



UNIVERSIDAD VILLA RICA

ESTUDIOS INCORPORADOS A LA UNIVERSIDAD
NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**“ASEGURAMIENTO DE LA CALIDAD
MEDIANTE PRUEBAS DE LABORATORIO DE
UNA MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE”**

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO CIVIL

PRESENTA:

GERARDO ERASMO PUENTE SOSA

Director de Tesis:
ING. PEDRO ABELARDO BOLÍVAR HERNÁNDEZ

Revisor de Tesis:
ING. JUAN SISQUELLA MORANTE

BOCA DEL RÍO, VER.

ENERO 2014

ÍNDICE

LISTA DE TABLAS	III
LISTA DE FIGURAS.....	V
INTRODUCCIÓN	1
I. METODOLOGÍA	3
1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	3
1.2. JUSTIFICACIÓN.....	4
1.3. OBJETIVOS	5
1.3.1. OBJETIVO GENERAL	5
1.3.2. OBJETIVOS PARTICULARES	5
1.4. HIPÓTESIS	5
1.5. TIPO DE ESTUDIO.....	5
II. MARCO TEÓRICO	6
2.1. PRUEBAS DE CLASIFICACIÓN DE LOS MATERIALES Y SUS ESPECIFICACIONES	6
2.1.1. GRANULOMETRÍA	6
2.1.2. DESGASTE DE LOS ÁNGELES	19
2.1.3. EQUIVALENTE DE ARENA	25
2.1.4. PRUEBA DE AFINIDAD DE LOS MATERIALES	35
2.1.5. DENSIDAD RELATIVA DE MATERIALES PÉTREOS PARA MEZCLAS ASFÁLTICAS.....	38

2.1.6. CUBRIMIENTO CON ASFALTO MEDIANTE EL MÉTODO INGLÉS DE MATERIALES PÉTREOS PARA MEZCLAS ASFÁLTICAS.....	46
2.1.7. PARTÍCULAS ALARGADAS Y LAJEADAS DE MATERIALES PÉTREOS PARA MEZCLAS ASFÁLTICAS.....	50
2.2. PRUEBAS DE PROYECTO Y ESPECIFICACIONES.....	57
2.2.1. DISEÑO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS	57
2.2.2. DESPRENDIMIENTO POR FRICCIÓN EN MATERIALES PÉTREOS PARA MEZCLAS ASFÁLTICAS.....	64
2.2.3. INTEMPERISMO ACELERADO.....	70
2.2.4. PÉRDIDA DE ESTABILIDAD POR INMERSIÓN EN AGUA DE MEZCLAS ASFÁLTICAS	76
2.2.5. PRUEBAS A LOS CEMENTOS ASFÁLTICOS	85
2.3. PRUEBAS DE CONTROL DURANTE LA PRODUCCIÓN Y VERIFICACIÓN DE LA CALIDAD DE LAS CARPETAS	100
2.3.1. PRUEBAS DE CONTROL	100
2.3.2. CONTENIDO DE ASFALTO EN UNA MEZCLA	102
2.3.3. PRUEBAS DE VERIFICACIÓN.....	103
2.3.4. EXTRACCIÓN DE NÚCLEOS	104
2.3.5. PRUEBA DE PERMEABILIDAD EN CARPETAS ASFÁLTICAS	106
2.3.6. ÍNDICE DE PERFIL.....	108
2.4. CRITERIOS DE ACEPTACIÓN O RECHAZO	125
2.4.1. CALIDAD DE LOS MATERIALES	125
2.4.2. ÍNDICE DE PERFIL.....	126
2.4.3. LÍNEAS, PENDIENTES Y ESPESORES.....	130
2.4.4. RESISTENCIA A LA FRICCIÓN	134
2.5. BASE DE PAGO	135
III. CONCLUSIÓN	142
BIBLIOGRAFÍA	144

LISTA DE TABLAS

TABLA 2.1.1-1: PARA TRANSITO IGUAL O MENOR A 1 MILLÓN DE EJES EQUIVALENTES	7
TABLA 2.1.1-2: PARA TRANSITO MAYOR A 1 MILLÓN DE EJES EQUIVALENTES.....	8
TABLA 2.1.1-3: JUEGOS DE MALLAS PARA GRAVA	11
TABLA 2.1.1-4: JUEGOS DE MALLAS PARA ARENA CON FINOS	11
TABLA 2.1.2-1: JUEGO DE MALLAS.....	21
TABLA 2.1.2-2: COMPOSICIÓN DE LA MUESTRA DE PRUEBA Y CARGAS ABRASIVAS	23
TABLA 2.1.6-1: JUEGO DE MALLAS.....	47
TABLA 2.1.7-1: JUEGO DE MALLAS.....	51
TABLA 2.2.1-1: REQUISITOS DE CALIDAD PARA MEZCLAS ASFÁLTICAS DE GRANULOMETRÍA DENSA, DISEÑADAS MEDIANTE EL MÉTODO MARSHALL	58
TABLA 2.2.2-1: JUEGO DE MALLAS.....	65
TABLA 2.2.2-2: CONTENIDO DE PRODUCTO ASFÁLTICO POR PORCIÓN DE MATERIAL PÉTREO.....	67
TABLA 2.2.3-1: JUEGO DE MALLAS.....	71
TABLA 2.2.3-2: TAMAÑO DEL MATERIAL.....	73
TABLA 2.2.3-3: CANTIDAD DE REACTIVO EMPLEADO PARA PREPARAR LA SOLUCIÓN DE PRUEBA	74
TABLA 2.2.4-1: JUEGO DE MALLAS.....	78
TABLA 2.2.4-2: CONTENIDO DE RESIDUO ASFALTICO POR MUESTRA	82
TABLA 2.2.4-3: MASA POR ESPÉCIMEN	82
TABLA 2.2.5-1: TABLA DE CLASIFICACIÓN DE CEMENTOS ASFALTICOS SEGÚN SU VISCOSIDAD DINÁMICA A 60° C	86
TABLA 2.2.5-2: DIFERENCIAS PERMISIBLES ENTRE LOS VALORES DE PENETRACIÓN CONSIDERADOS PARA EL CÁLCULO DE RESULTADOS	95
TABLA 2.3.1-1: TEMPERATURAS DE MEZCLADO PARA MEZCLAS EN CALIENTE	101
TABLA 2.4.2-1: FORMATO PARA EL CÁLCULO DEL ÍNDICE DE PERFIL PROMEDIO DIARIO	129
TABLA 2.4.4-1: FORMATO PARA EL CÁLCULO DEL ÍNDICE DE PERFIL PROMEDIO DIARIO	136

TABLA 2.4.4-2: FACTORES DE ESTÍMULO O SANCIÓN, SEGÚN EL ÍNDICE DE PERFIL.....	138
TABLA 2.4.4-3: FORMATO PARA EL CÁLCULO DE LOS VOLÚMENES, LOS ESTÍMULOS O SANCIONES Y LOS IMPORTES A PAGAR.....	139
TABLA 2.4.4-4: FORMATO PARA EL CÁLCULO DEL FACTOR PROMEDIO DE ESTÍMULO O SANCIÓN DE CADA TRAMO	140

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2.1.1-1: PARA TRANSITO IGUAL O MENOR A 1 MILLÓN DE EJES EQUIVALENTES.....	9
FIGURA 2.1.1-2: PARA TRANSITO MAYOR A 1 MILLÓN DE EJES EQUIVALENTES.....	10
FIGURA 2.1.5-1: PICNÓMETRO TIPO SIFÓN Y PROBETA GRADUADA.....	39
FIGURA 2.1.5-2: CURVA DE CALIBRACIÓN DEL MATRAZ.....	43
FIGURA 2.1.7-1: CALIBRADOR DE ESPESORES.....	52
FIGURA 2.1.7-2: CALIBRADOR DE LONGITUDES.....	53
FIGURA 2.2.4-1: COMPACTADOR DE MUESTRAS (VISTA LATERAL).....	79
FIGURA 2.2.4-2: COMPACTADOR DE MUESTRAS (CORTE).....	80
FIGURA 2.2.5-1: REGIONES GEOGRÁFICAS PARA LA UTILIZACIÓN DE ASFALTOS CLASIFICADOS SEGÚN SU VISCOSIDAD DINÁMICA A 60° C.....	87
FIGURA 2.3.6-1: PLANTILLA DE MEDICIÓN (ACOTACIONES EN MM).....	110
FIGURA 2.3.6-2: PLANTILLA PARA LOCALIZAR IRREGULARIDADES MAYORES DE 10 MM (ACOTACIONES EN MM).....	111
FIGURA 2.3.6-3: DISPOSITIVO PARA CALIBRACIÓN DE LA ESCALA VERTICAL DEL PERFILÓGRAFO.....	111
FIGURA 2.3.6-4: PROCEDIMIENTO DE CALIBRACIÓN DE LA ESCALA VERTICAL.....	114
FIGURA 2.3.6-5: LÍNEA DE PERFIL SUAVIZADA.....	117
FIGURA 2.3.6-6: LOCALIZACIÓN DE IRREGULARIDADES MAYORES DE 10 MM.....	118
FIGURA 2.3.6-7: POSICIONAMIENTO DE LA PLANTILLA DE MEDICIÓN.....	119
FIGURA 2.3.6-8: POSICIONAMIENTO DE LA PLANTILLA DE MEDICIÓN EN EL CASO DE CAMBIOS DE PENDIENTE IMPORTANTES EN LA RASANTE DEL SUBTRAMO.....	120
FIGURA 2.3.6-9: IRREGULARIDADES QUE SERÁN CONSIDERADAS PARA EL CÁLCULO DEL ÍNDICE DE PERFIL	121
FIGURA 2.3.6-10: FORMA EN QUE SE MIDEN LAS IRREGULARIDADES DE DOBLE CRESTA O DOBLE VALLE	122

FIGURA 2.3.6-11: FORMA DE REGISTRAR LAS IRREGULARIDADES COMPRENDIDAS ENTRE DOS SUBTRAMOS SUBSECUENTES	122
FIGURA 2.3.6-12: PROCEDIMIENTO DE MEDICIÓN DE IRREGULARIDADES.....	123
FIGURA 2.4.3-1: UBICACIÓN DE LOS PUNTOS POR NIVELAR.....	131
FIGURA 2.4.3-2: TOLERANCIAS PARA LÍNEAS Y PENDIENTES	132

INTRODUCCIÓN

Para la construcción de carreteras existe diferentes procesos constructivos, que van desde una simple terracería hasta una carpeta de concreto hidráulico, uno de los más comúnmente usados en México por su versatilidad y fácil fabricación es la carpeta asfáltica.

Para la construcción de carpetas asfálticas existen varios tipos de mezclas asfálticas, la elección de la más adecuada irá en función del flujo y el tipo de vehículos, que se espera la transiten durante su vida útil, así como las condiciones climatológicas de la zona donde se construirá. Sin embargo, para lograr un mejor enfoque este trabajo se limita a estudiar las mezclas asfálticas en caliente, de granulometría densa, que son las que se utilizan comúnmente en nuestro país para la construcción de carreteras, autopistas e incluso aeropuertos.

Para la fabricación de mezclas asfálticas es primordial mantener un estricto control de la calidad de los materiales y los procesos de construcción, para facilitar el acceso a los procedimientos de verificación de la calidad de los materiales durante el proceso constructivo y la comprobación de los valores de aceptación una vez finalizados los trabajos, en este trabajo se presentan las normas oficiales vigentes para la elaboración de mezclas asfálticas en caliente, de granulometría densa.

El aseguramiento de la calidad de una carpeta asfáltica es de vital importancia, puesto que una carretera con una carpeta asfáltica de mala calidad representa un riesgo para el usuario. Por lo que durante su construcción se deben tomar las medidas necesarias para evitar desde el inicio cualquier posible defecto.

De esta manera resulta indispensable contar con el personal capacitado y el equipo adecuado en el sitio de los trabajos.

El personal de laboratorio debe conocer las distintas pruebas de laboratorio que se llevan a cabo en las diferentes etapas de la construcción de carreteras, así como los rangos permitidos para el aseguramiento de la calidad de la mezcla asfáltica. Y deben estar en estrecho contacto con el personal de campo para informar de posibles defectos en los materiales, en la mezcla y en la carpeta asfáltica terminada.

De igual manera, el personal de campo debe conocer los valores permitidos para tomar las decisiones correctas, evitando problemas de calidad que resultan en un gasto innecesario para la constructora y por lo tanto en una reducción de la utilidad.

Cada obra tiene requerimientos de calidad específicos que deben ser cumplidos, sin embargo, cuando las especificaciones del proyecto no indiquen los resultados que se deben obtener, la Secretaría de Comunicaciones y Transportes cuenta con una serie de normas que regulan en lo general los valores y rangos para cada prueba.

I. METODOLOGÍA

1.1. Planteamiento del problema

Históricamente siempre han existido las vías terrestres, desde los nómadas tras cuyo andar quedaban senderos que luego ellos mismos u otros utilizaban, sin embargo con el paso del tiempo y el avance de la tecnología se fueron haciendo cada vez más complejos.

Así, surge la necesidad de crear vías terrestres durables, los primeros intentos por mejorar los caminos fueron los empedrados, que brindaban una superficie más sólida y estable para transitar con carretas, además de que ser más resistentes a los embates del clima. Sin embargo fue la llegada del automóvil lo que obligo a buscar nuevas formas de construir carreteras, que fueran más confiables y duraderas.

Luego de las carreteras vinieron las autopistas, que permitirían desplazar mayor número de vehículos a mayor velocidad, y por otra parte los aeropuertos que requerían una superficie de aterrizaje lo suficientemente resistente para soportar el peso de los aviones, pero lo suficientemente flexible para no dañar el tren de aterrizaje.

Hoy en día existen nuevos tipos de recubrimientos que permiten mayor durabilidad y seguridad a los usuarios de una carretera o autopista, sin embargo, la manera más usada sigue siendo la carpeta asfáltica.

Por esa razón, este trabajo se enfoca en la construcción de carpetas asfálticas fabricadas con mezcla asfáltica en caliente de granulometría densa, que es la más usada en las carreteras, autopistas e incluso aeropuertos de México.

Como cualquier otro proceso constructivo, se debe vigilar muy de cerca la calidad de los productos que se usarán en la fabricación de la mezcla asfáltica, así como de la carpeta asfáltica una vez terminada. Esto con la finalidad de entregar un producto que cumpla con los lineamientos establecidos por la Secretaría de Comunicaciones y Transportes, que es la encargada de normar la construcción de carreteras en el país.

El control de la calidad de una mezcla asfáltica es un punto fundamental durante el proceso constructivo, ya que cualquier defecto representa una pérdida para la empresa constructora, además, los encargados de supervisar la construcción de una carpeta asfáltica no pueden pasar por alto ningún desperfecto que pudiera afectar en algún momento el correcto funcionamiento de la carpeta asfáltica como tal y principalmente la seguridad del usuario final de dicha vía.

1.2. Justificación

Durante la elaboración de carpeta asfáltica de granulometría densa con mezcla asfáltica en caliente se debe llevar un minucioso control de la calidad desde los materiales que se usarán, hasta el producto terminado como tal. Para ello se utilizan diversas pruebas, cuyos resultados son comparables con los rangos admisibles según la norma o reglamento que rija cada proceso.

Desde el momento en que se diseña una carpeta asfáltica se deben considerar los factores de calidad de acuerdo al uso que tendrá la carpeta asfáltica y a los materiales existentes en la región. Así mismo se debe asegurar que los materiales mantengan las características indicadas en el diseño, de manera uniforme y durante todo el proceso de fabricación. De igual manera se debe cuidar el resto de los procesos constructivos de la carpeta asfáltica.

Por lo que es importante contar con personal altamente calificado, conocedor de las normas y reglamentos que rigen la construcción de una carretera. Así como con un laboratorio en obra, con el equipo adecuado para realizar las pruebas correspondientes antes, durante y después de la construcción de una carpeta asfáltica de granulometría densa con mezcla asfáltica en caliente.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo General

Mejorar la calidad las carpetas asfálticas fabricadas con mezcla asfáltica en caliente mediante el seguimiento de los resultados de las pruebas de laboratorio realizadas en las diversas etapas del proceso constructivo con el propósito maximizar su vida útil y reducir los costos de mantenimiento de las mismas.

1.3.2. Objetivos Particulares

1. Maximizar la vida útil de las carreteras y autopistas, construidas con carpeta asfáltica de granulometría densa mezclada en caliente, mediante el aseguramiento de la calidad durante todo el proceso constructivo.
2. Minimizar el costo de mantenimiento de las carreteras y autopistas, construidas con carpeta asfáltica de granulometría densa mezclada en caliente
3. Optimizar el rendimiento de la empresa constructora, eliminando reparaciones por mala calidad de la carpeta asfáltica, al mejorar el control de calidad durante el proceso constructivo.

1.4. Hipótesis

Es posible mejorar la calidad de las mezclas asfálticas en caliente utilizadas en la construcción de carpetas asfálticas de granulometría densa, mediante la vigilancia de las normas y reglamentos que rigen cada una de las etapas del proceso constructivo de dichas mezclas.

1.5. Tipo De Estudio

Este trabajo consiste en un compendio de las normas usadas durante la fabricación de mezclas asfálticas de granulometría densa en caliente y en la construcción de carpetas asfálticas producidas con dicha mezcla.

Mediante un estudio de investigación se determinaron las normas necesarias para la construcción de una carretera con mezcla asfáltica de granulometría densa tendida en caliente, a fin de lograr resumir en un solo documento los lineamientos y rangos permisibles para la correcta ejecución de los trabajos y el aseguramiento de la calidad de los materiales pétreos y asfálticos a usar, así como de la carpeta asfáltica terminada.

II. MARCO TEÓRICO

2.1. PRUEBAS DE CLASIFICACIÓN DE LOS MATERIALES Y SUS ESPECIFICACIONES

2.1.1. Granulometría

2.1.1.1. Objetivo:

Esta prueba permite determinar la composición por tamaños de las partículas del material pétreo empleado en la producción de mezclas asfálticas.

2.1.1.2. Valores por Norma:

Se considera lo siguiente:

La granulometría de proyecto deberá quedar comprendida entre las dos líneas autorizadas, las cuales forman la envolvente de proyecto, estas líneas se obtienen con los datos de las tablas que se muestran a continuación considerando las siguientes condiciones:

- Tamaño máximo nominal de la partícula
- Transito esperado en términos de ejes equivalentes de 8.2 Ton, acumulados durante la vida útil del pavimento (ΣL).

En base a lo anterior se presentan las siguientes tablas de clasificación.

Cuando el transito esperado sea igual o menor a 1 millón de ejes equivalentes, el material pétreo, de acuerdo a su tamaño nominal cumplirá con las características granulométricas establecidas en la TABLA 2.1.1-1.

Cuando el tránsito esperado sea mayor a 1 millón de ejes equivalentes¹, el material pétreo, de acuerdo a su tamaño nominal cumplirá con las características granulométricas establecidas en la TABLA 2.1.1-2.

TABLA 2.1.1-1: Para tránsito igual o menor a 1 millón de ejes equivalentes¹

Malla		Tamaño nominal del material pétreo mm (in)				
Abertura mm	Designación	9.5 (3/8)	12.5 (1/2)	19 (3/4)	25 (1)	37.5 (1 1/2)
		Porcentaje que pasa				
50	2"	-	-	-	-	100
37.5	1 1/2"	-	-	-	100	90 - 100
25	1"	-	-	100	90 - 100	76 - 90
19	3/4"	-	100	90 - 100	79 - 92	66 - 83
12.5	1/2"	100	90 - 100	76 - 89	64 - 81	53 - 74
9.5	3/8"	90 - 100	79 - 92	67 - 82	56 - 75	47 - 68
6.3	1/4"	76 - 89	66 - 81	56 - 71	47 - 65	39 - 59
4.75	N° 4	68 - 82	59 - 74	50 - 64	42 - 58	35 - 53
2	N° 10	48 - 64	41 - 55	36 - 46	30 - 42	26 - 38
0.85	N° 20	33 - 49	28 - 42	25 - 35	21 - 31	19 - 28
0.425	N° 40	23 - 37	20 - 32	18 - 27	15 - 24	13 - 21
0.25	N° 60	17 - 29	15 - 25	13 - 21	11 - 19	9 - 16
0.15	N° 100	12 - 21	11 - 18	9 - 16	8 - 14	6 - 12
0.075	N° 200	7 - 10	6 - 9	5 - 8	4 - 7	3 - 6

¹ Normas SCT, *Materiales pétreos para mezclas asfálticas (N-CMT-4-04)*, México D.F., Instituto Mexicano del Transporte, 2008, p 3.

TABLA 2.1.1-2: Para tránsito mayor a 1 millón de ejes equivalentes²

Malla		Tamaño nominal del material pétreo mm (in)				
Abertura mm	Designación	9.5	12.5	19	25	37.5
		(3/8)	(1/2)	(3/4)	(1)	(1 1/2)
Porcentaje que pasa						
50	2"	-	-	-	-	100
37.5	1 1/2"	-	-	-	100	90 - 100
25	1"	-	-	100	90 - 100	74 - 90
19	3/4"	-	100	90 - 100	79 - 90	62 - 79
12.5	1/2"	100	90 - 100	72 - 90	58 - 71	46 - 60
9.5	3/8"	90 - 100	76 - 90	60 - 76	47 - 60	39 - 50
6.3	1/4"	70 - 81	56 - 69	44 - 57	36 - 46	30 - 39
4.75	N° 4	56 - 69	45 - 59	37 - 48	30 - 39	25 - 34
2	N° 10	28 - 42	25 - 35	20 - 29	17 - 24	13 - 21
0.85	N° 20	18 - 27	15 - 22	12 - 19	9 - 16	6 - 13
0.425	N° 40	13 - 20	11 - 16	8 - 14	5 - 11	3 - 9
0.25	N° 60	10 - 15	8 - 13	6 - 11	4 - 9	2 - 7
0.15	N° 100	6 - 12	5 - 10	4 - 8	2 - 7	1 - 5
0.075	N° 200	2 - 7	2 - 6	2 - 5	1 - 4	0 - 3

Generalmente para la construcción de carreteras se utiliza el tamaño nominal de 19mm (3/4"), salvo que el proyecto lo indique de manera diferente, por lo que las líneas que

² *Ibidem*, p. 4

forman las envolventes quedarían como las mostradas en la FIGURA 2.1.1 1 y la FIGURA 2.1.1 2.

Es muy importante tener en cuenta los datos granulométricos del proyecto, ya que nos serán de gran utilidad durante toda la producción de la mezcla asfáltica.

El laboratorio de control de calidad deberá mantener un registro continuo de la granulometría de la producción de las trituradoras. Así como de la mezcla fabricada en la planta para comprobar que se está cumpliendo con la granulometría indicada en el diseño.

FIGURA 2.1.1-1: Para tránsito igual o menor a 1 millón de ejes equivalentes

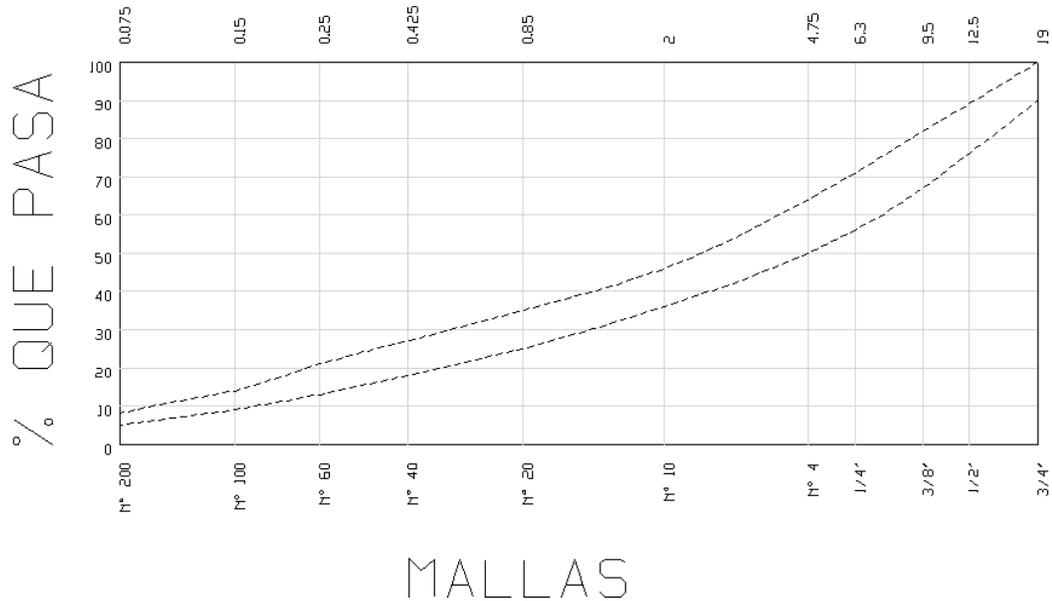
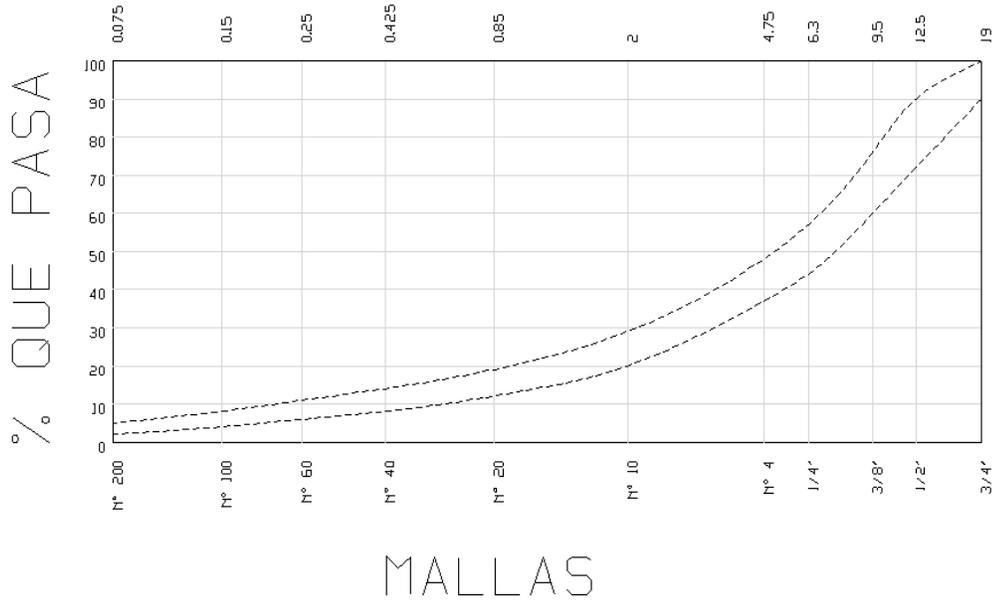


FIGURA 2.1.1-2: Para tránsito mayor a 1 millón de ejes equivalentes

2.1.1.3. Equipo

El equipo consiste en el siguiente:

- Juego de mallas (cribas). Fabricadas con alambre de bronce o de acero inoxidable de diversos calibres, tejidos en forma de cuadrícula, con abertura determinada conforme a lo indicado en las TABLA 2.1.1-3 y TABLA 2.1.1-4. El tejido estará sostenido mediante un bastidor circular metálico, de lámina de bronce o latín, de 206 ± 2 mm de diámetro interior y 68 ± 2 mm de altura, sujetando la malla rígida y firmemente mediante un sistema de engargolado de metales, a una distancia de 50 mm del borde superior del bastidor. Para cribar las gravas también se podrán utilizar mallas con marco de 400 mm o más por lado, a fin de facilitar la operación.

TABLA 2.1.1-3: Juegos de mallas para grava³

Designación	Abertura (mm)
2"	50
1½"	37,5
1¼"	31,5
1"	25
¾"	19
½"	12,5
⅜"	9,5
¼"	6,3
Nº4	4,75

TABLA 2.1.1-4: Juegos de mallas para arena con finos⁴

Designación	Abertura (mm)
Nº10	2
Nº20	0,85
Nº40	0,425
Nº60	0,25
Nº100	0,15
Nº200	0,075

- Horno. Eléctrico o de gas, con capacidad mínima de 20 dm³, ventilado, con termostato capaz de mantener una temperatura constante de 110 ± 5°C.
- Balanza. Con capacidad de 2 kg y aproximación de 0,1 g.
- Vaso de aluminio. De 500 cm³ de capacidad.
- Agitador de varilla metálica. De 6,3 mm (¼") de diámetro y 20 cm de longitud.
- Cubo de lámina. De 10 Lt de capacidad.
- Máquina agitadora para las mallas. De acción mecánica, activada por un motor eléctrico o manivela de velocidad constante, mediante el cual se transmita un

³ Normas SCT, *Granulometría de materiales pétreos para mezclas asfálticas (M-MMP-4-04-002)*. México D.F., Instituto Mexicano del Transporte, 2002, p 2.

⁴ *Idem.*

movimiento excéntrico controlado a un plato de soporte, sobre el que se sujeten las mallas en orden descendente.

- Cucharón. De acero galvanizado de 20 cm de largo, 11 cm de ancho y 10 cm de altura, formando un cajón rectangular con cuatro caras, cuya cara menor tenga un mango metálico de sección circular de 13 cm de largo.
- Charolas. De lámina galvanizada, tres con forma rectangular de aproximadamente $40 \times 70 \times 20$ cm y dos de forma circular de 206 ± 2 mm de diámetro interior y 68 ± 2 mm de altura, para acoplarse al bastidor de las mallas.
- Tapas para las charolas. De forma circular, que embonen perfectamente con el bastidor de las mallas.
- Regla. De madera, de 20 cm de ancho y 80 cm de longitud.
- Brocha. Con las dimensiones y cerdas adecuadas para desprender el material que se adhiera al interior del cubo de lámina y las mallas.
- Pala. De acero, de forma cuadrada.
- Hilo de cáñamo. Resistente, de aproximadamente 40 cm de largo.

2.1.1.4. Preparación de la muestra

2.1.1.4.1. Selección del material para la prueba

1. Si la muestra del material envasado que se recibe en laboratorio está saturada, se extiende sobre una superficie limpia para dejar que se escurra hasta contenido de agua constante o en condición de saturado y superficialmente seco, para posteriormente disgregar de forma manual aquel material que presente grumos, teniendo la precaución de no fragmentarlo por la presión aplicada. Hecho lo anterior, se cuartea el material como se describe en los siguientes incisos.
2. El material se apila utilizando la pala hasta formar un cono.
3. Desde el eje del cono y hacia la periferia se extiende el material hasta formar un cono truncado de 15 a 20 cm de altura.
4. Con ayuda de la regla se divide el cono truncado en cuatro partes iguales, de las cuales se toman dos cuartos opuestos para llenar el cubo de lámina previamente limpiado, dejando caer el material en su interior desde una altura de 20 cm. Una vez lleno el cubo se enrasa con el hilo de cáñamo.

5. En caso de exceder el volumen requerido para llenar el cubo, se procede a reducir la cantidad de material mediante cuarteos sucesivos.

