



---

---

# **Diseño de mezclas asfálticas densas en caliente en función del nivel de tránsito**

Dr. Horacio Delgado Alamilla

**Publicación Técnica No. 602  
Sanfandila, Qro, 2020**



---

**SECRETARÍA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTES**  
**INSTITUTO MEXICANO DEL TRANSPORTE**

**Diseño de mezclas asfálticas densas en caliente en  
función del nivel de tránsito**

**Publicación Técnica No. 602**  
**Sanfandila, Qro, 2020**

---



Esta investigación fue realizada en la Coordinación de Infraestructura de vías terrestres del Instituto Mexicano del Transporte, por el Dr. Horacio Delgado Alamilla.

Esta investigación es el producto final del proyecto de investigación IE 17/19 Uso del método Marshall para el diseño y control de calidad de mezclas asfálticas en caliente



# Contenido

---

	Página
Índice de tablas .....	v
Sinopsis.....	vii
Abstract .....	ix
Resumen ejecutivo .....	xi
Introducción.....	1
1 Calidad de mezclas asfálticas de granulometría densa en caliente para carreteras en función del nivel de tránsito .....	3
2 Procedimiento de control de calidad de mezclas asfálticas de granulometría densa .....	9
3 Método de diseño volumétrico de mezclas asfálticas de granulometría densa 21	
Bibliografía .....	37
Anexo 1. Frecuencias de muestreo por etapa.....	39
Anexo 2. Muestreo aleatorio.....	41



# Índice de tablas

---

Tabla 1.1 Niveles de tránsito esperados en términos de número de ejes equivalentes. ....	4
Tabla 1.2 Requisitos de calidad para mezclas asfálticas para nivel de tránsito bajo ( $\Sigma L \leq 1 \times 10^6$ ), Martillo Marshall. ....	4
Tabla 1.3 Vacíos en el agregado mineral (VAM) para mezclas asfálticas de granulometría densa. ....	5
Tabla 1.4 Requisitos de calidad para mezclas asfálticas para nivel de tránsito medio ( $1 \times 10^6 < \Sigma L \leq 1 \times 10^7$ ), Martillo Marshall. ....	5
Tabla 1.5 Requisitos de calidad para mezclas asfálticas para nivel de tránsito alto ( $1 \times 10^7 < \Sigma L \leq 2 \times 10^7$ ), Compactador Giratorio. ....	6
Tabla 1.6 Requisitos de calidad para mezclas asfálticas para nivel de tránsito muy alto ( $\Sigma L > 2 \times 10^7$ ).....	6
Tabla 2.1 Características de calidad en banco de materiales .....	10
Tabla 2.2 Requisitos de calidad del material pétreo en términos de número de ejes equivalentes. ....	10
Tabla 2.3 Tolerancias en los requisitos de la mezcla asfáltica. ....	11
Tabla 2.4 Requisitos de calidad de propiedades volumétricas en términos de número de ejes equivalentes.....	12
Tabla 2.5 Características requeridas en la evaluación de la mezcla asfáltica en el tramo de prueba. ....	13
Tabla 2.6 Ensayos para extracciones en tramo de prueba por sub-lote. ....	15
Tabla 2.7 Frecuencia de muestreo de materiales pétreos para el control rutinario. ....	17
Tabla 2.8 Características de calidad para el material asfáltico a la llegada de cada auto-tanque. ....	17
Tabla 2.9 Frecuencia, número y tamaño de muestra de la mezcla asfáltica. ....	18

Tabla 2.10 Frecuencia, características y número de mediciones requeridas para un tramo aplicado.....	19
Tabla 3.1 Selección del TN de la mezcla de materiales pétreos en función del espesor de la capa asfáltica .....	22
Tabla 3.2 Nivel de compactación en función del tránsito .....	26
Tabla 3.3 Rangos de viscosidades para temperaturas de mezclado y compactación .....	27
Tabla 3.4 Cantidad y número de muestras requeridas por prueba .....	27
Tabla 3.5 Datos volumétricos de las mezclas asfálticas propuestas.....	31
Tabla 3.6 Propiedades volumétricas estimadas para 4% de $V_a$ .....	34
Tabla 3.7 Propiedades volumétricas de la mezcla asfáltica. ....	35
Tabla 3.8 Requisitos de desempeño de la mezcla asfáltica. ....	36

# Sinopsis

---

El diseño de mezclas asfálticas en caliente ha ido evolucionando a lo largo de los años. Estos cambios han sido tanto en los procedimientos de elaboración de la mezcla asfáltica como en la evaluación de las propiedades de desempeño de la misma. Esto se puede ejemplificar con la sustitución en Estados Unidos del Método Marshall por la metodología Superpave.

Bajo esta situación y debido a que en México se sigue utilizando el diseño Marshall para el diseño de mezclas asfálticas en caliente para carreteras de bajo tránsito, se decidió hacer una conjunción de ambas metodologías, la cual estará en función del tránsito de la carretera

En el documento se presentan las características de calidad que debe cumplir una mezcla asfáltica en caliente, las cuales están definidas en cuatro niveles de tránsito. Contemplando en los primeros dos el uso de Método Marshall, y para los tránsitos superiores el uso del compactador giratorio, así como la evaluación del desempeño de la mezcla asfáltica.

Adicionalmente se presenta un procedimiento para la realización del control de calidad de la mezcla asfáltica en caliente, así como una secuencia de cálculo para la determinación de las propiedades volumétricas de la mezcla asfáltica.



# Abstract

---

Hot mix design has been evolving over the years. These changes include both asphalt mix processing procedures and the evaluation of asphalt mix performance properties. This can be demonstrated by the replacement of the Marshall Method with Superpave methodology in the United States.

Based on this situation, and since in Mexico the Marshall design is still used for the design of hot asphalt mixtures for low traffic pavements, it was decided to make a combination of both methodologies, which will be related to the traffic on the pavement.

The document presents the standard requirements for hot mix asphalt, which are defined in four levels of traffic. These are defined in four traffic levels. The first two levels include the use of the Marshall Method, and for higher traffic levels the use of the gyratory compactor.

In addition, a procedure for conducting quality control of the hot mix asphalt is presented, as well as a procedure for calculating the volumetric properties of the asphalt.



# Resumen ejecutivo

---

El presente documento presenta los requerimientos que debe cumplir una mezcla asfáltica en caliente de granulometría densa para su diseño y control de calidad. Así como la metodología a seguir para el diseño volumétrico de la mezcla asfáltica. Las características de calidad que debe cumplir la mezcla asfáltica fueron definidas en función del nivel de tránsito.

En el capítulo 1 se definen los requerimientos de calidad que deben cumplir las mezclas asfálticas de granulometría densa en caliente para carreteras en función del nivel de tránsito. El cálculo del tránsito se realizó en términos del número de ejes equivalentes de ocho coma dos (8,2) toneladas, acumulados durante un periodo de servicio del pavimento en el carril de diseño no menor de 10 años ( $\Sigma L$ ), obtenido con el método de Instituto de Ingeniería de la UNAM para la condición de daño superficial.

En base a lo anterior se definieron cuatro niveles de tránsito (Bajo:  $\Sigma L \leq 1 \times 10^6$ , Intermedio:  $1 \times 10^6 \leq \Sigma L \leq 1 \times 10^7$ , Alto:  $1 \times 10^7 \leq \Sigma L \leq 2 \times 10^7$ , Muy Alto:  $\Sigma L > 2 \times 10^7$ ). Se homogeneizó la metodología de cálculo de las propiedades volumétricas, siendo la única diferencia en el procedimiento que de acuerdo con el nivel de tránsito las probetas se deberán fabricar con el martillo Marshall o con el compactador giratorio. Lo cual reducirá las diferencias entre las metodologías de diseño volumétrico dando características similares de la mezcla asfáltica.

De igual forma se definieron los ensayos a realizar para la evaluación del desempeño de la mezcla asfáltica, siendo que para los dos primeros niveles se solicita la realización del ensayo de estabilidad y flujo Marshall, para un nivel de tránsito alto se solicita la realización de ensayos de susceptibilidad a la humedad por medio de la resistencia a la tensión indirecta y la susceptibilidad a la deformación permanente por medio de la rueda cargada de Hamburgo. Para el nivel más alto de tránsito se incorporan ensayos de propiedades mecánicas de la mezcla asfáltica como son el módulo dinámico, ensayo de deformación permanente mediante carga axial repetida y el ensayo de fatiga en flexión en cuatro puntos.

En el segundo capítulo se presenta el procedimiento para el control de calidad de la mezcla asfáltica en caliente, al igual que el en capítulo anterior está especificado en función del nivel de tránsito. Aunque el procedimiento fue adecuado para una mezcla asfáltica en caliente de granulometría densa, la secuencia de ensayos es general y puede utilizarse en cualquier otro tipo de mezcla simplemente adecuando los requerimientos de calidad.

Este procedimiento contempla la verificación de los requerimientos de calidad de los materiales (material pétreo y asfáltico), la calibración de la producción de la mezcla asfáltica o calibración de la planta la cual contempla la granulometría de diseño, el contenido de asfalto y las temperaturas de mezclado.

Se presenta el procedimiento de calibración del proceso constructivo mediante el tramo de prueba, la cual considera además de la revisión de la calidad de la mezcla asfáltica, los ensayos de desempeño en la mezcla asfáltica. Como punto importante a remarcar, es que se propone el uso de un densímetro para el control de la compactación de la mezcla asfáltica y así reducir el número de núcleos extraídos en el pavimento. Como último punto se presenta los puntos a seguir durante la evaluación de la mezcla asfáltica durante el control rutinario, definiendo el procedimiento de muestreo aleatorio, las frecuencias de muestreo, y ensayos a realizar de acuerdo al nivel de tránsito.

El último capítulo es el método de diseño volumétrico de mezclas asfálticas de granulometría densa. En donde se describe el procedimiento de cálculo de propiedades volumétricas de la mezcla asfáltica. Presentando la secuencia de cálculo a seguir para determinar el contenido de asfalto inicial, propiedades volumétricas estimadas y la determinación del contenido de asfalto de la fórmula de trabajo, homogeneizando cada uno de los procedimientos de cálculo para todos los niveles de tránsito definidos, lo cual elimina sustancialmente las diferencias entre las metodologías de diseño.





# Introducción

---

El diseño de mezclas asfálticas en caliente ha ido evolucionando a lo largo de los años. Estos cambios han sido tanto en los procedimientos de elaboración de la mezcla asfáltica como en la evaluación de las propiedades de desempeño de la misma. Esto se puede ejemplificar con la sustitución en Estados Unidos del Método Marshall por la metodología Superpave. Cabe señalar que estos cambios fueron paulatinos y solamente en alguno estados de la Unión Americana.

Bajo esta situación y debido a que en México se sigue utilizando el diseño Marshall para el diseño de mezclas asfálticas en caliente para carreteras de bajo tránsito, por lo cual es importante que la metodología de diseño de la mezcla asfáltica propuesta contemple el uso de ambas metodologías, las cuales estarán asociadas al nivel de las solicitaciones que le serán impuesta cuando forman parte del pavimento asfáltico. Siendo considerado el compactador Marshall para niveles de tránsito menores a los 10 millones de ejes equivalentes, en donde el ensayo de desempeño considerado es la estabilidad y flujo Marshall. Para tránsitos mayores se recomienda que los especímenes sean fabricados mediante un compactador giratorio e implementando ensayos de desempeño como la susceptibilidad a la humedad y a la deformación permanente, los cuales son ensayos comúnmente realizados en México. Para las condiciones de tránsito extremas se agregan ensayos mecánicos como es la evaluación del módulo dinámico, deformación permanente por carga repetida y ensayo de fatiga en flexión en cuatro puntos.

Sin embargo, el cálculo de la volumetría fue homogeneizado para cada uno de los niveles de tránsito, lo cual reduce significativamente las diferencias en la determinación de las propiedades volumétricas de la mezcla asfáltica entre los diferentes niveles de diseño.

Uno de los puntos importantes a considerar es el control de calidad de la mezcla asfáltica, la cual debe apegarse a la metodología de diseño. Esta metodología debe considerar los requerimientos de calidad de los materiales seleccionados durante el diseño, la calibración de la producción de la mezcla asfáltica o calibración de la planta de producción de mezcla asfáltica, la verificación del tramo de prueba o calibración del proceso constructivo, y el control rutinario durante la ejecución de la obra.

El procedimiento presentado, contempla cada uno de estos puntos en una secuencia que tiene como objetivo reducir el número de muestras que se extraen del pavimento utilizando procedimientos de muestreo aleatorio y la incorporación de mediciones de densidades mediante un densímetro.



# **1 Calidad de mezclas asfálticas de granulometría densa en caliente para carreteras en función del nivel de tránsito**

---

Una mezcla asfáltica es una combinación homogénea de material pétreo y asfáltico y eventualmente aditivos.

## **1.1 Mezclas asfálticas en caliente**

Son las elaboradas en caliente, utilizando cemento asfáltico y materiales pétreos, en una planta mezcladora estacionaria o móvil, provista del equipo necesario para calentar los componentes de la mezcla.

La mezcla asfáltica de granulometría densa en caliente se define de la siguiente manera:

### **Mezcla asfáltica de granulometría densa**

Es la mezcla en caliente, uniforme y homogénea, elaborada con cemento asfáltico y materiales pétreos bien graduados, con tamaño nominal entre treinta y siete coma cinco (37,5) milímetros ( $1\frac{1}{2}$  in) y nueve coma cinco (9,5) milímetros ( $\frac{3}{8}$  in), que satisfagan los requisitos de calidad establecidos en la Cláusula D. de la Norma N-CMT-4-04/17, Materiales Pétreos para Mezclas Asfálticas. Normalmente se utiliza en la construcción de carpetas asfálticas de pavimentos nuevos en los que se requiere una capacidad estructural, la cual esté en función del nivel de tránsito.

