

LIBRO: MMP. MÉTODOS DE MUESTREO Y PRUEBA DE MATERIALES

PARTE: 4. MATERIALES PARA PAVIMENTOS

TÍTULO: 05. Materiales Asfálticos, Aditivos y Mezclas

CAPÍTULO: 034. Método Marshall para Mezclas Asfálticas de Granulometría Densa

A. CONTENIDO

Este Manual describe el procedimiento para el diseño de mezclas asfálticas en caliente de granulometría densa, mediante el método Marshall, 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, aditivos y el desempeño de la mezcla asfáltica mediante la estabilidad y flujo, así como los indicadores de desempeño de susceptibilidad al daño inducido por humedad y de la deformación permanente por rodadura y que, además, 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

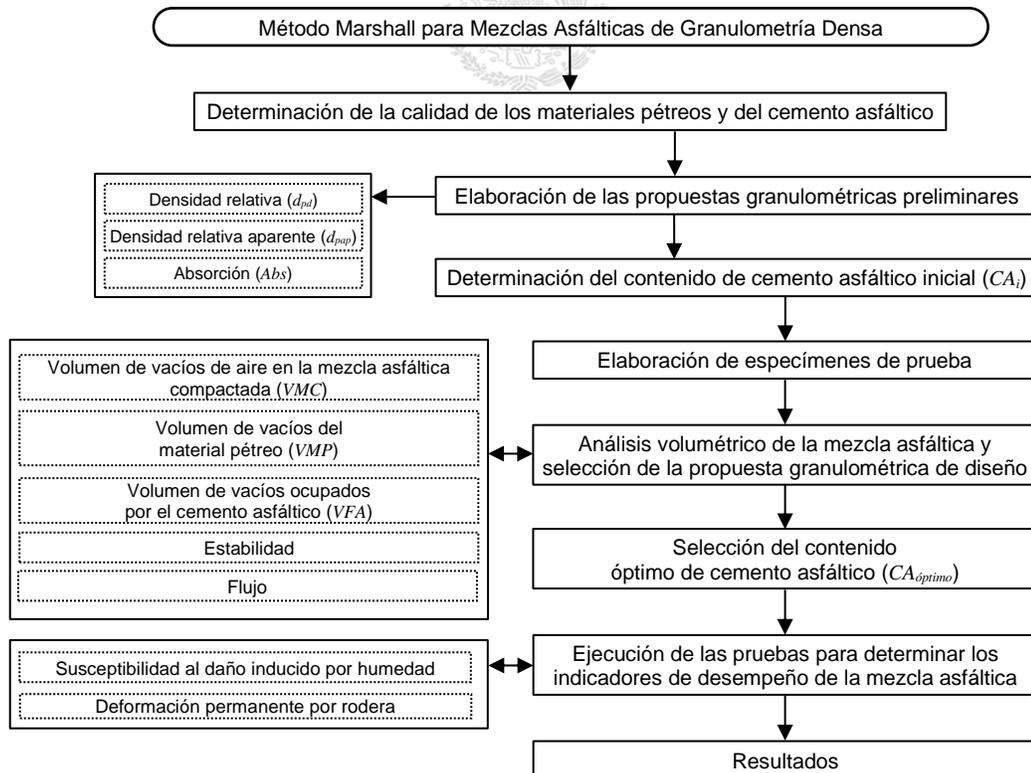


FIGURA 1.- Secuencia del proceso para el diseño de la mezcla asfáltica de granulometría densa

C. REFERENCIAS

Son referencias de este Manual, las normas:

ASTM D5581-07A (2021) e1, *Standard Test Method for Resistance to Plastic Flow of Bituminous Mixtures Using Marshall Apparatus (6 in. Diameter Specimen)*, publicada por ASTM International, en EUA, en el año 2021.

ASTM D6926-20, *Standard Practice for Preparation of Asphalt Mixture Specimens Using Marshall Apparatus*, publicada por ASTM International, en EUA, en el año 2020.

ASTM D6927-22, *Standard Test Method for Marshall Stability and Flow of Asphalt Mixtures*, publicada por ASTM International, en EUA, en el año 2022.

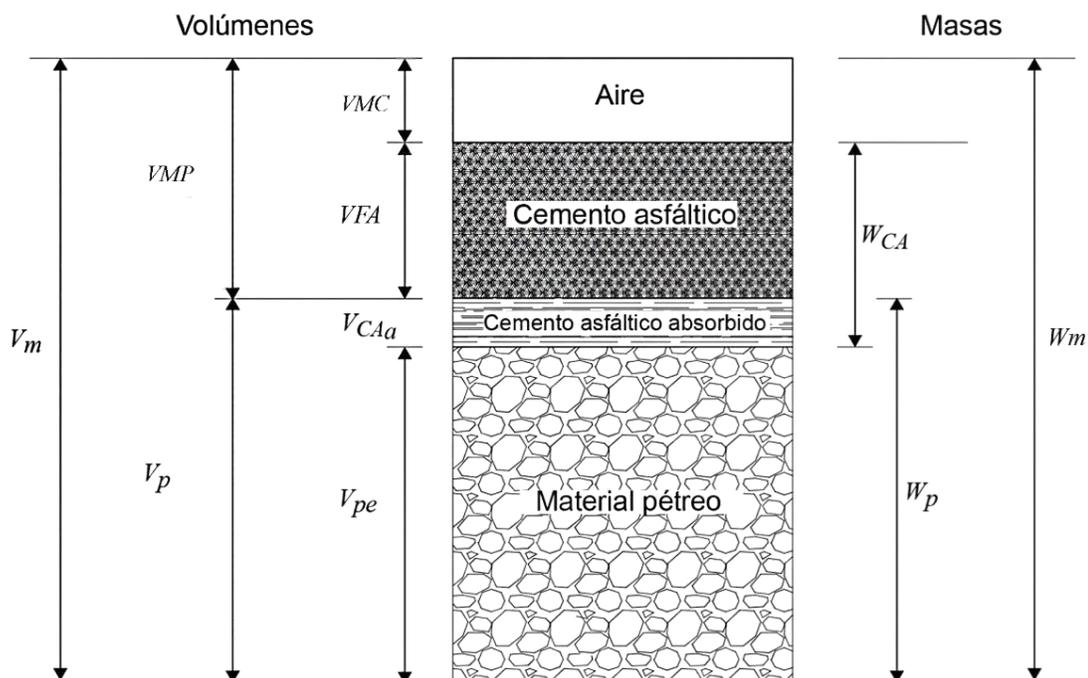
AASHTO R30-02 (2019), *Standard Practice for Mixture Conditioning of Hot Mix Asphalt (HMA)*, publicada por American Association of State and Highway Transportation Officials, en EUA, en el año 2019.

