la misma forma se proporciona una explicación breve de la aplicabilidad de los mismos, con el fin de tener una idea del porque de su uso.

Estas pruebas tienen como finalidad medir las propiedades físicas o mecánicas de los componentes (ligante asfáltico y agregado mineral) y de la mezcla asfáltica compactada.

En el capítulo 4 se presenta la descripción del experimento así como los resultados de las pruebas realizadas, al igual que los criterios adoptados.

Las variables utilizadas fueron establecidas tratando de abarcar los parámetros más importantes del compactador giratorio como son el ángulo de giro, esfuerzo vertical, número de giros y velocidad de rotación, de igual forma se evalúa la importancia de la granulometría.

Adicional a la metodología Superpave se realizaron ensayos de compresión simple a la mezcla asfáltica compactada .

El capítulo 5 exhibe los resultados obtenidos, los cuales muestran los efectos producidos debido a la variación de los diferentes parámetros del compactador giratorio, teniendo como marco de referencia los porcentajes de vacíos, esfuerzos de corte y módulo E_{50} que presentan las mezclas compactadas.

Introducción

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

La práctica actual de diseño de mezclas asfálticas en caliente (HMA) para aplicaciones en carreteras está en la etapa de redefinir su marco conceptual; lo anterior a raíz del ambicioso programa de investigación denominado SHRP, Strategic Highway Research Program, emprendido con la administración Federal de Carreteras (FHWA) en los Estados Unidos. El programa surgió con el fin de mejorar el desempeño y durabilidad de las carreteras, volviéndolas más seguras tanto para automovilistas como para los trabajadores de las mismas.

El producto final es un nuevo sistema llamado SUPERPAVE (*Superior Performing Asphalt Pavement*); representa un sistema provisto para especificar cemento asfáltico y agregado mineral; desarrollar diseños de mezclas asfálticas; analizar y establecer predicciones de desempeño del pavimento, y que tiene como objetivo final contribuir a lograr pavimentos más durables, y minimizar los costos de conservación y operación de los vehículos que hagan uso de la infraestructura vial.

El sistema SUPERPAVE desarrolló no sólo un nuevo equipo de compactación (compactador giratorio SUPERPAVE), sino también un nuevo sistema de clasificación de los cementos asfálticos mediante innovadores equipos de ensaye, como la Vasija de Envejecimiento a Presión (PAV); Reómetro de Corte Dinámico (DSR); Reómetro de Viga en Flexión (BBR); ensaye de Tensión Directa (DT), y el mejoramiento de otros como el Viscosímetro Rotacional (RV), y el Horno de Película Delgada Rotatoria (RTFO).

La metodología SUPERPAVE debe sustituir, en el corto plazo, a los métodos tradicionales para mezclas asfálticas actualmente en uso en México (Marshall, Hveem); es por ello que resulta necesario estudiar con detalle todo este nuevo conocimiento para poder adaptar las nuevas tecnologías asociadas a las necesidades muy particulares de México.

1 Historia del compactador giratorio

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

Dependiendo del sistema, los especímenes pueden tener forma cilíndrica, trapezoidal, o rectangular y la compactación lograrse a base de impactos, amasado o vibración. Los compactadores giratorios aplican un esfuerzo de amasado para producir especímenes cilíndricos. En general, los compactadores giratorios han experimentado una evolución resultado de varios dispositivos únicos y una variedad de métodos.

1.1 Primeras compactaciones giratorias

En 1939 el Texas Highway Department inició una investigación sobre el diseño y control de mezclas asfálticas. Previamente los métodos de prueba y error se utilizaban confiando en cómo se veía y se sentía la mezcla bajo carga. Se establecieron criterios para métodos realizados en laboratorio; en el primero, el método debía ser igualmente adaptable para el control de la mezcla tanto en campo como en el diseño. En segundo lugar, el método debía producir esencialmente la misma densidad o proporción de vacíos, como se obtendría en el pavimento terminado.

Desde que la vida del pavimento tuvo que tomarse en cuenta y comprendiendo que la densidad se incrementa a un máximo con el tiempo y tránsito vehicular, la densidad deseada que se obtiene con cualquier procedimiento de moldeado, necesita aproximarse a la del pavimento después de un tiempo en carretera.

Dado que el agregado deberá resquebrajarse, bajo métodos de compactación de campo, entonces el tercer requerimiento del método de moldeado fue el de aproximar lo más posible a la degradación del agregado obtenida, bajo las condiciones de operación.

1.2 Compactador giratorio del Texas Highway Department

La compactación giratoria se ha empleado en diseños de mezclas asfálticas desde 1930, cuando se desarrolló un procedimiento por el Texas Highway Department (Department of Transportation, actualmente); en cuanto al desarrollo del concepto giratorio, éste es atribuible a Philippi, Raines y Love (Figura 1.1).

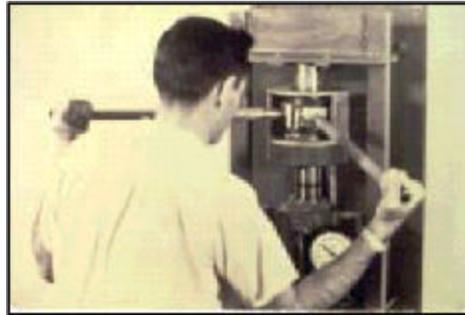


Figura 1.1
Prensa giratoria de Texas

1.3 Máquina de pruebas giratorias del cuerpo de ingenieros (GTM)

Durante la pasada II Guerra Mundial el cuerpo de ingenieros se comprometió a desarrollar tecnología militar para uso civil. El diseño de mezclas Marshall iniciado por el Mississippi Highway Department y aplicado en construcciones de campos de aviación se adoptó para uso de carreteras civiles.

John L. McRae junto con el cuerpo de ingenieros de los Estados Unidos y basado en los principios del Texas Highway Department, desarrollo “el compactador de amasado giratorio del cuerpo de ingenieros” (Figura 1.2). Fue desarrollado en respuesta a la experiencia de los años 50’s que mostraron que el impacto del martillo Marshall no simulaba las densidades producidas por las ruedas de aviones pesados. McRae también creía que las propiedades mecánicas de las pruebas de especímenes producidas por los impactos del martillo Marshall, no representaban las propiedades de los especímenes tomadas de los pavimentos.



Figura 1.2
Compactador de amasado giratorio del cuerpo de ingenieros

1.4 Compactador giratorio LCPC (francés)

Al final de los años 50's durante una visita de intercambio de tecnología, la idea del compactador giratorio fue introducida a Francia, al grado que durante los 60's y principios de los 70's el desarrollo del protocolo del compactador giratorio francés quedó establecido, generándose extensos estudios para investigar el mecanismo giratorio; incluían la forma de las curvas de densificación giratoria y efectos de la graduación del agregado, aun como contenidos de relleno mineral y propiedades del asfalto sobre la posición e inclinación de la curva. Durante los mismos hubo estudios para investigar las características de la compactación de la mezcla mediante rodillos y relacionar los resultados de propiedades de densificación de la mezcla en el compactador.

El compactador giratorio LCPC aplica un ángulo fijo de un grado (1°) y una presión vertical constante (600kPa) que es mantenida en el espécimen; los giros se aplican a una proporción constante de seis giros por minuto a través del proceso de compactación (Figura 1.3).



Figura 1.3
Francis Moutier (LCPC) con el PGC-2

En el sistema francés, el esfuerzo de compactación estándar en campo se define como una sucesión de rodillos estandarizados. En laboratorio, el número de giros con el compactador depende del espesor de la capa de pavimento. Si éste se incrementa, la mezcla se vuelve fácil de compactar en la carretera y el número de

giros aumenta. Para cualquier estructura de agregado significará que el contenido de asfalto puede decrecer y la mezcla ser más difícil de compactar.

El incremento en la dificultad de la compactación se compensa por el aumento del espesor, el cual reduce el esfuerzo de compactación requerido para obtener la densidad. En el método de diseño de mezclas, el cambio de los giros se diseña para balancear los dos efectos del espesor, el resultado final es una compactabilidad constante sobre la carretera.

1.5 Compactador giratorio Superpave

El Congreso de los Estados Unidos autorizó en 1987 el Strategic Highway Research Program (SHRP). Este esfuerzo fue conducido de 1987 a 1993. Inicialmente el SHRP se enfocó a investigación de cementos asfálticos. En 1990 SHRP incluyó un área mezclas asfálticas, diseñada sobre el trabajo del National Cooperative Highway Research Program (NCHRP) sobre el Asphalt-Aggregate Mixture Analysis System (AAMAS) y el trabajo del LCPC en Francia. El AAMAS se condujo bajo el proyecto 9-06 del NCHRP y los investigadores principales fueron Harold L. Von Quintus y Brent Rauhut.

La mayoría de las pruebas de mezclas durante el SHRP por el Asphalt Institute se enfocaron a modificar el compactador giratorio de 6 pulg. de Texas. Diversas investigaciones del FHWA sobre este dispositivo mostraron un ángulo de molde de 1.23° y no de un grado como originalmente se deseaba.

Los investigadores encargados del SHRP especificaron finalmente para el compactador giratorio SHRP, lo siguiente:

Tabla 1.1
Especificaciones de la metodología Superpave

| | |
|-----------------------------------|---------|
| Presión de consolidación vertical | 600 kPa |
| Ángulo de giro | 1.25 ° |
| Velocidad de giro | 30 rpm |

1.6 Compactador giratorio australiano

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

El primer compactador giratorio australiano, el Giropac, se produjo en 1992, con el fin de lograr estos requerimientos. Después de un periodo de investigación y desarrollo de las normas australianas para la preparación de especímenes asfálticos por medio de compactación giratoria, hizo que un número de autoridades estatales de carreteras aprobaran que reemplazar el método de compactación Marshall de sus normas de especificación de asfaltos.

Cuando se intentó operar el Gyropac para un ángulo más bajo y presión vertical especificada por SHRP (1.25° y 600 kPa, respectivamente), se encontró con mezclas rígidas y que los componentes de las máquinas se doblaban bajo las cargas, causando que el ángulo de giro se redujera durante la compactación.

1.6.1 Compactador giratorio SERVOPAC

El segundo compactador giratorio australiano, el SERVOPAC, es un servo-controlador del compactador giratorio diseñado para aplicar una presión vertical de compresión estática a un espécimen asfáltico, aunque se aplique simultáneamente un movimiento giratorio a un molde cilíndrico que contiene el asfalto.

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

Esto se logra con la instalación de un transductor de presión en las líneas de presión de los tres puntos giratorios actuantes. A través de un algoritmo similar al usado con la máquina GTM, el promedio de la presión medida por ciclos, es trasladada en resistencia al corte (Figura 1.4).



Figura 1.4
Compactador giratorio australiano (SERVOPAC)

2 Antecedentes de la metodología Superpave

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

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

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

Iniciando el desarrollo de un nuevo sistema para especificar materiales asfálticos, el producto final del programa es un nuevo sistema llamado Superpave (Superior Performing Asphalt Pavement). Representa una tecnología provista de tal manera que pueda especificar cemento asfáltico y agregado mineral, desarrollar diseños de mezclas asfálticas; analizar y establecer predicciones del desempeño del pavimento. Incluye una especificación para cementos asfálticos, un diseño y sistema de análisis de mezclas asfálticas en caliente y un software para computadora que integra los componentes del sistema. Las especificaciones del cemento y el sistema de diseño del Superpave incluyen varios equipos y métodos de pruebas, junto con criterios para los mismos.

2.1 Comportamiento del cemento asfáltico

El cemento asfáltico tiene tres características importantes en el desempeño de la mezcla asfáltica: susceptibilidad a la temperatura, visco elasticidad y envejecimiento.

Por su parte, las propiedades del asfalto son susceptibilidad a la temperatura; y su rigidez a bajas temperaturas. Esta es la razón de que la mayoría de los cementos asfálticos y pruebas en mezclas tienen que estar acompañados por una temperatura de prueba específica. Sin esta, los resultados de la prueba no podrán ser interpretados efectivamente.

Por la misma razón, el comportamiento del cemento asfáltico depende del tiempo de carga. Esa dependencia de temperatura y duración de la carga significa que ambos factores pueden ser usados intercambiamente.

El cemento asfáltico es un material visco elástico, debido a que simultáneamente muestra las características: viscosidad y elasticidad. Para altas temperaturas ($> 100\text{ }^{\circ}\text{C}$), el cemento asfáltico actúa casi enteramente como un fluido viscoso. A temperaturas muy bajas ($<0\text{ }^{\circ}\text{C}$), se comporta mayormente como un sólido elástico.

Para temperaturas intermedias se ha encontrado que en la mayoría de los sistemas de pavimentos, el cemento asfáltico tiene ambas características: fluido viscoso y sólido elástico.

Debido a su naturaleza visco elástica, el comportamiento del cemento asfáltico depende tanto de la temperatura como del porcentaje de carga. En la Figura 2.1 se puede observar que el flujo del asfalto puede ser el mismo para una hora a $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ o 10 h a $25\text{ }^{\circ}\text{C}$. Con esto el efecto del tiempo y de la temperatura se encuentra relacionado; el comportamiento a alta temperatura en un período corto de tiempo, equivale a uno con baja temperatura pero con una duración más larga.

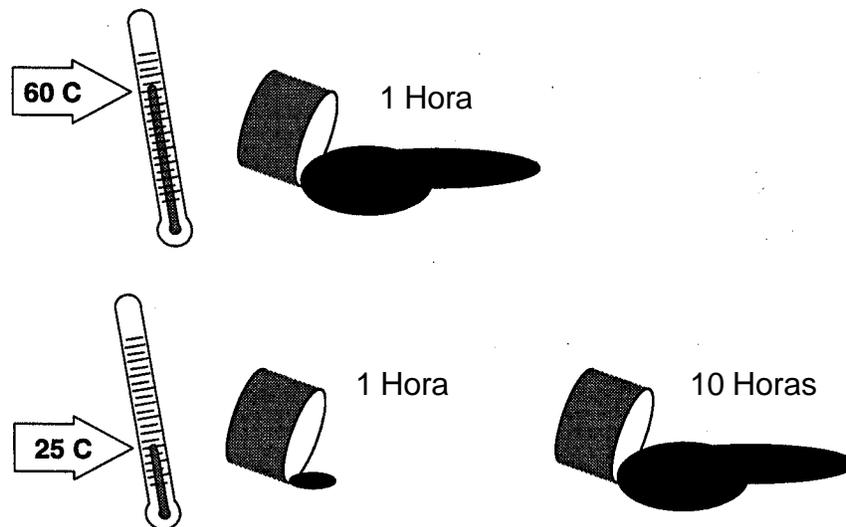


Figura 2.1
Comportamiento visco elástico del asfalto

2.1.1 Comportamiento a altas temperaturas

A altas temperaturas (desiertos), o bajo cargas sostenidas (camiones a bajas velocidades), el cemento asfáltico actúa como un líquido viscoso y fluye. La viscosidad es la característica que describe la resistencia de los líquidos a fluir. Si pudiera observarse con un poderoso microscopio (Figura 2.2), un líquido

como el asfalto fluir lentamente, se vería el movimiento relativo de las capas adyacentes del líquido, quizá del espesor de una molécula.

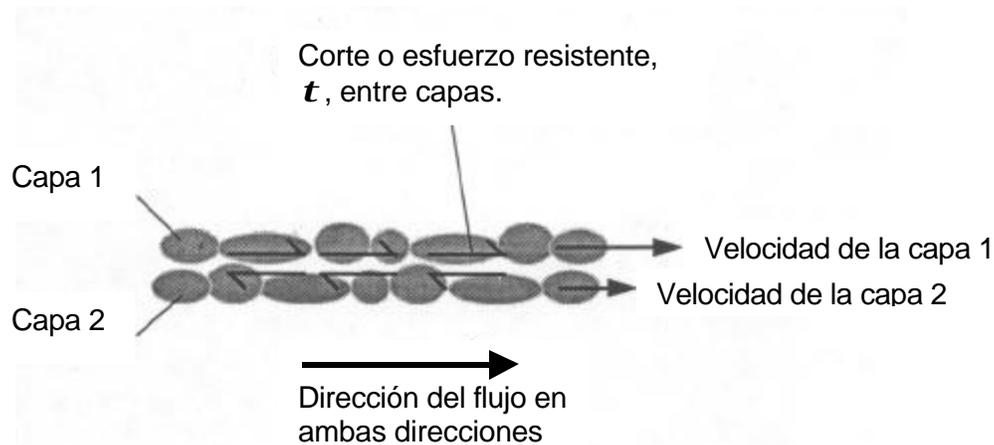


Figura 2.2
Vista microscópica de las características de flujo de un líquido

La fuerza de fricción, o resistente, entre estas capas depende de la velocidad relativa a la que se desliza una sobre otra. La fuerza resistente entre las capas se debe a que fluyen a velocidades ligeramente diferentes. La capa superior trata de arrastrar a la inferior, mientras que esta última trata de frenar a aquella. La relación entre la fuerza resistente y la velocidad relativa puede ser muy diferente en la mayoría de los líquidos.

Líquidos viscosos como el asfalto caliente son a veces llamados plásticos, porque una vez que comienzan a fluir no regresan a su posición original. Por esto, en climas cálidos algunos pavimentos asfálticos fluyen bajo cargas repetidas y forman roderas. Sin embargo, las roderas de los pavimentos asfálticos en climas cálidos son también influidas por las propiedades de los agregados y es probablemente más correcto decir que es la *mezcla asfáltica* la que tiene un comportamiento plástico.