2.1.1.4.2. Obtención de las muestras de prueba

Para realizar la prueba, de la muestra contenida en el cubo de 10 Lt se separa la grava de la arena con finos, conforme al siguiente procedimiento:

1. Se vacía poco a poco y cuidadosamente el material sobre la malla N°4 (4,75 mm), sin sobrepasar la capacidad de la malla y recolectando el material que pasa en una charola. Utilizando la brocha, se retiran todas las partículas que se hubieran adherido a las paredes y al fondo del cubo metálico y a la malla para hacerlas pasar también por dicha malla a fin de no perder ninguna porción del material. Finalmente, se coloca la porción de material retenido en la malla N°4 en otra charola.
2. Se vierte en la balanza la porción que pasa la malla N°4 y se determina su masa, lo que representa la fracción de arena con finos de la muestra, registrándola como W_{SF} , en g. De la misma forma se obtiene la masa del material retenido en dicha malla, lo que representa la grava, registrándola como W_G .
3. Posteriormente, cada fracción de la muestra se trata de forma distinta, de acuerdo con lo siguiente:
 - 3.1. Para la grava:
 - Se seca en el horno a una temperatura de $110 \pm 5^\circ\text{C}$ hasta masa constante, registrándola como W_{MG} , en g.
 - 3.2. Para la arena con finos:
 - Se seca al horno a una temperatura de $110 \pm 5^\circ\text{C}$ hasta masa constante, registrándola como W_{MSF} , en g.
 - Del material seco se separan aproximadamente 500 g, los cuales se reducen por cuarteos, hasta obtener una masa de 200 g. Este material se coloca en el vaso metálico donde se le agregan 500 cm³ de agua, dejándolo reposar por un tiempo de 12 h.
 - Hecho lo anterior, se lava el material decantando el vaso, para lo cual se agita su contenido en forma de “ochos” utilizando la varilla metálica, a la vez que se vierte sobre la malla N°200 (0,075 mm). Para facilitar el paso y eliminación de

los finos, se aplica un chorro de agua con baja presión sobre el contenido de la malla, repitiendo esta operación hasta que el agua salga limpia.

- Finalmente se regresa el material retenido en la malla N°200 al vaso metálico y se seca en el horno a una temperatura de $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$ hasta masa constante, la cual se registra como WF, en g.

2.1.1.5. Procedimiento.

2.1.1.5.1. Preparación de las mallas

Las mallas por usar durante el cribado se preparan en dos juegos, el primero para la grava y el segundo para la arena, ensamblándolas en orden descendente de aberturas de acuerdo con lo indicado en la TABLA 2.1.1-3 y TABLA 2.1.1-4, terminando en el fondo con la charola receptora.

2.1.1.5.2. Cribado

Con las muestras preparadas y teniendo listos los dos juegos de mallas conforme a lo establecido en el inciso anterior, se procede a depositar sobre la malla superior (malla de mayor abertura) la fracción de grava o arena, según su caso, colocando finalmente la tapa. Para efectuar el cribado de la arena se empleará el material que se obtuvo de la fracción de 200 g que se lavó a través de la malla N° 200. A continuación se inicia el cribado del material mediante la agitación de las mallas, mediante alguno de los siguientes métodos:

2.1.1.5.2.1. F.2.1. Agitación con equipo mecánico

Se colocan las mallas debidamente sujetadas en el agitador mecánico, haciéndolo funcionar durante un tiempo suficiente, de tal forma que se cumpla con lo indicado en el inciso 2.1.1.5.3 Verificación de la prueba.

Finalmente se determina y registra la masa retenida en cada malla vertiendo su contenido en la balanza, considerando que las partículas que hayan quedado atoradas en cada retícula forman parte del material retenido de la malla correspondiente, por lo que se reintegrará este material cepillando las mallas por el revés.

2.1.1.5.2.2. Agitación de forma manual

Se toma con ambas manos el conjunto de mallas, desde la charola de fondo y se procede a balancearlo de un lado a otro sobre una superficie rígida, haciendo este movimiento uniforme de tal modo que la agitación sea continua. El tiempo de cribado será el suficiente, de tal forma que se cumpla con lo indicado en el inciso 2.1.1.5.3 Verificación de la prueba.

Finalmente se determina y registra la masa retenida en cada malla vertiendo su contenido en la balanza, considerando que las partículas que hayan quedado atoradas en cada retícula forman parte del material retenido de la malla correspondiente, por lo que se reintegrará este material cepillando las mallas por el revés.

2.1.1.5.2.3. Agitación de forma manual para muestras compuestas principalmente por grava

Para el caso particular de gravas de tamaño nominal entre 31,5 mm a 50 mm (1¼" a 2") y de difícil manejo, se requerirían juegos de mallas y agitador de tamaño adecuado, los cuales no siempre están disponibles, por lo que se permitirá el empleo del método descrito a continuación:

Se trabaja individualmente cada malla usando tres charolas rectangulares, procediendo de la siguiente forma:

- Se coloca en la primera charola la muestra seca, a la que previamente se le ha determinado su masa.
- Dentro de la segunda charola se pone la malla de mayor tamaño y con el cucharón se colocan porciones de la muestra, en cantidad tal que no cubran la malla con más de una capa de partículas. Se agita la malla con ambas manos y se verifica que todas las partículas tengan movimiento sobre ésta.
- Cuando ya no pase material, el retenido en la malla se coloca en la tercera charola, continuando con la siguiente porción de la misma manera, haciéndolo consecutivamente hasta cribar toda la muestra.
- Se determina en la balanza y se registra, la masa retenida en la malla, con lo que se libera la tercera charola, que pasa a ser la segunda para el siguiente proceso, con la malla subsecuente.

Sucesivamente se aplica el mismo procedimiento con las mallas siguientes, depositando el material que pasa en la segunda charola y el retenido en la tercera, concluyendo al llegar a la malla N°4 donde se determina y registra la masa del material que pasó esta última malla.

2.1.1.5.3. Verificación de la prueba

Para comprobar que el cribado se haya ejecutado en forma correcta, debe observarse para cada malla, que durante un minuto extra de cribado continuo no pase más del 1% de la masa del material retenido. Esto se hace de la siguiente manera:

1. Una vez separadas las mallas se manejan en forma individual, colocándoles sucesivamente una charola y una tapa bien ajustadas en cada uno de sus extremos.
2. Se coloca la malla en turno con su tapa y charola en posición ligeramente inclinada sobre una superficie rígida, se balancea con rapidez de un lado a otro, dando un ligero golpe con la mano aproximadamente a cada sexto de vuelta hasta completar 25 golpes.
3. Para la determinación de la eficiencia del cribado de tamaños mayores a la malla N°4, se limitará la cantidad de material sobre cada malla, de tal forma que sólo se permita colocar una capa de partículas cada vez, aunque esto implique efectuar la comprobación por partes hasta agotar todo el material de cada malla.
4. En el caso de que pase más del 1% a través de cualquier malla, se repetirá la prueba, considerando que si dicha malla forma parte del arreglo empleado para la arena sólo se repetirá el cribado de esa parte, aplicando el mismo criterio en el caso de la grava.

2.1.1.6. CÁLCULOS Y RESULTADOS

1. Se calculan y reportan los porcentajes respecto a la masa de la muestra original, correspondientes al material retenido en la malla N°4 y al material que pasa dicha malla, utilizando las siguientes fórmulas:

$$\%SF = \frac{W_{MSF}}{W_{MO}} \times 100$$

$$\%G = \frac{W_{MG}}{W_{MO}} \times 100$$

Dónde:

$\%SF$ = Por ciento de arena con finos respecto a la masa de la muestra original, (%)

$\%G$ = Por ciento de grava respecto a la masa de la muestra original, (%)

W_{MO} = Masa de la muestra original seca, (g), determinada como:

$$W_{MO} = W_{MSF} + W_{MG}$$

W_{MSF} = Masa del material seco que pasa la malla N°4 (arena con finos), (g)

W_{MG} = Masa del material seco retenido en la malla N°4 (grava), (g)

2. Para la grava, se calculan y reportan los porcentajes del material retenido en cada malla así como el que pasó por la última malla, respecto a la masa total de la muestra, mediante la siguiente expresión:

$$\%G_N = \frac{W_N}{W_{MG}} \times \%G$$

Dónde:

$\%G_N$ = Por ciento de material retenido en la malla N respecto a la masa de la muestra original, (%)

W_N = Masa del material retenido en la malla N, (g)

N = Malla utilizada, perteneciente al arreglo de mallas empleado para determinar la granulometría de la fracción de grava

W_{MG} y $\%G$ tienen el significado indicado en el inciso anterior

3. Para la arena, se calculan y reportan los porcentajes del material retenido en cada malla, respecto a la masa total de la muestra, mediante la siguiente expresión:

$$\%S_N = \frac{W_N}{200} \times \%SF$$

Dónde:

$\%S_N$ = Por ciento de material retenido en la malla N respecto a la masa de la muestra original, (%)

W_N = Masa del material retenido en la malla N, (g)

N = Malla utilizada, perteneciente al arreglo de mallas empleado para determinar la granulometría de la arena

$\%SF$ tiene el significado indicado en el inciso 1. El número 200 representa la masa de material que se tomó de la arena seca con finos para determinar su granulometría.

4. Se calcula y reporta el porcentaje de arena y de finos que pasan la malla N°200, respecto a la masa total de la muestra, mediante las siguientes expresiones:

$$\%S = \frac{\sum W_N}{200} \times \%SF$$

$$\%F = \left(200 - \sum W_N\right) \times \%SF$$

Donde:

$\%S$ = Por ciento de arena respecto a la masa de la muestra original, (%)

$\%F$ = Por ciento de finos respecto a la masa de la muestra original, (%)

$\sum W_N$ = Sumatoria de las masas retenidas en cada una de las mallas empleadas durante la prueba para la fracción de arena, calculadas conforme a lo establecido en el inciso anterior, (g)

%SF tiene el significado indicado en la el inciso 1. El número 200 representa la masa de material que se tomó de la arena seca con finos para determinar su granulometría.

5. Una vez efectuados los cálculos indicados en esta Cláusula, se grafica y reporta el porcentaje retenido acumulado de cada malla, el cual se determina sumando el porcentaje retenido parcial de cada malla más el porcentaje retenido acumulado obtenido en la malla anterior y así sucesivamente, comenzando con la cantidad de finos hasta llegar a la malla de mayor abertura, sumando el 100% del material.

2.1.1.7. Precauciones para evitar errores

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

1. Realizar la prueba en un lugar cerrado, con ventilación indirecta, limpio y libre de corrientes de aire que puedan provocar la pérdida de partículas de las muestras de prueba.
2. Cuidar que las muestras estén perfectamente secas al momento de efectuar su cribado.
3. Que todo el equipo esté perfectamente limpio y funcional. Especialmente las mallas estarán limpias y sin indicios de falla, es decir, que los hilos presenten aberturas uniformes y no estén dañados ni rotos.
4. Verificar que la balanza esté limpia en todas sus partes y bien calibrada, colocada en una superficie horizontal, sin vibraciones que alteren las lecturas. (Normas SCT, M-MMP-4-04-002 2002)

2.1.2. Desgaste De Los Ángeles

2.1.2.1. Objetivo:

El objetivo de la prueba es determinar la resistencia a la trituración de los materiales pétreos empleados en mezclas asfálticas.

2.1.2.2. Valores por Norma:

Se consideran los siguientes valores:

1. Cuando el tránsito esperado sea igual o menor a 1 millón de ejes equivalentes:

Desgaste de Los Ángeles: 35 % Máximo⁵

2. Cuando el tránsito esperado sea mayor a 1 millón de ejes equivalentes:

Desgaste de Los Ángeles: 30 % Máximo⁶

2.1.2.3. Equipo y material:

El equipo para la ejecución de la prueba estará en condiciones de operación, calibrado, limpio y completo en todas sus partes. Todos los materiales por emplear serán de alta calidad, considerando siempre la fecha de su caducidad.

- Máquina de los ángeles: Constituida por un cilindro de acero, hueco y cerrado en ambos extremos, con diámetro interior de 710 ± 5 mm y largo de 510 ± 5 mm, montado sobre dos soportes ubicados al centro de sus caras paralelas, que le permitan girar sobre su eje de simetría en posición horizontal con una velocidad angular de 30 a 33 rpm. El cilindro tendrá una abertura que permita introducir la muestra de prueba y las esferas metálicas, con una tapa de cierre hermético diseñada con la misma curvatura del cilindro para que la superficie interior del mismo sea continua y uniforme; además tendrá en su parte interior una placa de acero removible de 2,5 cm (1") de espesor, que se proyecte radialmente 8,9 cm ($3\frac{1}{2}$ ") en toda la longitud del cilindro y contará con un dispositivo para registrar el número de revoluciones que dé el cilindro.
- Carga abrasiva: Esferas de hierro fundido o acero, con un diámetro promedio de 47 mm y una masa de entre 390 y 445 g cada una.
- Juego de mallas (cribas): Fabricadas con alambre de bronce o de acero inoxidable de diversos calibres, tejidos en forma de cuadrícula, con abertura determinada conforme a lo indicado en la TABLA 2.1.2-1. El tejido estará sostenido mediante un bastidor circular metálico, de lámina de bronce o latón, de 206 ± 2 mm de diámetro interior y 68 ± 2 mm de altura, sujetando la malla rígida y firmemente mediante un

⁵ Normas SCT, op. cit., nota 1, p. 3.

⁶ *Idem.*

sistema de engargolado de metales, a una distancia de 50 mm del borde superior del bastidor.

TABLA 2.1.2-1: Juego de mallas⁷

Designación	Abertura (mm)
2"	50
1½"	37,5
1"	25
¾"	19
½"	12,5
⅜"	9,5
¼"	6,3
Nº4	4,75
Nº10	2
Nº12	1,7

- Horno: Eléctrico o de gas, con capacidad mínima de 20 dm³, ventilado, con termostato capaz de mantener una temperatura constante de 110 ± 5°C.
- Balanza: Con capacidad de 20 kg y aproximación de 0,1 g.
- Máquina agitadora para las mallas: De acción mecánica, activada por un motor eléctrico o manivela de velocidad constante, mediante el cual se transmita un movimiento excéntrico controlado a un plato de soporte, sobre el que se sujeten las mallas en orden descendente.
- Cucharón: De acero galvanizado de 20 cm de largo, 11 cm de ancho y 10 cm de altura, formando un cajón rectangular con cuatro caras, cuya cara menor tenga un mango metálico de sección circular de 13 cm de largo.

⁷ Normas SCT, *Desgaste mediante la prueba de Los Ángeles de materiales pétreos para mezclas asfálticas (M-MMP-4-04-006)*. México D.F., Instituto Mexicano del Transporte, 2002, p 3.

- Charolas: De lámina galvanizada, con forma rectangular de aproximadamente 40 × 70 × 20 cm.
- Agua potable.

2.1.2.4. Preparación:

De la muestra del material envasado que se recibe en laboratorio, se disgrega de forma manual el material que presente grumos, teniendo la precaución de no fragmentarlo por la presión aplicada. Hecho lo anterior, se cuartea el material hasta obtener una muestra de aproximadamente 40 kg, como se describe a continuación:

1. Una vez que el material está disgregado, se apila hasta formar un cono.
2. Desde el eje del cono y hacia la periferia se extiende el material hasta formar un cono truncado de 15 a 20 cm de altura.
3. Se divide el cono truncado en cuatro partes iguales, de las cuales se toman dos cuartos opuestos para formar una muestra de aproximadamente 40 kg; en caso de exceder esta masa, se procede a reducir la cantidad de material mediante cuarteos sucesivos.

La muestra resultante se lava mediante un chorro de agua para eliminar el polvo adherido y posteriormente se seca en el horno a una temperatura de $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$ hasta masa constante.

Considerando el arreglo de mallas indicado en la TABLA 2.1.2-1, el material de la muestra se separa y clasifica obteniendo su granulometría, de acuerdo con el procedimiento establecido en el inciso 2.1.1 Granulometría, eliminando el material que pase por la malla N°10.

2.1.2.5. Procedimiento:

1. Una vez separado y clasificado el material de la muestra, de la TABLA 2.1.2-2 se elige el tipo de composición que se utilizará para integrar la muestra de prueba, que mejor se asemeje a las características granulométricas obtenidas.
2. Se integra la muestra de prueba con las proporciones correspondientes a cada rango de tamaños, de acuerdo con las cantidades indicadas en la TABLA 2.1.2-2.
3. Se obtiene la masa de la muestra de prueba integrada, registrándola como P_i , con aproximación de 1 g y se introduce a la máquina de Los Ángeles.

4. De acuerdo con lo indicado en la TABLA 2.1.2-2, se define la cantidad de esferas requeridas y se verifica que su masa total cumpla con lo establecido en dicha Tabla. Hecho lo anterior, se introducen las esferas a la máquina de Los Ángeles y se hace funcionar a una velocidad angular de 30 a 33 rpm, durante 500 revoluciones.

TABLA 2.1.2-2: Composición de la muestra de prueba y cargas abrasivas⁸

Tipo de composición de la muestra de prueba	Rango de tamaños		Masa de la fracción g	Carga abrasiva	
	mm	Designación		Número de esferas	Masa total g
A	37,5 - 25	1½" - 1"	1 250 ± 25	12	5 000 ± 25
	25 - 19	1" - ¾"	1 250 ± 25		
	19 - 12,5	¾" - ½"	1 250 ± 10		
	12,5 - 9,5	½" - ⅜"	1 250 ± 10		
	Masa total de la muestra de prueba		5 000 ± 10		
B	19 - 12,5	¾" - ½"	2 500 ± 10	11	4 584 ± 25
	12,5 - 9,5	½" - ⅜"	2 500 ± 10		
	Masa total de la muestra de prueba		5 000 ± 10		
C	9,5 - 6,3	⅜" - ¼"	2 500 ± 10	8	3 330 ± 20
	6,3 - 4,75	¼" - N°4	2 500 ± 10		
	Masa total de la muestra de prueba		5 000 ± 10		
D	4,75 - 2	N°4 - N°10	5 000 ± 10	6	2 500 ± 15

5. Se retira el material del interior de la máquina depositándolo en una charola. Se desecha la fracción de la muestra de prueba que pase la malla N°12 (1,7 mm de abertura), para lo que se puede hacer pasar el material por todas las mallas

⁸ *Ibidem*, p 4.

indicadas en la TABLA 2.1.2-1. Una vez desechado el material menor de 1,7 mm, se lava la muestra de prueba con un chorro de agua y se seca en el horno a una temperatura de $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$ hasta masa constante.

6. Finalmente se deja enfriar la muestra de prueba a temperatura ambiente, para determinar su masa con aproximación de 0,1 g, registrándola como P_f .

2.1.2.6. Cálculos y resultados

Se calcula y reporta como resultado de la prueba, el desgaste por trituración, utilizando la siguiente expresión:

$$P_a = \left(\frac{P_i - P_f}{P_i} \right) \times 100$$

Dónde:

P_a = Desgaste por trituración Los Ángeles, (%)

P_i = Masa inicial de la muestra de prueba, (g)

P_f = Masa final del material de la muestra de prueba mayor de 1,7 mm (malla N°12), (g)

2.1.2.7. Precauciones para evitar errores

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

1. Realizar la prueba en un lugar cerrado, con ventilación indirecta, limpio y libre de corrientes de aire que puedan provocar la contaminación de la muestra de prueba con otras partículas.
2. Verificar que la muestra esté perfectamente seca al momento de efectuar los cribados.

3. Que todo el equipo esté perfectamente limpio y funcional. Especialmente las mallas estarán limpias y sin indicios de falla, es decir, que los hilos presenten aberturas uniformes y no estén dañados ni rotos.
4. Que la máquina de Los Ángeles esté perfectamente limpia y libre de residuos de material en su interior, que el mecanismo de control de revoluciones trabaje correctamente y que la placa radial cumpla con las dimensiones indicadas.
5. Verificar que las esferas cumplan con las dimensiones y masas indicadas en la TABLA 2.1.2-2.
6. Verificar que la balanza esté limpia en todas sus partes, bien calibrada y colocada en una superficie horizontal, sin vibraciones que alteren las lecturas.
7. Verificar que el horno esté limpio y completo en todas sus partes y que su termostato trabaje correctamente.
8. Cuidar que la muestra de prueba esté integrada conforme a alguna de las composiciones indicadas en la TABLA 2.1.2-2. (Normas SCT, M-MMP-4-04-006 2002)

2.1.3. Equivalente De Arena

2.1.3.1. Objetivo:

Determinar la calidad que tiene un suelo que se va emplear en la fabricación de mezclas asfálticas, en relación de los finos indeseables de naturaleza plástica.

2.1.3.2. Valores por Norma:

Se consideran los siguientes valores:

1. Cuando el tránsito esperado sea igual o menor a 1 millón de ejes equivalentes:
Equivalente de Arena: 50% Mínimo⁹
2. Cuando el tránsito esperado sea mayor a 1 millón de ejes equivalentes:
Equivalente de Arena: 50% Mínimo¹⁰

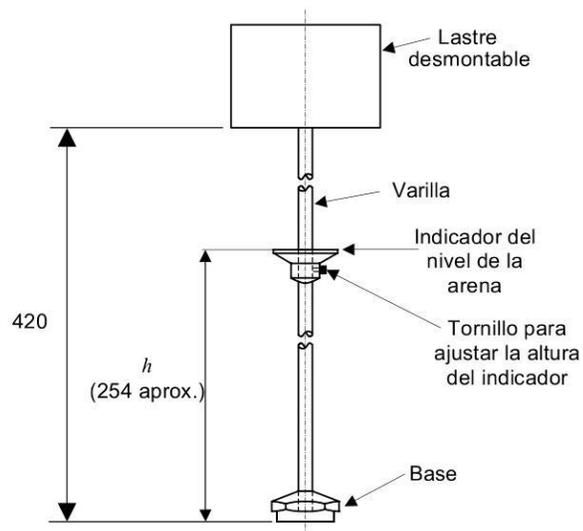
⁹ Normas SCT, *op. cit.*, nota 1, p 4.

2.1.3.3. Equipo y material:

El equipo consiste en el siguiente:

- Cilindro de prueba: De acrílico transparente, con diámetro interior de 3,15 cm ($1\frac{1}{4}$ ") y altura de 43 cm (17"), graduado a cada 1 mm, desde el fondo hasta una altura de 38,1 cm (15"), que permita medir los niveles de arena sedimentada y de finos suspendidos.
- Tapón de hule: Que permita tapar herméticamente al cilindro descrito en la Fracción anterior, a fin de evitar la pérdida de materiales o de solución.
- Tubo irrigador: Que conste de una tubería de cobre o latón, con diámetro exterior de 0,63 cm ($\frac{1}{4}$ "), con uno de sus extremos cerrado formando una punta en forma de cuña. Contará con dos perforaciones laterales hechas con una broca N°60, en los lados planos de la cuña, cerca de la punta.
- Botella: Con capacidad aproximada de 4 l, con equipo sifón consistente en un tapón con dos orificios y un tubo de cobre doblado.
- Soporte o dispositivo de posicionamiento: Que permita ubicar la botella y todo el dispositivo del sifón a la altura y de la forma adecuada.
- Manguera de hule: Para conectar el sifón al tubo irrigador. De 0,48 cm ($\frac{3}{16}$ ") de diámetro, con una pinza para obturarla.
- Pisón: Formado por una varilla de 46 cm de longitud y 0,63 cm ($\frac{1}{4}$ ") de diámetro. En su extremo superior contará con un lastre suficiente para que la masa total del dispositivo sea de 1 kg y en el otro extremo tendrá una base hexagonal cónica. Tendrá un indicador del nivel de la arena en su parte media que ajuste en el interior cilindro de prueba.

¹⁰ *Idem.*

Ilustración 2.1.3-1: Pisón (Acotacione en mm)¹¹

- Cápsula: Con capacidad de 90 ml.
- Embudo de boca ancha: Para depositar la muestra dentro del cilindro.
- Embudo para filtrado: De vidrio, con capacidad de 375 ml, que permita vaciar los reactivos de la solución de reserva.
- Malla n°4: Fabricada con alambre de bronce o de acero inoxidable, tejido en forma de cuadrícula y con aberturas de 4,75 mm.
- Papel filtro: Whatman N°12 o equivalente, de material resistente a los reactivos y soluciones que se utilizarán.
- Balanza: Con capacidad de 2 000 g y aproximación de 0,1 g.
- Matraces Erlenmeyer: De vidrio, graduados, de 2 000 cm³ de capacidad.
- Agitador automático o manual:
 1. Si es automático, que esté equipado con un cronómetro de dos velocidades (ASTM y California) y circuito de sincronización, accionado por un motor de

¹¹ Normas SCT, Equivalente de arena de materiales pétreos para mezclas asfálticas (M-MMP-4-04-004). México D.F., Instituto Mexicano del Transporte, 2002, p 3.

49,71 W (1/15 hp) y capaz de sostener de 175 a 180 ciclos por minuto con una extensión de carrera de 200 ± 3 mm.

2. Si es manual, que cuente con una base de apoyo y un sujetador de probeta para garantizar un movimiento completamente horizontal.

- Guantes de hule.
- Agua destilada o potable.
- Componentes para elaborar una solución de reserva
 1. Cloruro de calcio anhidro.
 2. Glicerina USP.
 3. Formaldehído RA (solución volumétrica al 40%).

2.1.3.4. Preparación

2.1.3.4.1. De las soluciones necesarias para la prueba

Previo al inicio de la prueba, se preparan las soluciones necesarias de acuerdo con lo indicado a continuación:

1. Solución de reserva:
 - 1.1. Se disuelven 454 g de cloruro de calcio en 1,9 l de agua destilada.
 - 1.2. Se enfría la solución al aire libre, hasta alcanzar la temperatura ambiente y después se pasa a través del papel filtro.
 - 1.3. Se agregan 47 g de formaldehído y 2 047 g de glicerina, mezclándose bien y diluyéndose con agua destilada hasta completar 3,2 l de líquido.
2. Solución de trabajo:
 - 2.1. Para preparar la solución de trabajo, en la botella equipada con el equipo sifón se diluyen 90 ml de la solución de reserva en 3,8 l de agua destilada.

2.1.3.4.2. De la muestra

La preparación de la muestra de materiales pétreos, se hace de la siguiente manera:

1. Si la muestra del material envasado que se recibe en laboratorio está saturada, se extiende sobre una superficie limpia para dejar que se escurra hasta la condición de saturado y superficialmente seco, para posteriormente disgregar de forma manual aquel material que presente grumos, teniendo la precaución de no

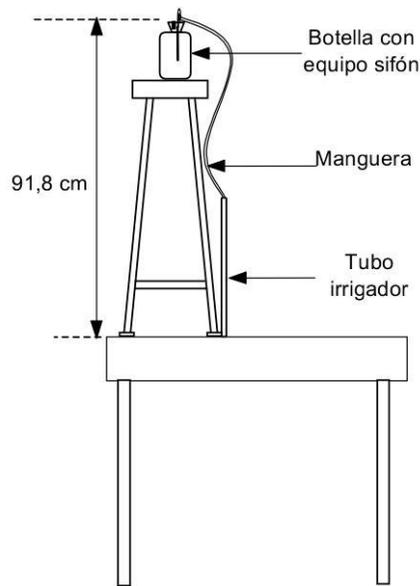
fragmentarlo por la presión aplicada. Hecho lo anterior, se cuartea el material hasta obtener una muestra de 10 kg, como se describe a continuación:

- 1.1. Una vez que el material está disgregado, saturado y superficialmente seco, se apila hasta formar un cono.
- 1.2. Desde el eje del cono y hacia la periferia se extiende el material hasta formar un cono truncado de 15 a 20 cm de altura.
- 1.3. Se divide el cono truncado en cuatro partes iguales, de las cuales se toman dos cuartos opuestos para formar una muestra de aproximadamente 10 kg; en caso de exceder esta masa, se procede a reducir la cantidad de material mediante cuarteos sucesivos.
2. Si la muestra original está seca, se humedecerá un poco antes de realizar la prueba a fin de evitar la pérdida del material fino durante el cribado.
3. Se hace pasar la muestra por la malla N°4, y si el material retenido en dicha malla presenta partículas finas adheridas, se frota entre las manos con guantes a fin de desprender y recuperar dichas partículas, las cuales se añadirán al material que pasó la malla. El material retenido en la malla se elimina.
4. El material que pasa la malla N°4 se disgrega y se cuartea como se indica en los Incisos 1.1. a 1.3. del inciso 2.1.3.4.2 De la muestra, hasta reducirlo a una masa de aproximadamente 2 kg.
5. Se llena la cápsula con este material hasta enrasar su superficie. Una vez llena, contendrá aproximadamente 110 g de material suelto.

2.1.3.4.3. Del equipo

La botella equipada con el equipo sifón se coloca de tal manera que la salida del líquido quede a 92 cm de altura con relación a la superficie de la mesa de trabajo, uniendo la botella mediante la manguera de hule al tubo irrigador, como se muestra en la Ilustración

2.1.3-2: Colocación del sifón

Ilustración 2.1.3-2: Colocación del sifón¹²

2.1.3.5. Procedimiento de la prueba

1. Una vez preparado el sifón, se sopla dentro de la botella por la parte superior o a través de un pequeño tubo estando abierta la pinza, para que el sifón quede listo para usarse.
2. Por medio del sifón, se introduce la solución de trabajo al cilindro hasta una altura de 10 cm (4”).
3. Con la ayuda del embudo, se vacía al cilindro de prueba la muestra de material contenida en la cápsula, golpeando firmemente varias veces el fondo del cilindro contra la palma de la mano para eliminar las burbujas de aire atrapado dentro del material y acelerar la saturación de la muestra.
4. Se deja reposar la muestra durante 10 min, se cierra el cilindro de prueba con un tapón y se agita considerando lo siguiente:

¹² *Ibidem*, p. 6

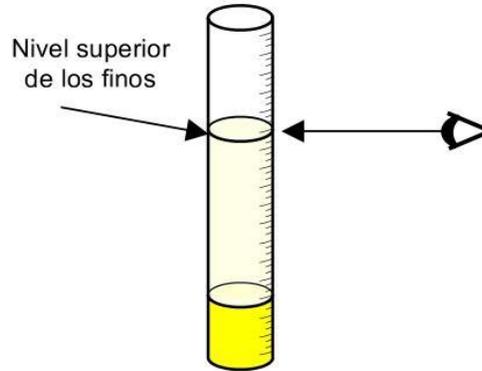
4.1. Agitado manual: Se agita vigorosamente el cilindro colocado en posición horizontal de un lado a otro en sentido longitudinal durante 90 ciclos en un tiempo de 30 s, con una carrera aproximada de 20 cm, entendiendo que un ciclo comprende un movimiento completo de oscilación, es decir, de un lado a otro hasta concluir en la posición de partida.