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 Materiales Asfálticos	N-CMT-4-05-001
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
Viscosidad Rotacional Brookfield de Cementos Asfálticos	M-MMP-4-05-005
Densidad, Densidad Relativa y Absorción de Mezclas Asfálticas Compactadas No Absorbentes	M-MMP-4-05-051
Susceptibilidad de las Mezclas Asfálticas Compactadas al Daño Inducido por Humedad	M-MMP-4-05-052
Deformación Permanente por Rodera con Rueda Cargada de Hamburgo	M-MMP-4-05-053
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

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:

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 (V_{MC})

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 (V_{MP})

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. COMUNICACIONES Y TRANSPORTES

D.8. VOLUMEN DE VACÍOS OCUPADOS POR EL CEMENTO ASFÁLTICO (V_{FA})

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

E. REQUISITOS PARA EL DISEÑO

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

E.1.1. El diseño del pavimento, conforme a lo establecido en la Norma N-PRY-CAR-5-01-001, *Ejecución de Proyecto de Pavimentos Asfálticos*.

E.1.2. 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*.

E.1.3. El tamaño nominal del material pétreo de la mezcla asfáltica indicado en el proyecto o aprobado por la Secretaría.

E.1.4. El espesor de la capa asfáltica, la intensidad del tránsito esperado en términos del número de ejes (ΣL) equivalentes de 8,2 t y la vida de diseño del pavimento.

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

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*, de acuerdo con la intensidad del tránsito esperado en términos del número de ejes (ΣL) equivalentes de 8,2 t, acumulados durante un periodo de servicio del pavimento en el carril de diseño que en ningún caso será menor de 10 años o de acuerdo con lo indicado en el proyecto.

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.2.3.** Si el cemento asfáltico indicado en el proyecto o aprobado por la Secretaría es un cemento asfáltico convencional, cumplirá con los requisitos de calidad que se establecen en la Norma N-CMT-4-05-001, *Calidad de Materiales Asfálticos*, o con los requisitos de calidad que se establecen en la Norma N-CMT-4-05-004, *Calidad de Cementos Asfálticos según su Grado de Desempeño (PG)*.

G. PROPUESTA GRANULOMÉTRICA

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 y la intensidad del tránsito esperado en términos del número de ejes (ΣL) equivalentes de 8,2 t, acumulados durante un periodo de servicio del pavimento en el carril de diseño que en ningún caso será menor de 10 años o de acuerdo con lo indicado en el proyecto o aprobado por la Secretaría.

G.1. SELECCIÓN DE 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.

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

Fracción	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*, de acuerdo con el tamaño nominal de material pétreo de la propuesta granulométrica.

TABLA 3.- Granulometría de las propuestas granulométricas preliminares

Malla		Tamaño nominal del material pétreo ^[1] mm (in)				
Abertura mm	Designación	9,5 (3/8)	12,5 (1/2)	19 (3/4)	25 (1)	37,5 (1 1/2)
		Porcentaje que pasa (en masa)				
50	2 in	---	---	---	---	
37,5	1 1/2 in	---	---	---		
25	1 in	---	---			
19	3/4 in	---				
12,5	1/2 in					
9,5	3/8 in					
6,3	1/4 in					
4,75	N°4					
2	N°10					
0,85	N°20					
0,425	N°40					
0,25	N°60					
0,15	N°100					
0,075	N°200					

[1] El tamaño nominal de un material pétreo es la abertura de la malla con la que se designa el material que cumpla con una determinada granulometría.

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:

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

Donde:

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

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

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

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

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

Donde:

- d_{pap} = Densidad relativa aparente del material pétreo seco, de la propuesta granulométrica preliminar, (adimensional)
- P_1, P_2, \dots, P_n = Porcentajes individuales en masa de cada fracción n de la propuesta granulométrica preliminar, (%)
- $d_{pap1}, d_{pap2}, \dots, d_{papn}$ = Densidad relativa aparente del material pétreo de cada fracción n de la propuesta granulométrica preliminar, (adimensional)

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

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

Donde:

- Abs = Absorción de la propuesta granulométrica preliminar, (%)
- P_1, P_2, \dots, P_n = Porcentajes individuales en masa de cada fracción de la propuesta granulométrica inicial n , (%)
- $Abs_{p1}, Abs_{p2}, \dots, Abs_{pn}$ = 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 95 %.

