LIBRO: MMP. MÉTODOS DE MUESTREO Y PRUEBA DE MATERIALES

PARTE: ***4. MATERIALES PARA PAVIMENTOS***

TÍTULO: 05. Materiales Asfálticos, Aditivos y Mezclas

CAPÍTULO: 043. Método de Diseño para Mezclas Asfálticas de Granulometría Discontinua con Fibra

A. CONTENIDO

Este Manual describe el método de diseño para mezclas asfálticas de granulometría discontinua con fibra, a que se refiere la Norma N·CMT·4·05·003, *Calidad de Mezclas Asfálticas para Carreteras*.

B. OBJETIVO

Determinar las proporciones volumétricas del material pétreo, el contenido óptimo de cemento asfáltico y el desempeño de la mezcla asfáltica, y que cumpla con los requisitos de calidad indicados en la Norma N·CMT·4·05·003, *Calidad de Mezclas Asfálticas para Carreteras*.

La Figura 1 de este Manual muestra la secuencia del método de diseño para su mejor comprensión.

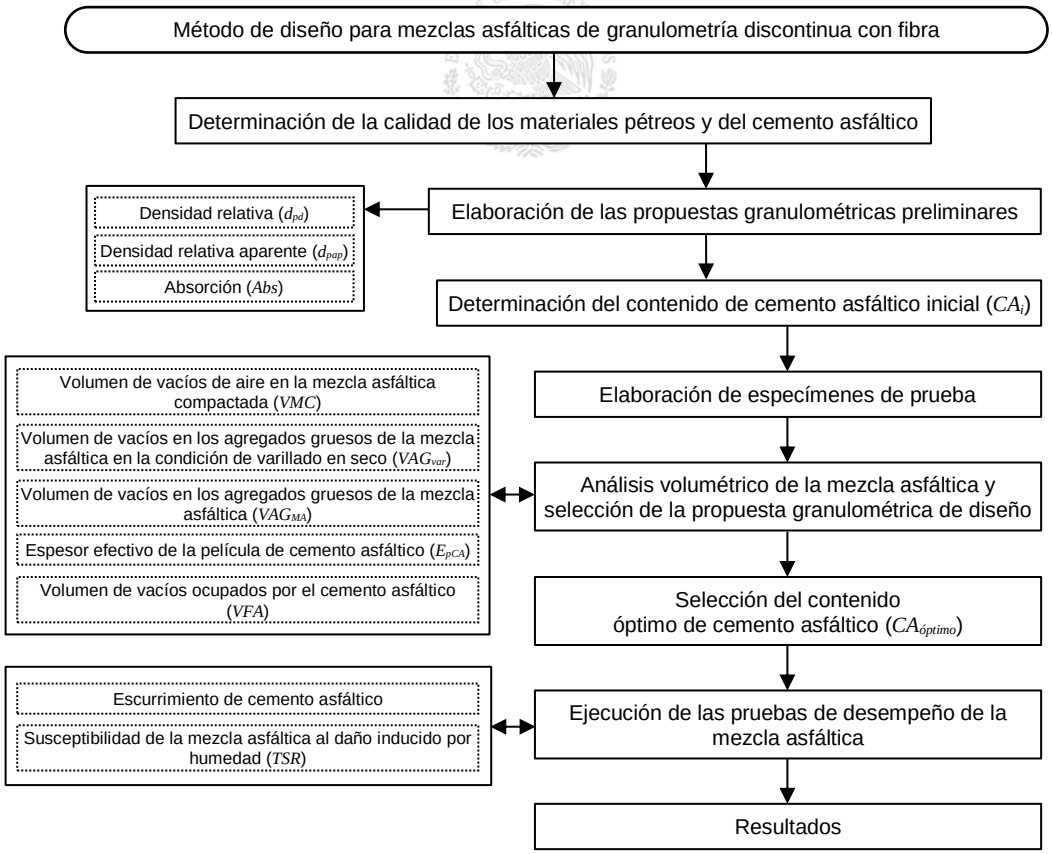


FIGURA 1.- Secuencia del proceso para el diseño de la mezcla asfáltica de granulometría discontinua con fibra

C. REFERENCIAS

Son referencias de este Manual, las Normas:

ASTM C29/C29M, *Standard Test Method for Bulk Density ("Unit Weight") and Voids in Aggregate*, publicada por ASTM international, en EUA, en el año 2017.

AASHTO R30, *Standard Practice for Mixture Conditioning of Hot-Mix Asphalt (HMA)*, publicada por AASHTO, en EUA, en el año 2022.

AASHTO T305, *Standard Method of Test for Determination of Draindown Characteristics in Uncompacted Asphalt Mixtures*, publicada por AASHTO, en EUA, en el año 2022.

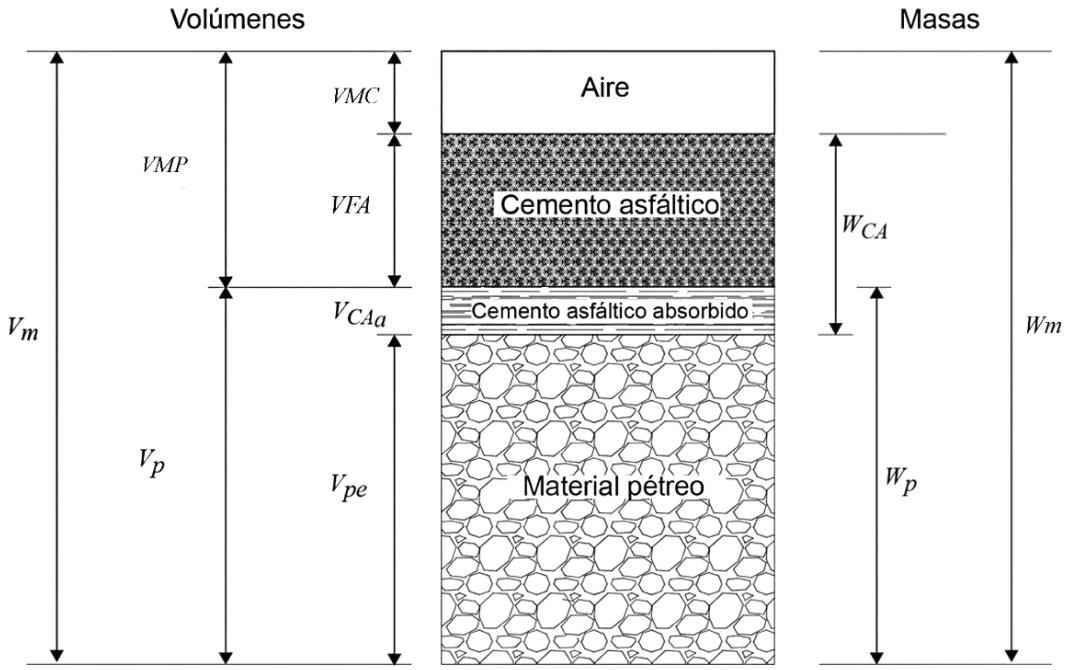
Además, este Manual se complementa con las siguientes:

