



Certificado en ISO 9001:2000†

SECRETARÍA DE
COMUNICACIONES
Y TRANSPORTES



“IMT, 20 años generando conocimientos y tecnologías para el desarrollo del transporte en México”

INFLUENCIA DE LA GRANULOMETRÍA EN LAS PROPIEDADES VOLUMÉTRICAS DE LA MEZCLA ASFÁLTICA

Horacio Delgado Alamilla
Paul Garnica Anguas
Gilber Mario Villatoro Mendez
Giovanni Rodríguez Oropeza

Publicación Técnica No 299
Sanfandila, Qro. 2006

SECRETARÍA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTES
INSTITUTO MEXICANO DEL TRANSPORTE

**Influencia de la granulometría en
las propiedades volumétricas de la
mezcla asfáltica**

Publicación Técnica No 299
Sanfandila, Qro, 2006

Este trabajo fue realizado por el Jefe de la División de Laboratorios, Dr Paul Garnica Anguas y el investigador M en I Horacio Delgado Alamilla de la Coordinación de Infraestructura del Instituto Mexicano del Transporte, Gilber Mario Villatoro Mendez tesista de la Universidad Autónoma de Chihuahua y Giovanni Rodríguez Oropeza tesista de la Universidad Marista de Querétaro.

Se agradece la participación del técnico Mario Antonio Pérez González por su colaboración en los ensayos de laboratorio.

Índice

Resumen	V
Abstract	VII
Resumen ejecutivo	IX
1 Análisis de la granulometría Superpave	1
1.1 Tamaño de mallas	1
1.2 Gráfica elevada al exponente 0,45	2
1.2.1 Origen de la gráfica de Fuller	2
1.2.2 Importancia de la gráfica de Fuller	3
1.3 Línea de máxima densidad	5
1.4 Tamaño máximo nominal y tamaño máximo	6
1.5 Mecanismo de control de la granulometría	6
2 Influencia de los agregados en la deformación permanente	9
2.1 La zona restringida	9
2.2 Granulometría	13
2.3 Influencia de la Mineralogía	15
3 Comparativa de Normas SCT y Superpave	17
3.1 Normas SCT	18
3.1.1 Granulometría para un número de ejes equivalentes de 8.2 ton, acumulados, $\Sigma L \leq 10^6$	18
3.1.2 Granulometría para un número de ejes equivalentes de 8.2 ton, acumulados, $\Sigma L > 10^6$	20
3.1.3 Calidad de los materiales pétreos	20
3.1.4 Vacíos en la Mezcla	21
3.2 Requisitos Superpave	22
3.2.1 Granulometría	22
3.2.2 Calidad de los materiales pétreos	23
3.3 Comparativa de las granulometrías SCT y Superpave	24
3.4 Comentarios	25
4 Métodos de caracterización de agregados	29
4.1 Pruebas de consenso	30

4.1.1	Angularidad del agregado grueso	30
4.1.1.1	Importancia y Uso	30
4.1.1.2	Resumen del método de prueba	30
4.1.1.3	Cálculos	30
4.1.2	Angularidad del agregado fino	31
4.1.2.1	Importancia	31
4.1.2.2	Resumen del método de prueba	33
4.1.2.3	Cálculos	33
4.1.3	Partículas alargadas y planas	34
4.1.3.1	Importancia y uso	34
4.1.3.2	Resumen del método de prueba	34
4.1.3.3	Cálculos	35
4.1.4	Equivalente de arena	37
4.1.4.1	Importancia y uso	37
4.1.4.2	Resumen del método de prueba	37
4.1.4.3	Cálculos	37
4.2	Pruebas de origen	38
4.2.1	Desgaste de los Ángeles	38
4.2.1.1	Importancia y uso	38
4.2.1.2	Resumen del método de prueba	39
4.2.1.3	Cálculos	39
4.2.2	Intemperismo acelerado	39
4.2.2.1	Importancia y uso	40
4.2.2.2	Resumen del método	40
4.2.2.3	Cálculos	41
4.2.3	Materiales deletéreos	42
4.2.4	Azul de Metileno	42
4.2.4.1	Importancia y uso	42
4.2.4.2	Resumen del método	43
4.2.4.3	Cálculos	43
4.3	Pruebas de rutina	44
4.3.1	Gravedad específica y absorción	44
4.3.1.1	Definiciones	45
4.3.1.2	Importancia y uso	45
4.3.1.3	Resumen del método para agregados gruesos	46
4.3.1.4	Cálculos para agregados gruesos	47
4.3.1.5	Resumen del método para agregados finos	48
4.3.1.6	Cálculos para agregados finos	49
5	Propiedades volumétricas de la mezcla	53
5.1	Parámetros volumétricos de la mezcla asfáltica	53
5.1.1	Ligante asfáltico	55
5.1.1.1	Gravedad específica del ligante asfáltico (Gb)	55
5.1.2	Agregado pétreo	55
5.1.2.1	Gravedad específica neta (Gsb)	55

5.1.2.2	Gravedad específica aparente (Gsa)	55
5.1.2.3	Gravedad específica efectiva (Gse)	55
5.1.3	Mezcla asfáltica	56
5.1.3.1	Gravedad específica neta (Gmb)	57
5.1.3.2	Gravedad específica teórica máxima (Gmm)	58
5.1.3.3	Contenido de asfalto (Pb)	58
5.1.3.4	Contenido de asfalto efectivo (Pbe)	58
5.1.3.5	Contenido de asfalto absorbido (Pba)	58
5.1.3.6	Contenido de vacíos de aire (Va)	58
5.1.3.7	Vacíos en el agregado mineral (VMA)	58
5.1.3.8	Vacíos llenos con asfalto (VFA)	60
5.2	Efecto del nivel de compactación en el diseño	61
6	Metodología RAMCODES	63
6.1	RAMCODES en las mezclas asfálticas	63
6.2	Aplicaciones de la metodología	63
6.2.1	El polígono de vacíos	63
6.3	Elaboración del polígono de vacíos	65
6.3.1	Gravedad específica teórica máxima de la mezcla asfáltica en estado suelto (Gmm)	65
6.3.2	Líneas de vacíos de aire (Va)	66
6.3.3	Líneas de vacíos en el agregado mineral (VAM)	67
6.3.4	Líneas de vacíos llenados con asfalto (VFA)	68
7	Descripción del experimento	71
7.1	Selección de los materiales	71
7.1.1	Agregado mineral	71
7.1.1.1	Dosificación de la mezcla de agregados	72
7.1.1.2	Graduación	73
7.1.2	Ligante asfáltico	74
7.1.2.1	Viscosímetro rotacional (RV)	74
7.1.2.2	Reómetro de corte dinámico (DSR)	76
7.2	Características de la mezcla asfáltica	78
7.2.1	Porcentajes de asfalto y niveles de compactación	78
7.2.2	Elaboración de la mezcla asfáltica	79
7.2.3	Compactación	79
7.3	Pruebas fundamentales a la mezcla asfáltica	81
7.3.1	Gravedad específica neta (Gmb)	81
7.3.2	Gravedad específica teórica máxima (Gmm)	82
8	Análisis de propiedades volumétricas	85
8.1	Análisis de los parámetros volumétricos de la mezcla asfáltica	85
8.1.1	Influencia de la granulometría para el banco 1	85

8.1.2	Influencia de la granulometría para el banco 2	87
8.1.3	Influencia de la granulometría para el banco 3	88
8.2	Selección del contenido óptimo de asfalto	89
8.3	Aplicación de la metodología RAMCODES	91
8.3.1	Polígono de vacíos para el banco 1	92
8.3.2	Polígono de vacíos para el banco 2	93
8.3.3	Polígono de vacíos para el banco 3	94
Conclusiones		95
Bibliografía		97

Resumen

Teniendo como marco de referencia las especificaciones actuales de Superpave y SCT, se analizó la pertinencia de utilizar ciertos parámetros como son la zona restringida (Superpave) y el efecto del tránsito (SCT) como definidores de las características de una estructura pétreo para mezclas asfálticas.

El estudio se basó en el análisis de las propiedades volumétricas como respuestas de la variación del tipo de granulometría y fuente de agregado, mediante diversas técnicas de análisis.

Abstract

This work makes a comparison between two hot mix asphalt methods, the Marshall method which is the most used in Mexico and the Superpave method which is a development of the Strategic Highway Research Program (SHRP) in the United States. This work emphasizes the background of the two methodologies and the hot mix asphalt volumetric properties, in the same way present a hot mix asphalt performance test by means of the Asphalt Pavement Analyzer (APA), which is using for evaluate the rut susceptibility.

Resumen ejecutivo

Con la aparición de la metodología Superpave han venido presentándose diversos cambios en las especificaciones relacionadas con el diseño de la mezcla. Uno de los cambios más significativos en la normativa mexicana es el presentado en la Norma SCT (N-CMT.4.04/03), la cual adopta los criterios de selección de la estructura pétreo establecidos en la metodología Superpave (gráfica de Fuller).

En esta investigación se presenta un análisis de la influencia de la zona restringida en el desempeño de la mezcla asfáltica, utilizando un diseño experimental que involucra tres factores (contenido de asfalto, granulometría y origen del agregado). Se analizan las propiedades volumétricas apoyándonos en la metodología RAMCODES.

El propósito principal de esta investigación es realizar un análisis de la influencia de la granulometría en el desempeño de la mezcla asfáltica, tomando como referencia la metodología superpave en lo que se refiera a la zona restringida de la granulometría de Fuller.

El capítulo uno discute los diferentes criterios establecidos por el método Superpave para la evaluación de una granulometría para mezclas asfálticas en caliente. Considerando las especificaciones relacionadas y describiendo la importancia de cada uno de los parámetros involucrados así como las consideraciones para su uso.

Debido a que el agregado mineral juega un papel muy importante en el desempeño de la mezcla asfáltica, el capítulo 2 se enfoca en una revisión bibliográfica de diversas investigaciones internacionales relacionadas con la influencia del agregado en el desempeño de la mezcla asfáltica, tomando como base de análisis la metodología Superpave en donde se fija a la zona restringida como el parámetro de mayor influencia en el posible comportamiento de la estructura del agregado mineral.

Debido a la aparición de la metodología Superpave se han presentado diversas modificaciones en las especificaciones americanas, esto ha llevado a cambios en las normas mexicanas. En el tercer capítulo se presenta una comparativa entre las normas SCT y las especificaciones establecidas en la metodología Superpave.

El capítulo 4 describe los métodos de ensayo utilizados para la caracterización del agregado pétreo. Se dividen los métodos de ensayo en dos tipos de propiedades (de consenso y de origen). Adicionalmente se describen los ensayos para la determinación de las densidades tanto del agregado grueso como fino.

El quinto capítulo detalla las propiedades volumétricas de la mezcla asfáltica que son evaluadas durante el diseño y selección de la misma. Entre las propiedades más comunes encontramos los vacíos de aire (V_a), Vacíos en el agregado mineral (VAM) y los vacíos llenos de asfalto (VFA). Se mencionan los métodos de ensayos utilizados así como las fórmulas de cálculo de estos parámetros. En forma adicional, se presenta una breve descripción de la influencia de estos parámetros en el desempeño de la mezcla asfáltica.

En el capítulo seis se presenta en forma detallada la metodología RAMCODES, mediante la descripción de su utilización en el control de mezclas asfálticas en campo, así como el desglose de las fórmulas utilizadas para la construcción del polígono de vacíos. Particularmente se describe paso por paso el procedimiento de cálculo y construcción del polígono de vacíos.

El capítulo 7 se describe el experimento realizado en esta investigación, proporcionando los resultados de las pruebas de calidad realizadas a los materiales (agregado mineral y asfalto), las consideraciones para seleccionar de las granulometrías, así como los criterios mezcla do y compactación de la mezcla asfáltica.

En el último capítulo se muestran los resultados de la investigación, divididos en dos partes: una que presenta el análisis convencional del diseño de una mezcla asfáltica en laboratorio, y otra estudia las propiedades volumétricas de la mezcla asfáltica utilizando la metodología RAMCODES. Las comparaciones presentadas están divididas por granulometrías y origen del agregado pétreo.

1 Análisis de la granulometría Superpave

En el presente capítulo se discuten los diferentes criterios establecidos por el método Superpave para la evaluación de una granulometría para mezclas asfálticas en caliente.

La aparición de nuevos criterios para la evaluación de la graduación de agregados es debido al surgimiento de la metodología de diseño Superpave, la cual forma parte del programa estratégico de investigación en carreteras (Strategic Highway Research Program, SRHP), el cual está dirigido a mejorar el desempeño y vida útil de las carreteras.

Los puntos a discutir en el presente capítulo son:

- Tamaño de mallas
- Gráfica elevada al exponente 0,45
- Línea de máxima densidad
- Tamaño máximo nominal y tamaño máximo
- Mecanismos de control de la granulometría
- La zona restringida

1.1 Tamaños de mallas

Actualmente en México no existe un juego universal de mallas, la mayoría de los estados utilizan lo descrito en las normas SCT y NMX, sin embargo en algunas empresas privadas se utilizan los descritos en las normas americanas AASTHO y ASTM. En la Tabla 1.1 se presentan las mallas utilizadas comúnmente en México, mediante la combinación de normas mexicanas y americanas.

La diferencia principal se encuentra en las mallas utilizadas para los agregados finos, en especial para el rango de las arenas, utilizándose en las normas mexicanas las mallas 10, 20, 40 y 60 y siendo las mallas 8, 16, 30 y 50 sus equivalentes en las normas americanas.

Tabla 1.1
Mallas utilizadas para el diseño de mezclas asfálticas

Malla	Abertura (mm)	Abertura ^{0,45}	Malla	Abertura (mm)	Abertura ^{0,45}
2"	50	5.81	Nº 10	2	1.37
1 1/2"	37.5	5.11	Nº 16	1.180	1.08
1"	25	4.26	Nº 20	0.850	0.93
3/4"	19	3.76	Nº 30	0.600	0.79
1/2"	12.5	3.12	Nº 40	0.425	0.68
3/8"	9.5	2.75	Nº 50	0.300	0.58
1/4"	6.3	2.29	Nº 60	0.250	0.54
Nº 4	4.75	2.02	Nº 100	0.150	0.43
Nº 8	2.36	1.47	Nº 200	0.075	0.31

1.2 Gráfica elevada al exponente 0,45

Para especificar la granulometría, Superpave ha modificado el enfoque de la granulometría Marshall, tomando en consideración recomendaciones de la FHWA. Emplea el exponente 0.45 en la carta de granulometría para definir la granulometría permitida (gráfica de Fuller), mediante 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, en escala aritmética, las abcisas representan las aberturas de los tamices en mm, elevadas a la potencia 0.45.

1.2.1 Origen de la Gráfica de Fuller

La curva de distribución granulométrica de un material grueso, no uniforme, o gráfica de Fuller tiene su origen en la ecuación de Fuller, la cual representa condiciones de máxima densidad y mínimo de vacíos en el agregado mineral (VMA). La ecuación se describe a continuación:

$$p_i = \left(\frac{D_i}{D_{m\acute{a}x}} \right)^n$$

Donde:

- p_i = acumulado que pasa, en decimal, para el diámetro de la partícula D_i
- D_i = diámetro de la partícula
- $D_{m\acute{a}x}$ = tamaño máximo del material
- N = valor asociado a la forma de la curva

Con la expresión de Fuller, la graduación de agregados para una mezcla asfáltica se puede expresar por un par de números, esto es, un coeficiente de forma (n) y el tamaño máximo ($D_{m\acute{a}x}$). La literatura sugiere que cuando el factor de forma tiene un valor de 0.45 la mezcla es capaz de alcanzar las máximas densidades cuando se compacta. Lo que hay que resaltar aquí es que sólo las curvas con n igual o cercana a 0.45 producen la máxima densificación; aunque esto se ha desvirtuado en la actualidad.

La Figura 1.1 muestra la representación con el diámetro elevado a la potencia de 0.45 que fue introducida en los años 60's por la FHWA (Federal Highway Association) de Estados Unidos. Esta representación permite visualizar la línea de máxima densificación y evitar que la curva de graduación de diseño caiga encima de ella. En general, la curva de máxima densificación es temida porque produciría inaceptablemente bajos valores de vacíos en el agregado mineral VMA.

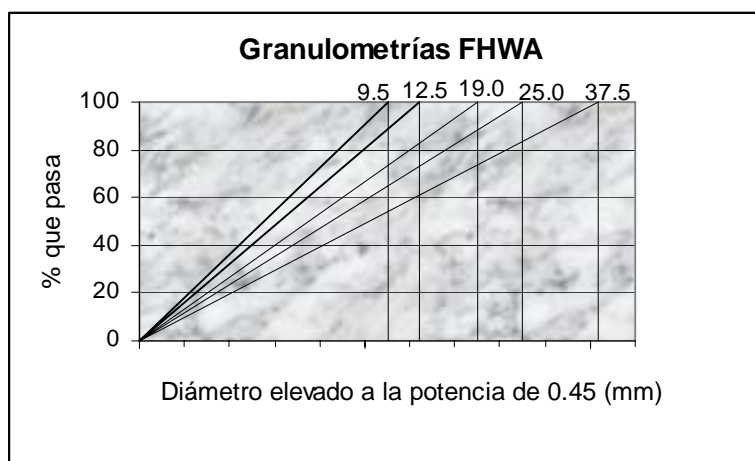


Figura 1.1
Representación de granulometrías según la FHWA

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

1.2.2 Importancia de la Gráfica de Fuller

La importancia de usar la gráfica de Fuller, es que permite expresar la graduación de agregados en una mezcla asfáltica con dos números (n_i/D_i). el primero está referido a la forma de la curva y a la estructura y arreglo geométrico de la potencial masa compactada, y el otro al tamaño máximo del agregado. Esto facilita la expresión y manejo de la graduación, de las especificaciones granulométricas y hasta la definición de la buena graduación y el potencial de densificación de la mezcla.

El ajuste de Fuller también puede servir para controlar la variabilidad de la producción diaria de la mezcla en planta. Este método para evaluar la variabilidad de una granulometría aventaja al método tradicional de tolerancias de mallas individuales pues aquel considera a la graduación de manera integral; las tolerancias individuales introducen de por sí un sesgo muy significativo que afecta principalmente al contratista. Una combinación de agregados es un todo, de esto pueden dar fe los manejadores de plantas trituradoras y cribadoras que cuando intentan modificar el porcentaje que pasa de un tamaño los otros se alteran irremediablemente.

Se observa que hay una influencia igualitaria de $D_{máx}$ y n en la trabajabilidad. En el ámbito de las graduaciones de Superpave, la facilidad de manejo y colocación aumenta a medida que las mezclas tienen a la vez tamaño máximos más pequeños y estructuras más densas. Una mezcla densa y otra abierta tienen significativamente diferentes trabajabilidades para un mismo tamaño máximo.

Regresando a la técnica gráfica única para juzgar la distribución de tamaños acumulados de partículas de una mezcla de agregados, en la Figura 1.2 se ilustra cómo se calcula el valor de la abcisa. En el ejemplo la malla de 4.75mm se grafica como 2.02.

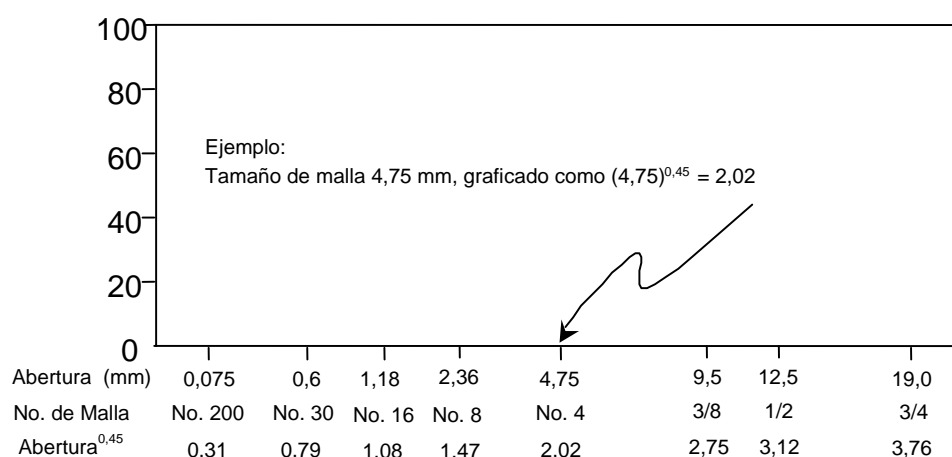


Figura 1.3
Ilustración de cómo se grafican las abcisas

Los valores de las aberturas en mm elevadas a la potencia 0,45 para cada una de las mallas se presentan en la Tabla 1.1.

Normalmente este tipo de gráficas no se presentan una escala aritmética común, en vez de ello, la escala esta en función de tamaño de malla como se observa en la segunda fila de las abcisas de la Figura 1.2.

Se debe comentar que no existe evidencia publicada que soporte la adopción del valor del exponente 0,45. Algunos reportes que circulan en la industria indican que el factor de 0,45 no debe ser aplicado universalmente para todo tipo agregados.

1.3 Línea de máxima densidad

Actualmente en la industria del asfalto la práctica de la selección de la máxima densidades confusa. Se han utilizado diferentes métodos con un variado grado de éxito. El SHRP investigo las diferentes definiciones de línea de máxima densidad y las evaluó con el estado actual en la industria.

De acuerdo con el SHRP, la FHWA formo un grupo de trabajo con expertos en propiedades volumétricas de mezclas asfálticas. El grupo investigó dos métodos para la determinación de la línea de máxima densidad. Un método dibuja una línea del porcentaje que pasa la malla No. 200 hasta la primera malla que pasa el 100% del material. El otro método (de publicaciones del Instituto del asfalto) requiere que se dibuje una línea del origen de la gráfica hasta el tamaño máximo del agregado. Mediante el uso del método Delphi modificado, el grupo determinó utilizar el método empleado por el Instituto del Asfalto.

Línea 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) Figura 1.3.

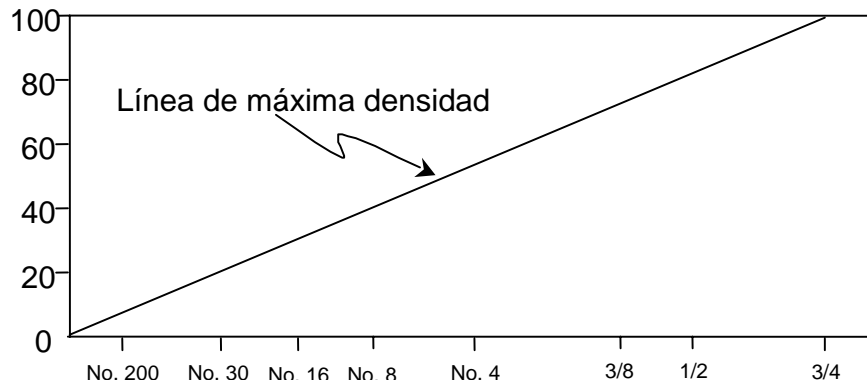


Figura 1.3
Graduación de máxima densidad para tamaño máximo de 19 mm

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.

1.4 Tamaño máximo nominal y tamaño máximo

Adicional a la definición de línea de máxima densidad, surgen las definiciones de tamaño máximo nominal y tamaño máximo, las cuales se especifican de la siguiente manera:

Tamaño máximo nominal: un tamaño de malla mayor a la primera malla que retiene el 10% del material

Tamaño máximo: un tamaño de malla mayor al tamaño máximo nominal.

Estas definiciones son consistentes con las definiciones de las Normas ASTM. Es elemental tener en cuenta la importancia de la correcta definición del tamaño máximo para asegurar la validación de la línea de máxima densidad.

1.5 Mecanismos de control de la granulometría

Históricamente las especificaciones de las granulometrías han consistido en bandas maestras (límite superior e inferior) en los cuales se especifica el máximo y mínimo porcentaje que pasa para cada malla. Tales especificaciones tienen una característica indeseable inherente. Las mezclas pueden estar diseñadas dentro de las especificaciones y sin embargo tener un desempeño pobre en servicio. Específicamente, estas mezclas tienen una estructura de agregado pobre y son susceptibles a la deformación permanente. De igual forma las mezclas pueden ser diseñadas demasiado densas, lo que reduce el contenido de asfalto y conduce a problemas de durabilidad.

Para especificar la granulometría del agregado, se emplearon dos conceptos: los puntos de control y la 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).

Los puntos de control fueron seleccionados para cumplir objetivos específicos, los cuatro puntos de control superiores, mínimo 100% que pasa la malla de tamaño máximo, 90 a 100% pasando la malla del tamaño máximo nominal y 90% máximo que pasa la malla menor inmediata que la del tamaño máximo nominal, se utilizan para verificar que se cumpla con la definición de tamaño máximo nominal y tamaño máximo.

Los cuatro puntos de control inferiores sirven para propósitos diferentes. Los requerimientos máximos y mínimos para la malla No. 200 (75 μ m), son típicamente para mezclas asfálticas de granulometría cerrada. Otras mezclas como las SMA, las cuales tienen porcentajes que pasan la malla No. 200 de 10 a 14% no cumplen con esta especificación.

Los puntos de control para la malla No 8 (2,36 mm), son utilizados para controlar partículas con tamaño de arena en la mezcla. El punto superior limita la cantidad de arena en la mezcla con el fin de evitar mezclas asfálticas arenosas las cuales

generalmente no cumplen con las especificaciones. El punto inferior asegura una cantidad de arena adecuada en la mezcla para cumplir con los requerimientos de una granulometría densa. Una granulometría con granulometría abierta (open graded) o mezcla porosa no cumplirá con estos puntos de control.

La zona restringida ha sido especificada para asegurarse que se desarrolla una adecuada estructura en la mezcla. La zona restringida se ubica entre los tamaños intermedios (4.75 o 2.36 mm) y 0.3 mm. Forma una banda por la cual la curva granulométrica no deberá pasar. Se especifica que las granulometrías deben pasar ya sea abajo o arriba de la zona. Mezclas que pasan por arriba tenderán a ser arenosas y a tener estructuras de agregado débiles en comparación con las que pasan debajo de la zona restringida.

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. La Figura 1.4 muestra un esquema para un tamaño máximo de agregado de 19 mm.

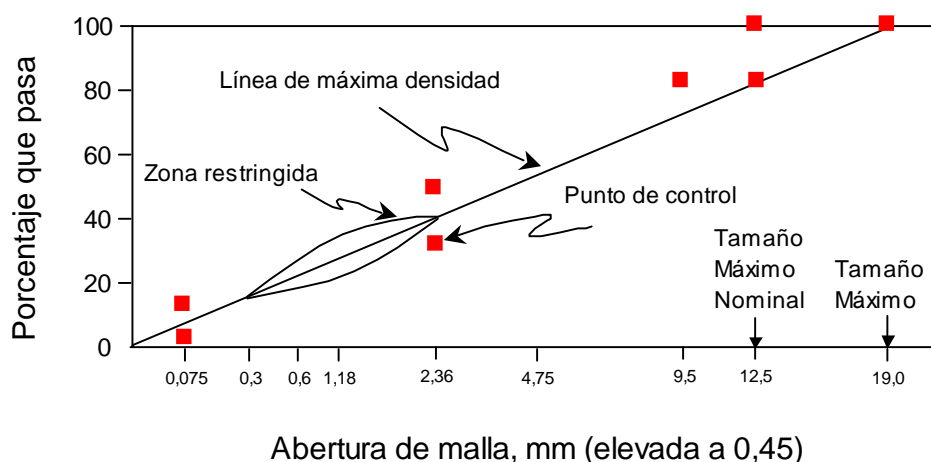


Figura 1.4
Límites para las granulometrías Superpave

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.

