



Universidad de San Carlos de Guatemala  
Facultad de Ingeniería  
Escuela de Ingeniería Civil

**CAMBIOS FÍSICOS, MECÁNICOS Y VOLUMÉTRICOS EN LA MEZCLA  
ASFÁLTICA EN CALIENTE TIPO E, POR EL MÉTODO MARSHALL PARA  
LABORATORIO**

**Rigoberto Velasco Campos**

Asesorado por el Ing. Yefry Valentín Rosales Juárez

Guatemala, noviembre de 2016

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**CAMBIOS FÍSICOS, MECÁNICOS Y VOLUMÉTRICOS EN LA MEZCLA  
ASFÁLTICA EN CALIENTE TIPO E, POR EL MÉTODO MARSHALL PARA  
LABORATORIO**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
POR

**RIGOBERTO VELASCO CAMPOS**

ASESORADO POR EL ING. YEFRY VALENTÍN ROSALES JUÁREZ

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

**INGENIERO CIVIL**

GUATEMALA, NOVIEMBRE DE 2016

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE INGENIERÍA



**NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA**

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL I	Ing. Angel Roberto Sic García
VOCAL II	Ing. Pablo Christian de León Rodríguez
VOCAL III	Inga. Elvia Miriam Ruballos Samayoa
VOCAL IV	Br. Raúl Eduardo Ticún Córdova
VOCAL V	Br. Henry Fernando Duarte García
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

**TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO**

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
EXAMINADOR	Ing. Luis Manuel Sandoval Mendoza
EXAMINADOR	Ing. Daniel Alfredo Cruz Pineda
EXAMINADOR	Ing. Guillermo Francisco Melini Salguero
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

## **HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR**

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

### **CAMBIOS FÍSICOS, MECÁNICOS Y VOLUMÉTRICOS EN LA MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE TIPO E, POR EL MÉTODO MARSHALL PARA LABORATORIO**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Civil, con fecha 15 de abril de 2015.

**Rigoberto Velasco Campos**

Guatemala viernes 02 de agosto de 2016

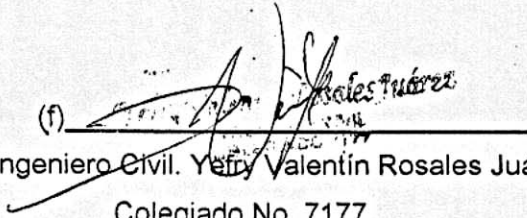
Ingeniero  
José Gabriel Ordoñez Morales  
Area de Materiales de Construcción Civiles  
COORDINADOR

Ingeniero Ordoñez

Me dirijo a usted para informarle, que he revisado el trabajo de graduación:  
**CAMBIOS FÍSICOS, MECÁNICOS Y VOLUMÉTRICOS EN LA MEZCLA  
ASFÁLTICA EN CALIENTE TIPO E, POR EL MÉTODO MARSHALL PARA  
LABORATORIO**, elaborado con el estudiante universitario Rigoberto Velasco  
Campos, quien conto con la asesoría del suscrito.

Considerando que el trabajo desarrollado por el estudiante universitario  
Rigoberto Velasco Campos, satisface los requisitos exigidos en el reglamento de  
graduación, por lo cual recomiendo su aprobación.

Atentamente,

  
(f) Yefry Valentín Rosales Juárez  
Ingeniero Civil. Yefry Valentín Rosales Juárez  
Colegiado No. 7177  
Asesor





**USAC**  
TRICENTENARIA  
Universidad de San Carlos de Guatemala

<http://civil.ingenieria.usac.edu.gt>

Universidad de San Carlos de Guatemala  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
Escuela de Ingeniería Civil



Guatemala,  
07 de octubre de 2016

Ingeniero  
Hugo Leonel Montenegro Franco  
Director Escuela Ingeniería Civil  
Facultad de Ingeniería  
Universidad de San Carlos

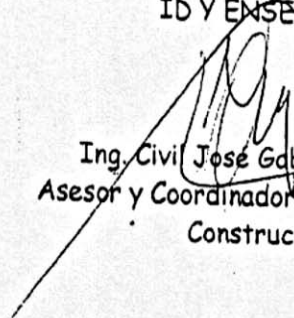
Estimado Ingeniero Montenegro.

Le informo que he revisado el trabajo de graduación **CAMBIOS FÍSICOS, MECÁNICOS Y VOLUMÉTRICOS EN LA MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE TIPO E, POR EL MÉTODO MARSHALL, PARA LABORATORIO** desarrollado por el estudiante de Ingeniería Civil Rigoberto Velasco Campos quien contó con la asesoría del Ing. Yefry Valentín Rosales Juárez.

Considero este trabajo bien desarrollado y representa un aporte para la comunidad del área y habiendo cumplido con los objetivos del referido trabajo doy mi aprobación al mismo solicitando darle el trámite respectivo.

Atentamente,

ID Y ENSEÑAD A TODOS

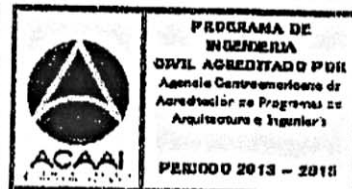
  
Ing. Civil José Gabriel Ordóñez Morales  
Asesor y Coordinador del Área de Materiales y  
Construcciones Civiles



FACULTAD DE INGENIERIA  
AREA DE MATERIALES Y  
CONSTRUCCIONES CIVILES  
USAC

/mrrm.

Mas de 134 años de Trabajo Académico y Mejora Continua







**USAC**  
TRICENTENARIA  
Universidad de San Carlos de Guatemala

<http://civil.ingenieria.usac.edu.gt>

Universidad de San Carlos de Guatemala  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
Escuela de Ingeniería Civil



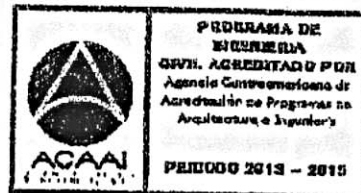
El director de la Escuela de Ingeniería Civil, después de conocer el dictamen del Asesor Ing. Yefry Valentín Rosales Juárez y del Coordinador del Departamento de Materiales y Construcciones Civiles Ing. José Gabriel Ordóñez Morales, al trabajo de graduación del estudiante Rigoberto Velasco Campos, titulado **CAMBIOS FÍSICOS, MECÁNICOS Y VOLUMÉTRICOS EN LA MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE TIPO E, POR EL MÉTODO MARSHALL PARA LABORATORIO**, da por este medio su aprobación a dicho trabajo.

  
Ing. Hugo Leonel Montenegro Franco



Guatemala, noviembre 2016  
/mrrm.

Mas de 134 años de Trabajo Académico y Mejora Continua



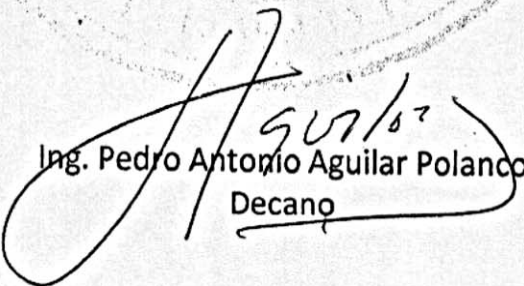




DTG. 552.2016

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Civil, al Trabajo de Graduación titulado: **CAMBIOS FÍSICOS, MECÁNICOS Y VOLUMÉTRICOS EN LA MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE TIPO E, POR MÉTODO MARSHALL PARA LABORATORIO**, presentado por el estudiante universitario: **Rigoberto Velasco Campos**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:

  
Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco  
Decano

Guatemala, noviembre de 2016

/gdech





## **ACTO QUE DEDICO A:**

### **Dios Padre Jehová**

Por brindarme la vida, bendiciones, triunfos, metas alcanzadas; ser la influencia más importante en mi vida; ser mi fortaleza en los tiempos difíciles; estar conmigo en todo momento y por darme la inteligencia para salir adelante. Ya que de Él proviene toda ciencia.

### **Mi madre**

Ana Verónica Campos Morales: por cumplir el papel de padre, madre, maestra y mi mejor amiga en el transcurso de mi vida.

### **Mi abuela**

Irma Horta: por contar con su cariño y comprensión en los momentos oportunos de mi existencia.

### **Mi esposa**

Silvia Patricia Alvarado Cabrera: por estar a mi lado apoyándome incondicionalmente con su amor, como mi amiga y pareja.

### **Mi hijo**

Rigoberto Velazco Alvarado: por ser mi motivo para superarme todos los días y tratar de ser un buen ejemplo a seguir para él.

**Mis hermanos**

Escarleth Andrea Velazco Campos, Erick Javier Velazco Campos y Jessica Paola Velazco Campos.

**Mi primo**

Carlos Alejandro Andrino Velazco: por ser parte de mi vida y ser como un hermano.



## **AGRADECIMIENTOS A:**

<b>Universidad de San Carlos de Guatemala</b>	Por permitirme adquirir conocimientos y enseñarme el orgullo de ser san carlista.
<b>Facultad de Ingeniería</b>	Por brindarme las herramientas académicas e intelectuales para desempeñarme como un profesional en mi vida laboral.
<b>Laboratorio de Suelos</b>	Por los conocimientos adquiridos en el área de geotecnia en mi estadía académica en la Universidad de San Carlos de Guatemala.
<b>Laboratorio de Asfaltos</b>	Por los conocimientos adquiridos en el área de aglomerantes y asfaltos en la estadía académica en la Universidad de San Carlos de Guatemala.
<b>Los ingenieros docentes de la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad de San Carlos de Guatemala.</b>	Por transmitirme sus conocimientos y enseñanzas, pero de manera especial a los ingenieros Omar Enrique Medrano Méndez y Yefri Valentín Rosales Juárez.

**Auxiliares y laboratoristas** Byron García, José Istupe, Moisés Mejía y Mynor Castillo.

**Mis amigos** Danilo Alejandro Melgar Rodas, Gabriel Estuardo Ocampo Pérez, Jonathan Armando Leiva, José Gerardo Hernández, Juan Manuel Castañeda Vásquez, Manuel Monterrosa y Marvin Tejeda.

**Mis amigos de la Facultad de Ingeniería** Antonio José Jurado Godoy, Carlos Humberto Rosales, Eduardo Román Tirado Pérez, Douglas Montenegro, Eli Samuel Pérez Ramírez, Juan Fernando Andrino Rodríguez y Julia Rosaura Gómez Maxia.



## ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	V
LISTA DE SÍMBOLOS .....	VII
GLOSARIO .....	IX
RESUMEN.....	XIII
OBJETIVOS.....	XV
INTRODUCCIÓN.....	XVII
1. CONCRETO ASFÁLTICO .....	1
1.1. Concreto asfáltico en caliente.....	1
1.2. Mezclas asfálticas densas .....	1
1.3. Agregados gruesos .....	2
1.4. Agregados finos.....	2
1.5. Llenante mineral .....	2
1.6. Bitumen .....	3
2. EXTRACCIÓN CUANTITATIVA DEL ASFALTO EN MEZCLAS EN CALIENTE PARA PAVIMENTOS .....	5
2.1. Objeto.....	5
2.2. Resumen del método de ensayo .....	5
2.3. Uso y significado .....	6
2.4. Equipo .....	6
2.5. Preparación de la muestra.....	13
2.6. Humedad.....	14
2.7. Procedimiento.....	14
2.8. Método de centrifugación .....	15

2.9.	Ecuación para el cálculo del contenido de asfalto.....	16
3.	GRAVEDAD ESPECÍFICA BULK Y DENSIDAD DE MEZCLAS ASFÁLTICAS COMPACTADAS NO ABSORBENTES EMPLEANDO ESPECÍMENES SATURADOS Y SUPERFICIE SECA .....	19
3.1.	Objeto.....	19
3.2.	Resumen del método de ensayo.....	20
3.3.	Uso y significado .....	20
3.4.	Muestras .....	21
3.5.	Especímenes para ensayo.....	21
3.6.	Equipo .....	22
3.7.	Procedimiento .....	24
3.8.	Ecuación para el cálculo de la gravedad específica bulk .....	25
4.	GRAVEDAD ESPECÍFICA MÁXIMA TEÓRICA (GMM) Y DENSIDAD DE MEZCLAS ASFÁLTICAS PARA PAVIMENTOS .....	27
4.1.	Objeto.....	27
4.2.	Resumen del método de ensayo.....	27
4.3.	Uso y significado .....	28
4.4.	Equipo .....	28
4.5.	Procedimiento .....	34
4.6.	Ecuación para el cálculo de la gravedad específica máxima teórica .....	37
5.	PORCENTAJE DE VACÍOS DE AIRE EN MEZCLAS ASFÁLTICAS COMPACTADAS DENSAS Y ABIERTAS.....	39
5.1.	Objeto.....	39
5.2.	Uso y significado .....	39
5.3.	Toma de muestra .....	40



5.4.	Procedimiento.....	40
5.5.	Cálculos.....	41
6.	RESISTENCIA DE MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE EMPLEANDO EL APARATO MARSHALL .....	43
6.1.	Objeto.....	43
6.2.	Resumen del método de ensayo.....	44
6.3.	Equipo y materiales necesarios.....	44
6.4.	Ensayo de estabilidad y flujo .....	56
7.	ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DE LOS AGREGADOS EXTRAÍDOS DE MEZCLAS ASFÁLTICAS .....	59
7.1.	Objeto.....	59
7.2.	Uso y significado .....	59
7.3.	Equipo .....	60
7.4.	Muestra.....	60
7.5.	Procedimiento.....	60
7.6.	Informe .....	63
7.7.	Precisión y tolerancia .....	64
7.8.	Ecuaciones para determinar la granulometría de los agregados extraídos de mezclas asfálticas.....	65
8.	CÁLCULOS .....	67
8.1.	Alturas y diámetros por espécimen o cilindros asfáltico de ensayo.....	67
8.2.	Extracción cuantitativa del asfalto en mezclas en caliente para pavimentos .....	80
8.3.	Gravedad específica bulk y densidad de la mezcla asfáltica... 81	

8.4.	Gravedad específica máxima teórica y densidad de mezclas asfálticas para pavimentos .....	84
8.5.	Porcentaje de vacíos de aire en la mezcla compactada respecto al volumen del espécimen .....	85
8.6.	Resistencia de mezclas asfálticas en caliente empleando el aparato Marshall .....	87
8.7.	Análisis granulométrico de los agregados extraídos de mezclas asfálticas .....	94
9.	TABLAS DE RESUMEN .....	95
	CONCLUSIONES.....	101
	RECOMENDACIONES .....	103
	BIBLIOGRAFÍA.....	105
	APÉNDICES.....	107
	ANEXOS.....	123

## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

### FIGURAS

1.	Horno.....	7
2.	Balanza.....	8
3.	Estufa eléctrica de temperatura ajustable .....	9
4.	Cilindros graduados .....	10
5.	Centrifugadora.....	11
6.	Anillos filtrantes .....	12
7.	Balanza electrónica provista de un dispositivo de suspensión.....	23
8.	Baño de agua para inmersión .....	24
9.	Picnómetro de acero .....	30
10.	Bomba de vacío .....	31
11.	Válvula de escape.....	32
12.	Guantes protectores.....	33
13.	Dispositivo para agitación mecánica .....	34
14.	Martillo de compactación.....	45
15.	Pedestal de compactación .....	46
16.	Sujetador para molde .....	47
17.	Dispositivo para moldear probetas .....	48
18.	Mordazas .....	49
19.	Medidor de deformación.....	50
20.	Medidor de la estabilidad .....	51
21.	Placa de calefacción .....	52
22.	Tanque para agua .....	52
23.	Tanque para agua controlado .....	53

24.	Tamices .....	54
25.	Termómetro blindado.....	55
26.	Probetas identificadas.....	56

## TABLAS

I.	Tamaño de la muestra .....	13
II.	Precisión para análisis granulométrico .....	64
III.	Resumen de resultados del ensayo del contenido de bitumen .....	80
IV.	Análisis granulométrico de los agregados extraídos de mezclas asfálticas I.....	94
V.	Análisis granulométrico de los agregados extraídos de mezclas asfálticas II.....	94
VI.	Extracción cuantitativa del asfalto en mezclas en caliente para pavimentos .....	95
VII.	Gravedad específica bulk y densidad de la mezcla asfáltica .....	95
VIII.	Gravedad específica máxima teórica y densidad de mezclas asfálticas para pavimentos .....	96
IX.	Porcentaje de vacíos de aire en la mezcla compactada respecto al volumen del espécimen .....	96
X.	Resistencia de mezclas asfálticas en caliente empleando el aparato Marshall .....	97
XI.	Análisis granulométrico I de los agregados extraídos de mezclas asfálticas.....	98
XII.	Análisis granulométrico II de los agregados extraídos de mezclas asfálticas.....	98
XIII.	Resumen de promedios.....	99



## LISTA DE SÍMBOLOS

<b>Símbolo</b>	<b>Significado</b>
<b>%AC</b>	Porcentaje de bitumen asfáltico.
<b>%G<sub>mm</sub></b>	Grado de compactación del espécimen, expresado como un % de la gravedad máxima teórica, aquella en la que no se tienen en cuenta los vacíos entre agregados cubiertos con asfalto, condición teórica de $V_a = 0$ .
<b>%Pasa</b>	Porcentaje de material que pasa en cada tamiz.
<b>%Ret.</b>	Porcentaje de peso retenido en cada tamiz.
<b>%Ret. ac.</b>	Porcentaje de peso retenido acumulado en cada tamiz.
<b>°C</b>	Grados Celsius.
<b><math>\phi</math></b>	Diámetro del espécimen o diámetro del cilindro asfáltico de ensayo.
<b>A</b>	Masa del espécimen seco al horno en el aire, en gramos.
<b>B</b>	Masa en el aire del espécimen saturado y superficie seca en gramos.
<b>B – C</b>	Masa del volumen de agua correspondiente al volumen del espécimen a 25°C dado en $\text{cm}^3$ .
<b>cm</b>	Centímetro.
<b>C</b>	Masa del espécimen en el agua en gramos.
<b>D</b>	Masa del recipiente lleno con agua a 25°C (77°F) en gramos.

<b>E</b>	Masa del recipiente lleno con agua y la muestra a 25°C (77°F) en gramos.
<b>g</b>	Gramo.
<b><math>G_{mb}</math></b>	Gravedad específica bulk de espécimen compactado.
<b><math>G_{mm}</math></b>	Gravedad específica máxima teórica.
<b>h</b>	Altura del espécimen o cilindro asfáltico de ensayo.
<b>in</b>	Pulgada.
<b>mm</b>	Milímetro.
<b>lbs</b>	Libra.
<b><math>P_b</math></b>	Peso bruto de material de la mezcla sin asfalto.
<b><math>P_{ne}</math></b>	Peso neto de material de la mezcla sin asfalto.
<b><math>P_{BR}</math></b>	Peso bruto retenido, acumulado de material en cada tamiz.
<b><math>P_{NR}</math></b>	Peso neto retenido individual en cada tamiz.
<b><math>V_a</math></b>	Porcentaje de vacíos de aire en la mezcla compactada respecto al volumen del espécimen.
<b><math>W_1</math></b>	Masa de la porción del ensayo.
<b><math>W_2</math></b>	Masa de agua en la porción de ensayo.
<b><math>W_3</math></b>	Masa del agregado mineral extraído.
<b><math>W_4</math></b>	Masa de la materia mineral en el extracto.

## GLOSARIO

<b>AASHTO</b>	Siglas que corresponden a la entidad americana <i>American Association for State Highway and Transportation Official</i> .
<b>Asfalto</b>	Material que puede variar de sólido a semisólido conforme a la temperatura, además de ser un material de color negro cuyos componentes son extraídos de la destilación del petróleo o de bituminosos naturales.
<b>ASTM</b>	Siglas que corresponden a la entidad <i>American Society For Testing And Materials</i> .
<b>Bitumen</b>	Sustancia cementante de color oscuro, artificial o natural, es típico de las breas y betunes, utilizados normalmente para la fabricación de asfaltos.
<b>Carpeta asfáltica</b>	Capa de pavimento flexible, rígido y semirrígido destinado a la protección de las capas inferiores y la circulación vehicular; además, brinda seguridad y comodidad a los usuarios de una vía terrestre pavimentada.
<b>Cemento asfáltico</b>	Utilizado en la mayor parte en la fabricación de mezclas asfálticas en caliente ya que para ser

trabajado es necesario su calentamiento, se obtiene por la refinación de residuos de petróleo provenientes de los aceites y los combustibles, los cuales sirven de aglutinante en el concreto asfáltico.

<b>Compactación</b>	Acción de comprimir o compactar una masa determinada de un material a una densidad requerida.
<b>Concreto asfáltico</b>	Mezcla en caliente compactada de masa densa y uniforme, constituida de cemento asfáltico con agregados de alta calidad bajo condiciones controladas.
<b>Densidad bulk</b>	Es la masa por unidad de volumen a una determinada temperatura. En el caso de una mezcla compactada es igual a la gravedad específica bulk, multiplicada por la densidad del agua a la temperatura en que se determinó la gravedad específica bulk, generalmente 25° C.
<b>Ductilidad</b>	Capacidad de una sustancia para ser estirada o estrechada en forma delgada.
<b>Estabilidad</b>	Capacidad de una mezcla asfáltica de resistir deformación bajo cargas aplicadas.