2.1.2 Comportamiento a baja temperatura

El asfalto se comporta a baja temperatura (en los días fríos de invierno), o bajo cargas repetidas (camiones a alta velocidad), como un sólido elástico, o sea como bandas de goma que se deforman al ser cargados y retornan a su forma original al ser descargados. La deformación elástica se recobra completamente (Figura 2.3).

Si se aplica una carga excesiva, el sólido elástico puede romperse. Aunque el asfalto es un sólido elástico a baja temperatura, puede volverse demasiado frágil y agrietarse bajo carga excesiva. Por esto el agrietamiento a baja temperatura (low temperature cracking) a veces ocurre en pavimentos asfálticos en climas fríos. En tales casos las “cargas” se deben a esfuerzos internos que se desarrollan en el pavimento cuando el proceso de contracción se restringe (por ejemplo, durante y después de una rápida caída de la temperatura).

2.1.3 Envejecimiento

Existe otra característica especial de los asfaltos. Debido a que los componen moléculas orgánicas, reaccionan con el oxígeno del medio ambiente. Esta reacción se llama oxidación y cambia la estructura y composición de las moléculas del asfalto; puede provocar que se haga más duro o frágil, dando origen al término “endurecimiento por oxidación” o “endurecimiento por envejecimiento”.

Este fenómeno ocurre en el pavimento a una velocidad relativamente baja, si bien es mucho más rápido en un clima cálido que en uno frío. Así, el endurecimiento por oxidación es estacional, siendo más marcado en el verano que en el invierno. Debido a este tipo de endurecimiento, los pavimentos asfálticos nuevos pueden ser propensos a este fenómeno si no se compactan adecuadamente.

En este caso, la falta de compactación origina un alto contenido de vacíos en la mezcla, lo que facilita el ingreso de una mayor cantidad de aire a la mezcla asfáltica, e incrementar el endurecimiento por oxidación.

La oxidación se produce más rápidamente a altas temperaturas. Es por ello que parte del endurecimiento ocurre durante el proceso de producción, cuando es necesario calentar el cemento asfáltico para permitir el mezclado y compactación.

Volatilización es otro tipo de endurecimiento que ocurre durante el mezclado en caliente y construcción. A altas temperaturas los componentes volátiles del asfalto se evaporan. Estos componentes volátiles livianos del tipo aceites ablandarían al asfalto, de permanecer dentro de él.

2.2 Comportamiento del agregado mineral

Se han empleado una amplia variedad de agregados minerales para producir mezclas asfálticas en caliente (HMA). Algunos se conocen como agregados naturales porque simplemente son extraídos de depósitos fluviales o glaciales y utilizados luego sin ningún procesamiento para elaborar la HMA.

Los agregados elaborados pueden incluir a los naturales, que han sido separados en distintas fracciones según su tamaño, lavados, triturados, o tratados para mejorar ciertas características de comportamiento de la HMA. Sin embargo, en muchos casos el agregado se explota en canteras y el más importante proceso al que es sometido es a la trituración y a la división, según tamaños.

Los agregados de textura rugosa, equidimensionales, proporcionan más resistencia interna que los redondeados y de textura lisa. 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 (Figura 2.3).

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 (Figura 2.4).

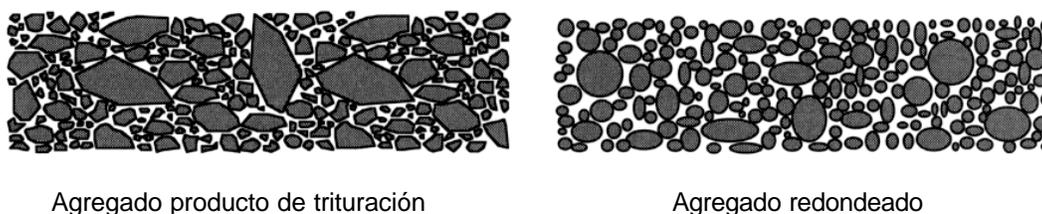


Figura 2.3
Importancia de rugosidad del agregado

Es en este plano donde las “tensiones de corte” exceden a la “resistencia de corte” de la masa de agregados. La resistencia al corte del agregado es de crítica importancia en las mezclas asfálticas en caliente.

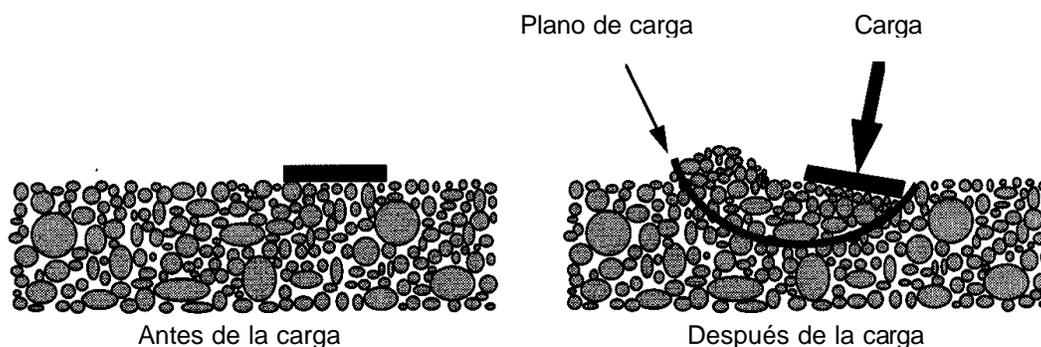


Figura 2.4
Comportamiento del agregado bajo carga de corte

La última consideración en la comprensión de las propiedades de corte del agregado, es el concepto de dilatación. Al someter una masa de agregados a tensiones de corte, las partículas deben fracturarse o arrastrarse unas sobre otras

si un desplazamiento ha de producirse (Figura 2.5). Este fenómeno se llama dilatación, pues resulta en una expansión o incremento del volumen de la masa de agregados.

En general, algunos materiales resistentes, con una mayor densificación y un alto ángulo de fricción interna, tienden a dilatarse más que los materiales más débiles.

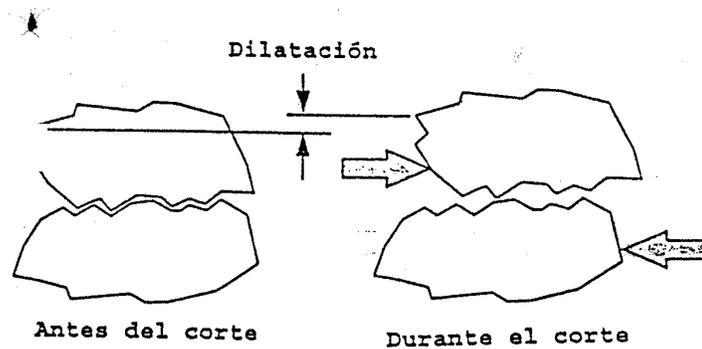


Figura 2.5

Dilatación de dos partículas de agregados cuando están sometidas a esfuerzos

A fin de asegurar una mezcla de materiales resistentes para HMA, se han especificado las propiedades del agregado que mejoran la fricción interna, una componente de la resistencia al corte. Para ello, normalmente se recurre a los porcentajes de caras fracturadas en el material grueso que integra la mezcla de agregados. Como las arenas naturales tienden a ser redondeadas, con una baja fricción interna, su aporte a las mezclas es con frecuencia limitado.

2.3 Comportamiento de la mezcla asfáltica

El concreto asfáltico (referido generalmente como mezclas asfálticas en caliente HMA) es un material de pavimentación que consta de un cemento asfáltico y un agregado mineral. El cemento asfáltico o cemento asfáltico modificado, actúa como un agente que aglutina las partículas de agregado convirtiéndola en una masa densa y una mezcla impermeable al agua. Cuando los materiales se aglutinan, el agregado mineral actúa como un marco de piedra que imparte fuerza y resistencia al sistema. El desempeño de la mezcla es afectado tanto por las propiedades individuales de los componentes, como por su reacción combinada en el sistema.

Mientras que las propiedades individuales de los componentes HMA son importantes, el comportamiento de la mezcla se explica mejor considerando el cemento asfáltico y agregado mineral, actuando conjuntamente. Una forma de entender el comportamiento de la mezcla asfáltica es considerar primeramente los tipos de inconveniencias en pavimentos asfálticos que los ingenieros tratan de

evitar: deformación permanente, agrietamiento por fatiga y agrietamiento por bajas temperaturas.

2.3.1 Deformación permanente

Es el deterioro caracterizado por la existencia de una sección transversal de la superficie que ya no ocupa su posición original. Se llama deformación "permanente", pues representa la acumulación de pequeñas deformaciones generadas con cada aplicación de carga. Esta deformación es irrecuperable. Si bien las roderas pueden tener varias causas (debilidad de la HMA por cambios de humedad, abrasión, densificación del tránsito), existen dos causas principales.

Primero, las roderas resultan de por muchas aplicaciones repetidas de carga al suelo natural (subrasante), la sub base, o la base por debajo de la capa asfáltica (Figura 2.8). Aunque la utilización de materiales viales más rígidos reduce parcialmente este tipo de roderas, el fenómeno es normalmente considerado más un problema estructural que un problema de los materiales. Frecuentemente, es producto de una sección de pavimento demasiado delgada, sin la suficiente profundidad para reducir a niveles tolerables, las tensiones sobre la subrasante cuando las cargas son aplicadas. Podría ser también resultado de una subrasante debilitada por el ingreso inesperado de humedad. La acumulación de la deformación permanente ocurre más en la subrasante que en las capas asfálticas.

Las roderas pueden ser causadas por la acumulación de deformaciones en las capas asfálticas. Este tipo de roderas es por una mezcla asfáltica cuya resistencia al corte es demasiado baja para soportar las cargas pesadas repetidas a las cuales está sometida (Figura 2.6). A veces ocurren en una capa superficial débil. En otros casos, la capa superficial no es en sí misma propensa a las roderas, pero acompaña la deformación de una inferior más débil.

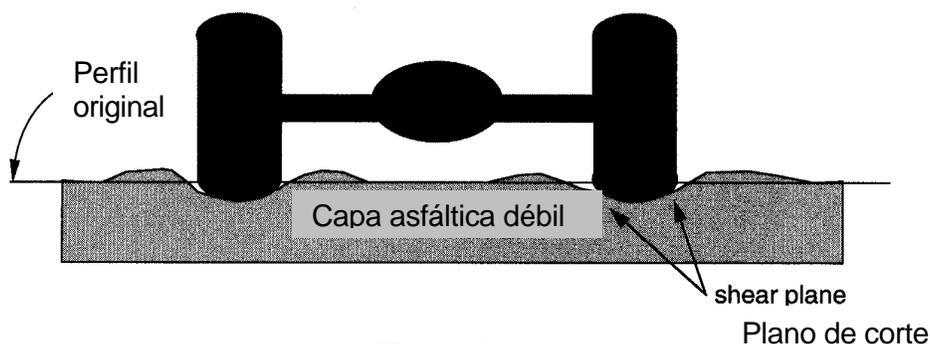


Figura 2.6
Roderas de una mezcla débil

Cuando en una mezcla asfáltica se presenta una rodera, es evidente que tiene una baja resistencia al corte. Cada vez que un camión aplica una carga se

ocasiona una deformación pequeña, pero permanente. La deformación por corte se caracteriza por un movimiento de la mezcla hacia abajo y lateralmente. Con un número dado de repeticiones de carga, aparecerán las roderas. Los pavimentos asfálticos con roderas tienen una seguridad deficiente, porque los surcos que se forman retienen suficiente agua para provocar hidropneumático, o acumulación de hielo.

Debido a que las roderas son una acumulación de muy pequeñas deformaciones permanentes, una forma de asegurar el buen desempeño del cemento asfáltico es manteniéndolo lo más próximo posible en un comportamiento de sólido elástico (Figura 2.7).

Así, cuando una carga es aplicada al cemento asfáltico en la mezcla, aquél tiende a actuar como una banda de goma y a recuperar su posición original en lugar de permanecer deformado.

Otra forma de incrementar la resistencia al corte de las mezclas asfálticas es eligiendo un agregado con un ángulo de fricción interno alto (f). Esto se logra con la selección de un agregado con buena rugosidad y con una granulometría tal que desarrolle un buen contacto entre partículas.

En la Figura 2.8 se compara la contribución de dos agregados a la resistencia al corte de la mezcla. Cuando una carga es aplicada al agregado en la mezcla, las partículas del agregado se juntan y funcionan no sólo como una masa de partículas individuales, sino como una enorme, única, roca elástica.

Al igual que con el cemento asfáltico, el agregado actuará como una banda de goma que recuperará su forma original, cuando se descarga. De esta forma, no se acumularán deformaciones permanentes.

Si bien el mayor aporte a la resistencia a la deformación permanente de la mezcla proviene del agregado, también es importante la colaboración del cemento asfáltico.

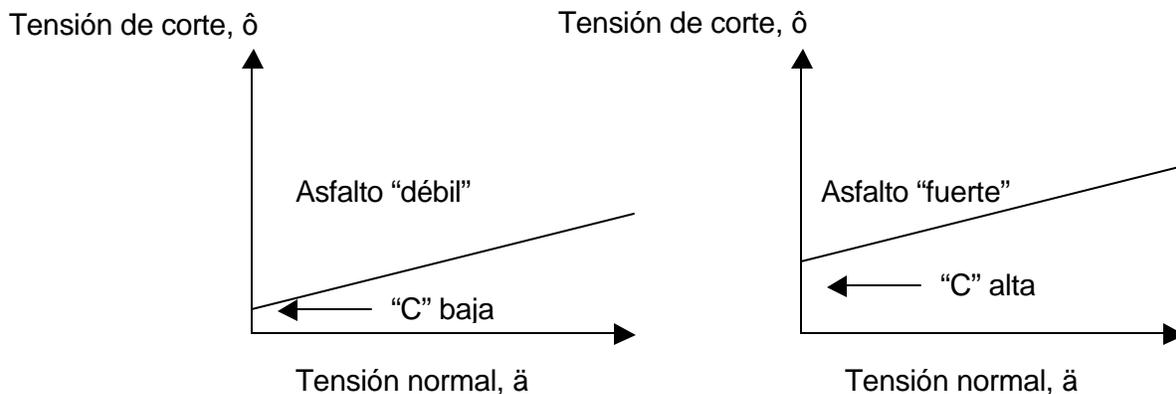


Figura 2.7
Contribución del cemento asfáltico a la resistencia por corte de la

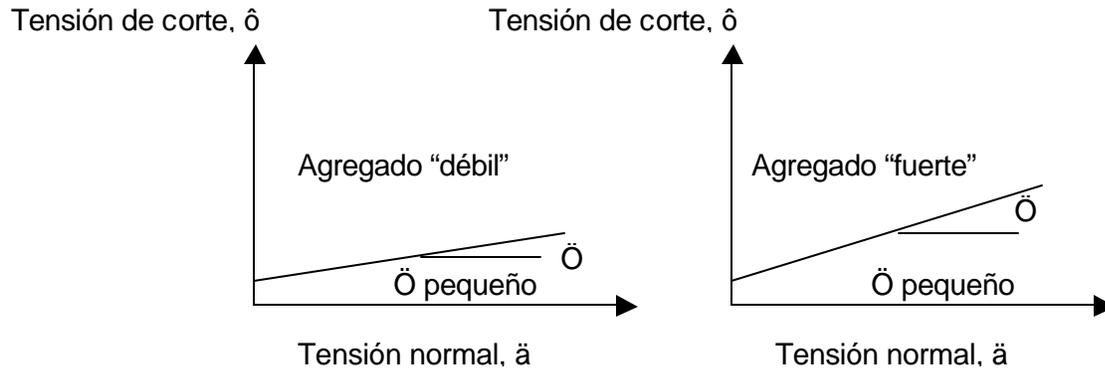


Figura 2.8
Contribución del agregado a la resistencia por corte de la mezcla

2.3.2 Fisuración por fatiga

Como las roderas, la fisuración por fatiga es un tipo de deterioro que con mucha frecuencia se produce en la huella donde las cargas pesadas se aplican. Las fisuras longitudinales intermitentes a lo largo de la huella (en la dirección del tránsito) son un signo prematuro de la fisuración por fatiga. Esta es un deterioro de tipo progresivo porque, en algún momento, las fisuras iniciales se unirán con otras, causando aún más fisuras. Un estado intermedio de la fisuración por fatiga es el denominado "piel de cocodrilo". En algunos casos extremos, el estado final de la fisuración por fatiga es la desintegración con la formación de baches.

Si bien el mecanismo de fatiga es fácil de comprender, sus causas no siempre lo son. No puede enfocarse como un problema de los materiales exclusivamente. La fisuración por fatiga es usualmente causada por un número de factores que deben producirse simultáneamente. Obviamente, las cargas pesadas repetidas están presentes. Algunos ingenieros creen que una subrasante con pobre drenaje tiene como resultado pavimentos blandos con altas deflexiones; eso es la causa principal del fisuramiento por fatiga. Así, capas de pavimento delgadas, muy rígidas, sujetas a altas deflexiones por cargas repetidas son más susceptibles al fisuramiento por fatiga.

En muchos casos, el fisuramiento por fatiga es sólo signo de que un pavimento ha sido transitado por el número de cargas para el cual fue diseñado. Luego, está simplemente "agotado" y necesita una rehabilitación planificada. Asumiendo que la ocurrencia del fisuramiento por fatiga coincide aproximadamente con el período de diseño, esto no sería necesariamente una falla, sino la progresión natural de una estrategia de diseño de pavimento. Si el fisuramiento observado ocurre mucho antes de concluido el período de diseño, sería un signo de que recibió más cargas pesadas, antes de lo previsto.