Los valores de los parámetros: puntos de control y zona restringida, están referenciados a cinco designaciones que la metodología Superpave establece, en las cuales proponen los tamaños máximos nominales más utilizados y los criterios correspondientes a los parámetros mencionados.

En la Tabla 1.2 se presentan las cinco designaciones propuestas en la metodología Superpave.

Tabla 1.2
Graduaciones para mezclas Superpave

Designación Superpave	Tamaño máximo nominal	Tamaño máximo
37,5 mm	37,5	50,0
25,0 mm	25,0	37,5
19,0 mm	19,0	25,0
12,5 mm	12,5	19,0
9,5 mm	9,5	12,5

Las Tablas 1.3 y 1.4 contienen las especificaciones de puntos de control y zona restringida para los dos tamaños máximos nominales de agregados más usuales.

Tabla 1.3
Especificación de gráfica de Fuller para un tamaño máximo nominal de 19mm

Malla (mm)	Puntos de control		Zona restringida	
	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
25,0		100,0		
19,0	90,0	100,0		
12,5		90,0		
2,36	23,0	49,0	34,6	34,6
1,18			22,3	28,3
0,600			16,7	20,7
0,300			13,7	13,7
0,075	2,0	8,0		

Tabla 1.4
Especificación de gráfica de Fuller para un tamaño máximo nominal de 12.5mm

Malla (mm)	Puntos de control		Zona restringida	
	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
19,0		100,0		
12,5	90,0	100,0		
9,5		90,0		
4,75				
2,36	28,0	58,0	39,1	39,1
1,18			25,6	31,6
0,600			19,1	23,1
0,300			15,5	15,5
0,075	2,0	10,0		

2 Influencia de los agregados en la deformación permanente

El agregado mineral juega un papel muy importante en el desempeño de las mezclas asfálticas, se ha encontrado que las características que más influyen en dicho desempeño y en particular a deformaciones permanentes, son las siguientes:

- ✓ Graduación (con énfasis en la zona restringida)
- ✓ Tamaño máximo
- ✓ Angularidad del agregado grueso (Caras fracturadas)
- ✓ Angularidad del agregado fino (Vacíos sin compactar)
- ✓ Porcentaje de finos
- ✓ Mineralogía (Fuente de origen de los agregados)

Sin embargo, en este capítulo solo se describirá la influencia de la graduación y brevemente lo que se refiere a la influencia de la mineralogía de los agregados en la deformación permanente de mezclas asfálticas.

Respecto a la graduación de los agregados la bibliografía reveló que la zona restringida debe ser omitida de acuerdo con lo que se describe a continuación:

2.1 La zona restringida

Después de algunos años de estar utilizando las especificaciones de Superpave referente a la graduación de los agregados, investigadores de la Nacional Cooperative Highway Research Program (NCHRP – Cooperativa Nacional de Investigación en Carreteras) desarrollaron una investigación bajo el título *NCHRP Report 464 The Restricted Zone in the Superpave Aggregate Gradation Specification* para revisar las recomendaciones originales del método de diseño Superpave para HMA. Se revisaron las graduaciones de agregados y su influencia en las HMA. Finalmente, encontraron que las recomendaciones originales se establecieron por consenso sin una base experimental, el criterio de revisión incluyó la zona de restricción por la cual recomendaron no pasar graduaciones de agregados.

La literatura en la cual estos investigadores basaron la revisión de las recomendaciones de la zona de restricción fue el Reporte SHRP-A-408 de la SHRP, nivel uno del diseño de mezclas: Selección de materiales, compactación y acondicionamiento, de donde surge la idea de la zona de restricción.

Las preguntas principales en su revisión fueron:

1. ¿Cuáles eran las bases de la zona de restricción?
2. ¿Qué conclusiones y recomendaciones habían acerca de las graduaciones que violaban la zona de restricción?
3. ¿Cuáles eran las posibles variables que deberían ser estudiadas para evaluar las graduaciones que pasan a través de la zona de restricción?

El Reporte SHRP-A-408 de la SHRP, resume el desarrollo de los aspectos de diseño volumétrico de Superpave bajo el Programa Estratégico de Investigación de Carreteras (SHRP). Bajo este programa se reunió a un grupo de expertos en el área de producción de agregados y diseño y comportamiento de mezclas asfálticas en caliente, con la finalidad de presentar ante ellos una serie de cuestionamientos consistente básicamente en siete características del agregado:

1. Límites de graduación
2. Caras fracturadas
3. Contenido de arenas naturales
4. Abrasión de L.A
5. Agregados redondeados
6. Materiales deletéreos
7. Equivalente de arena

La respuesta para determinar que características deberían modificarse de esta serie fue basada únicamente en acuerdos y desacuerdos acerca de las modificaciones, sin una base científica.

Una vez acordadas las características a modificar, establecieron limitaciones en los límites de graduación. De esta manera se agregaron características adicionales como mínimo/máximo tamaños de agregados, puntos de control/zona restringida y puntos de control.

La mayoría de los expertos especificaron graduaciones arriba y abajo de la zona de restricción aunque la mitad de ellos recomendaron graduaciones debajo de la zona de restricción para altas condiciones de tráfico.

Como ya se dijo, la zona de restricción forma una banda a través de la cual fue recomendado no pasar graduaciones de agregados. La zona de restricción fue adoptada para reducir la incidencia de tender o estar propensa a roderas en las HMA. Aunque la zona restringida fue incluida por Superpave como una guía recomendada, no como una especificación requerida, algunas agencias en EU la interpretaron como un requerimiento.

Según esto, la intención original de incluir una zona restringida, debido a que algunas graduaciones particularmente se ven afectadas por: 1) el uso de arenas naturales redondeadas o con distribución de tamaños limitada y 2) la proporción admisible de la fracción fina (0.15 a 0.6 mm) del total de la arena (que pasa por

2.36 mm), fue la de ayudar a reducir la incidencia de tender o ser propenso a roderas en las HMA.

Volviendo al proyecto “*Report 464 The Restricted Zone in the Superpave Aggregate Gradation Specification*”, de acuerdo con algunos expertos en EU, cumplir con el criterio de la zona de restricción, quizás no es deseable o necesario para producir mezclas que den buen comportamiento en términos de roderas. Algunas agencias de carreteras de EU, pueden proveer ejemplos de graduaciones de agregados que pasan a través de la zona de restricción, sin embargo estas producen mezclas que presentan buen comportamiento. Por ejemplo si se tiene una mezcla de agregados con un valor alto de angularidad (p.e. valor alto de angularidad de agregado fino FAA), es probable que la mezcla no exhiba ninguna tendencia durante la construcción y sería resistente a las roderas bajo tráfico sin tener en cuenta si la graduación pasa a través de esta zona restringida. Algunos cuestionaron también la necesidad de la zona de restricción cuando las mezclas requieren propiedades volumétricas tales como el VAM y V_a especificados para los números de giros $N_{inicial}$, $N_{diseño}$ y $N_{máximo}$ en la compactación giratoria.

Basado en lo que se ha indicado, la investigación de la NCHRP se desarrolló con el objetivo inicial de determinar bajo que condiciones es necesario cumplir con los requerimientos de la zona de restricción cuando las HMA en Superpave presentan otros requerimientos tales como FAA y criterios volumétricos para un proyecto específico.

Debido a que la zona de restricción es aplicada dentro de los tamaños de agregados finos, la forma y textura de éstos, son los factores más importantes que afectan el comportamiento de las HMA. Por lo tanto, es importante tomar en cuenta la variación de los valores de FAA.

Otro factor importante en el comportamiento de las HMA es la mineralogía del tipo de agregado y el tipo de trituración.

En el estudio desarrollado por la NCHRP, se variaron los tipos de agregados, la forma y textura del agregado fino, esto es que usaron diferentes tipos de agregados finos tanto triturados como naturales y por consiguiente los valores de FAA variaron, además de los niveles de tráfico, reflejados en el número de giros en el compactador giratorio.

Las conclusiones de la NCHRP Report 464 fueron las siguientes:

1. Las mezclas que cumplieron con los requerimientos de Superpave, incluidos los valores de FAA con graduaciones que violaron la zona de restricción, presentaron comportamientos similares o mejor que mezclas con graduaciones que pasan fuera de la zona de restricción.

2. **La zona de restricción es redundante** para mezclas que cumplen con todos los parámetros volumétricos de Superpave y el FAA requerido. Las referencias de la zona de restricción, ya sea como un requerimiento o una guía, debería suprimirse de las especificaciones para el diseño volumétrico de la HMA, sin tomar en cuenta el tamaño máximo del agregado o nivel de tráfico. Algunas agencias solo han usado la zona de restricción para diferenciar graduaciones finas de gruesas.
3.
 - ✓ El tipo de agregado grueso tiene un significativo efecto en los valores de VAM de las mezclas y en el $\%G_{mm}$ (% de la gravedad específica teórica máxima) @ $N_{inicial}$.
 - ✓ Mezclas con Graduaciones arriba de la zona de restricción (ARZ Above the Restricted Zone) y entrecruzada en la zona de restricción (CRZ Crossover Through the Restricted Zone), esta última que inicia abajo y se cruza en medio y se retoma arriba de la zona de restricción, tienden a proveer altos valores de VAM.
 - ✓ Las mezclas con graduaciones que pasan a través de la zona de restricción (TRZ Through the Restricted Zone), proveen los valores más bajos de VAM. Este resultado sugiere que la línea de máxima densidad MDL es razonable en la carta de graduación.
 - ✓ Relativamente mezclas con graduaciones finas tal como ARZ tiende a tener altos valores $\%G_{mm}@N_{inicial}$, comparado con los valores de graduaciones que pasan a través de la zona de restricción TRZ y debajo de la zona de restricción (BRZ Below the Restricted Zone).
 - ✓ Altos valores de FAA no necesariamente producen alto VAM en mezclas aunque ahí hubo una tendencia general de incrementar los valores de VAM cuando se incrementa el FAA.
 - ✓ Altos valores de FAA generalmente producen bajos valores de $\%G_{mm}@N_{inicial}$.

Las recomendaciones de la *NCHRP Report 464* fueron las siguientes:

Los resultados del estudio demostraron que la zona de restricción es redundante en todas las condiciones (tales como tamaño máximo del agregado TMA y niveles de tráfico) cuando todos los demás requerimientos volumétricos y FAA se satisfacen. Por lo tanto, la zona de restricción debería suprimirse para evitar confusión en su implementación.

Otra recomendación importante realizada fue que para TMA de 12.5 mm utilizar un $N_{diseño}$ de 100 giros.

Y finalmente la recomendación de usar el Analizador de Pavimentos Asfálticos APA únicamente para ensayos de comportamiento porque se observó que este ensayo es el más sensible a los cambios en la graduación.

Diversos investigadores recomiendan omitir la zona de restricción, toda vez que el comportamiento de las mezclas depende de otras características como las que ya se han indicado. Con respecto a la deformación permanente algunos aseguran que solo la zona de restricción no influye en los resultados obtenidos experimentalmente.

En resumen, las diversas investigaciones acerca de la zona de restricción recomiendan omitir esta zona toda vez que por sí sola no ofrece en el comportamiento de las mezclas asfálticas en caliente.

2.2 Granulometría

La graduación de los agregados es un factor importante que influye en la deformación permanente de mezclas asfálticas en caliente (HMA).

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

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

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

Existen muchas opiniones de expertos acerca de que tipo de graduación, rango de fino a gruesos para granulometrías abiertas (open-graded) y discontinuas (gap graded) o Stone Matrix Asphalt (SMA), proveerían el mejor desempeño.

En graduaciones densas, en EU la mayoría de los estados han diseñado mezclas con graduaciones arriba de la zona de restricción y algunas que pasan a través de ésta. Actualmente se ha generado un interés considerable por parte de Superpave acerca de las graduaciones más gruesas, esto es, las que pasan abajo de la zona de restricción. Hay necesidad de evaluar las posibles roderas de mezclas con graduaciones que pasan arriba, a través y debajo de dicha zona, en lo que se refiere a deformación permanente.

En estas graduaciones densas, diversas investigaciones muestran que las profundidades de roderas obtenidas con el APA en muchas mezclas indican una diferencia significativa entre la profundidad de rodera de mezclas con graduaciones ARZ, TRZ y BRZ. Por ejemplo, para granitos y calizas la graduación BRZ generalmente muestra el valor más alto de rodera. La graduación TRZ generalmente muestra el valor más bajo de rodera, y ARZ muestra un valor intermedio de rodera. Para mezclas de gravas, la graduación BRZ muestra un valor más bajo de rodera, la graduación ARZ muestra un valor más alto y la graduación TRZ muestra un valor intermedio de rodera. Lo que significa que la zona de restricción sola, no es adecuada para caracterizar la graduación y asegurar el desempeño de roderas aceptables y debería por lo tanto omitirse de las especificaciones de Superpave.

Con respecto a la estructura del agregado, Bensa Nuyunka *et al.*, también aseguran que mezclas con graduaciones abajo de la zona de restricción BRZ, ofrecen menor resistencia a la deformación permanente comparado con mezclas con graduaciones arriba de la zona de restricción ARZ. La conclusión general es que mezclas con graduación ARZ que tienen una débil estructura de agregados presentan un comportamiento mejor contra mezclas con graduación BRZ y que estas últimas presentan el peor comportamiento en roderas.

Haddock *et al.*, también aseguran que las mezclas con graduaciones BRZ, ofrecen un peor comportamiento en fatiga. Kandhal y Mallick concluyen lo mismo para agregados calizos y granitos.

Hand y Epps, sugieren lo mismo, que mezclas con graduaciones ARZ proveen un mejor comportamiento que mezclas con graduación BRZ.

Bensa nakunya *et al.*, concluyen que mezcla con graduación BRZ presentan valores altos de VAM, lo que resulta en un exceso de asfalto, lo cual contribuye a generarse roderas prematuras.

Las recomendaciones de Superpave son hechas para fomentar el uso de graduaciones gruesas (mezclas con graduaciones ARZ), en lugar de mezclas con graduaciones finas (mezclas con graduaciones BRZ). Las recomendaciones también se hacen contra el uso de mezclas con graduaciones TRZ.

Aunque muchas agencias en EU han diseñado con graduaciones ARZ y TRZ; esta contradicción sugiere un interés significativo en el papel de la graduación y la relación entre la zona de restricción y el desempeño de roderas en la HMA.

Resalta la mayoría que la combinación o graduación del agregado en las HMA significativamente afecta el desempeño o comportamiento del pavimento. Muchos aseguran que en graduaciones densas, una graduación razonable que presente valores de VAM adecuados, mejora la resistencia a la degradación durante la construcción y bajo el tráfico y mejora la resistencia a la falla por fatiga

cuando se usan en pavimentos de espesor grueso. En mezclas de graduaciones abiertas (p.e. open graded y stone matrix asphalt SMA), es deseable tener una graduación en la cual tenga un contacto agregado con agregado en los agregados gruesos.

Se ha resaltado aquí que la graduación de agregados es un factor importante en la determinación del desempeño de la HMA, sin embargo, la graduación de Superpave es contraria a la usada en la práctica por algunas agencias en EU.

Superpave recomienda usar mezclas con graduaciones BRZ para altos volúmenes de tráfico porque creen que mezclas con graduación gruesa tienen agregados más duros y resistentes en su estructura que las mezclas con graduación ARZ. Sin embargo, como ya se dijo, muchos investigadores se han dado cuenta que las mezclas con graduación BRZ tienen pobre comportamiento respecto a mezclas con graduaciones ARZ y TRZ en cuanto a deformación permanente. Además, mezclas con graduación BRZ proveen la menor resistencia a roderas bajo diferentes ensayos (situación que se observó en los ensayos en el APA de esta investigación).

En últimas investigaciones, Kandhal, indica que mezclas con graduaciones gruesas, esto es, abajo de la zona de restricción (BRZ), así como mezclas con graduaciones finas, arriba de la zona de restricción (ARZ), han demostrado en diferentes ensayos de susceptibilidad al ahuellamiento, que no existe una significativa diferencia en las profundidades de roderas entre las dos graduaciones. Por esto, se dice que en EU, los diseñadores no deberían limitar el uso de mezclas con graduaciones gruesas o finas que pasan de la zona de restricción, si ambas mezclas han mostrado buen comportamiento y además cumplen con los requisitos volumétricos.

Por lo anterior la literatura sugiere que las recomendaciones de Superpave deberían ser cuestionadas.

2.3 Influencia de la mineralogía

La revisión de la literatura no revela grandes relaciones entre la mineralogía y petrografía y el desempeño general de las mezclas HMA. Esto podría deberse a que todas las partículas de agregados son cubiertas con una película de asfalto; sin embargo, el pulimento y la fricción es altamente ligada a estas características. Estudios han revelado la relación entre la mineralogía del agregado y propiedades de pulimento/fricción y sugerido que la información petrográfica sea utilizada en ensayos físicos para establecer criterios de pulimento y fricción del agregado.

La influencia, más bien se enfoca hacia la fuente de origen, propiedades tales como tenacidad (Resistencia a la abrasión), durabilidad (Intemperismo

acelerado) y materiales deletéreos, las cuales están ligadas al tipo de falla de fisuras, baches y desprendimientos.

Con base a esto, podemos mencionar que la mayoría de los agregados son resistentes a la degradación durante la producción (p.e. almacenamiento, manejo y mezcla) y construcción (p.e. transporte, colocación y compactación). La resistencia a la abrasión del agregado minimiza los problemas de control en la construcción y asegura que la mezcla tenga las propiedades más cercanas al diseño. La mayoría de las HMA también son resistentes a la degradación cuando son sometidas al tráfico. Debido a que la degradación de las HMA es inicialmente controlada por las propiedades del agregado, la mayoría de los agregados son resistentes al desgaste y trituración por la acción del tráfico pesado.

Las HMA deberían ser también resistentes al intemperismo durante la vida de servicio. Aunque cubiertos por una película de asfalto, los agregados son expuestos a la acción del intemperismo (p.e. lluvia y sequía, y congelamiento y deshielo) cuando son tratados y triturados durante la compactación o cuando la película de asfalto es desplazada por el tráfico. El desprendimiento parcial en las capas de las HMA y/o degradación del agregado puede también exponer al agregado a estos elementos. Además, la mayoría de los agregados son sanos y resistentes a la intemperie. Los agregados que llegan a ser debilitados o desintegrados cuando son expuestos a la humedad, lluvia y sequía, congelamiento y deshielo, o calentamiento o enfriamiento no son deseables.

En resumen, la dureza y la resistencia a la abrasión es un indicativo de predicción el desempeño de las mezclas en términos de resistencia a la degradación e intemperismo.

En cuanto a los materiales deletéreos, estos impiden el cubrimiento de asfalto en las partículas de agregado, reaccionan con el ambiente, y ya que no consisten de material mineral son también perjudiciales en la mezcla; sin embargo también se dice que es difícil cuantificar la presencia de algunos materiales deletéreos en los parámetros de desempeño de las HMA.

3 Comparativa de Normas SCT y Superpave

Antes de realizar la comparativa entre las normas SCT y las exigidas por Superpave, es conveniente recalcar la principal diferencia entre el diseño Superpave y el diseño Marshall utilizado en México, siendo esta, el método de compactación, el cual repercute en los parámetros volumétricos. En México el diseño se basa en el método Marshall, en la que además de los requisitos de vacíos, la mezcla también debe cumplir propiedades mecánicas tales como estabilidad y flujo en especímenes elaborados (100 mm de diámetro y 50 mm de altura) con métodos de compactación dinámica, mientras que para Superpave los especímenes (de 150 mm de diámetro y 75 mm de altura) son elaborados bajo energía de compactación por amasado giratorio, más en consonancia con los equipos de compactación en campo.

La compactación giratoria produce mayores densidades de la mezcla asfáltica compactada, esto desde luego repercute de manera directa en los demás parámetros volumétricos. Los vacíos de aire son mayores aproximadamente en 1% para las mezclas elaboradas con el método Marshall.

Al haber más espacio intergranular en las mezclas elaboradas con el método Marshall, es de esperar obtener valores más altos de VAM en las probetas compactadas ya que existe más espacio disponible para acomodar asfalto y aire en la mezcla. Por la misma razón, los mayores valores de VAF se presentan para las mezclas compactadas con la metodología Superpave ya que al haber menos espacio entre las partículas para alojar el asfalto efectivo, son estas probetas las que presentan mayor porcentaje de saturación para una misma cantidad de asfalto.

El contenido óptimo de asfalto para la metodología Marshall resulta mayor en 0.5% aproximadamente con respecto al método Superpave. Es de especial importancia reflexionar acerca de las repercusiones que puede traer consigo la selección del método de compactación de la mezcla en el laboratorio durante la etapa de diseño.

En el supuesto de que la compactación giratoria represente de mejor manera las condiciones de densificación de un pavimento en servicio, se puede decir que la compactación dinámica que proporciona el método Marshall puede ser insuficiente en el intento de simular las condiciones de densificación que se producen en campo, al producir densidades más bajas con respecto al método Superpave. Lo anterior tiene como consecuencia directa la elección de contenidos de asfaltos "óptimos" mayores a los requeridos, condición que podría afectar directamente el desempeño de la mezcla asfáltica.

Dado que el objetivo de esta investigación es encontrar las características de los agregados que más pueden repercutir en el desempeño de la mezcla asfáltica y en particular en la deformación permanente o roderas, es conveniente ahora hacer una comparación entre las normas SCT para los agregados que se utilizan en la elaboración de las HMA y las exigidas para la metodología Superpave, la cual sirvió como base del experimento de esta investigación.

3.1 Normas SCT

3.1.1 Granulometría para un número de ejes equivalentes de 8.2 ton, acumulados, $\Sigma L \leq 10^6$.

Las normas SCT exigen requisitos de granulometría como los que se indican en la tabla 3.1, para los tamaños más usuales (Referencia 6).

Tabla 3.1
Requisitos de granulometría del material pétreo para carpetas asfálticas de granulometría densa (para $\Sigma L \leq 10^6$)

Malla		Tamaño nominal del material pétreo mm (in)					
Abertura mm	Designación	12.5 (1/2)		19 (3/4)		25 (1)	
		Porcentaje que pasa					
		Límites		Límites		Límites	
		Inferior	Superior	Inferior	Superior	Inferior	Superior
37.5	1 1/2"						
25	1"						100
19	3/4"				100	90	100
12.5	1/2"		100	90	100	76	89
9.5	3/8"	90	100	79	92	67	82
6.3	1/4"	76	89	66	81	56	71
4.75	Nº. 4	68	82	59	79	50	64
2	Nº 10	48	64	41	55	36	46
0.85	Nº 20	33	49	28	42	25	35
0.425	Nº 40	23	37	20	32	18	27
0.25	Nº 60	17	29	15	25	13	21
0.15	Nº 100	12	21	11	18	9	16
0.075	Nº 200	7	10	6	9	5	8

Para estas granulometrías, se utilizan gráficas semilogarítmicas para definir las granulometrías permitida, en las cuales, en las ordenadas se encuentran los porcentajes de material que pasan por las diferentes mallas según el tamaño nominal del material pétreo y en las abcisas se encuentran las aberturas de las mallas en mm, graficadas en forma logarítmica.

La selección de una curva granulométrica para el diseño de una mezcla asfáltica cerrada o densa, está en función de dos parámetros: el tamaño nominal del material y las líneas de control (superior e inferior). Las líneas de control son puntos de paso obligado para la curva granulométrica.

En la Figura 3.1 se presenta la gráfica granulométrica semilogarítmica para un tamaño nominal de 19 mm según SCT, para un número de ejes equivalentes de $\Sigma L \leq 10^6$. En la Figura 4.2 se presenta la gráfica para un tamaño nominal de 19 mm, para un número de ejes equivalentes de $\Sigma L > 10^6$. Este tamaño nominal corresponde a un tamaño nominal de 12.5 mm en la metodología Superpave.

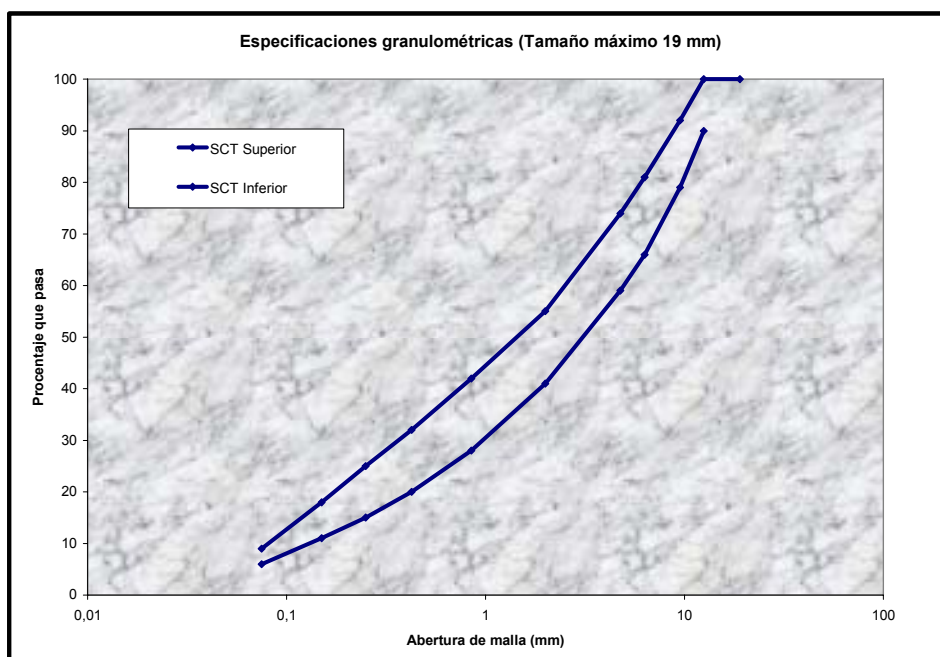


Figura 3.1
Gráfica granulométrica SCT para un tamaño nominal de 19 mm y $\Sigma L \leq 10^6$

3.1.2 Granulometría para un número de ejes equivalentes de 8.2 ton, acumulados, $\Sigma L > 10^6$.

Las normas SCT exigen requisitos de granulometría como los que se indican en la tabla 3.2, para los tamaños más usuales. Para el experimento se consideró un número de ejes equivalentes de 8.2 ton, acumulados, $\Sigma L = 10^7$.

Tabla 3.2

Requisitos de granulometría del material pétreo para carpetas asfálticas de granulometría densa (para $\Sigma L > 10^6$)

Malla		Tamaño nominal del material pétreo mm (in)					
Abertura mm	Designación	12.5 (1/2)		19 (3/4)		25 (1)	
		Porcentaje que pasa					
		Límites		Límites		Límites	
		Inferior	Superior	Inferior	Superior	Inferior	Superior
37.5	1 1/2"						
25	1"						100
19	3/4"				100	90	100
12.5	1/2"		100	90	100	72	90
9.5	3/8"	90	100	76	90	60	76
6.3	1/4"	70	81	56	69	44	57
4.75	Nº. 4	56	69	45	59	37	48
2	Nº 10	28	42	25	35	20	29
0.85	Nº 20	18	27	15	22	12	19
0.425	Nº 40	13	20	11	16	8	14
0.25	Nº 60	10	15	8	13	6	11
0.15	Nº 100	6	12	5	10	4	8
0.075	Nº 200	2	7	2	6	2	5

3.1.3 Calidad de los materiales pétreos

Los materiales pétreos que se utilicen en la elaboración de las HMA deben cumplir con los requisitos de calidad indicados en la Tabla 3.3.