## **1.2 Requisitos de calidad**

Los materiales pétreos cumplirán con lo establecido en la Norma N-CMT-4-04/17, Materiales Pétreos para Mezclas Asfálticas; los cementos asfálticos cumplirán con la Norma N-CMT-4-05-004/18, Calidad de Cementos Asfálticos según su Grado de Desempeño (PG).

### **Requisitos de calidad en base al nivel de tránsito**

Los requisitos de calidad de las mezclas asfálticas de granulometría densa dependerán del nivel de tránsito esperado en términos del número de ejes equivalentes de ocho coma dos (8,2) toneladas, acumulados durante un periodo de servicio del pavimento en el carril de diseño no menor de 10 años ( $\Sigma L$ ), obtenido con el método de Instituto de Ingeniería de la UNAM para la condición de daño superficial (versión digital).

Se consideran cuatro niveles de tránsito, los cuales se indican en la Tabla 1.1.

**Tabla 1.1 Niveles de tránsito esperados en términos de número de ejes equivalentes.**

Nivel de diseño	Número de ejes equivalentes de diseño	Condición de Tránsito
Nivel 1	$\Sigma L \leq 1 \times 10^6$	Bajo
Nivel 2	$1 \times 10^6 < \Sigma L \leq 1 \times 10^7$	Intermedio
Nivel 3	$1 \times 10^7 < \Sigma L \leq 2 \times 10^7$	Alto
Nivel 4	$\Sigma L > 2 \times 10^7$	Muy alto

Estas mezclas asfálticas serán diseñadas mediante el procedimiento descrito en el Capítulo 3, Método de diseño volumétrico de mezclas asfálticas de granulometría densa, en función del tránsito esperado en términos del número de ejes equivalentes.

### Requisitos de calidad de una mezcla asfáltica para nivel de tránsito bajo ( $\Sigma L \leq 1 \times 10^6$ )

Para un tránsito bajo la mezcla asfáltica cumplirá con los requisitos de calidad que se indican en la Tabla 1.2 y con el porcentaje de vacíos en el agregado mineral (VAM) indicado en la Tabla 1.3 de esta Norma, en función del tamaño nominal de la granulometría de diseño de la mezcla asfáltica.

**Tabla 1.2 Requisitos de calidad para mezclas asfálticas para nivel de tránsito bajo ( $\Sigma L \leq 1 \times 10^6$ ), Martillo Marshall.**

Características	Especificación
<b>Propiedades volumétricas</b>	
Compactación; número de golpes en cada cara de la probeta (Marshall)	50
Vacíos de aire (Va); %	4
Vacíos llenos de asfalto (VFA); %	65 – 78
Relación Filler-asfalto ( $R_{F-Pbe}$ ) <sup>[1]</sup>	0,6 - 1,2
<b>Propiedades de Desempeño</b>	
Estabilidad; N (lbf), mínimo	5340 (1 200)
Flujo; mm ( $10^{-2}$ in) <sup>[2]</sup>	2 – 4 (8 - 16)

Nota 1. Se considera Filler el material que pasa la Malla No. 200

Nota 2. Para asfaltos modificados el valor de flujo solo se reportará

**Tabla 1.3 Vacíos en el agregado mineral (VAM) para mezclas asfálticas de granulometría densa.**

Tamaño nominal (TN) del material pétreo utilizado en la mezcla <sup>[2]</sup>		Para 4 % de Vacíos de aire en la mezcla asfáltica
mm	Designación	Vacíos en el agregado mineral (VAM) %, mínimo
9,5	3/8"	15
12,5	1/2"	14
19	3/4"	13
25	1"	12
37,5	1 1/2"	11

Nota. El tamaño nominal es el tamaño de malla superior a la primera malla que retiene más del 10% del material pétreo en la granulometría de diseño.

### Requisitos de calidad de una mezcla asfáltica para nivel de tránsito medio ( $1 \times 10^6 < \Sigma L \leq 1 \times 10^7$ )

Para un tránsito medio la mezcla asfáltica cumplirá con los requisitos de calidad que se indican en la Tabla 1.4 y con el porcentaje de vacíos en el agregado mineral (VAM) indicado en la Tabla 1.3 de este documento, en función del tamaño nominal de la granulometría de diseño de la mezcla asfáltica.

**Tabla 1.4 Requisitos de calidad para mezclas asfálticas para nivel de tránsito medio ( $1 \times 10^6 < \Sigma L \leq 1 \times 10^7$ ), Martillo Marshall.**

Características	Especificación
<b>Propiedades volumétricas</b>	
Compactación; número de golpes en cada cara de la probeta (Marshall)	75
Vacíos de aire (Va); %	4
Vacíos llenos de asfalto (VFA); %	65 - 75
Relación Filler-asfalto ( $R_{F-Pbe}$ ) <sup>[1]</sup>	0,6 - 1,2
<b>Propiedades de Desempeño</b>	
Estabilidad; N (lbf), mínimo	8 000 (1 800)
Flujo; mm ( $10^{-2}$ in) <sup>[1]</sup>	2 - 3,5 (8 - 14)

Nota. Para asfaltos modificados el valor de flujo solo se reportará

### Requisitos de calidad de una mezcla asfáltica para nivel de tránsito alto ( $1 \times 10^7 < \Sigma L \leq 2 \times 10^7$ )

Para un tránsito alto la mezcla asfáltica cumplirá con los requisitos de calidad que se indican en la Tabla 1.5 y con el porcentaje de vacíos en el agregado mineral (VAM) indicado en la Tabla 1.3 de este documento, en función del tamaño nominal del material pétreo utilizado en la mezcla, para un porcentaje de vacíos de aire en la mezcla asfáltica de 4%.

**Tabla 1.5 Requisitos de calidad para mezclas asfálticas para nivel de tránsito alto ( $1 \times 10^7 < \Sigma L \leq 2 \times 10^7$ ), Compactador Giratorio.**

Características	Especificación
<b>Propiedades volumétricas</b>	
Número de giros iniciales en cada probeta	8
Número de giros de diseño en cada probeta	100
Grado de compactación al número de giros iniciales ( $GC@N_{ini}$ ), %	$\leq 89$
Grado de compactación al número de giros máximos ( $GC@N_{max}$ ), %	$\leq 98$
Vacíos de aire ( $V_a$ ) a los giros de diseño, %	4
Vacíos llenos de asfalto (VFA); %	65 - 75
Relación Filler-asfalto ( $R_{F-Pbe}$ ) <sup>[1]</sup>	0,6 - 1,2
<b>Propiedades de desempeño</b>	
Susceptibilidad al daño inducido por humedad por medio de la Relación en la Resistencia a la Tensión Indirecta (TSR), %, mínimo	80
Susceptibilidad a la formación de roderas y daño por humedad mediante la Rueda Cargada de Hamburgo a 50°C y 20 000 pasadas, mm, máximo	10

**Requisitos de calidad de una mezcla asfáltica para nivel de tránsito muy alto ( $\Sigma L > 2 \times 10^7$ )**

Para un tránsito muy alto la mezcla asfáltica cumplirá con los requisitos de calidad que se indican en la Tabla 1.6 y con el porcentaje de vacíos en el agregado mineral (VAM) indicado en la Tabla 1.3 de este documento, en función del tamaño nominal del material pétreo utilizado en la mezcla, para un porcentaje de vacíos de aire en la mezcla asfáltica de 4%.

**Tabla 1.6 Requisitos de calidad para mezclas asfálticas para nivel de tránsito muy alto ( $\Sigma L > 2 \times 10^7$ ), Compactador Giratorio.**

Características	Especificación
<b>Propiedades volumétricas</b>	
Número de giros iniciales en cada probeta	8
Número de giros de diseño en cada probeta	100
Grado de compactación al número de giros iniciales ( $GC@N_{ini}$ ), %	$\leq 89$
Grado de compactación al número de giros máximos ( $GC@N_{max}$ ), %	$\leq 98$
Vacíos de aire ( $V_a$ ) a los giros de diseño, %	4
Vacíos llenos de asfalto (VFA); %	65 - 75
Relación Filler-asfalto ( $R_{F-Pbe}$ ) <sup>[1]</sup>	0,6 - 1,2
<b>Propiedades de desempeño</b>	
Susceptibilidad al daño inducido por humedad por medio de la Relación en la Resistencia a la Tensión Indirecta (TSR), %, mínimo	80
Susceptibilidad a la formación de roderas y daño por humedad mediante la Rueda Cargada de Hamburgo a 50°C y 20 000 pasadas, mm, máximo	10

Deformación permanente mediante el Ensayo de Compresión Axial Cíclica, 40°C, $\sigma_v = 400\text{kPa}$ , $\sigma_h = 0\text{kPa}$ , $f=5\text{Hz}$ ( $t_c=0,2\text{s}$ , $t_r=0,8\text{s}$ ), ciclos de carga 10 000, deformación axial acumulada, %, máxima	1,5
Módulo Dinámico, $ E^* $ 20°C, 10Hz, MPa, mínimo	5 000
Resistencia a la fatiga, Viga a Flexión en cuatro puntos, 20°C, $f=10\text{Hz}$ , No. Ciclos	
Repeticiones mínimas a la falla <sup>[2]</sup> a 400 $\mu\epsilon$ , $N_f$ , mínimo	$1,0 \times 10^6$
Repeticiones mínimas a la falla <sup>[2]</sup> a 500 $\mu\epsilon$ , $N_f$ , mínimo	$1,0 \times 10^5$
Repeticiones mínimas a la falla <sup>[2]</sup> a 600 $\mu\epsilon$ , $N_f$ , mínimo	$1,0 \times 10^4$
Nota. El criterio de falla considerado es la pérdida del 50% de la rigidez inicial.	

### 1.3 Condiciones para la elaboración y uso adecuado de las mezclas asfálticas

- a) Las mezclas asfálticas en caliente se elaborarán a las temperaturas más bajas posibles que permitan obtener una mezcla y cubrimiento del material pétreo uniformes, pero lo suficientemente altas para disponer del tiempo requerido para su transporte, tendido y compactación. Para asfaltos no modificados las temperaturas de mezclado serán determinadas mediante la curva Viscosidad-Temperatura del material asfáltico y, dependiendo del tipo de cemento asfáltico utilizado. Para un asfalto convencional (PG 64-22), las temperaturas de mezclado estarán en un rango entre 145 – 160°C; cuando se trate de cementos asfálticos modificados, las temperaturas de mezclado se consultarán con el proveedor del material asfáltico.
- b) Los espesores compactos de las capas que se construyan con mezclas asfálticas en caliente, no serán menores que cuatro (4) veces el tamaño nominal del material pétreo utilizado para granulometrías gruesas y tres veces para granulometrías finas. El espesor máximo de la capa será aquel que el equipo sea capaz compactar, de tal forma que la diferencia entre el grado de compactación en los tres (3) centímetros superiores y los tres (3) centímetros inferiores, no difiera en más del uno (1) por ciento; si esto sucede, la carpeta se deberá construir en dos o más capas.



## **2 Procedimiento de control de calidad de mezclas asfálticas de granulometría densa**

---

Previo a la producción de la mezcla asfáltica y arranque de la obra, se deberá: (1) verificar la calidad de los materiales a utilizar, (2) realizar la calibración de la planta de mezcla asfáltica, y (3) evaluar el equipo y procedimiento de construcción de la carpeta asfáltica en caliente. Es importante que esta etapa sea realizada antes del arranque de obra.

Los ensayos indicados en las secciones 2.1, 2.2 y 2.3 se realizarán por duplicado para verificar la repetibilidad del ensayo, y se reportará como resultado de una prueba el promedio de dos resultados individuales.

### **2.1 Evaluación de los materiales**

Los materiales a utilizar en la producción de la mezcla asfáltica deberán ser los mismos con los que se realizó el diseño de la mezcla. Si existiera un cambio en la fuente del agregado pétreo o en el material asfáltico, el proyectista deberá aprobar dicho cambio y se verificará el diseño de la mezcla en un laboratorio autorizado y reconocido previamente por el mismo.

#### **2.1.1 Material pétreo en banco**

Previo a trasladar el material pétreo a la planta de mezcla asfáltica, se deberán verificar las características de calidad para finos y gruesos indicados en las 2.1; así como la granulometría de las fracciones definidas en el diseño, utilizando los tamaños de malla especificadas en la Tabla 1 de la norma N.CMT.4.04/17, Materiales pétreos para mezclas asfálticas, con el objetivo de verificar que el procedimiento de trituración no ha variado desde el diseño de la mezcla.

**Tabla 2.1 Características de calidad en banco de materiales.**

Ensayo	Norma	Especificación
Partículas fracturadas (trituradas) <sup>[1]</sup> , % (2 o más)	PT 551 AG-XI <sup>[2]</sup>	90 mín.
Partículas planas y alargadas <sup>[1]</sup> , %	M·MMP·4·04·005/08	40 máx
Equivalente de arena <sup>[1]</sup> , %	PT 551 AG-IV <sup>[2]</sup>	50 mín.
Angularidad del fino <sup>[1]</sup> , %	PT 551 AG-VI <sup>[2]</sup>	40 mín.

Nota 1. Ensayos a realizar en el laboratorio de control de calidad de campo. Considerar 2 días laborales para la entrega de resultados.

Nota 2. Publicación técnica No. 551 *Manual de ensayos para laboratorio: Agregados (AG) para mezclas asfálticas* del Instituto Mexicano del Transporte

## 2.1.2 Material pétreo en planta

Una vez verificadas las características de la Tabla 2.1, se deberá trasladar el material pétreo a la planta de mezcla en caliente. El material pétreo se muestreará directamente de los almacenamientos de la planta. Se muestreará cada fracción del agregado a utilizar en la elaboración de la mezcla de acuerdo a la norma M·MMP·4·04·001/02 Muestreo de materiales pétreos para mezclas asfálticas.