4.2. Agitado con equipo: La agitación se conseguirá mediante alguna de las dos formas siguientes:

- Si se utiliza un equipo de operación eléctrica, se coloca el cilindro de prueba sobre el dispositivo, y se programa el número de ciclos para que el equipo aplique la agitación automáticamente con los parámetros de longitud y tiempo que se requieren.
 - Si se utiliza un equipo de operación manual, se monta el cilindro de prueba en los sujetadores, y se procede con la agitación, midiendo el tiempo y el número de ciclos. En realidad la función del equipo manual consiste únicamente en delimitar los movimientos longitudinales del cilindro.
5. Concluida la agitación, se coloca el cilindro sobre la mesa de trabajo y se le quita el tapón, inmediatamente se le inserta el tubo irrigador con el cual se lavan las paredes del cilindro de arriba a abajo hasta concluir en el fondo. Con el fin de hacer la irrigación uniforme en todo el recorrido, se gira el cilindro conforme avanza el tubo irrigador, propiciando la separación entre el material arcilloso y el arenoso.
 6. Cuando el nivel del líquido llegue a 38,1 cm (15”), medido sobre la escala del cilindro de prueba, se extrae lentamente el tubo irrigador sin cortar el flujo de solución, de manera que el nivel del líquido se mantenga en los 38,1 cm después de retirar completamente el tubo.
 7. Se deja reposar el cilindro durante 20 min, evitando cualquier movimiento o vibración durante este período, transcurrido el cual, la arena se ha sedimentado y los finos permanecen en suspensión.
 8. Se mide y registra como (LNSfinos) el nivel superior de los finos en suspensión, con aproximación de 2 mm (0,1” aprox.). Dicha lectura se hará en condiciones de iluminación que permitan apreciar claramente el nivel máximo de las partículas, observando el cilindro desde uno de sus lados, de tal manera que la línea de

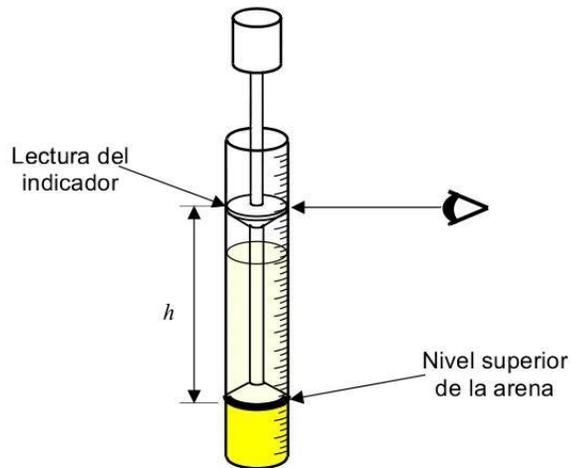
visión forme ángulo recto con la pared del cilindro, como se muestra en la **¡Error!**
No se encuentra el origen de la referencia.

Ilustración 2.1.3-3: Medición del nivel de finos¹³



9. A continuación se introduce lentamente la varilla con pisón dentro del cilindro, cuidando de no formar turbulencias, hasta que la base descansa sobre la arena. Se observa el nivel de la parte superior del indicador en la escala del cilindro, se le resta la altura h (254 mm aprox.) y se registra como el nivel superior de la arena (LNSarena), con aproximación de 2 mm (0,1" aprox.). Durante la medición se tendrán las mismas consideraciones citadas en el inciso anterior.

¹³ *Ibidem*, p. 7

Ilustración 2.1.3-4: Medición del nivel de arena¹⁴

10. Una vez concluida la prueba, se limpia el cilindro, tapándolo y agitándolo en posición vertical; se voltea y se destapa para vaciarlo inmediatamente. Para finalizar se lava dos veces con agua, hasta eliminar cualquier residuo de material en su interior.

2.1.3.6. Cálculos y resultados

1. Se calcula y reporta como resultado de la prueba el equivalente de arena, utilizando la siguiente expresión:

$$\%EA = \frac{LNS_{ARENA}}{LNS_{FINOS}} \times 100$$

Dónde:

¹⁴ *Idem.*

%EA = Equivalente de arena, (%)

LNSarena = Nivel superior de la arena, (cm)

LNSfinos = Nivel superior de los finos, (cm)

2. Si el valor del equivalente de arena es inferior al valor indicado en el inciso 2.1.3.2 Valores por Norma:, u otro valor especificado, se ejecutará la prueba dos veces más utilizando la misma muestra original.
3. En caso de que se hayan hecho tres pruebas, el equivalente de arena por reportar será el promedio de los tres resultados calculados con la expresión indicada en inciso 1 de esta sección.

2.1.3.7. Precauciones para evitar errores

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

1. Realizar la prueba en un lugar cerrado, bien ventilado, limpio y libre de corrientes de aire, de cambios de temperatura y de partículas que provoquen la contaminación de las muestras de material.
2. Que todo el equipo esté perfectamente limpio, para que al hacer la prueba los materiales no se mezclen con agentes extraños que alteren el resultado. En forma especial, el cilindro estará limpio y sin residuos de material de pruebas anteriores.
3. Verificar que los reactivos y soluciones correspondan a las características de los materiales indicados en el procedimiento de prueba.
4. Cuidar que el operario de laboratorio esté capacitado para aplicar la irrigación y mantener el nivel de la solución dentro de los parámetros de prueba.
5. Cuidar que el periodo de agitación, los ciclos y carrera del mismo, así como el tiempo de reposo del material y la solución, correspondan a lo indicado.
6. Cuidar que las lecturas se tomen inmediatamente después de terminado el periodo de reposo del material, sin realizar movimientos bruscos para no alterar las partículas, así mismo, que la iluminación sea adecuada y que el ángulo de visión sea el especificado. De no cumplirse esto, la lectura será considerada incorrecta y se repetirá la prueba. (Normas SCT, M-MMP-4-04-004 2002)

2.1.4. Prueba De Afinidad De Los Materiales

2.1.4.1. Objetivo:

Determinar si el material pétreo tiene buenas características de afinidad o de adherencia con el asfalto.

2.1.4.2. Equipo y material:

El equipo consiste en el siguiente:

- Dispositivo mecánico para realizar el agitado de las mezclas de prueba, consistente en una barra giratoria porta-frascos, en la cual estos se encuentran sujetos de dos a cada lado y perpendicularmente a dicha barra, la que está apoyada en soportes de baleros y accionada por un motor eléctrico provisto de un reductor de velocidad, para que los frascos giren a razón de 40 a 50 rev/min.
- Frasco de vidrio de 500 cm³, de 6.5 cm de diámetro y 16 cm de altura, de boca ancha y tapa hermética.
- Balanza de 2 kg. de capacidad y 0.1 gr. de aproximación.
- Horno con termostato que mantenga una temperatura de 20 a 150 °C, con aproximación de 1 °C.
- Mallas de las siguientes designaciones: de ½", No. 10, No. 40.
- Baño de agua con temperatura controlable de 20 a 50 °C.
- Charolas de lámina.
- Cuchara de albañil chica.
- Lupa de 4 a 5 aumentos, con diámetro aproximado de 75 mm.
- Agua destilada o potable.

2.1.4.3. Preparación de la muestra.

1. De una muestra de material pétreo obtenida, se toma por cuarteo una porción de 3 Kg.

2. A continuación se criba dicha porción por las mallas $\frac{1}{2}$ ", $\frac{1}{4}$ ", No. 10 y No. 40 para obtener las fracciones que quedan comprendidas entre dichas mallas y las que pasan la malla No. 40. La fracción que retiene la malla de $\frac{1}{2}$ " se elimina.
3. De acuerdo con la parte correspondiente de la granulometría de proyecto se calculan las cantidades necesarias de material pétreo para formar una muestra con peso aproximado de 500 gr.
4. De las fracciones separadas como se indicó en el paso 2 se pesan en una charolas las cantidades calculadas para formar dos muestras, las cuales se mezclan por separado. Cuando la prueba se efectúe con cemento asfáltico solo se formará una muestra de material pétreo.
5. Cuando los agregados vayan a utilizarse con cemento asfáltico, se calienta en el horno la muestra de material pétreo a una temperatura de 135 ± 5 °C.
6. Si la prueba se va a efectuar con asfalto rebajado o con una emulsión asfáltica, se sumerge una de las dos muestras en un vaso de aluminio que contenga agua a la temperatura ambiente y se deja saturar durante 16 a 20 horas; al finalizar este periodo, se eleva la temperatura del agua a 40 °C y se mantiene esta temperatura durante 1 hora. A continuación se vacía la muestra en una charola, se decanta el agua y se oreo moviéndola periódicamente, hasta que presente un color opaco, estando húmeda, considerando que en estas condiciones el material contiene aproximadamente su humedad de absorción. La otra muestra de material pétreo, que no se sujeta a saturación, se calentara a 40 °C cuando la mezcla se elabore con asfaltos rebajados y no se calentara cuando se utilicen emulsiones.
7. Se prepara una muestra de producto asfáltico del tipo que pretenda usarse en la obra con peso aproximado de 200 gr. y se calienta a la temperatura recomendable.

2.1.4.4. Procedimiento:

1. Inmediatamente después de preparados los materiales y tratándose de mezclas asfálticas, se agrega a cada una de las dos muestras, la cantidad de material asfáltico correspondiente al porcentaje de proyecto; en el caso de que no se conozca el porcentaje de proyecto para las mezclas o se trate de materiales pétreos sobre los que se aplicaran tratamientos asfálticos, se agregara a dicha muestras la cantidad de material asfáltico correspondiente al contenido mínimo

determinado, más el 1%. Si los materiales pétreos por ensayar se van a emplear en la construcción de carpetas por el sistema de riegos o para riego de sello, se les agregará a las muestras correspondientes una cantidad de material asfáltico suficiente para lograr con facilidad el cubrimiento de las partículas sin que haya exceso de asfalto.

2. A continuación se mezclan con una cuchara de albañil las muestras preparadas, hasta lograr un cubrimiento completo y uniforme de las partículas con asfalto; si después de aproximadamente 10 minutos de mezclado no se logra el cubrimiento, se verifica la temperatura y en su caso, se calienta cada una de las mezclas a 40 °C, siempre que se usen asfaltos rebajados o bien, a 120 °C cuando se utilicen cementos asfálticos; se continúa el mezclado a dichas temperaturas hasta que se observe que ya no se mejora el cubrimiento obtenido. Las mezclas elaboradas con emulsión así como las de los agregados que contienen la humedad de absorción, no deberán calentarse ni remezclarse.
3. Se colocan las mezclas dentro del horno y se dejan en este durante 15 horas aproximadamente, a una temperatura de 60 °C cuando se utilicen asfaltos rebajados o emulsiones asfálticas que contienen solventes, o bien, a 135 °C durante 2 horas si se trata de emulsiones prácticamente sin solventes, eliminando en este caso el agua libre mediante decantación. Cuando las mezclas se hayan elaborado con cemento asfáltico no se introducen en el horno y únicamente se dejan enfriar a la temperatura ambiente durante 2 horas.
4. Al terminar el proceso de curado de las muestras en el horno, se sacan de él e inmediatamente se remezclan cada una de ellas en su charola respectiva, durante 2 minutos, después de lo cual se dejan enfriar a la temperatura ambiente por un lapso de 2 horas mínimo.
5. Se seleccionan de cada una de las mezclas, 2 porciones de 50 gr aproximadamente, constituida la primera por material de tamaños comprendidos entre 5 y 10 mm y la segunda por partículas de tamaño inferior a 5 mm.
6. Se colocan en los frascos de vidrio cada una de las porciones seleccionadas, se agregan 200 cm³ del agua destilada o potable a cada frasco y se tapan herméticamente.

7. Se sumergen los frascos, con su contenido, en el baño de agua a 25 °C, se dejan en este durante un lapso de 16 a 20 horas y se observa el desprendimiento ocurrido.
8. Se sacan los frascos del baño, se instalan en la máquina de agitación y se someten a 4 periodos consecutivos de agitación de 15 minutos cada uno; en caso de que no se disponga de este aparato el agitado se hará manualmente durante 3 periodos de 5 minutos cada uno, efectuándose este proceso con los brazos al frente y flexionados, moviendo los frascos hacia los lados del operador en un espacio de 50 cm., a razón de 60 ciclos por minuto.
9. Al concluirse el último periodo de agitación se retiran los frascos del aparato, se destapan y se escurre el agua que contienen; se vacía cada muestras sobre una hoja de papel blanco y se acomodan estas sobre una mesa de trabajo, suficientemente iluminada para observar y estimar con la ayuda de una lupa, el porcentaje de superficie de las partículas en que haya ocurrido el desprendimiento de asfalto.
10. Se registra el porciento de desprendimiento estimado en cada una de las dos fracciones de cada muestra ensayada y se reporta el mayor valor obtenido, tanto para condiciones húmedas como para condiciones secas. Si el desprendimiento ocurrido es mayor de un 25% se considera que el material no cumple el requisito de afinidad con el asfalto indicado en las especificaciones de la Secretaría.

2.1.5. Densidad Relativa de Materiales Pétreos para Mezclas Asfálticas

2.1.5.1. Objetivo:

El objetivo de esta prueba es determinar la densidad relativa de los materiales pétreos empleados en mezclas asfálticas a fin de conocer la masa de sólidos por unidad de volumen de dichos sólidos sin vacíos en cada una de sus fracciones, ya sea arena con finos o grava, respecto a la densidad del agua.

2.1.5.2. Descripción:

La prueba para la arena con finos, una vez separada de la grava, consiste en eliminar el aire atrapado en la muestra de prueba, al estar sumergida totalmente en agua destilada en ebullición, para obtener su densidad relativa.

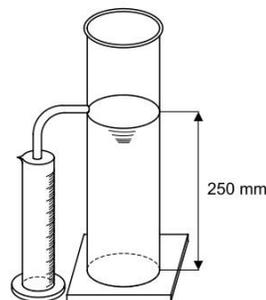
Para la grava, una vez separada de la arena con finos, la prueba consiste en introducir la muestra de prueba en un depósito con agua destilada, para determinar el volumen que desplaza, para después, al comparar con dicho volumen la masa seca de la muestra de prueba, obtener su masa por unidad de volumen y finalmente, compararla con la densidad del agua, para obtener su densidad relativa.

2.1.5.3. Equipo y material:

El equipo consiste en el siguiente:

- Balanzas: Una con capacidad de 10 kg y aproximación de 5 gr y otra con capacidad de 1 kg y aproximación de 0,1 gr.
- Probeta graduada: De 250 cm³ de capacidad y aproximación de 1 cm³.
- Picnómetro tipo sifón: Formado por un cilindro metálico de 163 mm de diámetro y 370 mm de altura, con un sifón colocado a 250 mm de su base.

FIGURA 2.1.5-1: Picnómetro tipo sifón y probeta graduada¹⁵



¹⁵ Normas SCT, *Densidad relativa de materiales pétreos para mezclas asfálticas (M-MMP-4-04-003)*. México D.F., Instituto Mexicano del Transporte, 2002, p 2.

- Horno: Con capacidad mínima de 20 dm³, ventilado, capaz de mantener una temperatura de 110 °C y aproximación de ± 5 °C.
- Matraz: Tipo Pyrex, aforado, de 500 cm³ de capacidad.
- Fuente de calor: Parrilla eléctrica u otra fuente de calor.
- Mallas del n°4 y de $\frac{3}{8}$ " : Con abertura de 4,75 mm y 9,5 mm, respectivamente, fabricadas con alambre de bronce o de acero inoxidable, tejido en forma de cuadrícula.
- Lienzo: De material absorbente.
- Termómetro: Calibrado, con un rango de 0 a 50 °C y aproximación de 0,2 °C.
- Agitador: De vidrio, de forma cilíndrica.
- Embudo: De vidrio o de plástico.
- Cucharón: De lámina, de 300 cm³ de capacidad.
- Charolas: De lámina galvanizada, con forma rectangular de aproximadamente 70 x 40 x 20 cm.
- Cuentagotas o pipeta: De vidrio o metal.
- Agua destilada.

2.1.5.4. Preparación:

La muestra del material recibida en el laboratorio se tratará y separará previamente en dos fracciones; el material que se retiene en la malla de $\frac{3}{8}$ " (9,5 mm) y el que pasa por la malla N°4 (4,75 mm). Esto se consigue mediante el cribado del material, colocando las fracciones mencionadas en charolas distintas.

2.1.5.4.1. Obtención de Muestras

Material que pasa la malla N°4

1. De la fracción de material que pasa por la malla N°4, se toman aproximadamente 100 gr, sin haber secado el material.

2. Aplicando presión en forma manual se disgregan los grumos hasta obtener un material homogéneo, teniendo el cuidado necesario para no romper las partículas durante esta operación.
3. Se procede a secar la muestra en el horno a 110 ± 5 °C hasta masa constante, que representa la masa seca del material y se registra como PS, en gr.

Material que se retiene en la malla de $\frac{3}{8}$ "

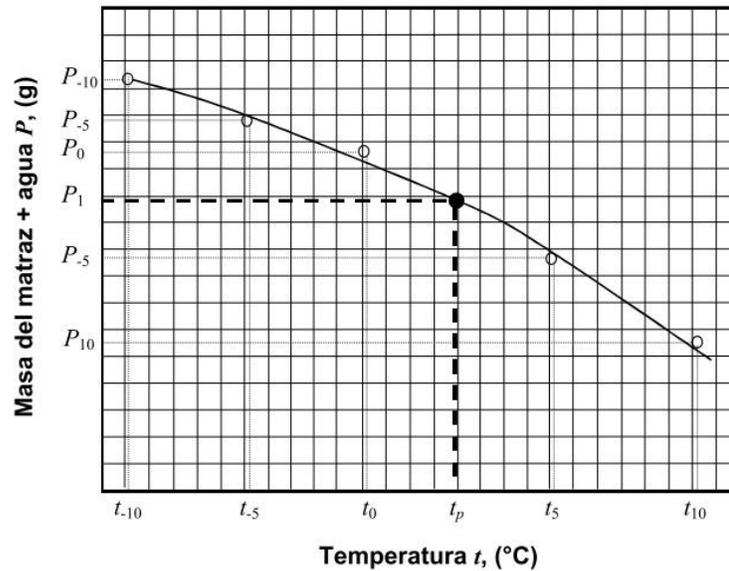
1. De la fracción de material que se retiene en la malla de $\frac{3}{8}$ " se toma una cantidad tal que permita obtener una muestra de aproximadamente 500 gr.
2. Se colocan los 500 gr de material en una charola con agua, donde se somete a saturación por un período de 24 hr.
3. Después del período de saturación, se retira el material del agua y se seca superficialmente con un lienzo, procurando eliminar únicamente el agua adherida en la superficie sin remover mediante presión el agua absorbida. Esta operación se realiza lo más rápido posible a fin de evitar cualquier pérdida de agua por evaporación.

2.1.5.4.2. Calibración:

Previamente al inicio de la prueba, se verificará que el equipo a emplear para el material que pasa la malla N°4 se encuentre calibrado, considerando lo siguiente:

1. Con agua destilada, que se encuentre a la temperatura ambiente, se llena el matraz hasta aproximadamente 0,5 cm abajo de la marca de aforo, dejándola reposar durante unos minutos.
2. Se verifica que la temperatura del agua dentro del matraz sea uniforme, para lo cual se toman lecturas con el termómetro a diferentes profundidades. Si la temperatura no es uniforme y la diferencia es menor de 0,2 °C, se agita suavemente el agua con el termómetro, pero si la diferencia de temperaturas es mayor de 0,2 °C, se tapa el matraz con la palma de la mano y se voltea lentamente procurando evitar la formación de burbujas; finalmente se mide la temperatura del agua colocando el bulbo del termómetro en el centro del matraz y se registra dicha temperatura como t_0 , en °C.

3. Utilizando el cuentagotas o pipeta, se agrega agua destilada hasta que la parte inferior del menisco del líquido coincida con la marca de aforo.
4. Posteriormente, sin tocar o alterar dicho menisco se seca cuidadosamente el interior del cuello del matraz con el lienzo absorbente enrollado y se determina la masa del matraz lleno de agua, registrándola como P0, en gr.
5. Siguiendo las indicaciones de los pasos 2, 3 y 4 de esta sección, se efectúan otras cuatro determinaciones de la masa P del matraz lleno de agua, pero a las temperaturas de 5 y 10 °C por abajo y 5 y 10 °C por arriba, aproximadamente, de la temperatura inicial del agua (t_0), registrando las masas como P-5, P-10, P5 y P10 y las temperaturas como t-5, t-10, t5 y t10, respectivamente.
6. Finalmente, sobre un sistema de ejes coordenados, se dibuja una curva de calibración para el matraz de prueba, marcando las temperaturas en las abscisas y las masas en las ordenadas, y se traza una curva suave y continua como se ilustra en la FIGURA 2.1.5-2.

FIGURA 2.1.5-2: Curva de calibración del matraz¹⁶

2.1.5.5. Procedimiento:

Densidad del material que pasa la malla N° 4

1. Utilizando el embudo, se introduce la muestra que pasó la malla N°4 en el matraz previamente tarado y calibrado.
2. Posteriormente se llena el matraz con agua destilada hasta aproximadamente la mitad de su capacidad.
3. Utilizando la parrilla eléctrica o fuente de calor, se pone en ebullición el agua del matraz, moviendo al mismo tiempo el material con el agitador mientras hierve, hasta expulsar el aire atrapado.
4. Se deja enfriar el matraz hasta alcanzar la temperatura ambiente y se adiciona el volumen de agua destilada necesario para alcanzar la marca de aforo.
5. Se seca superficialmente el matraz y se determina su masa en la balanza, registrándola como P2, en gr.

¹⁶ *Ibidem*, p. 4

6. Se tapa el matraz y se invierte varias veces en forma cuidadosa con el fin de uniformar la temperatura de la suspensión, a continuación se coloca el bulbo del termómetro en el centro del matraz y se registra la temperatura, misma que es considerada como la temperatura de la prueba t_p .
7. Finalmente, utilizando la curva de calibración mostrada en la FIGURA 2.1.5-2, se obtiene la masa del matraz con el agua, en g, correspondiente a la temperatura de prueba t_p y se registra como P1.

Densidad del material que se retiene en la malla de $\frac{3}{8}$ "

1. Se coloca el picnómetro sobre una superficie horizontal libre de vibraciones y se llena con agua destilada hasta el nivel de derrame. Junto a él, en su extremo de desalojo se coloca una probeta graduada vacía.
2. El material saturado y superficialmente seco se sumerge en el picnómetro y se recolecta en la probeta graduada el agua desalojada. Al concluir la inmersión del material, se mide sobre la escala de la probeta graduada el volumen correspondiente y se registra como V_t , en cm^3 .
3. Se extrae el material del picnómetro y se coloca en una charola para secarlo en el horno a una temperatura de 110 ± 5 °C durante 20 hr. Transcurrido este tiempo, el material se saca del horno y se deja enfriar hasta temperatura ambiente.
4. Una vez enfriado, se determina la masa del material seco y se registra como P_i , en gr.

2.1.5.6. Cálculos y Resultados

Se calcula y reporta la densidad relativa del material que pasa la malla N°4, mediante la siguiente expresión:

$$D_{rsf} = \frac{P_s}{P_s + P_1 - P_2}$$

Dónde:

D_{rsf} = Densidad relativa del material que pasa la malla N°4, (adimensional)

P_s = Masa del material que pasa la malla N°4 en condición seca, (g)

P1 = Masa del matraz lleno de agua destilada a la temperatura de prueba t_p , determinada gráficamente de la curva de calibración del matraz mostrada en la FIGURA 2.1.5-2, (gr)

P2 = Masa del matraz con el agua destilada y el material que pasa la malla N°4, obtenida con la balanza, (gr)

Se calcula y reporta la densidad relativa del material que se retiene en la malla $\frac{3}{8}$ ", mediante la siguiente expresión:

$$D_{rg} = \frac{P_i}{V_t(D_w)}$$

Dónde:

Drg = Densidad relativa del material retenido en la malla de $\frac{3}{8}$ ", (adimensional)

Pi = Masa del material retenido en la malla de $\frac{3}{8}$ " en condición seca, (gr)

Vt = Volumen del material retenido en la malla de $\frac{3}{8}$ ", (cm³)

Dw = Densidad del agua, que se considera igual a 1 g/cm³

2.1.5.7. Precauciones

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

1. Realizar la prueba en un lugar cerrado, bien ventilado, limpio y libre de corrientes de aire, de cambios de temperatura y de partículas que provoquen la contaminación de las muestras de material.
2. Que todo el equipo esté perfectamente limpio, para que al hacer la prueba los materiales no se mezclen con agentes extraños que alteren el resultado.
3. Verificar que las balanzas se encuentren debidamente calibradas.
4. Cuidar que no quede aire atrapado en el material, debido a una ebullición escasa.
5. Cuidar que al comenzar la prueba, el material pétreo grueso se encuentre en la condición de saturado y superficialmente seco.

6. Verificar que el picnómetro se encuentre debidamente nivelado y lleno hasta el nivel de derrame, y que al depositar el material en su interior no se salpique agua fuera del recipiente. (Normas SCT, M-MMP-4-04-003 2002).

2.1.6. Cubrimiento Con Asfalto Mediante El Método Inglés De Materiales Pétreos Para Mezclas Asfálticas

2.1.6.1. Objetivo:

El objetivo de la prueba es determinar la susceptibilidad al desprendimiento de los asfaltos adheridos a los materiales pétreos por efectos del agua. La prueba consiste en someter a la acción del agua un conjunto de partículas del material pétreo, de tamaños previamente definidos, las cuales se incrustan en una película de material asfáltico y evaluar el cubrimiento con asfalto sobre sus superficies, por comparación entre las superficies cubiertas y la superficie total de la muestra.

2.1.6.2. Equipo y material:

El equipo consiste en el siguiente y estará en condiciones de operación, calibrado, limpio y completo en todas sus partes. Todos los materiales por emplear serán de alta calidad.

- Juego de mallas: Fabricadas con alambre de bronce o de acero inoxidable de diversos calibres, tejidos en forma de cuadrícula, con abertura determinada conforme a lo indicado en la TABLA 2.1.6-1. El tejido es sostenido mediante un bastidor circular metálico, de lámina de bronce o latón, de 206 ± 2 mm de diámetro interior y 68 ± 2 mm de altura, sujetando la malla rígida y firmemente mediante un sistema de engargolado de metales, a una distancia de 50 mm del borde superior del bastidor.

TABLA 2.1.6-1: Juego de mallas¹⁷

Juegos de mallas	
Malla	Abertura mm
1/2"	12.5
3/8"	9.5

- Baño de agua: Con temperatura controlable dentro del rango de 20 a 150 °C y aproximación a 1 °C.
- Termómetro: Calibrado, con un rango de 0 a 150 °C y aproximación de 1,0 °C.
- Balanza: Con capacidad de 200 gr. y aproximación de 0,01 gr.
- Charolas:
 - De lámina galvanizada o metal inoxidable, de 130 mm de diámetro interior y 15 mm de altura.
 - De lámina galvanizada con forma rectangular de 70 x 40 x 10 cm.
- Vaso de aluminio: De 1 L de capacidad.
- Espátula de acero, rígida, de 2,5 cm de ancho y 10 cm de longitud.
- Máquina agitadora de mallas: De acción mecánica, activada por motor eléctrico o manivela de velocidad constante, mediante el cual se transmite un movimiento excéntrico a un plato soporte, sobre el que se sujetan las mallas en orden descendente.
- Cucharón de acero galvanizado: De 20 cm de largo, 11 cm de ancho y 10 cm de altura, formando un paralelepípedo rectangular con sólo cuatro caras, cuya cara menor lleva acoplado un mango metálico de sección circular de 13 cm de largo.
- Parrilla eléctrica u otra fuente de calor: De 130 mm de diámetro o mayor.
- Cápsula de cristal: Con diámetro de 145 mm y 358 ml de capacidad.

¹⁷ Normas SCT, *Cubrimiento con asfalto mediante el método inglés de materiales pétreos para mezclas asfálticas (M-MMP-4-04-010)*. México D.F., Instituto Mexicano del Transporte, 2003, p 2.

- Material asfáltico: Muestra de 250 gr de material asfáltico, del tipo y con las características indicadas en el proyecto.

2.1.6.3. Preparación:

2.1.6.3.1. De los materiales pétreos:

La preparación de la muestra de los materiales pétreos, se hace de la siguiente manera:

1. Si la muestra del material, recibida en el laboratorio con su contenido de agua natural y tal como llegó del campo está saturada, debe dejarse escurrir hasta contenido de agua constante o la condición de saturado y superficialmente seco.
2. Logrado lo anterior se aplican cuarteos sucesivos hasta obtener una masa aproximada de 1 kg; en el proceso no se permitirá el ajuste de la masa ni la inclusión o exclusión de partículas, para obtener la masa más próxima a la determinada.
3. Posteriormente se obtiene por cribado, ya sea de forma manual o con el equipo mecánico, el material pétreo que pasa por la malla $\frac{1}{2}$ " (12,5 mm) y que se retiene en la $\frac{3}{8}$ " (9,5 mm), desechando el resto.
4. Finalmente del material obtenido se toman 6 porciones representativas de la muestra.

2.1.6.3.2. Del material asfáltico

La preparación de la muestra de material asfáltico, se hace preparando en un vaso de aluminio una porción de aproximadamente 200 gr. y sometiéndola a un ligero calentamiento sobre la parrilla eléctrica o alguna otra fuente de calor, para hacerla manejable.

2.1.6.4. Procedimiento:

Esta prueba requiere de verificación, por lo cual se realiza por duplicado, empleando en cada determinación una muestra diferente.

1. Inmediatamente antes de la prueba se calienta el baño de agua a una temperatura que represente la condición de aplicación del producto asfáltico en la obra, de acuerdo con lo que indique el proyecto o apruebe la Secretaría. Sin embargo, cuando se trate del estudio de aditivos, la temperatura del agua será de 20 °C

2. Se vierten y distribuyen en el fondo de una charola, de 15 a 20 gr. de producto asfáltico para formar una película de 1,5 mm de espesor.
3. Se sumerge la charola con el asfalto dentro del baño, de manera que se obtenga un tirante de agua de aproximadamente 25 mm sobre el nivel de la película de asfalto, conservando estas condiciones hasta que el asfalto adquiera la temperatura del baño.
4. Con las manos se colocan sobre la charola, estando sumergida, las partículas de material pétreo, presionando ligera y uniformemente al apoyarlas sobre la película de asfalto, después de lo cual se dejan reposar durante un periodo de 10 min.
5. Se retira la charola del baño de agua, se extraen del asfalto las partículas de material pétreo separándolas con la espátula y con la mano, para ser colocadas sobre una cápsula de cristal de manera tal que la superficie que estuvo en contacto con el asfalto quede visible.
6. Finalmente se reporta el área cubierta por asfalto sobre las partículas, que se encuentran contenidas dentro de la cápsula.

2.1.6.5. Cálculos y resultados

Se reporta como resultado de la prueba, en por ciento, el promedio del área cubierta con material asfáltico en las partículas de la muestra. Se calcula mediante evaluación visual como la superficie del material pétreo cubierta con asfalto, con relación a la superficie total de la partícula que haya estado embebida en la película de asfalto.

2.1.6.6. Precauciones

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

1. Que la prueba se realice en un lugar cerrado, bien ventilado, limpio y libre de corrientes de aire, de cambios de temperatura y de partículas que provoquen la contaminación de la muestra de material.
2. Que todo el equipo esté perfectamente limpio, para que al hacer la prueba los materiales no se mezclen con agentes extraños que alteren el resultado.
3. Que la temperatura del baño de agua sea la de aplicación del producto asfáltico en la obra, misma que será indicada en el proyecto o aprobada por la Secretaría.

4. Que la charola esté limpia y nivelada, conteniendo la cantidad de asfalto determinada en el procedimiento de prueba.
5. Que las partículas sean colocadas de manera correcta.
6. Que el tiempo de reposo del material sea el indicado para el periodo de prueba.
(Normas SCT, M-MMP-4-04-010 2003)

2.1.7. Partículas Alargadas Y Lajeadas De Materiales Pétreos Para Mezclas Asfálticas

2.1.7.1. Objetivo:

Esta prueba permite determinar el contenido de partículas de formas alargada y lajeada presentes en los materiales pétreos empleados en mezclas asfálticas. La prueba consiste en separar el retenido en la malla N°4 de una muestra de materiales pétreos, para determinar la forma de cada partícula, empleando calibradores de espesor y de longitud.