Tabla 3.3
Requisitos de calidad del material pétreo para carpetas asfálticas de
granulometría densa (para $\Sigma L > 10^6$)

Características	Valor
Densidad relativa, mínimo	2.4
Desgaste de los Ángeles, % máximo	30
Partículas alargadas y lajeadas, % máximo	35
Equivalente de arena, % mínimo	50
Pérdida de estabilidad por inmersión en agua, % máximo	25

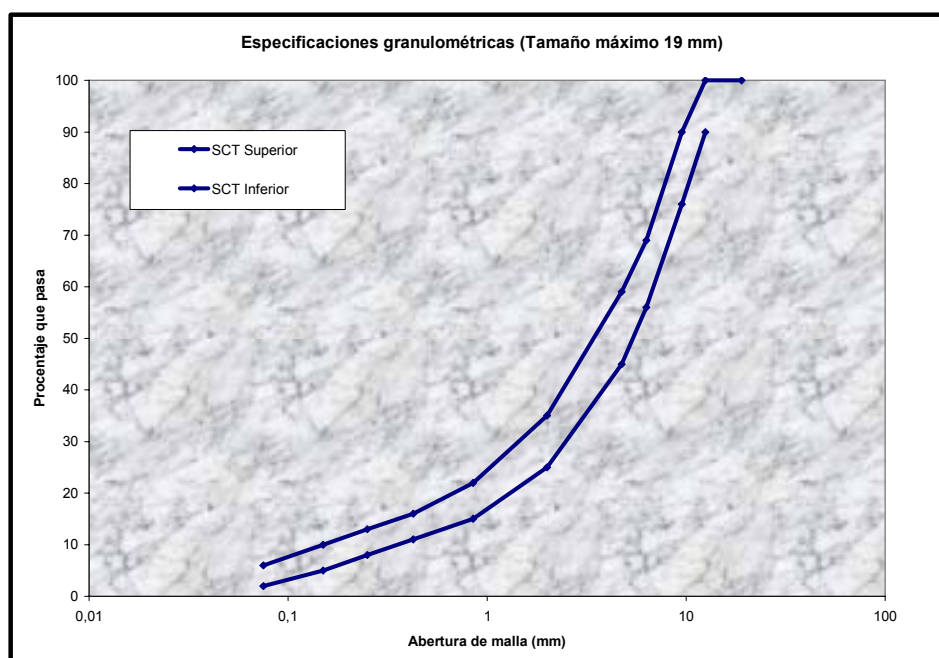


Figura 3.2
Gráfica granulométrica SCT para un tamaño
nominal de 19 mm y $\Sigma L > 10^6$

3.1.4 Vacíos en la mezcla

En las tablas 3.4 y 3.5 se muestran los requisitos de calidad que deben cumplir las mezclas asfálticas según las Normas SCT.

Tabla 3.4
Requisitos de calidad para mezclas de granulometría densa

Características	Número de ejes equivalentes de diseño $\Sigma L^{(1)}$	
	$\Sigma L < 10^6$	$10^6 < \Sigma L < 10^7$
Va (%)	3 - 5	3 - 5
VFA (%)	65 - 78	65 - 75
(1) No. de ejes equivalentes de 8.2 toneladas (millones de ESAL's), Esperado durante la vida útil del pavimento		

Tabla 3.5
Vacíos en el agregado mineral (VAM) para mezclas de granulometría densa

Tamaño nominal del pétreo utilizado en la mezcla ¹		Vacíos de aire en la mezcla asfáltica de diseño (%)		
Mm	Designación	3	4	5
		Vacíos en el agregado mineral VAM mínimo (%)		
9.5	3/8"	14	15	16
12.5	1/2"	13	14	15
19	3/4"	12	13	14
25	1"	11	12	13

3.2 Requisitos Superpave

3.2.1 Granulometría

Como se indicó en el capítulo 1, en la granulometría Superpave se emplea el exponente 0.45 en la carta para definir la granulometría permitida (gráfica de Fuller), mediante una técnica gráfica única para juzgar la distribución de tamaños acumulados de partículas de una mezcla de agregados.

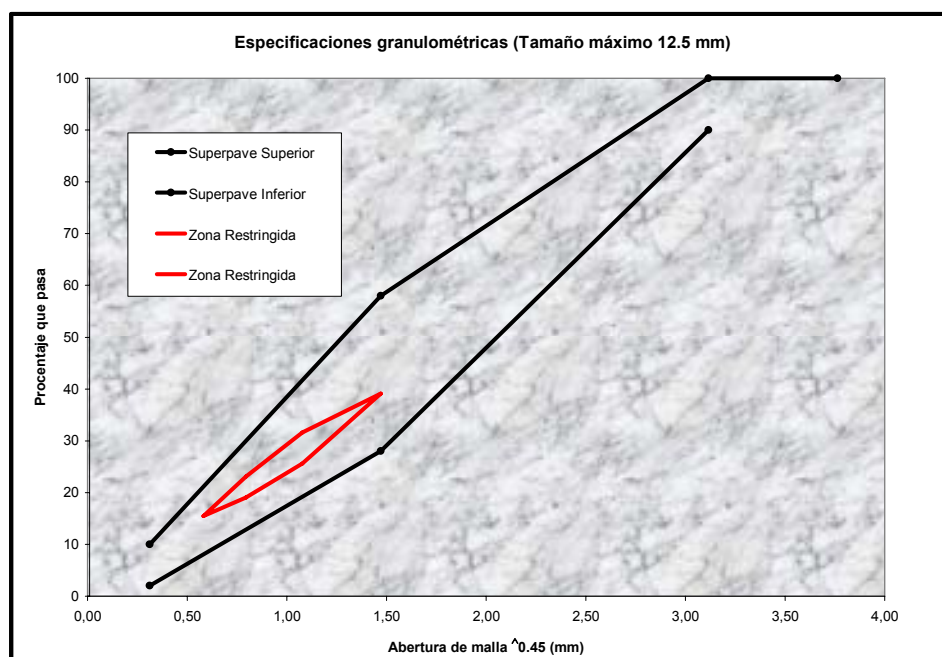


Figura 3.3

Gráfica granulométrica Superpave para un tamaño máximo nominal de 12.5 mm (usando el exponente de 0.45)

En la figura 4.3 se presenta la gráfica Superpave para un tamaño máximo nominal de 12.5 mm (1/2") utilizado en el experimento, lo que corresponde a una mezcla asfáltica según la designación SCT a 19 mm (3/4").

3.2.2 Calidad de los materiales pétreos

Los materiales pétreos que se utilicen en la elaboración de las HMA deben cumplir con los requisitos de calidad indicados en las tablas 3.6 y 3.7.

Tabla 3.6

Requisitos de calidad del material pétreo para carpetas asfálticas de granulometría densa

ESAL's ¹ (Millones)	Angularidad del agregado grueso		Angularidad del agregado fino		Equivalente de arena (Porcentaje mínimo)	Partículas planas y alargadas ³ (Porcentaje máximo)
	(Porcentaje mínimo)		(Porcentaje mínimo)			
	< 100 mm	> 100 mm	< 100 mm	> 100 mm		
< 0.3	55/-	-/-	-	-	40	-
0.3 a < 3	75/-	50/-	40	40	45	10

3 a < 10	85/80 ²	60/-	45	40	45
10 a < 30	95/90	80/75	45	40	45
≥ 30	100/100	100/100	45	45	50
(1) Correspondiente a un periodo de diseño de 20 años					
(2) "80/85" denota que el 85% del agregado grueso tiene una cara fracturada y el 80% con 2 ó más caras fracturadas					
(3) Criterio basado en la relación de máximo a mínimo 5:1					

Tabla 3.7
Requisitos de vacíos en mezclas de granulometría densa

ESAL's ¹ (Millones)	Vacíos en el agregado mineral VAM (Porcentaje mínimo)					Vacíos llenos de asfalto VFA (Porcentaje mínimo)	Relación de polvo-asfalto
	Tamaño máximo nominal (mm)						
	37.5	25.0	19.0	12.5	9.5		
< 0.3	11 ⁽⁴⁾	12.0	13.0	14.0	15.0	70-80 ⁽³⁾	0.6-1.6
0.3 a < 3						65-75 ⁽²⁾	
3 a < 10							
10 a < 30						65-75 ⁽²⁾	
≥ 30							
(1) Correspondiente a un periodo de diseño de 20 años							
(2) Para 9.5 mm los valores especificados para VFA van de 73% a 76% para tráfico ≥ 3x10 ⁶ ESAL's							
(3) Para 25.0 mm el límite menor especificado para VFA es 66% para tráfico < 0.3x10 ⁶ ESAL's							
(4) Para 37.5 mm el límite menor especificado para VFA es 63% para todos niveles de tráfico							

Otras características:

Características	Valor
Densidad relativa, mínimo	--
Intemperismo acelerado, % máximo	10

3.3 Comparativa de las granulometrías SCT y Superpave

En la siguiente figura se presentan las granulometrías SCT y Superpave para un tamaño máximo nominal de 19 mm para SCT, que corresponde a 12.5 mm según la metodología Superpave. Aquí se sobreponen las gráficas para un número de ejes equivalentes de $\Sigma L \leq 10^6$ y $\Sigma L > 10^6$.

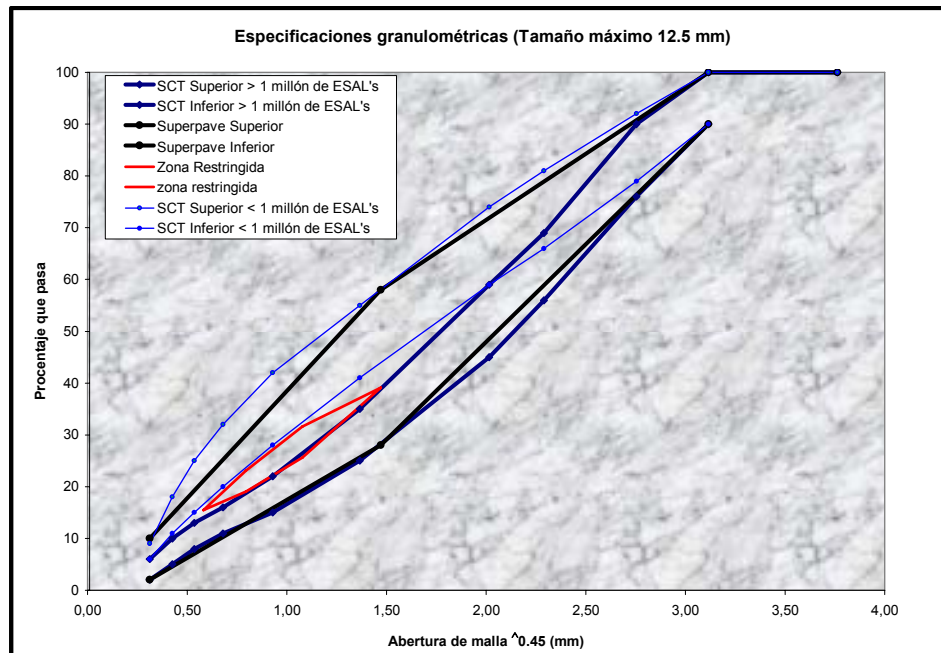


Figura 3.4
Granulometrías SCT y Superpave para un tamaño máximo nominal de 12.5 mm (usando el exponente de 0.45 para las aberturas de las mallas)

3.4 Comentarios

- ✓ La primera observación que se hace, es el hecho de que las granulometrías SCT, de acuerdo a la Figura 3.4, en la que se ilustran las gráficas semilogarítmica de SCT y la de Superpave, usando el exponente de 0.45, respectivamente, evitan pasar por la zona de restricción; sin embargo en la revisión de la Norma no existe una referencia que nos indique que fundamento científico se utilizó en la elaboración de dicha norma. Esta característica observada se presenta para los diferentes tamaños máximos nominales de SCT. Es de suponer por lo tanto que este criterio de evitar la zona de restricción fue basado en los requisitos que exige la metodología Superpave, sin embargo, como ya se indicó en el capítulo 3, esta recomendación de Superpave, también carece de fundamento científico y tal como se concluyó en ese capítulo, este requisito debería ser suprimido dadas las investigaciones que se han hecho al respecto.
- ✓ De acuerdo a lo anterior, se considera conveniente hacer una revisión de las granulometrías SCT, debido a que en los diferentes tamaños se presenta la misma situación, esto es, que por alguna razón se evita la zona de restricción.

- ✓ Además, partiendo de la aceptación de que los requisitos de granulometría de SCT están basados en los requisitos de Superpave, se debe notar la diferencia en cuanto a la designación, debido a que para un mismo tamaño máximo nominal SCT usa diferentes designaciones, debiendo corresponder, de acuerdo con la definición de tamaño máximo nominal a las designaciones Superpave. Por ejemplo para Superpave un tamaño máximo nominal de 12.5 mm corresponde a una mezcla de 12.5 mm (1/2") (Ver tabla 2.1 y definición en 2.4), para SCT corresponde a una mezcla con tamaño nominal de 19 mm (3/4").
- ✓ Por otro lado, se puede observar en la figura 3.3 que Superpave, de acuerdo al límite superior, puede permitir mezclas mucho más finas que SCT, lo que puede repercutir en el bombeo de finos bajo condiciones sumergidas y generar mezclas más susceptibles a fisuramientos, por lo tanto, podemos recomendar un límite superior en SCT en el rango de ambos límites superiores.
- ✓ Asimismo, respecto a la zona de restricción, como ya se dijo en el capítulo 3.1, la intención original de incluir una zona restringida, debido a que algunas graduaciones particularmente se ven afectadas por: 1) el uso de arenas naturales redondeadas o con distribución de tamaños limitada y 2) la proporción admisible de la fracción fina (0.15 a 0.6 mm) del total de la arena (que pasa por 2.36 mm), fue la de ayudar a reducir la incidencia de tender o ser propensas a roderas en las HMA, sin embargo se concluyó ahí que esta zona debería ser suprimida de las recomendaciones de Superpave, puesto que mezclas con graduaciones que violan esta zona restringida ofrecen buen comportamiento; además se indicó que no fue establecida como una norma sino como una simple recomendación, sin embargo algunos estados de EU, lo tomaron como norma.
- ✓ De acuerdo a los resultados de nuestro experimento, mezclas con la granulometría más gruesa G1 (límite inferior de ambas normas), demostraron ser más susceptibles a la deformación permanente, por lo que queda abierta la posibilidad de proponer graduaciones con límite inferior ligeramente arriba del actual y límite superior también ligeramente por encima del actual de SCT. Este límite inferior propuesto con la finalidad de evitar mezclas más susceptibles a roderas y el límite superior propuesto con la finalidad de evitar mezclas más susceptibles a daños por humedad y desprendimiento de agregados.
- ✓ En cuanto a la angularidad de los agregados (caras fracturadas) que no se especifican en las Normas SCT, se considera factible la posibilidad de tomar en cuenta estos requisitos, ya que las características de la forma de la partícula, angularidad y textura de agregados gruesos pueden ser usadas en la predicción del desempeño de las HMA en términos de la deformación permanente y en cuanto a agregados finos, una alta angularidad (UV vacíos

sin compactar) ofrece mayor resistencia en las HMA a la deformación permanente.

- ✓ El criterio de partículas alargadas y lajeadas difieren en cuanto al porcentaje y al método usado, ya que las normas SCT permiten hasta 35% máximo de estas partículas, mientras que Superpave establece como máximo 10%. Toda vez que esta condición puede interferir con la consolidación y provocar dificultad para colocar los materiales y además se relaciona con la degradación o rompimiento de las partículas de agregado durante la producción y compactación de la mezcla, se considera de suma importancia limitar el uso de estas partículas en porcentajes mucho menores que los que permite la norma actual.
- ✓ La pérdida de estabilidad por inmersión en agua que corresponde a la acción de intemperismo, y que está directamente relacionado con la sanidad de los agregados, se considera que la aceptación de hasta un 25% de pérdida máxima en las normas SCT, repercute en la resistencia de los agregados y esto puede hacer más susceptible a la mezcla de presentar fisuramientos por la degradación de los agregados durante la compactación o durante la vida de servicio.
- ✓ Con respecto a la densidad, Superpave no exige un valor específico, esto puede ser porque generalmente la variación de la densidad de los agregados varía de 2.60 a 2.80, sin embargo las normas SCT exigen un valor mínimo de 2.4 debido a que se han encontrado densidades menores, lo que resulta en agregados más ligeros y en consecuencia más débiles.
- ✓ En el anexo se muestra un resumen de los requisitos de calidad exigidos por CAPUFE (Carreteras y Puentes Federales) en la que destacan algunas diferencias en comparación con los requisitos exigidos por SCT, entre los cuales se encuentra la Pérdida por Abrasión "Micro-Deval" y Azul de Metileno (esta última se describió en 5.2.4), entre otros.

4 Métodos de caracterización de agregados

Investigadores de la SHRP creyeron que el agregado mineral juega un rol clave en el desempeño de la HMA. Si bien no desarrollaron ningún nuevo procedimiento para ensayar agregados, si refinaron los procedimientos existentes para adaptarlos al sistema Superpave. Dos tipos de propiedades de los agregados se especifican en el sistema Superpave: propiedades de consenso (consensus properties) y propiedades de origen del agregado (source properties).

Las propiedades de consenso son aquellas consideradas por los investigadores de SHRP críticas para alcanzar un elevado desempeño de la HMA. Estas propiedades deben satisfacerse en varias escalas, dependiendo del nivel de tránsito y la estructura del pavimento. Altos niveles de tránsito y mezclas para la carpeta de rodamiento requieren valores más estrictos para las propiedades de consenso. Estas propiedades son:

- ✓ Angularidad del agregado grueso (Caras fracturadas) (ASTM D5821)
- ✓ Angularidad del fino (Vacíos sin compactar) (ASTM C1252)
- ✓ Partículas alargadas y planas (ASTM D4791)
- ✓ Equivalente de arena (Contenido de arcilla) (ASTM D2419)

Especificando la angularidad de los agregados gruesos y finos, buscaban lograr una HMA con un alto ángulo de fricción interna y así, una alta resistencia al corte y por ende una alta resistencia al ahuellamiento o roderas. Limitando las partículas alargadas y planas se asegura que los agregados de la HMA serán menos susceptibles a fractura durante el manipuleo, construcción y bajo tránsito. Limitando la cantidad de arcilla en el agregado, la unión entre el ligante y el agregado es fortalecida y mejorada.

Las propiedades de origen del agregado son aquellas frecuentemente utilizadas para calificar las fuentes de agregados. El cumplimiento de estas propiedades es importante y son específicas de la fuente de origen. Las propiedades de origen del agregado son:

- ✓ Tenacidad (Mediante la prueba de Desgaste de los Ángeles) (ASTM C131)
- ✓ Durabilidad (Intemperismo Acelerado) (ASTM C88)
- ✓ Materiales deletéreos (AASHTO T11)

4.1 Pruebas de consenso

4.1.1 Angularidad del agregado grueso

Este ensayo se realiza en materiales retenidos en la malla 4. Normalmente desarrollado en gravas que necesitan triturarse para obtener caras fracturadas. Una cara fracturada es una cara que expone el interior de la partícula de grava.

4.1.1.1 Importancia y uso

Uno de los propósitos de esta estimación es maximizar la resistencia al corte mediante el incremento de la fricción entre partículas de las mezclas de agregado.

Otro propósito es proveer estabilidad para tratamientos superficiales de agregados mediante el incremento de la fricción y textura del agregado utilizado carpetas asfálticas delgadas.

4.1.1.2 Resumen del método de prueba

Las partículas fracturadas contenidas en una muestra son pesadas después de lavarlas, separarlas y secarlas hasta masa constante para determinar el porcentaje en peso. Se considera una cara fracturada si el área proyectada es mayor o igual al 25% del área máxima proyectada y la cara es puntiaguda y margen bien definido. La determinación es subjetiva y es considerada buena. La precisión puede ser pobre para materiales con baja cantidad de partículas fracturadas. Este ensayo no cuantifica la forma de la partícula ni la textura superficial.

Algunos estados en EU especifican porcentaje de partículas con una o más caras fracturadas y otros con dos o más caras fracturadas. Este requisito varía dependiendo del tipo de mezcla.

4.1.1.3 Cálculos

$$P = \frac{M_f}{M_t} \times 100$$

Donde:

- P = % de partículas con el número especificado de caras fracturadas
- M_f = Masa o cantidad de partículas fracturadas con el menor número de caras fracturadas especificadas
- M_t = Masa o cantidad total de partículas.



(a) 0% de caras fracturadas

(b) 100% con 2 ó más caras fracturadas

Figura 4.1
Ejemplos de caras fracturadas

4.1.2 Angularidad del agregado fino

Este método provee el porcentaje de vacíos bajo condiciones estandarizadas de una muestra de agregados finos menores de 2.36 mm (malla No. 8) en estado suelto. Esta medida depende de la forma y textura de la partícula de agregado fino. Existen 3 métodos para estimar la angularidad del agregado fino, A, B y C.

Un contenido de vacíos alto indica una alta angularidad, menos partículas esféricas o superficies con texturas rugosas o combinación de esos.

Cuando se mide el contenido de vacíos en una muestra tal como se recibe del banco, este puede ser un indicador del efecto en la trabajabilidad de la mezcla en la que podría usarse.

4.1.2.1 Importancia

Los métodos A y B proveen porcentajes de vacíos bajo condiciones estandarizadas, los cuales dependen de la forma y textura del agregado fino. Un incremento en el contenido de vacíos por estos procedimientos indica una alta angularidad y menos partículas esféricas o textura rugosa o combinación de esos.

El método C mide el contenido de vacíos de la porción que pasa la malla No. 4 de la muestra recibida del banco sin cribado previo. Este contenido depende de la graduación así como de la forma y textura de la partícula.

El contenido de vacíos determinado de muestras graduadas estándar (método A) no es directamente comparable con el promedio de contenido de vacíos de las tres fracciones de tamaños individuales de la misma muestra ensayada separadamente (método B). Una muestra consistente de partículas de tamaños escogidos tendrá un contenido de vacíos mucho mayor que una muestra graduada. Por lo tanto, es importante establecer el uso de cada uno de los métodos o los otros como una medida comparativa de forma y textura, e identificar que método ha sido usado para obtener los datos. El método C no provee un indicativo de forma y textura directamente si la graduación de una muestra a otra cambia.

La muestra graduada estándar (método A) es muy útil como un ensayo rápido, el cual indica las propiedades de forma y textura de la partícula del agregado fino graduado. Típicamente, el material usado para hacer la muestra graduada estándar puede ser obtenido de lo que se criba de fracciones de tamaño después de ejecutar un análisis de separación por mallas del agregado fino.

Obteniendo y ensayando fracciones de tamaño individuales es aún más tardado y requiere una muestra inicial grande que ensayar usando muestras graduadas. Sin embargo, el método B provee información adicional concerniente a las características de forma y textura de tamaños individuales.

Ensayando muestras con las graduaciones tal como se reciben (método C) podría ser útil ser en la selección de proporciones de componentes usados en una variedad de mezclas. En general, altos contenidos de vacíos sugieren que el material podría ser mejorado adicionando más finos en la porción fina o materiales cementantes para llenar los vacíos entre las partículas.

La densidad relativa seca (gravedad específica) del agregado fino es usada en cálculos de contenido de vacíos. La eficacia de estos métodos de ensayo para determinar contenidos de vacíos y su relación con la forma y textura de la partícula depende de la densidad relativa (gravedad específica) de varias fracciones de tamaños al inicio iguales o cercanamente iguales. El contenido de vacíos es en realidad una función del volumen de cada fracción de tamaños. Si el tipo de roca o minerales, o su porosidad, en cualquiera de las fracciones varía marcadamente, podría ser necesario determinar la gravedad específica de las fracciones usadas en el ensayo.

La información del contenido de vacíos de estos tres métodos debería ser útil como un indicador de propiedades tales como: relación agua-cemento en concreto hidráulico; factores de flujo, bombeo, o trabajabilidad cuando se forman morteros o lechadas; o en concreto asfáltico, el efecto del agregado fino en la estabilidad de la porción del agregado fino de una base de agregado grueso.

4.1.2.2 Resumen del método de prueba

En este método se usa un cilindro calibrado de 100 cm³, el cual se llena con el agregado fino de graduación establecida (de acuerdo al método) permitiendo a la muestra fluir a través del embudo dentro del cilindro. El exceso de material se quita y el cilindro se pesa. El contenido de vacíos sin compactar de la muestra se calcula usando este peso y la gravedad específica neta del agregado Gsb. El método A (Muestra de graduación estándar) usa muestras de graduación especificada con material que pasa la malla No. 8 y retenido en la malla No. 100. El método B (Fracciones de tamaños individuales) usa tres fracciones de tamaños individuales, de la malla No. 8 a la 16, de la malla 16 a 30, de la malla 30 a 50 y de la malla 50 a 100 y se determina por medio de la media del contenido de vacíos. El método C (Graduación de muestras tal como se reciben) usa la porción de agregados finos que pasan la malla No. 4.

4.1.2.3 Cálculos

$$U = \frac{V - (F / G)}{V} \times 100$$

Donde:

V= Volumen del cilindro

F= Masa neta del agregado

G= Densidad relativa seca (gravedad específica) del agregado fino

U= Vacíos sin compactar en el material en %.

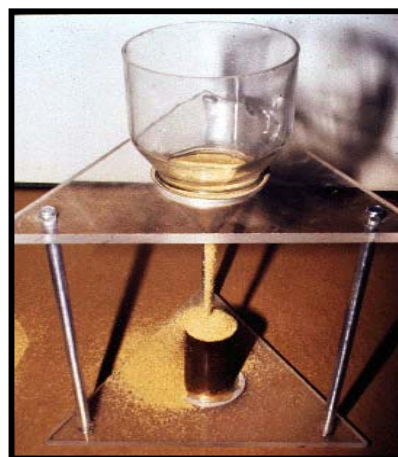


Figura 4.2
Dispositivos para la prueba de angularidad del agregado fino

4.1.3 Partículas alargadas y planas

Este método cubre la determinación de los porcentajes de partículas planas, alargadas o alargadas y planas de agregado grueso mayores de 4.75 mm.

4.1.3.1 Importancia y uso

Las partículas de agregado planas o alargadas, para algunos usos en construcción, pueden interferir con la consolidación y provocar dificultad para colocar los materiales.

Este método de prueba provee un medio para verificar el cumplimiento con las especificaciones que limitan tales partículas, o para determinar las características relativas a la forma del agregado grueso.

En EU muy pocos estados miden las partículas planas o alargadas por separado. La mayoría de los estados miden la relación de la mínima dimensión (espesor) a la máxima dimensión (largo) de la partícula de agregado para determinar el porcentaje de partículas planas o alargadas, usualmente se especifica un porcentaje máximo de relaciones 1:5. Sin embargo, esta relación no representa ninguna de las dos características, partículas planas ni alargadas y, por lo tanto, este valor es cuestionable.