<b>Fluencia</b>	Capacidad de una mezcla asfáltica de acomodarse a los asentamientos en presencia de una carga aplicada.
<b>Gravedad específica</b>	Es la relación entre una masa dada de material a 25° C (77° F) y la masa de un volumen con igual de agua a la misma temperatura.
<b>Gravedad específica bulk</b>	Es la relación entre la masa (peso en el aire), de un volumen dado de material a una determinada temperatura, generalmente a 25°C para mezclas asfálticas, y la masa de un volumen con igual de agua destilada, libre de gas, a la misma temperatura. Su valor es adimensional.
<b>Gravedad específica máxima teórica</b>	Es la relación entre la masa (o peso en el aire) de un volumen de mezcla sin compactar, (sin tener en cuenta los vacíos que quedan entre las partículas recubiertas con asfalto) y la masa de un volumen con igual de agua a una temperatura establecida. Su valor es adimensional.
<b>Mezcla asfáltica densa</b>	En Guatemala este es el tipo de mezcla que se utiliza y se define como: una mezcla asfáltica en la cual, una vez compactada los vacíos con aire son menores del 10 %.
<b>Pavimento</b>	Se define como la estructura principal de una carretera pavimentada, la cual, es colocada sobre la

sub rasante y está constituida por tres partes principales la sub base, base y la carpeta de rodadura. La función principal del pavimento es soportar y distribuir la carga vehicular al suelo para evitar deformaciones.

**Pavimento flexible** Es el pavimento que tiene en su parte superior una carpeta bituminosa, apoyada sobre dos capas granulares denominadas base y sub base.

**Presión residual** Es la presión que se aplica en un frasco de vacío.

**Trabajabilidad** Es descrita por la facilidad con que una mezcla asfáltica de pavimento, puede ser colocada o compactada.

**Vacíos de aire** Se definen como las bolsas de aire, que se encuentran dispersas entre las partículas de agregados cubiertos por asfalto, en una mezcla asfáltica compactada.

## RESUMEN

En el presente estudio se caracterizan y describen los cambios que pueden suceder en una mezcla asfáltica en caliente tipo “E”, en los aspectos físicos, mecánicos y volumétricos.

Tomando en cuenta las normas sobre el control de calidad internacional: *American Section of the International Association for Testing Materials (ASTM)*, *American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO)* y el Instituto Nacional de Vías Colombianas (I.N.V.), donde los análisis realizados son: gravedad específica bulk, gravedad específica máxima teórica, densidad de la mezcla asfáltica, porcentaje de vacíos de aire en mezclas bituminosas densas y abiertas, porcentaje de extracción de asfalto y ensayo marshall rotura.

Los resultados obtenidos determinaron la calidad del concreto asfáltico tipo “E” conforme a la muestra en diferentes temperaturas, teniendo en cuenta que la mínima temperatura es de 85°C, lo cual, indica las especificaciones generales para la construcción de carreteras y puentes en la sección 401, correspondiente a pavimento de concreto asfáltico en caliente en Guatemala.

Arriesgándose a tomar una temperatura inferior a la temperatura que según dan las especificaciones de nuestro país, por razones de conveniencia y manejar muestras desde 80°C hasta una temperatura de 180°C, en fracciones de 10°C.





## **OBJETIVOS**

### **General**

Tomar en cuenta y fijar un rango de temperaturas, verificando cómo se comportan los agregados del concreto asfáltico, y cuáles son sus ventajas y desventajas en los valores fuera del rango estipulado.

### **Específicos**

1. Verificar, estudiar y apuntar el comportamiento del porcentaje de vacíos, en el rango estipulado y comparar los datos obtenidos en los demás ensayos respecto al porcentaje de vacíos.
2. Se pretende tomar en cuenta, valores como la estabilidad y el flujo para observar y apuntar el comportamiento a las diferentes temperaturas en el rango aceptable estipulado, siempre según las normativas correspondientes.
3. Observar los cambios volumétricos de los especímenes compactados, verificando su comportamiento, para futuros estudios.
4. Estudiar los cambios físicos y volumétricos en los especímenes, con el método necesario; y si existieran más de un método hacer la respectiva comparación, para concluir cual es el más adecuado para utilizar.



## INTRODUCCIÓN

Las mezclas asfálticas de pavimento o concreto asfáltico flexible, son la relación entre el asfalto y sus agregados combinados, donde la proporción de sus agregados determinan las propiedades físicas mecánicas y volumétricas de la mezcla.

Posteriormente, dichos materiales también son esenciales en el desempeño del pavimento ya finalizado para una red vial. Por su importancia, en la actualidad se ha tenido que elaborar asfaltos que cumplan con diferentes estándares de calidad, para que sean confiables y competitivos.

Por esa razón se pretende realizar el presente estudio, para determinar las características de una mezcla asfáltica y sus cambios físicos, mecánicos y volumétricos en diferentes temperaturas de colocación en el laboratorio con el respaldo las normas correspondientes al tema como los son: *American Section of the International Association for Testing Materials (ASTM)*, *American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO)* y el Instituto Nacional de Vías Colombianas (I.N.V.). Estas normas son de gran respaldo tanto nacional como internacionalmente; indican cómo se debe realizar el ensayo para la muestra asfáltica detalladamente.

En los resultados mediante el análisis de laboratorio para el tema, se pretende encontrar un mejor aprovechamiento del concreto flexible, a la hora de su colocación mediante los parámetros que se puedan obtener, así como la elaboración de un documento, que caracterice y describa el comportamiento del asfalto; conforme a las pruebas a realizar en los diferentes cambios de

temperatura y de colocación ya mencionados, teniendo en cuenta también los inconvenientes que se puedan presentar durante dichas pruebas.

# **1. CONCRETO ASFÁLTICO**

El concreto asfáltico está conformado por una mezcla de agregados gruesos, finos, llenante mineral y bitumen los cuales deben llenar una lista de requerimientos, depende al uso o aplicación para el cual son diseñados.

## **1.1. Concreto asfáltico en caliente**

Son producidas por el calentamiento del aglutinante asfáltico, lo que disminuye su viscosidad, y permite mezclar el material con el agregado de áridos. La mezcla se realiza a 150 °C para el asfalto puro, y a 160 °C si el asfalto está modificado con polímeros. La extensión y el compactado tienen que realizarse mientras el material está caliente. En muchos países el asfalto se restringe a los meses de calor porque en invierno la base compactada puede estar demasiado fría para realizar la operación. Es el material más empleado en carreteras, autopistas, aeropuertos y pistas de carreras.

## **1.2. Mezclas asfálticas densas**

También conocidas como mezclas cerradas, y se cataloga por el porcentaje de vacíos que tiene la mezcla asfáltica que puede variar entre 3 % y 5 %, lo cual se encuentra estipulado en las Especificaciones Generales para la Construcción de Carreteras y Puentes, sección 401, tabla 401-12.

### **1.3. Agregados gruesos**

La retención de agregados en el tamiz Nro. 4 se le denomina agregados gruesos y se encuentra compuesta por roca o grave triturada, el cual, debe ser un material durable, lo más libre de polvo posible, ya que el polvo evita la adherencia de los agregados pétreos.

### **1.4. Agregados finos**

Agregados finos se le denomina al porcentaje de material retenido en el tamiz Nro. 200 el cual, consiste en arena natural, material triturado o una combinación de ambos, que deben ser granos limpios y duros de superficie rugosa, libre de arcilla y otros materiales que impidan la adherencia del asfalto.

### **1.5. Llenante mineral**

Se le denomina llenantes naturales a el concreto asfáltico con los siguientes materiales minerales inertes; polvo de piedra caliza, polvo de dolomita, cenizas de carbón, cemento los cuales deben estar secos y libres de otros materiales, se menciona además que no es requerido en todas las ocasiones el uso del concreto asfáltico.

## **1.6. Bitumen**

Es un aglomerante de color negro, el cual es viscoso, pegajoso o sólido según la temperatura del ambiente. Se utiliza su en la mayoría para la elaboración de mezclas asfálticas. Este se encuentra presente en el petróleo, y es la sustancia que constituye la fracción más pesada del petróleo crudo. Se encuentra en depósitos naturales como lagos asfáltites, pero la mayoría de su utilización es artificial, ya que son obtenidos con hidrocarburos no volátiles que permanecen después de refinar el petróleo para obtener combustibles y otras sustancias.





## **2. EXTRACCIÓN CUANTITATIVA DEL ASFALTO EN MEZCLAS EN CALIENTE PARA PAVIMENTOS**

La extracción cuantitativa del asfalto en mezclas en caliente para pavimentos, no es más que determinar cuantitativamente la cantidad de bitumen, pero el resultado de utilizar este u otros métodos, pueden variar conforme a la edad y calidad de los materiales.

### **2.1. Objeto**

Esta norma describe métodos para la determinación cuantitativa del asfalto en mezclas asfálticas en caliente y en muestras de pavimentos. Los agregados obtenidos mediante estos métodos se pueden emplear para un análisis granulométrico y otros tipos de ensayos.

Los valores establecidos en unidades del Sistema Internacional (SI) deben ser considerados como una norma.

Este método no pretende dar directrices sobre aspectos de seguridad asociados con su uso. Es responsabilidad de quien lo emplee, establecer las medidas de seguridad, salubridad apropiada y de determinar la aplicación de las limitaciones regulatorias antes de su empleo.

### **2.2. Resumen del método de ensayo**

El ligante de la mezcla se extrae con tricloroetileno, bromuro de n-propilo o cloruro de metileno, empleando el equipo de extracción aplicable al método

particular. El contenido de asfalto se calcula por diferencias a partir de las masas del agregado extraído, y del material mineral en el extracto. El contenido de asfalto se expresa como un porcentaje en masa, de las mezclas libres de humedad.

### **2.3. Uso y significado**

Se pueden emplear para hacer determinaciones cuantitativas de asfalto en mezclas en caliente: para pavimentos, para su aceptación, para su evaluación en servicio, para control de calidad y para investigaciones. El método prescribe el uso de solvente y cualquier otro reactivo que se pueda utilizar.

### **2.4. Equipo**

Es de gran importancia, utilizar el equipo adecuadamente, también es importante que se encuentre en buen estado para no afectar los resultados obtenidos en el ensaño.

Equipo a utilizar:

- Horno: que pueda mantener la temperatura a  $110^{\circ} \pm 5^{\circ} \text{ C}$ , ( $230^{\circ} \pm 9^{\circ} \text{ F}$ ).