El laboratorio de control de calidad del Contratista determinará en campo la granulometría de cada fracción de material pétreo de acuerdo y las características físicas para agregado pétreo especificadas Cláusula D. de la Norma N·CMT·4·04/17, Materiales Pétreos para Mezclas Asfálticas, así como las características de calidad de los materiales pétreos de acuerdo a la Tabla 2.2. Se reportarán los valores obtenidos como parámetros de control de calidad de los materiales pétreos previo al arranque de obra. Los ensayos se realizarán bajo los métodos de prueba especificados en la Publicación técnica No. 551 del Instituto Mexicano del Transporte *Manual de ensayos para laboratorio: Agregados (AG) para mezclas asfálticas*, a menos que se especifique un método de la normativa de la SCT.

**Tabla 2.2 Requisitos de calidad del material pétreo en términos de número de ejes equivalentes.**

Nivel de diseño	Número de ejes equivalentes de diseño	Condición de Tránsito	Norma N·CMT·4·04/17 Cláusula D
Nivel 1	$\Sigma L \leq 1 \times 10^6$	Bajo	Tabla 2
Nivel 2	$1 \times 10^6 < \Sigma L \leq 1 \times 10^7$	Intermedio	Tabla 3
Nivel 3	$1 \times 10^7 < \Sigma L \leq 2 \times 10^7$	Alto	Tabla 3
Nivel 4	$\Sigma L > 2 \times 10^7$	Muy alto	Tabla 4

## 2.1.3 Material asfáltico en planta

Se tomará una muestra del material asfáltico —a utilizar en la producción de la mezcla asfáltica— del auto-tanque, de acuerdo a la norma M·MMP·4·05·001/00

Muestreo de materiales asfálticos. Se analizará la calidad del mismo de acuerdo a la clasificación por grado de desempeño (Grado PG) en base a los ensayos y especificaciones indicados en la Norma N.CMT.4.05.004/18 Calidad de cementos asfálticos según su grado de Desempeño (PG) Clausula E Tabla 2. Se reportarán los valores obtenidos como parámetros de control de calidad del material asfáltico previo al arranque de la obra.

## 2.2 Calibración de la mezcla asfáltica

### 2.2.1 Calibración de la granulometría de diseño

En cuanto los materiales de construcción estén disponibles, el Contratista calibrará la planta de mezcla en caliente en seco (sin uso de material asfáltico) con el objetivo de reproducir la estructura granulométrica del diseño de la mezcla. Para lo cual, el Contratista:

Tomará una muestra de la combinación de materiales pétreos de la banda transportadora, en la planta de mezcla en caliente de acuerdo al método M-MMP-4-04-001/02 Muestreo de materiales pétreos para mezclas asfálticas.

A las muestras tomadas de la banda transportadora se les determinará la granulometría de la combinación de materiales pétreos de acuerdo al procedimiento descrito en la PT 551 AG-II “Método de prueba para el análisis granulométrico de agregados finos y gruesos”. Se realizarán los ajustes pertinentes en las dosificaciones de cada fracción del material pétreo para reproducir la curva granulométrica de diseño dentro de las tolerancias especificadas para granulometría en la Tabla 2.3 y dentro de los límites granulométricos especificados. en la Norma N.CMT-4-04/17, Materiales Pétreos para Mezclas Asfálticas, Cláusula D, Tabla 1.

**Tabla 2.3 Tolerancias en los requisitos de la mezcla asfáltica.**

Propiedad de composición de la mezcla	Método de extracción <sup>[1]</sup> (Rotarex)	Método de ignición <sup>[2]</sup>
	M-MMP-4-05-049/15	ASTM D6307
Contenido de asfalto, %	± 0,3	± 0,18
Material que pasa por las mallas superiores a la No. 4 (4,75mm) <sup>[1]</sup>	± 3	
Material que pasa por las mallas comprendidas entre la No. 8 (2,36mm) y la No. 100 (0,15mm) <sup>[1]</sup>	± 2	
Material que pasa la malla No. 200 (0,075mm) <sup>[1]</sup>	± 0,7	
Densidad relativa teórica máxima de la mezcla compactada (D <sub>mm</sub> ) <sup>[1]</sup>	Reportar	

Nota 1. Ensayos para determinar en el laboratorio de control de calidad de campo.

Nota 2. Ensayos a determinar en el laboratorio central. Considerar 10 días laborales para la entrega de resultados.

## 2.2.2 Evaluación de la mezcla asfáltica

En cuanto la calibración de la combinación de materiales pétreos sea realizada (en seco), el Contratista deberá calibrar la planta de mezcla en caliente y apegándose a la fórmula de trabajo definida en el diseño de la mezcla en lo que se refiere a: estructura granulométrica de la combinación de materiales, contenido de material asfáltico, y temperaturas de mezclado. El Contratista producirá al menos 50 toneladas de mezcla asegurando una producción uniforme. Se tomarán al menos dos muestras de mezcla asfáltica durante la producción: (1) a la salida del mezclador y (2) en la caída al transportador de acuerdo al método ASTM D979 “Práctica estándar para muestreo de mezclas asfálticas” con una cantidad aproximada por muestra de 10 kg.

Esta mezcla cumplirá con la granulometría y contenido de asfalto de acuerdo con las tolerancias indicadas en la Tabla 2.3 y dentro de los límites granulométricos especificados en la Norma N.CMT-4-04/17, Materiales Pétreos para Mezclas Asfálticas, Cláusula D, Tabla 1. Adicionalmente, se deberá obtener el valor de  $D_{mm}$  de la mezcla asfáltica, la cual será la densidad máxima de referencia de la mezcla para determinar contenidos de vacíos durante la etapa constructiva. La elaboración de la mezcla se realizará de acuerdo a las temperaturas de mezclado recomendadas por el proveedor del material asfáltico.

Si el contenido de asfalto y granulometría no cumplen con las tolerancias especificadas en la Tabla 2.3, se verificarán las propiedades volumétricas especificadas en la Tabla 2.4.

**Tabla 2.4 Requisitos de calidad de propiedades volumétricas en términos de número de ejes equivalentes.**

Nivel de diseño	Número de ejes equivalentes de diseño	Condición de Tránsito	Capítulo 1
Nivel 1	$\Sigma L \leq 1 \times 10^6$	Bajo	Tabla 1.2, 1.3
Nivel 2	$1 \times 10^6 < \Sigma L \leq 1 \times 10^7$	Intermedio	Tabla 1.3, 1.4
Nivel 3	$1 \times 10^7 < \Sigma L \leq 2 \times 10^7$	Alto	Tabla 1.3, 1.5
Nivel 4	$\Sigma L > 2 \times 10^7$	Muy alto	Tabla 1.3, 1.6

En caso de no cumplir con las tolerancias requeridas, se realizarán los ajustes necesarios en la producción. El Contratista reportará estos valores al proyectista, junto con las acciones tomadas para corregir las desviaciones mayores a las permitidas con respecto a la mezcla de diseño.

## 2.3 Calibración del proceso constructivo (Tramo de prueba)

Una vez concluido el proceso de calibración de la planta de mezcla en caliente, el Contratista producirá la mezcla asfáltica necesaria para realizar el tramo de prueba de 200 metros de longitud por un ancho de 7 metros, al espesor requerido en el proyecto; asegurando una producción uniforme dentro de las tolerancias mostradas en la Tabla 2.3.

### 2.3.1 Evaluación de la mezcla asfáltica suelta

El Contratista realizará el muestreo de acuerdo a un procedimiento de números aleatorios. Se considerará el tramo de prueba como un solo lote y éste se dividirá en 3 sub-lotes. Cada muestra a tomar por sub-lote será de 20 kg. Se evaluará la mezcla asfáltica de acuerdo a las características establecidas en la Tabla 2.5. Se tomará la temperatura de la mezcla asfáltica en cada muestreo y se registrará como la temperatura de mezclado.

El Contratista deberá muestrear de acuerdo a la norma ASTM D979 “*Práctica estándar para muestreo de mezclas asfálticas*” a la salida del mezclador y caída al transportador. Si se requiere, el Contratista ajustará la producción de la mezcla en caliente para cumplir los rangos de tolerancia. Si los valores obtenidos en las pruebas de granulometría y contenido de asfalto de la Tabla 2.5, no cumplen con las tolerancias establecidas en la Tabla 2.3, se deberá regresar al proceso de calibración de la mezcla asfáltica (Inciso 2.2).

**Tabla 2.5 Características requeridas en la evaluación de la mezcla asfáltica en el tramo de prueba.**

Lote	Sub-lotes	Características requeridas por Sub-lote
1	3	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Densidad relativa teórica máxima (<math>D_{mm}</math>) de la mezcla determinada en el laboratorio de campo y en el laboratorio central.</li> <li>- Contenido de asfalto de la mezcla asfáltica (M·MMP·4·05·049/15 ó ASTM D6307).</li> <li>- Granulometría del material tomado de la banda.</li> </ul>

### 2.3.2 Evaluación de la mezcla asfáltica compactada (tramo de prueba)

El lote de mezcla producida para el tramo de prueba, será colocado en el espesor requerido en el proyecto.

*Nota: Si después de los ajustes mencionados en la fracción 2.2.2, la mezcla producida no cumple lo solicitado, el Contratista valorará el riesgo de aplicar una mezcla que pudiese llegar a presentar problemas de desempeño.*

El patrón de compactación deberá ser una secuencia a seguir durante el procedimiento constrictivo de la carpeta asfáltica que asegure un Grado de Compactación (GC) entre el 94 – 97% (en relación a la Densidad relativa teórica máxima,  $D_{mm}$ ), determinada en el campo para la mezcla producida y tendida en el tramo de prueba, mediante el procedimiento MAC-III de la Publicación Técnica No. 516 del Instituto Mexicano del Transporte *Manual de ensayos para Laboratorio: Mezclas asfálticas en caliente (MAC), Parte 1*. Se realizarán mediciones de densificación, utilizando un densímetro (ensayo no destructivo), a cada 25 m y en cinco posiciones transversales al eje.

Para los ensayos destructivos, se realizarán extracciones (núcleos) en campo de acuerdo a la norma ASTM D5361 “*Práctica estándar para el muestreo de mezcla asfáltica compactada para evaluación en laboratorio*”. El muestreo se realizará utilizando un procedimiento de números aleatorios. Se considerará un solo lote para todo el tramo de prueba y dos sub-lotes; por consiguiente, cada sub-lote tendrá un tamaño de 100 m. El número de extracciones y ensayos a realizar por sub-lote se indican en la Tabla 2.6. Previo a la extracción de cada núcleo, se deberán tomar mediciones de la densidad utilizando el densímetro para la calibración del mismo.

Los núcleos extraídos de campo deberán cumplir con el Grado de Compactación del 94 – 97% (en relación a la Densidad relativa teórica máxima,  $D_{mm}$ ). Para el cálculo de los vacíos de aire y el Grado de Compactación se deberá utilizar el valor de la Densidad relativa teórica máxima ( $D_{mm}$ ) determinado en el laboratorio central de la evaluación de la mezcla asfáltica establecida en la fracción 2.3.3 de este documento. En caso de que el tramo de prueba construido no cumpla con todos los objetivos definidos, el Contratista ejecutará los tramos de prueba necesarios hasta cumplir con ellos.

Los requisitos de calidad en cuanto a propiedades de desempeño que debe cumplir la mezcla serán los establecido en el diseño de la mezcla asfálticas en función del nivel de tránsito (Tablas 1.2 a 1.6).

Tabla 2.6 Ensayos para el tramo de prueba por sub-lote.

Extracciones	Características requeridas por extracción
<b>Nivel I Tránsito bajo y Nivel II Tránsito Intermedio</b>	
4 núcleos de 10,1 cm (4 pulgadas)	- Densidad relativa bruta ( $D_{mb}$ ) - Vacíos de aire ( $V_a$ ) - Estabilidad y Flujo Marshall
5 kg de Mezcla suelta	- Contenido de asfalto - Granulometría
<b>Nivel III Tránsito Alto</b>	
5 kg de Mezcla suelta	- Contenido de asfalto - Granulometría
6 núcleos de 10,1 cm (4 pulgadas)	- Densidad relativa bruta ( $D_{mb}$ ) - Vacíos de aire ( $V_a$ ) - Susceptibilidad al daño por humedad (TSR)
1 núcleos de 25,4 cm (10 pulgadas) o 2 núcleos de 15,2 cm (6 pulgadas)	- Densidad relativa bruta ( $D_{mb}$ ) - Vacíos de aire ( $V_a$ ) - Susceptibilidad a la deformación permanente (Rueda de Hamburgo)
<b>Nivel IV Tránsito Muy Alto</b>	
5 kg de Mezcla suelta	- Contenido de asfalto. - Granulometría.
6 núcleos de 10,1 cm (4 pulgadas)	- Densidad relativa bruta ( $D_{mb}$ ). - Vacíos de aire ( $V_a$ ). - Susceptibilidad al daño por humedad (TSR).
1 núcleos de 25,4 cm (10 pulgadas) o 2 núcleos de 15,2 cm (6 pulgadas)	- Densidad relativa bruta ( $D_{mb}$ ). - Vacíos de aire ( $V_a$ ). - Susceptibilidad a la deformación permanente (Rueda de Hamburgo).
1 Losa de pavimento 30cm*20cm* $e_{carpeta}$	Módulo Dinámico, $ E^* $ 20°C, 10Hz
1 Losa de pavimento 30cm*40cm* $e_{carpeta}$	Resistencia a la fatiga, Viga en Flexión en cuatro puntos, 20°C, 10Hz

### 2.3.3 Aceptación o rechazo del tramo de prueba

Si la mezcla no cumple con las tolerancias de la fórmula de trabajo requeridas en la Tabla 2.3, entonces el Proyectista podrá aprobar el inicio de la obra con los ajustes a la mezcla asfáltica hechos en campo con respecto al diseño original, sólo si la combinación de materiales pétreos y el material asfáltico cumplen con los requisitos de calidad establecidos para el nivel de tránsito seleccionado, la mezcla asfáltica

cumple con los requerimientos volumétricos especificados en la Tabla 2.4, y el Grado de Compactación se encuentra en un rango de 94 – 97% respecto a la Densidad relativa teórica máxima ( $D_{mm}$ ). Los ensayos deberán ser realizados por un laboratorio con Reconocimiento AMAAC-IMT en la categoría de mezclas asfálticas Nivel I-IV según aplique para el nivel de diseño de la mezcla.