En general, las mezclas asfálticas no se afectan por la humedad al ser mayormente impermeables. En casos extremos no obstante, se ha comprobado que el vapor de agua puede despojar al agregado mineral del cemento asfáltico.

De este modo, para vencer el fisuramiento por fatiga desde la perspectiva de los materiales, la HMA debe ser seleccionada de modo tal que se comporte como un material elástico blando. Esto se logra cuando el comportamiento a la tracción de la HMA se ve fuertemente influido por el cemento asfáltico con la selección de un cemento asfáltico, cuyos límites superiores están ubicados en la parte elástica de su rigidez.

2.3.3 Fisuración por baja temperatura

Como su nombre lo indica, la fisuración por baja temperatura es un deterioro causado más por las condiciones adversas del medio ambiente que por la aplicación de las cargas del tránsito. Se caracteriza por fisuras transversales (perpendiculares a la dirección del tránsito) intermitentes, que se producen con un espaciamiento notablemente uniforme.

Las fisuras por baja temperatura se forman cuando una capa de pavimento asfáltico se contrae en climas fríos. En el momento en que el pavimento se contrae, se originan tensiones de tracción dentro de la capa. En algún lugar a lo largo del pavimento, la tensión de tracción excede la resistencia de tracción y la capa asfáltica se fisura. Así, las fisuras por baja temperatura ocurren principalmente a partir de un ciclo de baja temperatura.

3 Especificación de la metodología Superpave

Reconociendo las deficiencias en el sistema actual, las agencias de autopistas estatales de los Estados Unidos decidieron fundar un programa de investigación (SHRP) para desarrollar un sistema de especificación de pavimentos asfálticos.

Una característica única de las especificaciones Superpave es que el criterio establecido se mantiene constante, pero la temperatura a la cual el criterio deberá ser logrado cambia dependiendo de los diferentes grados.

3.1 Especificaciones de cemento asfáltico

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

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

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

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

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

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

En la Tabla 3.1 se pueden observar las pruebas utilizadas en el Superpave y el propósito de las mismas y en la Figura 3.1 una comparación de sus propiedades de desempeño.

Tabla 3.1
Propósito de las pruebas de asfaltos Superpave

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

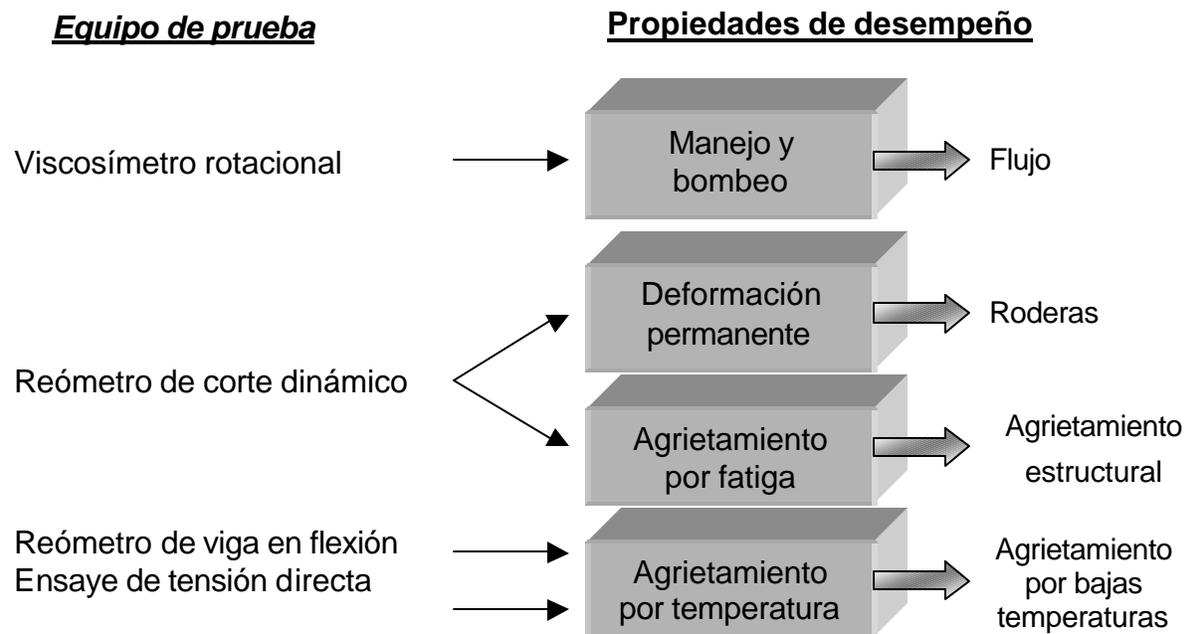


Figura 3.1
Propiedades de desempeño de los equipos de prueba

3.1.1 Procedimientos para envejecimiento de la muestra

El envejecimiento del cemento asfáltico consta de dos mecanismos diferentes: volatilización de aceites ligeros presentes en el asfalto y oxidación por la reacción con el oxígeno del medio ambiente.

El mezclado y la agitación de la mezcla en caliente en planta y el envejecimiento durante la puesta en obra son dos mecanismos que envejecen al asfalto, debido a las altas temperaturas y al flujo de aire involucrado en el proceso. Las especificaciones Superpave usan el horno rotatorio de película delgada (RTFO) como procedimiento para simular este tipo de envejecimiento (Figura 3.2).

Después que el pavimento asfáltico se construye, el envejecimiento continuo es el principal mecanismo de oxidación debido a las temperaturas del medio ambiente. Las especificaciones Superpave utilizan el procedimiento de la vasija de envejecimiento a presión (PAV), para simular el envejecimiento en servicio. Debe tomarse en cuenta que las muestras de asfaltos envejecidos en el PAV tienen que haber estado envejecidos primeramente en el RTFO.

Consecuentemente, el residuo del PAV representa un asfalto que ha sido expuesto a todas las condiciones del medio ambiente a las cuales está sujeto durante la producción y servicio.

3.1.1.1 Horno rotatorio de película delgada (RTFO)

El procedimiento del RTFO se utiliza para dos propósitos. Uno es proveer un envejecimiento al cemento asfáltico que puede usarse en pruebas posteriores de propiedades físicas. La segunda es determinar la cantidad de masa de aceites volátiles perdida del asfalto durante el mezclado. La masa de aceites volátiles perdida, es una indicación de que el envejecimiento pudiera ocurrir en el asfalto durante las operaciones de mezclado y construcción.



Figura 3.2
Horno rotatorio de película delgada (RTFO)

3.1.1.2 Vasija de envejecimiento a presión (PAV)

Como se describió, los efectos del envejecimiento del asfalto a largo plazo por servicio no se habían incorporado en especificaciones para cementos asfálticos previo a las especificaciones Superpave.

El PAV (Figura 3.3), usado por muchos años en investigaciones en asfaltos, fue modificado por el SHRP y un nuevo procedimiento se desarrolló para simular el envejecimiento en servicio. El PAV expone al asfalto a presiones y altas temperaturas durante 20 h para reproducir el efecto del envejecimiento a largo plazo. El asfalto que se expone al envejecimiento a largo plazo tiene que haber pasado por el proceso de mezclado y construcción; el procedimiento PAV utiliza el asfalto envejecido en el RTFO.

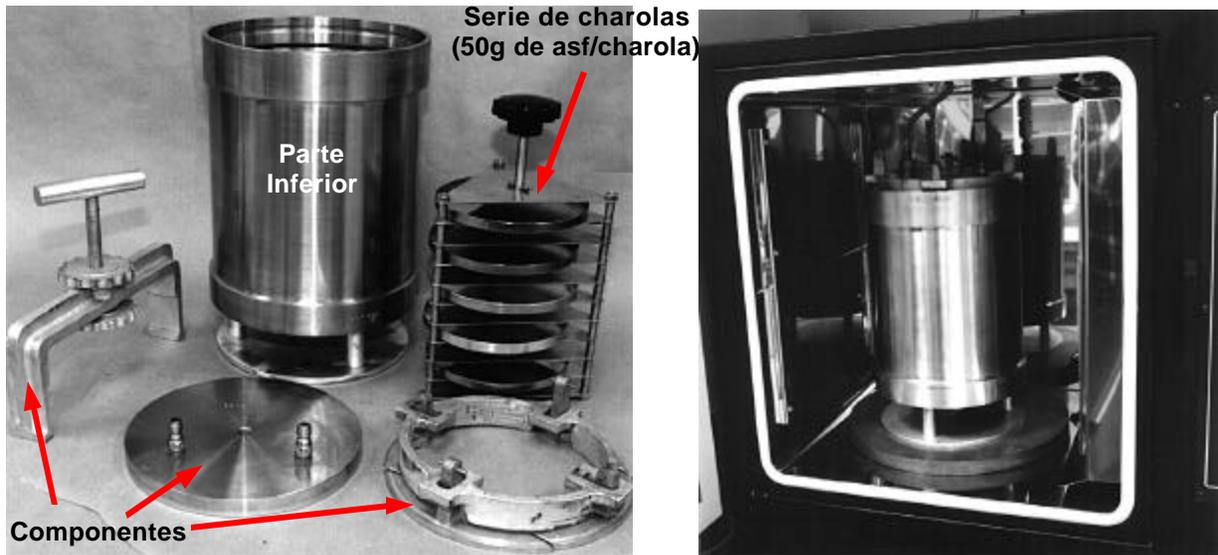


Figura 3.3
Vasija de envejecimiento a presión (PAV) y sus componentes

3.1.2 Pruebas Superpave para cementos asfálticos

Las pruebas Superpave para asfaltos se usan para cuantificar el desempeño del asfalto en las tres etapas de su vida. En estado original, después de mezclado y construcción y el envejecimiento después de estar en servicio. La prueba RTFO se emplea para simular el envejecimiento que ocurre durante el mezclado y construcción; y el procedimiento PAV para simular el envejecimiento durante servicio. La Tabla 3.2 muestra las condiciones de envejecimiento del asfalto usadas en las pruebas Superpave.

Tabla 3.2
Condiciones para pruebas de envejecimiento Superpave

| Pruebas Superpave para asfaltos | Condición del asfalto |
|-----------------------------------|-----------------------------|
| Reómetro de corte dinámico(DSR) | Asfalto original |
| | Asfalto envejecido con RTFO |
| | Asfalto envejecido con PAV |
| Viscosímetro rotacional (RV) | Asfalto original |
| Reómetro de flexión en vigas(BBR) | Asfalto envejecido con PAV |
| Equipo de tensión directa (DTT) | Asfalto envejecido con PAV |

3.1.2.1 Reómetro de corte dinámico (DSR)

Desde que el comportamiento del asfalto depende del tiempo de aplicación de las cargas y la temperatura, la prueba ideal para cementos asfálticos deberá incluir ambos factores. Afortunadamente, el equipo de prueba con esta capacidad ahora existe y es conocido generalmente como reómetro de corte dinámico (Figura 3.4). Los reómetros son adaptables para usarlos con asfaltos. Cuando se usan en pruebas para cementos asfálticos, el reómetro de corte dinámico (DSR) mide las propiedades reológicas (módulo complejo de corte y ángulo de fase) para temperaturas intermedias y altas.



Figura 3.4
Reómetro de corte dinámico

La operación del DSR es básica, el asfalto se aplasta entre dos placas paralelas (sándwich); una, se fija y la otra oscila hacia adelante y hacia atrás. La placa oscilante, parte del punto A y se mueve hacia el B. Desde el punto B, la placa oscilante retrocede y pasa por el punto A en su recorrido hacia el C y luego la

placa vuelve al punto A. Este movimiento, de A a B y a C y vuelta a A se define como un ciclo (Figura 3.5).

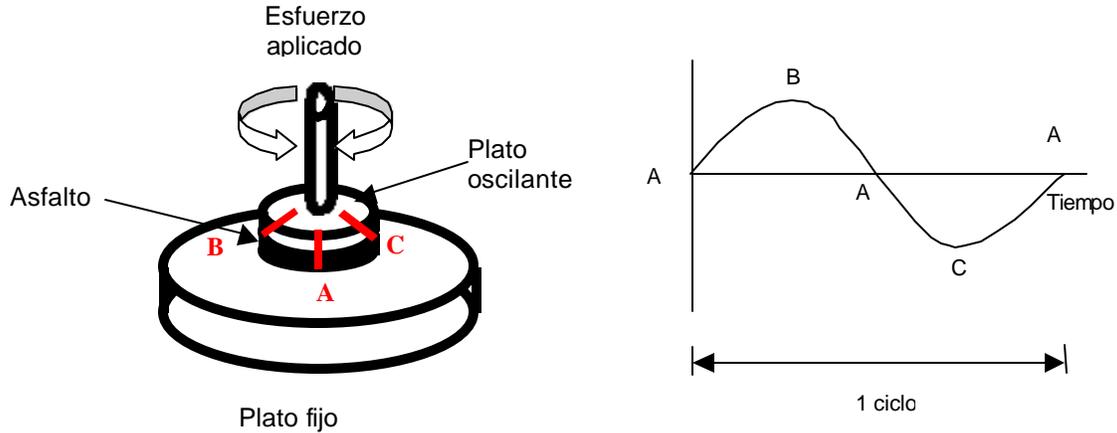


Figura 3.5
Esquema de funcionamiento del reómetro de corte dinámico

El DSR se utiliza para caracterizar el comportamiento viscoso y elástico por medición del módulo complejo de corte (G^*) y ángulo de fase (δ) del cemento asfáltico. G^* es una medida de la resistencia total de un material a deformación cuando se expone repetitivamente a presiones de corte. Esto consta de dos componentes: elástico (recuperable) y viscoso (no recuperable), δ es un indicador de la cantidad relativa de deformación recuperable y no recuperable. El valor de G^* (G asterisco) y δ (Delta) para asfaltos, depende altamente de la temperatura y frecuencia de la carga.

Para altas temperaturas, el asfalto se comporta como un fluido viscoso sin capacidad de recuperación o de regresar a su estado original. En este caso, el asfalto podría ser representado por el eje vertical (sólo componente viscoso). No podría haber componente elástico de G^* , para $\delta = 90^\circ$. A muy bajas temperaturas, los asfaltos se comportan como un sólido elástico, el cual regresa a su estado original después de deformarse completamente. Esta condición se representa por el eje horizontal (sólo componente elástico). En este caso, no existe componente viscoso de G^* , para $\delta = 0^\circ$.

Las flechas vectoriales (Figura 3.6), representan el módulo complejo de los asfaltos A y B, cuando estos son cargados; parte de su deformación es elástica (E) y parte es viscosa (V). Por eso el asfalto se considera un material visco elástico. Aunque ambos asfaltos son visco elásticos y tienen el mismo G^* , el B es más elástico que el A, debido a que δ es menor. Dado que el asfalto B tiene un componente elástico mayor, éste podrá recuperar mucho más deformación de una carga aplicada. El

ejemplo muestra que solamente G^* no puede describir el comportamiento del asfalto. El valor de δ también es necesario.

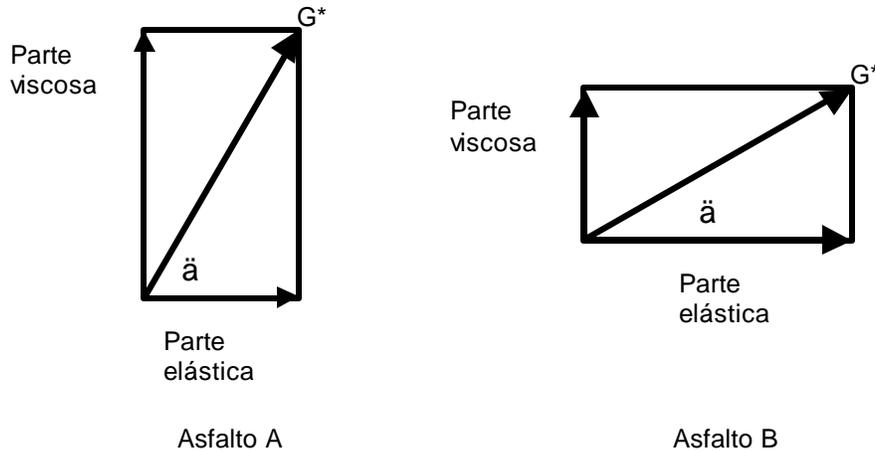


Figura 3.6
Mediciones del DSR

3.1.2.2 Viscosímetro rotacional (RV)

La prueba del viscosímetro rotacional se usa para determinar las características de fluidez del cemento asfáltico para proveer alguna garantía de que éste puede ser bombeado y ser fácilmente manejable en la refinería, terminal o planta de fabricación de mezclas asfálticas.

Un viscosímetro cilíndrico rotacional coaxial, mostrado en la Figura 3.7 y descrito en la norma ASTM D4420, "método estándar para determinación de viscosidad de asfaltos sin utilizar, usando el aparato thermosel de Brookfield".

La viscosidad rotacional se determina mediante el par requerido para mantener una velocidad de rotación constante de un vástago mientras se sumerge en una muestra de cemento asfáltico a una temperatura constante. Este par es directamente relacionado con la viscosidad del asfalto.

Desde que la viscosidad del asfalto se utiliza para asegurar que el asfalto tiene suficiente fluidez para bombear y mezclarse con el agregado, el viscosímetro se emplea para medir el asfalto original o almacenado.