Figura 1. Horno



Fuente: Laboratorio de Asfaltos de la Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala.

- Recipiente plano: de un tamaño apropiado, para calentar los especímenes.
- Balanza: con capacidad suficiente y con aproximación mínima de 0,1 % de la masa en la muestra.

Figura 2. **Balanza**



Fuente: Laboratorio de Asfaltos de la Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala.

- Placa de calentamiento: con velocidad de calentamiento ajustable y eléctrico.

Figura 3. **Estufa eléctrica de temperatura ajustable**



Fuente: Laboratorio de Asfaltos de la Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala.

- Cilindros graduados: de 1 000 o de 2 000 ml de capacidad. Opcionalmente, un cilindro de 100 ml de capacidad.

Figura 4. **Cilindros graduados**



Fuente: Laboratorio de Asfaltos de la Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala.

- Aparato de extracción: consistente en una taza y un aparato en el cual se pueda rotar la taza a una velocidad variable y controlada hasta de 3 600 rpm. El aparato debe estar provisto de un recipiente para recoger el solvente que escapa de la taza y un desagüe para remover dicho solvente. Es recomendable que el aparato disponga de accesorios protectores contra explosiones y estar instalado bajo una campana o con un sistema de desfogue superficial efectivo para asegurar la ventilación.



Figura 5. **Centrifugadora**



Fuente: Laboratorio de Asfaltos de la Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala.

- Anillos filtrantes: de fieltro o de papel, para colocar sobre el borde de la taza.

Figura 6. **Anillos filtrantes**



Fuente: Laboratorio de Asfaltos de la Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala.

Se pueden emplear anillos filtrantes de papel de poca ceniza en lugar de anillos filtrantes de fieltro. Dichos anillos de papel de poca ceniza deberán conformarse a partir de una pila de papel de poca ceniza, de  $1,27 \pm 0,03$  mm ( $0,05 \pm 0,005$ " ) de espesor. La masa nominal del papel deberá ser de  $150 \pm 14$  Kg ( $330 \pm 30$  lb) para una resma de (500 hojas de 635 x 965 mm (25" x 35")). El contenido de ceniza del papel no deberá exceder de 0,2 % (aproximadamente 0,034 g/anillo).

## 2.5. Preparación de la muestra

Se obtienen de acuerdo con la toma de muestras asfálticas de pavimentos.

Preparación de especímenes de ensayo:

- Si la mezcla no es suficientemente blanda para separarla con una espátula o palustre, se la coloca en una bandeja grande y plana y se calienta en el horno a  $110^{\circ} \pm 5^{\circ} \text{ C}$  ( $230^{\circ} \pm 9^{\circ} \text{ F}$ ) hasta que se pueda manejar o disgregar: el material se parte o cuartea hasta que se obtenga la masa de material requerida para el ensayo ( $W_1$ ).
- La cantidad de la muestra para el ensayo se determinará según el tamaño máximo nominal del agregado en la mezcla, de acuerdo con la tabla I.

Tabla I. **Tamaño de la muestra**

Tamaño nominal máximo del agregado		Masa mínima de la muestra
Milímetros(mm)	Pulgadas (in)	Kilogramos (kg)
4,75	Nro.4	0,5
9,5	3/8 "	1,0
12,5	1/2 "	1,5
19,0	3/4 "	2,0
25,0	1 "	3,0
37,5	1 1/2 "	4,0

Fuente: Norma I.N.V. E – 732 – 07, Tabla I.

A menos que la muestra se encuentre libre de agua, se necesita una muestra adicional para la determinación de la humedad en las mezclas. Esta muestra se toma de la mezcla remanente inmediatamente después de obtener el espécimen para el ensayo de extracción.

## **2.6. Humedad**

Cuando se requiera, se debe determinar de acuerdo con el procedimiento descrito en la humedad o destilados volátiles en mezclas asfálticas para pavimentos.

La masa de agua ( $W_2$ ) en la porción del ensayo de extracción, se calcula multiplicando el porcentaje de la masa del agua, por la masa de la porción del ensayo de extracción ( $W_1$ ).

## **2.7. Procedimiento**

Se determina la humedad del material, luego se coloca la porción de ensayo en la taza y se cubre con tricloroetileno, cloruro de metileno, bromuro n-propilo o terpeno, dejándolo el tiempo suficiente para que el disolvente desintegre la porción de ensayo (no más de 1 hora). Se coloca la taza que contiene la porción de ensayo y el solvente en el aparato de extracción. Se seca a  $110^\circ \pm 5^\circ \text{ C}$  ( $230^\circ \pm 9^\circ \text{ F}$ ) y se determina la masa del anillo filtrante ajustando alrededor del borde de la taza. Se aprieta la tapa firmemente sobre la taza y se coloca un recipiente apropiado bajo el desagüe, para recoger el extracto.

Se inicia la centrifugación girando lentamente y aumentando gradualmente la velocidad hasta un máximo de 3 600 rpm, hasta que deje de fluir el solvente por el desagüe. Se detiene la máquina y se agregan 200 ml (o más, según sea apropiado para la masa de la muestra) del solvente empleado, y se repite el procedimiento.

Se deben emplear suficientes adiciones de solvente (no menos de tres), hasta que el extracto no sea más oscuro que un color ligero de paja. Se recoge

el extracto y las lavaduras en un recipiente apropiado, para determinar la materia mineral.

Se transfieren cuidadosamente el anillo filtrante y todo el agregado de la taza de la centrífuga a un recipiente metálico tarado. Se seca al aire bajo una campana hasta que se disipen los vapores y luego en un horno a  $110^{\circ} \pm 5^{\circ}\text{C}$ , hasta obtener la masa constante. La masa del agregado extraído ( $W_3$ ) es igual a la masa del contenido en el recipiente, menos el peso seco inicial del anillo filtrante. Se desprende la materia mineral adherida a la superficie del anillo filtrante y se añade al agregado extraído para los ensayos posteriores.

El siguiente procedimiento alternativo se debe aplicar cuando se usen anillos filtrantes que produzcan poca ceniza. Se coloca el agregado y los anillos de filtro en una cazuela metálica limpia y se secan como se especifica arriba. Se dobla cuidadosamente el anillo filtrante seco y se deja sobre el agregado. Se quema el anillo de filtro mediante ignición con un fósforo o un mechero bunsen: y por último se determina la masa del agregado extraído en la cazuela ( $W_3$ ).

## **2.8. Método de centrifugación**

En este método se emplea cualquier centrifugadora adecuada de alta velocidad de 3 000 rpm o mayor del tipo de flujo continuo, para encontrar el contenido de asfalto.

- Se determina la masa de una taza de centrifuga limpia y vacía con aproximación a 0,01 g y se coloca en la centrifugadora. Se coloca un recipiente en el desagüe para recoger el efluente de la operación de la centrifugadora. Se transfiere todo el extracto a un recipiente debidamente equipado con un control de alimentación (válvula o abrazadera, etc.) para

garantizar la transferencia cuantitativa del extracto al recipiente alimentador, el recipiente que contiene el extracto se deberá lavar varias veces con pequeñas cantidades de un solvente limpio y agregar las lavaduras al recipiente alimentador, se da inicio a la centrifugadora y se deja que alcance una velocidad constante (por ejemplo 9 000 revoluciones por minuto para las del tipo SMM y más de 20 000 revoluciones por minuto para las del tipo Sharples). Se abre la línea de alimentación y se alimenta el extracto dentro de la centrifugadora a una rata de 100 a 150 ml/min. Después de que haya pasado todo el extracto a través de la centrifugadora, se lava el mecanismo de alimentación con la centrifugadora todavía funcionando con varias adiciones de solvente limpio, permitiendo que cada incremento corra a través de la centrifugadora hasta que el efluente sea esencialmente incoloro.

- Se deja que la centrifugadora se detenga, se remueve la taza y se limpia su parte exterior con solvente nuevo. Se deja evaporar el solvente residual en un embudo o en una caperuza para vapor y luego se seca el recipiente en un horno controlado a  $110^{\circ} \pm 5^{\circ}\text{C}$  ( $230^{\circ} \pm 9^{\circ}\text{F}$ ). Se deja enfriar el recipiente y se vuelve a determinar inmediatamente la masa; el incremento en masa representa la masa de material mineral ( $W_4$ ) en el extracto.

## **2.9. Ecuación para el cálculo del contenido de asfalto**

Se calcula el porcentaje de asfalto sin tomar en cuenta la humedad ( $W_2$ ), por razones de que el ensayo fue realizado en la porción de ensayo, de la siguiente forma:

Si la finalidad del ensayo de extracción no es determinar el contenido de asfalto, sino recuperarlo de la mezcla para otros ensayos, no es necesario determinar la humedad de la mezcla asfáltica.

$$\%AC = \frac{(W_1 - W_2) - (W_3 + W_4)}{W_1 - W_2}$$





### **3. GRAVEDAD ESPECÍFICA BULK Y DENSIDAD DE MEZCLAS ASFÁLTICAS COMPACTADAS NO ABSORBENTES EMPLEANDO ESPECÍMENES SATURADOS Y SUPERFICIE SECA**

En el desarrollo y diseño de las mezclas asfálticas en caliente, una herramienta importante es la gravedad específica bulk, ya que este método es una de los instrumentos que permite determinar el porcentaje de vacíos en los especímenes compactados en laboratorio.

#### **3.1. Objeto**

Este método se refiere a la determinación de la gravedad específica bulk y densidad de especímenes de mezclas asfálticas compactadas.

Este método se deberá emplear únicamente con mezclas asfálticas compactadas de granulometría densa o que prácticamente no sean absorbentes. No se puede utilizar en especímenes de mezclas abiertas o con vacíos intercomunicados y que absorban más del 2 % de agua respecto al volumen.

La gravedad específica bulk de la mezcla asfáltica en caliente compactada se puede usar para el cálculo de masa unitaria o densidad de la mezcla.

Los valores deben expresarse en unidades SI.

Esta norma no considera los problemas de seguridad asociados con su uso. Es responsabilidad de quien la emplee establecer prácticas apropiadas de seguridad, salubridad y de determinar la aplicabilidad de limitaciones regulatorias antes de su empleo.

### **3.2. Resumen del método de ensayo**

El espécimen se sumerge en un baño de agua a 25°C y se anota su masa bajo el agua. Se seca rápidamente con un trapo húmedo y se pesa al aire. La diferencia entre las dos masas es empleada para medir la masa de un volumen igual de agua, preferiblemente a 25°C.