Si a juicio del Contratante es necesario retirar el/los tramos de prueba defectuosos que no cumplan con los requerimientos establecidos, el Contratista los retirará y reemplazará, corriendo a cargo del Contratista los costos involucrados, hasta alcanzar los requerimientos marcados en la especificación particular.

## **2.4 Control de calidad rutinario**

El control de calidad rutinario incluye la frecuencia de pruebas para: (a) mantener el proceso en control, (b) determinar rápidamente cuando el proceso esté fuera de control y (c) responder adecuadamente para controlar de nuevo el proceso. El control de calidad rutinario establece los requerimientos mínimos que el Contratista ejecutará durante el proyecto y comprende los siguientes puntos.

Nota: Todos los resultados de ensayos a reportar, indicados en esta sección, no se realizarán por duplicado.

### **2.4.1 Evaluación del material pétreo**

Para verificar la uniformidad de la producción del material pétreo en el banco de materiales durante la ejecución de la obra o bien realizar los ajustes pertinentes a la misma, se obtendrán muestras de acuerdo con la norma M-MMP-4-04-001/02 Muestreo de materiales pétreos para mezclas asfálticas, para cada fracción de material establecida. Se evaluará el agregado pétreo por cada 250 m<sup>3</sup> de material extraído del banco; por lo tanto, el tamaño de lote será de 250 m<sup>3</sup> considerando un sub-lote por lote para muestras de material pétreo tomado del banco.

Por otro lado, se evaluará el agregado en el almacenamiento de la planta de mezcla por cada 2500 m<sup>3</sup> utilizados en la fabricación de la mezcla; considerando un lote de 2500 m<sup>3</sup> y un sub-lote por lote. Los ensayos a evaluar y frecuencia de los mismos se indican en la Tabla 2.7, siguiendo un procedimiento de muestreo de números aleatorios.

Si el proyecto requiere una cantidad inferior a 2500 m<sup>3</sup> de material pétreo, se considerarán dos sub-lotes para realizar la caracterización de la calidad de la fracción gruesa y fina del agregado total de acuerdo a la Tabla 2.2.

**Tabla 2.7 Frecuencia de muestreo de materiales pétreos para el control rutinario.**

Lote	Sub-lote	Lugar de muestreo	Tamaño de muestras parciales (kg)	Ensayos requeridos
Una muestra por cada 250 m <sup>3</sup> de material pétreo extraído del banco que se destinará para el proyecto particular	1	Almacenamiento en banco de material	5	Granulometría Equivalente de arena Azul de metileno
Una muestra por cada 2500 m <sup>3</sup> de material	1	Almacenamiento en planta de mezcla	40	Tabla 2.2

## 2.4.2 Evaluación del material asfáltico

A la llegada de cada auto-tanque de material asfáltico a la planta, se tomará 1 muestra de asfalto de 2 litros de acuerdo a la norma M·MMP·4·05·001/00 Muestreo de materiales asfálticos. Esta muestra se utilizará para determinar las características especificadas en la Tabla 2.8. En caso de que el material asfáltico no cumpla con las especificaciones mínimas establecidas en la Tabla 2.8, éste deberá rechazarse y regresar al proveedor. El material restante deberá ser almacenado y debidamente etiquetado para posibles verificaciones posteriores.

**Tabla 2.8 Características de calidad para el material asfáltico a la llegada de cada auto-tanque.**

Característica	Norma	Especificación
Punto de inflamación Cleveland <sup>[1]</sup> , °C	M·MMP·4·05·007/00	230 mín
Punto de reblandecimiento <sup>[1]</sup> , °C	M·MMP·4·05·009/00	PG 64: 48 mín, PG 70 a 82: 55 mín
Recuperación elástica por torsión <sup>[1]</sup> a 25 °C, %	M·MMP·4·05·024/02	PG 64: N/A PG 70 a 82: 35 mín

Nota. Ensayos a realizar en el laboratorio de control de calidad de campo.

Aunado a lo anterior, cada 110 m<sup>3</sup> de material asfáltico a utilizar en la producción de la mezcla, se tomará una segunda muestra de asfalto de 2 litros. Dicha muestra se enviará al laboratorio central para determinar las características de calidad especificadas en la Norma N.CMT.4.05.004/18 Calidad de cementos asfálticos según su grado de Desempeño (PG) Clausula E Tabla 2. Los ensayos deberán ser realizados por un laboratorio con Reconocimiento AMAAC-IMT en la categoría de asfaltos. El material asfáltico deberá cumplir con el Grado PG especificado en el proyecto.

### 2.4.3 Evaluación de la mezcla asfáltica

Se muestreará la mezcla asfáltica a la salida del mezclador y caída al transportador de acuerdo con la norma ASTM D979 “*Práctica estándar para muestreo de mezclas asfálticas*”. La frecuencia del muestreo se realizará considerando un tamaño de lote de 700 m<sup>3</sup>, independientemente de los días que tarde la planta en finiquitar dicho lote. El tamaño de sub-lote será de 175 m<sup>3</sup> (4 sub-lotes / lote). El muestreo se realizará de acuerdo a un procedimiento aleatorio. Si el tamaño de la producción del día es menor a 175 m<sup>3</sup>, se deberá tomar una muestra al final del día. El Contratista deberá llevar un registro diario de los siguientes puntos: temperatura del material asfáltico, temperatura de mezclado, volumen (m<sup>3</sup> o ton) de mezcla producida al día. La frecuencia, tamaño de muestra, número de muestras y las características a determinar se establecen en la Tabla 2.9 Frecuencia, número y tamaño de muestra de la mezcla asfáltica.

**Tabla 2.9 Frecuencia, número y tamaño de muestra de la mezcla asfáltica.**

Lote	Sub-lotes	Características a determinar	Tamaño de muestra requerido
700 m <sup>3</sup>	4	- Densidad relativa teórica máxima ( $D_{mm}$ ) - Contenido de asfalto (CA) - Granulometría	5 kg

### 2.4.4 Tendido y compactación

El Contratista llevará un registro diario de los siguientes puntos durante la producción de mezcla asfáltica: número de camiones de mezcla aplicados, volumen de mezcla (m<sup>3</sup> o ton) por camión, temperatura de tendido, temperaturas de inicio y finalización de compactación. La mezcla tendida y compactada cumplirá con un Grado de Compactación de 94% - 97% respecto a la Densidad relativa teórica máxima ( $D_{mm}$ ).

La frecuencia, número de extracciones (núcleos) y métodos de ensayo a realizar en el tramo se especifica en la Tabla 2.10. El muestreo será determinado utilizando un procedimiento de muestreo de números aleatorios. Si en el proyecto, la longitud de la vía es menor a las frecuencias establecidas en la Tabla 2.10, se determinarán al menos una vez cada una de las pruebas, excepto el porcentaje de Densidad relativa teórica máxima ( $D_{mm}$ ), en cuyo caso sí se realizarán al menos 5 mediciones en sentido longitudinal.

**Tabla 2.10 Frecuencia, características y número de mediciones requeridas para un tramo aplicado.**

Frecuencia	Características a determinar	Método / Tamaño de muestra	Sub-lotes
<b>Nivel I Transito bajo y Nivel II Transito Intermedio</b>			
Cada 50m en 5 puntos transversales al eje	- Porcentaje de compactación respecto a la Densidad relativa teórica máxima ( $D_{mm}$ )	No destructivo con densímetro	N/A
Cada un kilómetro / carril	- Estabilidad y flujo Marshall - Densidad relativa bruta ( $D_{mb}$ ) y vacíos de aire ( $V_a$ )	4 núcleos de 10.1 cm (4 pulgadas)	1
Cada dos kilómetros / carril	- Contenido de asfalto - Granulometría	5 kg de mezcla suelta	2
<b>Nivel III Transito alto</b>			
Cada 50m en 5 puntos transversales al eje	- Porcentaje de compactación respecto a la Densidad relativa teórica máxima ( $D_{mm}$ )	No destructivo con densímetro	N/A
Cada dos kilómetros / carril	- Contenido de asfalto - Granulometría	5 kg de mezcla suelta	2
Cada dos kilómetros / carril	- Densidad relativa bruta ( $D_{mb}$ ) y vacíos de aire ( $V_a$ ) - Susceptibilidad a la deformación permanente (Rueda de Hamburgo)	1 núcleos de 25,4 cm (10 pulgadas) o 2 núcleos de 15,2 cm (6 pulgadas)	1
Cada cinco kilómetros / carril	- Densidad relativa bruta ( $D_{mb}$ ) - Susceptibilidad al daño por humedad (TSR)	6 núcleos de 10 cm (4 pulgadas)	1
<b>Nivel IV Transito muy alto</b>			
Cada 50m en 5 puntos transversales al eje	- Porcentaje de compactación respecto a la Densidad relativa teórica máxima ( $D_{mm}$ )	No destructivo con densímetro	N/A
Cada dos kilómetros / carril	- Contenido de asfalto - Granulometría	5 kg de mezcla suelta	2

Cada dos kilómetros / carril	- Densidad relativa bruta ( $D_{mb}$ ) y vacíos de aire ( $V_a$ ) - Susceptibilidad a la deformación permanente (Rueda de Hamburgo) - Contenido de asfalto - Granulometría	1 núcleos de 25,4 cm (10 pulgadas) o 2 núcleos de 15,2 cm (6 pulgadas)	1
Cada cinco kilómetros / carril	- Densidad relativa bruta ( $D_{mb}$ ) - Susceptibilidad al daño por humedad (TSR)	6 núcleos de 10 cm (4 pulgadas)	1
Cada cinco kilómetros / carril	- Densidad relativa bruta ( $D_{mb}$ ) - Módulo dinámico, $ E^* $ , 20°C, 10Hz	1 Losa de pavimento 30cm*20cm* $e_{carpeta}$	1
Cada cinco kilómetros / carril	- Densidad relativa bruta ( $D_{mb}$ ) - Resistencia a la fatiga, Viga en Flexión en cuatro puntos, 20°C, 10Hz	1 Losa de pavimento 30cm*40cm* $e_{carpeta}$	1

### 2.4.5 Verificación

La verificación o supervisión de calidad del material pétreo, material asfáltico, mezcla asfáltica y densificación, se realizará al menos en el 10% de la frecuencia requerida en este documento de control de calidad o su fracción. Si el 10% de la frecuencia requerida es menor a dos muestras, se tomarán al menos dos muestras del proyecto completo para la evaluación de las características de: material pétreo, material asfáltico, mezcla asfáltica, y extracciones del tramo tendido y compactado.

### 2.4.6 Análisis estadístico de control de calidad

Todas las inspecciones y resultados de prueba serán registrados en los formatos correspondientes y la información estará disponible siempre que un representante del Contratante lo solicite.

Los resultados de las mediciones de campo o pruebas de laboratorio que se realicen a muestras seleccionadas al azar con un procedimiento basado en tablas de números aleatorios, se analizarán, mediante cartas de control y otros métodos estadísticos de acuerdo con el *Manual M-CAL-1-03 "Análisis Estadístico de Control de Calidad"* para verificar la conformidad con los requisitos de calidad establecidos en el proyecto, detectar las deficiencias y desviaciones significativas en los procesos de construcción y aplicar de forma oportuna y económica las medidas correctivas que sean necesarias.

### **3 Método de diseño volumétrico de mezclas asfálticas de granulometría densa**

---

Se describe el procedimiento para realizar el diseño volumétrico de una mezcla asfáltica en caliente de granulometría densa. El método de diseño se basa en la proporción volumétrica de los materiales pétreos y asfálticos que conforman la mezcla asfáltica, con el fin de determinar la granulometría de diseño, el contenido óptimo de cemento asfáltico y la evaluación del desempeño de la mezcla asfáltica, que permitan cumplir con los requisitos de calidad de la mezcla asfálticas de granulometría densa indicados en el Capítulo 1: Calidad de Mezclas Asfálticas de Granulometría Densa en Caliente para Carreteras en Función del Nivel de Tránsito.

Se verifica que la mezcla asfáltica de diseño cumple con los requisitos volumétricos y se le evalúa por desempeño de acuerdo al nivel de tránsito esperado en función del número de eje equivalentes.

El objetivo del método de diseño es reducir y controlar el daño inducido por humedad, la deformación permanente, el agrietamiento por fatiga y determinar el valor del módulo dinámico para el diseño estructural del pavimento asfáltico.