- 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 5 %.
- 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:

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

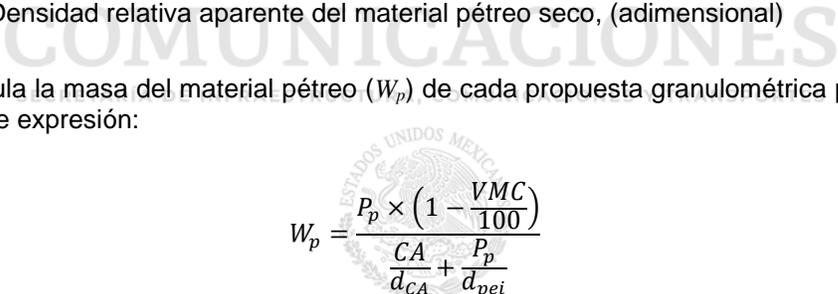
Donde:

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

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

d_{pap} = Densidad relativa aparente 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:



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

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}), 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)

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 con 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)

Los valores del contenido de cemento asfáltico inicial de cada mezcla asfáltica inicial se registran como CA_i , en %, en la Tabla 6 de este Manual.

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. COMPROBACIÓN DE LA GRANULOMETRÍA

Para cada propuesta granulométrica, se determina la masa del material pétreo por cada malla, de manera que se pueda comprobar que cumple con los requisitos granulométricos establecidos en la Norma N-CMT-4-04, *Materiales Pétreos para Mezclas Asfálticas*, para cada tamaño nominal, utilizando la siguiente expresión:

$$W_p = \frac{a \times W_{pt} \times P_{ret}}{10\ 000}$$

Donde:

W_p = Masa del material pétreo para cada fracción, (g)

a = Porción individual de material pétreo de la propuesta granulométrica, (%)

W_{pt} = Masa de la muestra, (g)

P_{ret} = Material pétreo retenido expresado como el porcentaje de la masa de la muestra, (%)

I.2. DETERMINACIÓN DE LA TEMPERATURA DE MEZCLADO Y COMPACTACIÓN

I.2.1. Asfaltos convencionales

Previo a la preparación de las mezclas asfálticas de prueba, se determina la viscosidad del cemento asfáltico de acuerdo con el Manual M-MMP-4-05-005, *Viscosidad Rotacional Brookfield de Cementos Asfálticos*, a diferentes temperaturas para obtener su carta de viscosidad, de la cual se obtienen las temperaturas de mezclado y compactación, y se comprueba que cumplen con los valores de viscosidad que indican en la Tabla 5 de este Manual.

TABLA 5.- Rangos de viscosidades para temperaturas de mezclado y compactación para cementos asfálticos convencionales

Temperatura	Viscosidad Pa-s
De mezclado	0,17 ± 0,02
De compactación	0,28 ± 0,03

I.2.2. Cementos asfálticos modificados

Se comprueban los rangos de viscosidad y temperatura de mezclado y compactación del cemento asfáltico seleccionado, los cuales serán los 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 densa o por el laboratorio de control de calidad de la obra.

I.3. NÚMERO DE ESPECÍMENES DE PRUEBA Y PROCEDIMIENTO PARA SU ELABORACIÓN

Serán 3 especímenes por cada mezcla asfáltica de prueba, de manera que en total se tengan 9 especímenes para 3 mezclas de prueba, considerando:

- I.3.1.** La norma ASTM D6926-20, *Standard Practice for Preparation of Asphalt Mixture Specimens Using Marshall Apparatus*, para mezclas asfálticas que contengan agregados con tamaño nominal de hasta 19 mm ($\frac{3}{4}$ in), donde se emplean moldes de 101,6 mm (4 in) de diámetro, compactando los especímenes conforme al número de golpes en cada cara de la probeta, establecidos en la Norma N-CMT-4-05-003, *Calidad de Mezclas Asfálticas para Carreteras*, en función de la intensidad del tránsito para la cual se va a diseñar la mezcla asfáltica.
- I.3.2.** La norma ASTM D5581-07A (2021) e1, *Standard Test Method for Resistance to Plastic Flow of Bituminous Mixtures Using Marshall Apparatus (6 in. Diameter Specimen)*, para mezclas asfálticas que contengan agregados con tamaño nominal de 25 mm (1 in) hasta 37,5 mm ($1\frac{1}{2}$ in), donde se empleen moldes de 152,4 mm (6 in) de diámetro. Considerando que, para obtener una compactación equivalente a la de las probetas de 101,6 mm (4 in), el número de golpes en cada cara de la probeta necesarios para compactar la mezcla será de 75 o 112, según el número de ejes equivalentes de diseño establecidos en la Norma N-CMT-4-05-003, *Calidad de Mezclas Asfálticas para Carreteras*, en función de la intensidad del tránsito para la cual se va a diseñar la mezcla asfáltica.

- I.3.3.** Además de lo indicado en los Incisos I.3.1. e I.3.2. de este Manual, se realizará el curado de los especímenes de acuerdo con lo indicado en la norma AASHTO R30-02 (2019) *Standard Practice for Mixture Conditioning of Hot Mix Asphalt (HMA)*, durante $2 \text{ h} \pm 5 \text{ min}$ para materiales pétreos con absorción igual a 2 % o menor, y $4 \text{ h} \pm 5 \text{ min}$ para materiales pétreos con absorción mayor al 2 %.

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 y se registran en la Tabla 6 de este Manual de acuerdo con lo siguiente:

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

- J.1.1.** Se determina por duplicado la densidad relativa teórica máxima de la mezcla asfáltica (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 asfáltico 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)
- d_{pe} = Densidad relativa efectiva del material pétreo, (adimensional)
- d_{pd} = Densidad relativa del material pétreo seco, (adimensional)

- 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 (d_{mm}) se hayan realizado correctamente.