El método de ensayo proporciona una guía para la determinación de la masa del espécimen seco. La gravedad específica se calcula a partir de estas masas. La densidad se obtiene multiplicando la gravedad específica bulk del espécimen por la densidad del agua.

### **3.3. Uso y significado**

Este método es útil para calcular porcentaje de vacíos de aire en mezclas asfálticas compactadas densas y abiertas o en el análisis volumétrico de mezclas asfálticas en caliente, compactadas y la masa unitaria de mezclas asfálticas densas compactadas. Estos valores se pueden usar para determinar el grado relativo de compactación.

Como la gravedad específica es adimensional, es necesario convertirlo en densidad para los cálculos que requieran unidades. Esta conversión se efectúa multiplicando la gravedad específica a una temperatura dada, por la densidad del agua a la misma temperatura.

### **3.4. Muestras**

Los especímenes para ensayo pueden ser mezclas moldeadas en el laboratorio o mezclas de pavimentos asfálticos.

Los especímenes se tomarán del pavimento con barrena saca núcleos, sierra de diamante o de carborundo (carburo de silicio), o por otros medios convenientes.

### **3.5. Especímenes para ensayo**

Para el tamaño de los especímenes se recomienda lo siguiente:

- Que el diámetro de los especímenes cilíndricos moldeados o sacados de núcleos, o la longitud de los lados de especímenes cortados con sierra, sean iguales al menos a cuatro veces el tamaño máximo del agregado.
- Que el espesor de los especímenes sea al menos de una y media veces el tamaño máximo del agregado.

Se deberá tener cuidado de evitar distorsiones, pandeos o agrietamiento de los especímenes durante y después de su remoción de los pavimentos o del molde. Los especímenes deberán almacenarse en un sitio frío y seguro.

Los especímenes deberán estar libres de materiales extraños tales como los de las capas de sellos, de ligas, materiales de fundación, papeles u hojas. Cuando estos materiales sean evidentes se pueden quitar con sierra cuidadosamente.

Si se desea, los especímenes se pueden separar de las restantes capas de pavimento aserrándolos o mediante otros métodos adecuados.

### **3.6. Equipo**

- **Balanza:** con capacidad adecuada y sensibilidad suficiente para que las gravedades específicas bulk puedan calcularse al menos con cuatro cifras significativas, esto es, aproximada a la tercera cifra decimal. Deberá estar provista de un dispositivo de suspensión adecuado que permita pesar el espécimen, cuando está suspendido del centro del platillo de la balanza. Para evitar lecturas erróneas por el desplazamiento excesivo, se debe usar un alambre o cuerda de pesca del tamaño práctico más pequeño para suspender el espécimen y el dispositivo sostenedor. No se deben utilizar cadenas o cordones; balanzas con sensibilidad de 0,1 g o mayor pueden ser adecuadas.

Figura 7. **Balanza electrónica provista de un dispositivo de suspensión**



Fuente: Laboratorio de Asfaltos de la Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala.

- Baño con agua: el uso rebosadero es obligatorio para inmersión del espécimen mientras se haya suspendido de la balanza, provisto con un rebosadero para mantener el agua a un nivel constante.

Figura 8. **Baño de agua para inmersión**



Fuente: Laboratorio de Asfaltos de la Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala.

### **3.7. Procedimiento**

Para especímenes completamente secos preparados en el laboratorio se toma en cuenta los siguientes procedimientos:

- Masa en el aire del espécimen seco: se determina la masa pesando el espécimen después de que haya permanecido al menos durante 1 hora en el aire, a la temperatura ambiente. Se registra esta masa como A.
- Masa del espécimen en agua: se sumerge el espécimen en un baño con agua preferiblemente a 25° C (77° F) de 4 ± 1 minutos y luego se determina la masa en el agua. Se registra esta masa como C.
- Masa en el aire del espécimen saturado y superficie seca: se seca rápidamente la superficie del espécimen con una toalla húmeda y pésese luego en el aire. Se registra esta masa como B.

Para núcleos y para especímenes que contienen humedad o solventes y se requieran para otras pruebas. La secuencia de prueba es: seco, en el agua saturada y en superficie seca.

Se seca el espécimen hasta obtener la masa constante. Se deja enfriar hasta la temperatura ambiente a  $25^{\circ} \pm 5^{\circ}\text{C}$ , se pesa y se registra la masa como A. Se sumerge cada espécimen en agua a  $25^{\circ} \pm 1^{\circ}\text{C}$  durante  $4 \pm 1$  minutos determinando la masa en el agua y se registra como C. Se saca el espécimen del baño y se seca rápidamente su superficie con una toalla húmeda, se determina su masa y se registra ésta como B. Cualquier agua que escurra del espécimen durante la operación de secado es considerada parte del espécimen saturado. Cada espécimen debe ser saturado y pesado individualmente.

### **3.8. Ecuación para el cálculo de la gravedad específica bulk**

Se calcula la gravedad específica bulk de los especímenes compactados en laboratorio con respecto a su peso, peso saturado y peso sumergido con la siguiente expresión:

$$G_{mb} = \frac{A}{B - C}$$





## **4. GRAVEDAD ESPECÍFICA MÁXIMA TEÓRICA (GMM) Y DENSIDAD DE MEZCLAS ASFÁLTICAS PARA PAVIMENTOS**

Para el desarrollo y diseño de las mezclas asfálticas en caliente, las herramientas para determinar el porcentaje de vacíos son: la gravedad específica bulk y la gravedad teórica máxima.

### **4.1. Objeto**

Este método se refiere al procedimiento para la determinación de la gravedad específica máxima teórica y densidad de mezclas asfálticas en caliente para pavimentos preferiblemente a 25° C (77° F), sin compactar.

Los valores se deben expresar en unidades SI.

Esta norma no considera los problemas de seguridad asociados con su uso. Es responsabilidad de quien la emplee establecer prácticas apropiadas de seguridad, salubridad y de determinar la aplicabilidad de limitaciones regulatorias antes de su empleo.

### **4.2. Resumen del método de ensayo**

Una muestra de mezcla asfáltica suelta, seca al horno y previamente pesada se coloca en un frasco de vacío tarado. Se agrega suficiente agua a una temperatura preferiblemente de 25° C (77° F), hasta llevar la muestra a un estado sumergido. Se le aplica vacío gradualmente para reducir la presión residual en el frasco de vacío a 4,0 kPa (30,0 mm de Hg) o menor y se sostiene

por un período de  $15,0 \pm 2$  min. Al final del período de aplicación del vacío este se retira gradualmente. El volumen de la muestra de mezcla asfáltica es obtenido sumergiendo el frasco de vacío con la muestra en un baño de agua y pesándolo o llenándolo hasta el nivel de enrase con agua y pesándolo en el aire. Ambos, la temperatura y el peso, son medidos en este momento, a partir de estas medidas de peso y volumen se calcula la gravedad específica y la densidad.

### **4.3. Uso y significado**

La gravedad específica teórica máxima y la densidad de mezclas asfálticas para pavimentos son propiedades fundamentales, cuyos valores están afectados por los materiales asfálticos y la composición de la mezcla en términos del tipo y cantidad de agregados.

Estos valores son utilizados para calcular el porcentaje de vacíos con aire en una mezcla de pavimento asfáltico en caliente compactada.

Ellos son esenciales para calcular la cantidad de asfalto absorbido por los poros internos del agregado en una mezcla asfáltica en caliente.

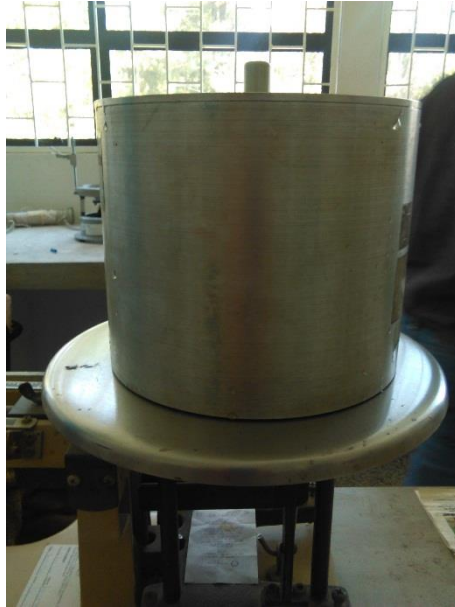
Ellos dan capacidades importantes para el proceso de compactación de compactación de mezclas asfálticas para pavimentos.

### **4.4. Equipo**

El equipo a utilizar en la gravedad específica máxima teórica, nos ayuda primordialmente a la extracción de aire en las partículas de la mezcla asfáltica en caliente.

- Recipientes de vacío:
  - Deben ser capaces de soportar todo el vacío aplicado y todos deben estar equipados con los accesorios requeridos por el procedimiento de ensayo que se está aplicando. La abertura del recipiente que permite instalar la bomba de vacíos debe estar cubierta por un pedazo de malla de 75µm (Nro. 200) con el fin de minimizar la pérdida de material fino.
  - Deben tener una capacidad entre 200 y 10 000 ml y dependen de los requisitos de tamaño mínimo de muestra. Se debe evitar utilizar una muestra pequeña en un recipiente grande.
  - Tazas de vacío: pueden ser metálicas o plásticas con un diámetro aproximado de 180 a 260 mm (7,1 a 10,2”) y una altura de al menos 1601 mm (6,3”), debe estar equipada con una tapa transparente asegurada con un empaque de caucho y con una conexión para la aplicación del vacío.
  - Frasco volumétrico para vacío: utilizado para pesar en el aire únicamente, un frasco volumétrico de pared gruesa con una capacidad aproximada de 4 000 ml y un tapón de caucho con conexión para la aplicación de vacío.
- Picnómetro para pesar en el aire únicamente: existen picnómetros de plástico, de vidrio y de acero.

Figura 9. **Picnómetro de acero**



Fuente: Laboratorio de Asfaltos de la Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala.

- Balanza: pueden ser calculadas al menos con cuatro cifras significativas (3 decimales), con capacidad amplia y sensibilidad suficiente para que la gravedad específica de las muestras de mezclas no compactadas para pavimentos. Para el método de la taza de vacío, la balanza deberá estar equipada con un dispositivo, para sostener y permitir pesar la muestra mientras se encuentre suspendida debajo del centro de la balanza. Como se muestra en la figura 7.
- Bomba de vacío o aspirador de agua: debe evacuar el aire del recipiente de vacío hasta una presión residual de 4,0 kPa (30 mm de Hg) o menos.

Figura 10. **Bomba de vacío**



Fuente: Laboratorio de Asfaltos de la Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala.

