

Diseño de mezclas asfálticas con la metodología Superpave (Nivel 1)

Superpave hot mix asphalt design (Level 1)

H. Delgado Alamilla, Investigador, Instituto Mexicano del Transporte
J. A. Gómez López, Investigador, Instituto Mexicano del Transporte
P. Garnica Anguas, Investigador, Instituto Mexicano del Transporte

RESUMEN. Se proporcionan los parámetros y especificaciones de esta nueva metodología, abarcando las pruebas a los materiales a utilizar y la selección de la granulometría hasta la utilización del compactador giratorio, el cual es una de las mayores aportaciones de este método de diseño de mezclas asfálticas en caliente. Siendo el fin, no solo mencionar los cambios relevantes con respecto al método Marshall, si no también proporcionar un ejemplo práctico de diseño, estableciendo las variables que más influyen en el diseño volumétrico de una mezcla asfáltica.

1 INTRODUCCIÓN

En 1987 el Strategic Highway Research Program (SHRP) fue establecido por el Congreso de los Estados Unidos, con un presupuesto de 150 millones de dólares en programas de investigación a fin de mejorar el desempeño y duración de las carreteras volviéndolas más seguras tanto para automovilistas como para los trabajadores de las mismas. Iniciando el desarrollo de un nuevo sistema para especificar materiales asfálticos, el producto final del programa es un nuevo sistema llamado Superpave (*Superior Performing Asphalt Pavement*). Representa una tecnología provista de tal manera que pueda especificar cemento asfáltico y agregado mineral, desarrollar diseños de mezclas asfálticas; analizar y establecer predicciones del desempeño del pavimento. Este método evalúa los componentes de la mezcla asfáltica en forma individual (agregado mineral y asfaltos) y su interacción cuando están mezclados. Esto debido a que el desempeño de la mezcla es afectado tanto por las propiedades individuales de los componentes, como su reacción combinada en el sistema. El cemento asfáltico actúa como un agente ligante que aglutina las partículas de agregado convirtiéndola en una masa densa e impermeable al agua. Cuando los materiales son ligados, el agregado mineral actúa como un marco de piedra que imparte fuerza y resistencia al sistema.

2 PRUEBAS A LOS MATERIALES

Los métodos de diseño de laboratorio usualmente utilizados Marshall y Hveem, no incorporaban criterios sobre agregados en sus procedimientos, a la inversa, el criterio de agregados está directamente incorporado dentro del procedimiento Superpave.

Pruebas al agregado mineral

Las pruebas a los agregados están clasificadas en dos grupos: de consenso y de origen

De consenso

- Angularidad del agregado grueso
- Angularidad del agregado fino (AASHTO TP 33)
- Partículas alargadas y aplanadas (ASTM D4791)
- Equivalente de arena (ASTM D2419)

De origen

- La prueba de desgaste de Los Ángeles (ASTM C131)
- Intemperismo acelerado (ASTM C88)
- Materiales deletéreos (AASHTO T 11)

Pruebas al ligante asfáltico

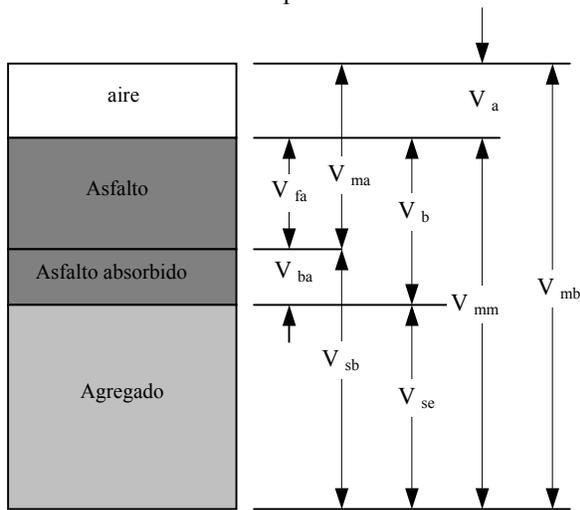
Existe una amplia gama de equipo y pruebas para evaluar a los ligantes asfálticos, para el caso del diseño volumétrico en laboratorio (Nivel 1), solamente se necesitará realizar pruebas en el viscosímetro rotacional para determinar las temperaturas de mezclado y compactación, por medio de la elaboración de la carta de viscosidad. Norma ASTM D4402 *Standard Method for Viscosity Determination of Unfilled Asphalt Using the Brookfield Thermosel Apparatus*.