- J.1.5.** Se determina la absorción de la mezcla asfáltica compactada elaborada con el contenido de cemento asfáltico inicial (CA_i), mediante el Manual M-MMP-4-05-051, *Densidad, Densidad Relativa y Absorción de Mezclas Asfálticas Compactadas No Absorbentes*.

J.1.6. Se determina la densidad relativa de la mezcla asfáltica compactada (d_{mc}) de cada espécimen, considerando lo siguiente:

J.1.6.1. Cuando la absorción de la mezcla asfáltica sea igual o menor de 2 %, se emplea el procedimiento indicado en el Manual M-MMP-4-05-051, *Densidad, Densidad Relativa y Absorción de Mezclas Asfálticas Compactadas No Absorbentes*.

J.1.6.2. Cuando la absorción de la mezcla asfáltica compactada resulta mayor de 2 %, se emplea el procedimiento indicado en el Manual M-MMP-4-05-063, *Densidad, Densidad Relativa y Absorción de Mezclas Asfálticas Compactadas Absorbentes*.

J.1.7. Posteriormente, se determina la densidad relativa de la mezcla asfáltica compactada (d_{mc}) promedio de todos los especímenes de prueba de una misma propuesta granulométrica o de un mismo contenido de cemento asfáltico, según sea el caso.

J.1.8. La masa volumétrica de la mezcla asfáltica compactada (γ_m), se determina mediante la siguiente expresión:

$$\gamma_m = d_{mc} \times \gamma_0$$

Donde:

γ_m = Masa volumétrica de la mezcla asfáltica, (kg/m³)

d_{mc} = Densidad relativa promedio de la mezcla asfáltica compactada, (adimensional), determinada como se indica en inciso anterior

γ_0 = Masa volumétrica del agua, considérese 1 000 kg/m³

J.1.9. Se determina el volumen de vacíos de aire en la mezcla asfáltica compactada (VMC), de acuerdo con la siguiente expresión:

$$VMC = 100 - \frac{100 \times d_{mc}}{d_{mm}}$$

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, (adimensional)

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

J.2. DETERMINACIÓN DEL VOLUMEN DE VACÍOS DEL MATERIAL PÉTREO (VMP)

Se determina el volumen de vacíos del material pétreo (VMP), usando la siguiente expresión:

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

Donde:

VMP = Volumen de vacíos del material pétreo, (%), expresado como porcentaje de la masa de la mezcla asfáltica

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

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

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

J.3. DETERMINACIÓN DEL VOLUMEN DE VACÍOS OCUPADOS POR EL CEMENTO ASFÁLTICO (VFA)

Se determina el volumen de vacíos ocupados por el cemento asfáltico (VFA) de acuerdo con la siguiente expresión:

$$VFA = 100 \times \left(\frac{VMP - VMC}{VMP} \right)$$

Donde:

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

VMP = Volumen de vacíos de los materiales pétreos, (%), expresado como porcentaje de la masa de la mezcla asfáltica

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

K. DETERMINACIÓN DE LAS PROPIEDADES VOLUMÉTRICAS PARA LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS COMPACTADAS CON CONTENIDO DE CEMENTO ASFÁLTICO ESTIMADO (CA_{est})**K.1. CÁLCULO DEL CONTENIDO DE CEMENTO ASFÁLTICO ESTIMADO (CA_{est})**

Cuando sea necesario, para cada propuesta granulométrica, se realiza el ajuste en el contenido de cemento asfáltico de manera que se obtenga un volumen de vacíos de aire de la mezcla asfáltica (VMC) del 4%, de acuerdo con la siguiente expresión:

$$CA_{est} = CA_i - 0,4 (4 - VMC_i)$$

Donde:

CA_{est} = Contenido de cemento asfáltico estimado, considerando un volumen de vacíos de los materiales pétreos del 4 %, expresado como porcentaje de la masa de la mezcla asfáltica

CA_i = Contenido de cemento asfáltico inicial con el cual se realizó la mezcla asfáltica de prueba, (%)

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

K.2. CÁLCULO DEL VOLUMEN ESTIMADO DE VACÍOS EN EL MATERIAL PÉTREO (VMP_{est})

$$VMP_{est} = VMP_i + K (4 - VMC_i)$$

Donde:

VMP_{est} = Volumen estimado de vacíos en el material pétreo, (%)

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

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

K = Constante, si: $VMC \leq 4\%$, $K = 0,1$

$VMC > 4\%$, $K = 0,2$

K.3. CÁLCULO DEL VOLUMEN ESTIMADO DE VACÍOS OCUPADOS POR EL CEMENTO ASFÁLTICO (VFA_{est})

$$VFA_{est} = 100 \times \left(\frac{VMP_{est} - VMC}{VMP_{est}} \right)$$

Donde:

VFA_{est} = Volumen estimado de vacíos ocupados con cemento asfáltico, (%)

VMP_{est} = Volumen estimado de vacíos en el material pétreo, (%)

VMC = Volumen de vacíos de aire en la mezcla asfáltica compactada, (%), considérese 4%

L. DETERMINACIÓN DE LA ESTABILIDAD Y EL FLUJO DE LA MEZCLA ASFÁLTICA COMPACTADA

Con el contenido de cemento asfáltico estimado se determina la estabilidad y el flujo de la mezcla asfáltica compactada de cada espécimen, conforme a lo establecido en:

L.1. La norma ASTM D6927-22, *Standard Test Method for Marshall Stability and Flow of Asphalt Mixtures*, para mezclas asfálticas que contengan agregados con tamaño nominal de hasta 19 mm ($\frac{3}{4}$ in), donde se emplean moldes de 101,6 mm (4 in) de diámetro.