El porcentaje de partículas planas o alargadas obviamente no es una medida completa de la forma de la partícula de agregado. Además, la textura de las partículas de agregado no es medida aquí. Este ensayo se relaciona con la degradación o rompimiento de las partículas de agregado durante la producción y compactación de la mezcla.

4.1.3.2 Resumen del método de prueba.

Se usa un dispositivo calibrado como el que se muestra en la Figura 3.3a. Las partículas individuales de agregado de tamaños de malla específico se miden para determinar las relaciones de ancho a espesor, largo a ancho o de largo a espesor, haciéndolas pasar primeramente a lo ancho en la proporción 1 y después por el largo en la proporción 5 para determinar si es plana o alargada o planas y alargadas.

En México esta prueba se denomina “Partículas alargadas y lajeadas”. Se desarrolla la prueba utilizando un dispositivo como el que se muestra en la Figura 3.4, denominados calibrador de espesores Figura 4.4a y calibrador de longitudes Figura 4.4b. Se selecciona una porción de material que se retiene en la malla No. 4, la cual se somete a un proceso de cribado para separar los diferentes tamaños. Esto se hace para dos muestras.

Para cada porción clasificada de cada una de las dos muestras de prueba, es decir, del número de partículas retenido de cada malla, se verifica que cada pieza pase por el claro correspondiente al calibrador de longitudes, buscando la posición tal que su dimensión mayor sea paralela al eje del calibrador. Se reúnen todas las partículas que hayan pasado por las ranuras de calibrador de longitudes y se determina su masa. Cada claro corresponde a las designaciones de las mallas que definen la fracción de prueba correspondiente.

Seguido se verifica que cada pieza pase por la ranura correspondiente del calibrador de espesores, buscando la posición más adecuada. Se reúnen todas las partículas que hayan pasado por las ranuras del calibrador de espesores y se determina su masa. Cada ranura corresponde a las designaciones de las mallas que definen la fracción de prueba correspondiente.

Los cálculos son similares a los que se indican a continuación.

4.1.3.3 Cálculos

Se calcula el porcentaje de partículas alargadas y planas con una aproximación de 1% para cada uno de los tamaños más grandes que la malla de 9,5 mm (3/8") o 4,75 mm (No.4), como sea requerido.

Por masa:

$$\% \text{Partículas planas} = (M_p/M_t) * 100$$

$$\% \text{Partículas alargadas} = (M_a/M_t) * 100$$

$$\% \text{Partículas planas y alargadas} = (M_{ayp}/M_t) * 100$$

Donde:

M_p = Masa de partículas planas

M_{ayp} = Masa de partículas planas y alargadas

M_t = Masa total

Por conteo:

$$\% \text{Partículas planas} = (N_p/N_t) * 100$$

$$\% \text{Partículas alargadas} = (N_a/N_t) * 100$$

$$\% \text{Partículas planas y alargadas} = (N_{ayp}/N_t) * 100$$

Donde:

N_p = Número de partículas planas

N_{ayp} = Número de partículas planas y alargadas N_t = Número total de partículas

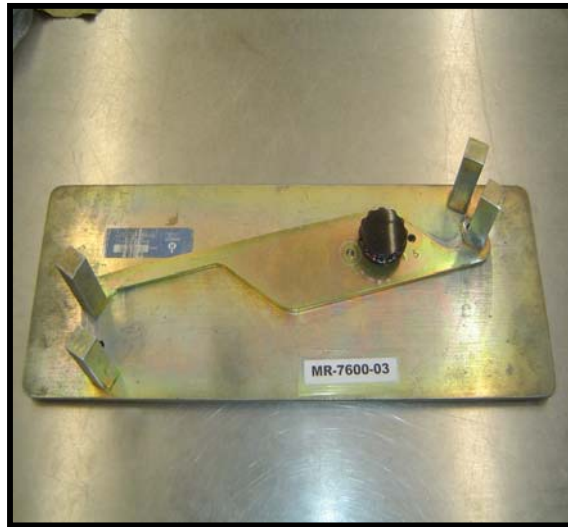


Figura 4.3
Medición de las partículas planas y alargadas

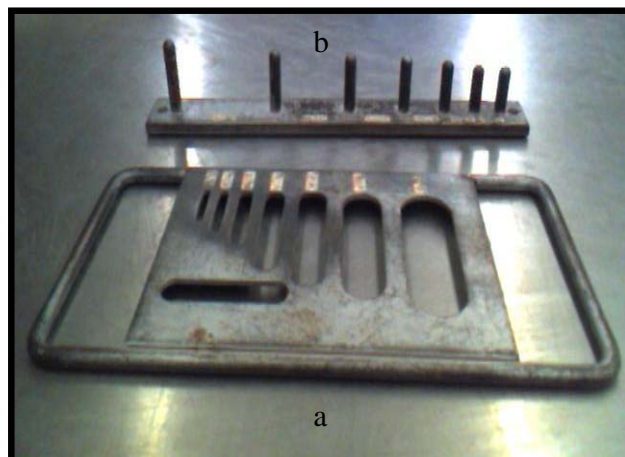


Figura 4.4
Dispositivos para estimar las partículas alargadas y lajeadas en México
(a) Calibrador de espesores (b) Calibrador de longitudes

4.1.4 Equivalente de arena

El equivalente de arena es una medida de la cantidad de contaminación de limo o arcilla en el agregado fino menor de 4.75 mm.

Este método tiene la intención de servir como un ensaye rápido de correlación en campo. El propósito de este método de prueba es indicar bajo condiciones estándar, las proporciones relativas de arcilla o finos plásticos y polvos de suelos granulares y agregados finos que pasan la malla No. 4. (4,75 mm). El término “equivalente de arena” expresa el concepto de que muchos suelos granulares y agregados finos son mezclas de partículas gruesas deseables, arena, con arcilla o finos plásticos y polvo, no deseables.

4.1.4.1 Importancia y uso

Este método de ensaye asigna un valor empírico a la cantidad relativa, fina y característica del material arcilloso presente en el espécimen de prueba.

Un valor mínimo de equivalente de arena sirve para limitar la cantidad permisible de partículas finas en un agregado.

Este método de prueba provee de un método rápido de campo para determinar cambios en la calidad de los agregados durante la producción o colocación.

4.1.4.2 Resumen del método de prueba

Se varilla un volumen medido de suelo o agregado fino con una pequeña cantidad de solución floculante en una probeta graduada y agitados con la finalidad de desprender la capa de arcilla de las partículas de arena en el espécimen de prueba. Se irriga entonces al espécimen usando solución adicional para forzar que el material arcilloso entre en suspensión sobre la arena. Después de un período de sedimentación prescrito, se lee la altura de la arcilla floculada y se determina la altura de la arena en la probeta. El equivalente de arena es la relación de la altura de la arena a la altura de la arcilla, multiplicada por cien para expresarlo en porcentaje.

4.1.4.3 Cálculos

Se calcula el equivalente de arena lo más cercano a 0,1% como sigue:

$$EA = (\text{lectura de arena} / \text{lectura de arcilla}) * 100.$$

Donde:

EA = Equivalente de Arena.



Figura 4.4
Prueba equivalente de arena

4.2 Pruebas de origen

4.2.1 Desgaste de los Ángeles

Este método de prueba cubre un procedimiento para ensayar partículas de agregado grueso menor que 1 ½" (37,5 mm) para resistencia a la degradación usando la máquina de abrasión de Los Ángeles.

4.2.1.1 Importancia y uso

Esta prueba ha sido ampliamente usada como un indicador de la calidad relativa o competencia de varios tipos de agregado que tienen composición mineral similar. Los resultados no permiten validar automáticamente la comparación para ser usadas indistintamente entre agregados de diferente origen, composición o estructura. Asignar límites de especificación con extremo cuidado tomando en consideración el tipo de agregado disponible y su historial de comportamiento en usos específicos.

4.2.1.2 Resumen del método de prueba

Esta prueba es una medida de la degradación de los agregados minerales de granulometría estándar resultado de una combinación de acciones que involucran abrasión o desgaste, impacto y molienda en un cilindro hueco de acero giratorio que contiene un número especificado de esferas de acero, el número depende sobre todo de la granulometría de la muestra. Cuando el cilindro gira, una placa radial de acero separa la muestra y las esferas de acero, llevándolas alrededor hasta que estas caen en el lado opuesto del cilindro, creando un efecto de trituración e impacto. Los contenidos giran dentro del cilindro hueco bajo una acción de desgaste y molienda hasta que la placa radial de acero separa la muestra y las esferas de acero, y el ciclo es repetido. Después del número de revoluciones preestablecidas, los contenidos son retirados del cilindro y la porción de agregado es cribado para medir la degradación como pérdida de porcentaje.

4.2.1.3 Cálculos

Se calcula la pérdida (diferencia entre la masa original y la masa final de la muestra de prueba) como un porcentaje de la masa original de la muestra de prueba. Se reporta este valor como la pérdida en porcentaje.

$$\% \text{ Desgaste} = \frac{\text{Diferencia}}{\text{Masa Inicial}} \times 100$$



Figura 4.5
Máquina de Los Ángeles

4.2.2 Intemperismo acelerado

Este método cubre las pruebas de agregados para estimar su sanidad cuando están sujetos a la acción de intemperismo por ejemplo en concreto u otras

aplicaciones. Esto se realiza por inmersión repetida en solución de sulfato de sodio o de magnesio seguida por secado al horno hasta que se deshidrate parcial o totalmente la sal precipitada en los espacios de los poros permeables. La fuerza expansiva interna, derivada de la rehidratación de la sal durante la reinmersión, simula la expansión del agua durante el congelamiento. Este método de prueba proporciona información útil en la evaluación de la sanidad de los agregados cuando no hay información adecuada disponible en los registros de servicios del material expuesto a las condiciones de intemperismo actual.

4.2.2.1 Importancia y uso

Este método de prueba proporciona un procedimiento para hacer una estimación preliminar de la sanidad de los agregados para su uso en concreto y para otros propósitos. Los valores obtenidos pueden ser comparados con especificaciones, por ejemplo la especificación C 33, que son diseñadas para indicar la conveniencia de usar los agregados propuestos. Cuando la precisión de este método es pobre, puede no ser conveniente en el momento el rechazo del material sin la confirmación de otros métodos de prueba más estrechamente relacionados con el servicio específico intentado.

Los valores para el porcentaje de pérdida permitido por este método de prueba son usualmente diferentes para agregados finos y gruesos, y es de llamar la atención el hecho de que los resultados por el uso de las dos sales difiere considerablemente y debe tenerse cuidado en fijar límites apropiados en cualquier especificación que incluya requerimientos para esta prueba. La prueba es usualmente más severa cuando se usa sulfato de magnesio; por lo tanto, los límites para el porcentaje de pérdida permitido cuando se usa sulfato de magnesio son normalmente más altos que los límites cuando se usa sulfato de sodio.

4.2.2.2 Resumen del método

Se sumergen las muestras en la solución preparada de 16 a 18 h, de tal manera que cubra el agregado hasta una profundidad de $\frac{1}{2}$ ", evitando la evaporación y previniendo la adición accidental de sustancias ajenas por medio de una tapa sobre el contenedor. Las muestras sumergidas en la solución se mantienen a una temperatura de $21 \pm 1^\circ\text{C}$ durante el periodo de inmersión.

Después del periodo de inmersión se retiran las muestras de agregado de la solución, se dejan escurrir 15 ± 5 minutos se secan al horno a una temperatura constante de $105 \pm 5^\circ\text{C}$ hasta obtener una masa constante. Se establece el tiempo requerido para alcanzar esa masa constante con el horno conteniendo la muestra de carga máxima esperada, verificando la pérdida de masa de las muestras retirándolas y pesándolas, sin enfriar, a intervalos de 2 a 4 h, con suficientes verificaciones se establece el tiempo de secado requerido. Se dejan enfriar las muestras y se repite el proceso alterno de inmersión y secado hasta que el número de ciclos requerido se obtenga.

Después de completar el ciclo final y con la muestra enfriada, se lava hasta que esté libre de la solución determinado por la reacción del agua lavada con cloruro de bario (BaCl_2). Para lavar la muestra se circula el agua a 43 ± 6 °C a través de las muestras en sus contenedores. En la operación de lavado se debe evitar impactos o abrasión que pueden provocar rompimiento de las partículas.

La prueba se realiza para cada fracción de tamaños de la muestra que se retiene en la malla 4, esto es por ejemplo de $\frac{1}{2}$ " a malla No. 4, $\frac{3}{4}$ " a $\frac{1}{2}$ ", 1" a $\frac{3}{4}$ ".

4.2.2.3 Cálculos

Ya sin la solución y después de secar el agregado, se criba el agregado fino con la misma malla en la cual este fue retenido antes del ensayo y se criba el agregado grueso con las mallas de acuerdo al tamaño apropiado de partícula. Se pesa el material retenido en cada una de las mallas, la diferencia entre cada una de estas cantidades y la masa inicial de la fracción de la muestra es la pérdida en el ensayo y es expresada en porcentaje del peso inicial, de acuerdo a las siguientes expresiones:

$$D = \frac{B - C}{B} \times 100 \quad E = \frac{D_i \times A_i}{100}$$

Donde:

- B = Masa antes del ensayo
- C = Masa después del ensayo
- D_i = Pérdida individual
- A_i = Porcentaje de cada fracción de tamaño
- E = Pérdida total o % de sanidad del agregado



Figura 4.6
Preparación de las muestras para intemperismo acelerado

4.2.3 Materiales deletéreos

La presencia de materiales deletéreos se mide con el ensayo de determinación de terrones de arcilla y el de partículas friables.

Los materiales deletéreos incluyen partículas que debilitan, reaccionan o partículas perjudiciales.

La adhesión entre el asfalto y el agregado puede ser inhibido por la presencia de polvo y arcilla que cubre al agregado grueso o fino, el cual resulta en un desprendimiento de la mezcla. En la presencia del agua, algunos finos muy arcillosos podrían causar desprendimiento por la debilitación del ligante asfáltico.

Los materiales deletéreos, que impiden el cubrimiento de asfalto en las partículas de agregado, reaccionan con el ambiente, ya que no consisten de materia mineral son también perjudiciales en la mezcla. Algunos ejemplos son terrones de arcilla, esquistos, aceites, carbón, partículas vidriosas, micas y vegetación. La presencia de micas se ha registrado por problemas hallados en algunas regiones. Es difícil cuantificar la presencia de algunos materiales deletéreos en los parámetros de desempeño de las HMA.

Para esta investigación esta prueba no aplica, toda vez que los agregados minerales provienen de bancos de explotación y se considera únicamente para agregados obtenidos en sitio.

4.2.4 Azul de metileno

Esta prueba adicional usada en EU, fue desarrollada para materiales que pasan la malla No. 200, y la relacionan con el desprendimiento de las mezclas asfálticas en caliente, lo cual puede causar deformaciones permanentes en las HMA.

4.2.4.1 Importancia y uso

El ensayo se realiza en arcillas. Algunas arcillas generalmente indican que existe una relación directa entre sus propiedades fundamentales y el Índice de Azul de Metileno (Methylene Blue Index MBI) en cuanto a la capacidad de reacción. El MBI se correlaciona con la superficie específica. Cuando el mineral de la arcilla es Caolinita, también hay una correlación con la superficie específica (determinada por la adsorción de nitrógeno). Cuando en la arcilla existe una gran cantidad de Illita o Montmorilonita, esta correlación no existe.

Este MBI es una medida de la capacidad de absorción de agua de las arcillas y en consecuencia de los minerales arcillosos y el límite líquido.

Esta prueba se desarrolla porque en el equivalente de arena no se mide la calidad de arcilla contenida, lo cual podría repercutir en daño inducido por humedad. Este

ensayo podría reemplazar al equivalente de arena e índice de plasticidad en los finos, los cuales son usados precisamente para evitar el desprendimiento o reducirlo. El ensayo evalúa la cantidad de finos naturales y deletéreos en el agregado fino que pasa la malla No. 200.

Un alto valor de MBI, se relaciona con una mayor susceptibilidad de la mezcla al desprendimiento.

Sin embargo, el agregado fino no debe ser rechazado considerando el MBI, debido a que existen agentes antidesprendimiento tales como líquidos o limos hidratados, los cuales mitigan este problema. Esto es, si la mezcla cumple con los ensayos de desprendimiento, susceptibilidad a la humedad y deformación permanente, los materiales deben aceptarse.

Se tiene conocimiento que empresas particulares en México llevan a cabo esta prueba, sin embargo no existe una normatividad para ésta.

4.2.4.2 Resumen del método

Se colocan 2 g de arcilla en un matraz de 600 ml. Se le agregan 300 ml de agua destilada y se agita hasta que la arcilla es dispersada uniformemente. A esta mezcla se le determina el pH agregando suficiente ácido sulfúrico hasta que el pH caiga dentro de un rango de 2.5 a 3.8. Se continúa agitando hasta ajustar el pH al rango indicado y se continúa agitando de 10 a 15 minutos después de la adición de ácido sulfúrico. Con la mezcla todavía en el matraz, se toma una pipeta y se agregan 5 ml de solución de azul de metileno y se agita de 1 a 2 minutos. Se remueve una gota de la mezcla, usando un gotero de vidrio y se coloca sobre un papel filtro.

Alrededor de la gota se debe observar una aureola azul, si esta no se logra se continúa agregando la solución de azul de metileno en incremento de 0.1 ml agitando de 1 a 2 minutos en cada adición. El procedimiento se termina hasta observar esta aureola azul en el papel filtro alrededor de la mezcla de arcilla y azul de metileno.

4.2.4.3 Cálculos

El índice de azul de metileno se calcula como sigue:

$$MBI = \frac{E \times V}{W} \times 100$$

Donde:

MBI = Índice de azul de metileno para la arcilla en meq/100 g de arcilla

(1 ml = 0.01 meq)

E = factor de equivalencia (miliequivalente de azul de metileno por ml)

V = mililitros de azul de metileno requeridos

W = masa del material de arcilla (2 g)

∴

$$MBI = \frac{0.01 \times V}{2} \times 100 = 0.5 V$$

En la tabla 3.1 se indica una relación entre los valores de azul de metileno y el desempeño de la mezcla.

Tabla 4.1
Valores de Azul de Metileno

Índice de Azul de Metileno	Desempeño esperado
5 - 6	Excelente
10 - 12	Aceptable
16 - 18	Problemas de posibles fallas
> 20	Falla

4.3 Pruebas de rutina

4.3.1 Gravedad específica y absorción

Este método de prueba cubre la determinación de la densidad promedio de una cantidad de partículas de agregado grueso o fino según sea el caso (no incluye el volumen de vacíos entre las partículas), la densidad relativa (gravedad específica), y la absorción del agregado grueso o fino. Dependiendo del procedimiento usado, la densidad kg/m³ (lb/ft³) se expresa como seca al horno (SH), saturada y superficialmente seca (SSS), o como densidad aparente. De cualquier manera, la densidad relativa (gravedad específica), es una cantidad adimensional, se expresa como SH, SSS o como densidad relativa aparente (gravedad específica aparente). La densidad SH y la densidad relativa SH se determinan después de secar el agregado. La densidad SSS, la densidad relativa SSS y la absorción se determinan después de sumergir el agregado en agua por una duración preestablecida.

Este método de prueba se usa para determinar la densidad de la porción esencialmente sólida de un número grande de partículas de agregado y provee un valor promedio representativo de la muestra.

Este método de prueba no es apropiado para partículas ligeras.

4.3.1.1 Definiciones

Absorción. Es el incremento en masa del agregado debido a la penetración de agua en los poros de las partículas durante un período de tiempo preestablecido, pero no incluye el agua adherida a la superficie exterior de las partículas, expresada como un porcentaje de la masa seca.

Secado al horno (SH), adjetivo relativo a las partículas de agregado. Es la condición en la cual los agregados han sido secados por calentamiento en un horno a una temperatura de $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$ durante el tiempo suficiente para alcanzar una masa constante.

Saturado y superficialmente seco (SSS), adj. relativo a las partículas de agregado. Es la condición en la cual los poros permeables de la partícula del agregado son llenados con agua llevado a cabo por inmersión en agua durante el periodo de tiempo prescrito, pero sin agua libre en la superficie de las partículas.

Densidad. Es la masa por unidad de volumen de un material, expresada en kilogramos por metro cúbico (libras por pie cúbico).

Densidad (SH). Es la masa del agregado secado al horno por unidad de volumen de partículas de agregado, incluyendo el volumen de los poros internos permeables e impermeables de la partícula, pero no incluyen los vacíos entre las partículas.

Densidad (SSS). Es la masa del agregado saturado superficialmente seco por unidad de volumen de las partículas de agregado, incluyendo el volumen de los poros impermeables y los vacíos llenados con agua, pero no incluye los poros entre las partículas.

Densidad aparente. Es la masa por unidad de volumen de la porción impermeable de las partículas de agregado.

Densidad relativa (Gravedad específica). Es la relación de la densidad de un material a la densidad el agua destilada a una temperatura conocida; los valores son adimensionales.

4.3.1.2 Importancia y uso

La densidad relativa (gravedad específica) es la característica generalmente usada para el cálculo del volumen ocupado por el agregado en varias mezclas que contienen agregados incluyendo concreto asfáltico, concreto hidráulico, y otras mezclas que son proporcionadas o analizadas con base en el volumen absoluto. La densidad relativa (gravedad específica) es también usada en el cálculo de vacíos en agregados en el método de prueba C 29/ C 29 M (ASTM). La densidad

relativa (gravedad específica) (SSS) es usada si el agregado está húmedo, esto es, si su absorción ha sido satisfactoria. Inversamente, la densidad relativa (gravedad específica) (secado al horno) se usa para cálculos cuando el agregado está seco o se asume que está seco.

La densidad aparente y la densidad relativa aparente (gravedad específica aparente) pertenece al material sólido el cual constituye las partículas, no incluye los espacios internos de los poros en las partículas los cuales son accesibles al agua.

Los valores de absorción se usan para calcular el cambio en la masa de un agregado debido al agua absorbida en los espacios internos de los poros de las partículas, comparados con la condición seca, cuando se considera que el agregado ha estado en contacto con agua lo suficiente para aprovechar al máximo el potencial de absorción. El estándar de laboratorio para absorción es aquel obtenido después de sumergir el agregado seco durante un periodo de tiempo prescrito. Los agregados extraídos debajo del nivel freático comúnmente tienen una absorción más alta, cuando se usan, si no es permitido el secado. Inversamente, algunos agregados los cuales no han sido mantenidos en una condición de humedad hasta ser utilizados pueden contener una cantidad menor de humedad absorbida que en la condición sumergida durante 24 horas.

Los poros en agregados ligeros no necesariamente llegan a ser esencialmente llenados con agua después de la inmersión durante 24 horas. De hecho, muchos agregados pueden permanecer inmersos en agua por varios días sin aprovechar al máximo el potencial de absorción. Por lo tanto, este método de prueba no es apropiado para usarse en agregados ligeros.

4.3.1.3 Resumen del método para agregados gruesos

Se seca la muestra del agregado en un horno hasta peso constante, la muestra es sumergida en agua por aproximadamente 24 ± 4 horas para esencialmente llenar los poros. Después la muestra es retirada del agua, secada superficialmente y pesada. Subsecuentemente el volumen de la muestra se determina por el método del desplazamiento de agua. Finalmente la muestra se seca en el horno y se determina la masa. Usando las masas obtenidas y las fórmulas de este método de prueba, es posible calcular la densidad, densidad relativa (gravedad específica) y la absorción.



Figura 3.7
Determinación de la gravedad específica en agregados gruesos

4.3.1.4 Cálculos para agregados gruesos

Gravedad específica neta del agregado G_{sb}

$$G_{sb} = \frac{A}{B - C}$$

Donde:

- A = masa de la muestra ensayada secada al horno, g
- B = masa de la muestra saturada superficialmente seca, g
- C = masa aparente en agua de la muestra saturada, g

Gravedad específica en condición saturada y superficialmente seca $G_{s,ss}$

$$G_{s,ss} = \frac{B}{B - C}$$

Donde:

- B = masa de la muestra saturada superficialmente seca, g
- C = masa aparente en agua de la muestra saturada, g

Gravedad específica aparente G_{sa}

$$G_{sa} = \frac{A}{A - C}$$

Donde:

A = masa de la muestra ensayada secada al horno, g

C = masa aparente en agua de la muestra saturada, g

Absorción

$$\text{Absorción} = \frac{B - A}{A} \times 100$$

Donde:

A = masa de la muestra ensayada secada al horno, g

B = masa de la muestra saturada superficialmente seca, g

4.3.1.5 Resumen del método para agregados finos

Se seca la muestra del agregado en un horno hasta peso constante, la muestra se sumerge en agua o se incrementa al menos 6% de humedad al agregado fino y se deja reposar por aproximadamente 24 ± 4 horas para esencialmente llenar los poros. Se decanta el agua con cuidado para evitar pérdida de finos, se extiende la muestra en una superficie plana no absorbente exponiéndola a movimientos suaves de corriente de aire, y mezclando frecuentemente para asegurar un secado homogéneo. Se puede emplear ayuda mecánica tal como espátula o agitador para lograr la condición saturada y superficialmente seca. Se continúa con esta operación hasta que el espécimen de prueba se aproxime a la condición de flujo libre.

Para determinar si la humedad superficial continúa presente en las partículas que constituyen el agregado fino se sigue el procedimiento siguiente. Se sostiene el molde firmemente sobre una superficie suave y lisa con el diámetro grande hacia abajo. Se vacía cuidadosamente la porción del agregado fino secado parcialmente llenando hasta el borde y amontonando material adicional sobre la parte superior del molde, sosteniendo el molde con los dedos de la mano ahuecados. Se apisona ligeramente el agregado fino dentro del molde con 25 golpes del pisón. Se deja caer el pisón desde una altura de 5 mm arriba de la superficie del agregado fino. Permitiendo que el pisón caiga libremente bajo la atracción gravitacional en cada uno de los golpes. Se ajusta la altura al inicio para una nueva elevación de la superficie después de cada golpe y se distribuyen los golpes sobre la superficie. Se retira la arena suelta de la base y se levanta el molde verticalmente. Si la humedad superficial continúa presente, el agregado fino tendrá la forma del molde.

Cuando haya una caída insignificante o escasa de agregado fino del molde se ha alcanzado la condición de secado superficial.

Se hace el primer intento de prueba de humedad superficial cuando hay algo de agua en el espécimen de prueba. Se continúa secando con mezclado constante y probando a intervalos constantes hasta que el ensaye indique que el espécimen ha alcanzado la condición de secado superficial. Si el primer intento de la prueba de humedad superficial indica que no hay humedad presente en la superficie de las partículas, el material está más seco que la condición de saturado y superficialmente seco. En este caso, se mezclan completamente unos pocos mililitros de agua con el agregado fino y se deja reposar el espécimen en un contenedor cubierto durante 30 minutos. Luego se reanuda el proceso de secado y ensaye a intervalos frecuentes para el inicio de la condición de secado superficial.

Se llena parcialmente el picnómetro (calibrado) con agua. Se introduce dentro del picnómetro 500 ± 10 g de agregado fino saturado y superficialmente seco y se llena con agua adicional hasta aproximadamente 90% de la capacidad. Se tapa manualmente, se invierte y agita el picnómetro para eliminar todas las burbujas de aire. Se requieren normalmente cerca de 15 a 20 minutos para eliminar las burbujas de aire por métodos manuales. Se ha visto que es útil mojar la punta de una toalla de papel dentro del picnómetro para dispersar la espuma que algunas veces se concentra cuando son eliminadas las burbujas de aire. Opcionalmente una pequeña cantidad de alcohol isopropílico puede ser usado para dispersar la espuma.