#### **3.1 Nomenclatura**

Para efectos de este Manual y con base a los diferentes componentes de la mezcla asfáltica y propiedades volumétricas de la misma, se presentan las nomenclaturas utilizadas en el documento:

- $D_{sb}$  .- Densidad relativa bruta del material pétreo
- $D_{sa}$  .- Densidad relativa aparente del material pétreo
- $D_{se}$  .- Densidad relativa efectiva del material pétreo
- $D_{mb}$  .- Densidad relativa bruta de la mezcla asfáltica compacta
- $D_{mm}$  .- Densidad relativa teórica máxima de la mezcla asfáltica
- $P_b$  .- Porcentaje de material asfáltico
- $P_{b\ ini}$  .- Porcentaje de material asfáltico inicial
- $P_{ba}$  .- Porcentaje de material asfáltico absorbido
- $P_{be}$  .- Porcentaje de material asfáltico efectivo
- $V_a$  .- Vacíos de aire de la mezcla asfáltica compacta
- VAM .- Vacíos en el agregado mineral
- VFA .- Vacíos llenos de asfalto
- $R_{F-Pbe}$  .- Relación Filler-cemento asfáltico efectivo
- $D_{mb@N_{ini}}$  .- Densidad relativa bruta de la mezcla asfáltica compacta al número de giros iniciales

- GC@N<sub>ini</sub> .- Grado de compactación de la mezcla asfáltica al número de giros iniciales con respecto a la D<sub>mm</sub>.
- GC@N<sub>max</sub> .- Grado de compactación de la mezcla asfáltica al número de giros máximos con respecto a la D<sub>mm</sub>.

## 3.2 Evaluación de los materiales

La preparación de la muestra de materiales pétreos para el diseño de las mezclas asfálticas, se realizará según lo establecido en el *Manual M·MMP·4·04·001, Muestreo de Materiales Pétreos para Mezclas Asfálticas*.

Una vez obtenida la muestra representativa del material pétreo, se deberá verificar que cumpla con los requisitos de calidad indicados en la *Norma N·CMT·4·04/17, Materiales Pétreos para Mezclas Asfálticas*.

La obtención de las muestras de material asfáltico para el diseño de las mezclas asfálticas, se realizará según lo establecido en el *Manual M·MMP·4·05·001, Muestreo de Materiales Asfálticos*.

Se verifica que el cemento asfáltico clasificado por su grado de desempeño (PG) cumpla con los requisitos de calidad que se indican en la *Norma N·CMT·4·05·004/18, Calidad de Cementos Asfálticos según su Grado de Desempeño (PG) de acuerdo con lo establecido en el Proyecto*.

## 3.3 Selección de la estructura granulométrica

### Determinación de la combinación de los materiales pétreos

Previo a la selección de la combinación de los materiales pétreos, se debe establecer el tamaño nominal de la granulometría de diseño, la cual debe estar en función del espesor de capa asfáltica del pavimento. El tamaño nominal (TN) se deberá seleccionar de acuerdo con la Tabla 3.1.

**Tabla 3.1 Selección del TN de la mezcla de materiales pétreos en función del espesor de la capa asfáltica.**

Tipo de Mezcla	Relación mínima Espesor / TN	Relación máxima Espesor / TN
Gruesas <sup>[1]</sup>	4	8
Finas <sup>[2]</sup>	3	6

Nota 1. 50% del material es retenido en la malla No. 4

Nota 2. 50% del material pasa la malla No. 4

De las pilas de acopio de los diferentes materiales pétreos se determina la granulometría de cada fracción a utilizar de acuerdo con lo indicado en la

Publicación técnica No. 551 del Instituto Mexicano del Transporte *Manual de ensayos para laboratorio: Agregados (AG) para mezclas asfálticas*, AG-II.

Cada fracción de material pétreo que se empleará para conformar la granulométrica de diseño deberá tener un tamaño nominal igual o menor al seleccionado para la combinación de materiales.

La combinación de los materiales para determinar la propuesta granulométrica debe ser realizada mediante alguna metodología que asegure el correcto acomodo del material pétreo. Esta combinación deberá contar con al menos tres fracciones de material pétreo.

La combinación de los materiales deberá cumplir con los requisitos granulométricos indicados en las Tabla 1 de la Norma N-CMT-4-04/17, Materiales Pétreos para Mezclas Asfálticas.

Las granulometrías que se propongan tomarán en cuenta el tipo de planta que se utilizará para la elaboración de la mezcla asfáltica, con el fin de determinar el número máximo de agregados que se pueden utilizar en el diseño. La planta de producción de mezcla asfáltica tendrá como mínimo tres tolvas.

### **Combinación de las densidades de los materiales pétreos**

Se deberá determinar la densidad relativa bruta del material pétreo ( $D_{sb}$ ) y densidad relativa aparente del material pétreo ( $D_{sa}$ ) de cada una de las fracciones de material pétreo a utilizar de acuerdo con lo establecido en la Publicación técnica No. 551 del Instituto Mexicano del Transporte *Manual de ensayos para laboratorio: Agregados (AG) para mezclas asfálticas*, AG-III y AG-VII.

Se calcula la densidad combinada del material pétreo con la siguiente expresión:

$$D_{sx} = \frac{P_1 + P_2 + \dots + P_n}{\frac{P_1}{D_{sx1}} + \frac{P_2}{D_{sx2}} + \dots + \frac{P_n}{D_{sxn}}}$$

Donde:

- $G_{sx}$  = Densidad relativa del material pétreo ( $D_{sb}$  o  $D_{sa}$ ), ( $\text{g/cm}^3$ )
- $P_1, P_2, \dots, P_n$  = Porcentajes individuales en masa del material pétreo, (%)
- $D_{sx1}, D_{sx2}, \dots, D_{sxn}$  = Densidad relativa del material pétreo de cada fracción ( $D_{sb}$  o  $D_{sa}$ ), ( $\text{g/cm}^3$ )

La absorción de la combinación de materiales pétreos se determina utilizando la siguiente expresión:

$$\%Abs = \frac{(P_1 * \%Abs_1) + (P_2 * \%Abs_2) + \dots + (P_n * \%Abs_n)}{100}$$

Donde:

$\%Abs$  = Absorción promedio de la mezcla de materiales pétreos, (%)

$P_1, P_2, \dots, P_n$  = Porcentajes en masa de cada material pétreo, (%)

$\%Abs_1, \%Abs_2, \dots, \%Abs_n$  = Absorción de cada material pétreo, (%)

### 3.4 Elaboración de especímenes de prueba

Después de establecer las propuestas granulométricas, las densidades relativas y la absorción de la combinación de materiales pétreo, se elaboran los especímenes de ensayo para el cálculo de la volumetría, de acuerdo con lo siguiente:

#### Determinación del contenido de asfalto inicial

Se calcula el porcentaje de cemento asfáltico de acuerdo con el método *AASHTO R-35, Standard Practice for Superpave Volumetric Design for Hot Mix Asphalt (HMA)*, para cada una de las propuestas granulométricas de prueba, todos los contenidos de asfalto se calculan con respecto porcentaje total de la masa de la mezcla asfáltica, de acuerdo con la siguiente expresión:

$$Pb_{ini} = \frac{D_b * (V_{be\ ini} + V_{ba\ ini})}{D_b * (V_{be\ ini} + V_{ba\ ini}) + W_{s\ ini}} * 100$$

Donde:

$Pb_{ini}$  = Porcentaje de material asfáltico inicial, con respecto a la masa de la mezcla, (%)

$D_b$  = Densidad del material asfáltico [5], (g/cm<sup>3</sup>)

$V_{be\ ini}$  = Volumen inicial de material asfáltico efectivo, (cm<sup>3</sup>)

$V_{ba\ ini}$  = Volumen inicial del material asfáltico absorbido en el material pétreo, (cm<sup>3</sup>)

$W_{s\ ini}$  = Masa inicial del material pétreo, (g)

Nota. Norma ASTM D70, Standard Test Method for Density of Semi-Solid Bituminous Materials (Pycnometer Method)

Las fórmulas requeridas para la determinación del porcentaje del material asfáltico inicial se presentan a continuación:

- a) Densidad Relativa efectiva inicial del material pétreo:

$$D_{se\ ini} = D_{sb} + 0,8 * (D_{sa} - D_{sb})$$

Donde:

$D_{se\ ini}$  =Densidad relativa efectiva inicial del material pétreo, (g/cm<sup>3</sup>)

$D_{sa}$  =Densidad relativa aparente del material pétreo, (g/cm<sup>3</sup>)

$D_{sb}$  =Densidad relativa bruta del material pétreo seco, (g/cm<sup>3</sup>).

b) Masa inicial del material pétreo:

$$W_{s\ ini} = \left( \frac{P_s * (1 - V_a)}{\frac{P_b}{D_b} + \frac{P_s}{D_{se\ ini}}} \right)$$

Donde:

$W_{s\ ini}$  = Masa inicial del material pétreo, (g)

$P_b$  = Porcentaje de material asfáltico, con respecto a la masa de la mezcla, (%)

$P_s$  = Porcentaje de material pétreo, con respecto a la masa de la mezcla, (%)

$D_b$  = Densidad del material asfáltico<sup>[5]</sup>, (g/cm<sup>3</sup>)

$V_a$  = Porcentaje de vacíos de aire de la mezcla compacta, para el cálculo inicial se deberá utilizar un valor de 4%. (cm<sup>3</sup>, decimales)

$D_{se\ ini}$  = Densidad relativa efectiva inicial del material pétreo, (g/cm<sup>3</sup>)

Nota [4]:  $P_b + P_s = 100\%$

c) Volumen de material asfáltico efectivo:

$$V_{b\ e\ ini} = 0,176 - 0,0675 \text{ Log}(TN)$$

Donde:

$V_{b\ e\ ini}$  = Volumen inicial de material asfáltico efectivo, (cm<sup>3</sup>)

$TN$  = Tamaño nominal de la granulometría, (mm)

d) Volumen de material asfáltico absorbido:

$$V_{b\ a\ ini} = W_{s\ ini} * \left( \frac{1}{D_{sb}} - \frac{1}{D_{se\ ini}} \right)$$

Donde:

- $Vba_{ini}$  = Volumen inicial del material asfáltico absorbido en el material pétreo, (cm<sup>3</sup>)  
 $W_{Sini}$  = Masa inicial del material pétreo, (g)  
 $D_{sb}$  = Densidad relativa bruta del material pétreo, (g/cm<sup>3</sup>)  
 $D_{se ini}$  = Densidad relativa efectiva inicial del material pétreo, (g/cm<sup>3</sup>)

## Selección del tipo de compactación

El tipo de compactación a los cuales se van a densificar los especímenes de ensayo para el diseño de la mezcla asfáltica se seleccionan en función de la intensidad del tránsito, de acuerdo con lo indicado en la Tabla 2.2 de éste Manual.

**Tabla 3.2 Nivel de compactación en función del tránsito.**

Nivel de diseño	Número de ejes equivalentes de diseño	Tipo de Compactación	Especificación
Nivel 1	$\Sigma L \leq 1 \times 10^6$	Martillo Marshall	50 golpes por cara
Nivel 2	$1 \times 10^6 < \Sigma L \leq 1 \times 10^7$	Martillo Marshall	75 golpes por cara
Nivel 3	$1 \times 10^7 < \Sigma L \leq 2 \times 10^7$	Compactador Giratorio	N <sub>ini</sub> : 8 giros
Nivel 4	$\Sigma L > 2 \times 10^7$	Compactador Giratorio	N <sub>dis</sub> : 100 giros

La compactación de las mezclas asfálticas para el diseño se realiza de acuerdo con lo indicado en la norma ASTM D6926 – 16, Preparation of Asphalt Mixture Specimens Using Marshall Apparatus y la Publicación técnica No. 516 del Instituto Mexicano del Transporte *Manual de ensayos para laboratorio: Mezclas asfálticas en caliente (MAC) Parte 1, para el cálculo de volumetría y ensayos de desempeño*, MAC-I.

## Elaboración del espécimen de prueba

Se elaboran los especímenes de prueba por duplicado, para cada una de las mezclas de prueba con el contenido de material asfáltico inicial calculado.

Previo a la preparación de las mezclas de prueba, de acuerdo con el tipo de material asfáltico a utilizar, se verifican las temperaturas de mezclado y compactación. Si el material asfáltico seleccionado es convencional (sin modificador incorporado), se determina la carta de viscosidad de acuerdo con los resultados de viscosidad a distintas temperaturas basado en el método de prueba M-MMP-4-05-005, *Viscosidad Rotacional Brookfield de Cementos Asfálticos*. De la carta de viscosidad se determinan los rangos de trabajo para las temperaturas de mezclado y compactación en base a los rangos de viscosidad establecidos en la Tabla 3.3 de

este Manual. Para el caso cementos asfálticos modificados las temperaturas de mezclado y compactación serán las proporcionadas por el proveedor.

**Tabla 3.3 Rangos de viscosidades para temperaturas de mezclado y compactación.**

Característica	Viscosidad $Pa \cdot s$
Temperatura de mezclado	0,15 a 0,19
Temperatura de compactación	0,25 a 0,31

Se preparan los materiales pétreos de acuerdo con las granulometrías propuestas, para lo cual se dosifica el material de acuerdo con las masas requeridas para el ensayo a realizar. Los ensayos a realizar se mencionan en la Tabla 3.4.

**Tabla 3.4 Cantidad y número de muestras requeridas por ensayo.**

Ensayo	Cantidad de mezcla recomendada	Número de muestras requeridas
Densidad relativa teórica máxima de la mezcla asfáltica, ( $D_{mm}$ )	Depende del TN del agregado 19,0 mm y 25,4 mm; 4 000 g	2 muestras por cada propuesta granulométrica
Densidad relativa bruta de la mezcla asfáltica compactada ( $D_{mb}$ )	Nivel 1 y 2; 1 000 - 1 200 g, 100 mm de diámetro x $63,5 \pm 2,5$ mm de altura	2 especímenes por cada propuesta granulométrica
	Nivel 3 y 4 4 500 - 4 700 g, 150 mm de diámetro x $115 \pm 5$ mm de altura	

Nota: Los procedimientos de ensayos se describen en la Publicación Técnica No. 516 del Instituto del Transporte *Manual de ensayos para Laboratorio: Mezclas asfálticas en caliente (MAC) Parte 1*. Procedimientos MAC-II y MAC-III.