2.1.7.2. Equipo y material:

El equipo consiste en el siguiente:

- Juego de mallas: Fabricadas con alambre de bronce o de acero inoxidable de diversos calibres, tejidos en forma de cuadrícula, con abertura determinada conforme a lo indicado en la TABLA 2.1.7-1. El tejido estará sostenido mediante un bastidor circular metálico, de lámina de bronce o latón, de 206 ± 2 mm de diámetro interior y 68 ± 2 mm de altura, sujetando la malla rígida y firmemente mediante un sistema de engargolado de metales, a una distancia de 50 mm del borde superior del bastidor.
- Balanza: Con capacidad de 20 kg y aproximación de 1,0 g.
- Máquina agitadora para las mallas: De acción mecánica, activada por un motor eléctrico o manivela de velocidad constante, mediante el cual se transmita un movimiento excéntrico controlado a un plato de soporte, sobre el que se sujeten las mallas en orden descendente.

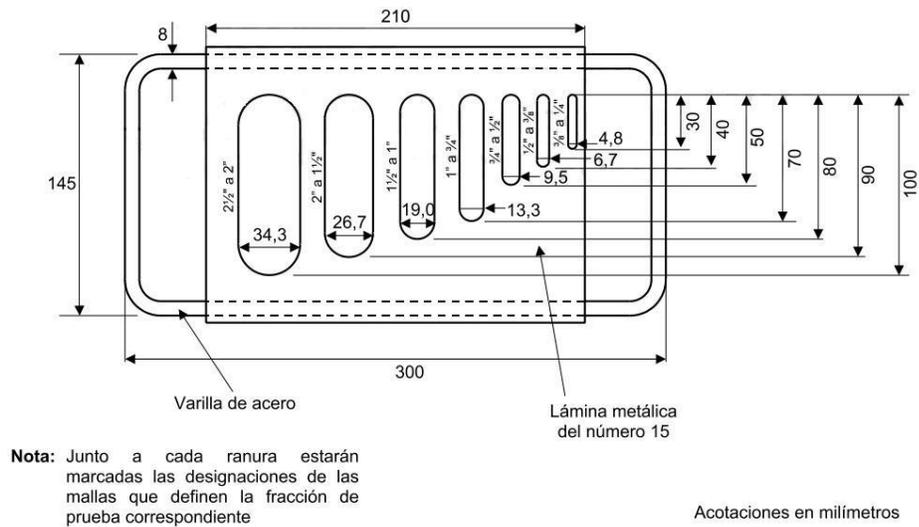
TABLA 2.1.7-1: Juego de mallas¹⁸

Juego de mallas	
Malla	Abertura mm
2"	50
1 1/2"	37.5
1"	25
3/4"	19
1/2"	12.5
3/8"	9.5
1/4"	6.3
N°4	4.75

- Calibrador de espesores: Con la forma y dimensiones que se muestran en la FIGURA 2.1.7-1.
- Calibrador de longitudes: Con la forma y dimensiones que se muestran en la FIGURA 2.1.7-2.
- Cucharón: De acero galvanizado de 20 cm de largo, 11 cm de ancho y 10 cm de altura, formando un cajón rectangular con cuatro caras, cuya cara menor tenga un mango metálico de sección circular de 13 cm de largo.
- Charolas: De lámina galvanizada, con forma rectangular de aproximadamente 40 x 70 x 20 cm.

¹⁸ Normas SCT, *Partículas alargadas y lajeadas de materiales pétreos para mezclas asfálticas (M-MMP-4-04-005)*. México D.F., Instituto Mexicano del Transporte, 2008, p 2.

FIGURA 2.1.7-1: Calibrador de espesores¹⁹



2.1.7.3. Preparación:

Preparación de la muestra:

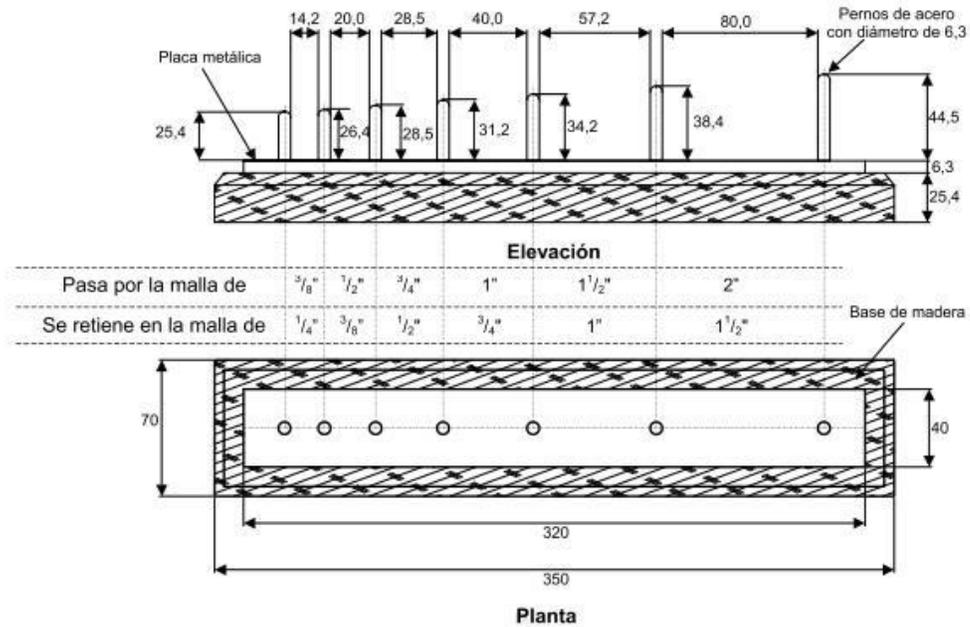
Selección del material para la prueba:

1. Si la muestra del material envasado que se recibe en laboratorio está saturada, se extiende sobre una superficie limpia para dejar que se escurra hasta contenido de agua constante o en condición de saturado y superficialmente seco, para posteriormente disgregar de forma manual aquel material que presente grumos, teniendo la precaución de no fragmentarlo por la presión aplicada. Hecho lo anterior, se cuartea el material hasta obtener una muestra de 25 kg aproximadamente, como se describe en los siguientes Incisos.
2. Una vez que el material está disgregado, saturado y superficialmente seco, se apila hasta formar un cono.

¹⁹ *Idem.*

- Desde el eje del cono y hacia la periferia se extiende el material hasta formar un cono truncado de 15 a 20 cm de altura.

FIGURA 2.1.7-2: Calibrador de longitudes²⁰



Nota: En cada claro estarán marcadas las designaciones de las mallas que definen la fracción de prueba correspondiente

Acotaciones en milímetros

- Se divide el cono truncado en cuatro partes iguales, de las cuales se toman dos cuartos opuestos para formar una muestra de aproximadamente 25 kg; en caso de exceder esta masa, se procede a reducir la cantidad de material mediante cuarteos sucesivos.

²⁰ *Ibidem*, p. 3

5. Una vez separados los 25 kg se criba la muestra a través de la malla N°4 (4,75 mm) ya sea con equipo mecánico o de forma manual, colocando en una charola el material retenido y eliminando el material que pase por la malla.

Obtención de las muestras para la prueba:

Esta prueba se realiza por duplicado, por lo cual se requieren dos muestras. Para la obtención de cada una de éstas se aplicarán cuarteos sucesivos. No se permitirá el ajuste de la masa ni la inclusión o exclusión de tamaños para obtener la masa más próxima a la determinada, considerando lo siguiente:

1. Se selecciona una porción del material retenido en la malla N°4 que contenga más de 200 piezas, la cual se somete a un proceso de cribado, considerando el arreglo de mallas indicado en la TABLA 2.1.7-1.
2. Se registra el número de partículas retenido en cada malla verificando que al final el total de partículas retenidas por todas las mallas sea de 200 piezas como mínimo. Si el número de piezas es menor, se repetirá el procedimiento indicado en el Inciso anterior, aumentando el tamaño de la muestra hasta obtener el número de piezas mencionado.
3. La masa total de cada una de las dos muestras obtenidas, se designará como M1 y M2 respectivamente, en g.

2.1.7.4. Procedimiento:

Para las partículas de forma alargada:

1. Para cada porción clasificada de cada una de las dos muestras de prueba, es decir, del número de partículas retenido en cada malla, se verifica que cada pieza pase por la ranura correspondiente del calibrador de longitudes, buscando la posición tal que su dimensión mayor sea paralela al eje del calibrador.
2. Se reúnen todas las partículas que hayan pasado por las ranuras del calibrador de longitudes y se determina su masa, designándola como ma, en g.

Para las partículas con forma de laja (Aplanada)

1. Para cada porción clasificada de cada una de las dos muestras de prueba, es decir, del número de partículas retenido en cada malla, se verifica que cada pieza

pase por la ranura correspondiente del calibrador de espesores, buscando la posición más adecuada.

2. Se reúnen todas las partículas que hayan pasado por las ranuras del calibrador de espesores y se determina su masa, designándola como m_e , en g.

2.1.7.5. Cálculo y resultados:

1. Se calcula el porcentaje de las partículas con forma alargada, con relación a la masa de la muestra de prueba utilizada, empleando la siguiente expresión:

$$C_a = \left(\frac{m_a}{M} \right) \times 100$$

Dónde:

C_a = Por ciento en masa de partículas con forma alargada, (%)

m_a = Masa de las partículas con forma alargada, determinada en cada una de las muestras de prueba, según corresponda, (g)

M = Masa total de la muestra para cada una de las muestras de prueba, es decir, M_1 o M_2 , según corresponda, (g)

2. Se calcula el porcentaje de las partículas con forma de laja, con relación a la masa de la muestra de prueba utilizada, empleando la siguiente expresión:

$$C_p = \left(\frac{m_e}{M} \right) \times 100$$

Dónde:

C_p = Por ciento en masa de partículas con forma de laja, (%)

m_e = Masa de las partículas con forma de laja, determinada en cada una de las muestras de prueba, según corresponda, (g)

M = Masa total de la muestra para cada una de las muestras de prueba, es decir, M_1 o M_2 , según corresponda, (g)

3. En caso de que se presente una variación entre los cálculos del contenido de partículas con forma alargada (Ca) igual al 20% o mayor entre una muestra y otra, se considerará para el cálculo del resultado de la prueba el promedio de ambas; en caso contrario se considerará el valor que resulte mayor; lo mismo se hará para el contenido de partículas en forma de laja (Cp).
4. Se reportan los contenidos de partículas alargadas (Ca) y lajeadas (Cp), considerando lo indicado en la Fracción anterior. Asimismo se reporta como resultado de la prueba, el por ciento en masa de partículas alargadas y lajeadas, como la suma de Ca más CP.

2.1.7.6. Precauciones:

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

1. Realizar la prueba en un lugar cerrado, con ventilación indirecta, limpio y libre de corrientes de aire que puedan provocar la contaminación de la muestra de prueba con otras partículas.
2. Verificar que la muestra esté perfectamente seca al momento de efectuar su cribado.
3. Que todo el equipo esté perfectamente limpio y funcional. Especialmente las mallas estarán limpias y sin indicios de falla, es decir, que los hilos presenten aberturas uniformes y no estén dañados ni rotos.
4. Verificar que la balanza esté limpia en todas sus partes, bien calibrada y colocada en una superficie horizontal, sin vibraciones que alteren las lecturas. (Normas SCT, M-MMP-4-04-005 2008)

2.2. PRUEBAS DE PROYECTO Y ESPECIFICACIONES

2.2.1. Diseño De Mezclas Asfálticas

2.2.1.1. Introducción.

La más común de las pruebas de proyecto es la Prueba Marshall para diseñar una mezcla asfáltica.

Con esta prueba se pretende encontrar el contenido óptimo de asfalto para una combinación determinada de materiales pétreos tanto gruesos como finos.

Una mezcla pobre en asfalto provocará que los agregados se separen con la acción del tránsito, creando baches; por otro lado una mezcla con demasiado asfalto volverá inestable a la carpeta, lo que ocasiona que con el peso de los vehículos surjan deformaciones en la superficie de rodamiento.

Para el diseño Marshall se consideran 4 variables. El contenido de asfalto para el peso volumétrico máximo, la estabilidad (resistencia), el flujo y la relación de vacíos.

2.2.1.2. Normas:

Los siguientes rangos son los valores admisibles por la norma, sin embargo, pudiera darse el caso de que el proyecto indique valores diferentes a estos, en dicho caso los valores que indique el proyecto son los que se tomarán para la construcción de la carpeta asfáltica.

TABLA 2.2.1-1: Requisitos de calidad para mezclas asfálticas de granulometría densa, diseñadas mediante el método Marshall²¹

Características	Número de ejes equivalentes de diseño ΣL ²²	
	$\Sigma L \leq 10^6$	$10^6 < \Sigma L \leq 10^7$ ²³
Compactación; número de golpes en cada cara de la probeta	50	75
Estabilidad; N (lbf), mínimo	5 340 (1 200)	8 000 (1 800)
Flujo; mm (10^{-2} in)	2 - 4 (8 - 16)	2 - 3,5 (8 - 14)
Vacios en la mezcla asfáltica (VMC); %	3 - 5	3 - 5
Vacios ocupados por el asfalto (VFA); %	65 - 78	65 - 75

2.2.1.3. Equipo:

El equipo y materiales que se utilizarán para esta prueba serán:

- Moldes metálicos para compactación (6), con diámetro interior de 101.6 mm y 87.3 mm de altura.
- Extensión o collarín y una placa de base.
- Pedestal de compactación.
- Sujetador metálico para los moldes de compactación.
- Pisón de compactación con superficie circular apisonado de 98.4 mm de diámetro.
- Máquina para prueba Marshall con capacidad de 3,000 kg. accionada con motor eléctrico.
- Extensómetro para medir la deformación vertical o flujo del espécimen.
- Dispositivo para extraer los especímenes del molde.
- Mezclador mecánico, con tazones de 2 lt de capacidad como mínimo y agitadores de espátula.
- Baño de agua o tanque de saturación con control termostático que mantenga una temperatura entre 20-80 grados centígrados.
- Horno con temperatura controlable de hasta 200 °C.

²¹ Normas SCT, Calidad de mezclas asfálticas para carreteras (N-CMT-4-05-003). México D.F., Instituto Mexicano del Transporte, 2008, p 6.

²² ΣL = Número de ejes equivalentes de 8,2 t (ESAL), esperado durante la vida útil del pavimento.

²³ Para tránsitos mayores de 10^7 ejes equivalentes de 8,2 t, se requiere un diseño especial de la mezcla.

- Parrilla eléctrica con temperatura controlable de hasta 150 °C con capacidad para calentar las muestras de agregados.
- Balanza de 2 kg. de capacidad y con aproximación a 0.1 gr.
- Balanza de 20 kg. de capacidad y con aproximación a 1 gr.
- Termómetro con rango de temperaturas de 10 a 200° C.
- Termómetro para el baño de agua que registre temperaturas de 20 a 70° C.
- Vernier, con aproximación de 0.1 mm.
- Equipo de uso general como charolas rectangulares, charolas redondas, cucharas de albañil, cucharones, espátulas, pinzas para vasos, guantes de hule y guantes de asbesto.
- Estearato de zinc, parafina, crayones.
- Papel filtro de forma circular con diámetro ligeramente menor que el molde de compactación.

2.2.1.4. Procedimiento²⁴:

1. Previamente a la preparación de las mezclas se determina el peso específico relativo aparente por inmersión en cemento asfáltico, del material pétreo seleccionado, así como, del cemento asfáltico.
2. La preparación de las mezclas de prueba para fines de diseño, se lleva a cabo con la cantidad necesaria de material pétreo para que el espécimen tenga una altura aproximada de 63.5 mm; 1,100 gr. de material pétreo generalmente pueden resultar adecuados. Las proporciones de cemento asfáltico que se deben utilizar para elaborar estas mezclas se definen con base al contenido óptimo aproximado.
3. Las mezclas se preparan por triplicado cada una para elaborar el espécimen, con los siguientes contenidos de cemento asfáltico:
 - Contenido óptimo aproximado, -1.0%
 - Contenido óptimo aproximado, -0.5%
 - Contenido óptimo aproximado, +0.5%
 - Contenido óptimo aproximado, +1.0%
 - Contenido óptimo aproximado, +1.5%
 - Contenido óptimo aproximado, +2.0%

²⁴ Polanco Rodríguez, Abraham, *Manual de prácticas de Laboratorio de Pavimentos*, Chihuahua, UACH, Facultad de Ingeniería, pp 23-27.

4. Al terminar la operación de mezclado se tendrá en la mezcla la temperatura de compactación, pudiendo, para lograrlo aplicar calor mediante el mezclado, y además, en el caso de rebajados, se tendrá una relación solvente de cemento asfáltico (K) de 0.08 para rebajados de fraguado rápido y de 0.12 para rebajados de fraguado medio. Cuando se trate de mezclas elaboradas con emulsiones, se mezclarán lo suficiente para homogenizarlas, verificando frecuentemente el peso de la mezcla, a fin de lograr que por decantación y evaporación sucesiva se elimine el 80%, aproximadamente, del agua y solventes que originalmente tenía la emulsión agregada. La humedad que conserve la mezcla será cercana a la óptima de compactación y se precisará elaborando la respectiva curva peso volumétrico de la mezcla – humedad.
5. Se limpian la placa de compactación del pisón y los moldes de compactación y junto con el collarín, la espátula y placa de base respectivos, se calientan a 90° C utilizando para ello un recipiente con agua calentada a dicha temperatura.
6. Se prepara una de las mezclas de prueba de uno de los contenidos de asfalto seleccionados y estando a la temperatura de compactación indicada, se saca del baño o recipiente con agua a 90° C, un molde con su collarín y base, se secan rápidamente y se arma sobre una mesa, poniendo en el fondo una de las hojas de papel filtro circular. Se vacía dentro del molde la mezcla asfáltica elaborada y se acomoda con la espátula, previamente calentada, introduciéndola 15 veces en la parte cercana al contacto de la mezcla con el molde, y 10 veces en la porción central de la misma, para acomodarla sin que se clasifique. Por último, se acomoda la parte superior del espécimen procurando dejarle la superficie ligeramente ablandada, sobre la cual se coloca otra de las hojas de papel filtro circular.
7. A continuación se coloca el molde con su base y collarín montados, conteniendo la mezcla de prueba sobre el pedestal de compactación y se ajusta el dispositivo de este que sostiene el molde; se aplican con la pesa deslizante del pisón de compactación 50 golpes, o bien, 75 golpes, dependiendo de lo que especifique el proyecto para el tipo de tránsito considerado. La altura de caída de la pesa será de 457 mm., debiendo mantenerse el eje del pisón en posición normal a la base del molde.

8. Una vez aplicando el número de golpes de compactación establecido se libera el molde de la sujeción y se remueve el collarín, se invierte el molde conteniendo el espécimen y se ajusta sobre la placa de base, se vuelven a colocar el collarín y el dispositivo que sostiene el molde y enseguida se aplica la otra cara del espécimen el mismo número de golpes que en la cara primeramente mencionada.
9. Se determina con el calibrador la altura del espécimen dentro del molde, y se anota esta en milímetros en la columna de la hoja del registro, si dicha altura no es de 63 ± 3 mm., la cantidad de mezcla empleada en la elaboración del siguiente espécimen deberá corregirse aplicando la siguiente fórmula:

$$P'_e = \frac{63P_e}{H_e}$$

Dónde:

P'_e = Peso corregido de la mezcla para elaborar uno de los nuevos especímenes, en gramos.

P_e = Peso del espécimen elaborado, en gramos.

H_e = Altura del espécimen elaborado, en milímetros

10. Se separan del molde que contiene el espécimen, la placa de base y su collarín y se deja enfriar dicho espécimen en el molde el tiempo necesario para que al ser sustraído no sufra deformaciones para lo cual se introduce en caso necesario, durante una hora, en un baño de aire o ambiente con aire acondicionado a 25° C; a continuación, utilizando el extractor de especímenes, se saca cuidadosamente el espécimen del molde y se le coloca sobre una superficie plana y horizontal en donde permanecerá en reposo a la temperatura ambiente, antes de ser probadas, durante 24 horas aproximadamente contadas a partir de su elaboración.
11. Se moldean sucesivamente cada uno de los especímenes restantes del contenido de asfalto con que se inició la prueba siguiendo los pasos descritos y después, en la misma forma, los demás especímenes de cada uno de los contenidos de asfalto considerados en el estudio.

12. Transcurrido el periodo de enfriamiento se determina el peso volumétrico de cada uno de los especímenes de prueba, utilizando el método de la parafina. Los datos obtenidos se anotan en la hoja de registro.
13. A continuación se sumergen todos los especímenes en el baño de agua, a una temperatura de $60 \pm 1^\circ \text{C}$ durante un lapso 30 a 42 minutos, excepto en el caso de mezclas elaboradas con asfaltos rebajados o emulsiones, en que los especímenes antes de ser probados se colocan en un ambiente con aire a una temperatura de $25 \pm 1^\circ \text{C}$ permaneciendo en estas condiciones durante dos horas. La determinación de la estabilidad y flujo se iniciará a los treinta minutos de inmersión, para lo cual se va extrayendo sucesivamente los especímenes del baño, debiendo sacar y probar el último a los cuarenta y dos minutos de haber sido introducido en el baño.
14. Se lubrican las guías de los cabezales de prueba, se limpian sus superficies interiores y se mantienen estos a una temperatura de $35 \pm 3^\circ \text{C}$, en el caso de mezclas con cemento asfáltico y de $25 \pm 3^\circ \text{C}$, en el caso de mezclas con rebajados o emulsiones. Se verifica que el extensómetro del anillo de carga instalado en la máquina de compresión marque cero cuando no se esté aplicando carga.
15. Se saca un espécimen del baño de agua o del acondicionador de ambiente y se le elimina la humedad superficial que presente, se coloca sobre el cabezal inferior y se centra en el mismo; se monta y coloca sobre el espécimen el cabezal superior y en esta forma se lleva el conjunto a la máquina de compresión, en donde se coloca y se centra. Se instala sobre la varilla guía el extensómetro para medir el flujo, se ajusta a cero su carátula y durante la aplicación de la carga se sujeta por el casquillo, oprimiéndolo contra el cabezal.
16. Se aplica carga al espécimen a una velocidad de deformación constante, de 50.8 mm por minuto, hasta que se presenta la carga máxima o sea la necesaria para producir la falla del espécimen a la temperatura de prueba; dicha carga es el valor de estabilidad Marshall y se anotara en kilogramos en la columna de la hoja de registro. Como antes se indicó, mientras la carga se está aplicando se sostiene firmemente el extensómetro medidor de flujo sobre la varilla guía y al presentarse la carga máxima se toma la lectura correspondiente y se registra con aproximación de 0.1 mm. La deformación del espécimen en milímetros es el valor del flujo, el

cual se anota en la columna de la hoja de registro. Todo el procedimiento para efectuar las pruebas de estabilidad y flujo del espécimen deberá completarse en un periodo de 30 segundos contados a partir del momento en que el espécimen se retire del baño.

17. Se determina sucesivamente la estabilidad y flujo de cada uno de los especímenes restantes del contenido de asfalto con que se inició la prueba, después de los cuales, aplicando este mismo procedimiento, se determinan los valores correspondientes a los especímenes de cada uno de los demás contenidos de asfalto considerados en el estudio.
18. Se verifica en forma sucesiva en cada espécimen del estudio el porcentaje de asfalto que realmente contiene, de no requerirse mucha precisión, se restará 0.3% a cada uno de los contenidos de asfalto considerados al elaborar las mezclas, para corregir dichos contenidos por pérdidas durante el mezclado. Los contenidos de cemento asfáltico así corregidos se anotan en la hoja de registro.
19. Se calculan todas las columnas de la hoja de registro, de donde se dibujarán las gráficas que se indican a continuación:
 - Contenido de asfalto - Peso volumétrico
 - Contenido de asfalto - % de vacíos de la mezcla
 - Contenido de asfalto - % de vacíos del material pétreo
 - Contenido de asfalto - Estabilidad
 - Contenido de asfalto - Flujo
20. De cada gráfica se define cual es el contenido de asfalto que mejor satisface los requisitos de proyecto para cada una de las características que se graficaron y se promedian dichos contenidos.

2.2.2. Desprendimiento Por Fricción En Materiales Pétreos Para Mezclas Asfálticas

2.2.2.1. Objetivo de la prueba

El objetivo de la prueba es determinar la pérdida de la película asfáltica en los materiales pétreos. La prueba consiste en someter a la acción del agua y a varios ciclos de agitado dentro de un frasco de vidrio, varias muestra de mezcla asfáltica de granulometría definida, evaluando su estado físico una vez sometidas a este tratamiento.

2.2.2.2. Equipo y materiales

El equipo para la ejecución de la prueba estará en condiciones de operación, calibrado, limpio y completo en todas sus partes. Todos los materiales por emplear serán de alta calidad.

- Frascos de vidrio: De 500 cm³ de capacidad, de boca ancha con tapa hermética, de aproximadamente 6,5 cm de diámetro y 16 cm de altura.
- Balanza: Con capacidad de 1 000 g y aproximación de 0,1 g.
- Juego de mallas: Fabricadas con alambre de bronce o de acero inoxidable de diversos calibres, tejidos en forma de cuadrícula, con abertura determinada conforme a lo indicado en la TABLA 2.2.2-1. El tejido es sostenido mediante un bastidor circular metálico, de lámina de bronce o latón, de 206 ± 2 mm de diámetro interior y 68 ± 2 mm de altura, sujetando la malla rígida y firmemente mediante un sistema de engargolado de metales, a una distancia de 50 mm del borde superior del bastidor.
- Agitador mecánico: Para realizar el agitado de las mezclas de prueba, consistente en una barra giratoria que se apoya sobre dos soportes de baleros y que es accionada por un motor eléctrico provisto de un reductor de velocidad que le permite girar a razón de 45 a 50 revoluciones por minuto. A cada lado de la barra y de forma perpendicular a ésta se sujetan los frascos de vidrio de dos en dos.

TABLA 2.2.2-1: Juego de mallas²⁵

Juego de mallas	
Malla	Abertura mm
1/2"	12.5
1/4"	6.3
N°10	2
N°40	0.425

- Horno: Con capacidad mayor a 20 dm³, ventilado, con termostato para mantener una temperatura de 110 °C, y con variación de ± 5 °C.
- Termómetro: Calibrado, con un rango de 0 a 150 °C y aproximación de 1°C.
- Vasos cilíndricos de aluminio: De 2 lt de capacidad.
- Parrilla eléctrica u otra fuente de calor: Con la capacidad suficiente para alcanzar y mantener temperaturas ligeramente mayores que la temperatura de aplicación del material asfáltico indicada en el proyecto o aprobada por la Secretaría.
- Cuchara de albañil: De acero galvanizado, de 20 cm de largo y 11 cm de ancho, con mango metálico de sección circular de 13 cm de largo.
- Cucharón de acero galvanizado: De 20 cm de largo, 11 cm de ancho y 10 cm de altura, formando un paralelepípedo rectangular con sólo cuatro caras, cuya cara menor lleva acoplado un mango metálico de sección circular de 13 cm de largo.
- Charolas de lámina galvanizada: Con forma rectangular de 70 x 40 x 10 cm.
- Cemento asfáltico: En cantidad suficiente para cubrir los requisitos, del tipo y con las características indicadas en el proyecto o aprobadas por la Secretaría.
- Agua: Pura o destilada.

²⁵ Normas SCT, Desprendimiento por Fricción de Materiales Pétreos para Mezclas Asfálticas (M-MMP-4-04-009). México D.F., Instituto Mexicano del Transporte, 2003, p 2.

2.2.2.3. Preparación de la muestra

2.2.2.3.1. Del material pétreo

La preparación de la muestra de materiales pétreos, se hace de la siguiente manera:

1. Si la muestra del material, recibida en el laboratorio con su contenido de agua tal como llegó del campo, está saturada, dejarla escurrir hasta la condición de saturada y superficialmente seca.
2. Logrado lo anterior, aplicar cuarteos sucesivos hasta obtener una masa aproximada de 50.kg; sin incluir o excluir tamaños para obtener la masa.
3. Mediante el método descrito en este manual y considerando el arreglo de mallas indicado en la TABLA 2.2.2-1, determinar la granulometría del material.
4. Del material clasificado, tomar diferentes cantidades correspondientes a la proporción de la granulometría de proyecto o aprobada por la Secretaría, y dependiendo del tipo de carpeta asfáltica donde se emplearán los agregados. Dichas fracciones de cada uno de los tamaños requeridos revolverlas hasta homogeneizarlas y de ahí formar 6 porciones con una masa de 500 g cada una, aproximadamente.
5. Calentar los materiales pétreos en una charola sobre la parrilla eléctrica o alguna otra fuente de calor; si la mezcla va a elaborarse en planta (mezclas asfálticas en caliente), se calentarla a una temperatura de 135 ± 5 °C; si se trata de mezcla elaborada en el lugar o tratamientos superficiales, calentar el material pétreo a la temperatura que tendrá en la obra.

2.2.2.3.2. Del material asfáltico

La preparación de la muestra de material asfáltico, se hace de la siguiente manera:

Para mezclas asfálticas en caliente, calentar el material en un vaso de aluminio sobre la parrilla eléctrica o alguna otra fuente de calor, a la temperatura de aplicación indicada en el proyecto o aprobada por la Secretaría.

Para mezclas asfálticas en frío y tratamiento superficial, calentar ligeramente el material en un vaso de aluminio sobre la parrilla eléctrica o alguna otra fuente de calor para hacerlo manejable, conforme a las condiciones de uso esperadas durante los trabajos de campo indicadas en el proyecto o aprobadas por la Secretaría.

Una vez que el material se ha calentado, vaciar parte del material asfáltico en otro vaso de aluminio, previamente tarado y pesarlo hasta obtener la masa necesaria conforme a lo indicado en la TABLA 2.2.2-2.

TABLA 2.2.2-2: Contenido de producto asfáltico por porción de material pétreo²⁶

Espécimen	Contenido residuo de asfalto
1 y 2	Contenido optimo más 0.5% de la masa de material pétreo
3 y 4	Contenido optimo
5 y 6	Contenido optimo menos 0.5% de la masa de material pétreo

2.2.2.4. Procedimiento de prueba

El procedimiento de prueba de desprendimiento por fricción requiere de verificación, para lo cual se toma como testigo un material que haya probado una buena afinidad con el asfalto. Este material se reserva de alguna prueba anterior donde el operador haya determinado que no se presentará pérdida de la película de asfalto; de esta manera se comparan los resultados entre el material testigo y el material por probar.

El procedimiento de prueba es el siguiente:

1. Con los materiales calentados a la temperatura indicada, agregar paulatinamente el producto asfáltico a cada una de las 6 porciones de agregado pétreo, dentro de la charola que las contienen. La cantidad de producto asfáltico que corresponde a cada porción es la indicada en la TABLA 2.2.2-2.

²⁶ *Ibidem* p.4.