NORMAS Y MANUALES	DESIGNACIÓN
Ejecución de Proyecto de Pavimentos Asfálticos ……..	N·PRY·CAR·5·01·001
Materiales Pétreos para Mezclas Asfálticas ..…….....	N·CMT·4·04
Calidad de Mezclas Asfálticas para Carreteras ..…….....	N·CMT·4·05·003
Calidad de Cementos Asfálticos según su Grado de Desempeño (PG) ……..	N·CMT·4·05·004
Muestreo de Materiales Pétreos para Mezclas Asfálticas ..…….....	M·MMP·4·04·001
Densidades Relativas y Absorción de Materiales Pétreos para Mezclas Asfálticas ……...	M·MMP·4·04·003
Muestreo de Materiales Asfálticos ..……..	M·MMP·4·05·001
Susceptibilidad de las Mezclas Asfálticas Compactadas al Daño Inducido por Humedad ……..	M·MMP·4·05·052
Compactación de Mezclas Asfálticas en Caliente con el Compactador Giratorio……	M·MMP·4·05·058
Densidad Relativa Teórica Máxima de Mezclas Asfálticas ……..	M·MMP·4·05·062
Densidad, Densidad Relativa y Absorción de Mezclas Asfálticas Compactadas Absorbentes ……..	M·MMP·4·05·063
Selección y Clasificación del Grado de Desempeño (PG) de Cementos Asfálticos ……...	M·MMP·4·05·064
Densidad Relativa del Cemento Asfáltico ……	M·MMP·4·05·065

COMUNICACIONES
SECRETARÍA DE INFRAESTRUCTURA, COMUNICACIONES Y TRANSPORTES

D. DEFINICIONES

Se establecen las siguientes definiciones consideradas en el diseño volumétrico de las mezclas asfálticas, representadas en la Figura 2 de este Manual, como componentes de una muestra de mezcla asfáltica compactada.



Donde:

COMUNICACIONES
SECRETARÍA DE INFRAESTRUCTURA, COMUNICACIONES Y TRANSPORTES

V_m = Volumen de la muestra

VMP = Volumen de vacíos en el material pétreo

V_p = Volumen del material pétreo

VMC = Volumen de vacíos de aire en la mezcla asfáltica compactada

VFA = Volumen de vacíos ocupados por el cemento asfáltico

V_{CAa} = Volumen de cemento asfáltico absorbido por el material pétreo

V_{pe} = Volumen del material pétreo efectivo

W_m = Masa de la muestra

W_{CA} = Masa del cemento asfáltico

W_p = Masa del material pétreo

FIGURA 2.- Esquema de una muestra de mezcla asfáltica

D.1. CONTENIDO DE CEMENTO ASFÁLTICO (CA)

El contenido de cemento asfáltico es la cantidad en masa de cemento asfáltico que se agrega en la mezcla asfáltica y se expresa como porcentaje respecto de la masa de la mezcla asfáltica.

D.2. CONTENIDO DE CEMENTO ASFÁLTICO ABSORBIDO (CA_a)

El contenido de cemento asfáltico absorbido es la porción de cemento asfáltico que se agrega en la mezcla asfáltica y que es absorbida por el material pétreo y se expresa como porcentaje respecto de la masa del material pétreo.

D.3. CONTENIDO DE CEMENTO ASFÁLTICO EFECTIVO (CA_e)

El contenido de cemento asfáltico efectivo es el contenido de cemento asfáltico en la mezcla asfáltica menos la porción de cemento asfáltico absorbido por el material pétreo. Se expresa como porcentaje respecto de la masa de la mezcla asfáltica compactada.

D.4. DENSIDAD RELATIVA TEÓRICA MÁXIMA DE LA MEZCLA ASFÁLTICA SUELTA (d_{mm})

La densidad relativa teórica máxima es la relación entre la masa de un volumen dado de mezcla asfáltica y la masa de igual volumen de agua para un cierto contenido de cemento asfáltico, sin considerar el volumen de los vacíos de aire. La densidad teórica máxima se determina con la mezcla asfáltica suelta en el laboratorio de acuerdo con el procedimiento indicado en el Manual M·MMP·4·05·062, *Densidad Relativa Teórica Máxima de Mezclas Asfálticas*.

D.5. MASA VOLUMÉTRICA DE LA MEZCLA ASFÁLTICA (γ_m)

La masa volumétrica representa la relación de la masa de la mezcla asfáltica entre su volumen.

D.6. VOLUMEN DE VACÍOS DE AIRE EN LA MEZCLA ASFÁLTICA COMPACTADA (VMC)

Los vacíos de aire en la mezcla asfáltica compactada corresponden al volumen de aire que hay entre las partículas de material pétreo cubiertas de cemento asfáltico. Se expresa como porcentaje respecto del volumen de la mezcla asfáltica compactada.

D.7. VOLUMEN DE VACÍOS EN EL MATERIAL PÉTREO (VMP)

Representa el volumen de vacíos entre las partículas del material pétreo de una mezcla asfáltica compactada y se integra por vacíos de aire y el contenido de cemento asfáltico efectivo, no incluye el cemento asfáltico absorbido por el material pétreo. Se expresa como porcentaje respecto del volumen de la mezcla asfáltica compactada.

D.8. VOLUMEN DE VACÍOS OCUPADOS POR EL CEMENTO ASFÁLTICO (VFA)

Es el porcentaje de vacíos ocupados con cemento asfáltico, expresado como porcentaje respecto del volumen de vacíos en el material pétreo (VMP).

E. REQUISITOS PARA EL DISEÑO

E.1. Para el diseño de las mezclas asfálticas de granulometría discontinua con fibra, se contará previamente con la siguiente información:

- El diseño del pavimento, conforme a lo establecido en la Norma N·PRY·CAR·5·01·001, *Ejecución de Proyecto de Pavimentos Asfalticos*.
- El tipo de cemento asfáltico según su grado de desempeño (PG) especificado en el proyecto o aprobado por la Secretaría, conforme a lo establecido en el Manual M·MMP·4·05·064, *Selección y Clasificación del Grado de Desempeño (PG) de Cementos Asfálticos*.
- El tamaño nominal del material pétreo de la mezcla asfáltica indicado en el proyecto o aprobado por la Secretaría.

E.2. Como consideración para el diseño, en la Tabla 1 de este Manual, se indica la propiedad y la nomenclatura que la identifica en el procedimiento para el diseño de la mezcla, junto a su equivalencia con las normas ASTM y AASHTO a las que se refiere la Cláusula C. de este Manual.