L.2. La norma ASTM D5581-07A (2021) e1, *Standard Test Method for Resistance to Plastic Flow of Bituminous Mixtures Using Marshall Apparatus (6 in. Diameter Specimen)*, para mezclas asfálticas que contengan agregados con tamaño nominal de 25 mm (1 in) hasta 37,5 mm ($1\frac{1}{2}$ in), donde se emplean moldes de 152,4 mm (6 in) de diámetro.

M. COMPROBACION DE LAS PROPIEDADES VOLUMÉTRICAS, ESTABILIDAD Y FLUJO

M.1. Se obtiene un promedio de las propiedades volumétricas, estabilidad y flujo de los 3 especímenes de prueba de cada propuesta granulométrica y se comprueba que cumplan con lo indicado en la Norma N-CMT-4-05-003, *Calidad de Mezclas Asfálticas para Carreteras*, considerando la intensidad del tránsito de diseño y el tamaño nominal del material pétreo.

M.2. Las propuestas granulométricas que no cumplan con lo indicado en la Norma N-CMT-4-05-003, *Calidad de Mezclas Asfálticas para Carreteras*, considerando la intensidad del tránsito de diseño y el tamaño nominal del material pétreo, se descartan. Si las 3 propuestas granulométricas preliminares no cumplen con lo indicado en la Norma señalada, se realizan nuevas propuestas granulométricas.

M.3. Si más de una propuesta granulométrica preliminar cumple con lo indicado en la Norma N-CMT-4-05-003, *Calidad de Mezclas Asfálticas para Carreteras*, se utilizará el criterio económico para la selección de la granulometría de diseño.

N. SELECCIÓN DEL CONTENIDO ÓPTIMO DE CEMENTO ASFÁLTICO (CA_{optimo})

Se elaboran 5 mezclas asfálticas de prueba con base en el contenido de cemento asfáltico estimado (CA_{est}) de la propuesta granulométrica seleccionada para el diseño, como se indica más adelante. De cada mezcla asfáltica, se elaboran 3 especímenes, a los que se les determinan y evalúan sus propiedades volumétricas, estabilidad y flujo, para seleccionar la mezcla asfáltica que mejor cumpla con las características de calidad indicadas en la Norma N-CMT-4-05-003, *Calidad de Mezclas Asfálticas para Carreteras*. Los valores obtenidos en esta Cláusula se anotan en la Tabla 7 de este Manual.

TABLA 6.- Ejemplo de una hoja de registro y cálculo para seleccionar una propuesta granulométrica para el diseño de mezclas asfálticas de granulometría densa por el método Marshall

Tipo de prueba Marshall:				Compactación:				Proyecto: _____							
Método Marshall (moldes de Ø 4 in)		()		Número de golpes en cada cara de la muestra:				Localización: _____							
Método Marshall (moldes de Ø 6 in)		()		Tipo de cemento asfáltico y clasificación:				Fecha: _____							
Propuesta	Contenido de cemento asfáltico inicial CA_i %	Número de espécimen	Altura del espécimen mm	Masa del espécimen (g)			Volumen del espécimen cm^3	Densidad relativa aparente del material pétreo, d_{pap}	Densidad relativa efectiva del material pétreo, d_{pe}	Densidad relativa del material pétreo seco, d_{pd}	Densidad relativa de la mezcla asfáltica compactada, d_{mc}	Densidad relativa teórica máxima de la mezcla asfáltica, d_{mm}	Vacíos de aire en la mezcla asfáltica compactada, VMC %	Vacíos en el material pétreo, VMP %	Vacíos ocupados por el cemento asfáltico, VFA %
				Seco al Aire W_s	Saturado y superficialmente seco W_{sat}	Sumergido W_w									
1		1													
		2													
		3													
		Promedio													
2		1													
		2													
		3													
		Promedio													
3		1													
		2													
		3													
		Promedio													
Propuesta	Contenido de cemento asfáltico estimado CA_{est} %	Número de espécimen	Altura del espécimen mm	Volumen del espécimen cm^3	Estabilidad (N)		Flujo (mm)	Vacíos en el material pétreo estimados, VMP_{est} %	Vacíos ocupados por el cemento asfáltico estimados, VFA_{est} %	NOTAS :					
					Medida	Corregida									
1		1													
		2													
		3													
		Promedio													
2		1													
		2													
		3													
		Promedio													
3		1													
		2													
		3													
		Promedio													

TABLA 7.- Ejemplo de una hoja de registro y cálculo para el diseño de mezclas asfálticas de granulometría densa por el método Marshall

Tipo de prueba Marshall:				Compactación:				Densidad relativa aparente del material pétreo, d_{pap}				Proyecto: _____				
Método Marshall (moldes de Ø 4 in) ()				Número de golpes en cada cara de la muestra:				Densidad relativa efectiva del material pétreo, d_{pe}				Localización: _____				
				Densidad relativa del cemento asfáltico:								Fecha: _____				
Método Marshall (moldes de Ø 6 in) ()				Tipo de cemento asfáltico y clasificación:				Densidad relativa del material pétreo seco, d_{pd}								
Designación	Contenido de cemento asfáltico CA %	Número de espécimen	Altura del espécimen mm	Masa del espécimen ^[1] g			Volumen del espécimen cm ³	Densidad relativa de la mezcla asfáltica compactada, d_{mc}	Densidad relativa teórica máxima de la mezcla asfáltica, d_{mm}	Masa volumétrica de la mezcla asfáltica, γ_m kg/m ³	Vacíos de aire en la mezcla asfáltica compactada, VMC %	Vacíos en el material pétreo, VMP %	Vacíos ocupados por el cemento asfáltico, VFA %	Estabilidad (N)		Flujo mm
				Seco al Aire W_s	Saturado y superficialmente seco W_{sat}	Sumergido W_w								Medida	Corregida	
CA ₁		1														
		2														
		3														
		Promedio														
CA ₂		1														
		2														
		3														
		Promedio														
CA ₃		1														
		2														
		3														
		Promedio														
CA ₄		1														
		2														
		3														
		Promedio														
CA ₅		1														
		2														
		3														
		Promedio														
NOTAS:																