2. A fin de alcanzar una distribución uniforme, manipular la mezcla con la cuchara de albañil, considerando, además, que para evitar la pérdida de temperatura durante este proceso, la mezcla se coloca por breves lapsos sobre una parrilla eléctrica o alguna otra fuente de calor, sin exceder la temperatura de aplicación indicada en el proyecto o aprobada por la Secretaría para el producto asfáltico.
3. Finalizada la homogeneización, de cada porción tomar 2 fracciones para prueba, de aproximadamente 50 g cada una.
4. Posteriormente, dejar enfriar cada una de las fracciones y orear a temperatura ambiente.
5. Colocar las fracciones de prueba en frascos de vidrio y agregar a cada una, 200 cm³ de agua pura o destilada a 25 °C; posteriormente tapar y dejar reposar durante 24 h.
6. Si transcurrido dicho tiempo no ocurre un desprendimiento apreciable de la película de asfalto en algunos de los frascos, instalarlos en el agitador mecánico descrito en la sección 2.2.2.2 Equipo y materiales, visto anteriormente y se someterlos a 4 periodos consecutivos de agitación de 15 minutos cada uno o, cuando no se disponga del agitador mecánico, agitar su contenido vigorosamente con movimientos alternados de un lado a otro, en un espacio de 50 cm, a razón de 60 ciclos por minuto, durante 3 períodos de 5.min cada uno. Para valuar la superficie que ha tenido desprendimiento de la película de asfalto, sostener el frasco en alto por arriba del nivel de la cabeza del observador y realizar la inspección visual.

2.2.2.5. Cálculos y resultados

1. Se reporta como resultado de la prueba, en por ciento para cada uno de los frascos, el desprendimiento por fricción de la película de asfalto, estimando mediante evaluación visual la superficie en la que se ha desprendido el asfalto, con relación a la superficie total del agregado.
2. Posteriormente se reporta, en por ciento, el promedio del desprendimiento por fricción de la película de asfalto (excluyendo los resultados del material testigo), que representa el desprendimiento por fricción representativo de toda la muestra y que se calcula utilizando la siguiente expresión:

$$P_{FR} = \frac{\sum P_{fr}}{N}$$

Dónde:

P_{FR} = Pérdida por fricción promedio, (%)

P_{fr} = Pérdida por fricción de cada una de las muestras consideradas, obtenidas como se muestra en la Fracción anterior, (%)

N = Número de muestras consideradas, contenidas en los frascos

3. Además, para fines de clasificación, se reporta el comportamiento del agregado pétreo en cuanto a su adherencia con el material asfáltico; para esto, se compara el desempeño de la muestra testigo contra el de la muestra que se está probando, de acuerdo con el siguiente criterio:
4. Si no hay desprendimiento o el que exista se asemeja al del testigo y no excede el 10 % después del último ciclo de agitación, el material se clasifica como de adherencia normal.
5. Si se presenta desprendimiento desde la etapa de reposo de 24 h o el desprendimiento después del último ciclo de agitación sobrepasa un 25%, se considera el material como de baja adherencia, la cual será necesario mejorar mediante algún procedimiento que determine el proyecto o apruebe la Secretaría.
6. Para una condición intermedia de desprendimiento entre el 10% y el 25%, el material se considera de regular adherencia, que también será necesario mejorar mediante algún procedimiento que indique el proyecto o apruebe la Secretaría.
7. Como dato adicional se puede reportar la granulometría del material de prueba.

2.2.2.6. Precauciones

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

1. Que la prueba se realice en un lugar cerrado, bien ventilado, limpio y libre de corrientes de aire, de cambios de temperatura y de partículas que provoquen la contaminación de la muestra de material.
2. Que todo el equipo esté perfectamente limpio, para que al realizar la prueba los materiales no se mezclen con agentes extraños que alteren el resultado.

3. Que la balanza esté limpia en todas sus partes, bien calibrada y colocada en una superficie horizontal, sin vibraciones que alteren las lecturas.
4. Que las mallas estén limpias y sin indicios de deterioro, es decir, que los hilos presenten aberturas uniformes y no estén doblados ni rotos.
5. Que las muestras se preparen con la proporción de producto asfáltico indicada.
6. Que el agua no contenga soluciones o agentes extraños que alteren el resultado de la prueba.
7. Que el tiempo de saturación dentro de los frascos sea el indicado para la prueba.
(Normas SCT, M-MMP-4-04-009 2003)

2.2.3. Intemperismo Acelerado

2.2.3.1. Objetivo:

El objetivo de esta prueba es determinar la susceptibilidad de los materiales pétreos que se emplean en la fabricación de mezclas asfálticas a los agentes del intemperismo, como es la lluvia, las heladas, cambios de temperatura, etc.

La prueba consiste en someter una muestra de grava a varios ciclos de saturación y secado empleando una solución saturada de sulfato de sodio o magnesio, y medir la diferencia entre la masa antes y después del procedimiento.

2.2.3.2. Definición:

Esta prueba permite estimar la alteración que pueden sufrir los materiales pétreos al estar expuestos a la acción del intemperismo.

2.2.3.3. Equipo y material:

El equipo para la ejecución de la prueba estará en condiciones de operación, calibrado, limpio y completo en todas sus partes. Todos los materiales por emplear serán de alta calidad, considerando siempre la fecha de su caducidad.

- Juego de mallas: Fabricadas con alambre de bronce o de acero inoxidable de diversos calibres, tejidos en forma de cuadrícula, con abertura determinada conforme a lo indicado en la TABLA 2.2.3-1. El tejido es sostenido mediante un bastidor circular metálico, de lámina de bronce o latón, de 206 ± 2 mm de diámetro interior y 68 ± 2 mm de altura, sujetando la malla rígida y firmemente mediante un sistema de engargolado de metales, a una distancia de 50 mm del borde superior del bastidor.

TABLA 2.2.3-1: Juego de mallas²⁷

Juego de mallas	
Malla	Abertura mm
2"	50
1 1/2"	37.5
1"	25
3/4"	19
1/2"	12.5
3/8"	9.5
1/4"	6.3
N°4	4.75

- Horno: Con capacidad mayor a 20 dm³, ventilado y con termostato para mantener una temperatura de 110 °C, con variación ± 5 °C.
- Balanza: Con capacidad de 5 000 g y aproximación de 1,0 g.
- Charolas de peltre: Con capacidad de 0.5 lt.

²⁷ Normas SCT, *Intemperismo acelerado de materiales pétreos para mezclas asfálticas* (M-MMP-4-04-008). México D.F., Instituto Mexicano del Transporte, 2003, p 2.

- Agitador de varilla metálica: De 6,2 mm (1/4") de diámetro y 20 cm de longitud.
- Recipiente cilíndrico de peltre: De 10 lt.
- Cucharón de acero galvanizado: De 20 cm de largo, 11 cm de ancho y 10 cm de altura, formando un paralelepípedo rectangular con sólo cuatro caras, cuya cara menor lleva acoplado un mango metálico de sección circular de 13 cm de largo.
- Charolas de lámina galvanizada: Con forma rectangular de 70 x 40 x 10 cm.
- Termómetro: Calibrado, con un rango de 0 a 150 °C y aproximación de 1 °C.
- Máquina agitadora para mallas (Ro-Tap): De acción mecánica, activada por un motor eléctrico o manivela de velocidad constante, mediante el cual se transmite un movimiento excéntrico a un plato soporte, sobre el que se sujetan las mallas en orden de tamaño descendente.
- Tanque con recirculación de agua: De acero inoxidable con control de termostato, capaz de mantener una temperatura constante de hasta 30 °C, con dimensiones aproximadas de 500 x 500 x 110 mm.
- Reactivos: Para efectuar esta prueba se requieren los siguientes reactivos químicos:
 - Solución de sulfato de sodio:
 - Anhidro (Na_2SO_4)
 - Con agua de cristalización ($\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10 \text{H}_2\text{O}$)
 - Solución de sulfato de magnesio ($\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) (Sal de Epsom)

2.2.3.4. Preparación de la muestra

1. De la muestra del material recibida en el laboratorio se toma una porción de 40 kg por cuarteos sucesivos; esta porción debe tratarse y separarse previamente en, agregados finos y arena, y agregados gruesos (grava, fragmentos de roca), de acuerdo con el procedimiento siguiente:
2. Si el material está saturado, dejarse escurrir hasta contenido de agua constante o hasta la condición de saturado y superficialmente seco.
3. Cribar el material de la muestra utilizando la malla N° 4 (4,75 mm) ya sea con equipo mecánico o de forma manual, colocando el material que pasa en una charola de lámina y el retenido en la otra, hasta concluir su separación.

4. Mediante alguno de los métodos descritos en la sección 2.1.1 Granulometría y considerando el arreglo de mallas indicado en la TABLA 2.2.3-1. de esta sección, determinar la granulometría del material, eliminando el que pasa la malla N° 4.
5. Posteriormente separar las mallas y lavar los materiales de cada tamaño, mediante chorro de agua, con el fin de eliminar el polvo y las partículas adheridas.
6. Finalmente, cada tamaño de la muestra colocarlo en una charola de lámina y secarlo en el horno a una temperatura de 110 ± 5 °C, hasta masa constante.
7. Con el material separado y clasificado, y de acuerdo con las cantidades indicadas en la TABLA 2.2.3-2, integrar las muestras de prueba M_i , correspondientes a cada tamaño t , ya que el material clasificado será ensayado individualmente. Para obtener la masa de cada una de las muestras, aplicar cuarteos sucesivos sin incluir o excluir tamaños.
8. Si en la muestra original el material retenido en las mallas 3/4" (19 mm) y 1/2" (12,5 mm) es menor del 5% del total de la fracción gruesa (material mayor a la malla N° 4), no aplicar la prueba a dicho material, considerando que la pérdida por intemperismo de esta fracción será el promedio de los valores obtenidos en el tamaño inmediato anterior y posterior. Igual tratamiento darle al material que se retiene en las mallas 1 1/2" (37,5 mm) y 1" (25 mm) cuando éste sea inferior al 5%.

TABLA 2.2.3-2: Tamaño del material²⁸

Tamaño del material (t)		Masa de muestra M_i gr
De: (Pasa la malla)	A: (Se retiene en la malla)	
2" (50 mm)	1 1/2" (37,5 mm)	1 500
1 1/2" (37,5 mm)	1" (25 mm)	1 500
1" (25 mm)	3/4" (19 mm)	1 000
3/4" (19 mm)	1/2" (12,5 mm)	500
1/2" (12,5 mm)	N° 4 (4,76 mm)	300

²⁸ *Ibidem*, p.4.

2.2.3.5. Preparación de la solución para la prueba

Con alguno de los reactivos (sales), preparar dentro del recipiente cilíndrico de peltre la solución de prueba, para lo cual se diluye en agua de tal forma que la concentración llegue a la saturación y además presente un excedente de cristales. Dependiendo del reactivo empleado, las cantidades a utilizar serán las mostradas en la TABLA 2.2.3-3.

TABLA 2.2.3-3: Cantidad de reactivo empleado para preparar la solución de prueba²⁹

Reactivo		Cantidad gr/lt
Solución de Sulfato de sodio	De anhidro (Na_2SO_4)	350
	Con agua de cristalización ($\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10 \text{H}_2\text{O}$)	750
Solución de sulfato de magnesio ($\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) (Sal de <i>Epsom</i>)		1 400

Preparar la solución a una temperatura de 25 °C y mantenerla a una temperatura de 21 °C por lo menos durante 48 h antes de emplearla; esto se logra manteniendo la solución en el tanque de recirculación de agua, el cual se gradúa a la temperatura deseada. Agitar la solución con el agitador de varilla antes de usarla.

2.2.3.6. Procedimiento

1. Colocar cada muestra en una charola de peltre que contenga la solución de prueba, de manera que queden totalmente cubiertas. Mantener esta condición por un período de 16 a 18 h a una temperatura de 21 °C, conservando dicha temperatura mediante el empleo del tanque de recirculación de agua.

²⁹ *Idem.*

2. Finalizado este período, escurrir las muestras y secarlas en el horno a una temperatura de 110 ± 5 °C, hasta masa constante. Repetir este proceso de inmersión y secado hasta completar cinco ciclos.
3. Al terminar el último ciclo, lavar las muestras hasta eliminar todo el sulfato de sodio o de magnesio y secar nuevamente en el horno a una temperatura de 110 ± 5 °C, hasta masa constante.
4. Una vez enfriadas a temperatura ambiente, cribar cada muestra con la malla de menor tamaño del intervalo considerado, es decir para el intervalo de tamaños de 50 mm (2") a 37,5 mm (1 1/2") emplear la malla 1 1/2" (37,5 mm) y así sucesivamente, según los intervalos citados en la TABLA 2.2.3-1, registrando como M_f la masa del material retenido en dichas mallas y desechando el material que pasa.

2.2.3.7. Cálculos y resultados

Se reporta como resultado de la prueba, en por ciento y con aproximación a un décimo, la pérdida por intemperismo, determinada de acuerdo al siguiente procedimiento:

La pérdida por intemperismo de cada tamaño ensayado, se calcula utilizando la siguiente

$$P_t = \left(\frac{M_i - M_f}{M_i} \right) \times 100$$

Dónde:

P_t = Pérdida por intemperismo para el tamaño t , (%)

M_i = Masa inicial de la muestra de prueba para cada tamaño, que se obtiene de la TABLA 2.2.3-2, (gr)

M_f = Masa del material al finalizar los ciclos de intemperismo para cada tamaño, (gr)

T = Variable que denota el rango del tamaño de las partículas de la muestra, de acuerdo con lo citado en la TABLA 2.2.3-2, (adimensional)

La pérdida por intemperismo representativa de todo el material, se calcula utilizando la expresión:

$$P_{INT} = \left(\frac{\sum (P_t - M_i)}{\sum M_i} \right) \times 100$$

Dónde:

PINT = Pérdida por intemperismo representativa de todo el material, (%)

Pt, Mi y t tienen el significado antes mencionado.

2.2.3.8. Precauciones

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

1. Que la prueba se realice en un lugar cerrado, bien ventilado, limpio y libre de corrientes de aire, de cambios de temperatura y de partículas que provoquen la contaminación de la muestra de material.
2. Que todo el equipo está perfectamente limpio, para que al realizar la prueba, los materiales no se mezclen con agentes extraños que alteren el resultado.
3. Que la balanza está limpia en todas sus partes, bien calibrada y colocada en una superficie horizontal, sin vibraciones que alteren las lecturas.
4. Que las mallas están limpias y sin indicios de deterioro, es decir, que los hilos presenten aberturas uniformes y no están doblados ni rotos.
5. Que la prueba se realice bajo las condiciones de temperatura especificadas para la solución de prueba y las muestras. (Normas SCT, M-MMP-4-04-008 2003)

2.2.4. Pérdida De Estabilidad Por Inmersión En Agua De Mezclas Asfálticas

2.2.4.1. Objetivo de la prueba

El objetivo de la prueba es determinar la reducción en la estabilidad que se produce en una mezcla asfáltica por inmersión en agua. La prueba consiste en ensayar mediante compresión simple varios especímenes de prueba, unos en condiciones normales y otros después de su inmersión en agua, fabricados con materiales pétreos de granulometría

previamente definida y medir la diferencia de resistencias entre especímenes en ambas condiciones.

2.2.4.2. Equipo y materiales

El equipo para la ejecución de la prueba estará en condiciones de operación, calibrado, limpio y completo en todas sus partes. Todos los materiales por emplear serán de alta calidad.

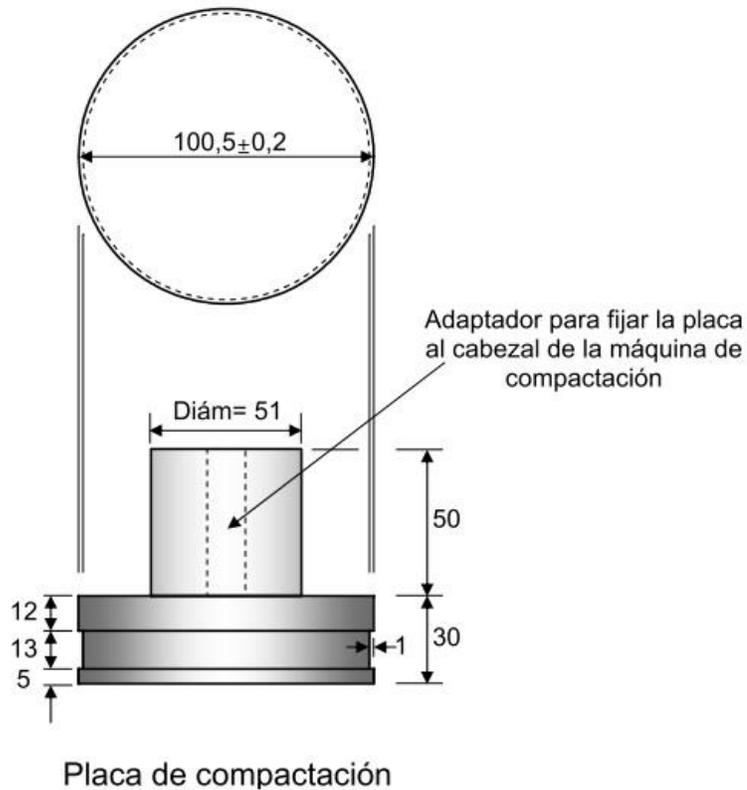
- Máquinas de compresión
 - Con capacidad mínima de 150 kN (15 Ton aprox.) y aproximación de 1 kN (100 kg aprox.), con cabezal para fijar la placa de compactación.
 - Con capacidad mínima de 50 kN (5 Ton aprox.) y aproximación de 0,1 kN (10 kg aprox.), capaz de mantener una velocidad de deformación de 1 cm/min, aproximadamente.
- Juego de mallas: Fabricadas con alambre de bronce o de acero inoxidable de diversos calibres, tejidos en forma de cuadrícula, con abertura determinada conforme a lo indicado en la TABLA 2.2.4-1. El tejido es sostenido mediante un bastidor circular metálico, de lámina de bronce o latón, de 206 ± 2 mm de diámetro interior y 68 ± 2 mm de altura, sujetando la malla rígida y firmemente mediante un sistema de engargolado de metales, a una distancia de 50 mm del borde superior del bastidor.
- Moldes de acero estructural (6): De $101,6 \pm 0,2$ mm de diámetro interior, 200 mm de altura y 6,4 mm de espesor.
- Placa de base: Para el molde, de acero estructural, con diámetro de $100,5 \pm 0,2$ mm y 50 mm de altura, sujeta a una base del mismo material, de 152 mm por lado y 9,5 mm de espesor.
- Placa de compactación: De acero estructural, con diámetro de $100,5 \pm 0,2$ mm y espesor mínimo de 30 mm, provista de un adaptador para acoplarla al cabezal de aplicación de carga.
- Termómetro: Calibrado, con un rango de 0 a 150 °C y aproximación de 1,0 °C.
- Vasos de aluminio: De 1 L de capacidad.

TABLA 2.2.4-1: Juego de mallas³⁰

Juego de mallas	
Malla	Abertura mm
2"	50
1 1/2"	37.5
1"	25
3/4"	19
5/8"	16
1/2"	12.5
3/8"	9.5
1/4"	6.3
N°4	4.75
N°10	2
N°20	0.85
N°40	0.425
N°60	0.25
N°100	0.15
N°200	0.075

- Balanzas: Una con capacidad de 10 kg y aproximación de 1,0 g y otra con capacidad de 300 g y aproximación de 0,01 gr.
- Varilla metálica: De 1,9 cm (3/4") de diámetro y 30 cm de longitud, con punta de bala.
- Cuchara de albañil: De acero galvanizado, de 20 cm de largo y 11 cm de ancho, con mango metálico de sección circular de 13 cm de largo.

³⁰ Normas SCT, *Pérdida de Estabilidad por Inmersión en Agua de Mezclas Asfálticas (M-MMP-4-05-042)*. México D.F., Instituto Mexicano del Transporte, 2003, p 2.

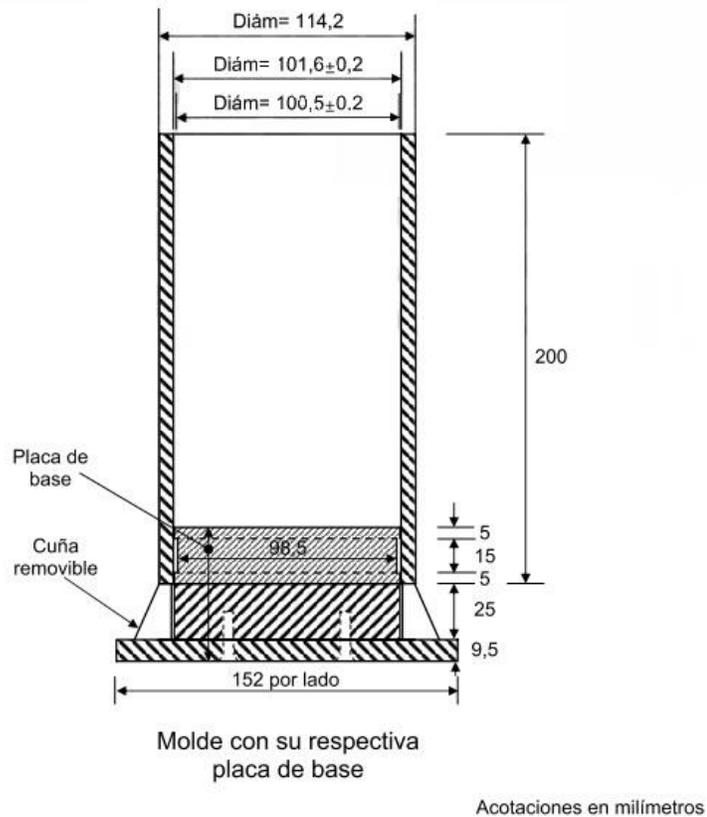
FIGURA 2.2.4-1: Compactador de Muestras (Vista Lateral)³¹

- Charolas: De lámina galvanizada con forma rectangular de 70 x 40 x 10 cm.
- Cucharón de acero galvanizado: De 20 cm de largo, 11 cm de ancho y 10 cm de altura, formando un paralelepípedo rectangular con sólo cuatro caras, cuya cara menor lleva acoplado un mango metálico de sección circular de 13 cm de largo.
- Tanque de inmersión: De acero inoxidable, con dimensiones aproximadas de 50 cm de alto, 50 cm de ancho y 110 cm de largo o bien una charola donde de

³¹ *Ibidem*, p. 3.

manera individual se puedan sumergir los especímenes de prueba y permanecer cubiertos con agua durante todo el tiempo estipulado.

FIGURA 2.2.4-2: Compactador de Muestras (Corte)³²



- Parrilla eléctrica u otra fuente de calor: De 30 cm de diámetro o mayor.
- Material asfáltico: En cantidad suficiente, del tipo y las características indicadas en el proyecto o aprobadas por la Secretaría.

³² *Idem.*

- Materiales pétreos: Muestra de 30 kg, si el tamaño máximo de la muestra es mayor de 9,5.mm (3/8”) o de 15 kg, si es menor.

2.2.4.3. Preparación

2.2.4.3.1. De materiales pétreos:

La preparación de la muestra de materiales pétreos, se hace de la siguiente manera:

1. Si la muestra del material, recibida en el laboratorio con su contenido de agua natural y tal como llegó del campo está saturada, se dejará escurrir hasta contenido de agua constante o la condición de saturado y superficialmente seco.
2. Se determina la granulometría del material mediante el método indicado en la sección 2.1.1 Granulometría y considerando el arreglo de mallas que corresponda según sea el caso, de los indicados en las TABLA 2.1.1-1 y TABLA 2.1.1-2 de la sección 2.1.1 Granulometría.
3. Del material clasificado se toman las diferentes fracciones correspondientes a la granulometría de proyecto. Dichas porciones de cada uno de los tamaños requeridos se revuelven hasta homogeneizarlas y de ahí formar 6 porciones, las cuales se separan en charolas de lámina.
4. Cada una de las 6 porciones se calienta en la charola que la contiene, colocándola sobre la parrilla eléctrica o alguna otra fuente de calor, hasta alcanzar una temperatura de 100 °C.

2.2.4.3.2. Del material asfáltico:

La preparación de la muestra de material asfáltico, se hace considerando que el material se calienta a la temperatura de aplicación indicada en el proyecto o aprobada por la Secretaría; esto se hace colocando el material asfáltico en un vaso de aluminio sobre la parrilla eléctrica o alguna otra fuente de calor y moviéndolo continuamente con la varilla metálica, para posteriormente separar en diferentes vasos previamente tarados las cantidades solicitadas en la TABLA 2.2.4-2.

Con el propósito de dosificar la masa del material asfáltico indicada en el proyecto, se requiere obtener la masa del vaso de aluminio vacío y posteriormente con el producto, previo a su calentamiento.

TABLA 2.2.4-2: Contenido de residuo asfáltico por muestra³³

Espécimen	Contenido residuo de asfalto
1 y 2	Contenido óptimo
3 y 4	Contenido óptimo más 0.5% de la masa de material pétreo
5 y 6	Contenido óptimo más 1.0% de la masa de material pétreo

2.2.4.3.3. De la mezcla de prueba:

Dependiendo del tipo de mezcla asfáltica por emplear, se define el tamaño máximo del agregado que aquella debe cumplir y con él se determina la masa de la mezcla de prueba de cada espécimen como lo indica la TABLA 2.2.4-3.

TABLA 2.2.4-3: Masa por espécimen³⁴

Tamaño máximo de los agregados	Masa por espécimen
Mayor de 9,5 mm ($\frac{3}{8}$ "	4 kg
Igual a 9,5 mm ($\frac{3}{8}$ " o menor	2 kg

³³ *Ibidem*, p. 5

³⁴ *Idem*.

2.2.4.3.4. Preparación de los especímenes de prueba

1. Con los materiales calentados a la temperatura indicada, se agrega paulatinamente el producto asfáltico a cada una de las 6 porciones de agregado pétreo. La cantidad de producto asfáltico que corresponde a cada muestra, de acuerdo con lo indicado en la TABLA 2.2.4-2.
2. A fin de alcanzar una distribución uniforme, la mezcla se manipula con una cuchara de albañil, considerando además que para evitar la pérdida de temperatura durante este proceso, la mezcla se colocará por breves instantes sobre una parrilla eléctrica o alguna otra fuente de calor, no excediendo la temperatura de aplicación indicada en el proyecto o aprobada por la Secretaría para el producto asfáltico.
3. Cada porción se coloca en 2 capas dentro de un molde precalentado a 50 °C, proporcionando a cada capa un acomodo inicial, mediante 20 penetraciones de la varilla metálica, distribuidas simétricamente.
4. Se compacta la mezcla asfáltica, aplacándole por medio de la máquina de compresión una carga inicial de reacomodo de 2,5 MPa (25.kg/cm²) y se libera la carga.
5. En seguida se aplica carga en forma lenta y uniforme hasta alcanzar, en 5 min, la carga de compactación correspondiente a una presión de 10 MPa (100 kg/cm²), la que se mantiene durante un lapso de 2 min, después de lo cual se libera la carga.
6. Se retira de la máquina de compresión el molde conteniendo el espécimen; se remueve la placa de base y se dejan reposar a la temperatura ambiente hasta que el espécimen adquiera la consistencia necesaria para extraerlo sin que se dañe. Si la mezcla se elabora con emulsión asfáltica, el periodo de reposo será de 3 días, manteniendo los moldes con el espécimen en posición horizontal para facilitar el drenado. Transcurrido el periodo de reposo, se extrae el espécimen del molde.

2.2.4.4. Procedimiento de prueba

1. De los especímenes elaborados se selecciona uno de cada contenido de asfalto y se prueba a compresión simple, aplicando la carga a una velocidad de deformación constante de 1 cm/min, hasta alcanzar su ruptura. Se registran las resistencias, que se designan como R, en kPa.

2. Los especímenes restantes se colocan en el tanque de inmersión donde se mantienen sumergidos en agua durante 4 días.
3. Transcurrido el período de inmersión, los especímenes se sacan del tanque, se prueban a compresión simple y se registran las resistencias a la ruptura, designándolas como R_s , en kPa.

2.2.4.5. Cálculos y resultados

Se reporta como resultado de la prueba, en por ciento y para cada contenido de asfalto, la pérdida de la resistencia entre un espécimen sumergido y su homólogo en condiciones normales, utilizando la siguiente expresión:

$$P_{INM} = \left(\frac{R - R_s}{R} \right) \times 100$$

Dónde:

P_{INM} = Pérdida de estabilidad por inmersión en agua, (%)

R = Resistencia del espécimen en condiciones normales, para un contenido específico de asfalto, (kPa)

R_s = Resistencia del espécimen sumergido, para el mismo contenido de cemento asfáltico, (kPa)

La pérdida de estabilidad por inmersión en agua de la mezcla asfáltica es aquella obtenida con el contenido óptimo de asfalto. El registro de los otros 2 resultados (obtenidos con + 0,5% y + 1,0% del contenido óptimo de residuo asfáltico) permitirá comparaciones y observaciones respecto al posible comportamiento de la mezcla por efecto de alguna variación que se presente en las condiciones de campo.

2.2.4.6. Precauciones

1. Que la prueba se realice en un lugar cerrado, bien ventilado, limpio y libre de corrientes de aire, de cambios de temperatura y de partículas que provoquen la contaminación de las muestras de material.
2. Que todo el equipo esté perfectamente limpio, para que al hacer la prueba los materiales no se mezclen con agentes extraños que alteren el resultado.

3. Que las balanzas estén limpias en todas sus partes, bien calibradas y colocadas en una superficie horizontal, sin vibraciones que alteren las lecturas.
4. Que las mallas estén limpias y sin indicios de falla, es decir, los hilos presenten aberturas uniformes y no estén doblados ni rotos.
5. Que la preparación de las muestras se haga con la proporción de asfalto indicada en el proyecto o aprobada por la Secretaría.
6. Que el agua no contenga soluciones o agentes extraños que alteren el resultado de la prueba.
7. Que el tiempo de saturación dentro del tanque sea el indicado para la prueba.
8. Que la velocidad de aplicación de carga sea uniforme y acorde con lo indicado en este Manual.
9. Que la elaboración de los especímenes se haga según lo indicado en este Manual, con la misma temperatura y energía de compactación. (Normas SCT, M-MMP-4-05-042 2003)

2.2.5. Pruebas A Los Cementos Asfálticos

Para definir sus características al cemento asfáltico se le realizan ciertas pruebas, los resultados de dichas pruebas se comparan con los valores o rangos indicados en las normas correspondientes o en las especificaciones del proyecto.

Dada la complejidad de las pruebas y el costo de los equipos, estas pruebas rara vez se realizan en los laboratorios que se ubican en la obra. Generalmente se realizan en los laboratorios centrales de la empresa constructora o supervisora. O se solicitan los certificados de calidad del fabricante y/o el distribuidor.