El viscosímetro puede también manejarse para desarrollar esquemas de temperatura-viscosidad en estimaciones de temperaturas de mezclado y compactación en los diseños de mezclas.

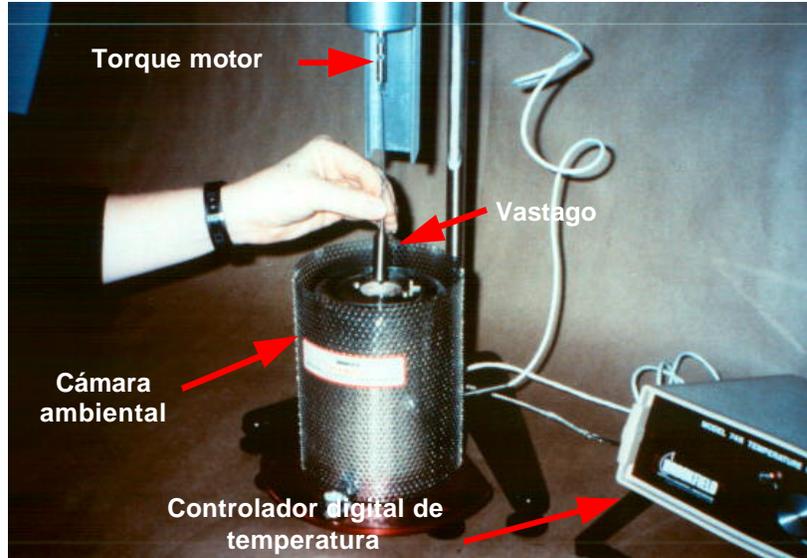


Figura 3.7
Viscosímetro rotacional (RV) y sus componentes

3.1.2.3 Reómetro de flexión en vigas (BBR)

Los asfaltos son demasiado rígidos a bajas temperaturas, lo que hace que la mayoría de los reómetros dinámicos de corte que utilizan la geometría de placas paralelas, no puedan emplearse en forma confiable en tales condiciones. Esto llevó al SHRP a desarrollar un nuevo ensayo que pudiera medir de manera precisa la rigidez y la velocidad de fluencia a temperaturas que representen las más bajas que puedan presentarse en el pavimento.

El reómetro de flexión en vigas (BBR) es un equipo sencillo que mide la flecha. Usando conjuntamente las pruebas del reómetro de corte dinámico y del reómetro de flexión en vigas (Figura 3.8) se podrá proveer el comportamiento de la rigidez de los cementos asfálticos alrededor de un gran rango de temperaturas.



Figura 3.8
Reómetro de flexión en vigas

El BBR se utiliza para medir qué tanto se flexiona o fluye el asfalto bajo una carga con temperatura constante y temperaturas que corresponden a las más bajas de servicio en el pavimento, para las que el asfalto actúa más bien como un sólido elástico.

3.1.2.4 Equipo de tensión directa (DT)

Numerosos estudios de comportamiento de cementos asfálticos a bajas temperaturas han mostrado una fuerte relación entre la rigidez del cemento asfáltico y la cantidad de alargamiento a que se somete antes de la ruptura.

Asfaltos que se sujetan a un alargamiento considerable antes de la falla son llamados “dúctiles”; aquellos que se fracturan sin mucho alargamiento se conocen como “quebradizos”.

Es importante que un cemento asfáltico sea capaz de una mínima cantidad de alargamiento. Típicamente, asfaltos más rígidos son más quebradizos y asfaltos más suaves son más dúctiles.

La rigidez en fluencia es medida por el BBR y no es adecuada para caracterizar completamente la capacidad del asfalto por alargamiento hasta la rotura.

Este requerimiento adicional aplica sólo para asfaltos que tienen una rigidez en fluencia en el BBR entre 300 a 600 MPa. Si esa rigidez está debajo de 300 MPa, adicionales, requerimiento y pruebas no son necesarias.

El equipo se denomina de tensión directa (Figura 3.9), la prueba se da en rangos temperaturas donde el asfalto generalmente exhibe un comportamiento quebradizo 0° C a -36° C. Además la prueba se ejecuta sobre asfaltos envejecidos tanto en el RTFO como en el PAV.



Figura 3.9
Equipo de tensión directa

3.2 Especificaciones de agregados minerales

Las propiedades del agregado mineral son obviamente importantes para el desempeño de mezclas asfálticas. De cualquier modo, los métodos de diseño de mezclas Marshall y Hveem no incorporan criterios sobre agregados en sus procedimientos. A la inversa, el criterio de agregados está directamente incorporado dentro del procedimiento Superpave. Procedimientos existentes se refinaron para concordar con el sistema Superpave. Al respecto dos tipos de propiedades de agregados son especificados en el sistema Superpave: propiedades de consenso y propiedades de origen.

3.2.1 Propiedades de consenso

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

3.2.1.1 Angularidad del agregado grueso

Estas propiedades aseguran un alto grado de fricción interna y alta fuerza al corte para resistencia a las roderas. Es definido como el porcentaje por peso de agregados más grandes de 4.75 mm, con una o más caras fracturadas.

3.2.1.2 Angularidad del agregado fino

Estas propiedades aseguran un alto grado de fricción interna y alta fuerza al corte para resistencia a las roderas. Se define como el porcentaje de vacíos de aire presentes en agregados sueltos, con tamaños menores de 2.36 mm [AASHTO TP 33, "método de prueba para la determinación del porcentaje de vacíos en agregado fino, levemente compactado" (así como la influencia de la forma de la partícula, textura de la superficie y graduación), (método A)], altos porcentajes de vacíos significan más caras fracturadas.

En la prueba, una muestra de agregado fino se vierte a través de un embudo estándar en un pequeño cilindro calibrado, determinando el peso del agregado fino (W) que llena al cilindro de volumen conocido (V); el contenido de vacíos puede calcularse como la diferencia entre el volumen del cilindro y el del agregado fino en el cilindro (Figura 3.10). La densidad específica del agregado fino (G_{sb}) se emplea para calcular el volumen del agregado fino.

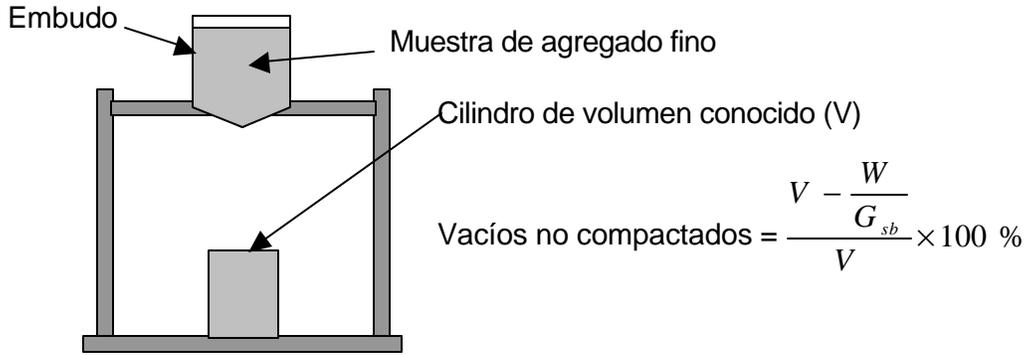


Figura 3.10
Aparato para medir la angularidad del agregado fino

3.2.1.3 Partículas planas y alargadas

Es el porcentaje en peso del agregado grueso, cuya relación entre las dimensiones máxima y mínima es mayor de 5 las partículas alargadas son indeseables porque tienden a quebrarse durante la construcción y el tránsito. El procedimiento es la Norma ASTM D4791, "partículas planas y alargadas en agregados gruesos" y se aplica a agregados gruesos mayores de 4.75mm.

Para medir la relación de dimensiones de una muestra representativa de las partículas de agregado, se emplea un calibrador (Figura 3.11)

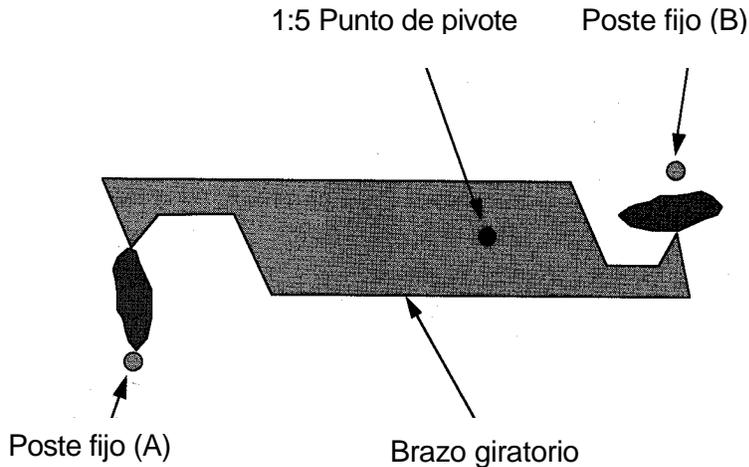


Figura 3.11
Calibrador de partículas planas y alargadas

3.2.1.4 Equivalente de arena

Es el porcentaje de arena presente en la fracción de agregado menor de 4.75 mm (Norma ASTM D2419, "Finos plásticos en agregados graduados y suelos usando el ensayo de equivalente de arena").

En este ensayo, una muestra de agregado fino se vierte en un cilindro graduado que contiene una solución que separa. El cilindro se agita para separar los finos de arcilla presentes en el agregado. La solución permite la separación del material y éste se sedimenta de manera individual, de modo que las partículas más grandes (arenas) se encuentran en el fondo de la probeta y gradualmente hacia arriba se tienen las partículas en suspensión (partículas plásticas). Después de un período que permita la sedimentación, se mide la altura de arcilla suspendida y la de la arena sedimentada; la relación entre ellas es el equivalente de arena (Figura 3.12). Limitando el contenido de arcilla, se realiza la relación de adherencia entre el cemento asfáltico y el agregado.

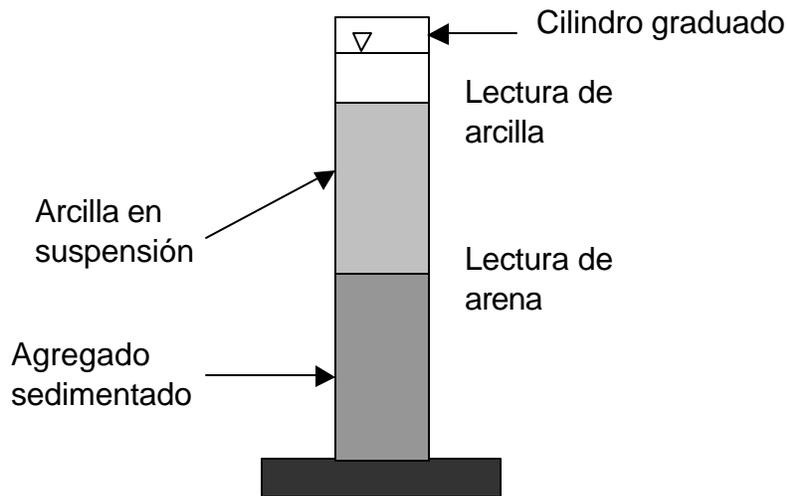


Figura 3.12
Ensayo de equivalente de arena

3.2.2 Propiedades de la fuente de origen

Además de las propiedades de consenso, los expertos viales pensaron que había otras características críticas del agregado. No obstante, no pudieron acordar valores críticos para estas propiedades pues son específicos de cada fuente de origen. Consecuentemente, un grupo de "propiedades de fuente de origen" fue recomendado. Valores específicos han sido establecidos por las agencias locales. Aun cuando estas propiedades son relevantes durante el proceso de diseño de la mezcla, podrían también ser usadas como un control de aceptación de la fuente de origen.

Estas propiedades son:

- Tenacidad (la prueba de desgaste de Los Ángeles)
- Durabilidad (intemperismo acelerado)
- Materiales deletéreos

3.2.2.1 Tenacidad (prueba de desgaste de Los Ángeles)

La tenacidad es el porcentaje de pérdida de material en una mezcla de agregados durante el ensayo de abrasión de Los Ángeles, la Norma ASTM D131, "Resistencia al desgaste del agregado grueso de pequeño tamaño mediante el uso de la máquina Los Ángeles". Este ensayo estima la resistencia del agregado grueso a la abrasión y degradación mecánica durante el manipuleo, construcción y servicio. Se realiza sometiendo al agregado grueso, mayor de 2.36 mm a trituración y abrasión por medio de esferas de acero y bajo el procedimiento ya especificado.

3.2.2.2 Durabilidad (intemperismo acelerado)

Es el porcentaje de pérdida de material en una mezcla de agregados durante el ensayo de durabilidad de los áridos sometidos al ataque con sulfato de sodio o magnesio. La norma es la ASTM C88, "Durabilidad del agregado por medio del uso de sulfato de sodio o magnesio". Este ensayo estima la resistencia del agregado al deterioro por la acción de los agentes climáticos durante la vida útil del pavimento. Puede aplicarse tanto a agregados gruesos como finos.

3.2.2.3 Materiales deletéreos

Los materiales deletéreos se definen como el porcentaje en peso de contaminantes como esquistos, madera, mica y carbón mezclados con los agregados. La norma es la AASHTO T 112, "Masa de arcilla y partículas friables en agregados". Puede aplicarse tanto a agregados finos como gruesos.

3.2.3 Granulometría

Para especificar la granulometría, Superpave ha modificado el enfoque de la granulometría Marshall. Emplea el exponente 0.45 en la carta de granulometría para definir la granulometría permitida (gráfica de Fuller). Esta carta usa una técnica gráfica única para juzgar la distribución de tamaños acumulados de partículas de una mezcla de agregados. Las ordenadas de la carta son los porcentajes que pasan; las abscisas, en escala aritmética, representan las aberturas de los tamices en mm, elevadas a la potencia 0.45.

Un rango importante de esta carta es la granulometría de máxima densidad; corresponde a una línea recta extendida desde la abcisa de tamaño máximo de agregado y ordenada 100% hasta el origen (0 %, 0 mm).

La granulometría de máxima densidad representa la graduación para la cual las partículas de agregado se acomodan entre sí, conformando el arreglo volumétrico más compacto posible. Evidentemente, esta granulometría debe evitarse porque habría muy poco espacio entre los agregados como para permitir el desarrollo de una película de asfalto lo suficientemente gruesa, como para obtener una mezcla durable.

Para especificar la granulometría del agregado, se emplean dos conceptos adicionales: puntos de control y una zona restringida. Los puntos de control son puntos de paso obligado para la curva granulométrica y corresponden al tamaño máximo nominal, un tamaño intermedio (2.36 mm) y un tamaño de finos (0.075 mm).

Por su parte, la zona restringida se ubica entre los tamaños intermedios (4.75 ó 2.36 mm) y 0.3 mm. Forma una banda por la cual la curva granulométrica no deberá pasar. Granulometrías que pasan a través de la zona de restricción (desde abajo), se llaman "humped graduations" (graduaciones con joroba) por la forma característica de joroba que se forma en la curva al pasar por aquella zona. En la mayoría de los casos, estas curvas indican una mezcla con mucha arena fina en relación con el total de la arena. Las granulometrías que violan la zona restringida poseen un esqueleto granular débil que depende demasiado de la rigidez del cemento asfáltico para alcanzar una mezcla con resistencia al corte.

Un diseño de la estructura del agregado que pase entre los puntos de control y evite la zona de restricción satisface los requerimientos granulométricos de Superpave.

3.3 Mezclas asfálticas

Los requerimientos del diseño de mezclas asfálticas de Superpave son:

Requerimientos volumétricos de la mezcla

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

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

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

Proporción de polvo

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

Susceptibilidad a la humedad

El ensayo de susceptibilidad a la humedad para evaluar una HMA al desprendimiento es la Norma T 283, "Resistencia de mezclas bituminosas compactadas al daño inducido por humedad". Este ensayo, que no se basa en el desempeño, sirve para dos propósitos; primero, identificar si una combinación de cemento asfáltico y agregado es susceptible a la acción del agua; segundo, mide la efectividad de los aditivos anti-desprendimiento o de mejora de adherencia.

4 Descripción del experimento

Se realizó siguiendo lo establecido en el sistema Superpave, que para el diseño de un pavimento tiene establecido tres especificaciones: cemento asfáltico, agregado mineral y mezclas asfálticas.

4.1 Cemento asfáltico

El asfalto utilizado para las pruebas es un AC-20 proveniente de la refinería de la ciudad de Salamanca, Gto.

Se realizaron pruebas a los cementos asfálticos en dos equipos: el viscosímetro rotacional (RV) y el reómetro de corte dinámico (DSR).

4.1.1 Viscosímetro Rotacional (RV)

Con este equipo se obtuvieron dos tipos de resultados; el primero, referente a las temperaturas necesarias para el mezclado y compactación de la muestra; y el segundo, respecto al manejo del asfalto.

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

Para elaborar la carta de viscosidad-temperatura, se realizaron pruebas en el viscosímetro rotacional a diferentes temperaturas para conocer la viscosidad atribuible a una temperatura específica. Las diferentes temperaturas así como su valor se pueden observar en la Figura 4.1, donde los rangos de valores de mezclado y de compactación son de 143 – 147°C y 135 – 140°C, respectivamente.

Para determinar la viscosidad, la especificación Superpave establece que el asfalto debe de tener una viscosidad máxima de 3 Pa.s (3000cP) para una temperatura de 135 °C.

En la prueba al asfalto utilizado (AC-20), su valor de viscosidad a 135 °C fue de 0.37 Pa.s, siendo éste un valor apropiado para el cemento asfáltico.