Después de eliminar todas las burbujas de aire, se ajusta la temperatura del picnómetro y su contenido a $23.0 \pm 2^\circ\text{C}$ si es necesario por inmersión parcial en agua circulando, y se llena con agua el picnómetro hasta la marca de calibración. Se determina la masa total de la muestra, el picnómetro y el agua.

Se retira el agregado fino del picnómetro, se seca a una temperatura de $110 \pm 5^\circ\text{C}$ hasta masa constante, se enfría a temperatura ambiente durante $1 \pm \frac{1}{2}$ horas y se determina la masa seca.

Se determina la masa del picnómetro lleno hasta la marca de calibración con agua a una temperatura de $23 \pm 2.0^\circ\text{C}$.

4.3.1.6 Cálculos para agregados finos

Gravedad específica neta del agregado G_{sb}

$$G_{sb} = \frac{A}{B + S - C}$$

Donde:

- A = masa de la muestra ensayada secada al horno, g
- B = masa del picnómetro lleno con agua, g
- C = masa del picnómetro, agregado saturado y superficialmente seco y agua, g
- S = masa del agregado saturado y superficialmente seco.

Gravedad específica en condición saturada y superficialmente seca $G_{s,ss}$

$$G_{s,ss} = \frac{S}{B + S - C}$$

Donde:

- B = masa del picnómetro lleno con agua, g
- C = masa del picnómetro, agregado saturado y superficialmente seco y agua, g
- S = masa del agregado saturado y superficialmente seco.

Gravedad específica aparente G_{sa}

$$G_{sa} = \frac{A}{B + A - C}$$

Donde:

- A = masa de la muestra ensayada secada al horno, g
- B = masa del picnómetro lleno con agua, g
- C = masa del picnómetro, agregado saturado y superficialmente seco y agua, g

Absorción

$$Absorción = \frac{S - A}{A} \times 100$$

- A = masa de la muestra ensayada secada al horno, g
- S = masa del agregado saturado y superficialmente seco.

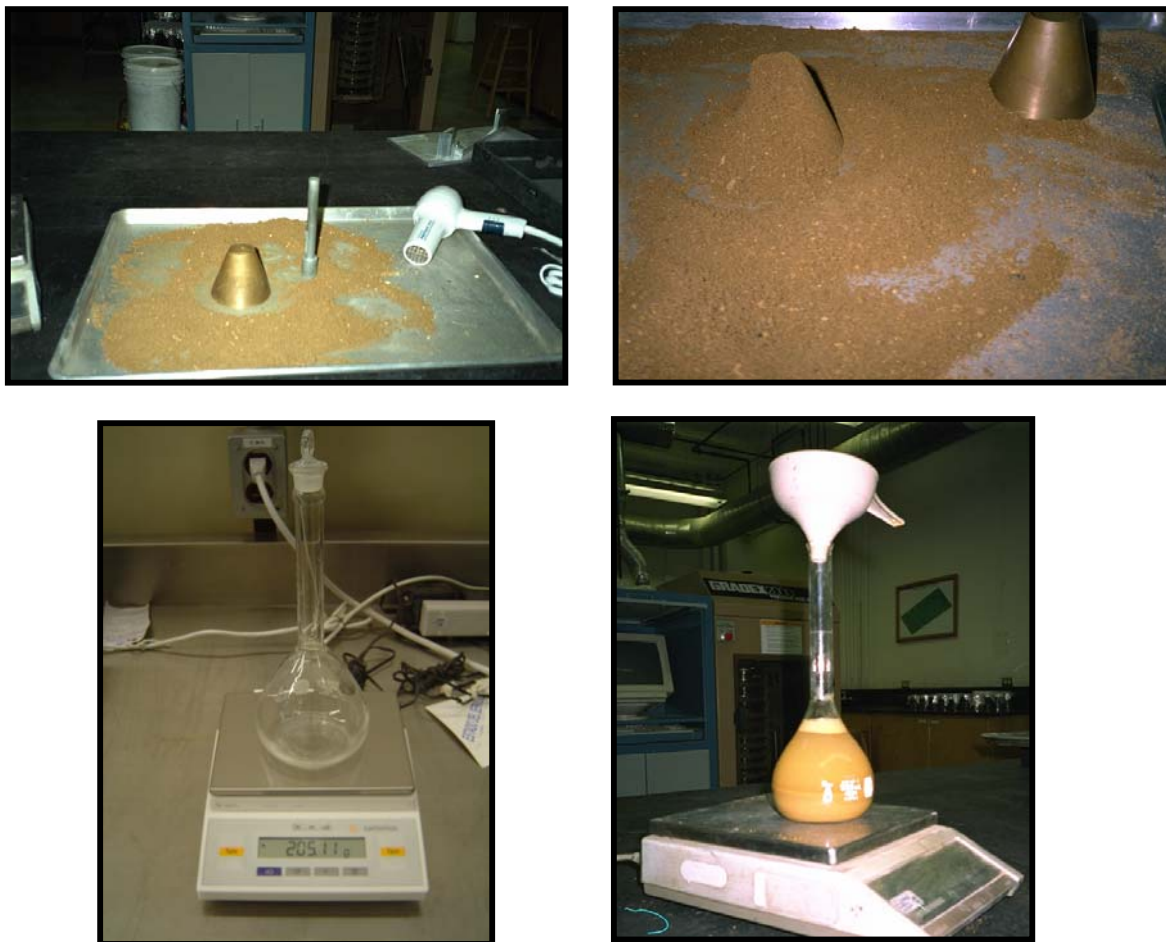


Figura 4.8
Procedimiento para Gravedad Específica de agregados finos

5 Propiedades volumétricas de la mezcla

Ya que el diseño de mezclas Superpave y su análisis es más complejo que los métodos en uso, el alcance de su uso depende del nivel de tránsito o de la clasificación funcional del pavimento para el cual se hace el diseño. En consecuencia, 3 niveles de diseño de mezclas del Superpave fueron desarrollados. La tabla 5.1 muestra los alcances y los ensayos requeridos de los 3 niveles de Superpave.

De los 3 niveles, el diseño volumétrico juega un rol clave en el diseño de mezclas asfálticas.

El diseño volumétrico, único requerimiento para el diseño de mezclas del nivel 1, implica la fabricación de los especímenes de ensayo usando el compactador giratorio y la selección del contenido de asfalto basado en los vacíos de aire (V_a), vacíos en el agregado mineral (VAM), vacíos llenos de asfalto (VFA), y la relación polvo (filler)/contenido de asfalto efectivo.

Tabla 5.1
Niveles de diseño de mezclas Superpave

Tránsito	Niveles de diseño	Requerimientos de ensayo ¹
$ESALs \leq 10^6$	1	Diseño volumétrico
$10^6 < ESALs \leq 10^7$	2	Diseño volumétrico + ensayos de predicción de desempeño
$ESALs > 10^7$	3	Diseño volumétrico + aumento de los ensayos de predicción de desempeño
¹ En todos los casos, la susceptibilidad a la humedad debe ser evaluada (Norma AASHTO T283).		

5.1 Parámetros volumétricos de la mezcla asfáltica

El fin de los análisis volumétricos es la estimación del contenido de asfalto de la mezcla objeto del diseño, lo cual involucra como ya se dijo:

- Estimación del contenido de vacíos de aire (V_a) en la mezcla
- Estimación del contenido de vacíos en el agregado mineral (VAM)

- c) Estimación del contenido de vacíos llenos de asfalto (VFA)
- d) Relación polvo / asfalto efectivo
- e) Estimación del contenido efectivo de asfalto de la mezcla

El contenido de vacíos de aire es una propiedad importante que se utiliza como base en la selección del contenido del ligante 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.

El VAM representa los vacíos entre las partículas del agregado.

Los valores mínimos especificados para el VAM en cuanto al porcentaje de diseño de vacíos de aire del 4% son una función del tamaño máximo nominal del agregado. La Tabla 5.2 muestra los requerimientos del Superpave para el VAM.

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

Tabla 5.2
Criterio para VAM

Tamaño máximo de agregado	Porcentaje de VAM mínimo
9,5 mm	15,0
12,5 mm	14,0
19,0 mm	13,0
25,0 mm	12,0
37.5 mm	11,0

El rango aceptable del VFA de diseño para 4% de vacíos de aire es una función del nivel de tránsito.

Tabla 5.3
Criterio para VFA

Tránsito, ESAL's (millones)	Porcentaje de VAM de diseño
< 0,3	70 – 80
< 1	65 – 78
< 3	65 – 78
< 10	65 – 75
< 30	65 – 75
< 100	65 – 75
>100	65 – 75

5.1.1 Ligante asfáltico

5.1.1.1 Gravedad específica del ligante asfáltico (G_b)

Es la relación entre la masa de un volumen dado de ligante asfáltico y el peso de igual volumen de agua (ASTM D 70). Generalmente los valores se especifican entre 1.015 y 1.05, para nuestro caso se tomó 1.03.

5.1.2 Agregado pétreo

5.1.2.1 Gravedad específica neta (G_{sb})

Se determina midiendo la masa seca y el volumen neto de una muestra de agregados (ASTM C 127 o ASTM C 128) (ver capítulo 3.3). El volumen bruto incluye el volumen del sólido del agregado más el volumen de agua contenida en los poros superficiales. El volumen neto se mide para la condición del agregado saturado y superficialmente seco (SSS).

5.1.2.2 Gravedad específica aparente (G_{sa})

Se obtiene midiendo la masa seca y el volumen aparente de la muestra del agregado (ASTM C 127 o ASTM C 128) (ver capítulo 3.3). El volumen aparente sólo incluye el volumen del sólido del agregado y no incluye el volumen de los poros de la superficie.

5.1.2.3 Gravedad específica efectiva (G_{se})

Se calcula usando la masa seca y volumen efectivo del agregado. El volumen efectivo incluye el volumen de los sólidos del agregado y el volumen de los poros de superficie llenos con agua pero no con asfalto. La gravedad específica del agregado no se mide directamente, a diferencia de las gravedades específicas neta y aparente. Esta se calcula conociendo la gravedad específica teórica máxima de la mezcla (G_{mm}) y el contenido de asfalto (P_b).

Solo las gravedades específicas neta y efectiva son utilizadas para el cálculo de los parámetros volumétricos de la mezcla asfáltica. Los volúmenes calculados para cada uno tendrán diferentes significados, y por ende, diferentes valores numéricos.

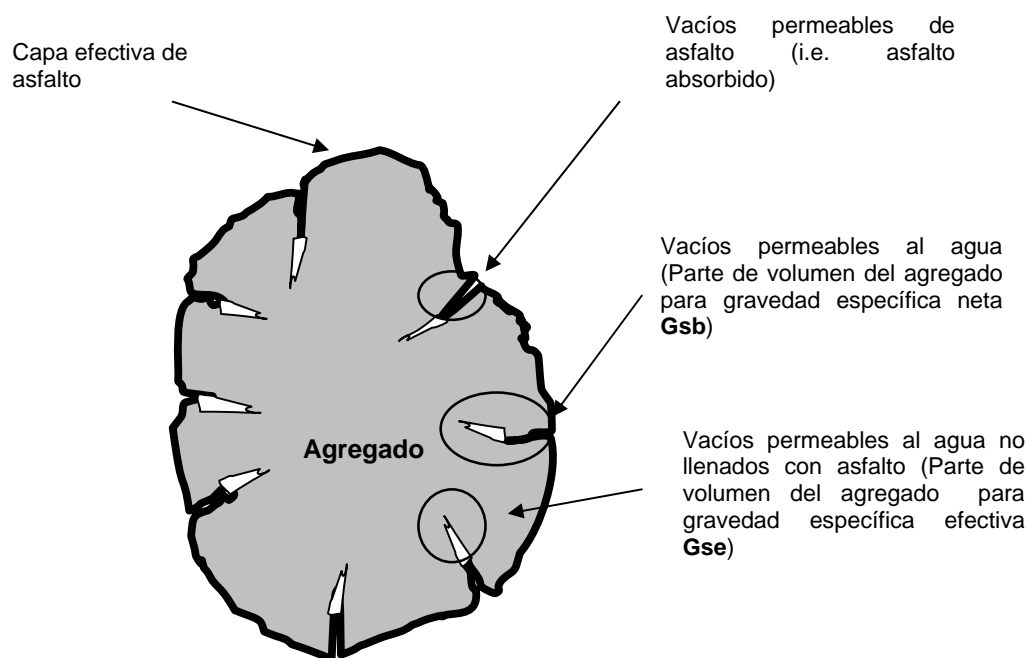


Figura 5.1

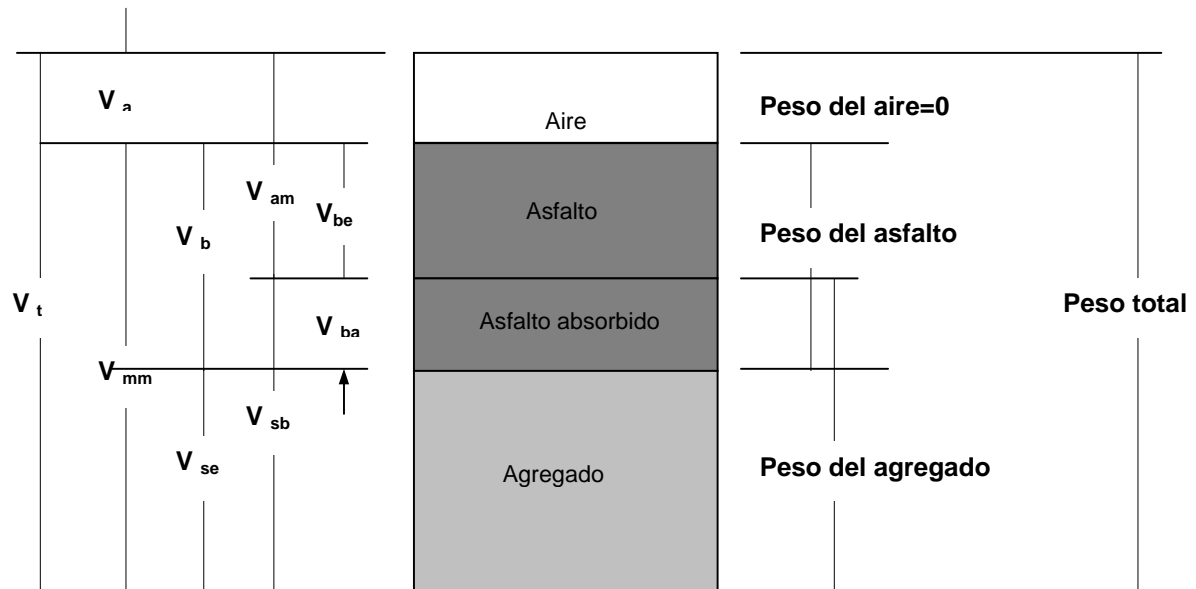
Ilustración de las gravedades específicas determinadas al agregado pétreo

5.1.3 Mezcla asfáltica

El modelo usado para describir las propiedades de masa y volumen de una HMA es el diagrama de componentes. Este considera una muestra compactada de HMA con vacíos de aire, cemento asfáltico y agregado mineral tratados como componentes discretas (Figura 5.1). A la muestra compactada se le asigna un volumen unitario (p.ej., 1 m^3 , 1 cm^3 , etc.) con peso conocido (p.ej., kg o g). El diagrama de componentes se adapta particularmente bien a las unidades métricas, pues, en este sistema, peso específico y gravedad específica son numéricamente iguales, ya que el peso específico del agua es muy cercano a 1 g/cm^3 y su gravedad específica es 1 a 25°C . Es una herramienta comúnmente usada para muchas aplicaciones de la ingeniería civil, pues representa un modelo conveniente para calcular distintos pesos y volúmenes en materiales de construcción no homogéneos.

El diagrama de componentes ofrece una clara definición de peso específico, esto es, el peso dividido por el volumen de material compactado. Como el modelo está compuesto de varios diferentes materiales, el peso específico de la muestra completa se llama frecuentemente “peso específico neto”. Se calcula dividiendo el peso total de la muestra por su volumen total.

Para un dado contenido de asfalto, el máximo peso específico teórico es el peso del agregado más asfalto dividido por el volumen de ambos componentes - sin incluir el volumen de vacíos de aire -. El máximo peso específico teórico es una propiedad muy útil porque puede usarse como referencia para calcular otras propiedades como el contenido de vacíos de aire.



- V_{am} = volumen de vacíos en agregado mineral
- V_t = volumen total de la mezcla asfáltica.
- V_{mm} = V volumen de la mezcla asfáltica sin vacíos
- V_{fa} = volumen de vacíos llenados con asfalto
- V_a = volumen de vacíos de aire
- V_b = volumen de asfalto
- V_{ba} = volumen de asfalto absorbido
- V_{sb} = volumen de agregado mineral (gravedad específica de la masa)
- V_{se} = volumen de agregado mineral (gravedad específica efectiva)

Figura 5.2

Diagrama de componentes de una mezcla asfáltica compactada

5.1.3.1 Gravedad específica neta (Gmb).

Como el modelo está compuesto de distintos materiales, la gravedad específica de la muestra compactada se llama *gravedad específica neta* y corresponde a la densidad de la mezcla asfáltica compactada (ASTM D 1188 ó D 2726) (ver capítulo 4.3.1).

5.1.3.2 Gravedad específica teórica máxima (Gmm)

Para un dado contenido de asfalto, la *gravedad específica teórica máxima* (Gmm) es la masa del agregado más asfalto dividido por el volumen de ambos componentes, sin incluir el volumen de los vacíos de aire. La gravedad específica teórica máxima es una propiedad muy útil por que se emplea como referencia para calcular otras importantes propiedades como el contenido de vacíos de aire (Va). El ensaye para determinar la Gmm se realiza a la mezcla asfáltica en su estado más suelto (ASTM D 2041) (ver capítulo 4.3.2).

5.1.3.3 Contenido de asfalto (Pb)

El contenido de asfalto es la concentración de masa de ligante asfáltico. Se expresa como porcentaje de la masa total de la mezcla o como porcentaje de la masa total de agregado. El contenido óptimo de asfalto en una mezcla depende en gran medida de las características del agregado como, la graduación y la absorción.

5.1.3.4 Contenido de asfalto efectivo (Pbe).

Es la concentración de masa del ligante asfáltico no absorbido.

5.1.3.5 Contenido de asfalto absorbido (Pba).

Es la concentración de masa del ligante asfáltico absorbido por el agregado. Normalmente se expresa como porcentaje de la masa del agregado.

5.1.3.6 Contenido de vacíos de aire (Va).

Es la concentración, en volumen, del aire en la muestra de mezcla asfáltica compactada. Los vacíos de aire se expresan siempre como un porcentaje del volumen total de la mezcla.

$$Va = 1 - \frac{Gmb}{Gmm} \times 100 \quad (5.1)$$

5.1.3.7 Vacíos en el agregado mineral (VAM)

Es el espacio intergranular ocupado por el asfalto y el aire en una mezcla asfáltica compactada y se expresa como porcentaje del volumen total. El volumen de asfalto absorbido no es usualmente considerado como parte del VAM. El VAM representa el espacio disponible para acomodar el volumen de asfalto efectivo y el volumen de aire necesarios en la mezcla. Valores mínimos

de VAM son necesarios para asegurar un adecuado espesor de película de asfalto que contribuya a la durabilidad de la mezcla.

$$VAM = 100 - \frac{Gmb - Ps}{Gsb} \quad (5.2)$$

Donde Ps es el porcentaje de agregado pétreo con respecto a la mezcla.

Los valores de VAM generalmente disminuyen hasta un valor mínimo, y luego aumenta con incrementos en el contenido de asfalto, exhibiendo una curva en forma de U (Figura 5.3). Esto parece ser una contradicción a la definición, sin embargo, debemos recordar que el VAM está íntimamente relacionado con la gravedad específica de la mezcla compactada (Gmb).

A medida de que se incrementa el contenido de asfalto en la mezcla, ésta se vuelve más trabajable y se compacta más fácilmente, es decir, mayor masa puede ser comprimida en menos volumen. Por consiguiente, hasta cierto punto, la gravedad específica de la mezcla incrementa y el VAM disminuye.

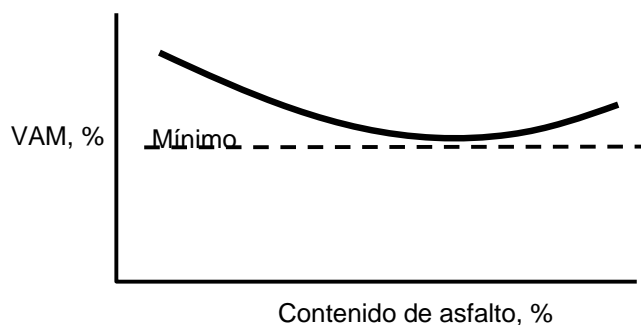


Figura 5.3
Curva típica de VAM contra contenido de asfalto

En algún punto, cuando el contenido de asfalto sigue aumentando, el VAM empieza a incrementarse debido a que material más denso (agregado) es desplazado relativamente por material menos denso (asfalto). Dado lo anterior, se recomienda evitar valores de VAM para contenidos de asfalto que se ubican dentro de la rama húmeda o parte derecha de la curva.

Contenidos de asfalto seleccionados en este rango pueden traer como consecuencia mezclas con cierta tendencia a presentar exudación o flujo plástico. En algunas mezclas la parte inferior de la curva es demasiado plana, esto significa que la compactabilidad de la mezcla es poco sensitiva al contenido de asfalto en ese rango.

Cuando parte de la curva cae considerablemente por debajo del criterio mínimo (Figura 5.4), el contenido de asfalto no debe ser seleccionado en los extremos de la curva aunque los valores de VAM sean aceptables. En la parte izquierda, la mezcla se considera con muy poco asfalto y propensa a la segregación. En la parte derecha, se podría esperar la aparición de roderas en la mezcla.

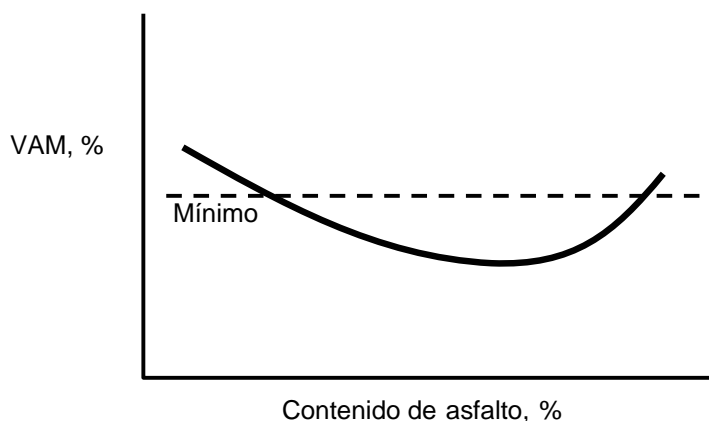


Figura 5.4
Evaluación de la Curva de VAM

Si la curva cae totalmente por debajo del criterio mínimo (Figura 5.5), se debe considerar realizar un nuevo diseño, cambiando la graduación de la mezcla y en algunos casos, el tipo de agregado.

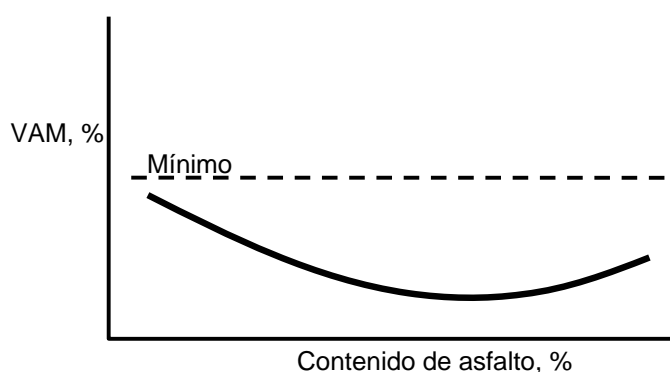


Figura 5.5
Evaluación de la Curva de VAM

5.1.3.8 Vacíos llenos con asfalto (VFA)

Es el porcentaje de VAM que contienen asfalto. El concepto de VFA es utilizado para asegurar que el porcentaje de asfalto efectivo (P_{be}) no sea demasiado pequeño como para producir una mezcla poco durable, o demasiado alto como obtener una mezcla demasiado inestable. El rango aceptable de VFA depende del nivel del tránsito. Altos niveles de tránsito requieren menores porcentajes de

VFA, debido a que en estas condiciones la resistencia y estabilidad de las mezclas son la mayor preocupación.

Bajos niveles de tránsito requieren porcentajes de VFA mayores para garantizar la durabilidad de la mezcla asfáltica. Si los porcentajes de VFA son demasiados altos, la mezcla asfáltica se vuelve susceptible a presentar deformaciones plásticas.

$$VFA = \frac{VAM - Va}{VAM} \times 100 \quad (5.3)$$

5.2 Efecto del nivel de compactación en el diseño

Para un mismo contenido de asfalto, los vacíos de aire (V_a) y los vacíos en el agregado mineral (VAM) disminuyen para un alto nivel de compactación. En las Figuras 5.6 y 5.7 se muestran tres niveles de compactación (A, B y C) para ilustrar las consecuencias de este efecto. A, B y C representan los niveles de compactación en el laboratorio que simulan las condiciones de densificación de la mezcla en campo, para niveles de tránsito bajo, medio y alto respectivamente.

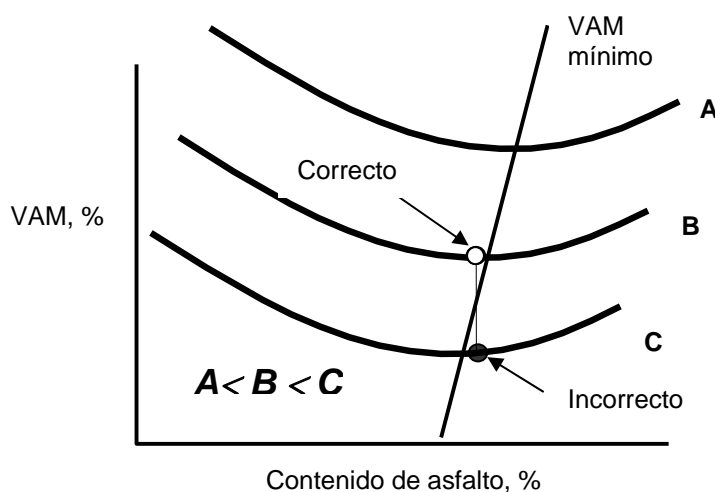


Figura 5.6
Evaluación de la Curva de VAM

Si la mezcla asfáltica se diseña en el laboratorio con un nivel de compactación B cuando realmente el pavimento estará sometido a niveles de tránsito altos (Figura 5.6), se pueden cometer errores en la selección del contenido óptimo de asfalto.

Se puede seleccionar un valor de VAM aparentemente dentro de las especificaciones del método, pero que en realidad se ubique en la rama húmeda de valores para las condiciones de densificación reales de la mezcla asfáltica en servicio. Esta equivocación tendría como consecuencia una carpeta asfáltica propensa a presentar ahuellamiento (deformación permanente).