[1] Estos valores permiten determinar la absorción de la mezcla asfáltica compactada (W_{mab}) de acuerdo con lo indicado en el Manual M-MMP-4-05-051, *Densidad, Densidad Relativa y Absorción de Mezclas Asfálticas Compactadas No Absorbentes*, para establecer qué método utilizar para el cálculo de la densidad relativa de la mezcla asfáltica compactada, d_{mc} .

N.1. DETERMINACIÓN DE LAS PROPIEDADES VOLUMÉTRICAS, ESTABILIDAD Y FLUJO

N.1.1. Siguiendo el procedimiento descrito en la Cláusula I. de este Manual, se elaboran 5 mezclas asfálticas de prueba, cada una de ellas con los contenidos de cemento asfáltico ($CA_{n=1...5}$), los cuales se indican a continuación:

- $CA_1 = CA_{est} + 1 \%$
- $CA_2 = CA_{est} + 0,5 \%$
- $CA_3 = CA_{est}$
- $CA_4 = CA_{est} - 0,5 \%$
- $CA_5 = CA_{est} - 1\%$

N.1.2. Se elaboran 3 especímenes de prueba por cada mezcla asfáltica siguiendo el procedimiento descrito en la Cláusula I. de este Manual.

N.1.3. Se determina la densidad relativa de la mezcla asfáltica compactada (d_{mc}) de cada espécimen, determinada conforme a lo establecido en el Manual M-MMP-4-05-051, *Densidad, Densidad Relativa y Absorción de Mezclas Asfálticas Compactadas No Absorbentes*, y se obtiene un promedio.

N.1.4. Se determina la masa volumétrica de la mezcla asfáltica compactada (γ_m), mediante la siguiente expresión:

$$\gamma_m = \overline{d_{mc}} \times \gamma_0$$

Donde:

γ_m = Masa volumétrica de la mezcla asfáltica, (kg/m³)

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

γ_0 = Masa volumétrica del agua, considérese de 1 000 kg/m³

N.1.5. Se determina por duplicado la densidad relativa teórica máxima de la mezcla asfáltica (d_{mm}), de acuerdo con lo indicado en el Manual M-MMP-4-05-062, *Densidad Relativa Teórica Máxima de Mezclas Asfálticas*.

N.1.6. Se calcula la densidad relativa efectiva del material pétreo (d_{pe}), para el contenido de cemento asfáltico estimado (CA_{est}), con la siguiente expresión:

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

Donde:

d_{pe} = Densidad relativa efectiva del material pétreo para el contenido de cemento asfáltico estimado, (adimensional)

d_{mm} = Densidad relativa teórica máxima de la mezcla asfáltica elaborada con el contenido de cemento asfáltico estimado, (adimensional)

CA_{est} = Contenido de cemento asfáltico estimado (%)

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

- N.1.7.** Para cada uno de los contenidos de cemento asfáltico indicados en el Inciso N.1.1. de este Manual, con excepción del contenido de cemento asfáltico estimado (CA_{est}), se calcula la densidad relativa teórica máxima de la mezcla asfáltica suelta (d_{mm}), mediante la siguiente expresión:

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

Donde:

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

$CA_{n=1...5}$ = Contenido de cemento asfáltico, (%), expresado como porcentaje respecto de la masa de la mezcla asfáltica, de cada uno de los contenidos de cemento asfáltico indicados en el Inciso N.1.1. de este Manual

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

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

- N.1.8.** Para cada uno de los contenidos de cemento asfáltico indicados en el Inciso N.1.1. de este Manual, se calcula el volumen de los vacíos de aire en la mezcla asfáltica compactada (VMC) con la siguiente expresión.

$$VMC = 100 - \frac{100 \times \overline{d_{mc}}}{d_{mm}}$$

Donde:

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

d_{mm} = Densidad relativa teórica máxima de la mezcla asfáltica, (adimensional), determinada para cada uno de los contenidos de cemento asfáltico

$\overline{d_{mc}}$ = Densidad relativa promedio de la mezcla asfáltica compactada, (adimensional), determinada para cada uno de los contenidos de cemento asfáltico

- N.1.9.** Para cada uno de los contenidos de cemento asfáltico indicados en el Inciso N.1.1. de este Manual, se determina el volumen de vacíos en el material pétreo (VMP), con la siguiente expresión:

$$VMP = 100 - \frac{\overline{d_{mc}} \times P_p}{d_{pd}}$$

Donde:

VMP = Vacíos en el material pétreo, (%), expresado como porcentaje de la masa de la mezcla asfáltica

$\overline{d_{mc}}$ = Densidad relativa promedio de la mezcla asfáltica compactada, (adimensional), determinada como se indica en el Inciso N.1.3. para cada uno de los contenidos de cemento asfáltico indicados en el Inciso N.1.1. de este Manual

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

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

N.1.10. Para cada uno de los contenidos de cemento asfáltico indicados en el Inciso N.1.1. de este Manual, se determinan los vacíos ocupados con cemento asfáltico (*VFA*), con la siguiente expresión:

$$VFA = 100 \times \left(\frac{VMP - VMC}{VMP} \right)$$

Donde:

VFA = Volumen de vacíos ocupados con cemento asfáltico, (%), expresados como porcentaje respecto de los vacíos en el material pétreo (*VMP*)

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

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

N.1.11. Se determina la estabilidad y el flujo Marshall de la mezcla asfáltica compactada para cada espécimen y el promedio de todos los especímenes de prueba de cada uno de los contenidos de cemento asfáltico indicados en el Inciso N.1.1. de este Manual, conforme a lo establecido en las normas ASTM D6927-22, *Standard Test Method for Marshall Stability and Flow of Asphalt Mixtures*, para mezclas asfálticas que contengan agregados con tamaño nominal de hasta 19 mm (¾ in), donde se emplean moldes de 101,6 mm (4 in) de diámetro o ASTM D5581-07A(2021) e1, *Standard Test Method for Resistance to Plastic Flow of Bituminous Mixtures Using Marshall Apparatus (6 in Diameter Specimen)*, para mezclas asfálticas que contengan agregados con tamaño nominal de 25 mm (1 in) hasta 37,5 mm (1½ in), donde se emplean moldes de 152,4 mm (6 in) de diámetro.

N.2. DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO DE CEMENTO ASFÁLTICO ÓPTIMO (*CA_{óptimo}*)

N.2.1. Para determinar el contenido de cemento asfáltico óptimo se elaboran 6 gráficas como las que se muestran en la Figura 3 de este Manual, con las propiedades volumétricas, estabilidad y flujo de las mezclas asfálticas de prueba compactadas, elaboradas con los contenidos de cemento asfáltico propuestos en el Inciso N.1.1. de este Manual, las cuales tendrán en el eje de las abscisas el contenido de cemento asfáltico efectivo y en el eje de las ordenadas, una de las propiedades volumétricas, estabilidad o flujo que se registraron en la Tabla 7 de este Manual, considerando:

- 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*)
- Masa volumétrica de la mezcla asfáltica (γ_m)
- Estabilidad
- Flujo

N.2.2. De la gráfica *VMC-CA* mostrada en el inciso (a) de la Figura 3 de este Manual, se selecciona el contenido de cemento asfáltico que corresponde con el 4 % de vacíos de aire en la mezcla asfáltica compactada, el cual se considera como el contenido de cemento asfáltico óptimo (*CA_{óptimo}*). De las gráficas restantes de la misma figura, se obtienen las propiedades volumétricas, estabilidad y flujo de la mezcla asfáltica compactada para el contenido de cemento asfáltico óptimo (*CA_{óptimo}*) seleccionado.

N.2.3. Si ninguno de los contenidos de cemento asfáltico efectivo de la gráfica del inciso (a) a la que se refiere el inciso anterior, cumple con el 4 % de vacíos en la mezcla asfáltica compactada (*VMC*), entonces se realiza una interpolación con base en la gráfica de *VMC-CA*, y se calcula el contenido de cemento asfáltico óptimo (*CA_{óptimo}*) con la siguiente expresión:

$$CA_{\text{óptimo}} = \left(0,5 \times \frac{VMC_s - 4}{VMC_s - VMC_i} \right) + CA_n$$

Donde:

$CA_{\text{óptimo}}$ = Contenido de cemento asfáltico óptimo, (%)

$CA_{n=1...5}$ = Contenido de cemento asfáltico de los indicados en el Inciso N.1.1. de este Manual, (%), se selecciona el que tenga el volumen de vacíos de aire en la mezcla asfáltica compactada (VMC) mayores del 4 %

VMC_s = Volumen de vacíos de aire en la mezcla asfáltica compactada, (%), para un contenido de cemento asfáltico inferior al estimado y vacíos mayores de 4 %

VMC_i = Volumen de vacíos de aire en la mezcla asfáltica compactada, (%), para un contenido de cemento asfáltico superior al estimado y vacíos menores de 4 %

- N.2.4.** Se obtienen las propiedades volumétricas, estabilidad y flujo de la mezcla asfáltica compactada de diseño que considere el contenido de cemento asfáltico óptimo seleccionado, a partir de las gráficas, que cumplan con lo establecido en la Norma N-CMT-4-05-003, *Calidad de Mezclas Asfálticas para Carreteras*, considerando la intensidad del tránsito de diseño y el tamaño nominal del material pétreo.

N.3. DETERMINACIÓN DE LAS PROPIEDADES DE LOS INDICADORES DE DESEMPEÑO DE SUSCEPTIBILIDAD AL DAÑO INDUCIDO POR HUMEDAD Y LA DEFORMACIÓN PERMANENTE POR RODERA

Considerando la mezcla asfáltica compactada de diseño con el contenido de asfalto óptimo, se determinan las propiedades de los indicadores de desempeño de susceptibilidad 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*, y la deformación permanente por rodera, de acuerdo con lo indicado en el Manual M-MMP-4-05-053, *Deformación Permanente por Rodera con Rueda Cargada de Hamburgo*, comprobando que cumplen con la Norma N-CMT-4-05-003, *Calidad de Mezclas Asfálticas para Carreteras*, de acuerdo con el tamaño del molde utilizado conforme a la Cláusula L. de este Manual, considerando la intensidad del tránsito de diseño y el tamaño nominal del material pétreo.