Cuando se usa una bomba de vacío, una trampa apropiada constituida por uno o más frascos de 100 ml de capacidad o equivalentes a los 100 ml, se deben instalar entre el frasco de vacío y la fuente de vacío para reducir la cantidad de vapor de agua que pueda entrar en la bomba.

Manómetro de presión residual o celda de presión absoluta calibrada: una celda de presión de vacío conectada directamente al frasco de vacío debe ser capaz de medir una presión residual de 4 kPa (30 mm de Hg) o menos (preferiblemente hasta 0), esta debe ser conectada al final de la línea de vacío utilizando un tubo apropiado ya sea un conector en “T” en la parte superior del frasco o usando una abertura separada (de la línea de vacío) en la parte superior del frasco para conectar la manguera. Para evitar daño del manómetro o de la celda, ésta no se debe situar en la parte superior del frasco sino a un lado del mismo.

- Baño de agua
  - Para las tazas de vacío se requiere que el baño de agua sea capaz de mantener la temperatura preferiblemente entre 20° y 30° C (70° y 85° F).
  - Cuando se emplea la técnica de pesar dentro del agua, se necesita un baño de agua para la inmersión del recipiente suspendido que contenga la muestra desairada.
- Válvula de escape: está colocada junto al tren de vacío para facilitar el ajuste del vacío que se aplicara al vaso.

Figura 11. **Válvula de escape**



Fuente: Laboratorio de Asfaltos de la Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala.

- Guantes protectores: se utilizan para coger el equipo de vidrio que está bajo vacío.

Figura 12. **Guantes protectores**



Fuente: Laboratorio de Asfaltos de la Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala.

- Dispositivo para agitación mecánica: capaz de aplicar una agitación suave pero consistente en la muestra. Este dispositivo debe estar equipado con un sistema de soporte para el recipiente, de tal forma que éste no se mueva en la superficie del dispositivo.



Figura 13. **Dispositivo para agitación mecánica**



Fuente: Laboratorio de Asfaltos de la Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala.

- Horno: capaz de mantener una temperatura de  $110^{\circ} \pm 5^{\circ} \text{ C}$  ( $230^{\circ} \pm 9^{\circ} \text{ F}$ ). Este horno es necesario cuando se ensayan muestras diferentes a mezclas preparadas en el laboratorio usando agregados secos al horno.

#### **4.5. Procedimiento**

Se separan las partículas de la muestra, de la mezcla a mano, teniendo cuidado de no fracturar las partículas minerales, de tal manera que las de la porción fina del agregado no sean mayores de 6,4 mm (1/4"). Si la mezcla no está suficientemente floja para separarla manualmente, se la coloca en una bandeja grande y plana y se calienta en un horno hasta que se puedan separar.

Las muestras preparadas en el laboratorio se deben secar y curar al horno a  $135^{\circ} \pm 5^{\circ} \text{ C}$  ( $275^{\circ} + 9^{\circ} \text{ F}$ ) por un mínimo de 2 horas o como se considere apropiado para que guarde relación con el procedimiento de diseño de la mezcla utilizada. Pueden ser necesarios tiempos de secado más largos para que la muestra alcance masa constante. (La masa se debe mantener dentro del 0,1 % para pesadas consecutivas durante 15 minutos). Las mezclas que no han sido preparadas en el laboratorio con agregados secados al horno, se deben secar hasta obtener la masa constante a una temperatura de  $105^{\circ} \pm 5^{\circ} \text{ C}$  ( $221^{\circ} + 9^{\circ} \text{ F}$ ). Este secado y curado se debe combinar con el calentamiento.

Se enfría la muestra hasta la temperatura ambiente, se coloca en un recipiente, frasco, taza o picnómetro tarados y calibrados. La muestra se debe colocar directamente en el recipiente de vacío. No se debe utilizar un recipiente dentro de otro. Se pesa y determina la masa neta de la muestra como A; se agrega agua suficiente aproximadamente a  $25^{\circ} \text{ C}$  ( $77^{\circ} \text{ F}$ ) para cubrir la muestra completamente.

Se debe remover el aire atrapado en la muestra aplicando incrementos graduales de vacío hasta que la presión residual del manómetro indique  $3,7 \pm 0,3 \text{ kPa}$  ( $27,5 + 2,5 \text{ mm Hg}$ ). Se debe mantener esta presión residual por un período de  $15 \pm 2 \text{ min}$ . Durante el período de aplicación de vacío el recipiente se debe agitar continuamente ya sea utilizando un dispositivo mecánico o manualmente agitando vigorosamente a intervalos de 2 minutos. Los vasos de vidrio se deben manipular sobre una superficie del recipiente, tal como caucho o almohadilla plástica y no sobre una superficie dura, para evitar impacto mientras está bajo vacío.

El vacío se puede aplicar y disminuir gradualmente empleando la válvula de escape.

Al final del período de aplicación de vacío se suelta el vacío incrementando la presión a una velocidad no mayor de 8 kPa por segundo y se procede con una de las siguientes determinaciones:

- Pesada en agua: se suspende el recipiente y su contenido dentro del baño de agua y se determina su masa después de una inmersión de  $10 \pm 1$  minuto. Se mide la temperatura del baño y si fuese diferente de  $25^{\circ} \pm 1^{\circ} \text{ C}$  ( $77^{\circ} \pm 1,8^{\circ} \text{ F}$ ), se corrige la masa a  $25^{\circ} \text{ C}$ , empleando el ajuste por temperatura de calibración desarrollado. Se designa la masa neta de la muestra en el agua a  $25^{\circ} \text{ C}$  como C.
- Pesada en el aire: se llena el frasco o cualquiera de los picnómetros con agua y se llevan sus contenidos a una temperatura de  $25^{\circ} \pm 1^{\circ} \text{ C}$  ( $77^{\circ} \pm 1,8^{\circ} \text{ F}$ ) en el baño de agua. Se determina la masa del recipiente y los contenidos, completamente lleno, dentro de los  $10 \pm 1$  minuto después de completar lo dispuesto, se designa esta masa como E.
- Pesada en el aire (taza): en caso de utilizar la taza de vacío, la masa en el aire se determina de la siguiente manera: se sumerge la taza con la muestra en un baño de agua por  $10 \pm 1$  min, la tapa también se coloca en un baño de agua al mismo tiempo, se desliza la tapa sobre la taza sin sacarla del agua para evitar la inclusión de aire y luego se presiona hacia abajo. Se retira la taza con la tapa puesta fuera del baño de agua, cuidadosamente se seca la taza y la tapa: y se debe determinar la masa de la taza, muestra y tapa y se mide la temperatura del agua en la taza. Se repite este procedimiento una vez más, si la masa varía en más de 1 g, se repite el procedimiento hasta que se obtengan dos masas con una

diferencia menor o igual a 1 g. Se designa la masa de la taza, la tapa, el agua y la muestra, como E.

#### **4.6. Ecuación para el cálculo de la gravedad específica máxima teórica**

Para la ecuación de la gravedad teórica máxima interviene, la masa del espécimen seco, la masa del recipiente lleno con agua (picnómetro), la masa del recipiente (picnómetro) y la muestra asfáltica, todos estos en gramos.

$$G_{mm} = \frac{A}{A + D - E}$$



## **5. PORCENTAJE DE VACÍOS DE AIRE EN MEZCLAS ASFÁLTICAS COMPACTADAS DENSAS Y ABIERTAS**

Esta norma, ayuda a determinar el porcentaje de vacíos o la cantidad de espacios vacíos en mezclas asfálticas compactadas, densas y abiertas de los especímenes, indicando las técnicas de laboratorio a utilizar.

### **5.1. Objeto**

Esta norma se refiere a la determinación del porcentaje de vacíos de aire en mezclas asfálticas densas y abiertas compactadas.

Esta norma puede involucrar operaciones peligrosas de manejo de materiales y equipos, no considera los problemas de seguridad asociados con su uso. Es responsabilidad de quien la emplee establecer prácticas apropiadas de seguridad y salubridad y determinar la aplicación de limitaciones regulatorias antes de su empleo.

### **5.2. Uso y significado**

El porcentaje de vacíos de aire en una mezcla asfáltica es uno de los criterios utilizados tanto en los métodos de diseño, como en la evaluación de la compactación alcanzada en proyectos de pavimentos asfálticos.

### **5.3. Toma de muestra**

Las muestras para este ensayo, serán especímenes provenientes de mezclas compactadas en el laboratorio o núcleos tomados de capas asfálticas compactadas en obra.

### **5.4. Procedimiento**

Para mezclas asfálticas densas: no absorbentes empleando los especímenes saturados y con superficie seca, se determina la gravedad específica bulk y densidad de mezclas asfálticas compactadas. Se determina gravedad específica y densidad máximas teóricas de mezclas asfálticas para pavimentos, sobre una mezcla asfáltica comparable para evitar la influencia de la diferencia de gradación, del contenido de asfalto.

- Para mezclas asfálticas abiertas: se determina a partir de su masa seca (en g) y su volumen (en  $\text{cm}^3$ ). La densidad bulk de una probeta, conformada en forma regular, de una mezcla asfáltica compactada. Se mide la altura del espécimen con especial cuidado y precisión; así mismo, se mide su diámetro en cuatro sitios diferentes y se calcula su promedio. Se calcula el volumen de la muestra con base en la altura promedio y en la medida del diámetro. Se convierte la densidad bulk en gravedad específica bulk, dividiendo por  $0,99707 \text{ g/cm}^3$  o  $997,07 \text{ kg/m}^3$ , densidad del agua a  $25^\circ\text{C}$  ( $77^\circ\text{F}$ ). Se determina la gravedad específica máxima teórica mediante la norma INV E – 735, sobre una mezcla asfáltica comparable, para evitar la influencia de diferencias en la granulometría, contenido de asfalto, etc.

Con propósitos de referencia, se determina tanto la gravedad específica bulk como la gravedad específica máxima teórica, sobre porciones de la misma mezcla asfáltica compactada.

## 5.5. Cálculos

Se calcula el porcentaje de vacíos de aire en una mezcla asfáltica compactada, respecto al volumen total, de la siguiente forma:

$$V_a = 100 - \%G_{mm}$$

$$\%G = 100 \times \frac{G_{mb}}{G_{mm}}$$

Otra forma para presentar la expresión:

$$V_a = 100 \left( 1 - \frac{G_{mb}}{G_{mm}} \right)$$

Se reporta el porcentaje de vacíos de aire con una cifra decimal.





## **6. RESISTENCIA DE MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE EMPLEANDO EL APARATO MARSHALL**

Empleando el aparato Marshall en la mezcla asfáltica en caliente, tipo E, se pretende encontrar la estabilidad y el flujo conforme lo indica la norma, AASHTO T 245-04, I.N.V. E – 748 – 07.