TABLA 1.- Propiedad, nomenclatura y equivalencia ASTM o AASHTO

Propiedad	Nomenclatura		Equivalencia ASTM o AASHTO
	SICT	ASTM o AASHTO	
Volumen de la muestra	V_m	V_{mb}	*Volume of compacted mixture*
Volumen de vacíos en el material pétreo	VMP	VMA	*Voids in the mineral aggregate*
Volumen del material pétreo	V_p	V_{sb}	*Bulk (dry) volume of the aggregate*
Volumen de vacíos de aire en la mezcla asfáltica compactada	VMC	P_a	*Percentage of air voids by volume*
Volumen de cemento asfáltico absorbido por el material pétreo	V_{CAa}	V_{ba}	*Volume of absorbed binder*
Volumen del material pétreo efectivo	V_{pe}	V_{se}	*Effective volume of the aggregate*
Masa de la muestra	W_m	M_{mb}	*Mass of the total mix*
Masa del cemento asfáltico	W_{CA}	M_b	*Mass of the binder*
Masa del material pétreo	W_p	M_s	*Mass of the aggregate*
Densidad relativa del cemento asfáltico	d_{CA}	G_b	*Binder specific gravity*
Densidad relativa del material pétreo seco	d_{pd}	G_{sb}	*Bulk (dry) specific gravity of aggregate*
Densidad relativa aparente del material pétreo seco	d_{pap}	G_{sa}	*Apparent specific gravity of the aggregate*
Densidad relativa efectiva del material pétreo	d_{pe}	G_{se}	*Effective specific gravity of the aggregate*
Densidad relativa de la mezcla asfáltica compactada	d_{mc}	G_{mb}	*Bulk Specific Gravity of Compacted Mixture*
Densidad relativa teórica máxima de la mezcla asfáltica	d_{mm}	G_{mm}	*Theoretical maximum specific gravity of an asphalt mixture*
Contenido de cemento asfáltico	CA	P_b	*Percent binder*

COMUNICACIONES
SECRETARÍA DE INFRAESTRUCTURA, COMUNICACIONES Y TRANSPORTES

F. TRABAJOS PREVIOS

F.1. DETERMINACIÓN DE LA CALIDAD DE LOS MATERIALES PÉTREOS

De las muestras de material pétreo obtenidas según se establece en el Manual M·MMP·4·04·001, *Muestreo de Materiales Pétreos para Mezclas Asfálticas*, se comprueba que el material pétreo retenido en la malla con abertura de 4,75 mm (N°4), así como el material pétreo retenido en la malla con abertura de 0,075 mm (N°200), cumplan con lo establecido en la Norma N·CMT·4·04, *Materiales Pétreos para Mezclas Asfálticas*.

F.2. DETERMINACIÓN DE LA CALIDAD DEL CEMENTO ASFÁLTICO

De las muestras del cemento asfáltico seleccionado para el diseño de la mezcla, obtenidas según se establece en el Manual M·MMP·4·05·001, *Muestreo de Materiales Asfálticos*, se corrobora que:

F.2.1. El cemento asfáltico según su grado de desempeño (PG) indicado en el proyecto o aprobado por la Secretaría, cumpla con los requisitos de calidad indicados en la Tabla 2 de la Norma N·CMT·4·05·004, *Calidad de Cementos Asfálticos según su Grado de Desempeño (PG)*.

F.2.2. Cuando no se haya indicado en el proyecto el tipo de cemento asfáltico, la determinación del grado de desempeño (PG) requerido se hará de acuerdo con lo indicado en el Manual M·MMP·4·05·064, *Selección y Clasificación del Grado de Desempeño (PG) de Cementos Asfálticos*, y se comprobará que éste cumpla con los requisitos de calidad que se indican en la Tabla 2 de la Norma N·CMT·4·05·004, *Calidad de Cementos Asfálticos según su Grado de Desempeño (PG)*.

F.3. DETERMINACIÓN DE LA CALIDAD DE LAS FIBRAS

Para las fibras que se adicionen a la mezcla asfáltica de granulometría discontinua con fibra, se comprueba que cumplan con el tipo, contenido y comportamiento propuesto en el proyecto mediante un certificado de calidad. Las fibras utilizadas serán productos no nocivos para la salud.

G. PROPUESTAS GRANULOMÉTRICAS PRELIMINARES

Después de comprobar que los materiales pétreos para el diseño de la mezcla asfáltica cumplen con los requisitos de calidad, se elaboran tres propuestas granulométricas preliminares, las cuales cumplirán con los límites granulométricos establecidos en la Norma N·CMT·4·04, *Materiales Pétreos para Mezclas Asfálticas*, de acuerdo con el tamaño nominal del material pétreo seleccionado.

G.1. SELECCIÓN DE LAS FRACCIONES DE MATERIAL PÉTREO

G.1.1. Las propuestas granulométricas preliminares considerarán el número máximo de fracciones de material pétreo que se pueden utilizar en el diseño, dependiendo del número de tolvas disponibles en la planta, considerando que cada tolva será para una única fracción de material pétreo. También tomarán en cuenta el tipo de planta que se utilizará para la elaboración de la mezcla asfáltica. Se sugiere que la planta tenga al menos entre 3 y 4 tolvas.

G.1.2. En la combinación de las fracciones de los materiales pétreos para obtener las propuestas granulométricas preliminares, se empleará el método de aproximaciones sucesivas. Se pueden emplear otros métodos gráficos, analíticos o numéricos como ecuaciones lineales y ecuaciones diferenciales, entre otros que estén debidamente justificados.

G.1.3 Se determinan los porcentajes de cada fracción de material pétreo que integrarán las propuestas granulométricas preliminares y se registran, como se muestra en la Tabla 2 de este Manual.

COMUNICACIONES
SECRETARÍA DE INFRAESTRUCTURA, COMUNICACIONES Y TRANSPORTES

TABLA 2.- Fracciones de material pétreo de las propuestas granulométricas preliminares

Tolva	Porcentajes individuales en masa de cada fracción de material pétreo, (%)		
	Propuesta granulométrica preliminar		
	1	2	3
1			
2			
…*n*			

G.1.4. Se determina la granulometría de las tres propuestas preliminares y se registran, como se muestra en la Tabla 3 de este Manual. Se comprueba que cumplan con los límites granulométricos establecidos en la Norma N·CMT·4·04, *Materiales Pétreos para Mezclas Asfálticas*.