3 PARÁMETROS VOLUMÉTRICOS

Las propiedades volumétricas de la mezcla asfáltica compactada forman parte fundamental en la selección del contenido óptimo de asfalto. Los parámetros más importantes son; los vacíos de aire (V_a), vacíos en el agregado mineral (VMA), vacíos llenados con asfalto (VFA), y contenido de asfalto efectivo (P_{be}), estos

proporcionan una indicación del probable funcionamiento de la mezcla asfáltica.

En la Figura 1 se presenta un diagrama de componentes de una mezcla asfáltica compactada.



V_{ma} = Volumen de vacíos en agregado mineral

V_{mb} = Volumen total de la mezcla asfáltica.

V_{mm} = 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 1 Diagrama de componentes de una HMA

4 SELECCIÓN DE LA GRANULOMETRÍA

Para especificar la granulometría, Superpave ha modificado el enfoque de la granulometría Marshall. Emplea el exponente 0.45 en la carta de granulometría (gráfica de Fuller). Esta carta usa una técnica gráfica única para juzgar la distribución de tamaños acumulados de partículas de una mezcla de agregados. Las ordenadas de la carta son los porcentajes que pasan; las abscisas, en escala aritmética, representan las aberturas de los tamices en mm, elevadas a la potencia 0.45. Un rango importante de esta carta es la línea 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). 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. Para especificar la granulometría del agregado, se emplean dos conceptos adicionales: puntos de control y una zona restringida. Los puntos de control son puntos de paso obligado para la curva granulométrica y dependen del tamaño nominal del agregado, un tamaño intermedio (2.36 mm) y un tamaño de finos (0.075 mm). Por su parte, la zona restringida se ubica entre los tamaños intermedios (4.75 ó 2.36 mm) y 0.3 mm. Forma una banda por la cual la curva granulométrica no deberá pasar. Las granulometrías que violan la zona restringida poseen un esqueleto granular débil que depende demasiado de la rigidez del cemento asfáltico para alcanzar una buena con resistencia al corte en la mezcla asfáltica. La Figura 2 muestra un esquema para un tamaño máximo de agregado de 19 mm.

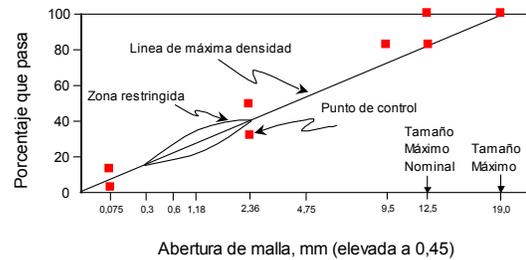


Figura 2. Límites para las granulometrías Superpave

5 DETERMINACIÓN DEL PORCENTAJE DE ASFALTO INICIAL

Después de haber determinado las propiedades del agregado y la granulometría de diseño, se calcula el porcentaje de asfalto inicial mediante las fórmulas siguientes

$$G_{se} = G_{sb} + 0,8(G_{sa} - G_{sb}) \quad (1)$$

G_{se} = Gravedad específica efectiva del agregado

G_{sa} = Gravedad específica aparente del agregado (ASTM C127 y C128)

G_{sb} = Gravedad específica neta del agregado (ASTM C127 Y C128)

$$V_{ba} = \frac{P_s - (1 - V_a)}{\left(\frac{P_b}{G_b} + \frac{P_s}{G_{se}}\right)} \times \left(\frac{1}{G_{sb}} - \frac{1}{G_{se}}\right) \quad (2)$$

V_{ba} = Volumen de asfalto absorbido, cm^3/cm^3 de mezcla

P_s = Porcentaje de agregado con respecto a la mezcla total (suponer 0,95)

P_b = Porcentaje de asfalto con respecto a la mezcla total (suponer 0,05)

G_b = Gravedad específica del asfalto

V_a = volumen de vacíos de aire (suponer $0,04 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ de mezcla)

$$V_{be} = 0,176 - 0,0675 \log(S_n) \quad (3)$$

V_{be} = Volumen de asfalto efectivo

S_n = tamaño máximo nominal de la mezcla de agregados (mm)

$$P_{bi} = \frac{G_b \times (V_{be} + V_{ba})}{(G_b \times (V_{be} + V_{ba}) + W_s)} \times 100 \quad (4)$$

P_{bi} = Porcentaje de asfalto inicial, con respecto a la mezcla total.