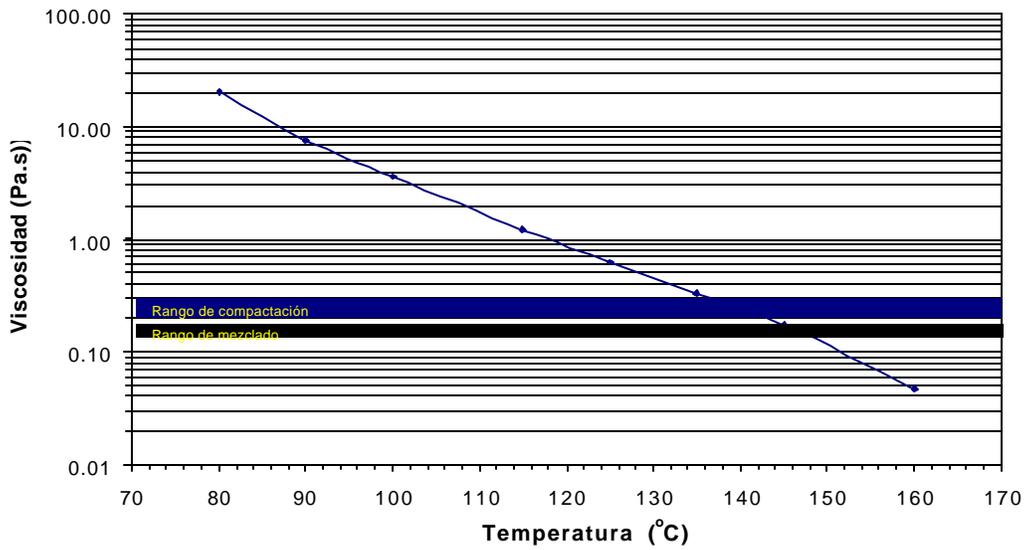


Figura 4.1
Carta de viscosidad

Con el fin de entender el comportamiento del asfalto en el laboratorio, se aplicó un tratamiento que consistió en calentar la muestra en horno a 155 °C por 24 h y se realizaron pruebas en el viscosímetro a las mismas temperaturas que el asfalto natural (sin tratar); los resultados se presentan en la Figura 4.2.

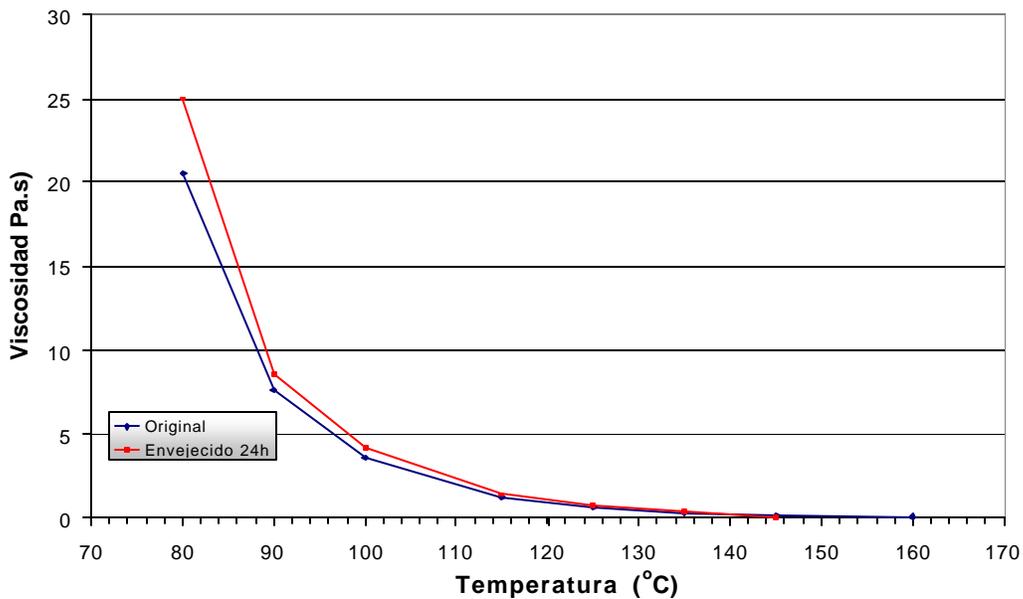


Figura 4.2
Carta de viscosidad comparativa

Como se observa en la Figura 4.2, los valores de viscosidad a temperaturas mayores de 125 °C, no parecen ser afectados por el tratamiento; para valores de temperatura de 90 °C o menores, el comportamiento de la viscosidad se presenta en forma lineal, quedando el área de variación por tratamiento entre 90 y 125 °C, en donde podrían encontrarse valores de viscosidad para muestras tratadas entre 0 (sin tratar) y 24 h, en lo que respecta al asfalto utilizado en esta investigación.

4.1.2 Reómetro de corte dinámico (DSR)

Conjuntamente se determinó la viscoelasticidad del cemento asfáltico, determinando su grado de desempeño (PG); resultó un valor de $G^*/\text{sen}(\delta)$ de 1.90 para una temperatura de pavimento de 58 °C, siendo casi el doble de lo establecido en la especificación Superpave, donde $G^*/\text{sen}(\delta) \geq 1$. Su valor de ángulo de fase (δ) es de 84.1°, lo que significa que es un material con un componente viscoso muy alto; debido a esto, el valor de $G^*/\text{sen}(\delta)$ es muy similar a G^* ($\text{sen } 90 = 1$).

Al igual que en el viscosímetro rotacional se realizaron pruebas en el asfalto tratado durante 24 h a 155 °C, variando las temperaturas del pavimento entre 40 y 70 °C, de acuerdo con la especificación Superpave, que indica que las temperaturas de prueba varían en 6 °C, siendo los valores 40, 46, 52, 58, 64 y 70 °C.

Los resultados de módulo de corte (G^*), ángulo de fase (δ) y $G^*/\text{sen}(\delta)$, para los diferentes parámetros utilizados se observan en las Figuras 4.3 y 4.4.

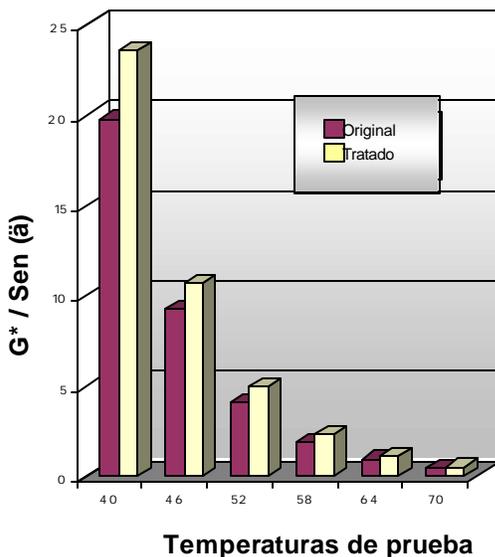


Figura 4.3
Análisis de $G^*/\text{sen}(\delta)$

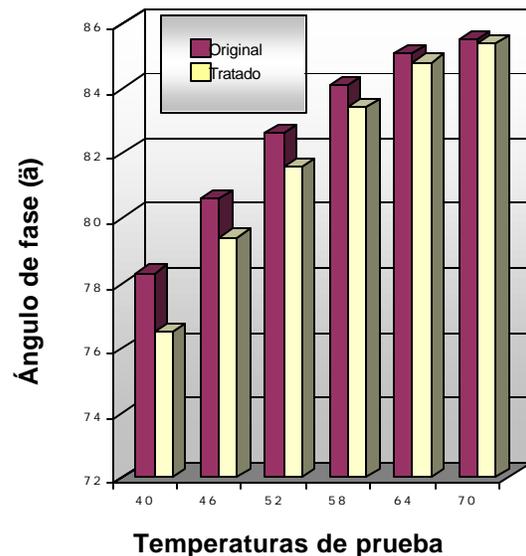


Figura 4.4
Análisis del ángulo de fase (δ)

En la Figura 4.3 se puede observar que los valores de $G^*/\text{sen } (\delta)$ disminuyen en un 50%, conforme se aumenta la temperatura de la prueba; por ende, el valor de G^* tendrán el mismo comportamiento.

La comparación de $G^*/\text{sen } (\delta)$ entre las dos condiciones de asfaltos (original y tratamiento de 24 h) muestran que conforme se aumenta la temperatura de prueba, las diferencias entre las dos condiciones de preparación son menores.

En cuanto al valor del ángulo de fase, se puede determinar que se incrementa conforme sube la temperatura y la variación de las temperaturas parece ser no muy significativa; igualmente el valor del ángulo de fase, siempre fue mayor para el asfalto sin tratar.

4.2 Agregado mineral

El material granular en estudio proviene del banco de materiales La Cañada, Saldarriaga, Qro (Figura 4.5) y está compuesto de roca basáltica triturada.



Figura 4.5
Banco La Cañada

La granulometría se seleccionó de acuerdo con la metodología Superpave. Con el fin de analizar el efecto de la graduación, se utilizaron dos tipos de granulometrías (Figura 4.6); corresponden a una que pasa por debajo de la zona de restricción (G1, mezcla gruesa) y otra que lo hace por encima de la zona de restricción (G2, mezcla fina).

Después de separar el material y definir las granulometrías, se determinó la cantidad de material a utilizar por probeta de mezcla asfáltica compactada.

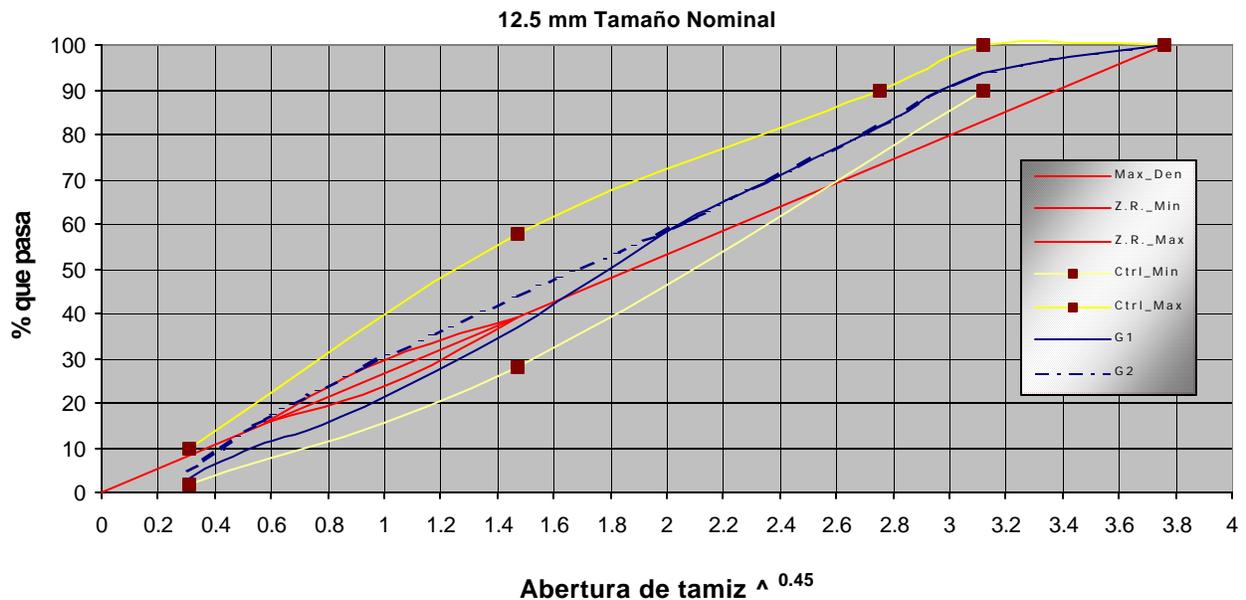


Figura 4.6
Granulometría Superpave

Para esto, el primer aspecto a determinar fue el tipo de molde a utilizar (4 o 6 plg), seleccionando el molde de 6 plg, que es el que señala el Superpave. Con el fin de realizar pruebas mecánicas posteriores a la mezcla asfáltica compactada (compresión simple), se decidió lograr relaciones de altura-diámetro mayor o iguales de 1, dando como resultado una cantidad de 6 kg de material granular.

4.2.1 Pruebas de consenso

Angularidad del agregado grueso

En el análisis de caras fracturadas se pudo observar que el agregado proporcionaría un buen grado de fricción interna, debido a que presenta los siguientes porcentajes (Tabla 4.1).

Tabla 4.1
Resultados de la angularidad del agregado grueso

| Criterio | Agregado (%) | Especificación Superpave (*) |
|-----------------------|--------------|------------------------------|
| Una cara fracturada | 100 | 100 |
| Dos caras fracturadas | 100 | 100 |

* Esta especificación es para ejes equivalentes mayores de 30×10^6

Partículas alargadas y aplanadas (ASTM D4791)

Para ésta se ejecutó de acuerdo con la Norma ASTM D4791; por tanto, lo que se realizó fue una inspección visual de las partículas del agregado que se retuvo en

la malla No 4, donde se presentó un porcentaje en peso del 3% cumpliendo ampliamente con la especificación (<10).

Esto aseguró que la mezcla de agregado no contiene una cantidad de partículas considerable que puedan fracturarse durante la construcción y bajo tránsito.

Equivalente de arena (ASTM D2419)

En esta prueba se determinó de acuerdo con la Norma ASTM D 2419, que el equivalente de arena de la mezcla de agregado, siendo éste de 60 %, se pudo comprobar que se cumplía con las especificaciones Superpave, que señalan como mínimo 50 % (para ESAL's >30 x 10⁶).

4.2.2 Pruebas de origen

Desgaste de Los Ángeles (ASTM C131)

De acuerdo con la Norma C 131, los valores de pérdida por abrasión de la mezcla de agregado fue de 14.7%, que es un valor aceptable debido a que la especificación marca que sea menor de 35%.

Intemperismo acelerado (ASTM C88)

La prueba de Intemperismo se realizó de acuerdo con la Norma ASTM C88, resultando un valor de pérdida de 8%, menor al especificado en el Superpave, que es de 10%.

Materiales deletéreos (AASHTO T11)

La prueba de materiales deletéreos no se realizó debido a que el material pétreo es producto de trituración y no presentaba partículas contaminantes como esquistos y carbón.

Trabajos complementarios

Las pruebas adicionales realizadas a bs agregados fueron absorción, densidad específica y aparente tanto al agregado grueso como al fino. Los resultados se presentan en la Tabla 4.2.

Tabla 4.2
Pruebas adicionales a los agregados

| Pruebas | Granulometrías | |
|-------------------|----------------|------|
| | G1 | G2 |
| Absorción (%) | 3.04 | 4.03 |
| Densidad | 2.70 | 2.69 |
| Densidad aparente | 2.78 | 2.76 |

Después de haber realizado las pruebas correspondientes al material granular y verificar que cumple con las especificaciones mínimas, se procedió a separarlo por tamaños; el máximo nominal del agregado fue de 12.57 mm ($\frac{1}{2}$), que es común en carpetas asfálticas.

Después de separar el material y definir las granulometrías, se determinó la cantidad de material a utilizar por probeta de mezcla asfáltica compactada.

Para determinar el contenido de asfalto se utilizó la fórmula de aproximación propuesta por el Superpave, que dio como resultado un porcentaje de 5.23% y se decidió utilizar como contenido de asfalto para el diseño un valor de 5.5% del peso total (agregado + asfalto) de la muestra, que para 6 kg resulta de 349 g.

4.3 Parámetros del compactador giratorio

Los parámetros a evaluar en el compactador giratorio son el número de giros, el esfuerzo vertical, la velocidad de rotación y el ángulo de giro; a continuación se describen las consideraciones para cada una de estos.

Número de giros

El total que se utilizó en la compactación fue de 300 giros, un valor alto comparado con los de diseño de laboratorio, que oscilan entre 147 y 240 giros; esto fue con el fin de comprobar los efectos de la compactación y a su vez probar los alcances del equipo.

Esfuerzo vertical

Los esfuerzos verticales fueron, el especificado por la norma Superpave 600 kPa, y dos adicionales, con un valor intermedio de 300 kPa; y uno bajo, de 100 kPa.

Velocidad de rotación

Se mantuvo constante de acuerdo con la especificación Superpave, siendo de 30 cpm (M.J. Butcher, Determining Gyratory Compactation Characteristic Using The Servopac Gyratory Compactor), donde se concluye que la velocidad de rotación no influye en la densificación de la muestra.

Ángulo de giro

Se evaluó su influencia en la mezcla asfáltica compactada utilizando cinco diferentes valores de ángulo de giro: desde el más bajo, que proporciona el compactador giratorio 0.05° (cuasi estático) hasta el mayor 3.00° , teniendo como puntos intermedios 0.50° , 1.25° (especificación Superpave) y 2.00° .

4.4 Preparación de la mezcla asfáltica compactada

Para elaborar lo que se conoce como envuelta, se llevó a los materiales a una temperatura de mezclado de 142 - 146°C; y para el agregado, una temperatura mayor que la del asfalto, pero sin exceder de 28°C la temperatura de mezclado, al igual que el asfalto a utilizar, no debe ser calentado a la temperatura de mezclado por más de una hora.

Preparación

Cuando los materiales alcanzan las temperaturas deseadas, se prepara el agregado para recibir el cemento asfáltico, haciendo una especie de cráter en donde se coloca el asfalto (Figura 4.7) y se mezcla hasta que todas las partículas de agregado estén cubiertas de asfalto (Figura 4.8).

De igual forma el molde debe de ser calentado (en el horno) para que alcance la temperatura de compactación (136 – 139 °C).