TABLA 3.- Granulometría de las propuestas granulométricas preliminares

Malla		Tamaño nominal del material pétreo, ___mm (___ in)		
		Porcentaje que pasa (en masa)		
Abertura mm	Designación	Propuestas granulométricas preliminares		
		1	2	3
19	¾ in			
12,5	½ in			
9,5	⅜ in			
6,3	¼ in			
4,75	N°4			
2	N°10			
0,85	N°20			
0,075	N°200			

G.2. CÁLCULO DE LA DENSIDAD RELATIVA, DENSIDAD RELATIVA APARENTE Y ABSORCIÓN DE LAS PROPUESTAS GRANULOMÉTRICAS PRELIMINARES

Se determina la densidad relativa ($d_{pd1...n}$), la densidad relativa aparente ($d_{pap1...n}$) y la absorción de cada fracción de material pétreo, de acuerdo con lo indicado en el Manual M·MMP·4·04·003, *Densidades Relativas y Absorción de Materiales Pétreos para Mezclas Asfálticas*.

G.2.1. Se determina la densidad relativa del material pétreo seco (d_{pd}) de cada propuesta granulométrica preliminar, con la siguiente expresión:

$$d_{pd} = \frac{P_1 + P_2 + \cdots + P_n}{\frac{P_1}{d_{pd1}} + \frac{P_2}{d_{pd2}} + \cdots + \frac{P_n}{d_{pdn}}}$$

Donde:

d_{pd} = Densidad relativa del material pétreo seco de la propuesta granulométrica preliminar, (adimensional)

$P_1, P_2, \ldots P_n$ = Porcentajes individuales en masa de cada fracción de la propuesta granulométrica preliminar n, (%)

$d_{pd1}, d_{pd2}, \ldots d_{pdn}$ = Densidad relativa del material pétreo seco de cada fracción de la propuesta granulométrica preliminar n, (adimensional)

COMUNICACIONES
SECRETARÍA DE INFRAESTRUCTURA, COMUNICACIONES Y TRANSPORTES

G.2.2. Se determina la densidad relativa aparente del material pétreo (d_{pap}) de cada propuesta granulométrica preliminar, con la siguiente expresión:

$$d_{pap} = \frac{P_1 + P_2 + \cdots + P_n}{\frac{P_1}{d_{pap1}} + \frac{P_2}{d_{pap2}} + \cdots + \frac{P_n}{d_{papn}}}$$

Donde:

d_{pap} = Densidad relativa aparente del material pétreo de la propuesta granulométrica preliminar, (adimensional)

$P_1, P_2, \ldots P_n$ = Porcentajes individuales en masa de cada fracción de la propuesta granulométrica preliminar n, (%)

$d_{pap1}, d_{pap2}, \ldots d_{papn}$ = Densidad relativa aparente del material pétreo de cada fracción de la propuesta granulométrica preliminar n, (adimensional)

G.2.3. Se determina la absorción del material pétreo (Abs) de cada propuesta granulométrica preliminar, utilizando la siguiente expresión:

$$Abs = \frac{(P_1 \times Abs_{\,p1}) + (P_2 \times Abs_{\,p2}) + \cdots + (P_n \times Abs_{\,pn})}{100}$$

Donde:

Abs = Absorción de la propuesta granulométrica preliminar, (%)

$P_1, P_2, \ldots P_n$ = Porcentajes individuales en masa de cada fracción de la propuesta granulométrica inicial n, (%)

$Abs_{p1}, Abs_{p2}, \ldots Abs_{pn}$ = Absorción del material pétreo de cada fracción de la propuesta granulométrica preliminar n, (adimensional)

G.2.4. Se registran los resultados en la Tabla 4 de este Manual.

TABLA 4.- Propiedades del material pétreo de las propuestas granulométricas

Propiedad	Propuestas granulométricas preliminares		
	1	2	3
d_{pd}			
d_{pap}			
Abs			

H. DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO DE CEMENTO ASFÁLTICO INICIAL

Se determina el contenido de cemento asfáltico inicial (CA_i) para cada propuesta granulométrica preliminar, de acuerdo con lo siguiente:

H.1. CONSIDERACIONES PREVIAS

Para determinar el contenido de cemento asfáltico inicial, se considera que:

H.1.1. El contenido de material pétreo (P_p), expresado como el porcentaje respecto de la masa de la mezcla asfáltica, es de 94 %.

H.1.2. El volumen de vacíos de aire en la mezcla asfáltica compactada (VMC), expresado como porcentaje respecto del volumen de la mezcla asfáltica, es de 4 %.

H.1.3. El contenido de cemento asfáltico (CA), expresado como el porcentaje respecto de la masa de la mezcla asfáltica, es de 6 %.

H.1.4. El contenido de fibra de celulosa será de 0,3% respecto de la masa de la mezcla asfáltica.

H.2. Se calcula la densidad relativa del cemento asfáltico (d_{CA}), de acuerdo con lo indicado en el Manual M·MMP·4·05·065, *Densidad Relativa del Cemento Asfáltico*.

H.3. Se calcula la densidad relativa efectiva inicial del material pétreo (d_{pei}) de cada propuesta granulométrica preliminar, con la siguiente expresión:

$$d_{pei} = d_{pd} + 0{,}8\left(d_{pap} - d_{pd}\right)$$

Donde:

d_{pei} = Densidad relativa efectiva inicial del material pétreo de la propuesta granulométrica preliminar, (adimensional)

d_{pap} = Densidad relativa aparente del material pétreo, (adimensional)

d_{pd} = Densidad relativa del material pétreo seco, (adimensional)

H.4. Se calcula la masa del material pétreo (W_p) de cada propuesta granulométrica preliminar, con la siguiente expresión:

$$W_p = \frac{P_p \times \left(1 - \frac{VMC}{100}\right)}{\frac{CA}{d_{CA}} + \frac{P_p}{d_{pei}}}$$

COMUNICACIONES
SECRETARÍA DE INFRAESTRUCTURA, COMUNICACIONES Y TRANSPORTES

Donde:

W_p = Masa del material pétreo de la propuesta granulométrica preliminar, (g)

P_p = Contenido de material pétreo, (%), expresado como el porcentaje respecto de la masa de la mezcla asfáltica

VMC = Volumen de vacíos de aire en la mezcla asfáltica compactada, (%), expresado como porcentaje respecto del volumen de la mezcla asfáltica

CA = Contenido de cemento asfáltico, (%), expresado como el porcentaje respecto de la masa de la mezcla asfáltica

d_{CA} = Densidad relativa del cemento asfáltico, (adimensional)

d_{pei} = Densidad relativa efectiva inicial del material pétreo, (adimensional)

H.5. Se calcula el volumen de cemento asfáltico absorbido por el material pétreo (V_{CAai}) de cada propuesta granulométrica preliminar, con la siguiente expresión:

$$V_{CAai} = W_p \times \left(\frac{1}{d_{pd}} - \frac{1}{d_{pei}}\right)$$

Donde:

V_{CAai} = Volumen de cemento asfáltico inicial absorbido por el material pétreo de la propuesta granulométrica preliminar, (cm³)

W_p = Masa del material pétreo, (g)

d_{pd} = Densidad relativa del material pétreo seco, (adimensional)

d_{pei} = Densidad relativa efectiva inicial del material pétreo, (adimensional)

COMUNICACIONES
SECRETARÍA DE INFRAESTRUCTURA, COMUNICACIONES Y TRANSPORTES

H.6. Se calcula el volumen de cemento asfáltico efectivo inicial (V_{CAei}), con la siguiente expresión:

$$V_{CAei} = 0{,}176 - 0{,}067\ [\log(Tn)]$$

Donde:

V_{CAei} = Volumen de cemento asfáltico efectivo inicial de la propuesta granulométrica preliminar, (cm³)

T_n = Tamaño nominal del material pétreo, (mm)

H.7. Se calcula el contenido de cemento asfáltico inicial (CA_i) de cada propuesta granulométrica preliminar, de acuerdo a la siguiente expresión:

$$CA_i = \frac{d_{CA}(V_{CAei} + V_{CAai})}{d_{CA}(V_{CAei} + V_{CAai}) + W_p} \times 100$$

Donde:

CA_i = Contenido de cemento asfáltico inicial, (%), de la propuesta granulométrica preliminar, expresado como el porcentaje respecto de la masa de la mezcla asfáltica

d_{CA} = Densidad relativa del cemento asfáltico, (adimensional)

V_{CAei} = Volumen de cemento asfáltico efectivo inicial, (cm³)

V_{CAai} = Volumen de cemento asfáltico inicial absorbido por el material pétreo, (cm³)

W_p = Masa del material pétreo, (g)

I. ELABORACIÓN DE ESPECÍMENES DE PRUEBA

Para cada una de las propuestas granulométricas preliminares, se elaboran los especímenes de prueba como se indica a continuación:

I.1. DETERMINACIÓN DE LA TEMPERATURA DE MEZCLADO Y COMPACTACIÓN

Se comprueban los rangos de viscosidad y temperatura de mezclado y compactación del cemento asfáltico seleccionado, los cuales serán proporcionados por el proveedor del asfalto mediante una carta de viscosidad-temperatura, elaborada con diferentes temperaturas, además de la obtenida por el laboratorio de control de calidad, indicando el método de prueba utilizado, que será reproducible por el diseñador de la mezcla asfáltica de granulometría discontinua con fibra, o por el laboratorio de control de calidad de la obra.

I.2. NÚMERO DE ESPECÍMENES DE PRUEBA

Se elaboran 2 especímenes, realizando lo siguiente:

I.2.1. El cemento asfáltico y el material pétreo se calientan en un horno a la temperatura de mezclado especificada. El cemento asfáltico no se calentará por más de 2 h a la temperatura de mezclado.

I.2.2. El material pétreo, el cemento asfáltico y la fibra de celulosa se mezclan de preferencia en un mezclador mecánico de laboratorio. El mezclado se realiza hasta cubrir completamente las partículas del material pétreo y la fibra con el cemento asfáltico.

I.2.3. Posterior al mezclado, se extiende la mezcla en una charola plana con un espesor homogéneo de entre 25 y 50 mm. La mezcla se cura de acuerdo con lo que indica el procedimiento al que se refiere la Norma AASHTO R30, *Standard Practice for Mixture Conditioning of Hot-Mix Asphalt (HMA)*, durante 2 h ± 5 min para material pétreo con absorción menor o igual a 2 % y 4 h ± 5 min para material pétreo con absorción mayor a 2 %.

I.2.4. Se compactan las mezclas asfálticas de prueba de acuerdo con lo indicado en el Manual M·MMP·4·05·058, *Compactación de Mezclas Asfálticas en Caliente con el Compactador Giratorio*; los especímenes se compactan a 100 giros, comprobando que la presión aplicada sea de 600 ± 18 kPa, con un ángulo exterior de giro de 1,25 ± 0,02°, o a 50 golpes por cara si se utiliza el aparato para compactación Marshall.

J. ANÁLISIS VOLUMÉTRICO DE LA MEZCLA ASFÁLTICA Y SELECCIÓN DE LA PROPUESTA GRANULOMÉTRICA DE DISEÑO

Se realiza el análisis volumétrico de cada una de las propuestas granulométricas preliminares, de acuerdo a lo siguiente:

J.1. DETERMINACIÓN DEL VOLUMEN DE VACIOS DE AIRE EN LA MEZCLA ASFÁLTICA COMPACTADA, (VMC)

J.1.1. Se determina por duplicado la densidad relativa teórica máxima de la mezcla asfáltica suelta (d_{mm}), de acuerdo con el método indicado en el Manual M·MMP·4·05·062, *Densidad Relativa Teórica Máxima de Mezclas Asfálticas*.

J.1.2. Se calcula la densidad relativa efectiva del material pétreo (d_{pe}), mediante la siguiente expresión:

$$d_{pe} = \frac{100 - CA_i}{\frac{100}{d_{mm}} - \frac{CA_i}{d_{CA}}}$$

Donde:

d_{pe} = Densidad relativa efectiva del material pétreo, (adimensional)

d_{mm} = Densidad relativa teórica máxima de la mezcla asfáltica suelta, (adimensional)

CA_i = Contenido de cemento asfaltico inicial, (%), expresado como el porcentaje respecto de la masa de la mezcla asfáltica

d_{CA} = Densidad relativa del cemento asfáltico, (adimensional)

J.1.3. Se comprueba que la densidad relativa aparente del material pétreo (d_{pap}), la densidad relativa efectiva del material pétreo (d_{pe}) y la densidad relativa del material pétreo seco (d_{pd}), cumplan con la siguiente relación:

$$d_{pap} > d_{pe} > d_{pd}$$

Donde:

d_{pap} = Densidad relativa aparente del material pétreo, (adimensional), determinada como se indica en el Inciso G.2.2. de este Manual

d_{pe} = Densidad relativa efectiva del material pétreo, (adimensional), determinada como se indica en el Inciso J.1.2. de este Manual

d_{pd} = Densidad relativa del material pétreo seco, (adimensional), determinada como se indica en el Inciso G.2.1. de este Manual

COMUNICACIONES
SECRETARÍA DE INFRAESTRUCTURA, COMUNICACIONES Y TRANSPORTES

J.1.4. Si la relación a la que se refiere el Inciso anterior no se cumple, se comprueba que la determinación de la densidad relativa del material pétreo seco (d_{pd}) y la densidad relativa teórica máxima de la mezcla asfáltica suelta (d_{mm}) se hayan realizado correctamente.