W_s = Masa del agregado, gramos

$$W_s = \frac{P_s \times (1 - V_a)}{\left(\frac{P_b}{G_b} + \frac{P_s}{G_{se}}\right)} \quad (5)$$

Como se pudo observar en las fórmulas anteriores, los parámetros de mayor influencia en la selección del contenido inicial de asfalto, son las densidades del agregado (G_{sb} , G_{sa} y G_{se}) y los porcentaje de asfalto y de agregado mineral utilizados. En La Figura 3 se exhibe una representación de estos valores en la mezcla asfáltica compactada.

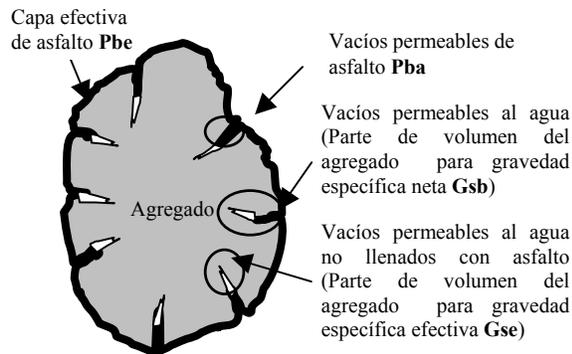


Figura 3 Parámetros de la mezcla asfáltica

6 DEFINIR EL ESFUERZO DE COMPACTACIÓN

Una de las grandes diferencias del Superpave con respecto a las metodologías antiguas (Marshall) es el tipo de compactación. El compactador giratorio es posiblemente la mayor aportación del Superpave, este equipo simula de mejor forma las densidades y acomodo de partículas de la mezcla asfáltica encontradas en el campo. Los parámetros de compactación son la presión vertical (600 kPa), ángulo de giro (1,25 °), la velocidad de rotación (30 rev/min) y el número de giros. En la Figura 4 se puede observar una representación de la compactación giratoria.

El esfuerzo de compactación esta en función de los ejes equivalentes (ESALs). Los ESALs de diseño es el nivel de tránsito esperado para el carril de diseño en un periodo de 20 años. Se debe determinar los ESALs de diseño a los 20 años para seleccionar un valor correcto de $N_{diseño}$. En

la Tabla 1 se presentan los diferentes rangos de esfuerzos de compactación.

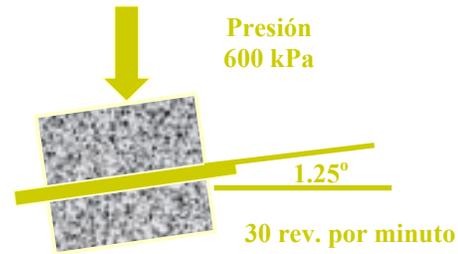


Figura 4 Esquema de la compactación giratoria

Tabla 1 Esfuerzos de compactación

ESALs de diseño (millones)	Parámetros de compactación		
	$N_{inicial}$	$N_{diseño}$	$N_{máximo}$
< 0,3	6	50	75
0,3 a 3	7	75	115
3 a 30	8	100	160
> 30	9	125	205

Se pueden observar que para un ESALs de diseño existen tres valores de compactación

$N_{inicial}$ = es el número de giros que produce la mínima compactación que se debe presentar en el campo

$N_{diseño}$ = es el número de giros que se necesitan para producir la compactación de diseño en campo

$N_{máximo}$ = es el número de giros que produce la máxima compactación que se debe presentar en el campo.

Los requerimientos que debe cumplir cada valor de N, se pueden observar en la Tabla 2.

Tabla 2 requerimientos de densidad

ESALs de diseño (millones)	Densidad requerida (porcentaje de G_{mm})		
	$N_{inicial}$	$N_{diseño}$	$N_{máximo}$
< 0,3	≤ 91,5	96,0	98,0
0,3 a 3	≤ 90,5		
3 a 30	≤ 89,0		
> 30	≤ 89,0		

7 PROCEDIMIENTO

- Se deberán elaborar 12 probetas, cuatro porcentajes de asfalto ($P_{bi} \pm 0,5\% +1,0\%$) con tres réplicas.
- La densificación de la mezcla asfáltica se deberá realizar de acuerdo con el número de giros

establecidos en el $N_{\text{diseño}}$ para el ESALs determinado. Los parámetros de compactador giratorio son :Presión vertical – 600 kPa; ángulo de giro-1,25; velocidad de rotación-30rev/min.