Una vez que la mezcla asfáltica alcanza la temperatura de mezclado, se saca el molde del horno, se coloca el papel filtro en la parte inferior interna del molde y se vacía la mezcla asfáltica (debido a la cantidad de material, Figura 4.9); con una espátula o cuchara caliente se golpea 15 veces el perímetro del molde y diez veces en el interior; después se coloca el molde en el compactador giratorio (Figura 4.10).



Figura 4.7
Preparación del agregado



Figura 4.8
Envuelta de la mezcla

Compactación

Previamente se colocaron los parámetros a evaluar para la densificación de la mezcla asfáltica en el compactador giratorio Servopac; esfuerzo vertical, ángulo de giro, número de giros, etc., (Figura 4.11).

Antes de iniciar la compactación se asegura el molde en el compactador y después se inicia el proceso.



Figura 4.9
Vaciado de la mezcla al molde



Figura 4.10
Colocación del molde

Durante la compactación, el software del Servopac presentará gráficas de números de giros contra diferentes parámetros, como la variación del ángulo de giro, esfuerzo de corte, densidad, volumen de vacíos.

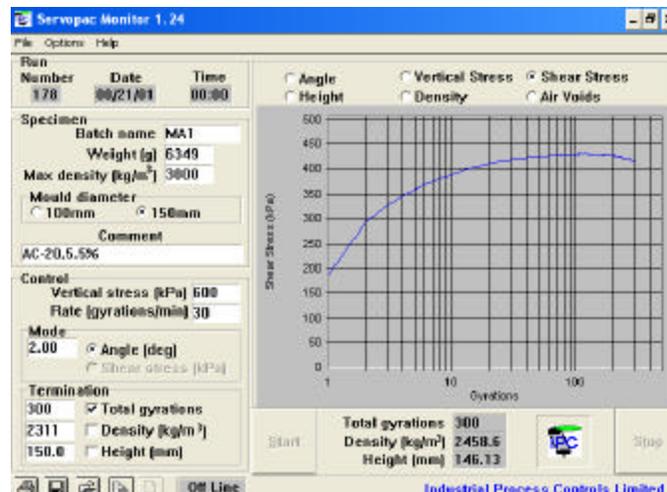


Figura 4.11
Datos generales y gráfica en el compactador Servopac

Extracción

El compactador giratorio cuenta con un sistema de extracción (Figura 4.12) que es un gato hidráulico que expulsa a la muestra del molde. Para extraerla se tiene que dejar enfriar la muestra por lo menos una hora para no ocasionarle daño alguno; esto porque a altas temperaturas la mezcla asfáltica compactada no tiene la cohesión suficiente y podría afectarse su volumetría.



Figura 4.12
Extracción de la mezcla asfáltica compactada

4.5 Pruebas a las mezclas asfálticas

Debido a que el compactador giratorio Servopac proporciona en forma directa los valores de diámetro y altura de la mezcla asfáltica compactada, no fue necesaria la medición de los mismos.

Gravedad específica de la mezcla asfáltica compactada (G_{mb})

Esta densidad es la relación entre su peso en el aire y su volumen incluyendo los vacíos permeables. Si la probeta tiene una textura superficialmente densa e impermeable, su peso específico (G_{mb}) se determina de manera sencilla mediante la expresión:

$$G_{mb} = \frac{W_a}{W_{ss} - W_w}$$

Donde:

W_a = peso de la probeta en el aire

W_w = peso de la probeta en el agua

W_{ss} = peso en el aire de la probeta saturada y superficialmente húmeda

Gravedad específica máxima (Gmm).

Para esta prueba no se contaba con el equipo necesario para realizarlo según la Norma ASTM D2047, por lo que se recurrió a una fórmula de aproximación:

$$G_{mm} = \frac{W_a}{W_a - W_w}$$

Donde:

W_a = peso de la probeta en el aire

W_w = peso de la probeta en el agua

En la Figura 4.13 se muestra la habilitación de la báscula para el pesaje de las probetas en forma sumergida, al aire y superficialmente seca.

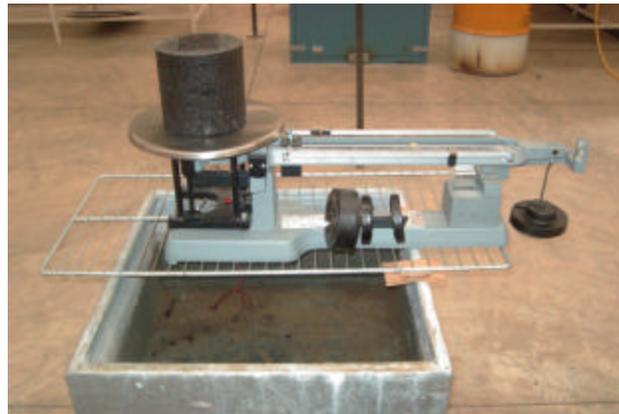


Figura 4.13
Determinación de las masas de las mezclas asfálticas

Pruebas mecánicas (prueba de compresión sin confinar)

Las pruebas de compresión simple se realizaron en una máquina servohidráulica Instron, según la Norma NLT 161/84 a una velocidad de deformación de 0.05 mm/min por cada milímetro de altura de la probeta; como las mezclas asfálticas compactadas tenían en promedio 150 mm de altura, la velocidad de deformación utilizada de 7.5 mm/min. En la Figura 4.14 se muestra el arreglo en la máquina servohidráulica Instron para las pruebas de compresión sin confinar, a su vez en la Figura 4.15 se aprecia una probeta después de ser ensayada.



Figura 4.14
Arreglo para prueba de compresión de la máquina Servohidráulica

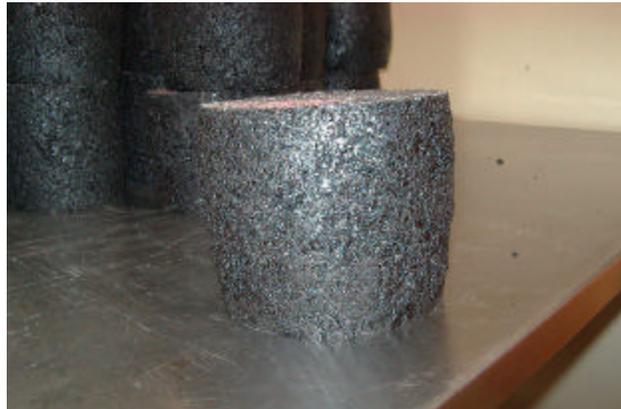


Figura 4.15
Probeta después de prueba de compresión simple

5 Resultados obtenidos

Los parámetros de investigación se determinaron tomando como base la investigación “Determining Gyrotory Compaction Characteristics Using The Servopac Gyrotory Compactor” de Mike Bucher, además de los efectos tanto del ángulo de giro como la presión vertical y el esfuerzo de corte.

5.1 Efecto del ángulo de giro

Las familias de curvas del Servopac en la variación de ángulo (600kPa, 30cpm) para las dos diferentes granulometrías se muestran en las Figuras 5.1a y 5.1b. Las graficas muestran una regular progresión desde el ángulo 0.05° hasta un máximo de 3.00°.

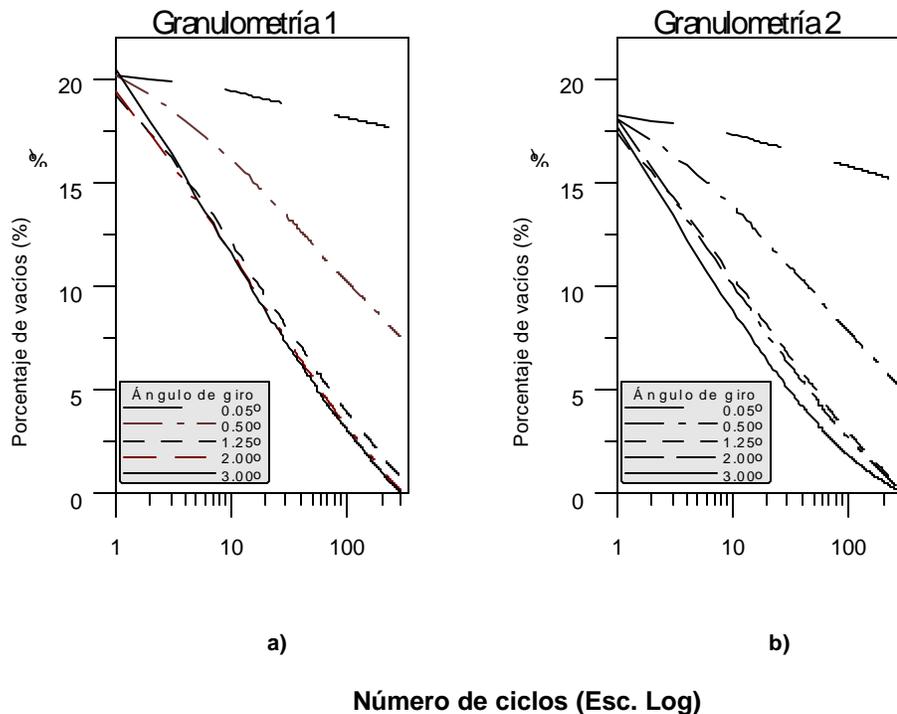


Fig. 5.1
Efecto del ángulo de Giro

Se puede observar que para valores de ángulo de giro de 1.25° o mayores el porcentaje de vacíos es similar, en donde el incremento en el ángulo de giro no tiene una afectación significativa, a diferencia de ángulos de giro menores de 1.25°, siendo donde la influencia del ángulo de giro es muy marcada.

Las Figuras 5.2a y 5.2b presentan el efecto del ángulo de giro en el porcentaje de vacíos a diferentes ciclos (50, 100, 150, 200, 250, 300), con 30cpm para las dos granulometrías.

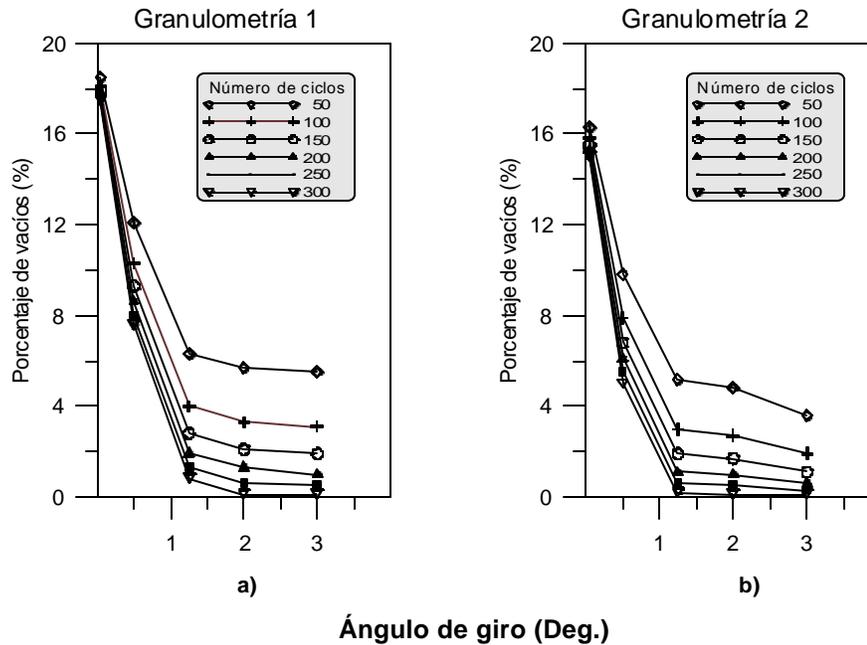


Figura 5.2
Efecto del ángulo de giro en el porcentaje de vacíos

Para compactaciones con ángulo de giro de 1.25° o mayores, el cambio en el porcentaje de vacíos es mínimo, a diferencia de las compactaciones con ángulos menores donde el porcentaje de vacíos es notablemente afectado por el cambio del ángulo.

En cuanto a los ángulos de giro menores de 0.05° (compactaciones “estáticas”), la variación en el porcentaje de vacíos para diferentes ciclos es mínima, lo que significa que la muestra no se logra compactar.

Las Figuras 5.3a y 5.3b muestra el efecto del ángulo de giro en el número de ciclos necesarios para lograr diferentes porcentajes de vacíos (10, 8, 6, 4, 2, 1, 0.5), con un esfuerzo vertical de 600 kPa y una velocidad de rotación de 30 cpm.

Se observa que la región entre el ángulo de 2.00° y 3.00° , es la más estable, y para ángulos de giro menores de 1.25° es difícil lograr porcentajes de vacíos menores, o iguales a 6%.

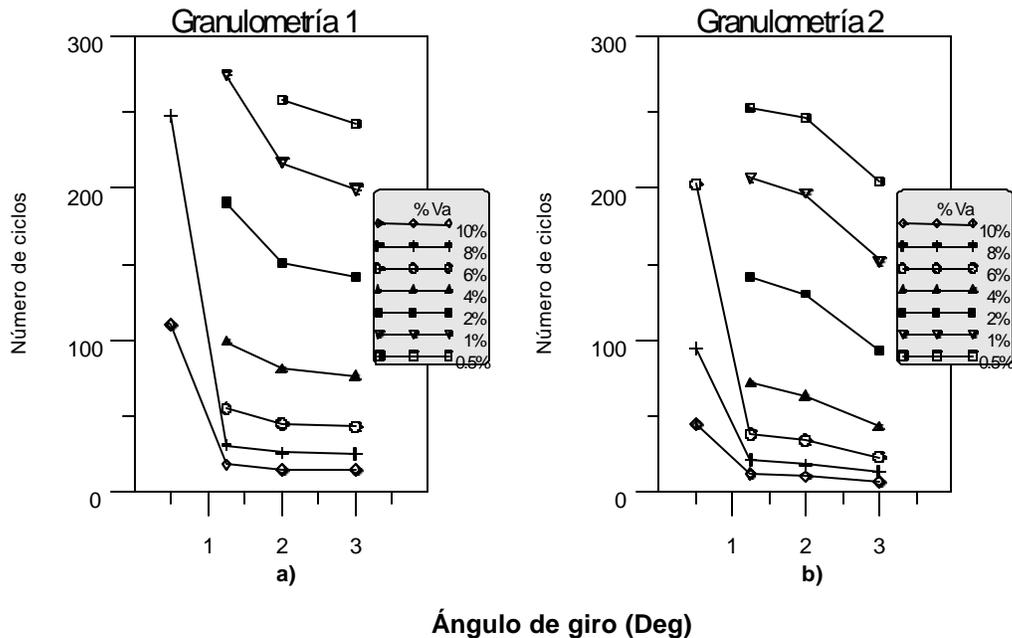


Figura 5.3
Efecto del ángulo de giro en el número de ciclos

5.2 Efecto de la presión vertical

Para investigar el efecto de la presión, el ángulo se varió entre 0.05 a 3.00° para valorar las diferentes presiones verticales (600kPa, 300kPa, 100kPa), y tomaron en cuenta los parámetros mencionados a velocidad de compactación de 30cpm utilizando las dos granulometrías.

Por su parte, las Figuras siguientes 5.4b y 5.4b se elaboraron para un ángulo de giro de 2.00° y 30cpm, utilizando las dos granulometrías establecidas; en las Figuras se presenta el efecto del esfuerzo vertical en el porcentaje de vacíos a través de los diferentes ciclos aplicados.

Como se puede observar el que el esfuerzo vertical no tiene influencia en la densificación de la mezcla asfáltica.

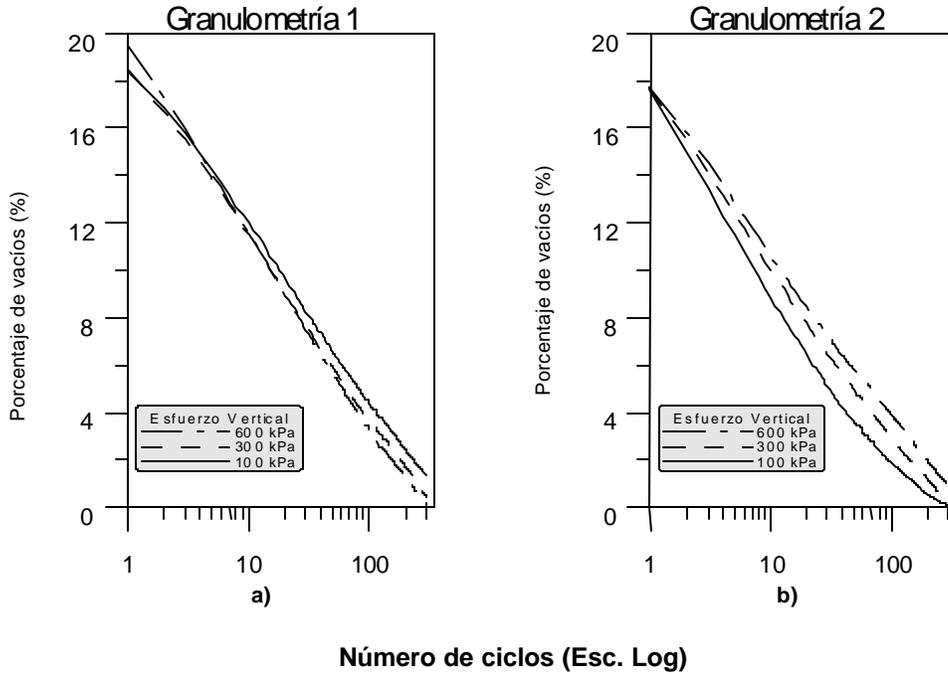


Figura 5.4
Efecto de la presión vertical

Las Figuras 5.5a y 5.5b corresponden al efecto del esfuerzo vertical en el porcentaje de vacíos para diferentes ciclos (50, 100, 150, 200, 250, 300) con 30 cpm y para las dos granulometrías.