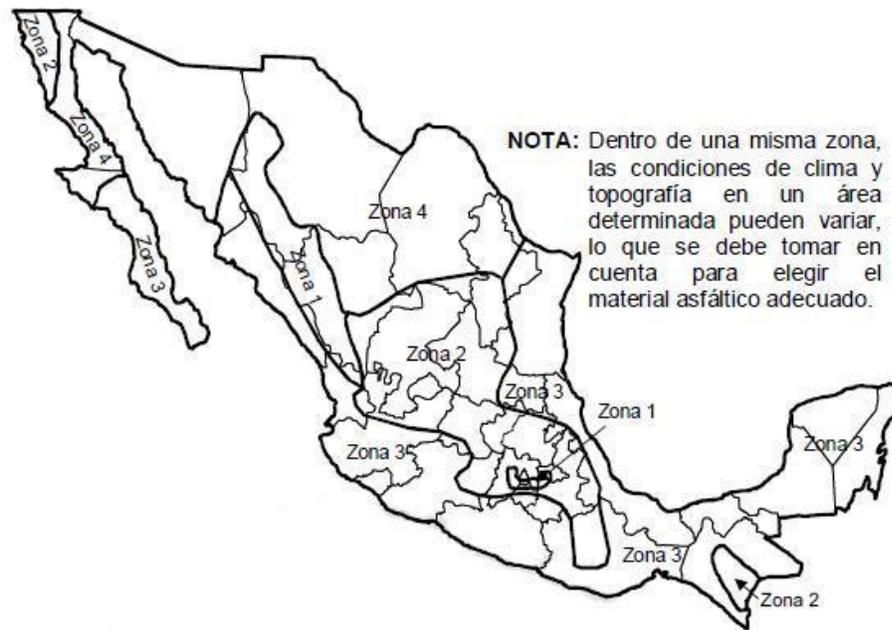
TABLA 2.2.5-1: Tabla de clasificación de cementos asfálticos según su viscosidad dinámica a 60° C³⁵

Clasificación	Viscosidad a 60° C Pa·s (Poises)	Usos más comunes
AC-5	50 ±10 (500±100)	<ul style="list-style-type: none"> • En la elaboración de carpetas de mezcla en caliente dentro de las regiones indicadas como Zona 1 en la FIGURA 2.2.5-1. • En la elaboración de emulsiones asfálticas que se utilicen para riegos de impregnación, de liga y poreo con arena, así como en estabilizaciones.
AC-10	100 ±20 (1000±200)	<ul style="list-style-type: none"> • En la elaboración de carpetas de mezcla en caliente dentro de las regiones indicadas como Zona 2 en la FIGURA 2.2.5-1 • En la elaboración de emulsiones asfálticas que se utilicen en carpetas y morteros de mezcla en frío, así como en carpetas por sistema de riegos, dentro de las regiones indicadas como Zona 1 en la FIGURA 2.2.5-1.
AC-20	200 ±40 (2000±400)	<ul style="list-style-type: none"> • En la elaboración de carpetas de mezcla en caliente dentro de las regiones indicadas como Zona 3 en la FIGURA 2.2.5-1. • En la elaboración de emulsiones asfálticas que se utilicen en carpetas y morteros de mezcla en frío, así como en carpetas por sistema de riegos, dentro de las regiones indicadas como Zona 2 en la FIGURA 2.2.5-1.
AC-30	300 ±60 (3000±600)	<ul style="list-style-type: none"> • En la elaboración de carpetas de mezcla en caliente dentro de las regiones indicadas como Zona 4 en la FIGURA 2.2.5-1 • En la elaboración de emulsiones asfálticas que se utilicen en carpetas y morteros de mezcla en frío, así como en carpetas por sistema de riegos, dentro de las regiones indicadas como Zona 3 y 4 en la FIGURA 2.2.5-1. • En la elaboración de asfaltos rebajados en general, para utilizarse en carpetas de mezcla en frío, así como en riegos de impregnación.

³⁵ Normas SCT, *Calidad de materiales asfálticos* (N-CMT-4-05-001). México D.F., Instituto Mexicano del Transporte, 2006, p 3.

Para fines de construcción de carpetas asfálticas, México está dividido en diferentes regiones; de acuerdo a la región se recomienda un tipo de asfalto, ya sea por las condiciones de temperatura, la humedad o los materiales de la región.

FIGURA 2.2.5-1: Regiones geográficas para la utilización de asfaltos clasificados según su viscosidad dinámica a 60° C³⁶



En general el cemento asfáltico más utilizado en la construcción de carpetas asfálticas en México es el AC-20.

Las pruebas más comunes que se le realizan a los asfaltos son las siguientes:

³⁶ *Ibidem*, p. 4.

2.2.5.1. Destilación de Emulsiones asfálticas

2.2.5.1.1. Objetivo:

Determinar la cantidad de residuo por destilación, el contenido de agua y el contenido de disolventes que existen en las emulsiones asfálticas catiónicas.

2.2.5.1.2. Equipo y material

Para esta prueba se necesitan los siguientes materiales:

- Alambique cilíndrico
- Quemador anular de gas de 127.0 mm. de diámetro interior.
- Unidad de condensación integrada por un adaptador, tubo de conexión con camisa de lámina y refrigerante recto provisto de camisa metálica.
- Probeta de 100 cm³
- Termómetros de inmersión total, con escala hasta de 300 °C.
- Mechero a gas del tipo Bunsen.
- Malla No. 50
- Balanza con capacidad de 3,500 grs. y una aproximación de 0.1 gr.

2.2.5.1.3. Procedimiento:

1. Se pesan 200.0 grs. de emulsión en el alambique cilíndrico, previamente tratado, incluyendo su tapa, abrazadera, termómetros y demás accesorios y se registra el peso total de estos elementos más el de la emulsión como W_i , en grs.
2. Se ajusta perfectamente la tapa del alambique utilizando su tornillo de presión y colocando entre esta y el alambique un empaque de papel impregnado con aceite.
3. Se insertan los termómetros introduciéndolos en los respectivos orificios de la tapa, con su correspondiente tapón de corcho ajustado y sujetándolos de tal manera que el bulbo de uno de ellos quede a 6 mm. del fondo del alambique y el bulbo del otro quede a 165 mm. aproximadamente de dicho fondo.
4. Se monta el equipo, conectando el alambique con el refrigerante y se coloca el quemador de gas anular, de manera que diste 15 cms. del fondo del alambique, se enciende el quemador, se ajusta con flama baja y se registra el tiempo en que se inicia la aplicación de calor; también se aplica suficiente calor con el mechero al tubo de conexión, para evitar la condensación de agua en éste. Por otra parte, se

vigilará que no se registren cambios bruscos de temperatura en el termómetro superior, lo que indicará que la espuma producida alcanzó la parte superior del alambique y para controlarla será necesario disminuir la aplicación de calor.

5. Cuando la temperatura de la muestra pueda ser leída en el termómetro más bajo, lo que ocurre a 215 °C aproximadamente, se baja el quemador anular al nivel del fondo del alambique y se eleva la temperatura a 260 °C, manteniendo esta temperatura por 15 minutos.
6. Inmediatamente después se suspende la aplicación de calor, se registra el tiempo total transcurrido desde su primera aplicación, se desconecta el alambique, se pesa con todos los accesorios, se le agrega a este peso 1.5 grs., para compensar la flotación del alambique caliente y se anota este peso como W_f , en grs. El tiempo total que dure la destilación será de 60 ± 15 minutos. También se leen en la escala de la probeta y se registran, el nivel superior del destilado anotando dicha lectura como V_{dw} , en cm^3 y el nivel superior del agua en la probeta anotando dicha lectura como V_w , en cm^3 . Los niveles mencionados se pueden definir al ocurrir la separación del disolvente y el agua, por diferencia de densidades.

2.2.5.1.4. Cálculos y resultados

En esta prueba se calcula y se reporta lo siguiente:

El residuo de la destilación expresándolo como un porcentaje en peso con respecto al inicial de la muestra, empleando la fórmula siguiente:

$$R = \frac{200 - (W_i - W_f)}{200} \times 100$$

Dónde:

R = Contenido de residuo asfáltico por destilación, en por ciento con respecto a la masa inicial de la muestra de prueba.

W_i = El peso del alambique y sus accesorios más el inicial de la muestra, grs.

W_f = El peso del residuo asfáltico, más el alambique y sus accesorios calientes, más la corrección por temperatura, grs.

El contenido de agua obtenida en la destilación con respecto al volumen total de la muestra de emulsión, utilizando la siguiente fórmula:

$$C_w = \frac{V_w \gamma_o S_e}{200} \times 100$$

Dónde:

C_w = Contenido de agua obtenida en la destilación, en por ciento, con respecto a la masa inicial de la muestra de prueba.

V_w = Volumen del agua obtenida en la destilación, cm^3

S_e = Densidad relativa de la muestra de prueba, adimensional.

γ_o = Densidad del agua, considerada igual a 1 gr/cm^3

El contenido de disolventes en por ciento, respecto al volumen de la muestra de emulsión, aplicando la siguiente fórmula:

$$C_d = \frac{(V_{dw} - V_w) S_e \gamma_o}{200} \times 100$$

Dónde:

C_d = Contenido de disolvente, en por ciento con respecto a la masa inicial de la muestra de prueba.

V_{dw} = Volumen correspondiente al nivel superior del destilado, cm^3 .

V_w = Volumen correspondiente al nivel superior del agua depositada en la probeta, cm^3 .

S_e = Densidad relativa de la muestra de prueba, adimensional.

γ_o = Densidad del agua, considerada igual a 1 gr/cm^3

2.2.5.1.5. Precauciones

Para evitar errores durante la ejecución de la prueba, se deben tener en cuenta las siguientes recomendaciones:

1. Verificar que la tapa del alambique quede perfectamente ajustada.

2. Regular la cantidad de calor para controlar la espuma producida durante la destilación, de manera que no alcance la parte superior del alambique. (Normas SCT, M-MMP-4-05-012 2000)

2.2.5.2. Viscosidad

2.2.5.2.1. Objetivo:

Determinar el grado de fluidez de un asfalto a las temperaturas que se especifican.

2.2.5.2.2. Equipo y material

Para esta prueba se necesitan los siguientes materiales:

- Viscosímetro
- Termómetros (2)
- Estufa o placa de calor
- Producto asfáltico en estudio

2.2.5.2.3. Procedimiento:

1. Se calienta el aceite del viscosímetro a una temperatura de 0.5°C mayor que la temperatura de prueba; debe lograr la temperatura especificada media hora antes del ensaye.
2. Se colocaran en un vaso de 150 grs. aproximadamente el producto asfáltico y se calentará en una parrilla hasta un temperatura de 5°C mayor que la temperatura de prueba, agitando durante el calentamiento hasta que la temperatura sea uniforme.
3. Se vacía el producto en un tubo de viscosímetro hasta el nivel de derrame, se tapa y se mantiene durante 15 minutos hasta alcanzar una temperatura de prueba
4. Se abre el obturador y se empieza a contar el tiempo en segundos que tarda el producto en llenar el matraz de 60 cm³ pasando a través del tubo Furol. Este tiempo expresará la viscosidad del producto a la temperatura de prueba. (Normas SCT, M-MMP-4-05-004 2000)

2.2.5.3. Penetración

2.2.5.3.1. Objetivo:

Esta prueba permite determinar la consistencia de los cementos asfálticos, así como de los residuos por destilación de las emulsiones y asfaltos rebajados, mediante la penetración vertical de una aguja en una muestra de prueba de dichos materiales bajo condiciones establecidas de masa, tiempo y temperatura.

2.2.5.3.2. Equipo

El equipo para la ejecución de la prueba debe estar en condiciones óptimas para su uso, calibrado, limpio, completo en todas sus partes y sin desgaste.

El equipo necesario es el siguiente:

- Aparato de penetración o penetrómetro para asfaltos: Provisto de un dispositivo para medir la profundidad de penetración de la aguja, en décimos de milímetro. También contará con un mecanismo que permita aproximar la aguja a la muestra de prueba y con pesas o lastres de 50 y 100 g.
- Agujas: De acero inoxidable, totalmente endurecidas y perfectamente pulidas, que se acoplen al penetrómetro mediante un casquillo de bronce o de acero inoxidable, sobresaliendo de éste último entre 40 y 45 mm.
- Cápsula de penetración: De metal o de vidrio refractario, de forma cilíndrica y con el fondo plano; con diámetro interior de 55 mm y altura interior de 35 mm, para penetraciones menores de 200×10^{-1} mm; o diámetro interior de 70 mm y altura interior de 45 mm para penetraciones entre 200 y 350×10^{-1} mm.
- Baño de agua: Con temperatura controlable hasta 50°C y aproximación de 0,1°C, con dimensiones y características tales que le permitan una capacidad mínima de 10 lt, estará provisto de un entrepaño con perforaciones, colocado a no menos de 5 cm del fondo del baño y a no menos de 10 cm de la superficie libre del líquido.

- Termómetro: Con rango de 0 a 50°C y aproximación de 1°C.
- Cronómetro: Con aproximación de 0,2 s.
- Recipiente de manejo: De metal, plástico o vidrio, de forma cilíndrica adecuada para manejar y mantener sumergida la cápsula de penetración que contenga la muestra de prueba; de 350 cm³ de capacidad y con relieves en el fondo para evitar que la muestra que contiene se mueva durante el proceso de ensaye.
- Malla N°50: De 300 µm de abertura, cuando se prueben residuos por destilación de emulsiones asfálticas. Espátula de níquel de 20 cm de longitud, cuando se prueben residuos por destilación.

2.2.5.3.3. Preparación de la muestra:

La muestra de prueba, según se trate de cemento asfáltico o del residuo por destilación, se prepara como se indica a continuación:

2.2.5.3.3.1. Muestra de cemento asfáltico:

De la muestra de cemento asfáltico, se toma una porción de volumen ligeramente mayor al de la cápsula de penetración y se calienta en un recipiente apropiado, agitándola en forma continua con el objeto de distribuir la temperatura uniformemente, hasta que adquiera la fluidez suficiente para facilitar su vaciado en dicha cápsula, cuidando que durante su calentamiento no se formen burbujas de aire, que la temperatura alcanzada no exceda de 130°C y que esta operación se realice en un lapso menor de 30 min. Hecho esto, inmediatamente se llena la cápsula con la muestra de prueba, se cubre adecuadamente para protegerla del polvo y se deja enfriar hasta que alcance la temperatura ambiente.

2.2.5.3.3.2. Muestra del residuo por destilación de una emulsión asfáltica

Inmediatamente después de obtener el residuo por destilación de la emulsión asfáltica, se destapa el alambique utilizado en esa prueba, se homogeneiza su contenido con la espátula y se llena la cápsula de penetración vertiendo el residuo a través de la malla N° 50, se cubre adecuadamente para protegerla del polvo y se deja enfriar hasta que alcance la temperatura ambiente.

2.2.5.3.3. Muestra del residuo por destilación de un asfalto rebajado

Inmediatamente después de obtener el residuo por destilación del asfalto rebajado y tan pronto como deje de vaporizar en la cápsula metálica utilizada en esa prueba, se homogeneiza con la espátula y se llena la cápsula de penetración, se cubre adecuadamente para protegerla del polvo y se deja enfriar hasta que alcance la temperatura ambiente.

2.2.5.3.4. Procedimiento de la prueba

La prueba se realiza en la forma siguiente:

1. Se coloca la cápsula de penetración que contiene la muestra de prueba dentro del recipiente de manejo, para introducirlos posteriormente en el baño de agua, cuando éste mantenga una temperatura de 25°C o la que se especifique para la prueba. Se sumerge dicho recipiente completamente y se mantiene así por espacio de 2 hr, con objeto de que el producto asfáltico adquiera esa temperatura.
2. Se coloca el penetrómetro sobre una superficie plana, firme y sensiblemente horizontal, se le acopla la aguja y se lastra para que el elemento que se desplaza tenga una masa de $100 \pm 0,1$ gr o la masa que se especifique para la prueba y finalmente se nivela perfectamente el penetrómetro.
3. Se saca del baño de agua el recipiente de manejo, el cual contiene la muestra de prueba en su cápsula de penetración, cuidando que tenga agua suficiente para cubrir completamente la cápsula. Se colocan el recipiente y la cápsula sobre la base del penetrómetro, de tal manera que la muestra quede bajo la aguja. Se ajusta la altura de la aguja hasta que haga contacto con la superficie de la muestra, lo que se logra haciendo coincidir la punta de la aguja con la de su imagen reflejada en la superficie de la muestra.
4. Se hace coincidir la manecilla del penetrómetro con el cero de su carátula, hecho esto se oprime el sujetador para liberar la aguja únicamente durante 5 s o durante el tiempo que se especifique para la prueba, después de lo cual se toma la lectura registrándola en décimos de milímetro.
5. Se deben hacer por lo menos tres penetraciones sobre puntos diferentes de la superficie de la muestra de prueba, separados entre sí y de la pared de la cápsula de penetración 10 mm. como mínimo. Se limpiará cuidadosamente la aguja después de cada penetración sin desmontarla y, de ser necesario, para ajustar la

temperatura a 25°C o a la especificada para la prueba, se regresará el recipiente de manejo con la muestra al baño de agua. Para la limpieza de la aguja se utilizará un paño humedecido con tricloroetileno, y después un paño seco y limpio.

6. Para materiales asfálticos suaves, con penetraciones mayores de 225×10^{-1} mm, se tienen que emplear por lo menos tres agujas, las que se deben ir dejando introducidas en la muestra de prueba al hacer las penetraciones.

2.2.5.3.5. Cálculos y resultados

Se reporta como resultado de la prueba, el promedio de las profundidades a las que haya entrado la aguja en por lo menos tres penetraciones, expresadas en décimos de milímetro y con aproximación a la unidad, valor conocido también como grado de penetración. Las penetraciones utilizadas para el cálculo del promedio, deben estar dentro de las diferencias permisibles mostradas en la TABLA 2.2.5-2, de lo contrario la prueba se repetirá. En el reporte quedarán asentados la temperatura, la masa y el tiempo de penetración con los que se realice la prueba.

TABLA 2.2.5-2: Diferencias permisibles entre los valores de penetración considerados para el cálculo de resultados³⁷

Valor de la penetración	Diferencias permisibles ³⁸
0 - 49	2
50 - 149	4
150 - 249	6
250 ó más	8

³⁷ Nomras SCT, *Penetración de cementos y residuos asfálticos* (M-MMP-4-05-006). México D.F., Instituto Mexicano del Transporte, 2000, p 5.

³⁸ Unidades en 1×10^{-1} mm. (Grados de penetración)

2.2.5.3.6. Precauciones para evitar errores

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

1. Tener especial cuidado en realizar la prueba bajo las condiciones de temperatura, masa y tiempo de penetración que se especifiquen.
2. Cuidar que no exista aire atrapado en la muestra de prueba.
3. Confirmar que la aguja esté perfectamente limpia en el momento de la penetración.
4. Verificar que la aguja esté en contacto con la superficie de la muestra de prueba al iniciar la penetración.
5. Cuidar que la aguja no toque el fondo del recipiente antes de finalizar el tiempo especificado. (Normas SCT, M-MMP-4-05-006 2000)

2.2.5.4. Punto de Encendido o de Ignición

2.2.5.4.1. Objetivo:

Determinar la temperatura mínima a la cual se producen flamas instantáneas al someter al cemento asfáltico a un calentamiento gradual.

2.2.5.4.2. Definición:

Representa la temperatura crítica arriba de la cual deberá tomarse precauciones para eliminar los peligros de incendio durante el calentamiento y manipulación del mismo.

2.2.5.4.3. Equipo y material

Para esta prueba se necesitan los siguientes materiales:

- Copa abierta de Cleveland
- Termómetro
- Placa de calor
- Producto asfáltico en estudio

- Gas

2.2.5.4.4. Procedimiento:

1. Se llena la copa abierta de Cleveland hasta la marca interior con el producto asfáltico, previamente calentado hasta hacerlo fluido, para poderlo vaciar.
2. Con una llama o con la placa de calor especial para esta prueba, se calentará la parte inferior de la copa en tal forma que la temperatura del asfalto suba en una relación aproximada de 1.5 °C por minuto.
3. Se agita el asfalto con un termómetro a intervalos durante la prueba para uniformar la temperatura.
4. A intervalos de cada grado centígrado se pasará una pequeña flama de aproximadamente 4 mm. de diámetro, de forma horizontal por los bordes de la copa y se observa si se producen unas pequeñas chispas. Se anota la temperatura que marca el termómetro cuando esto ocurra, que será el punto de ignición del producto que se ensaya. (Normas SCT, M-MMP-4-05-007 2000)

2.2.5.5. Punto de Reblandecimiento o de Fusión

2.2.5.5.1. Objetivo:

Determinar la temperatura a la cual fluye un asfalto hasta cierto grado. Esta prueba permite estimar la consistencia de los cementos asfálticos.

2.2.5.5.2. Equipo y material

Para esta prueba se necesitan los siguientes materiales:

- Vaso de precipitado
- Termómetro
- Esferas (2) de 9.5 mm. de diámetro y 3.5 grs. de peso.
- Anillos de latón (2) de 15.88 mm. de diámetro interior y de 6.35 mm. de altura.
- Soporte de los anillos, el cual debe tener una ménsula a 2.54 cms. debajo de los anillos.

- Fuente de calor regulable, la cual puede ser un mechero.
- Placa de apoyo, que puede ser de latón o bronce.
- Gas
- Agua a 5 °C.

2.2.5.5.3. Procedimiento:

1. Sobre una placa de bronce que haya sido previamente amalgamada, se colocan los anillos, en posición invertida y se llenarán con asfalto, el cual haya sido previamente calentado y se dejará enfriar durante una hora.
2. Se quita el exceso de asfalto con una espátula caliente.
3. Se pueden presentar los siguientes casos:
4. Si se trata de asfaltos cuyo punto de fusión es menor de 80 °C, se vaciará en el vaso hasta una altura de 8.25 cm, agua destilada a 5 °C. Se introducen las esferas de 3/8" y los anillos con sus respectivas guías, en el agua dejándola descansar en el fondo del vaso y se suspenderá el termómetro de manera que el bulbo queda a la misma altura que la cara inferior del anillo y a una separación de 6.35 mm. se mantendrá la temperatura del agua a 5 °C durante 15 min. y con unas pinzas adecuadas se tomarán las esferas y se colocaran cuidadosamente en el centro de las guías. Ya colocadas las esfera se elevara la temperatura del agua en una relación de 5 °C por minuto. La temperatura que marque el termómetro en el instante en que el asfalto toque la ménsula, se reportará como Punto de Fusión o de Reblandecimiento del asfalto.
5. Si se trata de asfaltos con punto de fusión mayor de 80 °C se sigue el mismo procedimiento anterior solo que se utilizara glicerina químicamente pura en lugar de agua y la temperatura inicial será de 32 °C. La flama se colocará a la mitad de la distancia comprendida entre el centro del vaso y al pared más distante de los anillos. (Normas SCT, M-MMP-4-05-009 2000)

2.2.5.6. Ductilidad

2.2.5.6.1. Objetivo:

Determinar si el cemento asfáltico o el residuo de la destilación tienen la ductilidad que marcan las especificaciones.

2.2.5.6.2. Equipo y material

Para esta prueba se necesitan los siguientes materiales:

- Ductilómetro
- Briquetas
- Placa de cobre o latón
- Crema para la piel
- Estearato de zinc
- Agua
- Alcohol

2.2.5.6.3. Procedimiento:

1. Se amalgamarán dos piezas laterales removibles del molde de latón para formar la briqueta de prueba y la placa de cobre para evitar que se adhiera el asfalto.
2. Se aplicará una capa crema y encima otra de Estearato de zinc.
3. Se colocará el molde encima de la placa en posición horizontal y se vaciará el asfalto que será previamente fundido a la temperatura más baja posible, hasta alcanzar un nivel ligeramente mayor que el de enrase
4. Se deja enfriar a temperatura ambiente durante 40 min.
5. Se quitarán las piezas laterales y la placa de cobre e inmediatamente después, se sumerge la briqueta en el aparato de prueba, debiendo quedar el nivel de agua a no menos de 2.5 cm de la cara superior de la briqueta.
6. Se pone en marcha el aparato y se mide la distancia a que se ha desalojado la mordaza hasta que se rompa la briqueta. Esta distancia en centímetros expresa la ductilidad del asfalto. (Normas SCT, M-MMP-4-05-011 2000)

2.3. PRUEBAS DE CONTROL DURANTE LA PRODUCCIÓN Y VERIFICACIÓN DE LA CALIDAD DE LAS CARPETAS

2.3.1. Pruebas De Control

A fin de mantener un adecuado control de la calidad de la mezcla asfáltica, por cada 200 m³ de producción de mezcla asfáltica se extrae una muestra de material, para realizarle pruebas de control.

La importancia de estas pruebas radica en detectar problemas en la producción y corregirlos antes de realizar el tendido.

Para este fin, se debe contar con un laboratorio instalado en la obra, y con los equipos adecuados, que permita la toma de muestras directamente en la planta de asfalto.

Las pruebas que se deben realizar a la muestra de mezcla asfáltica son:

- Contenido de asfalto
- Granulometría
- Estabilidad
- Flujo
- Resistencia
- Peso volumétrico

La calidad de la mezcla se controla con muestras que se obtienen diariamente de la planta de asfalto.

Al material extraído se realiza un cuarteo.

- Un cuarto para realizar la prueba de contenido de asfalto, una vez extraído el asfalto se precede a determinar la granulometría de los agregados pétreos.
- Con el resto de la muestra se crean especímenes, iguales a los creados para el diseño Marshall, para comprobar los valores de diseño como la estabilidad, el flujo, la resistencia y el peso volumétrico máximo.

En ocasiones, por especificación del proyecto se paga el cemento asfáltico por separado a la mezcla asfáltica, por lo que la prueba del contenido de asfalto cobra mayor relevancia dado que de su resultado depende el importe que se pagará en la estimación.

Otro factor importante durante la producción de la mezcla asfáltica es la temperatura, debido que demasiado calor calcina el asfalto y muy poco no lo reblandece lo suficiente para que se adhiera al material pétreo.

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. Las temperaturas de mezclado serán determinadas mediante la curva Viscosidad-Temperatura del material asfáltico y, dependiendo del tipo de cemento asfáltico utilizado, pueden ser las indicadas como referencia en la TABLA 2.3.1-1. Para fabricar mezclas asfálticas con asfaltos modificados con polímero se debe solicitar al fabricante el certificado de calidad del cemento asfáltico, así como la tabla de temperatura-viscosidad recomendada.

TABLA 2.3.1-1: Temperaturas de mezclado para mezclas en caliente³⁹

Clasificación del cemento asfáltico	Temperatura de mezclado °C
AC- 5	120 - 145
AC-10	120 - 155
AC-20	130 - 160
AC-30	130 - 165

³⁹ Normas SCT, *op. cit.*, nota 21, p. 12.

Por lo que se debe llevar un registro de la temperatura, tanto a la salida de la planta de asfalto como a la llegada al tramo de tendido. Ya que durante el acarreo se presenta la mayor pérdida de temperatura.

Así mismo, una vez tendida la carpeta asfáltica se debe registrar la temperatura, la cual se conoce como temperatura de compactación y es de vital importancia puesto que una mezcla que ha perdido demasiado calor no se compacta de manera adecuada dejando una textura abierta.

El resultado de una carpeta compactada a baja temperatura es una textura abierta que reduce la resistencia y aumenta la posibilidad de permeabilidad. Poniendo en riesgo la estructura completa del pavimento.

2.3.2. Contenido De Asfalto En Una Mezcla

2.3.2.1. Objetivo:

Determinar el contenido de residuo o cemento asfáltico en las mezclas, expresándolo como porcentaje en peso respecto al del material pétreo seco.

2.3.2.2. Equipo y material

Para esta prueba se necesitan los siguientes materiales:

- Rótarex
- Cuchara chica
- Balanza con capacidad 1 kg., con aproximación a 0.1 gr.
- Parrilla o fuente de calor similar.
- Charolas de lámina.

2.3.2.3. Procedimiento:

1. Se calienta la mezcla para que sea desmenuzable y de esta, se pesan 500 grs. y se vacían en la taza del extractor.

2. Se le vierte un disolvente adecuado, como puede ser el tetracloruro de carbono o gasolina, en la taza, se tapa el extractor en forma segura y se hace girar hasta que el disolvente haya salido por el orificio de descarga.
3. Esta operación de lavado se repite hasta que hayan desaparecido todos los restos de cemento asfáltico, lo cual se nota cuando el disolvente salga de color claro o limpio.
4. Se retira la tapadera y se pone a secar la muestra, ya sea al horno o a la estufa a fuego bajo.
5. Cuando la muestra se ya secado, se pesa junto con el material fino que se haya quedado adherido al papel filtro. En el caso de que el papel filtro siga teniendo aumento de peso sobre el peso original, este aumento se debe a la impregnación del polvo y por lo tanto debe sumársele al peso de la muestra seca y la cantidad total se resta del peso original de la muestra, obteniéndose de esta manera el peso del cemento asfáltico extraído.
6. Dividiendo el peso del cemento asfáltico entre el peso del material pétreo y multiplicándolo por 100, da el porcentaje de cemento asfáltico presente en la mezcla ensayada. La ecuación es la siguiente:

$$\% \text{ de Cemento Asfáltico} = \frac{\text{Peso del Asfalto}}{\text{Peso del Material Pétreo}} \times 100$$

2.3.3. Pruebas De Verificación

Una vez tendida y compactada la carpeta asfáltica se deben realizar las pruebas de verificación, que son las siguientes:

- Extracción de núcleos
- Prueba de permeabilidad

La prueba de extracción de núcleos es sumamente importante. Los núcleos extraídos son medidos para determinar el espesor de la carpeta tendida. Después se les realizarán las pruebas de contenido de asfalto y granulometría para revisar que cumpla con el diseño

Marshall presentado en el proyecto. Estos datos nos sirven como reportes de control de calidad que debemos entregar a la dependencia como parte de la estimación.

Para mantener un registro preciso de los núcleos, se deben rotular inmediatamente después de extraerlos, y anotar en una lista el número de núcleo y el tramo del que se extrajo para poder complementar la información del reporte de calidad.

La prueba de permeabilidad es de las últimas pruebas que se realizan a una carpeta asfáltica, sin embargo, un resultado negativo puede significar que se tenga que reemplazar la carpeta.

Un método para eliminar la permeabilidad de una carpeta asfáltica es el riego de sello, que además de brindar una superficie de desgaste, cubre las oquedades que pudieran llegar a existir. Sin embargo, si no se tiene considerado en el proyecto original puede ser en una afectación muy grande a la utilidad debido a su costo.

2.3.4. Extracción De Núcleos

2.3.4.1. Objetivo:

Extraer muestras de la carpeta asfáltica terminada. Con la finalidad de revisar que las características de la mezcla asfáltica sean las que se estableció en el diseño.

Este proceso genera unos “cilindros” conocidos comúnmente como corazones o núcleos, los cuales se ensayan en el laboratorio para obtener la compactación real, los espesores de tendido, además de las características resultantes del diseño Marshall.

2.3.4.2. Equipo y material:

El equipo consiste en el siguiente:

- Taladro para extracción de muestras de carpeta:
- Generador eléctrico:
- Broca de 4”

- Mezcla asfáltica.
- Charolas
- Bolsas plásticas

2.3.4.3. Preparación:

Debido a que generalmente no existe electricidad disponible en la zona del tendido de una carpeta asfáltica, se utiliza un generador eléctrico a fin de proporcionar la energía necesaria para operar el taladro.

2.3.4.4. Procedimiento:

El número de corazones por extraer se determinará aplicando la siguiente fórmula:

$$C = \frac{L}{50}$$

Dónde:

c = Número de corazones por extraer, aproximado a la unidad superior

L = Longitud del tramo, (m)

La ubicación de la extracción se al azar, aunque generalmente se realiza una extracción cada 50 m. en tres bolillo y a una distancia de entre 60 y 90 cm del hombro al centro de la franja tendida.

Durante la extracción se debe mantener un flujo constante de agua, a fin de mantener mojada la broca para evitar que el calor pueda dañar el núcleo. Al llegar a la profundidad especificada de acuerdo al espesor de la carpeta a analizar, se separa el corazón cortado de la carpeta asfáltica inferior, moviendo cuidadosamente en diferentes direcciones, para despegar la base se pueden emplear espátulas o desarmadores, teniendo la precaución de no dañar o contaminar el núcleo con materias extrañas.