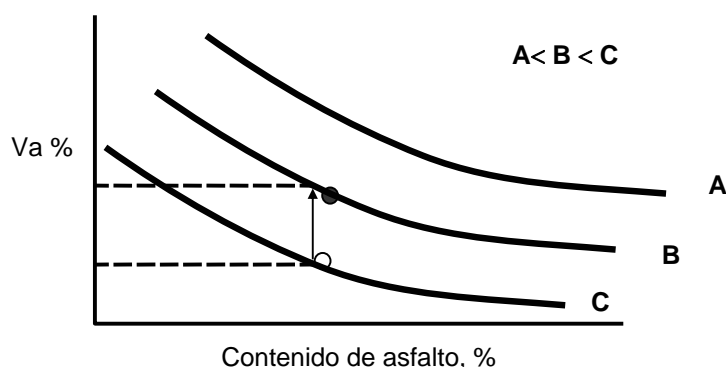


Figura 5.7
Efecto del nivel de compactación en los vacíos de aire

Por otro lado, si la mezcla es diseñada para un nivel de compactación C, y es colocada en un pavimento en donde el nivel de tránsito es mucho menor del que se esperaba, el porcentaje final de vacíos de aire será considerablemente mayor que el planeado (Figura 5.7). Esta condición puede conducir a tener una carpeta asfáltica demasiado permeable, que permita el paso del agua y del aire a través de ella fácilmente. Esto tendría como consecuencia el endurecimiento prematuro del ligante asfáltico que compone a la mezcla convirtiéndose en frágil y quebradizo, produciéndose el desprendimiento del agregado de la mezcla a causa de la falta de adhesión.

Por estas razones resulta de gran importancia simular en el laboratorio, los esfuerzos de compactación producidos en el sitio donde la carpeta asfáltica va a ser colocada. Además, la mezcla asfáltica deberá ser construida con los equipos de compactación adecuados, de tal manera, que se produzcan los niveles de vacíos de aire iniciales (al menos 8 por ciento) que se consideran en los diseños.

Es importante notar que los criterios de diseño de VAM, independiente del método que se trate, no se basan en el nivel de compactación. La razón es, la de proveer suficiente espacio al asfalto y al aire, a reserva del nivel de tránsito que se espere en el pavimento.

6 Metodología RAMCODES

El método RAMCODES, acrónimo de RAtional Methodology for COmpacted geomaterial's DEnsification and Strenght analysis desarrollada por F.J. Sánchez-Leal, es una metodología basada en experimentos factoriales y en la experiencia práctica de diseño y control, para análisis de densificación y resistencia de geomateriales compactados.

6.1 RAMCODES en las mezclas asfálticas

En mezclas asfálticas, metodologías como Superpave demuestran que se ha avanzado mucho sobre aspectos tales como la selección de ligante, la selección de la mezcla de agregados, y la densificación de la mezcla.

A pesar de avances como estos, la práctica de control de campo ha quedado sin cambios, esto es, el control está basado en la densidad final de la carpeta. La práctica actual de control está divorciada del diseño y esto podría llevar a la aceptación de lotes defectuosos, y al rechazo de lotes buenos.

En la experiencia práctica, RAMCODES ha demostrado ser una poderosa herramienta para el diseño, control y análisis de mezclas asfálticas compactadas dado que permite entrelazar la teoría y la práctica de una manera sencilla y eficiente.

6.2 Aplicaciones de la metodología

RAMCODES está basado en un experimento factorial de dos niveles o factores, a saber: el contenido de asfalto (CA) y la gravedad específica neta de la mezcla asfáltica (G_{mb}). Como geomaterial, el comportamiento de resistencia y deformabilidad de una mezcla asfáltica puede ser estudiado bajo la concepción de Coulomb de cohesión y fricción.

La gravedad específica neta de la mezcla asfáltica, G_{mb} es una medida directa de la fricción o trabazón entre partículas; y CA es una medida de la cohesión. Esta concepción permite una ventaja práctica dado que CA y G_{mb} son variables comúnmente utilizadas en el control de compactación de campo.

6.2.1 El polígono de vacíos

RAMCODES liga racionalmente las especificaciones de diseño con los criterios de control en campo mediante la implementación de un “polígono de vacíos” que define un área donde se cumplen todas las especificaciones de vacíos (V_a , VAM, VFA). Los vacíos son función del %CA y del G_{mb} y se representan en mapas como isolíneas para los valores permitidos, la intersección de estas líneas produce una construcción gráfica en el espacio %CA- G_{mb} , que da lugar al polígono. Las expresiones que se emplean para el trazo de las isolíneas en el espacio G_{mb} -CA se muestran a continuación:

$$Va = 1 - \frac{G_{mb}}{G_{mm}} \times 100 \quad (6.1)$$

$$VAM = 100 - \frac{G_{mb} - (100 - CA)}{G_{sb}} \quad (6.2)$$

$$VFA = \frac{VAM - Va}{VAM} \times 100 \quad (6.3)$$

Despejando el G_{mb} de las ecuaciones 6.1 y 6.2, se tiene:

$$G_{mb} = \left(1 - \frac{Va}{100}\right)(G_{mm}) \quad (6.4)$$

$$G_{mb} = \frac{100 - VAM}{100 - CA} G_{sb} \quad (6.5)$$

Sustituyendo las ecuaciones 6.1 y 6.2 en la ecuación 6.3, se tiene:

$$\frac{VFA}{100} = 1 - \frac{1 - \left(\frac{G_{mb}}{G_{mm}}\right) \cdot 100}{100 - (100 - CA) \frac{G_{mb}}{G_{sb}}} \quad (6.6)$$

Despejando G_{mb} de la ecuación 6.6, obtenemos:

$$G_{mb} = \frac{VFA}{\frac{100}{G_{mm}} + \frac{VFA(100 - CA)}{100G_{sb}} - \frac{100 - CA}{G_{sb}}} \quad (6.7)$$

Donde:

CA = Porcentaje de cemento asfáltico con respecto a la mezcla total

G_{mb} = Gravedad específica neta de la mezcla asfáltica compactada

Va = Porcentaje de vacíos de aire

VAM = Vacíos de aire en el agregado mineral

VAF = Vacíos de aire llenos de asfalto

G_{mm} = Gravedad específica teórica máxima de la mezcla asfáltica

G_{sb} = Gravedad específica neta del agregado.

6.3 Elaboración del polígono de vacíos

Como primer paso para la elaboración del polígono de vacíos, se deben tomar en cuenta las especificaciones del diseño volumétrico de mezclas asfálticas. Para este diseño son las siguientes:

- % Va: entre 3 y 5%
- % VMA: mínimo 13%
- % VFA: entre 65 y 75 %

Para el caso del VMA no existe un límite superior en la especificación, sin embargo diversas investigaciones indican que valores mayores en 3% del valor mínimo, producen mezclas con demasiados vacíos intergranulares, por lo que se tomo como límite superior un VMA de 16%.

Adicionalmente se debe contar con los valores de G_{sb} (gravedad específica neta de la mezcla de agregados) y G_{se} (gravedad específica efectiva de la mezcla de agregados) para cada granulometría utilizada.

Los valores de G_{sb} para las tres granulometrías utilizadas en el experimento se presentan en la Tabla 6.1

Tabla 6.1
Gravedades específicas por fuente de agregado y granulometría

Banco de material	Granulometría	G_{sb}	G_{se}
Banco 1 (B1)	1	2,690	2,728
	2	2,684	2,702
	3	2,699	2,727
Banco 2 (B2)	1	2,081	2,181
	2	2,178	2,249
	3	2,071	2,097
Banco 3 (B2)	1	2,635	2,636
	2	2,608	2,615
	3	2,591	2,644

6.3.1 Gravedad específica teórica máxima de la mezcla asfáltica en estado suelto (G_{mm})

Para la determinación el valor de G_{mm} se utiliza una ecuación de estimación (Ecuación 6.8), la cual depende del valor de G_{se} . Con la ayuda de esta ecuación se pueden estimar los valores de G_{mm} para diferentes contenidos de asfaltos.

$$G_{mm} = \frac{100}{\frac{100 - \%CA}{G_{se}} + \frac{\%CA}{G_b}} \quad (6.8)$$

G_b = gravedad específica del asfalto = 1,03

G_{se} = gravedad efectiva del agregado

%CA = contenido de asfalto, %

En la Tabla 6.2 se presenta los resultados de la ecuación 6.8 para los valores de G_{se} del banco “La Cañada” para la granulometría 1.

Tabla 6.2
Estimación de G_{mm}, La Cañada, G1

% CA	G _{mm}
4,1	2,555
4,6	2,536
5,1	2,516
5,6	2,497
6,1	2,479

6.3.2 Líneas de vacíos de aire (V_a)

Las líneas de vacíos de aire se elaboran utilizando la ecuación 6.4, y tomando en consideración los valores de G_{mm} presentados en la Tabla 6.2.

Los valores de V_a que se van a utilizar en el cálculo son; 3 y 5% (especificación), y 0% (saturación de la probeta)

A continuación se presenta un ejemplo de cálculo del valor de G_{mb} para un porcentaje de vacíos de aire de 3% y un contenido de asfalto de 4,1%.

$$G_{mb\,4,1} = \left(1 - \frac{V_a}{100}\right) \times G_{mm} = \left(1 - \frac{3}{100}\right) \times 2,555 = 2,478$$

La Tabla 7.3 presenta los valores de G_{mb} para vacíos de aire de 0, 3 y 5%, para diferentes contenidos de asfalto

Tabla 6.3
Estimación de las líneas de vacíos de aire

Porcentaje de vacíos					
3		5		0	
%C.A.	G _{mb}	%C.A.	G _{mb}	%C.A.	G _{mb}
4,1	2,479	4,1	2,428	4,1	2,555
4,6	2,460	4,6	2,409	4,6	2,536
5,1	2,441	5,1	2,391	5,1	2,516
5,6	2,423	5,6	2,373	5,6	2,497
6,1	2,404	6,1	2,355	6,1	2,479

Con los valores de G_{mb} obtenidos en la Tabla 6.3 se grafican las primeras líneas del polígono de vacíos.

En la Figura 6.1 se presenta la gráfica de las líneas de vacíos de aire para el banco “La Cañada” considerando los datos de la granulometría 1.

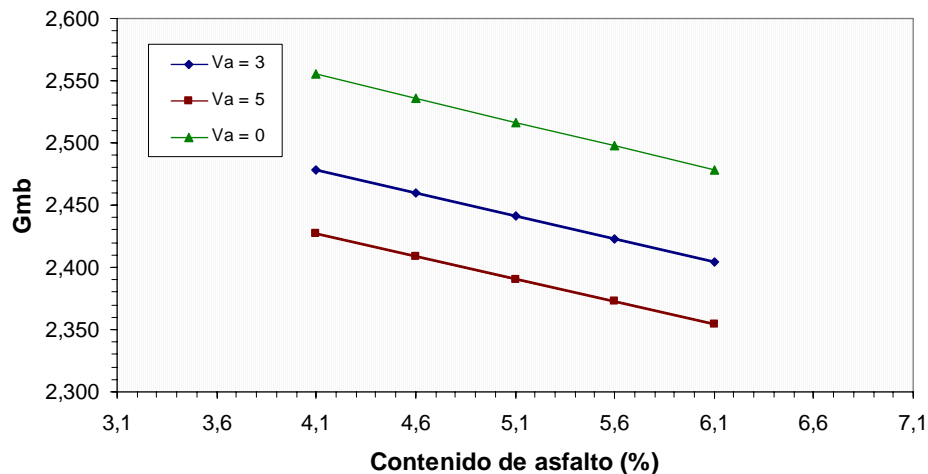


Figura 6.1
Líneas de vacíos para el banco "La Cañada"

6.3.3 Líneas de vacíos en el agregado mineral (VAM)

Las líneas de vacíos en el agregado mineral se elaboran utilizando la ecuación 7.5. De esta ecuación se puede observar que el valor necesario para el cálculo es el G_{sb}

Los valores de VAM que se van a utilizar en el cálculo son; 13 y 16% (especificación).

A continuación se presenta un ejemplo de cálculo del valor de G_{mb} para un porcentaje de vacíos de agregado mineral de 13% y un contenido de asfalto de 4,1%.

$$G_{mb\ 4,1} = \frac{100 - \text{VAM}}{100 - \text{CA}} G_{sb} = \frac{100 - 13}{100 - 4,1} \times 2,690 = 2,441$$

La Tabla 6.4 presenta los valores de G_{mb} para vacíos en el agregado mineral de 13 y 16%, para diferentes contenidos de asfalto

Tabla 6,4
Estimación de las líneas de VAM

Vacíos en el agregado mineral			
13		16	
%C.A.	G _{mb}	%C.A.	G _{mb}
4,1	2,441	4,1	2,357
4,6	2,454	4,6	2,369
5,1	2,466	5,1	2,381
5,6	2,480	5,6	2,394
6,1	2,493	6,1	2,407

En la Figura 6.2 se presenta la gráfica de las líneas de vacíos en el agregado mineral para el banco “La Cañada” para la granulometría 1.

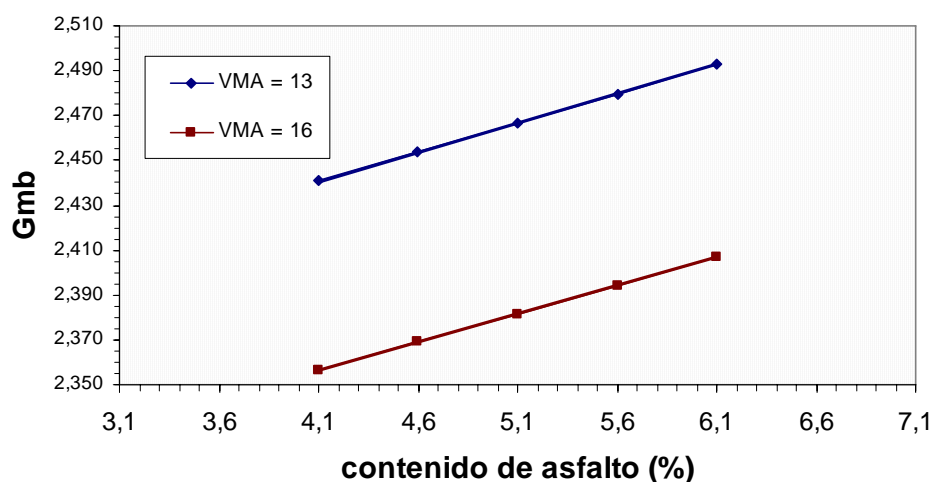


Figura 6.2
Líneas de VAM para el banco “La Cañada” para G1

En la Figuras 6.1 y 6.2 se graficaron las líneas de Va y VAM en forma separada, en la Figura 6.3 se presentan las líneas de ambos parámetros volumétricos superpuestas.

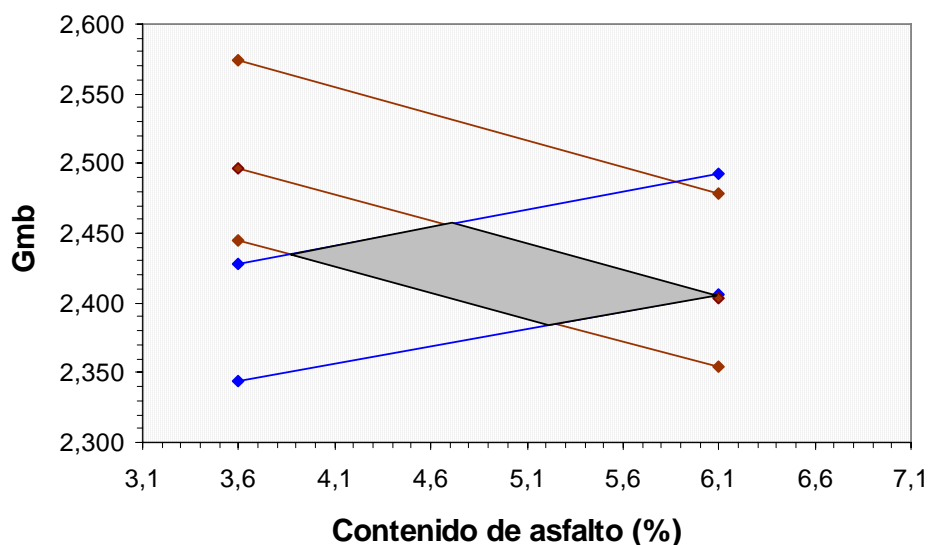


Figura 6.3
Intersección de líneas de Va y VAM

De la Figura anterior se puede observar que las líneas de Va y VAM se intersectan, con lo que se empieza a esbozar el área del polígono de vacíos.

6.3.4 Líneas de vacíos llenados con asfalto (VFA)

Las líneas de vacíos llenados con asfalto se elaboran utilizando la ecuación 6.7. De esta ecuación se puede observar que los valores necesarios para el cálculo son el Gsb y los valores de G_{mm} presentados en la Tabla 6.2.

Los valores de VFA que se van a utilizar en el cálculo son; 65 y 75% (especificación).

A continuación se presenta un ejemplo de cálculo del valor de G_{mb} para un porcentaje de vacíos llenados con asfalto de 65% y un contenido de asfalto de 4,1%.

$$G_{mb4,1} = \frac{\frac{VFA}{100} + \frac{VFA(100-CA)}{100G_{sb}} - \frac{100-CA}{G_{sb}}}{\frac{100}{G_{mm}} + \frac{VFA(100-CA)}{100G_{sb}} - \frac{100-CA}{G_{sb}}} = \frac{\frac{65}{2,555} + \frac{65(100-4,1)}{100 \times 2,690} - \frac{100-4,1}{2,690}}{\frac{100}{2,555} + \frac{65(100-4,1)}{100 \times 2,690} - \frac{100-4,1}{2,690}} = 2,438$$

La Tabla 6.5 presenta los valores de G_{mb} para vacíos llenados con asfalto de 65 y 75%, para diferentes contenidos de asfalto

Tabla 6.5
Estimación de las líneas de VAM

Vacíos en el agregado mineral			
65		75	
%C.A.	G_{mb}	%C.A.	G_{mb}
4,1	2,438	4,1	2,482
4,6	2,405	4,6	2,453
5,1	2,373	5,1	2,426
5,6	2,341	5,6	2,399
6,1	2,311	6,1	2,372

En la Figura 6.4 se presenta la gráfica de las líneas de vacíos llenados con asfalto para el banco "La Cañada" para la granulometría 1, superpuestas con las líneas de la Figura 6.3 (Va y VAM).

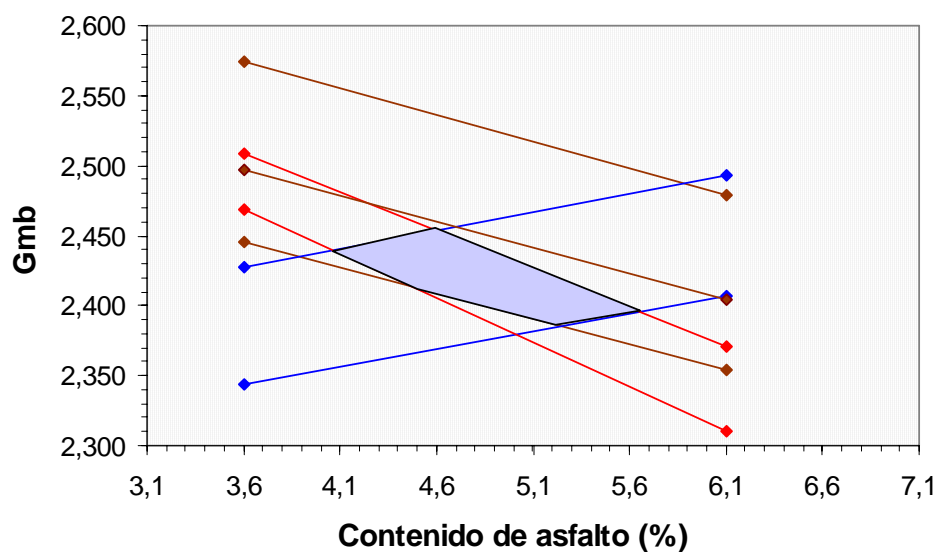


Figura 6.4
Intersección de líneas de Va, VAM y VFA

Después de dibujar todas las líneas de propiedades volumétricas (Figura 6.4), se puede observar el polígono de vacíos. Primeramente podemos observar que unas de las líneas no forma parte del polígono ($V_a = 3$), esto es debido a que el valor de VFA de 75% es una especificación más rigurosa y por ende reduce el área del polígono de vacíos, haciendo innecesaria la determinación de la línea para $V_a = 3\%$.

De igual forma se observa que durante el proceso de elaboración del polígono de vacíos no fue necesarios realizar ensayos de compactación (método Marshall o Superpave), solamente se determinaron valores de los agregados a utilizar así como el valor de la gravedad específica teórica máxima de la mezcla asfáltica, Gmm.

La construcción del polígono de vacíos es una herramienta poderosa para el control de ensayos de campo, en dos aspectos fundamentales: el rango óptimo de asfalto y las características de compactación de la mezcla.

En lo referente al rango óptimo podríamos determinar cual es la variación permitida del contenido de asfalto para una cierta característica de la mezcla asfáltica y no cazarnos con un valor fijo de contenido de asfalto, el cual en la mayoría de los casos cambia de acuerdo con las variaciones que presenta la granulometría en la dosificación en planta.

Por otro lado se puede verificar si una mezcla cumple con las características volumétricas establecidas de forma ágil. Esto se ejemplifica en la Figura 6.5 en donde se incorpora los valores de densidades de probetas elaboradas con el compactador giratorio al polígono de vacíos presentado en la Figura 6.4.

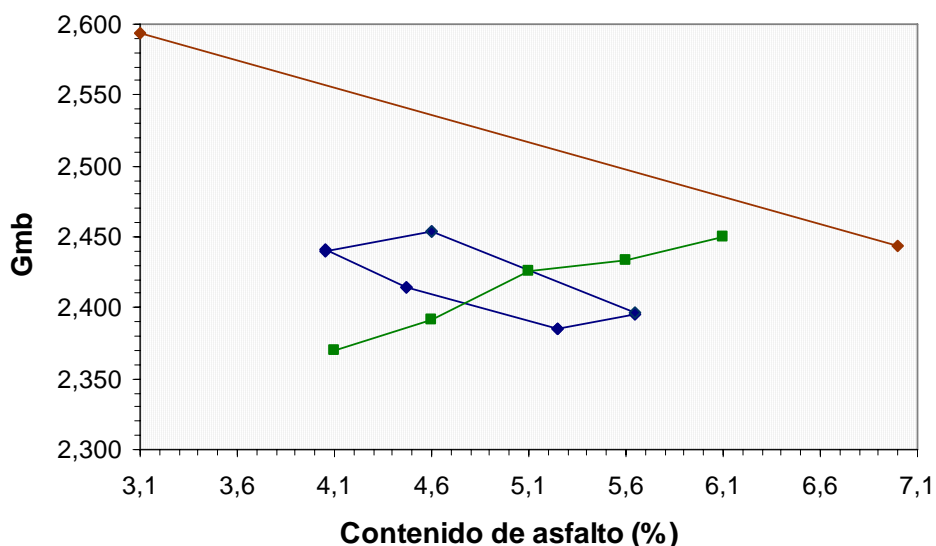


Figura 6.5
Control de propiedades volumétricas utilizando un polígono de vacíos

7 Descripción del experimento

Se describe la metodología y desarrollo de la experimentación realizados durante la investigación, tomando como base lo siguiente:

- ✓ Selección de los materiales
- ✓ Características de la mezcla asfáltica
- ✓ Pruebas fundamentales a la mezcla asfáltica
- ✓ Ensayos a la mezcla asfáltica compactada

7.1 Selección de los materiales

7.1.1 Agregado mineral

Los materiales pétreos que se utilizaron para la elaboración de la mezcla asfáltica provienen de tres bancos de materiales que denominaremos B1 y B2 ubicados en el estado de Querétaro, y B3 del estado de Coahuila y constan básicamente, el primero de roca basáltica triturada; el segundo consta de una combinación de roca basáltica triturada de menor calidad y arena natural, y el tercer banco consta de materiales triturados de roca caliza. Las pruebas al agregado se realizaron de acuerdo con los requerimientos establecidos por la metodología Superpave, basados en Normas ASTM.

En las Tablas 7.1 y 7.2 se muestra el resumen de los resultados de la caracterización de los agregados pétreos. Como se describe en 7.1.1.2, se utilizaron 3 (tres) granulometrías diferentes G-1, G-2 y G-3:

Tabla 7.1
Pruebas al agregado mineral

Ensayos	Resultados			Especificación
	Bancos			
	B1	B2	B3	
De consenso				
Angularidad del agregado grueso(ASTM D5821)	100/100	100/100	100/100	100/100 ¹
Angularidad del agregado fino (ASTM C1252)	58%	< 45%	> 45%	45 % mín
Partículas planas y alargadas (ASTM D4791)	2%	< 10%	< 10%	10% máx
Equivalente de arena (ASTM D2419)	75%	> 50%	> 50%	50% mín

De origen				
Desgaste de los Ángeles (ASTM C131)	16%	16%	24%	35% máx
Intemperismo acelerado (ASTM C88)	4.9%	35.2%	1.8%	10% máx

1 El primer número denota % con una o más caras fracturadas

El segundo número denota % con dos o más caras f

Tabla 7.2

Pruebas al agregado mineral

Densidades	Banco B1		
	G-1	G-2	G-3
Densidad aparente (Gsa)	2.854	2.851	2.840
Densidad neta (Gsb)	2.690	2.684	2.699
	Banco B2		
Densidad aparente (Gsa)	2.289	2.318	2.230
Densidad neta (Gsb)	2.081	2.178	2.071
	Banco B3		
Densidad aparente (Gsa)	2.713	2.716	2.719
Densidad neta (Gsb)	2.635	2.608	2.591

Para el caso del banco B2, se hizo una mezcla de agregados gruesos basálticos con arenas naturales (ver tabla 7.3), con la finalidad de evaluar su influencia en la deformación permanente.

7.1.1.1 Dosificación de la mezcla de agregados

De acuerdo al tamaño máximo nominal, en este caso de 1/2", se realizó el cribado por 11 diferentes mallas para realizar la dosificación exacta de acuerdo a las 3 granulometrías por evaluar, esto es, de la malla de 3/4" a la malla No. 200. Las 3 granulometrías corresponden a graduaciones que pasan por abajo (G-1), a través (G-2) y arriba de la zona de restricción (G-3), esta última de acuerdo al límite superior de las especificaciones de la metodología Superpave.

Estas graduaciones fueron escogidas con base a la revisión bibliográfica, la cual concluía de manera general en la recomendación de omitir la zona de restricción toda vez que graduaciones que pasan a través de esta zona (p.e. G-2), experimentalmente ofrecen un buen comportamiento en cuanto a deformación permanente, como se indicó anteriormente en el capítulo 2. En cuanto a las granulometrías G-1 y G-3, se eligieron con la finalidad de evaluar una graduación

con mayor porcentaje de partículas gruesas y otra con mayor porcentaje de partículas finas, y de esta manera observar su comportamiento.