### **6.1. Objeto**

Esta norma describe el procedimiento que se debe seguir para la determinación de la resistencia a la deformación plástica de especímenes cilíndricos de mezclas asfálticas para pavimentación, empleando el aparato Marshall. El procedimiento se puede emplear tanto para el proyecto de mezclas en el laboratorio, como para el control en obra de las mismas; el método es aplicable a mezclas elaboradas con cemento asfáltico y agregados pétreos con tamaño máximo, menor o igual a 25,4 mm (1”).

Los valores deben expresarse en unidades SI.

Esta norma no pretende dar directrices sobre aspectos de seguridad asociados con su uso. Es responsabilidad de quien la emplee, establecer las medidas de seguridad y salubridad apropiadas y determinar la aplicación de las limitaciones regulatorias antes de su empleo.

## **6.2. Resumen del método de ensayo**

El procedimiento consiste en la fabricación de probetas cilíndricas de 101,6 mm (4") de diámetro y 63,5 mm (2½") de altura, preparadas como se describe en esta norma, rompiéndolas posteriormente en la prensa Marshall y determinando su estabilidad y deformación. Si se desean conocer los porcentajes de vacíos de las mezclas así fabricadas, se determinarán previamente las gravedades específicas de los materiales empleados y el de las probetas compactadas, antes del ensayo de rotura, de acuerdo con las normas correspondientes.

El procedimiento se inicia con la preparación de probetas de ensayo para lo cual, los materiales propuestos deben cumplir con las especificaciones de granulometría y demás, fijadas para el proyecto. Además, se deberá determinar previamente la gravedad específica bulk de los agregados, así como la gravedad específica del asfalto, y se deberá efectuar un análisis de densidad-vacíos de las probetas compactadas.

Para determinar el contenido óptimo de asfalto para una gradación de agregados dada o preparada, se deberá elaborar una serie de probetas con distintos porcentajes de asfalto, de tal manera que, al graficar los diferentes valores obtenidos después de ser ensayadas, permitan determinar ese valor "óptimo".

## **6.3. Equipo y materiales necesarios**

- Dispositivo para moldear probetas: consistente en un molde cilíndrico con un collar de extensión y una placa de base plana. El molde deberá tener un diámetro interior de 101,6 mm (4") y una altura interna

aproximada de 76,2 mm (3"); la placa de base y el collar de extensión deberán ser intercambiables, es decir ajustables en cualquiera de los dos extremos del molde. Se recomienda disponer de 3 moldes. Para facilidad de manejo, es conveniente que el molde esté provisto de agarraderas.

- Extractor de probetas: elemento de acero en forma de disco con diámetro de 100 mm (3,95") y 12,7 mm (1/2") de espesor, utilizado para extraer la probeta compactada del molde, con la ayuda del collar de extensión. Se requiere de un elemento adecuado para transferir la carga a la probeta, de manera que ésta pase suavemente del molde al collar.
- Martillo de compactación: consistente en un dispositivo de acero formado por una base plana circular de 98,4 mm (3 7/8") de diámetro y un pisón deslizante de  $4\,536 \pm 9$  g ( $10 \pm 0,02$  lb) de peso total, montado en forma que proporcione una altura de caída de  $457,2 \pm 1,524$  mm ( $18 \pm 0,06$ "). El martillo de compactación puede estar equipado con un protector de dedos.

Figura 14. **Martillo de compactación**



Fuente: Laboratorio de Asfaltos de la Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala.

- Pedestal de compactación: consistente en una pieza prismática de madera o metal de base cuadrada de 203,2 mm de lado y 457,2 mm de altura (8" x 8" x 18") y provista en su cara superior de una platina cuadrada de acero de 304,8 mm de lado x 25,4 mm de espesor (12" x 12" x 1"), firmemente sujeta en la misma. La madera será roble u otra clase cuya densidad seca sea de 0,67 a 0,77 g/cm<sup>3</sup> (42 a 48 lb/pie<sup>3</sup>); el conjunto se fijará firmemente a una base de concreto, debiendo quedar la platina de acero en posición horizontal.

Figura 15. **Pedestal de compactación**



Fuente: Laboratorio de Asfaltos de la Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala.

- Sujetador para molde: consistente en un dispositivo con resorte de tensión diseñado para centrar rígidamente el molde de compactación

sobre el pedestal. Deberá asegurar el molde completo en su posición durante el proceso de compactación.

Figura 16. **Sujetador para molde**



Fuente: Laboratorio de Asfaltos de la Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala.

- Dispositivo para moldear probetas: consiste en un molde cilíndrico con un collar de extensión y una placa de base plana. El molde deberá tener un diámetro interior de 101,6 mm (4") y una altura interna aproximada de 76,2 mm (3"); la placa de base y el collar de extensión deberán ser intercambiables, es decir ajustables en cualquiera de los dos extremos del molde, se recomienda disponer de 3 moldes (figura 17), para facilidad de manejo, es conveniente que el molde esté provisto de agarraderas.

Figura 17. **Dispositivo para moldear probetas**



Fuente: Laboratorio de Asfaltos de la Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala.

- **Mordazas:** las mordazas consisten en dos segmentos cilíndricos, con un radio de curvatura interior de 50,8 mm (2") maquinado con exactitud; la mordaza inferior va montada sobre una base plana, provista de dos varillas perpendiculares a ella y que sirven de guía a la mordaza superior. El movimiento de la mordaza superior se debe efectuar sin un rozamiento apreciable.

Figura 18. **Mordazas**



Fuente: Laboratorio de Asfaltos de la Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala.

- El medidor de deformación: consiste en un deformímetro de lectura final fija, con divisiones en 0,25 mm (0,01”). En el momento del ensayo, el medidor deberá estar firmemente apoyado sobre la mordaza superior y su vástago se apoyará en una palanca ajustable acoplada a la mordaza inferior.



Figura 19. **Medidor de deformación**



Fuente: Laboratorio de Asfaltos de la Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala.

- Medidor de la estabilidad: la resistencia de la probeta en el ensayo se medirá con un anillo dinamométrico acoplado a la prensa, de 22,2 kN (2 265 kgf) de capacidad, con una sensibilidad de 44,5 N (4,54 kgf), 4,45 kN (454 kgf), 111,2 N (11,4 kgf) y 22,2 kN (2 265 kgf). Las deformaciones del anillo se medirán con un deformímetro graduado en 0,0025 mm (0,0001”).

Figura 20. **Medidor de la estabilidad**



Fuente: Laboratorio de Asfaltos de la Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala.

- Placa de calefacción: para calentar los agregados, el material asfáltico, el conjunto de compactación y la muestra, se empleará un horno o placa de calefacción, provisto de control termostático, capaz de mantener la temperatura requerida con un error menor de 2,8° C (5° F).

Figura 21. **Placa de calefacción**



Fuente: Laboratorio de Asfaltos de la Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala.

- Tanque para agua: termostáticamente de 152,4 mm (6") con una profundidad mínima y controlado para mantener la temperatura a  $60^{\circ} \pm 1^{\circ} \text{C}$  ( $140^{\circ} \pm 2,0^{\circ} \text{F}$ ).

Figura 22. **Tanque para agua**



Fuente: Laboratorio de Asfaltos de la Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala.

- Tanque para agua controlado: El tanque deberá tener un falso fondo perforado o estar equipado con un estante para sostener las probetas por lo menos a 50,8 mm (2") sobre el fondo del tanque.

Figura 23. **Tanque para agua controlado**



Fuente: Laboratorio de Asfaltos de la Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala.

- Tamices: son necesarios para reproducir en el laboratorio la granulometría exigida, para la especificación a los agregados y para la mezcla que se va a diseñar.

Figura 24. **Tamices**



Fuente: Laboratorio de Asfaltos de la Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala.

- Termómetros blindados: los termómetros blindados tienen que ser de  $9,9^{\circ}\text{C}$  a  $204^{\circ}\text{C}$  ( $50^{\circ}\text{F}$  a  $400^{\circ}\text{F}$ ) para determinar las temperaturas del asfalto, agregados y mezcla, con sensibilidad de  $2,8^{\circ}\text{C}$ . Para la temperatura del baño de agua se utilizará un termómetro con escala de  $20^{\circ}\text{C}$  a  $70^{\circ}\text{C}$  y sensibilidad de  $0,2^{\circ}\text{C}$  ( $68^{\circ}\text{F}$  a  $158^{\circ}\text{F} \pm 0,4^{\circ}\text{F}$ ).

Figura 25. **Termómetro blindado**



Fuente: Laboratorio de Asfaltos de la Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala.

- Balanzas: una de 5 kg de capacidad, sensible a 1 g para pesar agregados y asfalto; otra de 2 kg de capacidad, sensible a 0,1 g para las probetas compactadas. Como se muestra en las figuras 2.
- Guantes: los guantes de soldador se utilizan para manejar equipo caliente y de caucho, para sacar las muestras del baño de agua. Como se muestra en la figura 12.
- Crayolas: se utilizan para identificar las probetas.

Figura 26. **Probetas identificadas**



Fuente: Laboratorio de Asfaltos de la Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala.

- Bandejas metálicas: las bandejas de fondo plano se utilizan para calentar agregados y cubetas metálicas redondas de 4 litros (1 galón) de capacidad, para mezclar asfalto y agregados, cucharones, recipientes, espátulas, papel de filtro, etc.

#### **6.4. Ensayo de estabilidad y flujo**

Se colocan las probetas en un baño de agua durante 30 o 40 minutos o en el horno durante 2 horas, manteniendo el baño o el horno a  $60^{\circ} \pm 1^{\circ} \text{ C}$  ( $140^{\circ} \pm 1,8^{\circ} \text{ F}$ ).

Se limpian perfectamente las barras guías y las superficies interiores de las mordazas de ensayo antes de la ejecución de éste, y se lubrican las barras guías de tal manera que la mordaza superior se deslice libremente. La

temperatura de las mordazas se deberá mantener entre 21,1° C y 37,8° C (70° F a 100° F), empleando un baño de agua cuando sea necesario.

Se retira una probeta del baño de agua u horno y se coloca centrada en la mordaza inferior; se monta la mordaza superior con el medidor de deformación y el conjunto se sitúa centrado en la prensa.

Se coloca el medidor de flujo en posición, se ajusta a cero, y se mantiene su vástago firmemente contra la mordaza superior mientras se aplica la carga de ensayo.

Se aplica a continuación, la carga sobre la probeta con la prensa a una rata de deformación constante de 50,8 mm (2") por minuto, hasta que ocurra la falla, es decir, cuando se alcanza la máxima carga y luego disminuye, según se lea en el dial respectivo. Se anota el valor máximo de carga registrado en la máquina de ensayo o, si es el caso, la lectura de deformación del dial indicador, la cual, se convierte a carga, multiplicándola por la constante del anillo. El valor total en Newtons (kgf) que se necesite para producir la falla de la muestra se registrará como su valor de estabilidad marshall.