Se rotula cada corazón inmediatamente después de extraerlo, a fin de identificarlo posteriormente. Se identifica y registra el espesor de la carpeta nueva y el cadenamiento del que fue extraído, y se guarda el núcleo en una bolsa plástica con el fin de evitar cualquier contaminación.

Una vez en el laboratorio se realizan las pruebas de control tal como si se tratase de un espécimen fabricado en laboratorio.

A fin de determinar:

- Contenido de asfalto
- Granulometría
- Grado de compactación
- Peso específico
- Resistencia
- Flujo
- Estabilidad
- Relación de vacíos

2.3.5. Prueba De Permeabilidad En Carpetas Asfálticas

2.3.5.1. Objetivo:

Determinar si una carpeta asfáltica cumple con la impermeabilidad requerida, para que no haya infiltraciones de agua que dañen las capas inferiores.

La existencia de poros en el tendido permite el paso del agua, que resulta altamente perjudicial para la carpeta ya que debilita la estructura de la mezcla, además de que puede llegar a dañar las capas inferiores al pavimento.

No existe una norma que regule específicamente el valor de la permeabilidad, sin embargo generalmente se usa el 10% como máximo permisible.

2.3.5.2. Equipo y material

Para esta prueba se necesitan los siguientes materiales:

- Aro de lámina galvanizada del Núm. 16, de 250 mm. de diámetro interior y 50 mm de altura.

- Cono de bronce de 25.4 mm de altura y base de 20 mm de diámetro.
- Probetas graduadas.
- Cronómetro con aproximación de 1 segundo.
- Fuente de calor de flama abierta
- Recipiente para agua
- Sellador constituido por plastilina, parafina o mezcla de parafina y brea en partes iguales.

2.3.5.3. Procedimiento:

1. Se seleccionan en la superficie de la carpeta del subtramo por estudiar, zonas que se aprecien con la textura más abierta, que por su acabado o irregularidades de tendido pueden presentar problemas de permeabilidad; en estas zonas se ubican los lugares de prueba, separándolos entre sí a una distancia del orden de 200 m. y procediendo con ellos en forma sucesiva.
2. Se fija el aro de lámina en posición horizontal sobre la carpeta, en uno de los sitios escogidos para hacer la prueba, procediendo a tapar la parte exterior de la junta entre la carpeta y el aro con el sellador, cuya consistencia se adecuará para aplicarlo en forma de un cordón de dos centímetros de diámetro, aproximadamente; se presiona el cordón con los dedos para cerrar debidamente las oquedades entre el aro y la carpeta.
3. Se coloca el cono en el centro de la carpeta delimitada por el aro y en seguida se vierte rápidamente suficiente agua para cubrir dicho cono hasta el vértice; en ese instante se acciona el cronómetro y se agrega más agua, midiéndola con las probetas graduadas, en la cantidad necesaria para compensar la que se infiltra a través de la carpeta y mantener constante durante 10 minutos el nivel inicial de prueba indicado por el vértice del cono.
4. Al completarse dicho lapso se suspende la adición del agua de compensación y se registra el volumen de la misma, en centímetros cúbicos.
5. En esta prueba se calcula y reporta el índice de permeabilidad de la carpeta asfáltica en la ubicación seleccionada para la prueba, aplicando la siguiente Fórmula:

$$I_p = \frac{V_i}{V_t} \times 100$$

Dónde:

I_p = Índice de permeabilidad en el lugar de prueba, en por ciento.

V_i = Volumen de agua infiltrada en la carpeta durante el tiempo de prueba, en cm^3 .

V_t = Volumen delimitado en el interior del aro, por la altura del cono, cuyo valor es de $1,247 \text{ cm}^3$.

2.3.6. Índice De Perfil

2.3.6.1. Objetivo:

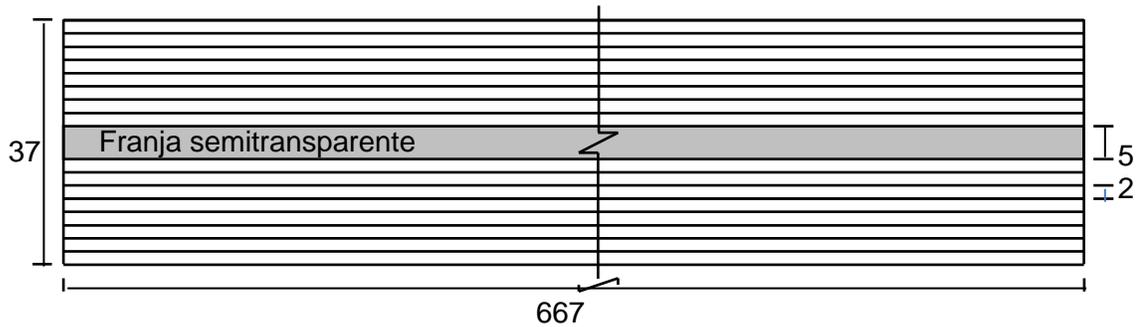
Esta prueba permite obtener el perfil horizontal de la superficie de rodamiento, y determinar el índice de perfil del pavimento. La prueba consiste en medir las irregularidades en la superficie con un perfilografo tipo California a lo largo de una franja de pavimento.

2.3.6.2. Equipo:

1. Perfilografo tipo California. Que consiste en:
 - 1.1. Marco: Rígido, de 7.62 m (25 ft) de longitud y aproximadamente 1 m de altura, integrado por armaduras de aluminio desmontables.
 - 1.2. Carros de carga: Para soportar el marco y permitir su desplazamiento a lo largo de la trayectoria indicada, mediante un sistema de dirección mecánica controlado por el operador, los carros de carga se ubican en los extremos del marco, en diversas configuraciones de ruedas de apoyo en línea, separadas entre sí en al menos 30.5 cm (1 ft) longitudinalmente y 43.5 cm (17 in) transversalmente, para proporcionar estabilidad al equipo.
 - 1.3. Neumático, de al menos 15.2 cm (6 in) de diámetro y ubicada en la parte central del marco, con libre desplazamiento vertical, que permita registrar la elevación de perfil de la superficie de rodamiento, formando el perfilograma. Generalmente, la presión es de 170 KPa (25 lb/in²).

- 1.4. Consola de registro: Para registrar el perfilograma, grafica o electrónicamente, considerando que:
- 1.4.1. El dispositivo de registro grafico consistirá en una pluma trazadora capaz de dibujar el perfilograma sobre un rollo de papel, con escala vertical de 1:1 y horizontal de 1:300.
 - 1.4.2. El dispositivo de registro electrónico, será capaz de realizar 5 lecturas por cada 2.54 cm (1 in) de longitud recorrida y registrar la altura de la superficie con una aproximación de 0.25 mm (0.01 in), recolectando los datos por medio de señales digitales resultantes del movimiento vertical de la llanta sensora. Contará con un programa de cómputo para procesar los datos recolectados, dibujar sobre un rollo de papel el perfilograma a las escalas anteriormente señaladas, indicando la magnitud de cada una de las irregularidades que sean medibles, la suma de ellas y la distancia recorrida, así como calcular el índice de perfil del subtramo medido. Salvo que se indique otra cosa en el proyecto, se configuran los siguientes parámetros:
 - 1.4.2.1. Tipo de filtro: Butterworth de 3er orden.
 - 1.4.2.2. Longitud de filtro: 610 mm (2ft)
 - 1.4.2.3. Distancia de corte: 200 m
 - 1.4.2.4. Franja semitransparente: 5 mm
 - 1.4.2.5. Localizador de protuberancias: encendido
 - 1.4.2.6. Altura de protuberancia: 10 mm
 - 1.4.2.7. Ancho de protuberancia: 7.5 mm
 - 1.4.2.8. Redondeo de picos: 0.00
 - 1.4.2.9. Localizador de depresiones: Apagado
2. Plantilla de medición: Rectangular de plástico transparente, como la mostrada en la FIGURA 2.3.6-1, de 3.7 cm de ancho y 66.7 cm de largo, equivalente a un tramos de pavimento de 200 m de longitud a una escala de 1:300. La parte central de la plantilla estará marcada con una franja semitransparente de 5 mm de ancho, a lo largo de toda su longitud, que representara la franja de tolerancia. En ambos lados de esta franja contara con líneas paralelas a cada 2 mm (0.1 in), que servirían para identificar y medir la magnitud de las irregularidades de la línea del perfilograma fuera de la franja semitransparente de la plantilla.

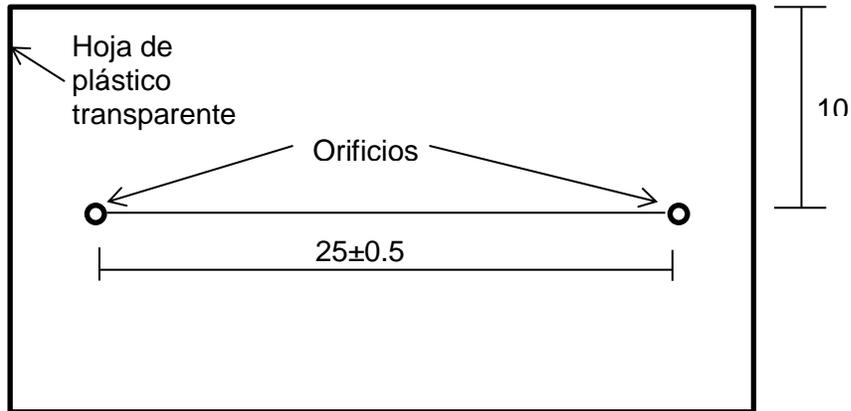
FIGURA 2.3.6-1: Plantilla de medición (Acotaciones en mm)⁴⁰



- Plantilla para localizar irregularidades mayores de 10 mm: Rectangular, de plástico transparente, con una línea de referencia de 25.0 ± 0.5 mm (1 ± 0.02 in) de longitud, ubicada a 10 mm del borde superior, como se muestra a continuación. Los extremos de la línea tendrán pequeños orificios o marcas que servirán para precisar sus puntos de intersección con la línea del perfilograma.

⁴⁰ Normas SCT, *Índice de perfil* (M-MMP-4-07-002). México D.F., Instituto Mexicano del Transporte, 2006, p 3.

FIGURA 2.3.6-2: Plantilla para localizar irregularidades mayores de 10 mm (Acotaciones en mm)⁴¹



4. Dispositivo para calibración de la escala vertical del perfilógrafo: Consistirá en una placa de base y un bloque de peldaños, metálicos e indeformables, similares a los mostrados en la FIGURA 2.3.6-3. La placa de base será plana y en general, su espesor será menor de 25.4 mm (1 in); la altura de los peldaños del bloque será de 25.4 ± 0.25 mm (1 ± 0.01 in). En lugar del bloque pueden utilizarse dos placas planas auxiliares del mismo espesor que la altura de los peldaños del bloque.

FIGURA 2.3.6-3: Dispositivo para calibración de la escala vertical del perfilógrafo⁴²



⁴¹ *Ibidem*, p.4.

⁴² *Idem*.

5. Rollo de papel: Del tipo y dimensiones especificadas por el fabricante del perfilógrafo, que permita registrar de forma clara el perfilograma, sin alteraciones, manchas o escurrimientos.

2.3.6.3. Calibración del perfilógrafo.

2.3.6.3.1. Frecuencia de calibración:

El perfilógrafo será calibrado en sus escalas horizontal y vertical, inmediatamente antes de utilizarlo por primera vez en obra, cada vez que se obtengan perfilogramas equivalentes a 20km. También se calibrara cuando se remplace o repare la llanta sensora y cada vez que se renasamble el perfilógrafo. Las calibraciones horizontal y vertical se ejecutan conforme a los procedimientos que se indican a continuación y los registros que se generen serán conservados como evidencia de las calibraciones, entregando una copia a la Secretaría.

2.3.6.3.2. Procedimiento de calibración de la escala horizontal

A menos de que el fabricante del perfilógrafo indique otra cosa, el procedimiento de calibración de la escala horizontal será el siguiente:

1. Se selecciona un tramo de camino recto de 200 m de longitud como mínimo, medido con algún medio aprobado por la Secretaría, que garantice una aproximación de $\pm 0,2\%$ de la longitud del tramo.
2. Se desplaza en línea recta el perfilógrafo a lo largo del tramo estipulado en el Inciso anterior.
3. Si se utiliza un dispositivo de registro gráfico, se mide gráficamente la longitud del perfilograma obtenido, en milímetros, con una aproximación de 0,5 mm y se determina el factor de escala mediante la siguiente fórmula:

$$f_e = 1000 \frac{L_t}{L_p}$$

Dónde:

f_e =Factor de escala, adimensional

L_t =Longitud del tramo, en m

L_p =Longitud del perfilograma, en mm

4. La calibración se considera satisfactoria si el factor de escala calculado es igual a $300 \pm 2,4$.
5. Si se utiliza un dispositivo de registro electrónico, para que se considere satisfactoria la calibración, la longitud registrada en el perfilograma será igual a la longitud del tramo $\pm 0,8\%$.
6. En caso de que no se cumpla con la tolerancia indicada en el Inciso 3. ó 4., según corresponda, se seguirán las recomendaciones del fabricante para ajustar la escala horizontal del equipo y se repetirá la calibración, las veces que sea necesario para cumplir con esa tolerancia.

2.3.6.3.3. Procedimiento de calibración de la escala vertical

A menos de que el fabricante del perfilógrafo indique otra cosa, el procedimiento de calibración de la escala vertical será el siguiente:

1. Se coloca el perfilógrafo sobre una superficie plana sensiblemente horizontal (FIGURA 2.3.6-4. A), se levanta la llanta sensora y se inserta debajo de ella la placa de base, de forma que quede estable y firmemente asentada y se apoya la llanta sobre la placa (FIGURA 2.3.6-4.B); se marca en el rollo de papel la elevación inicial (e_1) de la pluma trazadora del dispositivo de registro gráfico o se registra la elevación inicial (e_1) mostrada en la pantalla del dispositivo de registro electrónico.

FIGURA 2.3.6-4: Procedimiento de calibración de la escala vertical⁴³

FIGURA A.



FIGURA B.



FIGURA C.



FIGURA D.

2. Se levanta cuidadosamente la llanta sensora para insertar entre ésta y la placa de base el primer peldaño del bloque de calibración o la primera placa auxiliar, de forma que la llanta quede apoyada libremente sobre el peldaño o la placa auxiliar (FIGURA 2.3.6-4.C) y se marca o registra, como se indica en el Inciso anterior, la nueva elevación obtenida (e2).

⁴³ *Ibidem*, p.6

3. Se levanta cuidadosamente la llanta sensora para insertar entre ésta y la placa de base el segundo peldaño del bloque de calibración o para insertar la segunda placa auxiliar, de forma que la llanta quede apoyada libremente sobre el peldaño o la placa auxiliar (FIGURA 2.3.6-4.D) y se marca o registra la nueva elevación obtenida (e3).
4. Se sostiene la llanta sensora para retirar el segundo peldaño del bloque de calibración o la segunda placa auxiliar, se baja cuidadosamente la llanta hasta que quede apoyada libremente sobre el primer peldaño o la primera placa auxiliar (FIGURA 2.3.6-4.C) y se marca o registra, la nueva elevación obtenida (e4).
5. Se sostiene la llanta sensora para retirar el primer peldaño del bloque de calibración o la primera placa auxiliar, se baja cuidadosamente la llanta hasta que quede apoyada libremente sobre la placa de base (FIGURA 2.3.6-4.B) y se marca o registra la elevación final obtenida (e5).
6. Antes de marcar o registrar las elevaciones, se tendrá especial cuidado de que al insertar el bloque de calibración, este quede alineado con el eje vertical de la llanta sensora, pues de lo contrario se tendrán errores en la lectura de las elevaciones.
7. La calibración se considera satisfactoria si la diferencia, en valor absoluto, entre las elevaciones determinadas sucesivamente es $25,4 \pm 0,5$ mm y si la diferencia, en valor absoluto, entre la elevación inicial (e1) y la elevación final (e5) es 0,76 mm como máximo. En caso de que no se cumpla con estos requisitos, se seguirán las recomendaciones del fabricante para ajustar la escala vertical del equipo y se repetirá la calibración, las veces que sea necesario para cumplir con ellos.

2.3.6.4. Obtención del perfilograma.

Una vez ensamblado y calibrado el perfilografo, se obtiene el perfilograma de la superficie de rodamiento del pavimento para cada subtramos de 200 m de longitud o fracción, en cada línea de tendido o colado, de acuerdo con lo indicado a continuación:

1. Para indicar el levantamiento del perfilograma de un nuevo subtramo, se coloca la llanta sensora al final del ultimo subtramo levantado. Si se trata del primer subtramo de la obra, el levantamiento empezara a 5 m del inicio de la carpeta.
2. Se desplaza el perfilografo por la trayectoria indicada, hasta el final del subtramo, donde se la rueda se levanta aproximadamente 3 cm con el fin de dejar una marca fácil de identificar en el perfilograma.

3. La velocidad de operaciones del perfilografo será de 4.5 km/hr, es decir, a la velocidad que un peatón se desplazaría en condiciones normales, ya que a velocidades mayores el equipo tiende a balancearse y brincar al pasar por algunas irregularidades.
4. Cada perfilograma se identificara rotulando, al menos, la siguiente información:
 - 4.1. Nombre de la carretera
 - 4.2. Cadenamiento de inicio y terminación del subtramo
 - 4.3. Fecha de construcción del subtramo
 - 4.4. Fecha de levantamiento del perfilograma
 - 4.5. Nombre del operador del perfilografo
 - 4.6. Y las observaciones pertinentes, tales como la existencia de una curva horizontal o vertical

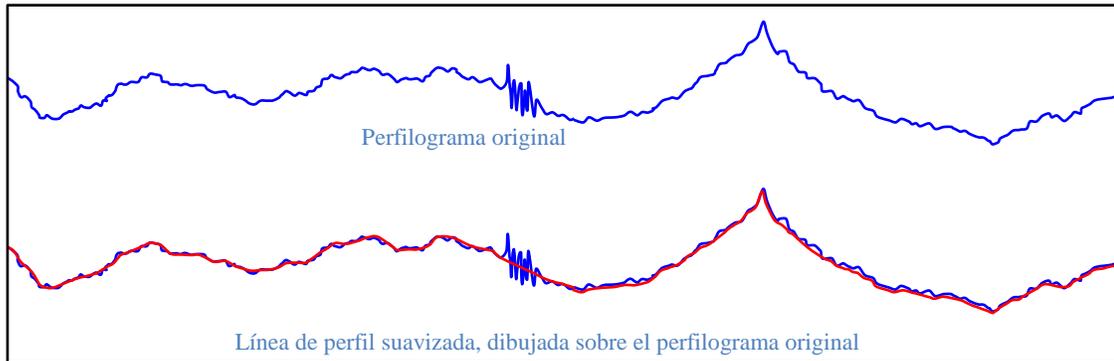
2.3.6.5. Determinación del índice de perfil

El índice de perfil (I_p) se determina a partir del perfilograma levantado en cada subtramo. Su cálculo se realiza en forma manual cuando se utiliza el dispositivo de registro grafico o mediante el programa de cómputo del dispositivo de registro electrónico, en cuyo caso se identificará claramente el programa utilizado y se someterá a la aprobación de la secretaría. El procedimiento para el cálculo manual será el siguiente.

2.3.6.5.1. Línea de perfil suavizada:

Sobre el perfilograma se dibuja la línea de perfil suavizada, que es una línea continua cuyo propósito es suavizar el trazo del perfilograma, atenuando los picos y desviaciones menores provocadas por piedras, tierra y objetos extraños, como se indica en la FIGURA 2.3.6-5.

FIGURA 2.3.6-5: Línea de perfil suavizada⁴⁴

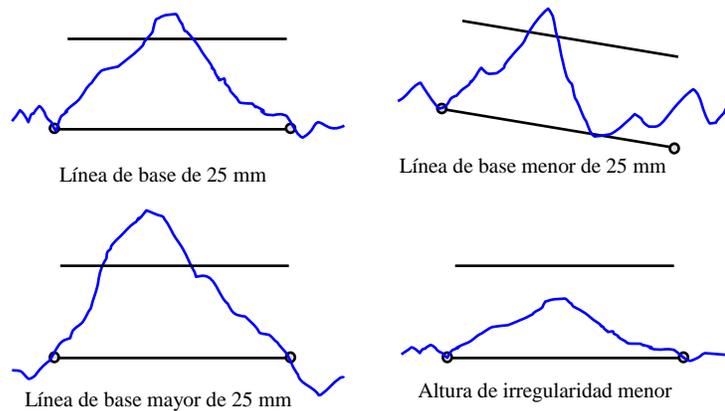


2.3.6.5.2. Localización de las irregularidades mayores de 10 mm:

Una vez dibujada la línea de perfil y utilizando la plantilla descrita anteriormente, se localizan y marcan sobre esa línea, todas las protuberancias mayores de 10 mm en una longitud igual o menor a 7.5 m, mismas que serán identificadas en campo para ser eliminadas de la superficie de rodamiento, mediante algún procedimiento aprobado.

Se coloca la plantilla sobre cada protuberancia o pico excepcionalmente alto de la línea de perfil suavizada, de tal forma que la línea de referencia de la plantilla intercepte la línea de perfil, formando una especie de triángulo. De acuerdo con lo ilustrado en la FIGURA 2.3.6-6, es importante señalar lo siguiente:

⁴⁴ *Ibidem*, p. 7.

FIGURA 2.3.6-6: Localización de irregularidades mayores de 10 mm⁴⁵

1. La base de dicho triángulo puede ser menor que la línea de referencia de la plantilla, sin embargo nunca podrá ser mayor.
2. La línea de referencia de la plantilla puede colocarse en forma inclinada sobre la línea del perfil.
3. Cuando la base de la irregularidad es mayor que la línea de referencia de la plantilla, esta última se coloca en forma sensiblemente horizontal mientras se desliza hacia arriba por la irregularidad hasta que los orificios o las marcas de referencia se ubiquen sobre la línea de perfil.

Utilizando como guía el borde superior de la plantilla se traza una línea delgada sobre la línea de perfil suavizada. Cualquier porción de la línea de perfil que sobresalga de la línea trazada con la plantilla, indica una protuberancia que ha de ser eliminada de la superficie de rodamiento.

2.3.6.5.3. Cálculo del índice de perfil:

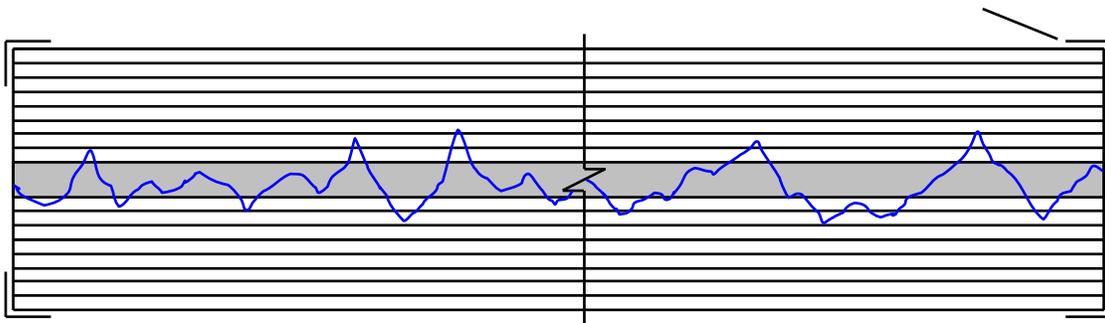
Una vez identificadas en la línea de perfil suavizada las protuberancias mayores a 10 mm, a que se refiere el párrafo anterior, se utiliza la plantilla de medición para identificar en la línea de perfil y medir, los picos que sobresalgan por arriba o por debajo de la franja semitransparente de la plantilla, como se indica a continuación.

1. Posicionamiento de la plantilla de medición:

⁴⁵ *Ibidem*, p. 8.

- 1.1. Se coloca la plantilla de medición sobre la línea de perfil suavizada, de tal forma que la franja semitransparente cubra lo más posible dicha línea y procurando que las magnitudes de las irregularidades que sobresalgan por arriba y por debajo de la franja, queden sensiblemente balanceadas, como se muestra en la siguiente figura.

FIGURA 2.3.6-7: Posicionamiento de la plantilla de medición⁴⁶

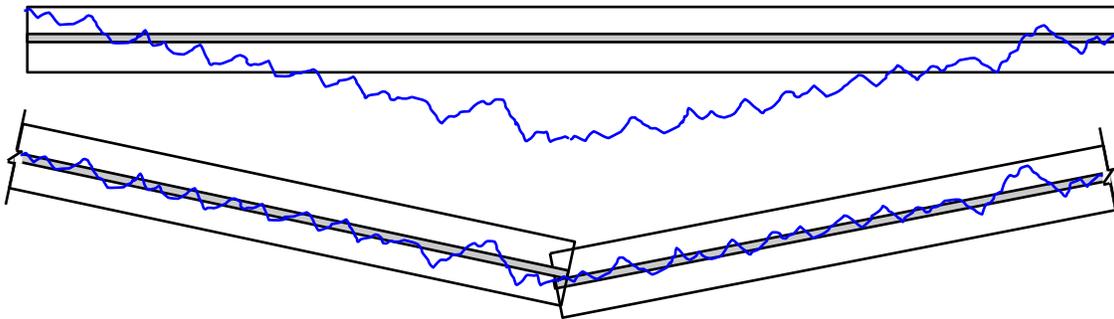


- 1.2. Al posicionar la plantilla de medición se considerara que la continuidad con las líneas de perfil suavizada de los subtramos subsecuentes, de tal forma que se coloque en la mejor posición con relación a toda la línea de perfil del tramo levantado en la jornada de trabajo.
- 1.3. Una vez que se ha colocado la plantilla de medición en la mejor posición posible, se marcan sus esquinas sobre el perfilograma, para que pueda reubicarse nuevamente en la misma posición en caso de una revisión o para alinear la plantilla cuando se evalúe el subtramo siguiente.

⁴⁶ *Ibidem*, p. 9.

- 1.4. En el caso de curvas verticales o de sobreelevaciones de curvas horizontales, donde se observen cambios importantes de la pendiente en la rasante del subtramo, es necesario dividir la línea de perfil suavizada en secciones de menor longitud y girar la plantilla de medición.

FIGURA 2.3.6-8: Posicionamiento de la plantilla de medición en el caso de cambios de pendiente importantes en la rasante del subtramo⁴⁷



2. Medición de las irregularidades:

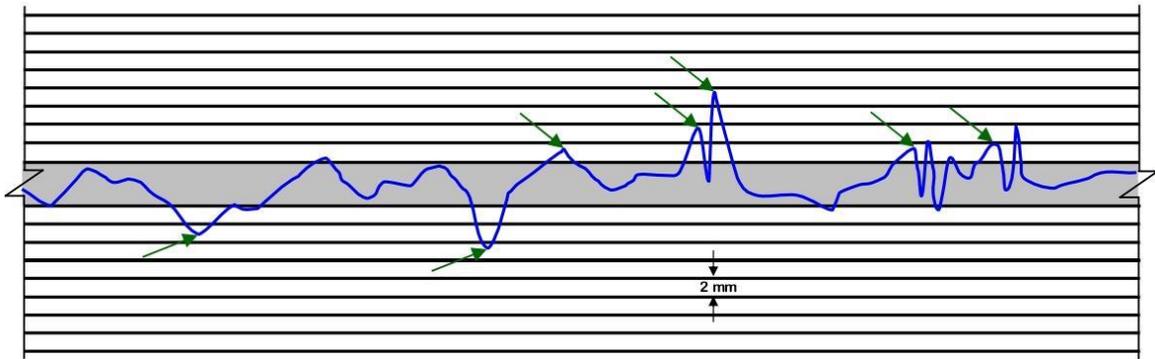
Una vez posicionada la plantilla de medición sobre la línea de perfil suavizada, utilizando las líneas paralelas a la franja semitransparente de la plantilla como referencias, se determina la magnitud de cada irregularidad, es decir, la distancia entre su cresta o su valle máximo que sobresalga de la franja semitransparente y el límite que corresponda de la franja, con aproximación al mm, considerando lo siguiente:

- 2.1. Sólo se consideraran las irregularidades que sobresalgan de la franja semitransparente más de 0,5 mm, y que se extiendan longitudinalmente sobre el perfilograma por al menos 2 mm, como se muestra en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..** No se considerarán los picos repentinos que presente

⁴⁷ *Idem.*

el perfilograma, ya que generalmente son causados por brincos provocados por piedras sueltas o material ajeno a la superficie de rodadura del pavimento. Las magnitudes de las irregularidades con doble cresta o doble valle, que no regresen a la franja semitransparente, se considerarán una sola vez tomando la distancia máxima, como se muestra en la FIGURA 2.3.6-10.

FIGURA 2.3.6-9: Irregularidades que serán consideradas para el cálculo del índice de perfil⁴⁸



2.2. Las magnitudes de las irregularidades mayores de 10 mm, a que se refiere el inciso 2 de esta sección, en todos los casos se tomarán iguales a 10 mm, considerando que en los casos más desfavorables sólo se eliminaría en el subtramo, las partes de las irregularidades que excedan esa magnitud.

2.3. Si una irregularidad queda registrada entre dos perfilogramas de subtramos subsecuentes, se considerará una sola vez como parte del subtramo donde se presente la magnitud máxima, como se muestra en la FIGURA 2.3.6-11.

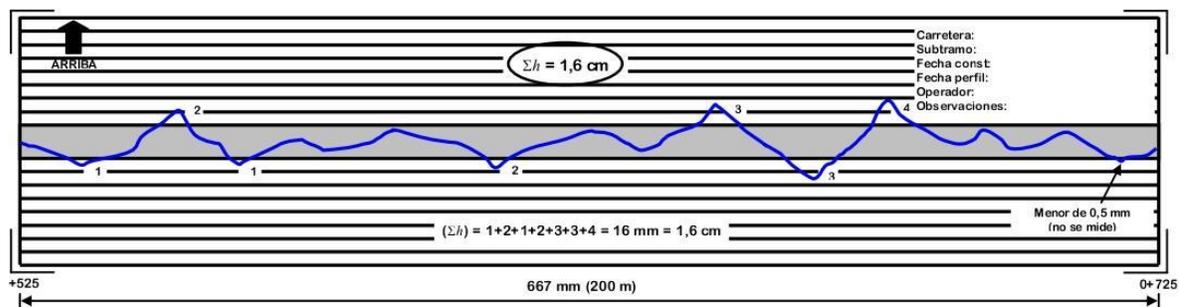
⁴⁸ *Ibidem*, p. 10.

2.4. Se anotará en forma clara la magnitud de cada irregularidad junto a ella, en mm con aproximación a la unidad.

2.3.6.6. Cálculos y resultados

Una vez que se han registrado las magnitudes de todas las irregularidades de un mismo subtramo, se calcula la suma de éstas, anotando, el resultado en la parte superior central del perfilograma, en cm, con aproximación a un décimo y encerrándolo en un círculo para su fácil identificación, como se ejemplifica en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

FIGURA 2.3.6-12: Procedimiento de medición de irregularidades⁵¹



Se calculará y reportará junto con los perfilogramas, el índice de perfil (I_p) de cada subtramo, mediante la siguiente expresión:

$$I_p = \frac{\Sigma h}{L} \times 1000$$

Dónde:

I_p = Índice de perfil del subtramo, (cm/km)

Σh = Suma de las magnitudes de las irregularidades en el subtramo, (cm)

L = Longitud del subtramo, (m)

⁵¹ *Ibidem*, p. 11.