El proceso de mezclado y compactación se deberá de realizar de acuerdo con el establecido en la Publicación Técnica No. 516 del Instituto Mexicano del Transporte *Manual de ensayos para Laboratorio: Mezclas asfálticas en caliente (MAC) Parte 1*. Procedimiento MAC-I Método de prueba para la preparación y compactación de especímenes de mezclas asfálticas en caliente por medio del compactador giratorio.

## 3.5 Diseño volumétrico de la mezcla asfáltica

Una vez elaborados los especímenes de ensayo para cada granulometría propuesta se realiza la estimación del contenido de asfalto para el 4% de vacíos de aire y se determina la fórmula de trabajo. El procedimiento a seguir se describe a continuación.

### 3.5.1 Análisis Volumétrico de la Mezcla Asfáltica

Para hacer el análisis volumétrico de cada una de las mezclas asfálticas se deberán realizar los ensayos de Densidad relativa bruta de la mezcla asfáltica ( $D_{mb}$ ) y

Densidad relativa teórica máxima ( $D_{mm}$ ). Los procedimientos para la realización de estos ensayos se pueden consultar en la Publicación técnica No. 516 del Instituto Mexicano del Transporte Manual de ensayos para Laboratorio: Mezclas asfálticas en caliente (MAC), Parte 1.

## Verificación de la calidad de los ensayos

Antes de empezar el cálculo de las propiedades volumétricas se debe verificar que las densidades relativas del material pétreo cumplen con la siguiente relación:

$$D_{sa} > D_{se} > D_{sb}$$

Si no se cumple la relación se deberán revisar los resultados de los ensayos de densidad relativa del material pétreo ( $D_{sb}$  y  $D_{sa}$ ) y de densidad relativa teórica máxima de la mezcla asfáltica ( $D_{mm}$ ).

Se calcula la densidad relativa efectiva del material pétreo con la siguiente expresión:

$$D_{se} = \frac{(100 - P_b)}{\left(\frac{100}{D_{mm}} - \frac{P_b}{D_b}\right)}$$

Donde:

$D_{se}$	Densidad relativa efectiva del material pétreo, (g/cm <sup>3</sup> )
$P_b$	Cemento asfáltico, porcentaje del total de la mezcla asfáltica, (%)
$D_{mm}$	Densidad relativa teórica máxima de la mezcla asfáltica, (g/cm <sup>3</sup> )
$D_b$	Densidad relativa del material asfáltico <sup>[5]</sup> , (g/cm <sup>3</sup> )

## Porcentaje de vacíos de aire ( $V_a$ )

Este valor se calcula mediante una relación entre la Densidad relativa bruta y la Densidad relativa teórica máxima de la mezcla asfáltica.

$$V_a = 100 * \left(\frac{D_{mm} - D_{mb}}{D_{mm}}\right)$$

Donde:

$V_a$	=	Porcentaje de vacíos de aire de la mezcla asfáltica compacta (%)
$D_{mm}$	=	Densidad relativa teórica máxima de la mezcla asfáltica, (g/cm <sup>3</sup> )
$D_{mb}$	=	Densidad relativa bruta de la mezcla asfáltica, (g/cm <sup>3</sup> )

## Vacíos en el Agregado Mineral (VAM)

Este se refiere al espacio entre partículas de agregado en una mezcla asfáltica, está compuesto de los vacíos de aire de la mezcla y el volumen de asfalto efectivo. Se calcula de la siguiente forma.

$$VAM = 100 - \left( \frac{D_{mb} * P_s}{D_{sb}} \right)$$

Donde:

- $VAM$  = Porcentaje de Vacíos en el agregado mineral (%)
- $D_{mb}$  = Densidad relativa bruta de la mezcla asfáltica, (g/cm<sup>3</sup>)
- $P_s$  = Porcentaje de material pétreo con respecto a la masa de la mezcla (%)
- $D_{sb}$  = Densidad relativa bruta del material pétreo, (g/cm<sup>3</sup>)

## Vacíos llenos de asfalto (VFA)

Este se refiere al porcentaje que ocupa el asfalto de todo el espacio disponible en la estructura granular (VAM). Se calcula de la siguiente forma.

$$VFA = 100 * \left( \frac{VAM - V_a}{VAM} \right)$$

Donde:

- $VFA$  = Porcentaje de Vacíos llenos de asfalto (%)
- $VAM$  = Porcentaje de Vacíos en el agregado mineral (%)
- $V_a$  = Porcentaje de vacíos de aire de la mezcla asfáltica compacta (%)

## Porcentaje de asfalto absorbido (Pba)

El porcentaje de asfalto que es absorbido por el material pétreo se calcula de la siguiente manera.

$$P_{ba} = \frac{(100 * D_b) * (D_{se} - D_{sb})}{(D_{se} * D_{sb})}$$

Donde:

- $P_{ba}$  = Porcentaje de material asfáltico absorbido (%)
- $D_b$  = Densidad relativa del material asfáltico, (g/cm<sup>3</sup>)
- $D_{se}$  = Densidad relativa efectiva del material pétreo, (g/cm<sup>3</sup>)
- $D_{sb}$  = Densidad relativa bruta del material pétreo, (g/cm<sup>3</sup>)

## Porcentaje de material asfáltico efectivo (Pbe)

Tomando en consideración la determinación anterior, se puede calcular el porcentaje del material asfáltico efectivo en la mezcla asfáltica mediante la siguiente fórmula.

$$P_{be} = P_b - \left( \frac{P_{ba} * P_s}{100} \right)$$

Donde:

- $P_{be}$  = Porcentaje de material asfáltico efectivo (%)
- $P_b$  = Porcentaje de material asfáltico, con respecto a la masa de la mezcla, (%)
- $P_{ba}$  = Porcentaje de material asfáltico absorbido (%)
- $P_s$  = Porcentaje de material pétreo con respecto a la masa de la mezcla (%)

## Relación Filler-Material asfáltico efectivo (RF-Pbe)

Este parámetro establece una relación entre el material pétreo que pasa la malla No. 200 y el material asfáltico efectivo de la mezcla asfáltica, el cálculo se realiza con la siguiente fórmula.

$$R_{F-Pbe} = \left( \frac{P_{0.075}}{P_{be}} \right)$$

Donde:

- $R_{F-Pbe}$  = Relación filler-cemento asfáltico efectivo, (%)
- $P_{0,075}$  = Porcentaje de material pétreo que pasa la malla 200, (%)
- $P_{be}$  = Porcentaje de material asfáltico efectivo (%)

## Grado de compactación de mezcla asfáltica al número de giros iniciales con respecto al Dmm (GC@Nini)

Este parámetro se calcula considerando la densidad relativa bruta de la mezcla asfáltica ( $D_{mb}$ ), la densidad relativa teórica máxima ( $D_{mm}$ ) y una relación de alturas de los registros del compactador giratorio, por lo cual no se calculará para los especímenes elaborados con el compactador Marshall. El cálculo se realiza de la siguiente forma:

- a) Primeramente, se calcula el factor de corrección C.

$$C = \frac{H_{Ndis}}{H_{Nini}}$$

Donde:

- $C$  = Factor de corrección entre alturas a diferentes números de giros  
 $H_{Ndis}$  = Altura al número de giros de diseño (100 giros), (mm)  
 $H_{Nini}$  = Altura al número de giros iniciales (8 giros), (mm)

- b) En base a este factor, se estima la Densidad relativa bruta para el número de giros iniciales con la siguiente fórmula:

$$D_{mb@Nini} = C * D_{mb}$$

Donde:

- $D_{mb@Nini}$  = Densidad relativa bruta de la mezcla asfáltica al número de giros iniciales, (g/cm<sup>3</sup>)  
 $D_{mb}$  = Densidad relativa bruta de la mezcla asfáltica, (g/cm<sup>3</sup>)

- c) En base al cálculo anterior se estima el Grado de compactación con respecto al  $D_{mm}$  para el número de giros iniciales. utilizando la siguiente expresión:

$$GC@Nini = \frac{D_{mb@Nini}}{D_{mm}} * 100$$

Donde:

- $GC@Nini$  = Grado de compactación de la mezcla asfáltica al número de giros iniciales en función del  $G_{mm}$ , (%)  
 $D_{mb@Nini}$  = Densidad relativa bruta de la mezcla asfáltica al número de giros iniciales, (g/cm<sup>3</sup>)  
 $D_{mm}$  = Densidad relativa teórica máxima de la mezcla asfáltica, (g/cm<sup>3</sup>).

Con base en estos cálculos se reportan los valores obtenidos para cada una de las granulometrías evaluadas, (Tabla 3.5).

**Tabla 3.5 Datos volumétricos de las mezclas asfálticas propuestas.**

Granulometría	P <sub>b</sub>	D <sub>sb</sub>	D <sub>se</sub>	V <sub>a</sub> (%)	VAM (%)	VFA (%)	P <sub>ba</sub>	P <sub>be</sub>	R <sub>F-Pbe</sub>	GC@N <sub>ini</sub>
1										
2										
3										

### 3.5.2 Estimación de propiedades volumétricas para un 4% de vacíos de aire

En caso de requerir que el porcentaje de vacíos de la mezcla asfáltica sea de 4%, se podrá realizar un ajuste del contenido de asfalto para el porcentaje de vacíos requerido y una estimación de las propiedades volumétricas asociadas a este ajuste, el cual se deberá para cada una de las granulometrías evaluadas. La secuencia de cálculos a realizar se presenta en los siguientes puntos.

Ajuste en el contenido de cemento asfáltico para obtener un contenido de vacíos de aire en la mezcla asfáltica del 4%, de acuerdo con la siguiente expresión:

$$P_{b\ est} = P_b - [0,4 * (4 - V_a)]$$

Donde:

- $P_{b\ est}$  = Contenido de material asfáltico estimado para obtener 4% de vacíos de aire, (%)  
 $P_b$  = Contenido de material asfáltico determinado en la mezcla de prueba, (%)  
 $V_a$  = Porcentaje de vacíos de aire de la mezcla asfáltica compacta(%)

Con el contenido de cemento asfáltico estimado, calculado en el párrafo anterior, se estiman los siguientes parámetros volumétricos.

a) Vacíos en el agregado mineral estimado

$$VAM_{est} = VAM + [K * (4 - V_a)]$$

Donde:

- $VAM_{est}$  = Vacíos en el agregado mineral estimado, (%)  
 $VAM$  = Vacíos en el agregado mineral obtenidos en la mezcla inicial de prueba, el valor de  $VAM$  para el cálculo de  $CA_{est}$  se toma de la Tabla 3.5 de este Manual, (%)  
 $V_a$  = Porcentaje de vacíos de aire de la mezcla asfáltica compacta (%), ver Tabla 3.5  
 $K$  = Constante; Si:  $V_a < 4,0\%$ ,  $K=0,1$   
 $V_a > 4,0\%$ ,  $K=0,2$

b) Vacíos llenos de asfalto estimados

$$VFA_{est} = 100 * \left( \frac{VAM_{est} - 4}{VAM_{est}} \right)$$

Donde:

- $VFA_{est}$  = Vacíos llenos con asfalto estimados, (%)  
 $VAM_{est}$  = Vacíos en el agregado mineral estimados, (%)

c) Contenido de material asfáltico efectivo estimado

$$P_{be\ est} = P_{b\ est} - P_s * D_b * \left( \frac{D_{se} - D_{sb}}{D_{se} * D_{sb}} \right)$$

Donde:

- $P_{be\ est}$  = Contenido de material asfáltico efectivo estimado, (%)  
 $P_{b\ est}$  = Contenido de material asfáltico estimado para obtener 4% de vacíos de aire, (%)  
 $P_s$  = Porcentaje de material pétreo con respecto a la masa de la mezcla (%)  
 $D_b$  = Densidad del material asfáltico, (g/cm<sup>3</sup>)  
 $D_{se}$  = Densidad relativa efectiva del material pétreo, (g/cm<sup>3</sup>)  
 $D_{sb}$  = Densidad relativa bruta del material pétreo, (g/cm<sup>3</sup>)

d) Relación filler – material asfáltico estimado

$$R_{F-Pbe} = \left( \frac{P_{0,075}}{P_{be\ est}} \right)$$

Donde:

- $R_{F-Pbe\ est}$  = Relación filler-material asfáltico efectivo estimado, (%)  
 $P_{0,075}$  = Porcentaje de material pétreo que pasa la malla 200, (%)  
 $P_{be\ est}$  = Porcentaje de material asfáltico efectivo estimado(%)

e) Grado de compactación de la mezcla asfáltica al número de giros iniciales estimada con respecto a la  $D_{mm}$

$$GC@N_{ini\ est} = GC@N_{ini} - (4 - V_a)$$

Donde:

- $GC@N_{ini\ est}$  = Grado de compactación de la mezcla asfáltica al número de giros iniciales estimado con respecto al  $D_{mm}$   
 $GC@N_{ini}$  = Grado de compactación de la mezcla asfáltica al número de giros iniciales con respecto a la  $D_{mm}$ , ver Tabla 3.5  
 $V_a$  = Porcentaje de vacíos de aire (%), ver Tabla 3.5

Las propiedades volumétricas estimadas de la mezcla asfáltica compactada a  $N_{ini}$ , para cada una de las propuestas granulométricas, elaboradas para lograr el 4% de vacíos de aire en la mezcla asfáltica compactada se anotan en la Tabla 3.6

**Tabla 3.6 Propiedades volumétricas estimadas para 4% de  $V_a$ .**

Granulometría	$P_{b\ est}$	$VAM_{est}\ (%)$	$VFA_{est}\ (%)$	$P_{be\ est}$	$RF-P_{be\ est}$	$GC@N_{ini\ est}$
1						
2						
3						

### 3.5.3 Selección de la granulometría

- Las propiedades volumétricas estimadas de cada propuesta granulométricas y anotadas en la Tabla 2.6 de este Manual se comparan con los requerimientos volumétricos establecidos en función del nivel de tránsito.
- Las propuestas que no cumplan con algún requerimiento volumétrico se descartan.
- Si más de una combinación cumple con los criterios volumétricos requeridos, de acuerdo con la experiencia del diseñador de la mezcla asfáltica la selección se basa en el costo y el desempeño de la mezcla.
- Si ninguna de las propuestas cumple con los requerimientos volumétricos, se evalúan propuestas adicionales.