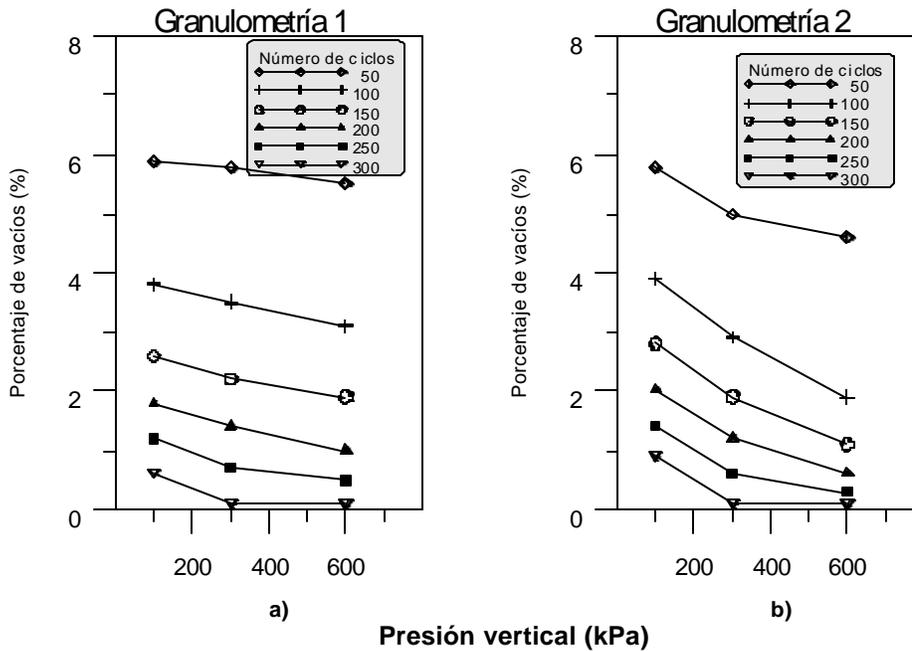


Figura 5.5
Efecto del esfuerzo vertical en el porcentaje de vacíos

La variación en el porcentaje de vacíos debido al esfuerzo vertical no es muy significativa y prácticamente se mantiene para los diferentes números de ciclos.

Cabe mencionar que la granulometría 2 presenta el mismo comportamiento, aunque con una pendiente más marcada; esto, debido a que sus densidades de compactación son más altas.

Las figuras comparativas 5.6a y 5.6b muestran los ciclos necesarios para lograr diferentes porcentajes de vacíos (10, 8, 6, 4, 2, 1, 0.5), mediante un ángulo de giro de 2.00° y 30 cpm.

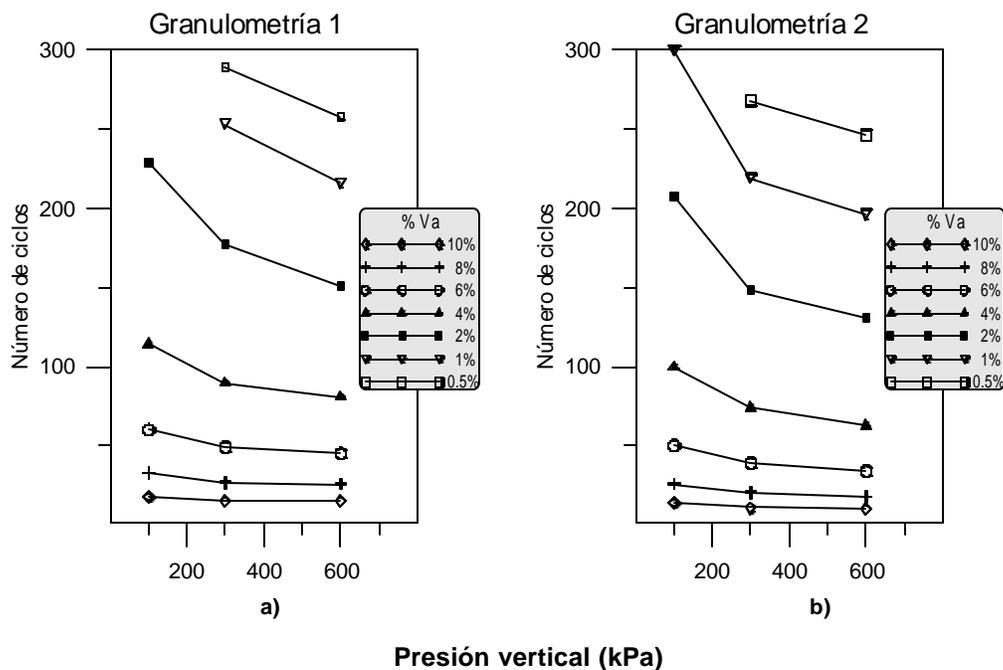


Figura 5.6
Efecto del número de giros en el porcentaje de vacíos

Para porcentajes de vacíos de 6% o mayores, la variación del esfuerzo vertical tiene una afectación mínima en los ciclos requeridos para lograr un porcentaje de vacíos específico, pero en porcentajes de vacíos menores el número de ciclos para un porcentaje de vacíos establecido, presenta una baja en el crecimiento más marcada.

5.3 Resistencia al corte

El problema de la medición de la presión de corte es uno de los más importantes en la compactación giratoria; esto, debido a que dos curvas de compactación giratoria pueden ser iguales en términos de densidad vs ciclos, y sus características de corte ser significativamente diferentes.

La medición de la resistencia al corte en el Servopac se realiza mediante la siguiente fórmula:

$$G_s = \frac{2PL}{Ah}$$

Donde:

- G_s = esfuerzo de corte
- P = promedio de la carga medida
- L = distancia del punto medio al actuador
- A = área del espécimen
- H = altura de la Probeta

5.3.1 Efecto del ángulo de giro y presión vertical

El efecto del ángulo en la medición de la resistencia al corte para los diferentes ángulos ensayados, usando una presión vertical de 600 kPa y una velocidad de compactación de 30cpm, se muestran en las figuras 5.7a y 5.7b.

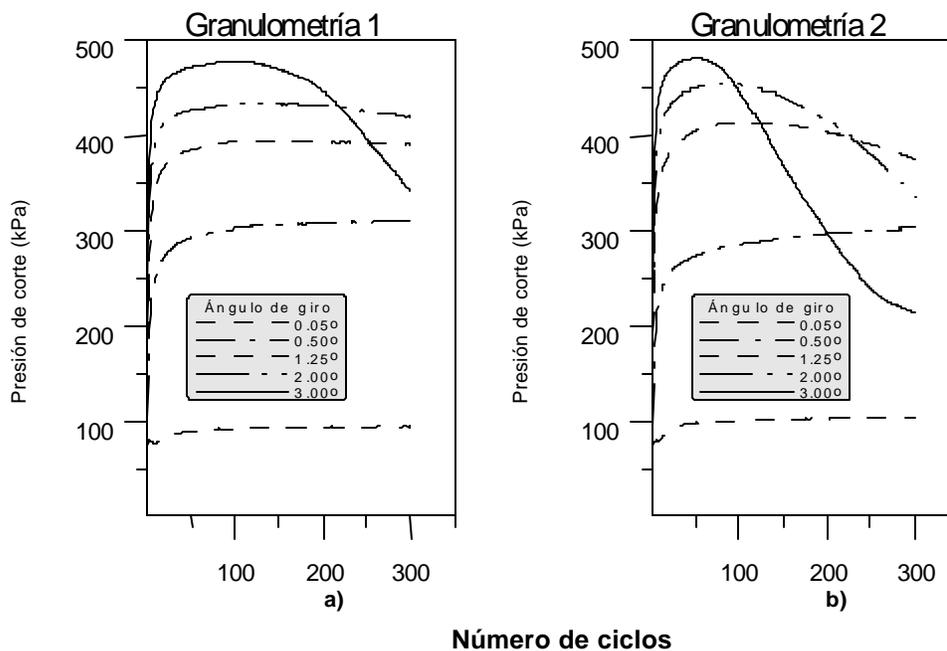


Figura 5.7
Efecto del ángulo de giro

Las tres etapas características de la presión de corte (Gauer, 1996) están definidas en estas gráficas: la primera es cuando la resistencia al corte se incrementa hasta un máximo seguido por la segunda etapa, donde la presión de corte decrece a un punto donde se vuelve constante; la tercera es cuando el decremento de la altura del espécimen se logra mediante la pérdida de cemento asfáltico (granulometría 2, ángulo de giro 3.00°).

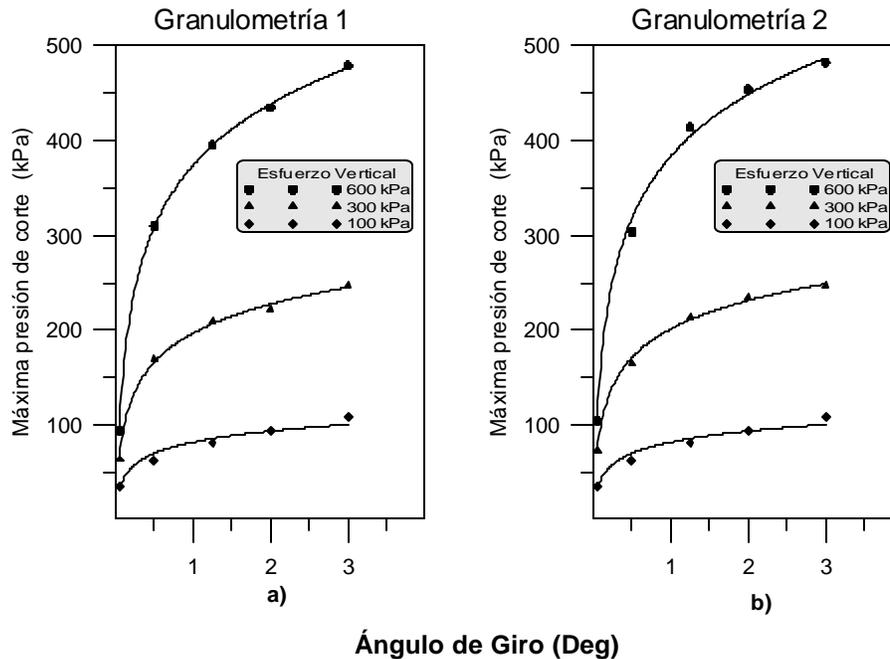


Figura 5.8

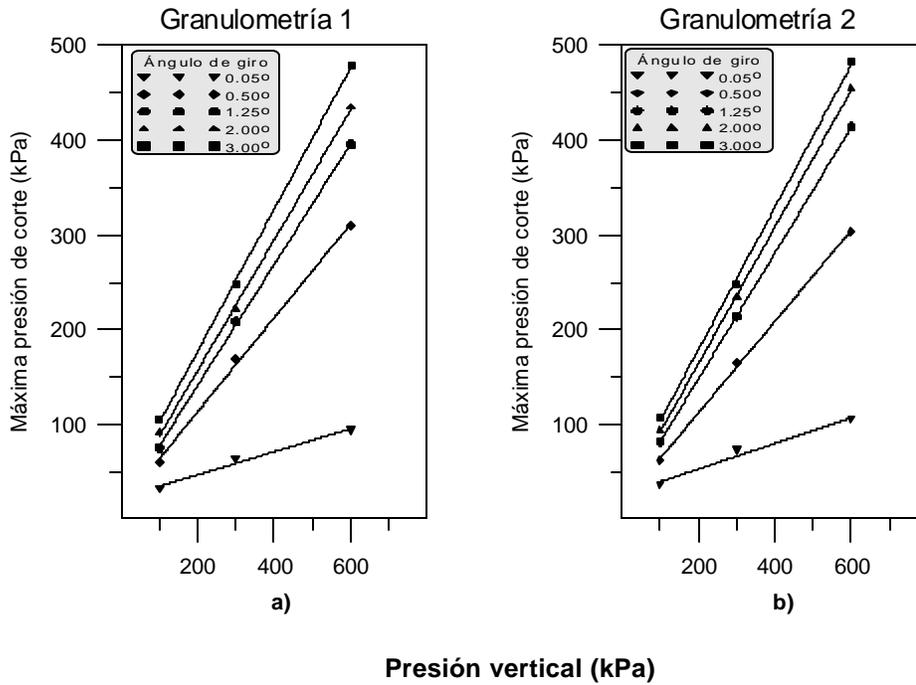
Variación de la máxima presión de corte (cambio en el ángulo giro)

El esfuerzo vertical tiene una marcada influencia en el máximo esfuerzo de corte, así como también el máximo esfuerzo de corte es una función logarítmica del ángulo de giro (Figuras 5.8a y 5.8b).

A la par se realizaron gráficas para evidenciar la influencia de la presión vertical sobre la máxima presión de corte (Figuras 5.9a y 5.9b).

5.3.2 Efecto del porcentaje de vacíos

Los resultados de las presiones de corte fueron más ilustrativos cuando se exhibieron en graficas que compararan los porcentajes de máximos de presión de corte, contra los porcentajes de vacíos.

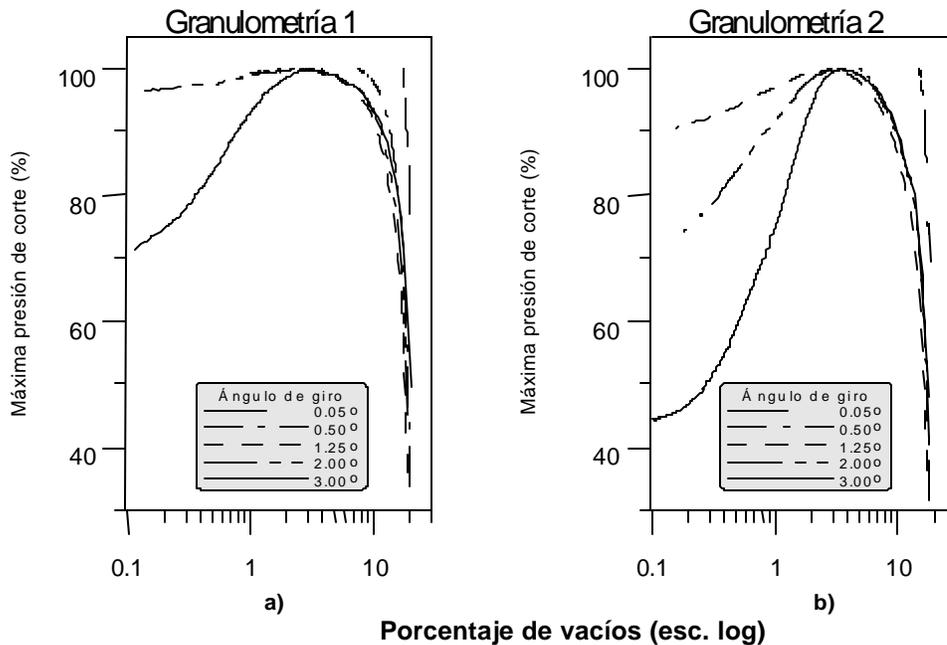


Presión vertical (kPa)

Figura 5.9

Variación de la máxima presión de corte (cambio en la presión vertical)

En las gráficas 5.10a y 5.10b se observa el efecto de los porcentajes de vacíos en la variación del máximo esfuerzo de corte en porcentaje para los diferentes ángulos de giro, para un esfuerzo vertical de 600 kPa y velocidad de compactación de 30 cpm, para las dos granulometrías.



Porcentaje de vacíos (esc. log)

Figura 5.10

Variación de la máxima presión de corte

Se puede ver que en términos de porcentajes de vacíos, la posición de la máxima presión vertical es razonablemente estable en los porcentajes de vacíos menores, pero también que cuando estos empiezan a decrecer, los valores de máxima presión de corte se dispersan debido a las diferencias de compactación que producen los diferentes tipos de ángulos. Los valores máximos de presiones de corte se dieron para valores de porcentajes de vacíos de 3.6 a 3.3 %; esto demuestra la estabilidad antes mencionada.

Para gráficas elaboradas con presiones menores, el comportamiento fue casi homogéneo, como se puede apreciar en las Figuras 5.11a y 5.11b, con un esfuerzo vertical de 300 kPa y velocidad de compactación de 30 cpm.

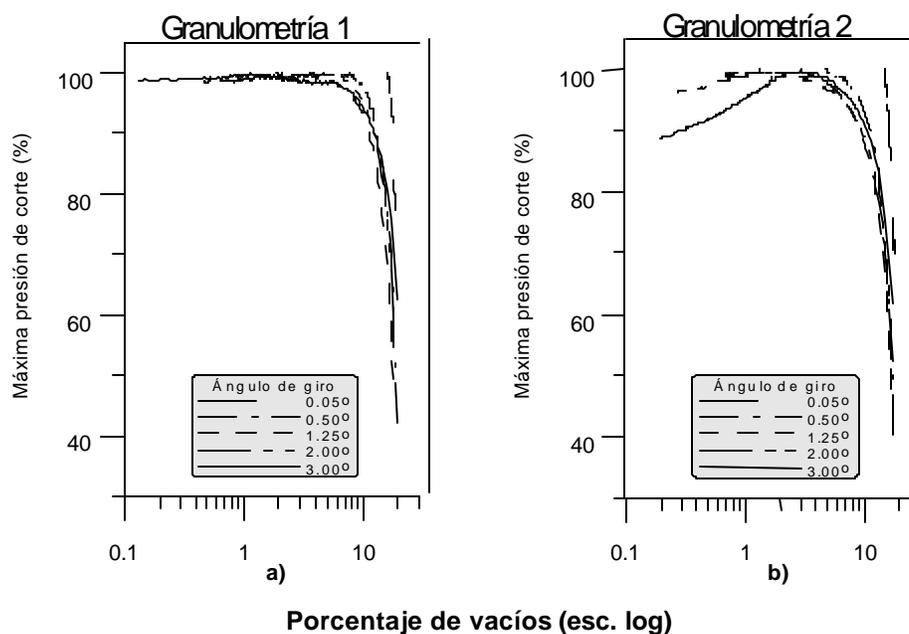


Figura 5.11
Variación de la máxima presión de corte

Aunque la única variación es la presión vertical, esto ocasiona que los efectos del ángulo de giro sean casi nulos.