2.3.6.7. Precauciones

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

1. Verificar que el perfilógrafo esté perfectamente ensamblado conforme a las especificaciones del fabricante, limpio, en óptimas condiciones de operación y debidamente calibrado.
2. Tener especial cuidado en utilizar estrictamente los consumibles (papel y tinta) recomendados por el fabricante.
3. Verificar varias veces al día, durante la operación del equipo, que la presión de la llanta sensora sea la indicada.
4. Limpiar la franja de camino por donde se desplazará el perfilógrafo de todo material suelto y de objetos ajenos al pavimento.
5. Evitar la operación del perfilógrafo en la proximidad de tránsito intenso de vehículos o de maquinaria pesada, que pueda inducir vibraciones que alteren el levantamiento del perfilograma.
6. Evitar que el perfilógrafo se opere a una velocidad mayor que la indicada. (Normas SCT, M-MMP-4-07-002 2006)

2.4. CRITERIOS DE ACEPTACIÓN O RECHAZO

Para que la carpeta asfáltica con mezcla en caliente, se considere terminada y sea aceptada por la Secretaría, con base en el control de calidad que ejecute el Contratista de Obra, mismo que podrá ser verificado por la Secretaría cuando lo juzgue conveniente, se comprobará:

2.4.1. Calidad De Los Materiales

1. Que los materiales pétreos, asfálticos y aditivos utilizados en la mezcla asfáltica, así como los materiales asfálticos empleados en el riego de liga, hayan cumplido con las características establecidas en el proyecto.
2. Que las características de la mezcla asfáltica hayan cumplido con las establecidas en el proyecto o aprobadas por la Secretaría.
3. Que la temperatura de la mezcla asfáltica tendida y compactada, una vez concluido el proceso de compactación, haya sido igual o mayor que la temperatura mínima de compactación determinada mediante la curva Viscosidad-Temperatura del material asfáltico utilizado o, en su caso, que haya indicado el proveedor del asfalto modificado.
4. Que el grado de compactación y la estabilidad de la carpeta asfáltica con mezcla en caliente, una vez compactada, determinados en corazones extraídos al azar, hayan cumplido con lo establecido en el proyecto o lo aprobado por la Secretaría, considerando que:
 - 4.1. El número de corazones por extraer se determinará aplicando la siguiente fórmula:

$$C = \frac{L}{50}$$

Dónde:

c = Número de corazones por extraer, aproximado a la unidad superior

L = Longitud del tramo, (m)

- 4.2. Los corazones se extraerán sin dañar la carpeta asfáltica contigua a los mismos.

- 4.3. Tan pronto se concluya la extracción de los corazones, se rellenarán los huecos con el mismo tipo de mezcla asfáltica utilizada en la carpeta, compactándola y enrasando su superficie con la original de la carpeta.
- 4.4. Todos los grados de compactación y las estabilidades que se determinen en los corazones, estarán dentro de las tolerancias que fije el proyecto o apruebe la Secretaría.

2.4.2. Índice De Perfil

Que el índice de perfil de la última capa de la carpeta asfáltica con mezcla en caliente, compactada en cada franja de tendido de cada subtramo de doscientos (200) metros de longitud o fracción, haya sido de catorce (14) centímetros por kilómetro como máximo, a menos que el proyecto indique otro valor. El Contratista de Obra hará esta comprobación, dentro de las cuarenta y ocho (48) horas siguientes a la terminación de la compactación, considerando lo que a continuación se señala. La Secretaría evaluará diariamente los resultados que se obtengan.

2.4.2.1. Equipo

El Contratista de Obra dispondrá y mantendrá durante el tiempo que dure la obra, de un perfilógrafo tipo California que cumpla con lo indicado en la sección Índice de Perfil. Antes de su utilización, el equipo se calibrará como se indica, pudiendo la Secretaría verificar la calibración en cualquier momento y si a su juicio, el perfilógrafo presenta deficiencias o no está bien calibrado, se suspenderá inmediatamente la evaluación en tanto que el Contratista de Obra lo calibre adecuadamente, corrija las deficiencias o lo remplace. En ningún caso se medirán, para efecto de pago, carpetas asfálticas con mezcla en caliente que no hayan sido comprobadas.

2.4.2.2. Tramo de prueba

Para que el tramo de prueba sea aceptado por la Secretaría, tendrá un índice de perfil de catorce (14) centímetros por kilómetro como máximo.

2.4.2.3. Determinación del índice de perfil

La obtención del índice de perfil, en cada franja de tendido, se hará a lo largo de la línea imaginaria ubicada a noventa más menos veinte (90 ± 20) centímetros de la orilla interior de la franja de tendido por evaluar. Las mediciones serán divididas en secciones consecutivas de doscientos (200) metros.

Cuando la longitud de un subtramo construido en un día de trabajo, no alcance los doscientos (200) metros, será agrupado con el tramo inmediato que se construya el día siguiente. En este caso, la medición del índice de perfil se hará tan pronto como sea práctico y posible, pero no después de cuarenta y ocho (48) horas de terminado el último subtramo de ese día.

2.4.2.4. Índice de perfil promedio diario

Cada día de trabajo se determinará el índice de perfil promedio diario, obteniendo el promedio aritmético de todos los índices de perfil determinados ese día. Si el índice de perfil promedio diario, resulta mayor de veinticuatro (24) centímetros por kilómetro, se suspenderá de inmediato la construcción de la carpeta asfáltica con mezcla en caliente, hasta que el Contratista de Obra corrija la carpeta defectuosa.

Para determinar el índice de perfil promedio diario se puede utilizar el formato que se muestra en la TABLA 2.4.2-1, en el que, para un mismo día de trabajo y cada franja de tendido y subtramo, se anota el índice de perfil obtenido. Se calcula el promedio aritmético de todos los índices de perfil obtenidos el mismo día y se anota en el último renglón del formato. Si el tramo tiene más de dos (2) franjas de tendido, al formato se le agregan las columnas que sean necesarias para completar el número de franjas de tendido. Los índices de perfil que se obtengan en subtramos que hayan sido corregidos, serán registrados en la columna correspondiente, pues los valores originales se conservarán sin alterar.

2.4.2.5. Corrección de la superficie de la carpeta asfáltica con mezcla en caliente

El Contratista de Obra realizará las correcciones de la superficie de la carpeta asfáltica con mezcla en caliente que se requieran para obtener el índice de perfil adecuado.

Después de obtenido el índice de perfil de cada franja de tendido en un subtramo de doscientos (200) metros, todas aquellas áreas en las que el perfilograma presente una

desviación igual a un (1) centímetro o mayor, en siete coma cinco (7,5) metros o menos, serán corregidas mediante fresado. Concluida la corrección, se obtendrá nuevamente el índice de perfil del subtramo para comprobar el cumplimiento de lo aquí estipulado.

Una vez realizadas las correcciones individuales de todas las desviaciones a que se refiere el Párrafo anterior, cualquier subtramo de doscientos (200) metros que presente un índice de perfil mayor de veinticuatro (24) centímetros por kilómetro en cualquiera de sus franjas de tendido, será corregido mediante alguno de los procedimientos que se indican a continuación u otros que apruebe la Secretaría. En cualquier caso, concluida la corrección se determinarán nuevamente los índices de perfil de todas las franjas de tendido del subtramo para comprobar el cumplimiento de lo aquí estipulado.

1. Fresado continuo de la superficie de la carpeta asfáltica con mezcla en caliente, en tramos no menores de cincuenta (50) metros y a todo el ancho de la corona en carreteras de dos (2) carriles, o en todos los carriles de un mismo sentido en carreteras con carriles múltiples, para reducir el índice de perfil a veinticuatro (24) centímetros por kilómetro o menos. Sobre la superficie fresada, se colocará un tratamiento superficial aprobado por la Secretaría, con un espesor de dos (2) centímetros como mínimo, a menos que el proyecto establezca la construcción de una capa de rodadura con mezcla asfáltica, en caliente o en frío.
2. Colocación sobre la carpeta asfáltica con mezcla en caliente, de una sobrecarpeta de tres (3) centímetros de espesor como mínimo, en tramos no menores de cincuenta (50) metros y a todo el ancho de la corona en carreteras de dos (2) carriles, o en todos los carriles de un mismo sentido en carreteras con carriles múltiples, elaborada con la misma mezcla asfáltica utilizada en la carpeta, que cumpla con todo lo indicado en esta Norma y tenga un índice de perfil de veinticuatro (24) centímetros por kilómetro como máximo.

TABLA 2.4.2-1: Formato para el cálculo del índice de perfil promedio diario⁵²

Fecha de construcción:

Tramo ⁵³		Subtramo ⁵⁴		Ip cm/km		Ipc cm/km		
del km	al km	del km	al km	Franja de tendido 1	Franja de tendido 2	Fecha de obtención	Franja de tendido 1	Franja de tendido 2
+ + + + +	+ + + + +	+ + + + +	+ + + + +					
		+ + + + +	+ + + + +					
		+ + + + +	+ + + + +					
		+ + + + +	+ + + + +					
		+ + + + +	+ + + + +					
+ + + + +	+ + + + +	+ + + + +	+ + + + +					
		+ + + + +	+ + + + +					
		+ + + + +	+ + + + +					
		+ + + + +	+ + + + +					
		+ + + + +	+ + + + +					

$$\bar{I}p = \boxed{}$$

Dónde:

Ip = Índice de perfil original del subtramo y franja de tendido correspondientes

$\bar{I}p$ = Índice de perfil promedio diario. Promedio aritmético de todos los Ip obtenidos en un mismo día, (cm/km)

Ipc = Índice de perfil después de corregido el subtramo y franja de tendido correspondientes

⁵² Normas SCT, *Carpetas asfálticas con mezcla en caliente* (N-CTR-1-04-006). México D.F., Instituto Mexicano del Transporte, 2009, p 18.

⁵³ Tramo de 1 km o fracción

⁵⁴ Subtramo de 200 m o fracción

Cuando el índice de perfil de alguna franja de tendido de un subtramo de doscientos (200) metros esté entre catorce coma uno (14,1) y veinticuatro (24) centímetros por kilómetro, el Contratista de Obra podrá elegir entre corregir la superficie terminada, o aceptar una sanción por incumplimiento de calidad, calculada con base en el precio unitario de la carpeta asfáltica, mediante el factor que se establece en la sección Base de Pago.

Todos los trabajos de corrección serán por cuenta y costo del Contratista de Obra, y previamente a su ejecución, los procedimientos de corrección de la superficie de la carpeta asfáltica serán sometidos a la aprobación de la Secretaría. No se permitirá efectuar trabajos de corrección con equipos de impacto que puedan dañar la estructura del pavimento, ni con resanes superficiales adheridos. Los atrasos en el programa de ejecución detallado por concepto y ubicación, que se ocasionen por motivo de las correcciones, serán imputables al Contratista de Obra.

Todos los trabajos de corrección de la superficie de la carpeta asfáltica, se efectuarán antes de que se comprueben sus líneas, pendientes y espesores, salvo que la corrección se realice mediante una sobrecarpeta, en cuyo caso la comprobación de los espesores se hará antes de colocarla.

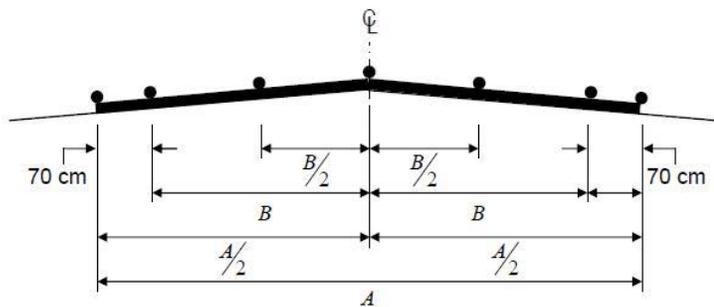
2.4.3. Líneas, Pendientes Y Espesores

Que el alineamiento, perfil, sección y espesor de la carpeta asfáltica con mezcla en caliente, cumplan con lo establecido en el proyecto, con las tolerancias que se indican a continuación:

Previamente a la construcción de la carpeta asfáltica con mezcla en caliente, en las estaciones cerradas a cada veinte (20) metros, se nivelará la superficie de la capa inmediata inferior, obteniendo los niveles en el eje y en ambos lados de éste, en puntos ubicados a una distancia (B) igual al semiancho de la corona de la carpeta ($A/2$) menos setenta (70) centímetros, a la mitad del espacio comprendido entre éstos y el eje ($B/2$), y en las orillas de la carpeta, como se muestra en la FIGURA 2.4.3-1, sin considerar las

ampliaciones en curvas, ni los carriles de aceleración o desaceleración, las ampliaciones en paraderos o las cuñas de transición en entronques a nivel. Cuando existan estos elementos, en las mismas secciones a cada veinte (20) metros de los carriles principales, adicionalmente se nivelarán los puntos en sus orillas, para el posterior cálculo de las pendientes transversales, como se indica en el Inciso siguiente.

FIGURA 2.4.3-1: Ubicación de los puntos por nivelar⁵⁵



Una vez compactada la carpeta asfáltica con mezcla en caliente, comprobados sus índices de perfil y, en su caso, hechas las correcciones necesarias, se volverán a nivelar las secciones correspondientes a los cadenamientos reparados, determinando las elevaciones de los mismos puntos ahí indicados para obtener las pendientes transversales entre ellos, y se medirán, en cada sección, las distancias entre el eje y las

⁵⁵ Normas SCT, op. cit., nota 52, p. 20.

orillas de la carpeta, para comprobar que esas pendientes y distancias estén dentro de las tolerancias que se indican en la FIGURA 2.4.3-1.

FIGURA 2.4.3-2: Tolerancias para líneas y pendientes⁵⁶

Característica	Tolerancia
Ancho de la carpeta asfáltica con mezcla en caliente, del eje a la orilla	± 1 cm
Pendiente transversal	± 0,5%

Si para corregir la superficie de la carpeta asfáltica con mezcla en caliente se opta por colocar una sobrecarpeta o por cualquier otro procedimiento aprobado por la Secretaría, que eleve esa superficie, antes de su ejecución se nivelarán las secciones a corregir, determinando las elevaciones de los mismos puntos ahí indicados para obtener los espesores de la carpeta antes de ser corregida.

Las nivelaciones se ejecutarán con nivel fijo y comprobación de vuelta, obteniendo los niveles con aproximación al milímetro. Las distancias horizontales se medirán con aproximación al centímetro.

A partir de las cotas obtenidas en las nivelaciones, en todos los puntos nivelados se determinarán los espesores de la carpeta asfáltica compactada, los que serán iguales al fijado en el proyecto o, para cada tramo de un (1) kilómetro o fracción, cumplirán con lo establecido en los siguientes incisos.

⁵⁶ *Ibidem*, p. 21.

El espesor promedio correspondiente a todas las determinaciones hechas en el tramo, será igual a noventa y ocho centésimos (0,98) del espesor de proyecto o mayor:

$$\bar{e} \geq 0,98e$$

Dónde:

e = Espesor de proyecto, (cm)

\bar{e} = Espesor promedio correspondiente a todas las determinaciones hechas en el tramo, (cm), obtenido mediante la siguiente fórmula:

$$\bar{e} = \frac{\sum_{i=1}^n e_i}{n}$$

Dónde:

e_i = Espesor obtenido en cada determinación, (cm)

n = Número de determinaciones hechas en el tramo

La desviación estándar de todos los espesores determinados en el tramo, será igual a diez centésimos (0,10) del espesor promedio o menor:

$$\sigma_e \leq 0,10\bar{e}$$

Dónde:

σ_e = Desviación estándar correspondiente a todas las determinaciones hechas en el tramo, (cm), calculada con la siguiente fórmula:

$$\sigma_e = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (e_i - \bar{e})^2}{n - 1} \right]^{1/2}$$

e , e_i y n tienen el significado indicado en el Inciso anterior.

2.4.4. Resistencia A La Fricción

Cuando el proyecto no establezca la construcción de una capa de rodadura con mezcla asfáltica, en caliente o en frío, sobre la carpeta asfáltica con mezcla en caliente:

Que la superficie de rodadura de la carpeta asfáltica con mezcla en caliente compactada, haya tenido una resistencia a la fricción en condiciones de pavimento mojado, igual a seis décimas (0,6) o mayor, medida con el equipo Mu-Meter, a una velocidad de setenta y cinco (75) kilómetros por hora, por lo menos sobre la huella de la rodada externa de cada franja de tendido.

Cuando la resistencia a la fricción de una carpeta asfáltica, sea menor de seis décimas (0,6), el Contratista de Obra, por su cuenta y costo, corregirá la superficie terminada mediante la colocación de una capa de rodadura de un riego, en tramos no menores de cincuenta (50) metros y a todo el ancho de la corona en carreteras de dos (2) carriles, o en todos los carriles de un mismo sentido en carreteras con carriles múltiples. La corrección también podrá hacerse mediante fresado o colocación de sobrecarpeta con mezcla asfáltica en caliente, una vez concluida, se determinarán nuevamente la resistencia a la fricción y los índices de perfil de todas las franjas de tendido del subtramo, para comprobar el cumplimiento de lo estipulado en el proyecto.

2.5. BASE DE PAGO

Cuando la construcción de carpetas asfálticas con mezcla en caliente se contrate a precios unitarios por unidad de obra terminada, se pagará al precio fijado en el contrato para el metro cúbico de carpeta asfáltica terminada en cada tramo de un (1) kilómetro o fracción, según su tipo y para cada banco en particular. Estos precios unitarios, incluyen lo que corresponda por:

- Valor de adquisición o producción de los materiales asfálticos para la carpeta asfáltica con mezcla en caliente y para el riego de liga, así como de los aditivos y, en su caso, las fibras que se requieran. Limpieza del tanque en que se transporten, movimientos en la planta de producción y en el lugar de destino, carga al equipo de transporte, transporte al lugar de almacenamiento, descarga en el depósito, cargo por almacenamiento y todas las operaciones de calentamiento y bombeo requeridas.
- Desmonte y despalme de los bancos; extracción del material pétreo aprovechable y del desperdicio, cualesquiera que sean sus clasificaciones; cribados y desperdicios de los cribados; trituración parcial o total; lavado o eliminación del polvo superficial adherido a los materiales; cargas, descargas y todos los acarrees de los materiales y de los desperdicios; formación de los almacenamientos y clasificación de los materiales pétreos separándolos por tamaños.
- Instalación, alimentación y desmantelamiento de las plantas.
- Secado del material pétreo; dosificación, calentamiento y mezclado de los materiales pétreos, asfálticos, aditivos y, en su caso, fibras.
- Barrido y limpieza de la superficie sobre la que se construirá la carpeta asfáltica con mezcla en caliente.
- Aplicación del riego de liga.
- Cargas en la planta de la mezcla asfáltica al equipo de transporte y acarreo al lugar de tendido.
- Tendido y compactación de la mezcla asfáltica.
- Los tiempos de los vehículos empleados en los transportes de todos los materiales durante las cargas y las descargas.

- La conservación de la carpeta asfáltica con mezcla en caliente hasta que sea recibida por la Secretaría.
- Y todo lo necesario para la correcta ejecución de este concepto.

TABLA 2.4.4-1: Formato para el cálculo del índice de perfil promedio diario⁵⁷

Fecha de construcción:

Tramo ⁵⁸		Subtramo ⁵⁹		lp cm/km		lpc cm/km		
del km	al km	del km	al km	Franja de tendido 1	Franja de tendido 2	Fecha de obtención	Franja de tendido 1	Franja de tendido 2
+ + + + +	+ + + + +	+ + + + +	+ + + + +					
		+ + + + +	+ + + + +					
		+ + + + +	+ + + + +					
		+ + + + +	+ + + + +					
		+ + + + +	+ + + + +					
+ + + + +	+ + + + +	+ + + + +	+ + + + +					
		+ + + + +	+ + + + +					
		+ + + + +	+ + + + +					
		+ + + + +	+ + + + +					
		+ + + + +	+ + + + +					

$$\bar{I}_p = \boxed{}$$

⁵⁷ Normas SCT, op. cit., nota 52, p. 18.

⁵⁸ Tramo de 1 km o fracción

⁵⁹ Subtramo de 200 m o fracción

Dónde:

I_p = Índice de perfil original del subtramo y franja de tendido correspondientes

\bar{I}_p = Índice de perfil promedio diario. Promedio aritmético de todos los I_p obtenidos en un mismo día, (cm/km)

I_{pc} = Índice de perfil después de corregido el subtramo y franja de tendido correspondientes

Cuando procedan estímulos por mejoramiento de calidad o sanciones por incumplimiento de calidad, de acuerdo con los índices de perfil de la carpeta asfáltica con mezcla en caliente, se pagará al Contratista de Obra una bonificación o se le hará una deducción, según corresponda, calculada para cada tramo de un (1) kilómetro o fracción, mediante la siguiente fórmula:

$$E = V \times PU \times \bar{F}$$

Dónde:

E = Estímulo por pagar como bonificación cuando resulta positivo o sanción aplicada como deducción cuando resulta negativo, para cada tramo de un (1) kilómetro o fracción, (\$)

V = Volumen de la carpeta asfáltica con mezcla en caliente del tramo, (m³)

PU = Precio unitario de la carpeta asfáltica con mezcla en caliente fijado en el contrato, (\$/m³)

\bar{F} = Factor promedio de estímulo o sanción del tramo. Promedio aritmético de los factores de estímulo o sanción (F_j) para cada subtramo de doscientos (200) metros en cada franja de tendido, tomados de la TABLA 2.4.4-2, (adimensional)

TABLA 2.4.4-2: Factores de estímulo o sanción, según el índice de perfil⁶⁰

Índice de perfil * (cm / km)	Factores de estímulo o sanción (Fj)	
4.0 o menos	Estímulo	+ 0.05
4.1 a 5.5		+ 0.04
5.6 a 7.0		+ 0.03
7.1 a 8.5		+ 0.02
8,6 a 10,0		+ 0.01
10.1 a 14.0	0	
14.1 a 16.0	Sanción	- 0.02
16.1 a 18.0		- 0.04
18.1 a 20.0		- 0.06
20.1 a 22.0		- 0.08
22.1 a 24.0		- 0.10
Mayor de 24.0	CORREGIR	

* Para cada tramo de 200 m o fracción en cada franja de tendido

Para calcular el factor promedio de estímulo o sanción (F) se puede utilizar el formato que se muestra en la TABLA 2.4.4-4, en el que, para cada franja de tendido y subtramo, se anota el factor de estímulo o sanción (Fj) tomado de la TABLA 2.4.4-2, de acuerdo con el índice de perfil (Ip) obtenido de la TABLA 2.4.4-1 y se calcula el promedio aritmético de todos los factores de estímulo o sanción (Fj) de cada tramo, que se anota en la última columna del formato, en el cuadro correspondiente. Para subtramos que hayan sido corregidos, el factor de estímulo o sanción (Fj) correspondiente se determina con base en el índice de perfil (Ipc) logrado después de la corrección. Si el tramo tiene más de dos (2)

⁶⁰ Normas SCT, op. cit., nota 52, p. 27.

franjas de tendido, al formato se le agregan las columnas que sean necesarias para completar el número de franjas de tendido.

Asimismo, para calcular el estímulo o la sanción (E) de cada tramo, se puede usar la TABLA 2.4.4-3, en la que se anotan los factores promedio de estímulo o sanción (F) correspondientes, calculados en la TABLA 2.4.4-4.

TABLA 2.4.4-3: Formato para el cálculo de los volúmenes, los estímulos o sanciones y los importes a pagar⁶¹

Tramo ⁶²		L	ē	ā	V	PU	Importe	F	E
del km	al km	m	M	m	m ³	\$	\$ ⁶³		\$
+	+								
+	+								
+	+								
+	+								
+	+								

Sumas = \$ \$
 Importe total= \$

Dónde:

L = Longitud del tramo correspondiente

ē= Espesor promedio del tramo correspondiente (espesor de proyecto más 1 cm como máximo)

ā= Ancho promedio del tramo correspondiente (ancho de proyecto más 1 cm como máximo)

⁶¹ Normas SCT, op. cit., nota 52, p. 25.

⁶² Tramo de 1 km o fracción.

⁶³ Importe de la carpeta asfáltica con mezcla en caliente (Importe = V x PU)

V = Volumen del tramo correspondiente ($V = L \times e \times a$)

PU = Precio unitario de la carpeta asfáltica con mezcla en caliente

F = Factor promedio de estímulo o sanción del tramo correspondiente, obtenido de la TABLA 2.4.4-4.

E = Estímulo o sanción del tramo correspondiente ($E = V \times PU \times F$)

TABLA 2.4.4-4: Formato para el cálculo del factor promedio de estímulo o sanción de cada tramo⁶⁴

MES		AÑO								
Tramo ⁶⁵		Subtramo ⁶⁶		Franja de tendido 1			Franja de tendido 2			F
del km	al km	del km	al km	Día	lp cm/km	Fj	Día	lp cm/km	Fj	
+ _____	+ _____	+ _____	+ _____							
		+ _____	+ _____							
		+ _____	+ _____							
		+ _____	+ _____							
		+ _____	+ _____							

lp = Índice de perfil del subtramo y franja de tendido correspondientes, obtenido de la TABLA 2.4.4-1. Para subtramos que hayan sido corregidos, se utiliza el índice de perfil (Ipc) logrado después de la corrección

⁶⁴ Normas SCT, op. cit., nota 49, p. 28.

⁶⁵ Tramo de 1 km o fracción.

⁶⁶ Subtramo de 200 m o fracción.

F_j = Factor de estímulo o sanción para el subtramo y franja de tendido correspondientes, obtenido de la TABLA 2.4.4-2.

F = Factor promedio de estímulo o sanción. Promedio aritmético de los F_j del tramo correspondiente. (Normas SCT, N-CTR-CAR-1-04-006 2009)

III. CONCLUSIÓN

La búsqueda de la calidad es un proceso constante, de mejora continua, con los avances de la tecnología la construcción de carpetas asfálticas se ha vuelto cada vez más eficaz y eficiente, mejorando los tiempos y los rendimientos durante la obra. Sin embargo, nunca se debe dejar de lado la calidad.

La información contenida en este trabajo, permite al usuario acceder de manera rápida a los rangos y valores aceptables, así como a los procesos de verificación de la calidad de una mezcla asfáltica, para la construcción de carreteras.

Es importante señalar que un correcto control de la calidad, tanto de los materiales como de los procesos, durante las diferentes etapas de fabricación y tendido de una mezcla asfáltica, se evitará problemas de rechazos por baja de calidad que resultan en costos adicionales y mayores tiempos de entrega que reducen el margen de utilidad de una obra.

Así mismo, resaltar la importancia de mantener un laboratorio bien equipado de manera permanente en la obra, con el personal debidamente capacitado en las pruebas que aquí se mencionaron y en el resultado de estas para detectar defectos en el proceso de fabricación y tendido de carpetas asfálticas de granulometría densa mezcladas en caliente.

El personal de obra debe conocer en todo momento la calidad de los materiales que se están utilizando, de la mezcla asfáltica que se está produciendo y tendiendo y de la carpeta asfáltica una vez tendida. Y saber interpretar los resultados de las pruebas realizadas por el laboratorio.

Por lo que una retroalimentación adecuada de ambos equipos de trabajo es fundamental, a fin de detectar oportunamente cualquier deficiencia en la calidad que permita corregir inmediatamente el problema y así evitar sobrecostos.

De igual manera, el personal representante de la dependencia así como de la supervisión de obra, deberán estar informados de los resultados de las pruebas de calidad que ellos mismos realicen, para corroborar los resultados de la contratista y exigir un producto terminado de la más alta calidad.

Una de las pruebas más importantes es la extracción de núcleos de la carpeta asfáltica, ya que de esta se obtienen múltiples valores, como el contenido de asfalto, la granulometría, la compactación y el espesor de carpeta. Además de ser una prueba rápida para algún tipo de auditoría por parte de la dependencia, ya que se puede realizar tiempo después de terminados los trabajos.

La prueba del espesor de la carpeta permite confirmar los datos obtenidos por los niveles topográficos, que son utilizados para generar los volúmenes de obra a cobrar a la dependencia y esto representa el dinero, que es el objetivo de cualquier empresa constructora.

BIBLIOGRAFÍA

- Normas SCT, M-MMP-4-04-002. *Granulometría de materiales pétreos para mezclas asfálticas*. México D.F.: Instituto Mexicano del Transporte, 2002.
- Normas SCT, M-MMP-4-04-003. *Densidad relativa de materiales pétreos para mezclas asfálticas*. México D.F.: Instituto Mexicano del Transporte, 2002.
- Normas SCT, M-MMP-4-04-004. *Equivalente de arena de materiales pétreos para mezclas asfálticas*. México D.F.: Instituto Mexicano del Transporte, 2002.
- Normas SCT, M-MMP-4-04-005. *Partículas alargadas y lajeadas de materiales pétreos para mezclas asfálticas*. México D.F.: Instituto Mexicano del Transporte, 2008.
- Normas SCT, M-MMP-4-04-006. *Desgaste mediante la prueba de Los Ángeles de materiales pétreos para mezclas asfálticas*. México D.F.: Instituto Mexicano del Transporte, 2002.
- Normas SCT, M-MMP-4-04-008. *Intemperismo acelerado de materiales pétreos para mezclas asfálticas*. México D.F.: Instituto Mexicano del Transporte, 2003.
- Normas SCT, M-MMP-4-04-009. *Desprendimiento por fricción de materiales pétreos para mezclas asfálticas*. México D.F.: Instituto Mexicano del Transporte, 2003.
- Normas SCT, M-MMP-4-04-010. *Cubrimiento con asfalto mediante el método inglés de materiales pétreos para mezclas asfálticas*. México D.F.: Instituto Mexicano del Transporte, 2003.

- Normas SCT, M-MMP-4-05-004. *Viscosidad Saybolt-Furol en materiales asfálticos*. México D.F.: Instituto Mexicano del Transporte, 2000.
- Normas SCT, M-MMP-4-05-006. *Penetración en cementos y residuos asfálticos*. México D.F.: Instituto Mexicano del Transporte, 2000.
- Normas SCT, M-MMP-4-05-007. *Punto de inflamación Cleveland en cementos asfálticos*. México D.F.: Instituto Mexicano del Transporte, 2000.
- Normas SCT, M-MMP-4-05-009. *Punto de reblandecimiento en cementos asfálticos*. México D.F.: Instituto Mexicano del Transporte, 2000.
- Normas SCT, M-MMP-4-05-011. *Ductilidad de cementos y residuos asfálticos*. México D.F.: Instituto Mexicano del Transporte, 2000.
- Normas SCT, M-MMP-4-05-012. *Destilación de emulsiones asfálticas*. México D.F.: Instituto Mexicano del Transporte, 2000.
- Normas SCT, M-MMP-4-05-042. *Pérdida de estabilidad por inmersión en agua de mezclas asfálticas*. México D.F.: Instituto Mexicano del Transporte, 2003.
- Normas SCT, M-MMP-4-07-002. *Índice de perfil*. México D.F.: Instituto Mexicano del Transporte, 2006.
- Normas SCT, N-CMT-4-04. *Materiales pétreos para mezclas asfálticas*. México D.F.: Instituto Mexicano del Transporte, 2008.
- Normas SCT, N-CMT-4-05-001. *Calidad de materiales asfálticos*. México D.F.: Instituto Mexicano del Transporte, 2006.
- Normas SCT, N-CTR-CAR-1-04-006. *Carpetas asfálticas con mezcla en caliente*. México D.F.: Instituto Mexicano del Transporte, 2009.