### 3.5.4 Selección del contenido óptimo de asfalto

Con la propuesta granulométrica seleccionada se elaboran los especímenes variando el contenido de cemento asfáltico, de acuerdo con el porcentaje de cemento asfáltico estimado y se evalúan las propiedades de las mezclas asfálticas para determinar un contenido de cemento asfáltico óptimo de acuerdo con lo siguiente:

- Se elabora la mezcla asfáltica con el contenido de cemento asfáltico estimado ( $P_{b\ est}$ ) y se determina por duplicado la Densidad relativa teórica máxima ( $D_{mm}$ ). Las mezclas se preparan y ensayan de acuerdo con lo indicado en el punto 3.4.3 de este capítulo.
- Se elaboran las mezclas asfálticas para cada uno de los contenidos de cemento asfáltico que se indican a continuación:
  - $P_{b\ est} \pm 0,5\%$  de  $P_{b\ est}$ ,  $\pm 1\%$  de  $P_{b\ est}$
- Se elaboran especímenes por duplicado con las mezclas indicadas en el inciso anterior y se compactan al número de golpes o de giros de diseño.
- Enseguida se determinan las propiedades volumétricas de acuerdo al punto 3.5.1 de este Manual.
  - Para el caso de los ensayos de Densidad relativa teórica máxima de la mezcla asfáltica, se puede realizar un ensayo y estimar los valores a otros contenidos de asfalto mediante las siguientes relaciones:

$$D_{se} = \frac{100 - P_b}{\frac{100}{D_{mm}} - \frac{P_b}{D_b}}$$

$$D_{mm} = \frac{100}{\frac{P_s}{D_{se}} + \frac{P_b}{D_b}}$$

Donde:

- $D_{se}$  = Densidad relativa efectiva del material pétreo, (g/cm<sup>3</sup>)
- $D_{mm}$  = Densidad relativa teórica máxima, (g/cm<sup>3</sup>)
- $P_b$  = Contenido de material asfáltico con respecto a la masa de la mezcla, (%)
- $P_s$  = Porcentaje de material pétreo con respecto a la masa de la mezcla (%)
- $D_b$  = Densidad del material asfáltico<sup>[5]</sup>, (g/cm<sup>3</sup>)

a) Las propiedades volumétricas de cada uno de los especímenes se anotan en la Tabla 3.7, los cuales son obtenidos con los promedios de cada par de especímenes que se elaboraron para cada contenido de cemento asfáltico.

**Tabla 3.7 Propiedades volumétricas de la mezcla asfáltica.**

Granulometría	Gmb	V <sub>a</sub> (%)	VAM (%)	VFA (%)	P <sub>ba</sub>	P <sub>be</sub>	R <sub>F-Pbe</sub>	GC@N <sub>ini</sub>
P <sub>b</sub> - 1,0%								
P <sub>b</sub> - 0,5%								
P <sub>b</sub>								
P <sub>b</sub> + 0,5%								
P <sub>b</sub> + 1,0%								

- Se graficará el contenido de asfalto en el eje de las abscisas “x” y en el eje de las ordenadas “y” las propiedades volumétricas de la Tabla 3.7.
- El contenido de asfalto óptimo será aquel que proporcione el 4% de vacíos de aire y además cumpla con todos los requisitos volumétricos establecidos para el nivel de tránsito.
- Una vez terminado el diseño se deberá reportar las características de los materiales y resultados parámetros indispensables para reproducir el diseño de la mezcla asfáltica durante el proceso constructivo (Fórmula de trabajo).

**Tabla 3.8 Requisitos de desempeño de la mezcla asfáltica.**

Nivel de diseño	Número de ejes equivalentes de diseño	Prueba de desempeño	Norma o Manual de referencia
Bajo	$\Sigma L \leq 1 \times 10^6$	Estabilidad y flujo Marshall	ASTM D6927-15 Standard Test Method for Marshall Stability and Flow of Asphalt Mixtures
Intermedio	$1 \times 10^6 < \Sigma L \leq 1 \times 10^7$	Estabilidad y flujo Marshall	ASTM D6927-15 Standard Test Method for Marshall Stability and Flow of Asphalt Mixtures
Alto	$1 \times 10^7 < \Sigma L \leq 2 \times 10^7$	Susceptibilidad al daño inducido por humedad	Publicación Técnica No. 516, MAC-IV, Método de prueba para determinar la resistencia de la mezcla asfáltica compactada al daño inducido por humedad por medio de la Relación en la Resistencia a la Tensión Indirecta (TSR)
		Susceptibilidad al daño inducido por humedad	Publicación Técnica No. 516, MAC-V. Método de prueba para determinar la resistencia a la deformación permanente y daño por humedad en una mezcla asfáltica en caliente compactada mediante la Rueda Cargada de Hamburgo
Muy Alto	$\Sigma L > 2 \times 10^7$	Susceptibilidad al daño inducido por humedad	Publicación Técnica No. 516, MAC-IV, Método de prueba para determinar la resistencia de la mezcla asfáltica compactada al daño inducido por humedad por medio de la Relación en la Resistencia a la Tensión Indirecta (TSR)
		Susceptibilidad a la deformación permanente	Publicación Técnica No. 516, MAC-V. Método de prueba para determinar la resistencia a la deformación permanente y daño por humedad en una mezcla asfáltica en caliente compactada mediante la Rueda Cargada de Hamburgo
		Deformación permanente	Publicación Técnica No. XXX, MAC-VII. Método estándar para determinar la tasa de deformación en un ensayo de compresión axial cíclica en las mezclas asfálticas en caliente
		Módulo dinámico	Publicación Técnica No. XXX, MAC-VIII. Método estándar para determinar el módulo dinámico de mezclas asfálticas en caliente
		Resistencia a la Fatiga	Publicación Técnica No. XXX, MAC-IX. Método estándar para determinar la vida a la fatiga de mezclas asfálticas en caliente (HMA) sujetas a flexión repetida

## Bibliografía

---

Ayala, Y., Delgado, H., Guzmán, D.V., & Salazar, A.Z. (2018). Manual de Ensayos para Laboratorio: Mezclas Asfálticas en Caliente (MAC), Parte 1. Instituto Mexicano del Transporte. Publicación Técnica No. 516. Recuperado de IMT: <http://imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt516.pdf>

Ayala, Y., Delgado, H., Cuellar, V.H., & Salazar, A.Z. (20189). Manual de Ensayos para Laboratorio: Agregados (AG) para mezclas asfálticas. Instituto Mexicano del Transporte. Publicación Técnica No. 551. Recuperado de IMT: <https://imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt551.pdf>

N.CMT.4.04/17, Materiales pétreos para mezclas asfálticas. Normativa para la infraestructura del transporte. Recuperado de IMT: <https://normas.imt.mx/normativa/N-CMT-4-04-17.pdf>

N.CMT.4.05.004/18, Calidad de cementos asfálticos según su Grado de Desempeño (PG). Normativa para la infraestructura del transporte. Recuperado de IMT: <https://normas.imt.mx/normativa/N-CMT-4-05-004-18.pdf>

N.CMT.4.05.003/16, Calidad de mezclas asfálticas para carreteras. Normativa para la infraestructura del transporte. Recuperado de IMT: <https://normas.imt.mx/normativa/N-CMT-4-05-003-16.pdf>

Asphalt Institute (2001). Superpave Mix Design, Superpave Series No. 2 (SP-2). Third edition: USA.

Asphalt Institute (2014). Asphalt mix design methods, Manual Series No. 2 (MS-2). Seventh edition: USA.



# Anexo 1. Frecuencias de muestreo

**Tabla A.1 Frecuencias de muestreo por etapa**

Etapa	Evaluación	Tipo de muestreo aleatorio	Tamaño de lote	No. de sub-lotes/lote	Frecuencia de sub-lote	Tamaño de muestra por sub-lote	Ensayos
<b>Calibración de la mezcla</b>	Agregado en banco	N/A	1	1	1	10 kg	Ensayos Tabla 2.1
	Agregado en planta	N/A	1	1	1	70 kg	Ensayos N.CMT.4.04/17
	Material asfáltico	N/A	1	1	1	2 L	Ensayos N.CMT.4..05.004/18
	Granulometría	N/A	1	1	1	5 kg	Granulometría
	Mezcla asfáltica	N/A	1	1	1	10 kg	D <sub>mm</sub> , CA, Granulometría.
<b>Tramo de prueba</b>	Mezcla asfáltica a la salida del mezclador	Muestreo por volumen	200 m	3	200/3 m	20 kg	D <sub>mm</sub> , CA, Granulometría tomado de la banda.
	Compactación	N/A	200 m	1	200 m	40 mediciones (Fig. 1)	Densímetro (GC@D <sub>mm</sub> ).
	Extracción de núcleos	Muestreo por área	200 m	2	100 m	6 núcleos de 4 in	D <sub>mb</sub> , V <sub>a</sub> , TSR.
						2 núcleos de 10 in	D <sub>mb</sub> , V <sub>a</sub> , Rueda de Hamburgo, CA, Granulometría.
					1 núcleo de 10 in	CA, Granulometría.	
<b>Control rutinario</b>	Agregado en banco	Muestreo por volumen	250 m <sup>3</sup>	1	250 m <sup>3</sup>	5 kg	Granulometría, Equivalente de arena, Azul de metileno
	Agregado en planta		2,500 m <sup>3</sup>	1	2,500 m <sup>3</sup>	40 kg	Ensayos N.CMT.4.04/17
	Material asfáltico	N/A	cada auto-tanque	1	cada auto-tanque	2 L	Punto de reblandecimiento, Recuperación elástica por torsión a 25°C
		N/A	cada 110 m <sup>3</sup> en tanque de almacenamiento	1	cada 110 m <sup>3</sup> en tanque de almacenamiento	2 L	Ensayos N.CMT.4..05.004/18
	Mezcla asfáltica	Muestreo por volumen	700 m <sup>3</sup>	4	175 m <sup>3</sup>	5 kg	D <sub>mm</sub> , CA, Granulometría.
				1/5	3,500 m <sup>3</sup>	40 kg	TSR, Rueda de Hamburgo.
	Tendido y compactación	N/A	50 m	5 puntos transversales	Cada 50m @ 5 puntos transversales	N/A	Densímetro (GC@D <sub>mm</sub> ).
Muestreo por área		2 km	1 por carril	2 km / carril	1 núcleo de 10 in	D <sub>mb</sub> , V <sub>a</sub> , Rueda de Hamburgo, CA, Granulometría.	

*Diseño de mezclas asfálticas densas en caliente en función del nivel de tránsito*

---

			5 km	1 por carril	5 km / carril	6 núcleos de 4 in	D <sub>mb</sub> , TSR.
			5km	1 por carril	5 km / carril		Módulo dinámico Carga repetida
			5km	1 por carril	5 km / carril		Fatiga

## Anexo 2. Muestreo aleatorio

Tabla A.2 Números Aleatorios

Número de secuencia	X	Y	Número de secuencia	X	Y	Número de secuencia	X	Y			
1	0.2	I	0.92	35	0.97	D	0.02	68	0.35	I	0.96
2	0.32	I	0.56	36	0.96	I	0.36	69	0.21	I	0.9
3	0.28	D	0.51	37	0.74	D	0.89	70	0.83	D	0.49
4	0.3	I	0.3	38	0.65	D	0.1	71	0.69	D	0.43
5	0.99	I	0.06	39	0.86	D	0.29	72	0.61	D	0.65
6	0.94	I	0.03	40	0.2	I	0.46	73	0.34	I	0.37
7	0.44	D	0.68	41	0.37	I	0.16	74	0.95	D	0.88
8	0.33	D	0.73	42	0.44	I	0.57	75	0.31	D	0.61
9	0.65	D	0.67	43	0.13	D	0.28	76	0.34	I	0.99
10	0.27	D	0.68	44	0.67	I	0.46	77	0.72	I	0.06
11	0.3	I	0.62	45	0.42	D	0.34	78	0.76	D	0.72
12	0.04	I	0.59	46	0.49	I	0.73	79	0.12	I	0.49
13	0.27	D	0.64	47	0.96	D	0.22	80	0.89	D	0.04
14	0.69	D	0.34	48	0.89	I	0.04	81	0.28	D	0.08
15	0.67	D	0.39	49	0.74	I	0.2	82	0.63	I	0.61
16	0.99	D	0.92	50	0.27	I	0.74	83	0.00	I	0.39
17	0.61	D	0.28	51	0.24	I	0.06	84	0.75	I	0.03
18	0.89	I	0.58	52	0.22	D	0.97	85	0.08	D	0.64
19	0.36	D	0.36	53	0.13	I	0.54	86	0.00	I	0.95
20	0.64	D	0.43	54	0.31	D	0.71	87	0.23	I	0.37
21	0.71	I	0.27	55	0.49	D	0.47	88	0.13	D	0.52
22	0.59	D	0.83	56	0.98	I	0.63	89	0.62	I	0.89
23	0.9	I	0.76	57	0.55	I	0.91	90	0.32	I	0.48
24	0.58	D	0.18	58	0.94	D	0.29	91	0.63	I	0.33
25	0.25	D	0.85	59	0.99	I	0.08	92	0.9	I	0.8
26	0.73	I	0.98	60	0.74	D	0.03	93	0.94	D	0.6
27	0.15	I	0.42	61	0.33	D	0.91	94	0.14	D	0.83
28	0.51	I	0.88	62	0.46	D	0.67	95	0.52	I	0.69
29	0.75	D	0.18	63	0.62	I	0.36	96	0.35	I	0.94
30	0.12	I	0.37	64	0.93	I	0.59	97	0.45	D	0.07
31	0.67	I	0.33	65	0.4	I	0.89	98	0.96	D	0.14
32	0.12	I	0.8	66	0.24	I	0.18	99	0.51	D	0.03
33	0.72	I	0.69	67	0.76	I	0.19	100	0.58	I	0.34
34	0.8	I	0.75								

X= Fracción decimal en dirección longitudinal de la carretera desde un punto de inicio.