- De acuerdo con la gráfica de viscosidad-temperatura, se determinarán las temperaturas de mezclado y compactación, que correspondan a los rangos de viscosidades de $0,28 \pm 0,03$ Pa.s y $0,17 \pm 0,02$ Pa.s, respectivamente.
- Se deberán realizar dos pruebas a la mezcla asfáltica con el fin de conocer sus propiedades volumétricas:

Gravedad específica teórica máxima, esta prueba se realiza en la mezcla asfáltica en forma suelta, mediante la Norma ASTM D2041

$$G_{mm} = \frac{A}{A+B-C} \quad (6)$$

G_{mm} = gravedad específica teórica máxima

A = masa de la muestra seca, g

B = masa del picnómetro con agua a 25 °C, g

C = masa del picnómetro con agua y muestra a 25 °C, g

Gravedad específica neta de la mezcla asfáltica compactada, esta prueba se realiza en la mezcla asfáltica compactada, mediante la Norma ASTM D1188 o D2726, la selección de la Norma a utilizar dependerá del porcentaje de absorción de la probeta.

$$G_{mb} = \frac{W_a}{W_{ss} - W_w} \quad (7)$$

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

W_a = masa de la probeta en el aire

W_w = masa de la probeta en el agua

W_{ss} = masa de la probeta saturada y superficialmente seca

- Se deberá calcular los parámetros volumétricos; vacíos en el agregado mineral (VAM), vacíos llenos de asfalto (VFA) y vacíos de aire (V_a), a continuación se presentan las fórmulas de cada parámetro volumétrico y la especificación de cada parámetro.

$$V_a = 100 \times \frac{G_{mm} - G_{mb}}{G_{mm}} \quad (8)$$

Para este parámetro la especificación establece un rango de 3 a 5 % de vacíos de aire.

V_a = porcentaje de vacíos de aire (%)

G_{mm} = gravedad específica teórica máxima

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

$$VMA = 100 - \frac{G_{mb} \times P_s}{G_{sb}} \quad (9)$$

VMA = Vacíos en el agregado mineral (%)

Los valores mínimos de VMA, se presentan en la Tabla 3

Tabla 3 Requerimientos de Superpave para el VMA

Tamaño máximo nominal del agregado	Mínimo % de VMA
9.5 mm	15.0
1.25 mm	14.0
19 mm	13.0
25 mm	12.0
37.5 mm	11.0

$$VFA = 100 \times \frac{VMA - V_a}{VMA} \quad (10)$$

VFA = Vacíos llenos de asfalto

Los rangos de valores en que se debe encontrar el VFA se presentan en la Tabla 4.

Tabla 4 Requerimientos de Superpave para el VFA

ESALs de diseño (millones)	Vacío llenos de asfalto, VFA (Porcentaje mínimo)
< 0,3	70 - 80
0,3 a 3	65 - 75
3 a 30	
> 30	

- Susceptibilidad a la humedad:

Se deberá realizar la prueba de susceptibilidad a la humedad de la mezcla asfáltica, mediante la Norma AASHTO T283, Susceptibilidad a la humedad por medio del ensayo de tensión indirecta (TSR). Esta prueba tiene como finalidad determinar la pérdida de resistencia que sufre la mezcla asfáltica después de ser acondicionada en un baño María a 60 °C durante 24 h. La susceptibilidad a la humedad es la relación entre el promedio de las probetas acondicionadas entre el promedio de las probetas de control (sin acondicionamiento), se debe tener una relación mínima de 80 %. Las probetas deberán tener un porcentaje de vacíos aire de 7%.

$$TSR = \frac{2000P}{tD\pi} \quad (11)$$

TSR = Ensayo de tensión indirecta

P = carga máxima (N)

t = espesor de la probeta (mm)

D = diámetro de la probeta (mm)

8 EJEMPLO DE CÁLCULO

A continuación se presentan una descripción detallada del diseño de una mezcla asfáltica, tomando en cuenta 4 pasos fundamentales para la selección del diseño.

- Selección de los materiales
- Selección de la granulometría
- Selección del contenido óptimo de asfalto
- Evaluación de la sensibilidad a la humedad.

El tamaño máximo nominal del agregado es de 19 mm y el nivel de tránsito es de 8 000 000 de ESAL's. estos parámetros se utilizarán para determinar la granulometría a utilizar, así como determinar el número de giros en la compactación, propiedades físicas de los agregados y requerimiento volumétricos de la mezcla asfáltica.

Selección de los materiales

Asfalto

Para las condiciones ambientales del lugar se determinó que el asfalto debe ser un PG 64-10, las temperaturas de mezclado de y compactación del asfalto son de 148-152 °C y 139-145 °C respectivamente (Figura 5).