J.1.5. Se determina la densidad relativa de la mezcla asfáltica compactada (d_{mc}), de acuerdo con lo indicado en el Manual M·MMP·4·05·063, *Densidad, Densidad Relativa y Absorción de Mezclas Asfálticas Compactadas Absorbentes*.

J.1.6. Se determina el volumen de vacíos de aire en la mezcla asfáltica compactada (VMC), de acuerdo con la siguiente expresión:

$$VMC = \left(\frac{d_{mm} - d_{mc}}{d_{mm}}\right) \times 100$$

Donde:

VMC = Volumen de vacíos de aire en la mezcla asfáltica compactada, (%), expresado como porcentaje del volumen total de la mezcla asfáltica

d_{mm} = Densidad relativa teórica máxima de la mezcla asfáltica suelta, (adimensional)

d_{mc} = Densidad relativa de la mezcla asfáltica compactada, (adimensional)

J.1.7. Los resultados obtenidos para cada propuesta granulométrica preliminar se registran en la Tabla 5 de este Manual.

J.2. DETERMINACIÓN DEL VOLUMEN DE VACÍOS EN LOS AGREGADOS GRUESOS DE LA MEZCLA ASFÁLTICA EN CONDICIÓN DE VARILLADO EN SECO (VAG_{var})

J.2.1. Se determina la masa volumétrica seca compacta del material pétreo retenido en la malla con abertura de 4,75 mm (N°4), (γ_{ps}), de acuerdo con la Norma ASTM C29/C29M *Standard Test Method for Bulk Density ("Unit Weight") and Voids in Aggregate*.

J.2.2. Se determina el volumen de vacíos en los agregados gruesos de la mezcla asfáltica en la condición de varillado en seco (VAG_{var}), usando la siguiente expresión:

$$VAG_{var} = \frac{d_{pd}(\gamma_a - \gamma_{ps})}{d_{pd} \times \gamma_a} \times 100$$

Donde:

VAG_{var} = Volumen de vacíos en los agregados gruesos de la mezcla asfáltica en la condición de varillado en seco, (%)

γ_α = Densidad del agua, (kg/m^3), igual a 1 000 kg/m^3

d_{pd} = Densidad relativa del material pétreo seco, (adimensional), determinada como se indica en el Inciso G.2.1. de este Manual

γ_{ps} = Masa volumétrica seca compacta de la fracción gruesa del agregado pétreo, (kg/m^3)

J.2.3. Los resultados obtenidos para cada propuesta granulométrica de diseño se registran en la Tabla 5 de este Manual.

J.3. DETERMINACIÓN DEL VOLUMEN DE VACÍOS EN LOS AGREGADOS GRUESOS DE LA MEZCLA ASFÁLTICA COMPACTADA (VAG_{MA})

COMUNICACIONES
SECRETARÍA DE INFRAESTRUCTURA, COMUNICACIONES Y TRANSPORTES

J.3.1. Se calcula el volumen de vacíos en los agregados gruesos de la mezcla asfáltica compactada (VAG_{MA}), con la siguiente expresión:

$$VAG_{MA} = 100 - \left[\frac{d_{mc}}{d_{pd}} \times P_p\right]$$

Donde:

VAG_{MA} = Volumen de vacíos en los agregados gruesos de la mezcla asfáltica compactada, (%)

d_{mc} = Densidad relativa de la mezcla asfáltica compactada, (adimensional)

d_{pd} = Densidad relativa del material pétreo seco, (adimensional), determinada como se indica en el Inciso G.2.1. de este Manual

P_p = Contenido de material pétreo, (%), expresado como el porcentaje respecto de la masa de la mezcla asfáltica

J.3.2. Los resultados obtenidos para cada propuesta granulométrica preliminar se registran en la Tabla 5 de este Manual.

J.4. DETERMINACIÓN DEL ESPESOR EFECTIVO DE LA PELÍCULA DE CEMENTO ASFÁLTICO (E_{pCA})

J.4.1. Se calcula el espesor efectivo de la película de cemento asfáltico de la mezcla asfáltica, (E_{pCA}), será de 9 µm como mínimo y se calcula de acuerdo con las siguientes expresiones:

$$E_{pCA} = \frac{1\,000 \times [V_{CA} - V_{CAa}]}{S_p \times [100 - CA] \times d_{mc}} \quad \text{y} \quad S_p = \frac{P_{0,30} + P_{0,15} + P_{0,075}}{5}$$

Donde:

E_{pCA} = Espesor efectivo de la película de cemento asfáltico, (μm)

V_{CA} = Volumen total de cemento asfaltico, (%), expresado como el porcentaje respecto del volumen de la mezcla asfáltica

V_{CAa} = Volumen de cemento asfáltico absorbido, (%), expresado como el porcentaje respecto del volumen total de la mezcla asfáltica

CA = Contenido de cemento asfaltico, (%), expresado como el porcentaje respecto de la masa de la mezcla asfáltica

d_{mc} = Densidad relativa de la mezcla asfáltica compactada, (adimensional), determinada como se indica en el Inciso J.1.5. de este Manual

S_p = Superficie del agregado pétreo, (m^2/kg)

$P_{0,30}$ = Porcentaje en masa de material pétreo que pasa la malla con abertura de 0,30 mm (malla N° 50), (%)

$P_{0,15}$ = Porcentaje en masa de material pétreo que pasa la malla con abertura de 0,15 mm (malla N° 100), (%)

$P_{0,075}$ = Porcentaje en masa de material pétreo que pasa la malla con abertura de 0,075 mm (malla N° 200), (%)

J.4.2. Los resultados obtenidos para cada propuesta granulométrica de diseño se registran en la Tabla 5 de este Manual.

J.5. DETERMINACIÓN DEL VOLUMEN DE VACÍOS OCUPADOS POR EL CEMENTO ASFÁLTICO (*VFA*)

COMUNICACIONES
SECRETARÍA DE INFRAESTRUCTURA, COMUNICACIONES Y TRANSPORTES

J.5.1. Se determina el volumen de vacíos ocupados por el cemento asfáltico (VFA), con la siguiente expresión:

$$VFA = \frac{VMP - VMC}{VMP} \times 100$$

Donde:

VFA = Volumen de vacíos ocupados por el cemento asfáltico, (%)

VMP = Volumen de vacíos en el material pétreo, (%)

VMC = Volumen de vacíos de aire en la mezcla asfáltica compactada, (%), expresado como porcentaje del volumen total de la mezcla asfáltica

J.5.2. Los resultados obtenidos para cada propuesta granulométrica preliminar se registran en la Tabla 5 de este Manual.