Las probetas fabricadas con la metodología Superpave alcanzaron alturas de 75 ± 3 mm, con una masa de agregados pétreos de 3,000 g, 2,900 g y 2,200 g para los bancos B1, B3 y B2, respectivamente. La altura indicada de las probetas se alcanzó con el fin de cumplir con los requerimientos del ensayo de susceptibilidad a la deformación permanente en el Analizador de Pavimentos Asfálticos (APA).

7.1.1.2 Graduación

En la Tabla 7.3 se presentan las granulometrías utilizadas en este proyecto.

Las curvas granulométricas de los agregados se presentan en la Figura 7.1, donde se puede observar que cumple con los requerimientos de Superpave citados en el capítulo 2, toda vez que fueron propuestos para el estudio. Las características del agregado (calidad, graduación, tamaño máximo nominal, etc) fueron las mismas que se emplearon en la elaboración de las probetas ensayadas en este experimento.

Tabla 7.3
Granulometrías usadas en el experimento

Abertura (mm)	(Abertura) ^{0.45}	Designación	% que pasa		
			G-1	G-2	G-3
19	3.76	¾"	100	100	100
12.5	3.12	½"	94	94	96
9.5	2.75	3/8"	82	82	92
6.3	2.29	¼"	68	68	81
4.75	2.02	Nº. 4	59	59	74
2.36	1.47	Nº 8	37	44	58
1.18	1.08	Nº 16	19	28	42
0.600	0.79	Nº 30	13	20	30
0.300	0.58	Nº 50	11	16.5	21
0.150	0.43	Nº 100	7	10	15
0.075	0.31	Nº 200	3	5	10

Los puntos de control como ya se discutió anteriormente, corresponden al tamaño máximo nominal de 12.5 mm, un tamaño intermedio (2.36 mm), y un tamaño de polvo mineral (<0.075 mm). La zona restringida se ubica entre los tamaños 2.36 y 0.30 mm.

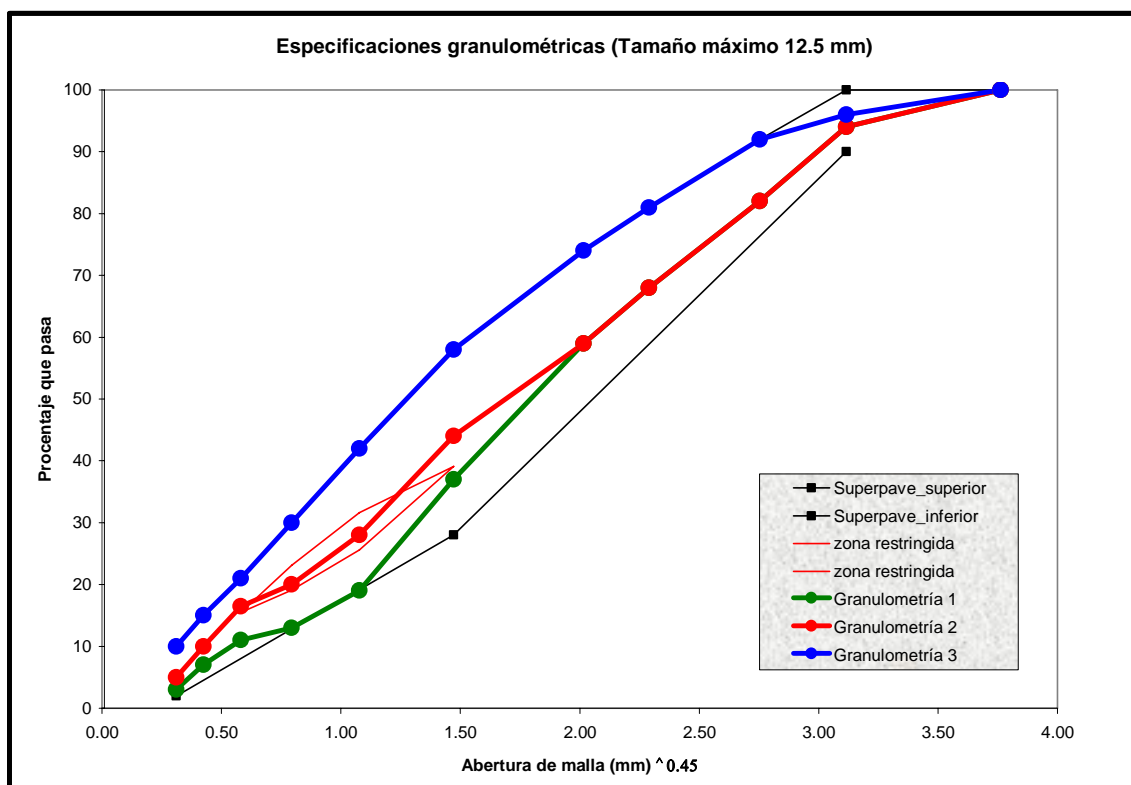


Figura 7.1
Curvas granulométricas de los agregados utilizados en este proyecto

7.1.2 Ligante asfáltico

El asfalto utilizado en la elaboración de probetas en la presente investigación, fue del tipo AC-20, proveniente de la refinería de Salamanca, Guanajuato. Con el propósito de caracterizar el ligante, se realizaron ensayos en el viscosímetro rotacional (RV) y el reómetro de corte dinámico (DSR).

7.1.2.1 Viscosímetro rotacional (RV)

La prueba del viscosímetro rotacional (Figura 7.2) se utiliza para determinar las temperaturas de mezclado y compactación de la mezcla asfáltica en el laboratorio. Se determinan las viscosidades a distintas temperaturas, y se construye una carta de viscosidad (Figura 7.3) en donde se seleccionan las temperaturas de mezclado y compactación correspondientes a los rangos de viscosidades de 0.17 ± 0.02 y 0.28 ± 0.03 Pa.s (Pascal.segundo) respectivamente.

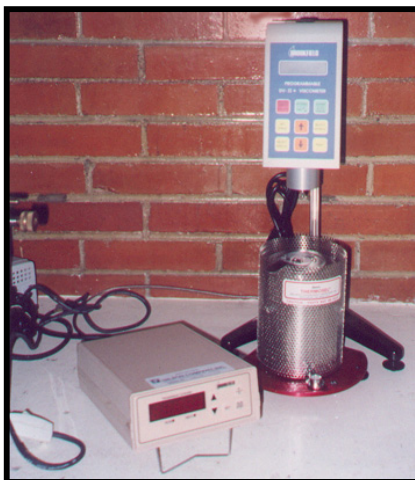


Figura 7.2
Viscosímetro rotacional

Basándonos en estos criterios establecidos por Superpave, es factible obtener los rangos de temperatura de mezclado y compactación para el asfalto AC-20. Los resultados se muestran en la Figura 7.3.

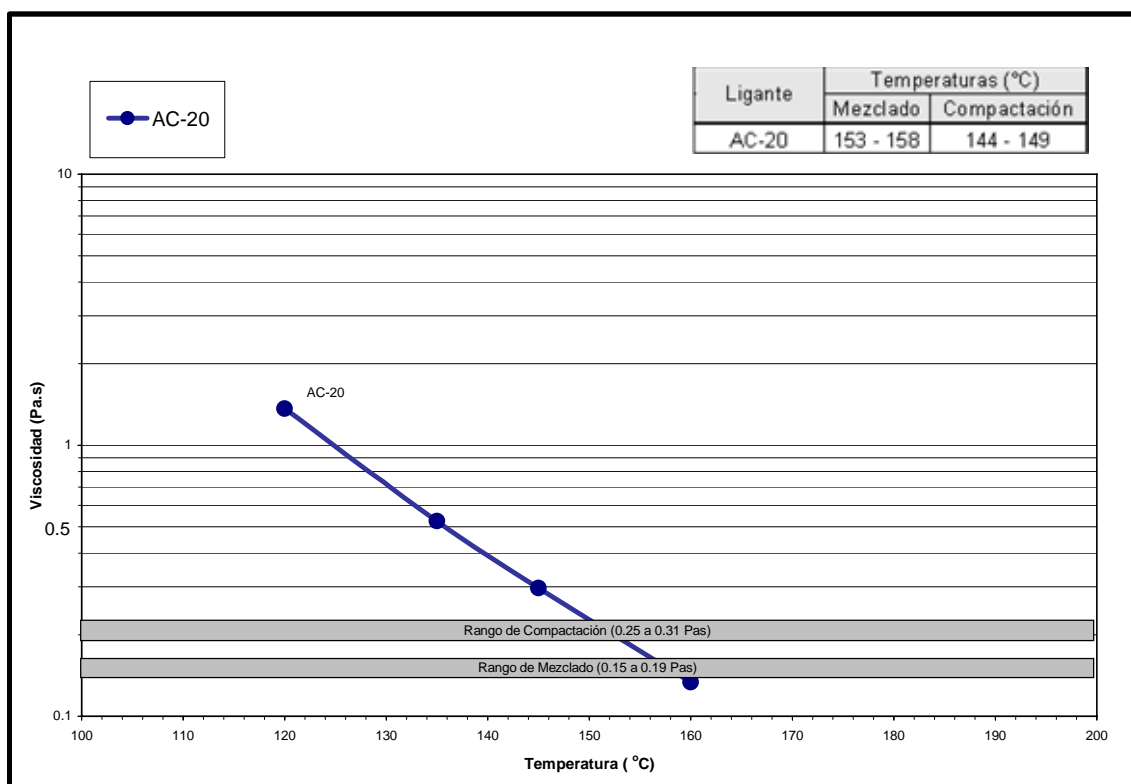


Figura 7.3
Carta de viscosidad

Superpave también establece un criterio para asegurar el fácil manejo y bombeo del asfalto en planta, especificando un valor de viscosidad a la temperatura de 135°C; este valor debe ser como máximo de 3 Pa.s. Se puede ver en la Figura 7.3 que el cemento asfáltico AC-20 cumple con el requerimiento (0.51 Pa.s).

7.1.2.2 Reómetro de corte dinámico (DSR)

Se llevó a cabo la caracterización de los ligantes asfálticos en el DSR (Figura 7.4) con el fin de evaluar su contribución a resistir las deformaciones plásticas en la mezcla, con base en la medición del parámetro reológico $G^*/\sin \delta$ ¹.

La prueba se realizó al asfalto en su estado original y envejecido en el horno rotatorio de película delgada (RTFO). La Figura 7.5 muestra el RTFO, equipo que simula el mezclado y la agitación de la mezcla en caliente en planta y el envejecimiento durante la puesta en obra. La Figura 7.6 muestra la variación del valor $G^*/\sin \delta$ para las diferentes temperaturas a las que se ejecutó el ensaye. Se puede ver que el valor de $G^*/\sin \delta$ disminuye notablemente a medida que aumenta la temperatura de prueba. Se observa también que los valores de $G^*/\sin \delta$ son más altos para el asfalto envejecido; esto es debido al endurecimiento que sufre el ligante como consecuencia de la volatilización de aceites durante la prueba en el RTFO. Un ligante con mayor rigidez mejora la resistencia a la generación de roderas, por lo tanto requerimos un $G^*/\sin \delta$ menor para controlar deformaciones permanentes, esto se logra aumentando G^* o disminuyendo δ .



Figura 7.4
Reómetro de corte dinámico (DSR)

¹ Parámetros Reológicos de resistencia al daño por roderas

G^* =Módulo de corte δ =Ángulo de desfase



Figura 7.5
Horno rotatorio de película delgada

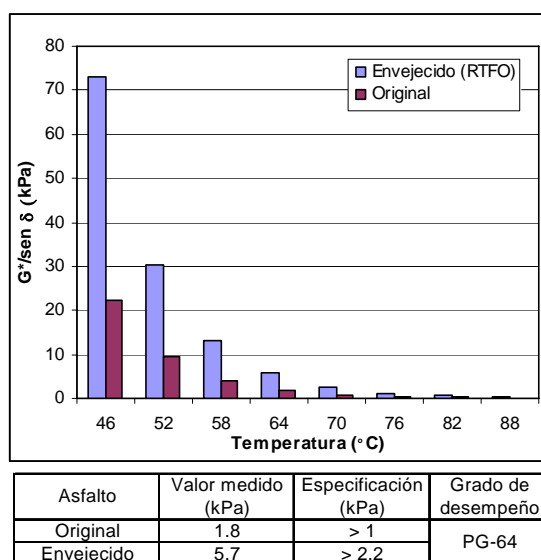


Figura 7.6
Caracterización del ligante asfáltico para AC-20

7.2 Características de la mezcla asfáltica

7.2.1 Porcentajes de asfalto y niveles de compactación

Con datos de la mezcla de agregados de diseño, como son la gravedad específica neta (G_{sb}); la gravedad específica aparente (G_{sa}); y el tamaño máximo nominal del agregado (S_n), se puede determinar un porcentaje de asfalto inicial (P_{bi}); tal como describe el Instituto del Asfalto de Norteamérica en su publicación sobre diseño de mezclas asfálticas en caliente, por el método Superpave.

El valor de P_{bi} obtenido para las diferentes granulometrías y bancos se presenta en la Tabla 7.4. En la Tabla 7.5 se indica el incremento y decremento en los contenidos de asfalto para la elaboración de las probetas según la metodología Superpave.

Tabla 7.4
Contenidos de asfalto iniciales

Granulometría	Porcentaje de asfalto inicial P_{bi} para los bancos		
	B1	B2	B3
G-1	5.4	8.0	4.7
G-2	5.4	6.7	5.1
G-3	5.3	7.5	5.3

Tabla 7.5
Variación de los contenidos de asfalto a utilizar

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

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

Para el banco B1 se utilizaron los contenidos de asfalto de 4.1%, 4.6%, 5.1%, 5.6% y 6.1%, para el banco B2 estos contenidos fueron de 6.1%, 6.6%, 7.1%, 7.6% y 8.1% y para el banco B3 se elaboraron probetas únicamente con contenidos de 4.1% y 4.6% por falta de material, toda vez que originalmente se planteó usar dos fuentes de materiales, sin embargo se aprovechó un material

sobranante del banco Contrissa utilizado en estudios solicitados por el Centro SCT Coahuila al IMT.

7.2.2 Elaboración de la mezcla asfáltica

Una vez que los materiales se acondicionan cercanos a la temperatura de mezclado, se dosifica el asfalto en peso con respecto a la mezcla total (Figura 7.7a). Posteriormente se procede al cubrimiento del agregado pétreo, manteniendo la temperatura de mezclado dentro del rango especificado hasta que las partículas más gruesas se hayan cubierto totalmente (Figura 7.7b).

Cuando la mezcla haya alcanzado la temperatura de compactación, se coloca dentro de los moldes donde va ser compactada (ver Figura 7.10). Los moldes deben estar calientes, así como los demás accesorios que se utilicen en el vaciado y acomodo de la mezcla, con el fin de evitar una reducción de temperatura de la mezcla asfáltica, previa a su compactación.



Figura 7.7
Elaboración de la mezcla asfáltica

7.2.3 Compactación

En la compactación de la mezcla asfáltica en caliente se utilizó el compactador giratorio para las probetas Superpave.

En la Figura 7.8 se muestra el compactador giratorio, así como el equipo para el control de la compactación.

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

En la Figura 7.9 se puede observar el desarrollo de los esfuerzos de corte, a medida que aumenta el número de giros.

Dado que se cuenta con una extensa información como resultado de todas las probetas elaboradas en el compactador giratorio.



(a)

(b)

Figura 7.8
Equipo de compactación de la mezcla asfáltica

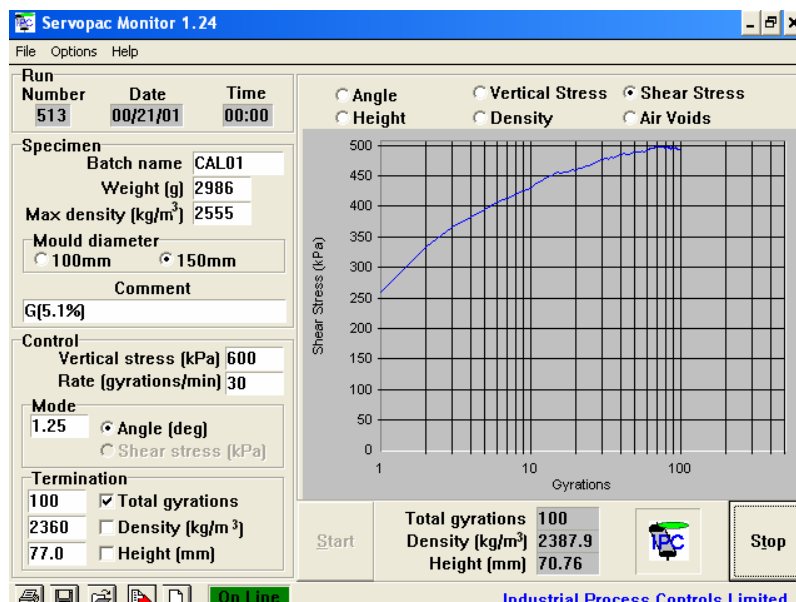


Figura 7.9
Mediciones de los esfuerzos de corte en el compactador giratorio

Se tomó como referencia un nivel de tránsito de 10 millones de ejes equivalentes (ESAL's) como lo establece el nivel 1 de la metodología Superpave para análisis volumétrico. El nivel de compactación utilizado para este tránsito considerado corresponde a un número de giros de 100, lo que equivaldría a 75 golpes por cara en el método Marshall.

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

En la Figura 7.10 se muestra el aspecto de las probetas compactadas de 75 mm de altura aproximadamente al retirarlas del compactador giratorio.



Figura 7.10
Probetas de mezcla asfáltica

7.3 Pruebas fundamentales a la mezcla asfáltica

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

7.3.1 Gravedad específica neta (G_{mb})

El procedimiento a seguir para las probetas con un porcentaje de absorción menor al 2% fue el descrito por la Norma ASTM D2726. Se registra la masa del espécimen seco, se sumerge en un baño María a 25 °C (77 °C) por 3 a 5 minutos, se registra la masa sumergida (Figura 7.1b) y se saca del agua y se seca rápidamente con una toalla e inmediatamente se pesa en el aire. La diferencia

entre las dos masas se utiliza para medir la masa de un volumen igual de agua a 25 °C. Se proporcionan factores de corrección para convertir la masa de agua a la temperatura referenciada de 25 °C si desde un punto de vista práctico las mediciones fueron hechas a una temperatura diferente.

La expresión para la gravedad específica es la siguiente:

$$G_{mb} = \frac{A}{B - C} \quad (7.1)$$

Donde:

A = masa del espécimen al aire, g

B = masa del espécimen saturado, y superficialmente seco, g

C = masa del espécimen sumergido en agua, g



(a)



(b)

Figura 7.11

Determinación de la gravedad específica neta de la mezcla compactada

7.3.2 Gravedad específica teórica máxima (Gmm)

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

Una muestra de la mezcla seca en condición suelta se coloca en un picnómetro de vacío tarado. Se agrega suficiente agua a 25 °C para sumergir completamente la muestra. Gradualmente se aplica vacío para reducir la presión residual en la vasija

de vacío hasta 4 kPa (30 mm de Hg) o menos y se mantiene así durante 15 ± 2 min. Al finalizar el periodo de vacío, el vacío se libera gradualmente. El volumen de la muestra de la mezcla se obtiene sumergiendo el contenedor vacío con la muestra en un baño María y pesándolo o por llenado del contenedor de vacío completamente de agua y pesándolo al aire. La temperatura y la masa del agua se miden en ese momento. De la masa y volumen medidos, se determina la gravedad específica o densidad a 25 °C.

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

$$G_{mm} = \frac{G}{G + H - I} \quad (7.2)$$

Donde:

G = masa de la mezcla asfáltica (estado suelto), g

H = masa del picnómetro + agua, g

I = masa del picnómetro + mezcla + agua, g



(a)



(b)

Figura 7.12
Determinación de la gravedad específica teórica máxima.
(a) Mezcla asfáltica en estado suelto (b) Ensayo en el picnómetro

8 Análisis de propiedades volumétricas

En el presente análisis se presentan al análisis de la influencia tanto de la granulometría como de la fuente de agregado en las propiedades volumétricas de la mezcla asfáltica. Para el análisis de los datos se utilizaron procedimientos comunes como son la comparación de las propiedades volumétricas contra el contenido de asfalto, y adicionalmente se incorporó una nueva técnica de análisis como es el RAMCODES.

El diseño volumétrico parte de un nivel de tránsito correspondiente a 10 millones de ejes equivalentes (ESAL's), utilizando granulometrías que cumplen con las especificaciones establecidas en normas tanto de la SCT, como de ASTM.

8.1 Análisis de los parámetros volumétricos de la mezcla asfáltica

Una vez determinados los ensayos de densidad para la mezcla asfáltica suelta (Gmm) y compactada (Gmb) para las probetas elaboradas con la metodología Superpave, se tiene toda la información necesaria para determinar los parámetros volumétricos de la mezcla asfáltica, y obtener el contenido óptimo de asfalto.

Las granulometrías y fuentes de agregado empleadas se presentan a detalle en el capítulo 7. Cabe comentar que los contenidos de asfalto utilizados durante la investigación variaron tanto en cantidad (número de contenidos de asfalto) como en el nivel aplicado (porcentaje de asfalto).

8.1.1 Influencia de la granulometría para el banco 1

Se presentan los resultados de la influencia de la granulometría por fuente de agregado. Los análisis se realizaron tomando en consideración cuatro parámetros volumétricos; Vacíos de aire (Va), Vacíos en el agregado mineral (VAM), Vacío llenados con asfalto (VFA) y gravedad específica neta de la mezcla asfáltica (Gmb).

Los contenidos de asfalto utilizados fueron de 4,1 % a 6,1% en incrementos de 0,5%.

En la Figura 8.1 se presentan los resultados de las propiedades volumétricas del banco 1 (B1), para las condiciones anteriormente mencionadas.

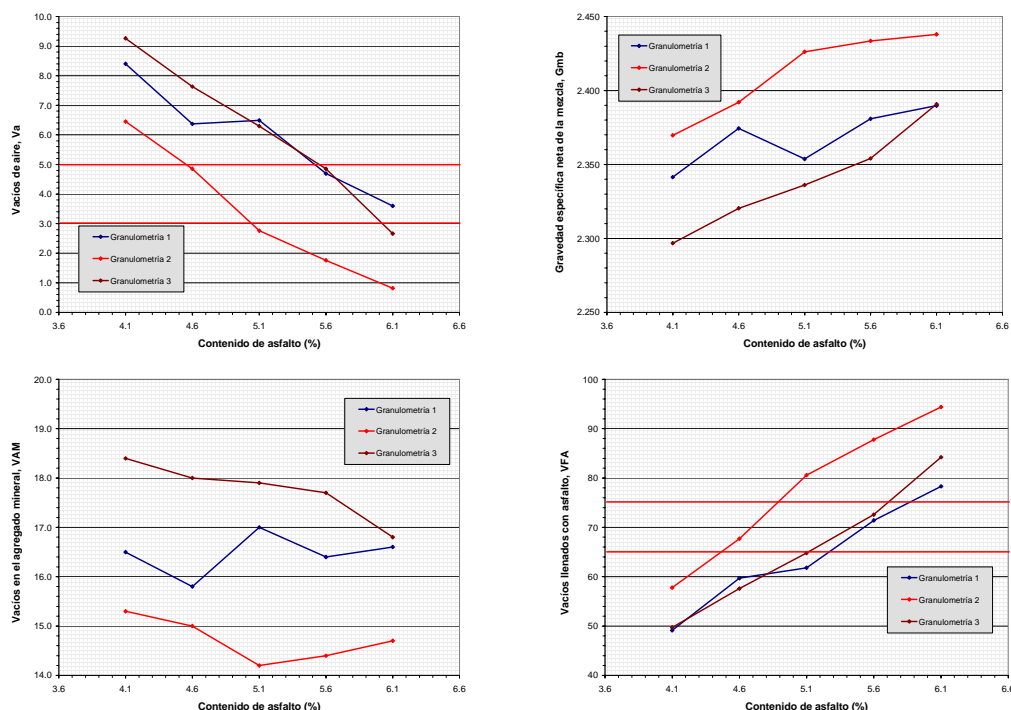


Figura 8.1
Propiedades volumétricas del banco 1, para diferentes granulometrías

Las relaciones para determinar los porcentajes de vacíos de aire (V_a), vacíos en el agregado mineral (V_{AM}), y vacíos llenos de asfalto (V_{FA}) son las descritas en el capítulo 5.

En la Figura 8.1 se observa que para los valores de V_a las granulometrías 1 y 3 son muy similares, siendo la G2 la que tiene menos vacíos de aire, visto de otra forma, se necesita menos asfalto en la G2 para estar en los rangos de diseño (3-5%).

Por otro lado se observa que las densidades no son similares, sin embargo la G2 presenta valores de densificación mayores, que por ende se transforman en menores volúmenes de vacíos de aire.

Para el caso particular del los V_{AM} todas las granulometrías cumplen con la especificación (> 13%), siendo G2 la que presenta menos vacíos intergranulares, esto sin duda ayuda al desempeño de la mezcla debido a que minimiza la cantidad de ligante asfáltico que se necesita para lograr una propiedades volumétricas.

Por último los valores de V_{FA} son un reflejo de las demás propiedades volumétricas, ya que al haber mayor densificación de una probeta asfáltica se reducen los vacíos intergranulares y por lo tanto para un contenido de asfalto dado

se tiene un menor grado de saturación (menor valor de VFA), como ocurre para la granulometría 2.

Considerando los datos presentados, al parecer, la granulometría 2 presenta un mejor desempeño en lo referente a propiedades volumétricas.

8.1.2 Influencia de la granulometría para el banco 2

En la Figura 8.2 se presentan los resultados de las propiedades volumétricas del banco 2 (B2), para las condiciones anteriormente mencionadas.

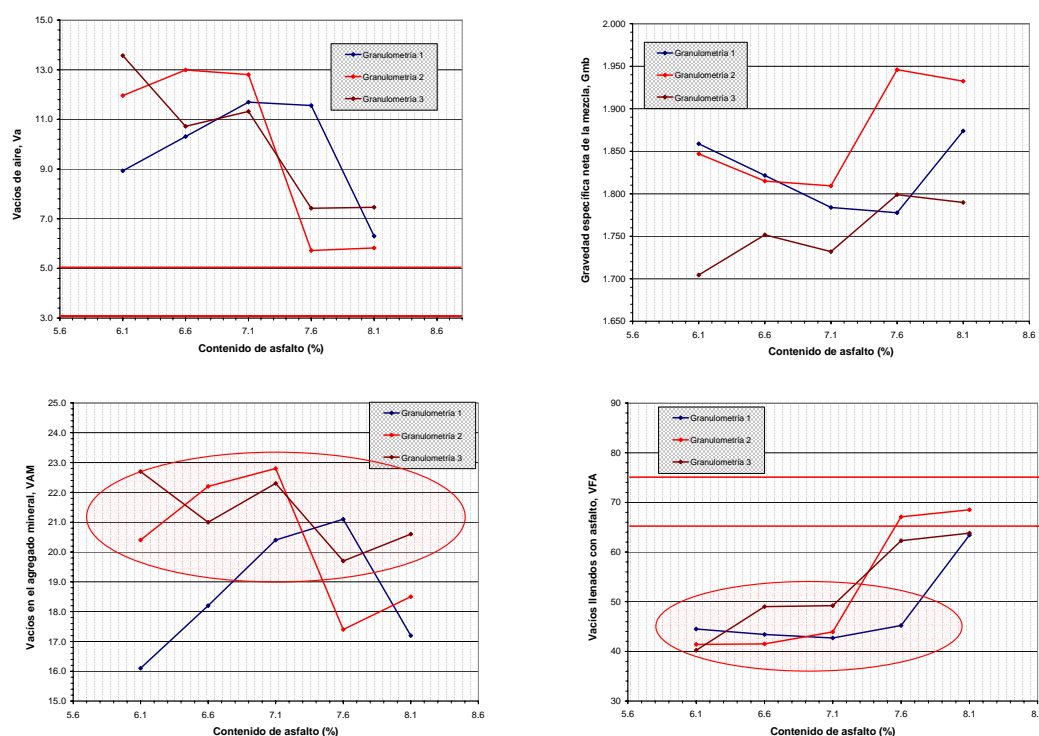


Figura 8.2
Propiedades volumétricas del banco 2, para diferentes granulometrías

Las propiedades volumétricas presentadas para el banco de material 2 muestran una desviación significativa con respecto a las especificaciones de diseño. Los valores de Va son muy altos, el contenido de asfalto de 8,1% parece acercarse al rango de diseño, sin embargo la adición de más asfalto a la mezcla con llevaría a que se tuvieran problemas de exudación y deformación permanente en la carpeta asfáltica.