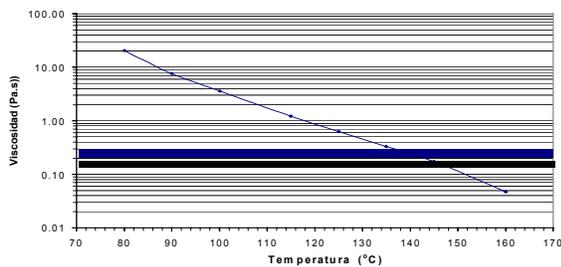


Figura 5 Gráfica de viscosidades

Agregado mineral

Para la selección de la granulometría se utilizó una mezcla de tres agregados. El tamaño máximo de la mezcla de agregados (TMA) es 19 mm (3/4"). En la Figura 6 se presenta la gráfica de Fuller, los puntos de control y zona restringida, al igual que la granulometría de diseño seleccionada.

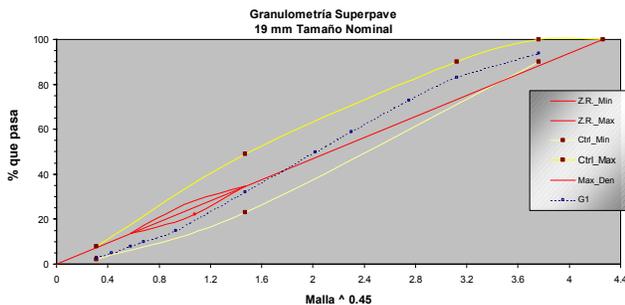


Figura 6. Gráfica de Fuller

Como se puede observar en la Figura anterior, la granulometría cumple con las especificaciones requeridas, debido a que pasa por los puntos de control y no atraviesa la zona restringida. Los resultados de las pruebas de calidad realizadas en la mezcla de agregados se pueden observar en la Tabla 5.

Tabla 5 Pruebas de calidad a la mezcla de agregado

Ensayos	Resultado	Especificación
De consenso		
Angularidad del agregado grueso	100/100	100/100
Angularidad del agregado fino	58	45 mín
Partículas planas y alargadas	2%	10% máx
Equivalente de arena	75%	50% mín
De origen		
Desgaste de los Ángeles	16%	35% máx
Intemperismo acelerado	7%	10% máx
Densidad aparente (Gsa)	2.780	
Densidad neta (Gsb)	2.700	

Selección del contenido óptimo de asfalto

Para seleccionar el contenido óptimo de asfalto, primeramente se debe establecer el porcentaje de asfalto inicial (Fórmulas 1-5). Los resultados de las fórmulas se presentan en la Tabla 6

Tabla 6 Cálculo del asfalto inicial

Fórmula	Resultado
G_{se}	2,760
V_{ba}	0,0187
V_{be}	0,0897
W_s	2,32
P_{bi}	4,6

De acuerdo con el nivel de tránsito establecido se determinaron los siguientes parámetros de compactación; $N_{ini} = 8$, $N_{des} = 100$ y $N_{máx} = 160$. Se compactarán 12 probetas, de acuerdo con los parámetros antes mencionados. Siendo los porcentajes de asfalto utilizados; 4,1; 4,6; 5,1; 5,6 (tres réplicas por porcentaje). En la Figura 7 se presenta el equipo de compactación utilizado.



Figura 7 Compactador giratorio

Después de compactar las probetas se deben realizar dos ensayos a la mezcla asfáltica. Los resultados promedio obtenidos para cada porcentaje de asfalto se presentan en la Tabla 7.

Tabla 7 Pruebas de densidad a la mezcla asfáltica

% de asfalto	Tipo de ensaye	
	G _{mb}	G _{mm}
4,1	2,414	2,604
4,6	2,421	2,581
5,1	2,448	2,562
5,6	2,443	2,542

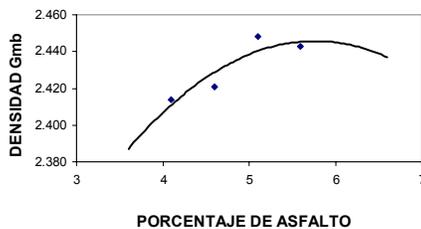
Con los resultados obtenidos de las pruebas de densidad a la mezcla asfáltica, se calcularon los parámetros volumétricos que se utilizarán para la selección del contenido óptimo de asfalto, los resultado de los cálculo se pueden observar en la Tabla 8.