J.6. SELECCIÓN DE LA PROPUESTA GRANULOMÉTRICA DE DISEÑO

Considerando los resultados registrados en la Tabla 5 de este Manual, se selecciona la propuesta granulométrica de diseño que cumpla simultáneamente con los siguientes criterios:

J.6.1. La propuesta granulométrica de diseño cumplirá con las condiciones que se indican en las siguientes expresiones:

$$VMP \geq VAG_{MA}$$

$$VFA \geq VAG_{MA}$$

$$VMC \geq VAG_{MA}$$

$$VAG_{var} \geq VAG_{MA}$$

Donde:

VMP = Volumen de vacíos en el material pétreo, (%)

VAG_{MA} = Volumen de vacíos en los agregados gruesos de la mezcla asfáltica compactada, (%)

VFA = Volumen de vacíos ocupados por el cemento asfáltico, (%)

VMC = Volumen de vacíos de aire en la mezcla asfáltica compactada, (%)

VAG_{var} = Volumen de vacíos en los agregados gruesos de la mezcla asfáltica en la condición de varillado en seco, (%)

J.6.2. Un espesor efectivo de la película de cemento asfáltico (E_{pCA}) de al menos 9 µm y un valor del volumen de vacíos de aire en la mezcla asfáltica compactada (VMC) de al menos 4 %.

TABLA 5.- Resumen para la selección de la propuesta granulométrica de diseño

Propuesta granulométrica preliminar	CA_i (%)	VMC (%)	VMP (%)	VFA (%)	VAG_{var} (%)	VAG_{MA} (%)	E_{pCA} (µm)
1							
2							
3							

COMUNICACIONES
SECRETARÍA DE INFRAESTRUCTURA, COMUNICACIONES Y TRANSPORTES

K. SELECCIÓN DEL CONTENIDO ÓPTIMO DE CEMENTO ASFÁLTICO ($CA_{óptimo}$)

K.1. Una vez seleccionada la propuesta granulométrica de diseño, se utiliza el siguiente rango de trabajo para la determinación del contenido óptimo de cemento asfáltico, considerando las siguientes variaciones:

- $CA_1 = CA_i$ - 1,0 %
- $CA_2 = CA_i$ - 0,5 %
- $CA_3 = CA_i$
- $CA_4 = CA_i$ + 0,5 %
- $CA_5 = CA_i$ + 1,0 %

K.2. Se elaboran 2 especímenes por cada mezcla asfáltica de prueba, con el contenido de cemento asfáltico indicado en la Fracción anterior de este Manual y el contenido de fibras de celulosa que será de al menos 0,3 % respecto de la masa de la mezcla asfáltica, de manera que en total se elaboren 10 especímenes.

K.3. DETERMINACIÓN DEL VOLUMEN DE VACÍOS DE AIRE EN LA MEZCLA ASFÁLTICA COMPACTADA (VMC) Y VOLUMEN DE VACIOS OCUPADOS POR EL CEMENTO ASFÁLTICO (VFA)

K.3.1. Para la determinación de las densidades relativas teóricas máximas de las mezclas asfálticas sueltas (d_{mm}), necesarias para la determinación de los vacíos de aire en las mezclas asfálticas compactadas (VMC), se puede emplear la fórmula del Inciso J.1.2. de este Manual, ya que la densidad relativa efectiva del material pétreo (d_{pe}) de la propuesta granulométrica elegida no cambia.

K.3.2. Se grafican los contenidos de cemento asfáltico propuestos en el rango de trabajo y los valores de los volúmenes de vacíos de aire en la mezcla asfáltica compactada (VMC), de acuerdo con lo indicado en el Inciso J.1.6. de este Manual, así como el volumen de vacíos del material pétreo (VMP), como se muestra en la Figura 3 de este Manual.

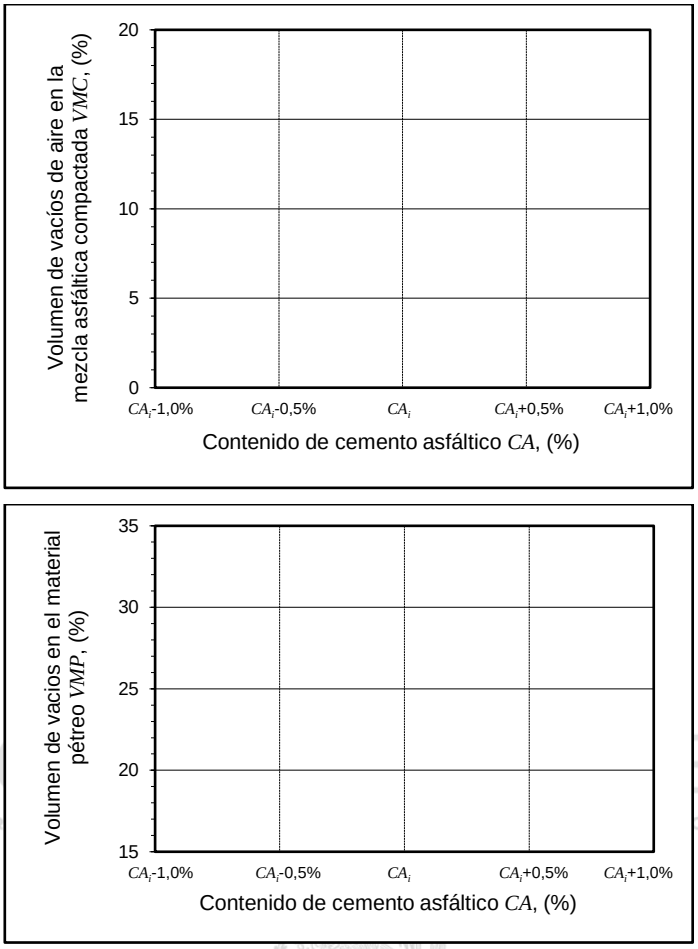


FIGURA 3.- Gráfica del volumen de vacíos de aire en la mezcla asfáltica compactada (*VMC*), volumen de vacíos en el material pétreo (*VMP*) y el contenido de cemento asfáltico (*CA*) del rango de trabajo

K.4. DETERMINACIÓN DEL ESPESOR EFECTIVO DE LA PELÍCULA DE CEMENTO ASFÁLTICO (E_{pCA})

Se grafican los contenidos de cemento asfáltico propuestos en el rango de trabajo y los valores del espesor efectivo de la película de cemento asfáltico (E_{pCA}), determinados de acuerdo con lo indicado en el Inciso J.4.1. de este Manual.