O. RESULTADOS

Se reporta como resultado de la ejecución del método de diseño de mezclas asfálticas de granulometría densa por el método Marshall, un informe que contenga por lo menos:

- O.1.** Las consideraciones de diseño de la mezcla asfáltica que incluya el espesor de la capa asfáltica, la intensidad del tránsito esperado en términos del número de ejes (ΣL) equivalentes de 8,2 t, la vida de diseño del pavimento y el tamaño nominal del material pétreo de la mezcla asfáltica, especificados en el proyecto o aprobado por la Secretaría.
- O.2.** Los resultados de las determinaciones de las propuestas granulométricas.
- O.3.** La memoria de cálculo que contenga los resultados de las pruebas realizadas a los materiales pétreos y a la mezcla asfáltica, así como los cálculos realizados durante el diseño que incluyan las tablas con los valores obtenidos en este Manual o cualquier otra que haya servido de apoyo para el diseño, así como las gráficas a las que se refiere el Inciso N.2.1. de este Manual indicando claramente los contenidos de cemento asfáltico utilizados para el diseño.
- O.4.** La conclusión del diseño que incluya la granulometría de diseño y el contenido de asfalto óptimo ($CA_{\text{óptimo}}$).
- O.5.** De ser necesario, las observaciones o recomendaciones que sirvan para la elaboración de la mezcla asfáltica de diseño.

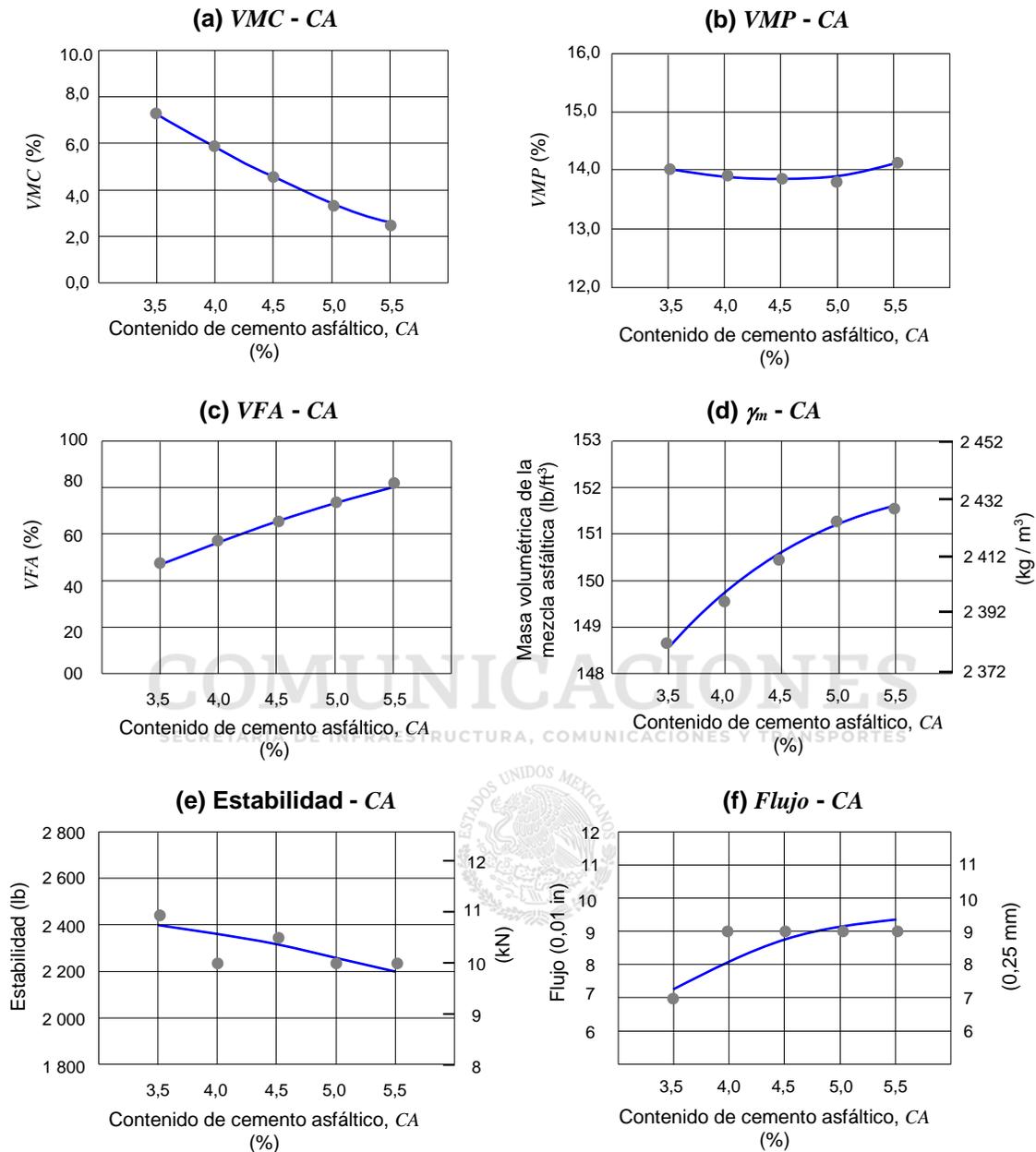


FIGURA 3.- Propiedades volumétricas y de desempeño de la mezcla asfáltica compactada

P. PRECAUCIONES PARA EVITAR ERRORES

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

- P.1.** Que todos los equipos que se utilicen durante el diseño se encuentren calibrados de acuerdo con las recomendaciones del fabricante.
- P.2.** Que los materiales que se utilicen para realizar el diseño de la mezcla asfáltica cumplan con los requisitos de calidad indicados en este Manual y que tengan las mismas características que los materiales con los cuales se producirá la mezcla asfáltica en obra.
- P.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

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



INSTITUTO MEXICANO DEL TRANSPORTE

INSTITUTO MEXICANO DEL TRANSPORTE

Km 12+000, Carretera Estatal No. 431

"El Colorado-Galindo", San Fandila,

Pedro Escobedo, 76703, Querétaro

<https://normas.imt.mx>

normas@imt.mx