Tabla 8 Propiedades volumétricas

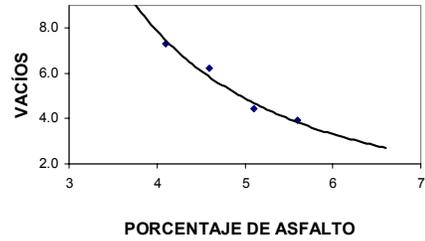
% de asfalto	Propiedades volumétricas (%)		
	V _a	VMA	VFA
4,1	7,3	17,1	57,3
4,6	6,2	17,3	64,1
5,1	4,4	16,8	73,6
5,6	3,9	17,4	77,5

Para la determinación del contenido óptimo de asfalto se utilizan comparaciones entre el porcentaje y las propiedades volumétricas.

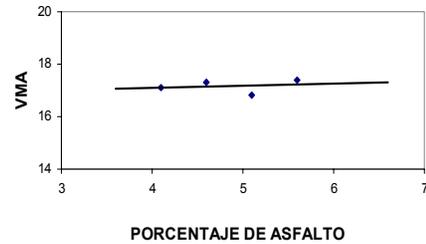
Primeramente se selecciona el porcentaje de vacíos de aire que se quiere obtener, en este caso se seleccionó la mitad del rango (4%), para este valor se obtuvo un porcentaje de asfalto de 5,3% (Figura 8.b), con este porcentaje de asfalto se entra en las Figura 8.c y 8.d para obtener los valores de VMA y VFA, los cuales son 17,5 y 73 respectivamente. Como ambos valores cumplen con las especificaciones Superpave (Tabla 3 y 5), se acepta como el 5,3% como el contenido óptimo de asfalto.



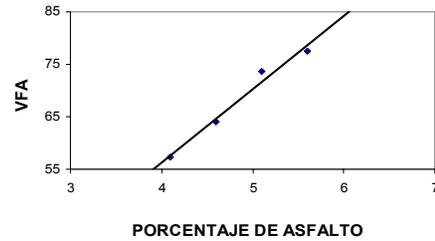
a



b



c



d

Figura 8 Gráficas para el diseño Superpave

Sensibilidad a la humedad

Se elaboraron 6 probetas para la prueba de tensión indirecta (TSR), las primeras tres se ensayaron sin acondicionar (25 °C), las tres restantes se colocaron en un baño Maria a 60 °C durante 24 h, para después ensayarse a 25 °C. Los resultados volumétricos se presentan en la Tabla 9 y los de las prueba de tensión indirecta en la Tabla 10.

Tabla 9 Propiedades volumétricas

Probeta	G _{mb}	G _{mm}	V _a (%)
1	2,373	2,558	7,2
2	2,370		7,3
3	2,372		7,3
4	2,373		7,2
5	2,371		7,3
6	2,373		7,2

Tabla 10 Resultados de ensayo

robeta	Diámetro (mm)	Espesor (mm)	Carga (N)	TSR	Promedio
1	150	99,3	20 803	889	872
2	150	99,2	20 065	858	
3	150	99,3	20 354	870	
4	150	99,2	16 720	713	745
5	150	99,4	16 484	704	
6	150	99,4	17 441	745	

$$TSR(\%) = \frac{745}{872} \times 100 = 82,6\% \geq 80\%$$

Como se puede observar en el cálculo anterior, la mezcla asfáltica cumple con la especificación de susceptibilidad a la humedad, por lo tanto los resultados de diseño se presentan en la Tabla 11

Tabla 11 Resultados del diseño

Parámetro	Resultado
Va (%)	4
VMA (%)	17,5
VFA	73
TMA	19 mm
Asfalto	PG 64 -10
Densidad	2,440
Susceptibilidad a la humedad	86 %

9 BIBLIOGRAFÍA

Asphalt Institute Performance Graded Asphalt Binder Specification and Testing, Series No.1 (SP-1), (1996).

Asphalt Institute, Superpave Mix Design, Series No.2 (SP-2), (1996).

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).

Garnica P., Gomez J. A., Delgado H., 2003, Algunos aspectos de la densificación de las mezclas asfálticas con el compactador giratorio, Publicación técnica No. 228, Instituto Mexicano del Transporte

Rico A, Orozco J. M., Tellez R., Pérez A, 1990, Manual de Calidad de los Materiales en Secciones Estructurales de Pavimentos Carreteros, Documento Técnico, No. 1, Instituto Mexicano del Transporte.

Annual book of ASTM Standard, 4.03 Roofing and Paving Material; Vehicle-Pavement System (2004).