Las Figuras 5.12a y 5.12b presentan el efecto de los porcentajes de vacíos en la variación del máximo esfuerzo de corte en porcentaje para los diferentes esfuerzos verticales, en un ángulo de giro de 3.00° y velocidad de compactación de 30 cpm, en ambas granulometrías.

Se observa el efecto de la presión vertical sobre la máxima presión de corte; el máximo valor de corte para las diferentes presiones se dio en forma proporcional para las dos granulometrías; esto es que, para las mayores presiones verticales los valores máximos de corte ocurrieron en porcentajes de vacíos más altos, debido al grado de compactación producido.

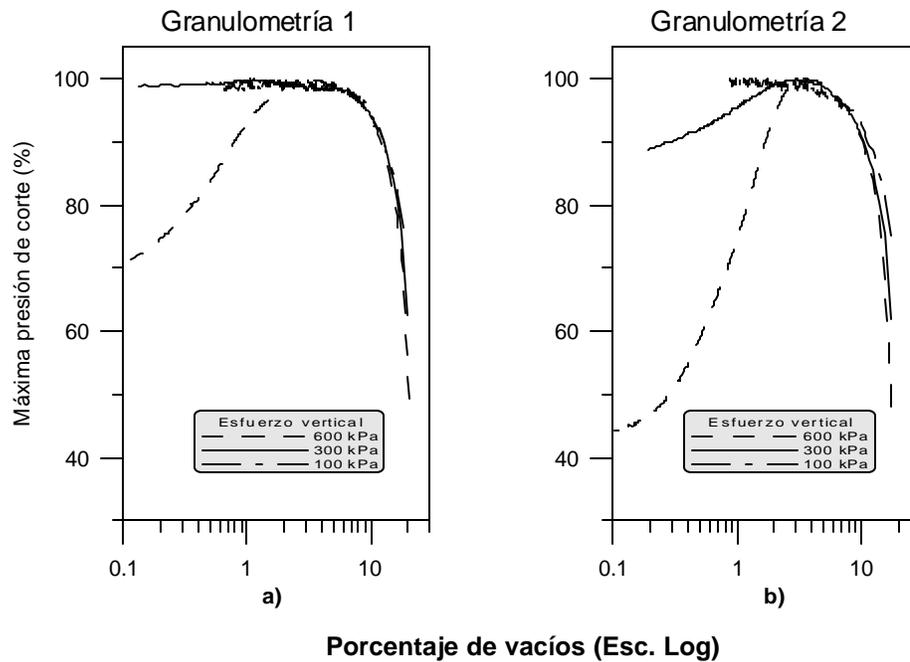


Figura 5.12
Variación de la máxima presión de corte

5.4 Pruebas de compresión simple

Las Figuras 5.13a y 5.13b corresponden a la relación esfuerzo-deformación existente para un esfuerzo vertical de 600 kPa, y velocidad de compactación de 30 cpm, en las dos granulometrías.

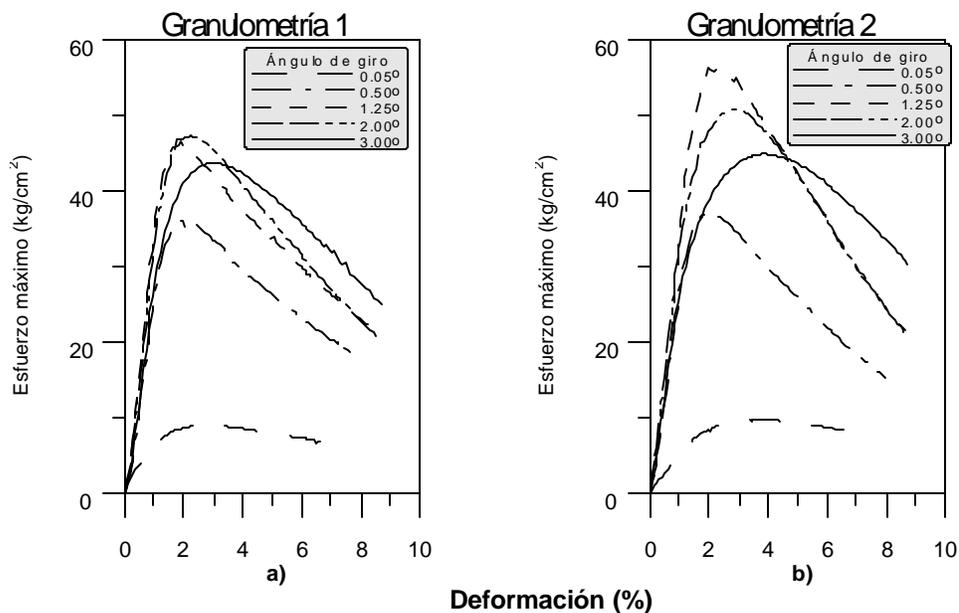


Figura 5.13
Gráficas esfuerzo-deformación para diferentes ángulos de giro

Se observa que el efecto de la resistencia en las pruebas de compresión sin confinar para las diferentes mezclas, muestran resistencias máximas que van de 30 a 45 kg/cm^2 , considerando compactaciones con ángulos de giro de 0.50 a 3.00°.

Sólo para ángulos de giro de 0.05° se alcanzan resistencias de 8 kg/cm^2 , debido a que no se logra una buena compactación.

Las deformaciones a la falla para prácticamente todas las muestras, no superan el 2.5%.

Las Figuras 5.14a y 5.14b exhiben el efecto del esfuerzo máximo en el módulo E_{50} para todas las pruebas en las dos granulometrías.

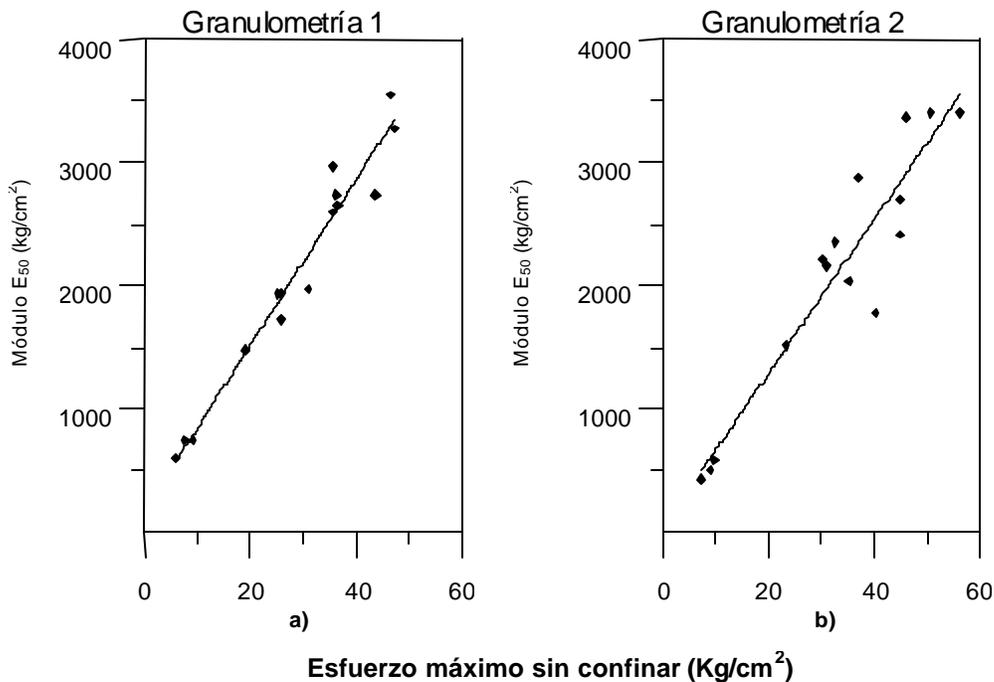


Figura 5.14
Influencia del esfuerzo máximo sin confinar en el módulo E_{50}

Al incrementarse el esfuerzo máximo obtenido en compresión sin confinar produce que los valores de E_{50} se incrementen y tengan una tendencia lineal.

Las Figuras 4.15a y 4.15b presentan la influencia del ángulo de giro en el módulo E_{50} para los diferentes esfuerzos verticales en las dos granulometrías.

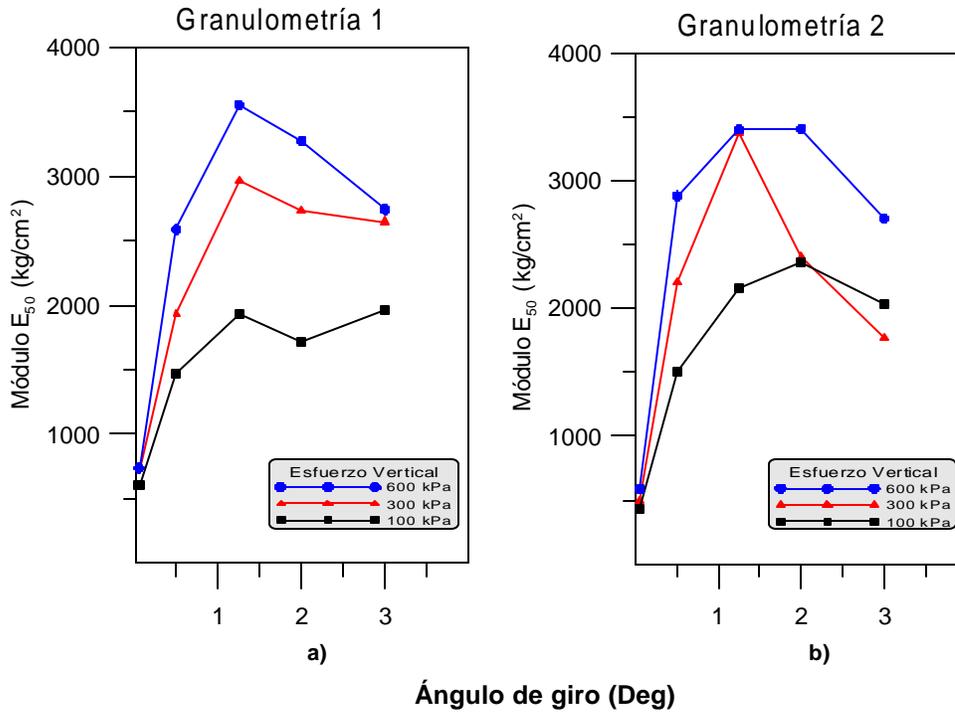


Figura 5.15
Influencia del ángulo de giro en el módulo E_{50}

Se puede observar que los mayores valores de E_{50} para cada esfuerzo vertical se presentaron en el ángulo de 1.25° , siendo este el especificado para diseño en la metodología SUPERPAVE.

Otro aspecto a resaltar es la influencia del esfuerzo vertical, ya que al incrementarse éste, el módulo E_{50} aumenta.

Conclusiones

El compactador giratorio es una máquina versátil, redituable y fácil de usar.

La habilidad de modificar los parámetros en forma rápida y eficiente permite determinar las características de la compactación giratoria.

Las características, determinadas como resultado de la investigación de la variación del ángulo de giro, presión vertical y rotación se resumen como sigue:

- El valor del porcentaje de vacíos logrado por compactaciones para un ciclo específico, o para diversos ciclos decrece exponencialmente cuando se incrementa el ángulo
- El valor de porcentaje de vacíos alcanzado por compactación para un ciclo específico decrece linealmente con el incremento de la presión vertical y los ciclos requeridos para un porcentaje de vacíos específico disminuyen exponencialmente ante el incremento de la presión vertical
- Las densidades más altas se produjeron en la granulometría que contiene más cantidad de finos (por encima de la zona de restricción, G2)
- Igualmente para ángulos giratorios menores de 0.50° , la compactación giratoria deja de tener un efecto significativo tanto en la densificación de la mezcla asfáltica como en el esfuerzo de corte

La medición de la resistencia al corte ofrece un marco potencial en la investigación de las características de las mezclas asfálticas. Las conclusiones iniciales se resumen de la siguiente manera:

- La máxima presión de corte se incrementa en forma logarítmica con el aumento del ángulo y se realiza en forma lineal con el incremento de la presión vertical
- La máxima presión de corte se logra dentro de un rango corto de porcentaje de vacíos para todas las mezclas densas y es independiente del ángulo giratorio y la presión vertical

Las propiedades de las mezclas asfálticas determinadas como resultado de las pruebas de compresión, se sintetizan a continuación:

- El valor de esfuerzo máximo logrado por compactación para los diferentes ángulos giratorios, se presenta en forma proporcional a la presión vertical del compactador

- Los valores máximos del módulo E_{50} para las diferentes cargas máximas de la prueba de compresión simple, se incrementan en forma lineal cuando se aumenta la carga máxima.

Bibliografía

1. Annual book of ASTM Standard, 4.03 Roofing and Paving Material; Vehicle-Pavement System (2001).
2. Asociación Mexicana de Ingeniería de Vías Terrestres, Reología de asfaltos teoría, aplicación e implementación, 4º Seminario Técnico (1995).
3. Asphalt Institute Performance Graded Asphalt Binder Specification and Testing, Series No.1 (SP-1), (1996).
4. Asphalt Institute , Superpave Mix Design, Series No.2 (SP-2), (1996).
5. BUTCHER, M J, Determining Gyrotory Compaction Characteristics using The Servopac Gyrotory Compactor.
6. Centros de Estudio Experimentales de Obras Públicas – Centro de Estudios de Carreteras, Normas NLT1-Ensayos de carreteras.
7. Dale Alan Rand, Comparative Analysis of Superpave Gyrotory Compactors and TxDOT Gyrotory Compactors. Texas Department of Transportation.
8. Fred Martínez and Fouad M. Bayony, Selection of maximum Theoretical Specific Gravity for Asphalt Mixture Design. Transportation Research Record No 1300.
9. Harman T, Bukowski J, Moutier F, Huber G, McGennis R. The History and Future Challenges of Gyrotory Compaction 1939 to 2001, Transportation Research Board 2001.
10. Harrigan E T, Leahy R B, Youtcheff J S, The SUPERPAVE Mix Design System Manual of Specification, Test Method, and Practices, SHRP-A-379, Strategic Highway Research Program, National Research Council, Washington, DC (1994).
11. Instituto Mexicano de Transporte, Manual de Calidad de los Materiales en Secciones Estructurales de Pavimentos Carreteros, Documento Técnico, No. 1, (1990).
12. Jorge B. Sousa, George Way, John T. Harvey and Mickey Hines, Comparison of Mix Design Concepts, Transportation Research Record No. 1492.
13. Mansour Solaimannain, Yetkin Yildirim, Superpave and Texas Gyrotory Compactors - How do they compare, Texas Department of Transportation.

14. National Asphalt Training Center, Background of Superpave asphalt Mixtures Design and Analysis, SHRP-A-379, FHWA-SA-95-003.
15. PC-Based SERVOPAC Monitor, Reference Manual, Industrias Process Controls Ltd.
16. Strategic Highway Research Program, Superior Performing Asphalt Pavement: The Product of the SHRP Asphalt Research Program, SHRP-A-410.
17. Thomas W. Kennedy, Ensayos y especificaciones de los ligantes asfálticos en el sistema Superpave, Superpave Center at Austin Texas (USA,1996)
18. AASHTO Innovate Highway Technologies.
[//Leadstates.tamu.edu/sp/index.stm](http://Leadstates.tamu.edu/sp/index.stm)
19. D.I. Hanson –TSL Services and Equipment, Evaluation of Servopac Superpave Gyrotory Compactor.
www.eng.auburn.edu/center/ncat/ssc/reports/sgcservopaceval.pdf
20. Public Roads: Superpave comes of Age.
www.tfhre.gov/pubrds/02sep/10.htm
21. Robert McGennis – Superpave Asphalt Research Program
www.utexas.edu/research/superpave/articles/compeval.html
22. Superpave Mix Design
www.utexas.edu/research/superpave/mix/index.html
23. The Superpave Gyrotory Compactor
www.utexas.edu/research/superpave/articles/gyrate.html
24. University of Texas: Superpave Gyrotory Compactors Update.
www.utexas.edu/research/superpave/articles/sgc.html

**CIUDAD DE MEXICO**

Av. Patriotismo 683
Col. Mixcoac
03730, México, D. F.
Tel. (55) 56 15 35 75
55 98 52 18
Fax (55) 55 98 64 57

SANFANDILA

Km. 12+000, Carretera
Querétaro-Galindo
76700, Sanfandila, Qro.
Tel. (442) 2 16 97 77
2 16 96 46
Fax (442) 2 16 96 71

Internet: <http://www.imt.mx>
publicaciones@imt.mx