Y= Fracción decimal en dirección transversal del extremo del pavimento al centro de línea.

I= Posición desde el borde izquierdo al centro de la línea.

D= Posición desde el borde derecho al centro de la línea.

En el presenta anexo se resume el tipo de muestreo aleatorio sugerido para cada tipo de evaluación indicada en el presente documento, desde la calibración de la mezcla hasta el control rutinario.

### A.2.1 Muestreo por área

Para realizar un muestreo por área se deberán considerar los siguientes pasos:

1. Definir el número de lotes o tomar el valor especificado de acuerdo a esta guía (Tabla A.1).
2. Definir el tamaño del sub-lote o considerar el valor especificado en esta guía.
3. Seleccionar un número al azar de la Tabla A.2
4. Registrar los valores de “X” y “Y” de la Tabla A.2 para el número seleccionado al azar en el paso 3, y posteriormente, los números subsecuentes requeridos de acuerdo al total de sub-lotes requeridos. Los valores de “X” representarán, en este caso, la distancia longitudinal al eje; y los valores de “Y” representarán la distancia transversal al eje. El dato “I” o “D” indicará el extremo del carril desde dónde se ubicará el sub-lote (muestra).
5. Multiplicar el valor de “X” y “Y” por el tamaño de sub-lote para obtener la ubicación de cada muestreo.

#### Ejemplo 1

**Se requiere evaluar la susceptibilidad a la deformación permanente mediante el ensayo de Rueda Cargada de Hamburgo de la mezcla asfáltica compacta en el tramo de prueba. La longitud del tramo construido es de 200 m, con un ancho de carril de 3.5 m, y consta de 2 carriles. El cadenamiento inicial es el km 0+000.**

1. De acuerdo a la Tabla Frecuencias de muestreo (Tabla A.1), para evaluar el ensayo de rueda de Hamburgo se utilizará una frecuencia de muestreo de 2 sub-lotes/lotes.
2. Calcular el número de lotes:

$$\text{Número de lotes} = \frac{\text{Longitud del tramo}}{\text{Tamaño de lote}} = \frac{200 \text{ m}}{200 \text{ m/lote}} = 1.0$$

3. Calcular el total de sub-lotes requeridos:

$$\begin{aligned} \text{Total sub - lotes} &= \text{No. de lotes} * \frac{\text{No. sub - lote}}{\text{lote}} = 1 \text{ lotes} * \frac{2 \text{ sub - lote}}{\text{lote}} \\ &= 2 \text{ sub - lotes} \end{aligned}$$

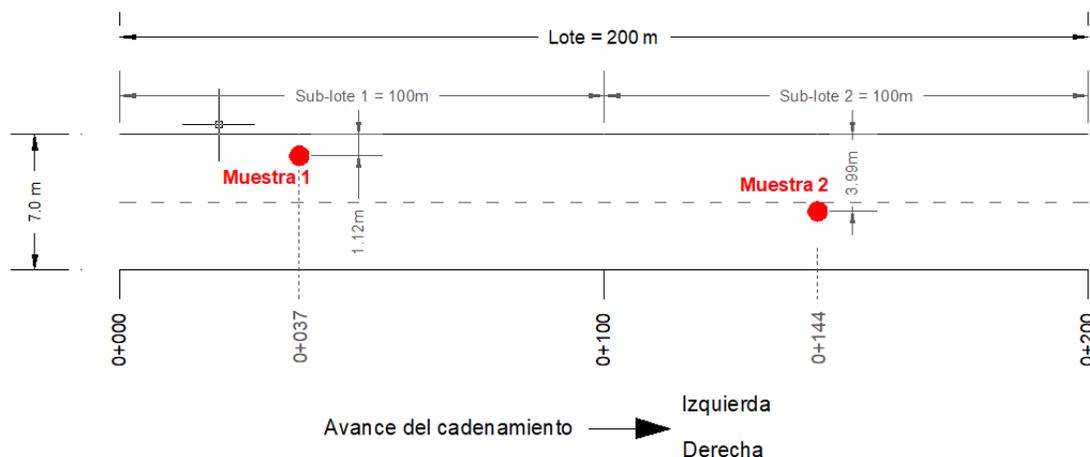
4. Seleccionar un número al azar de la Tabla A.2 y registrar los valores “X” y “Y” para cada sub-lote.

Se seleccionó al azar el número 41, por lo tanto:

Lote	Sub-lote (carril)	Número de secuencia	"X"	"Y"
1	1	41	0.37	0.16
2	1	42	0.44	0.57

5. Obtener los puntos de muestreo multiplicando el valor de "X" por la longitud del lote, y el valor de "Y" por el ancho del lote.

Sub-lote (carril)	Cadenamiento inicial del lote	Tamaño de lote	"X"	"Y"	Cálculo para ubicación longitudinal	Ubicación del muestreo
1	0+000	100 m	$0.37 \times 100\text{m} = 37\text{m}$	$0.16 \times 7.0 = 1.12\text{m}$	$0+000+37 = 0+037$	<b>0+037 @ 1.12m</b>
2	0+100	100 m	$0.44 \times 100\text{m} = 44\text{m}$	$0.57 \times 7.0 = 3.99\text{m}$	$0+100+44 = 0+144$	<b>0+144 @ 3.99m</b>



## A.2.2 Muestreo por volumen

Para realizar un muestreo por volumen se deberán considerar los siguientes pasos:

1. Definir el número de lotes o tomar el valor especificado de acuerdo a esta guía (Tabla A.1).
2. Definir el tamaño del sub-lote o considerar el valor especificado en esta guía.
3. Seleccionar un número al azar de la Tabla A.2.
4. Registrar los valores de "X" de la Tabla A.2 para el número seleccionado al azar en el paso 3, y posteriormente, los números subsecuentes requeridos de acuerdo al total de sub-lotes requeridos.
5. Multiplicar el valor de "X" por el tamaño de sub-lote para obtener el momento de cada muestreo.

## Ejemplo 2

Se requiere determinar el muestreo de la mezcla asfáltica en planta para  $G_{mm}$ , contenido de asfalto y granulometría, dentro del control rutinario. El volumen total de mezcla asfáltica requerida para el proyecto es de 2,000 m<sup>3</sup>.

- De acuerdo a la Tabla A.1 para la mezcla asfáltica en control rutinario, el tamaño de lote es de 700 m<sup>3</sup> con 4 sub-lotes/lote, por lo que resulta una frecuencia de sub-lote de 175 m<sup>3</sup>.
- Calcular el número de lotes:

$$\text{Número de lotes} = \frac{\text{Volumen total}}{\text{Volumen del lote}} = \frac{2,000 \text{ m}^3}{700 \text{ m}^3} = 2.6 \therefore \text{se considerarán } \mathbf{3 \text{ lotes}}$$

*El tamaño del último lote se ajustará a 600 m<sup>3</sup> para que la suma de ellos resulte en el total de la mezcla requerida.*

- Calcular el número de sub-lotes para el lote de 600 m<sup>3</sup>:

$$\text{No. de sublotes} = \frac{\text{Tamaño de lote}}{\text{Tamaño de sublote}} = \frac{600 \text{ m}^3}{175 \text{ m}^3} = 3.4 \text{ m}^3$$

*El último lote contará con 3 sub-lotes, teniendo el último sub-lote un tamaño de 250 m<sup>3</sup> para que la suma de todos ellos resulte el total de la mezcla requerida.*

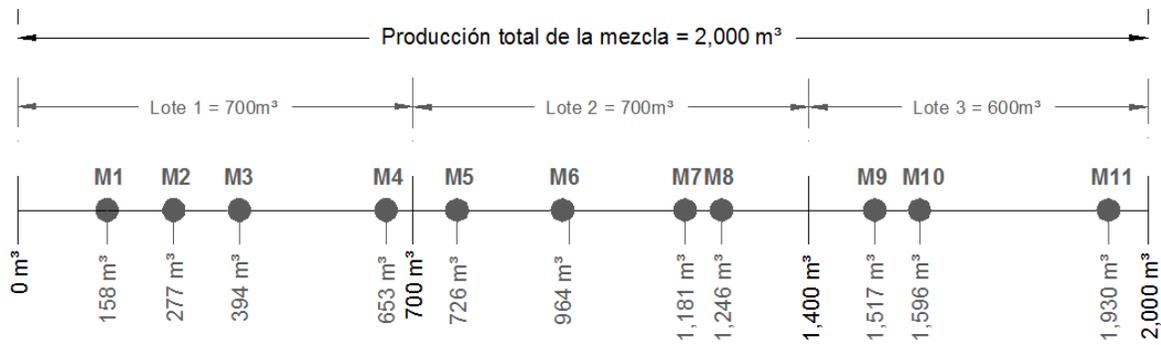
- Seleccionar un número al azar de la Tabla A.2 y registrar los valores "X" para cada sub-lote.

Se seleccionó al azar el número 23, por lo tanto:

Lote	Sub-lote	Número de secuencia	"X"
1	1	23	0.9
	2	24	0.58
	3	25	0.25
	4	26	0.73
2	1	27	0.15
	2	28	0.51
	3	29	0.75
	4	30	0.12
3	1	31	0.67
	2	32	0.12
	3	33	0.72

- Obtener los puntos de muestreo multiplicando el valor de "X" por el tamaño del sub-lote.

Lote	Sub-lote	Tamaño de sub-lote	Volumen inicial	"X"	Cálculo para muestreo	Momento de muestreo
1	1	175 m <sup>3</sup>	0 m <sup>3</sup>	0.9	175 m <sup>3</sup> * 0.9 = 158 m <sup>3</sup>	0 m <sup>3</sup> + 158 = <b>158 m<sup>3</sup></b>
	2	175 m <sup>3</sup>	175 m <sup>3</sup>	0.58	175 m <sup>3</sup> * 0.58 = 102 m <sup>3</sup>	175 m <sup>3</sup> + 102 = <b>277 m<sup>3</sup></b>
	3	175 m <sup>3</sup>	350 m <sup>3</sup>	0.25	175 m <sup>3</sup> * 0.25 = 44 m <sup>3</sup>	350 m <sup>3</sup> + 44 = <b>394 m<sup>3</sup></b>
	4	175 m <sup>3</sup>	525 m <sup>3</sup>	0.73	175 m <sup>3</sup> * 0.73 = 128 m <sup>3</sup>	525 m <sup>3</sup> + 128 = <b>653 m<sup>3</sup></b>
2	1	175 m <sup>3</sup>	700 m <sup>3</sup>	0.15	175 m <sup>3</sup> * 0.15 = 26 m <sup>3</sup>	700 m <sup>3</sup> + 26 = <b>726 m<sup>3</sup></b>
	2	175 m <sup>3</sup>	875 m <sup>3</sup>	0.51	175 m <sup>3</sup> * 0.51 = 89 m <sup>3</sup>	875 m <sup>3</sup> + 89 = <b>964 m<sup>3</sup></b>
	3	175 m <sup>3</sup>	1050 m <sup>3</sup>	0.75	175 m <sup>3</sup> * 0.75 = 131 m <sup>3</sup>	1050 m <sup>3</sup> + 131 = <b>1181 m<sup>3</sup></b>
	4	175 m <sup>3</sup>	1225 m <sup>3</sup>	0.12	175 m <sup>3</sup> * 0.12 = 21 m <sup>3</sup>	1225 m <sup>3</sup> + 21 = <b>1246 m<sup>3</sup></b>
3	1	175 m <sup>3</sup>	1400 m <sup>3</sup>	0.67	175 m <sup>3</sup> * 0.67 = 117 m <sup>3</sup>	1400 m <sup>3</sup> + 117 = <b>1517 m<sup>3</sup></b>
	2	175 m <sup>3</sup>	1575 m <sup>3</sup>	0.12	175 m <sup>3</sup> * 0.12 = 21 m <sup>3</sup>	1575 m <sup>3</sup> + 21 = <b>1596 m<sup>3</sup></b>
	3	250 m <sup>3</sup>	1750 m <sup>3</sup>	0.72	250 m <sup>3</sup> * 0.72 = 180 m <sup>3</sup>	1750 m <sup>3</sup> + 180 = <b>1930 m<sup>3</sup></b>





Km 12+000 Carretera Estatal 431 "El Colorado-Galindo"  
Parque Tecnológico San Fandila  
Mpio. Pedro Escobedo, Querétaro, México  
CP 76703  
Tel +52 (442) 216 9777 ext. 2610  
Fax +52 (442) 216 9671

[publicaciones@imt.mx](mailto:publicaciones@imt.mx)

<http://www.imt.mx/>