Por otro lado los valores de densidad son bajos, esto sin duda influenciado por la baja densidad (Gsb) que presentó la mezcla de agregados de agregados.

Para el caso de los VAM al igual que para los V_a , se observan valores altos, en donde la mayoría de los valores se encuentran en un rango de 20 a 23 %, esto es un reflejo de una estructura pétreo inadecuada, la cual aún cumpliendo con las especificaciones de granulometría, al tener un exceso de finos con angularidad baja (arena de río) ocasiona que el nivel de compactación obtenido sea bajo.

En lo que respecta al VFA, es el caso opuesto ya que los valores que presenta el banco son bajos, lo cual es muy razonable ya que al haber demasiado espacio intergranular se necesita demasiado asfalto para llegar a un grado de saturación de la mezclas de 65%.

8.1.3 Influencia de la granulometría para el banco 3

En la Figura 8.3 se presentan los resultados de las propiedades volumétricas del banco 3 (B3), considerando las cuatro propiedades volumétricas antes mencionadas.

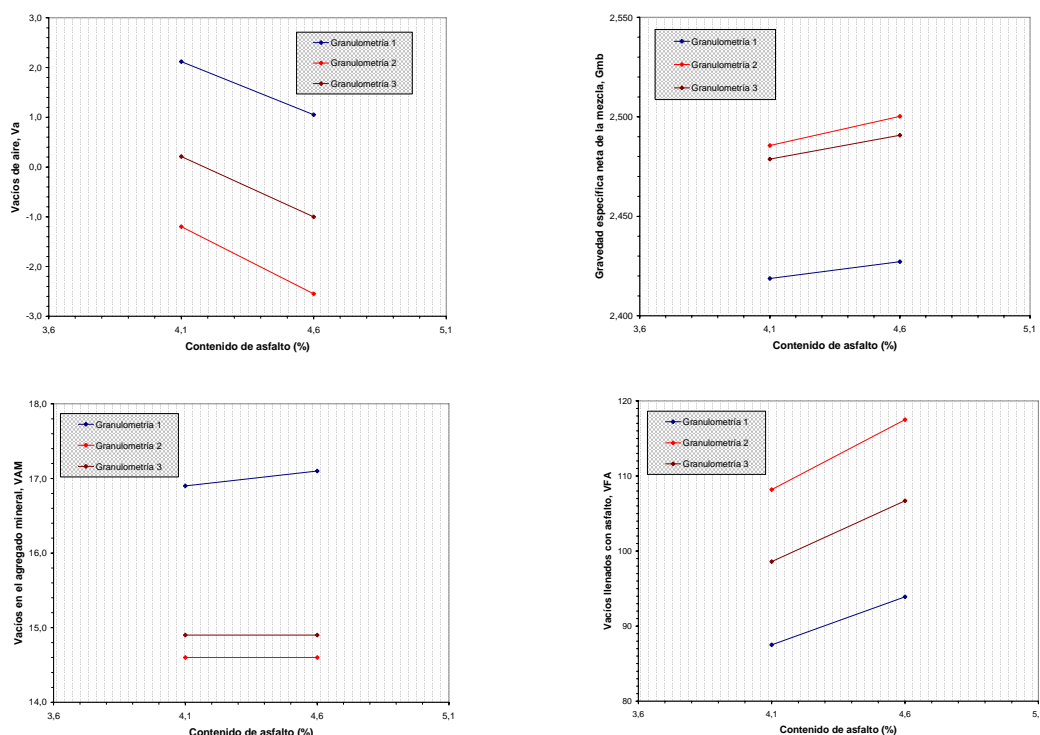


Figura 8.3
Propiedades volumétricas del banco 3, para diferentes granulometrías

La Figura anterior presenta datos fuera de los parámetros establecidos para estas propiedades volumétricas como por ejemplo porcentajes de vacíos negativos o grados de saturación de la mezcla de más del 100%, los cuales hasta cierto punto son erróneos.

La presencia de este tipo de valores llevó a un análisis de variabilidad de resultados, en donde se analizó la consistencia de los resultados con respecto a las dispersiones indicadas en normas internacionales (ASTM). El resultado de la investigación indico que los ensayos se habían realizado dentro de las condiciones de repetibilidad establecidas en los métodos de ensayo utilizados. Por lo que se realizó un análisis de las condiciones de las probetas asfálticas.

Del análisis a las probetas se determinó que hubo una interacción de ciertas propiedades de agregados (desgaste de Los Ángeles, forma de la partícula) que originó que se presentará rotura de agregados, la cual modificó la granulometría y el acomodo de las partículas, lo que ocasionó que se logaran valores de gravedades específicas netas de la mezcla (G_{mb}) mayores a los valores de gravedad específica teórica máxima y por ende valores de V_a negativos y valores de VFA mayores de 100%.

Estos cambios ligeros en la granulometría por rotura de agregados durante la compactación se acentuaron más en las granulometrías 2 y 3, debido a que tenían contenidos de material fino mayores a los de la granulometría 1.

Los resultados obtenidos reiteran la importancia de evaluar las características físicas del material, ya que una buena graduación granulométrica por si sola no es suficiente para asegurar el buen desempeño de la mezcla.

Un punto importante a investigar es la interacción de ciertas propiedades físicas del agregado, ya estas pueden producir efectos en el desempeño de la mezcla.

8.2 Selección del contenido óptimo de asfalto

La práctica actual de diseño volumétrico de mezclas asfálticas emplea el concepto de contenido óptimo de asfalto, el cual excluye ciertos valores de contenidos de asfalto los cuales cumplen con las propiedades volumétricas especificadas.

En la Tabla 8.1 se presentan los resultados de la estimación del contenido óptimo de asfalto para las tres granulometrías del banco 1. La determinación se realizó tomando como valor de referencia 4% de V_a .

De los datos presentados en la Tabla 8.1 se observa que los contenidos de asfalto para las granulometrías 1 y 3 son similares, sin embargo la granulometría 3 no cumple con la especificación de VFA. Cabe mencionar que el valor de VFA de la granulometría 1 esta sobre el límite superior de la especificación, por lo que cualquier variación en el contenido de asfalto ocasionaría que no se cumpliera con la especificación de VFA. En lo que se refiere a la granulometría 2 cumple con la especificación y su valor de VFA no está tan cerca del límite superior.

Tabla 8.1

Determinación del contenido óptimo de asfalto para el banco 1

Propiedades volumétricas	Granulometrías			
	G1	G2	G3	Especificación
Va (%)	4	4	4	3 – 5 %
Gmb	2,387	2,405	2,369	-----
VAM (%)	16,5	14,6	17,4	> 13 %
VFA (%)	75	72,5	77	65 – 75 %
Contenido óptimo de asfalto	5,9	4,8	5,8	-----

Otra forma de evaluar las propiedades volumétricas de una mezcla asfáltica es determinar un rango de contenido de asfalto que cumpla con todas las propiedades volumétricas, los rangos determinados para las tres granulometrías evaluadas en el banco 1 se presentan en la Figura 8.4.

En esta Figura se utilizan tres nomenclaturas de colores las cuales identifican el cumplimiento con las propiedades volumétricas establecidas en la Figura. El color rojo identifica los contenidos de asfalto para los cuales no se cumple las propiedades volumétricas, el color verde para los contenidos de asfalto que cumplen y el color azul para los contenidos de asfalto que se encuentran en el rango óptimo.

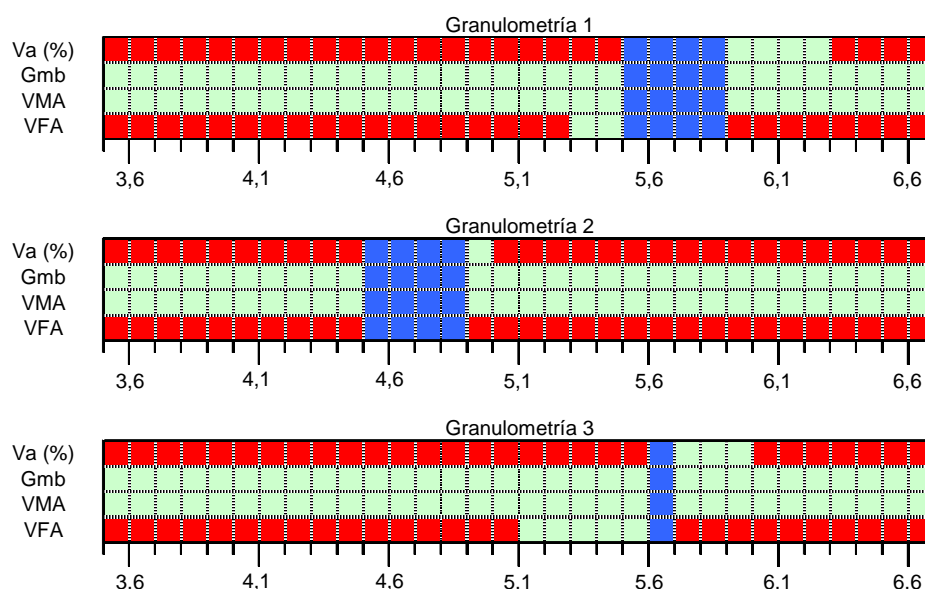


Figura 8.4

Determinación de rangos óptimos de asfalto para el banco 1

De la Figura anterior se puede observar que las propiedades de VAM y Gmb se cumplen satisfactoriamente para las tres granulometrías. En lo que se refiere a los parámetros Va y VFA se observa que los rangos de VFA son más reducidos por lo que debe considerar este parámetro como el más importante en el diseño volumétrico, no solo por el echo de ser más estricto sino por su significado en el diseño (grado de saturación de la mezcla).

Los rangos óptimos de contenido de asfalto encontrados para cada granulometría evaluada en el banco 1, se presentan en la Tabla 8.2.

Tabla 8.2
Rangos óptimos de asfalto para el banco 1

Granulometría	Rango óptimo	Valor medio
G1	5,5 – 5,9	5,7
G2	4,5 – 4,9	4,7
G3	5,6 – 5,7	5,65

De la Tabla anterior se pueden observar dos situaciones, la primera que ninguno de los valores medios son iguales a los contenidos óptimos antes determinados y que para el caso de la G3 el rango es muy pequeño lo que hace inadecuado el uso de esta granulometría debido a que cualquier variación crearía un incumplimiento en las propiedades volumétricas.

Con respecto a las diferencias entre los valores de contenidos de asfalto seleccionados, se puede decir que el valor promedio del rango óptimo es una mejor aproximación, por ejemplo; para el caso de G1, el contenido óptimo de asfalto fue de 5,9; el cual está en el límite del rango permitido, a diferencia del valor promedio del rango.

Se puede concluir que la determinación del rango óptimo de asfalto es una mejor forma de establecer un valor de contenido de asfalto de diseño, ya que se asegura dentro del valor medio de variación permitida en el contenido de asfalto.

8.3 Aplicación de la metodología RAMCODES

En los dos puntos anteriores hemos analizado la influencia de la granulometría y fuente de agregado en el desempeño de la mezcla asfáltica con los métodos que generalmente se utilizan en la práctica nacional, sin embargo una forma adicional de análisis de información es el polígono de vacíos (metodología RAMCODES) descrito en el capítulo 6.

Como se describió en el capítulo 6, el polígono de vacíos es una herramienta gráfica que nos permite determinar si una mezcla asfáltica compactada cumple con los requerimientos volumétricos establecidos.

8.3.1 Polígonos de vacíos para el banco 1

En la Figura 8.5 se presentan los polígonos de vacíos para las tres granulometrías utilizadas evaluadas en el banco 1 (B1).

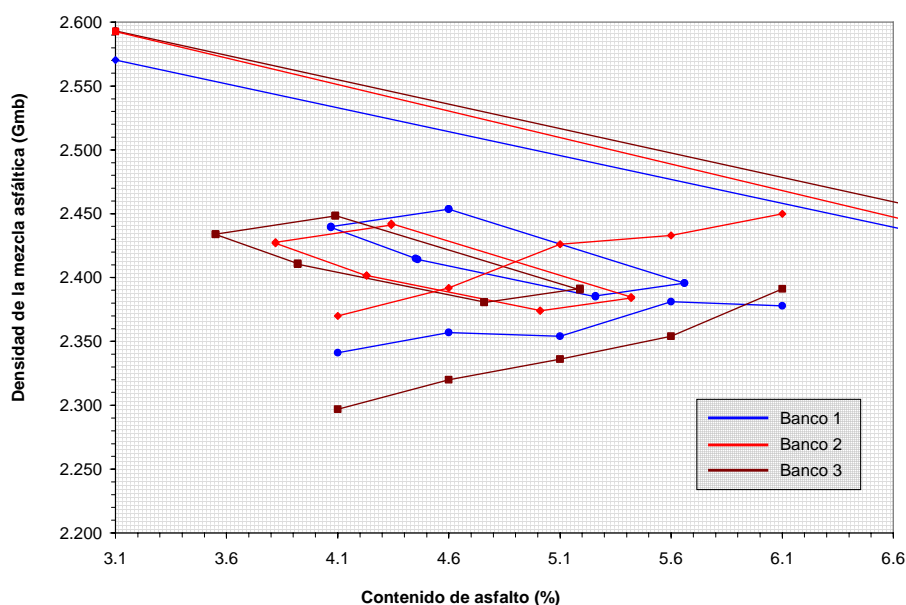


Figura 8.5
Polígonos de vacíos para el banco 1

En la Figura 8.5 se observa que los polígonos de vacíos por granulometría están muy cercanos lo cual indica que la estructura del agregado pétreo no influye en demasía en las propiedades volumétricas, pero no así en las características de compactación de la mezcla asfáltica, ya que se aprecian variaciones significativas en la densificación por cambios en la granulometría. Primeramente se pudo observar que solamente la granulometría 2 cumple con las especificaciones volumétricas. La razón de que las granulometrías 1 y 3 no cumplieran, cuando en los análisis anteriores se había encontrado un rango óptimo de asfalto, es debido a que se incorporó la especificación de VAM menor de 16%, restricción que no se utilizó en los análisis anteriores.

Esta restricción asegura que no la mezcla asfáltica compactada no cuente con un volumen de vacíos intergranular alto, por lo que reduce el volumen de asfalto requerido para cumplir con la especificación y por ende reduce la susceptibilidad a la deformación permanente de la mezcla asfáltica.

Este análisis confirma que la zona restringida en la gráfica de Fuller no tiene una influencia en el desempeño de la mezcla, debido a que la granulometría atraviesa la zona restringida y sin embargo es la única que cumple las propiedades volumétricas.

8.3.2 Polígonos de vacíos para el banco 2

En la Figura 8.6 se presentan los polígonos de vacíos para las tres granulometrías utilizadas evaluadas en el banco 2 (B2).

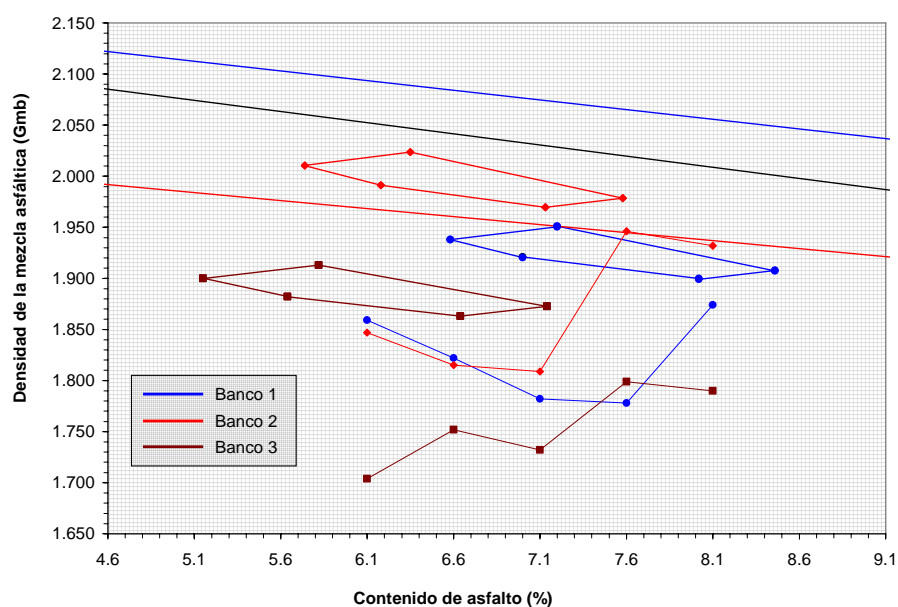


Figura 8.6
Polígonos de vacíos para el banco 2

En la Figura anterior se observa que para el banco 2, la variación de la granulometría tiene un efecto significativo tanto en las propiedades volumétricas como en las características de compactación de la mezcla asfáltica. Esto deja entre ver el cuidado que se debe tener a la hora de la realización de la mezcla de agregados.

Por otro lado, se observa que para ninguna de las mezclas asfálticas compactadas cumplen con los requisitos volumétricos, por lo que la mezcla de agregados utilizada en este banco no es adecuada para su utilización en mezclas asfálticas para pavimentación.

Esto deja de lado la idea de que para algunos materiales la zona restringida ayuda a evidenciar un comportamiento inadecuado, ya que una mezcla de agregados de mala calidad presentará problemas de densificación sin importar que graduación de agregados presente.

8.3.3 Polígonos de vacíos para el banco 3

En la Figura 8.7 se presentan los polígonos de vacíos para las tres granulometrías utilizadas evaluadas en el banco 3 (B3).

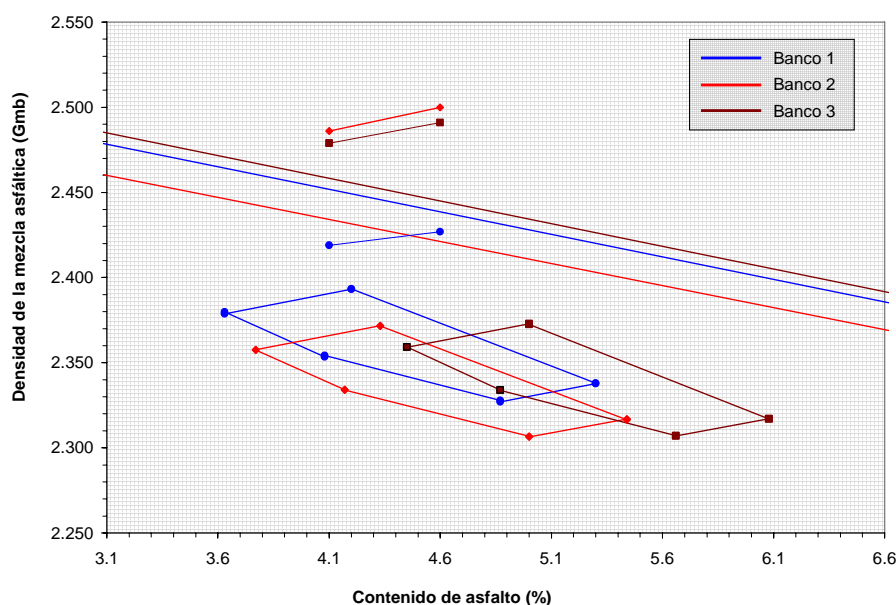


Figura 8.7
Polígonos de vacíos para el banco 3

En la Figura 8.7 se observa que los polígonos de vacíos por granulometría están dispersos lo cual indica que la estructura del agregado pétreo tiene una influencia moderada en las propiedades volumétricas. Las granulometrías 2 y 3 parecen tener características de compactación similares, mientras que los grados de compactación logrados con la granulometría 1 son diferentes.

Cabe mencionar que ninguna de las tres granulometrías cumple con las propiedades volumétricas debido a que durante las densificaciones se alcanzan valores demasiado altos de Gmb, estos valores están asociados a diversas características físicas del agregado, las cuales producen rotura de agregado durante la densificación y por ende los polígonos de vacíos no corresponden a las características finales de las probetas.

Se recomienda realizar un análisis estadístico de las variables de mayor influencia en las propiedades volumétricas de la mezcla asfáltica bajo diferentes condiciones de densificación.

Conclusiones

Revisión bibliográfica

- La zona restringida fue incluida en la metodología Superpave como una guía recomendada, sin embargo se esta utilizando como una de las especificaciones de la metodología
- Se demostró en el Reporte 464 “The restricted zone in the Superpave aggregate gradation specification” del NCHRP que la zona de restricción es redundante en todas las condiciones, debido a que granulometrías que atravesaron la zona restringida tuvieron desempeños iguales o mayores que las granulometrías que pasaron abajo o arriba de la misma.
- La Norma N.CMT.4.04/03 “Materiales pétreos para mezclas asfálticas” de la Secretaría de Comunicaciones y transportes en su punto D (Carpetas asfálticas para granulometría densa) presenta un cambio en los requisitos, los cuales fueron tomados de la metodología Superpave para la determinación de las granulometrías, sin embargo presentan variaciones con respecto a Superpave pero no se presenta una justificación de las misma.
- Entre los cambios más notables es la diferencia existente entre las designaciones de los tamaños máximos nominales, ya que mientras que para Superpave una designación es TMN de $\frac{1}{2}$ ” para la norma SCT es TN de $\frac{3}{4}$ ”.
- Otro punto a tomar en cuenta es que en la Norma de la SCT se divide la especificación de Superpave en dos partes; tránsito de $\leq 1 \times 10^6$ de ESAL (especificaciones por encima de la zona restringida) y tránsito de $> 1 \times 10^6$ de ESAL (especificaciones por debajo de la zona restringida), eliminando la zona restringida sin una explicación aparente.

Desarrollo de la investigación

- Se debe reevaluar el concepto de contenido óptimo de asfalto debido a que existe un rango de contenidos de asfalto en donde se cumplen con las especificaciones volumétricas de la mezcla asfáltica.
- Las granulometrías 1 y 3 del banco de material 1 presentan propiedades volumétricas similares a pesar de tener granulometrías en puntos casi opuestos de la especificación.

- Para el caso del banco de material 1, la granulometría que presento un mejor desempeño, en lo que a propiedades volumétricas se refiere, fue la granulometría 2, confirmando lo encontrado en la revisión bibliográfica, ya que esta granulometría atraviesa la zona restringida y sin embargo tiene un desempeño superior.
- Mezclas de agregados con altos porcentajes de finos redondeados (arena de río) no son adecuados para la elaboración de mezclas asfálticas para pavimentación.
- Las propiedades físicas del agregado pétreo ya sea en forma individual o mediante interacción de las mismas ocasionan alteraciones en las características de compactación de las mezclas asfálticas, las cuales pueden inducir errores durante la determinación de las propiedades volumétricas.
- De acuerdo con los materiales y granulometrías evaluadas, se puede determinar que el polígono de vacíos es una herramienta eficaz para identificar la susceptibilidad a la variación de las propiedades volumétricas por cambios en la fuente de agregado o en la granulometría.
- Se puede concluir que la granulometría es la que presenta un mejor desempeño. Al ser una granulometría que atraviesa la zona de restricción deja en duda la conveniencia de utilizar la zona de restricción como un parámetro de rechazo, tanto para el caso de las especificaciones de Superpave como de SCT.
- Es conveniente reevaluar los límites superiores e inferiores de las especificaciones con el fin de reducir las mezclas demasiado finas o gruesas las cuales no proveen un desempeño adecuado de la mezcla asfáltica.

Bibliografía

1. Annual Book of ASTM Standard, 4.03 Roofing and Paving Material; Vehicle-Pavement System (2001).
2. Asphalt Institute Performance Graded Asphalt Binder Specification and Testing, Series No 1 (SP-1), (1996).
3. Asphalt Institute, Superpave Mix Design, Series No 2 (SP-2), (1996).
4. Centros de Estudios Experimentales de Obras Públicas – Centro de Estudios de Carreteras, Normas NLT1-Ensayos de carreteras.
5. Garnica P, Delgado H, Gómez J A, Alonso S., Alarcón H A, Aspectos del diseño volumétrico de mezclas asfálticas, Publicación técnica No 246, Instituto Mexicano del Transporte (2004).
6. Garnica P, Delgado H, Gómez J A, Análisis de la influencia del método de compactación en el comportamiento mecánico de mezclas asfálticas, Publicación técnica No 255, Instituto Mexicano del Transporte (2004).
7. Dale Alan Rand, Comparative Analysis of Superpave Gyratory Compactors and TxDoT Gyratory Compactors. Texas Department of Transportation.
8. 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).
9. Sánchez-Leal FJ, Garnica Anguas P, Gómez López J A, Pérez García N, RAMCODES: Metodología Racional para el Análisis de Densificación y Resistencia de Geomateriales Compactados, Publicación Técnica No 200, Instituto Mexicano del Transporte (2002).
10. Instituto Mexicano del Transporte, Manual de Calidad de los Materiales en Secciones Estructurales de Pavimentos Carreteros, Documento Técnico, No 1 (1990).
11. Jorge B Sousa, George Way, John T Harvey and Mickey Hines, Comparison of Mix Design Concepts, Transportation Research Record No 1492.
12. National Asphalt Training Center, Background of Superpave Asphalt Mixtures Design and Analysis, SHRP-A-379, FHWA-SA-95-003.

13. Strategic Highway Research Program, Superior Performing Asphalt Pavement: The Product of the SHRP Asphalt Research Program, SHRP-A-410.
14. Thomas W Kennedy, Ensayos y especificaciones de los ligantes asfálticos en el sistema Superpave, Superpave Center at Austin Texas (USA,1996).
15. Garnica P, Gomez J A, Delgado H, Algunos aspectos de la densificación de las mezclas asfálticas con el compactador giratorio (2003).



‡ Certificación ISO 9001:2000 según documento No 0109-2007-AQ-MEX-EMA,
vigente hasta el 24 de octubre de 2009 (www.imt.mx)

CIUDAD DE MÉXICO

Av Nuevo León 210, piso 2
Col Hipódromo Condesa
06100, México, D F
tel (55) 5265 3190
fax (55) 5265 3190 ext 4711

SANFANDILA

km 12+000, Carretera
Querétaro-Galindo
76700, Sanfandila, Qro
tel (442) 216-9777
fax (442) 216-9671

www.imt.mx
publicaciones@imt.mx