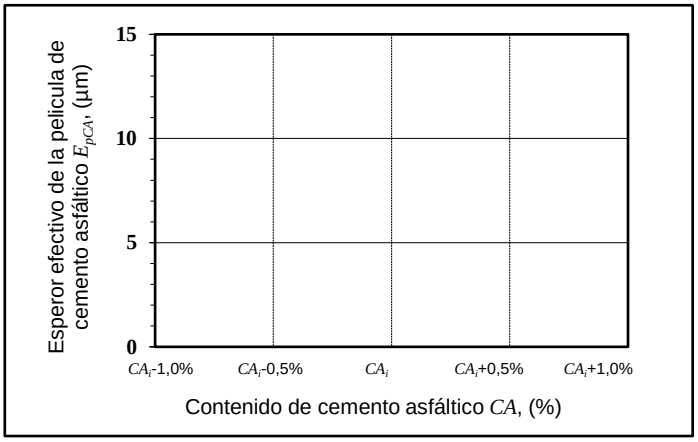


FIGURA 4.- Gráfica espesor efectivo de la película de cemento asfáltico (E_{pCA}) y el contenido de cemento asfáltico (*CA*) del rango de trabajo

K.5. Se selecciona el contenido de cemento asfáltico óptimo ($CA_{óptimo}$), que corresponda a un volumen de vacíos de aire en la mezcla asfáltica compactada (VMC) de al menos 4 % y un volumen de vacíos en el material pétreo (VMP) de al menos 17 %, como lo indica la Norma N·CMT·4·05·003, *Calidad de Mezclas Asfálticas para Carreteras*, y que tenga un espesor efectivo de la película de cemento asfáltico (E_{pCA}), de al menos 9 µm.

L. DESEMPEÑO DE LA MEZCLA ASFÁLTICA

Se realizan las pruebas de desempeño de la mezcla asfáltica compactada, considerando el contenido óptimo de cemento asfáltico ($CA_{óptimo}$) seleccionado en la Cláusula K. de este Manual, de acuerdo con lo siguiente:

L.1. ESCURRIMIENTO DE CEMENTO ASFÁLTICO

L.1.1. Se realiza la prueba de escurrimiento de cemento asfáltico de la mezcla asfáltica de acuerdo con lo indicado en el Método AASHTO T305, *Standard Method of Test for Determination of Draindown Charactereristics in Uncompacted Asphalt Mixtures*. La prueba se realiza con el contenido óptimo de cemento asfáltico ($CA_{óptimo}$) obtenido en la Cláusula K. de este Manual más un incremento de 0,5 % a una temperatura 15 °C por arriba de la máxima definida para el mezclado.

L.1.2. El escurrimiento de cemento asfáltico será de 0,3 % como máximo, en caso contrario, se modificará el diseño mediante la revisión de la cantidad de fibras de celulosa añadidas a la mezcla, el uso de un cemento asfáltico de mayor viscosidad o ajustes en la granulometría del material pétreo. El resultado se registra en la Tabla 6 de este Manual.

L.2. SUSCEPTIBILIDAD DE LA MEZCLA ASFÁLTICA AL DAÑO INDUCIDO POR HUMEDAD (RESISTENCIA RETENIDA A TENSIÓN INDIRECTA)

L.2.1. Se realiza la prueba de susceptibilidad de la mezcla asfáltica al daño inducido por humedad de acuerdo con lo indicado en el Manual M·MMP·4·05·052, *Susceptibilidad de las Mezclas Asfálticas Compactadas al Daño Inducido por Humedad*.

L.2.2. La susceptibilidad de la mezcla asfáltica al daño inducido por humedad, expresada como la resistencia retenida a tensión indirecta (TSR), será de al menos 80 %. En caso contrario, se modificará el diseño para incrementar la resistencia al daño inducido por humedad de la mezcla asfáltica. Estos ajustes podrán incluir la adición de cal hidratada a la mezcla, la incorporación de aditivos mejoradores de adherencia, el cambio de material pétreo o el cambio del tipo de cemento asfáltico. El resultado se registra en la Tabla 6 de este Manual.

TABLA 6.- Características de la mezcla asfáltica de granulometría discontinua con fibra de diseño

Característica	Valor obtenido en las pruebas de desempeño
Número de giros en compactador giratorio o golpes en aparato de compactación Marshall	
Contenido óptimo de cemento asfáltico ($CA_{óptimo}$), (%)	
Contenido de fibras de celulosa, (%), respecto de la masa de la mezcla	
Volumen de vacíos de aire en la mezcla asfáltica compactada (VMC), (%)	
Volumen de vacíos en el material pétreo (VMP), (%)	
Volumen de vacíos ocupados por el cemento asfáltico (VFA), (%)	
Resistencia retenida a tensión indirecta (TSR), (%)	
Escurrimiento de cemento asfáltico, (%)	

M. RESULTADOS

Se reporta como resultado de la ejecución del método de diseño para mezclas asfálticas de granulometría discontinua con fibra, un informe que contenga por lo menos:

M.1. Los resultados de las propuestas granulométricas preliminares a las que se refiere la Cláusula G. de este Manual y de las pruebas realizadas durante el diseño, registrándolas en la Tabla 6 de este Manual.

M.2. La memoria de cálculo que contenga los resultados de las pruebas realizadas a los materiales pétreos y a la mezcla asfáltica, así como de los cálculos realizados durante el diseño que incluyan las tablas con los valores obtenidos con este Manual o cualquier otra que haya servido de apoyo para el diseño, así como las gráficas a las que se refiere la Cláusula K. de este Manual, indicando claramente el rango de trabajo de los contenidos de cemento asfáltico utilizados para el diseño.

M.3. La conclusión del diseño que incluya la granulometría de diseño, el contenido óptimo de cemento asfáltico ($CA_{óptimo}$) y el contenido de fibra de celulosa empleado.

M.4. De ser necesario, las observaciones o recomendaciones que sirvan para la elaboración de la mezcla asfáltica de diseño.

N. PRECAUCIONES PARA EVITAR ERRORES

Para evitar errores durante la ejecución de la prueba, se observarán las siguientes precauciones:

N.1. Que todos los equipos que se utilicen durante el diseño se encuentren calibrados de acuerdo con las recomendaciones del fabricante.

N.2. Que los materiales que se utilicen para realizar el diseño de la mezcla asfáltica cumplan con los requisitos de calidad indicados en la Norma N·CMT·4·05·003, *Calidad de Mezclas Asfálticas para Carreteras*, y que tengan las mismas características que los materiales con los cuales se producirá la mezcla asfáltica en obra.

N.3. Que el personal que participe durante la ejecución del diseño de la mezcla asfáltica tenga la experiencia necesaria para llevar a cabo cada una de las actividades mencionadas en este Manual.

COMUNICACIONES
ESTRUCTURA, COMUNICACIONES Y TRANSPORTES

COMUNICACIONES

SECRETARÍA DE INFRAESTRUCTURA, COMUNICACIONES Y TRANSPORTES

SUBSECRETARÍA DE INFRAESTRUCTURA
Dirección General de Servicios Técnicos
Av. Coyoacán 1895
Col. Acacias, Benito Juárez, 03240
Ciudad de México
www.gob.mx/sct