Se anota la lectura en el medidor de flujo en el instante que va alcanzar la carga máxima. Este será el valor del "flujo" para la probeta, expresado en mm, e indica la disminución de diámetro que sufre la probeta entre la carga cero y el instante de la rotura. El procedimiento completo, a partir de la sacada de la probeta del baño de agua, se deberá completar en un período no mayor de 30 segundos.





## **7. ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DE LOS AGREGADOS EXTRAÍDOS DE MEZCLAS ASFÁLTICAS**

Se define como la medición y graduación de los materiales obtenidos de la extracción cuantitativa del asfalto, en mezclas en caliente para pavimentos, con la finalidad, del análisis de su origen y sus propiedades mecánicas, para determinar su mejor uso.

### **7.1. Objeto**

Esta norma describe el procedimiento que se debe seguir, para determinar la granulometría de los agregados gruesos y finos recuperados de las mezclas asfálticas, empleando tamices con malla de abertura cuadrada.

Los valores se deben expresar en unidades SI.

### **7.2. Uso y significado**

Esta norma se utiliza para determinar la gradación de los agregados extraídos de una mezcla asfáltica. Los resultados del ensayo sirven para determinar la conformidad de la granulometría con la especificación requerida y para proporcionar los datos necesarios en el control de la producción de los diferentes agregados, usados en la fabricación de mezclas asfálticas.

### **7.3. Equipo**

Para el ensayo granulométrico de los materiales extraídos de una mezcla asfáltica, se utiliza el mismo procedimiento que una granulometría normal teniendo en cuenta, la consideración de no perder material en el proceso, entonces, se tiene en consideración que se utiliza el mismo equipo.

- Balanza: la balanza debe tener una capacidad suficiente y debe leer con una exactitud de 0,1 % de la masa de la muestra.
- Tamices: los tamices empleados serán de mallas con aberturas cuadradas e irán montados sobre bastidores adecuados para evitar pérdidas de material durante el tamizado. Se debe disponer de la serie de tamices para obtener la información deseada de acuerdo con la especificación.
- Horno: el horno de temperatura regulable debe ser capaz de mantener la temperatura de  $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$ .

### **7.4. Muestra**

La muestra empleada será la totalidad del agregado de la mezcla asfáltica obtenida según la extracción cuantitativa de asfalto en mezclas para pavimentos.

### **7.5. Procedimiento**

Cuando se utiliza para la prueba de extracción cuantitativa de asfalto en mezclas para pavimentos, los agregados se secan en el horno a una temperatura de  $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$  ( $230 \pm 9^{\circ}\text{F}$ ) hasta conseguir una variación de masa inferior al 0,1 %; se debe pesar con una precisión de 0,1. La masa total del

agregado es la suma de la masa de los agregados secos, de la masa del material mineral retenida en el filtro y la masa del material fino contenida en el solvente de extracción, esta última será la masa de la ceniza.

La muestra del agregado secada y pesada, se coloca en un recipiente apropiado y se cubren completamente con agua, se le debe añadir una cantidad suficiente de un agente humectante para facilitar el mojado de los agregados y asegurar una buena separación de las partículas finas, menores de 75  $\mu\text{m}$  (Nro. 200) de las partículas más gruesas. El material contenido en el recipiente se debe agitar vigorosamente para lograr una separación de la fracción fina y conseguir que la suspensión se mantenga, mientras se realiza el proceso de vertimiento sobre los dos tamices, el de 2,0 mm o el de 1,18 mm (Nro. 10 o Nro. 16) como protección y el de 75  $\mu\text{m}$  (Nro. 200). Durante esta operación, se procurará evitar en lo posible, la transferencia de material grueso en los tamices, se ha encontrado que el empleo de una cuchara rígida de gran tamaño es muy útil para la agitación de la muestra de agregado en el agua de lavado.

Se deberá repetir la operación de agitado enérgico y vertido del líquido sobre el conjunto formado por un tamiz superior de 2,0 mm o de 1,18 mm (Nro. 10 o Nro. 16) y el tamiz de 75  $\mu\text{m}$  (Nro. 200), las veces necesarias hasta que el líquido de lavado salga limpio y se garantice la separación total de las partículas finas.

Todo el material retenido sobre el conjunto formado por los dos tamices se pasa de nuevo al recipiente de los agregados, el cual se secará en el horno a  $110^{\circ} \pm 5^{\circ} \text{C}$  ( $230^{\circ} \pm 9^{\circ} \text{F}$ ) y se pesará finalmente con una aproximación de 0,1 %.

El agregado retenido seco y debidamente pesado, se debe tamizar por los tamices requeridos por la especificación, incluyendo el tamiz de 75  $\mu\text{m}$  (Nro.

200). Se insertan los tamices en orden descendente de tamaño y se coloca la muestra en el tamiz de mayor tamaño: se tamiza manualmente o con el equipo mecánico un tiempo suficiente, establecido para la prueba o verificado por la medida de la muestra real.

Se debe limitar la cantidad de material en un tamiz dado, para que todas las partículas tengan oportunidad de alcanzar las aberturas del tamiz varias veces durante el proceso de tamizado. Para los tamices con las aberturas más pequeñas que 4,75 mm (Nro. 4) y la masa retenida en cualquier tamiz durante la realización del tamizado no debe exceder 6 kg/m<sup>2</sup>: para los tamices con las aberturas de 4,75 mm (Nro. 4) y mayores, la masa en kg no debe exceder el producto de 2,5 x la abertura del tamiz en mm x y el área de la superficie del tamiz en m<sup>2</sup>. En ningún caso la masa debe ser tan grande que produzca deformación permanente en la tela del tamiz.

Se continúa el tamizado por un período que sea suficiente, de tal forma que después de terminado, no pase más del 0,5 % de la masa de la muestra total por ningún tamiz, durante 1 min de tamizado continuo a mano, realizado de la siguiente manera: se toma individualmente cada tamiz, con su tapa y un fondo que ajuste sin holgura, con la mano en una posición ligeramente inclinada, se golpea secamente el lado del tamiz, con un movimiento hacia arriba contra la palma de la otra mano, a razón de 150 veces por minuto, girando el tamiz aproximadamente 1/6 de vuelta en cada intervalo de 25 golpes.

En la determinación de la eficiencia del tamiza para tamaños de abertura mayores que los del tamiz de 4,75 mm (Nro. 4), se debe limitar el material sobre el tamiz a una sola capa de partículas.; si el tamaño de los tamices hace impracticable el movimiento de tamizado descrito, se deberán usar tamices de 203,2 mm (8") de diámetro para comprobar la eficiencia del tamizado.

Se determina y registra la masa del material que pasa cada tamiz y es retenido lo más próximo y del material que pasa el tamiz de 75  $\mu\text{m}$  (Nro. 200). Se debe verificar, que la suma de las masas acabadas de determinar corresponda a la masa seca total después del lavado  $\pm 0,2 \%$ . Para determinar la cantidad total de material menor de 75  $\mu\text{m}$  (Nro. 200), se sumará la masa del material tamizado en seco, que pasa el tamiz de 75  $\mu\text{m}$  (Nro. 200), la masa perdida en el lavado, el aumento de masa en el papel filtro y la masa de la ceniza obtenida después de la calcinación, las dos últimas se sumarán cuando en el ensayo de extracción se efectuó de acuerdo a la extracción cuantitativa de asfalto en mezclas para pavimentos. Si se desea comprobar el material eliminado por lavado, se pueden evaporar a sequedad los líquidos de lavado o filtrar a través del papel de filtro con la masa previamente determinada; después del filtrado, se debe secar y determinar la masa de este material y las cantidades de las distintas fracciones retenidas en cada tamiz, así como la cantidad del material menor de 75  $\mu\text{m}$  (Nro. 200), se convierten en los respectivos porcentajes dividiéndolos por la masa total de agregados en la mezcla asfáltica y multiplicando por 100.

## **7.6. Informe**

Los resultados del análisis granulométrico se pueden expresar de distintas formas, según los valores indicados en las correspondientes especificaciones:

- Porcentaje total de material que pasa por cada uno de los tamices.
- Porcentaje total de material que está retenido en cada tamiz y el porcentaje retenido acumulado en cada uno de los tamices.
- Porcentaje de material que está retenido entre dos tamices consecutivos.

Estos porcentajes se expresarán redondeándolos al número entero más próximo, excepto para el tamiz de 75  $\mu\text{m}$  (Nro. 200) que se expresará con una aproximación del 0,1 %.

### 7.7. Precisión y tolerancia

- Precisión: la estimación de la precisión para este método de prueba se presenta en la tabla X. Los valores en la tabla son dados para diferentes rangos del porcentaje total de agregado que pasa un tamiz.
- Tolerancias: este método de prueba no tiene tolerancias ya que, los valores determinados se pueden definir únicamente en las condiciones de este método.

Tabla II. **Precisión para análisis granulométrico**

	Porcentaje total de materia que pasa un tamiz		% desviación estándar (1s)	Rango aceptable de dos resultados % (D2s)
Agregado extraído				
Precisión de simple operador	< 100	$\geq 95$	0,49	1,4
	< 95	$\geq 40$	1,06	3,0
	< 40	$\geq 25$	0,65	1,8
	< 25	$\geq 10$	0,46	1,3
	< 10	$\geq 5$	0,29	0,8
	< 5	$\geq 2$	0,21	0,6
	< 2	$\geq 0$	0,17	0,5
Precisión multilaboratorio	< 100	$\geq 95$	0,57	1,6
	< 95	$\geq 40$	1,24	3,5
	< 40	$\geq 25$	0,84	2,4
	< 25	$\geq 10$	0,81	2,3
	< 10	$\geq 5$	0,56	1,6
	< 5	$\geq 2$	0,43	1,2
	< 2	$\geq 0$	0,32	0,9

Fuente: Norma I.N.V. E – 782 – 07, Tabla I.

## 7.8. Ecuaciones para determinar la granulometría de los agregados extraídos de mezclas asfálticas

Se muestra a continuación las ecuaciones correspondientes al ensayo de la granulometría, estas ecuaciones fueron utilizadas para la determinación del material retenido y el material retenido acumulado y el porcentaje que pasó cada tamiz.

$$P_{NR}(\text{para el primer tamiz}) = (P_{BR} - \text{Tara})$$

$$P_{NR}(\text{para los siguientes tamices}) = P_{BR_{n-1}}$$

$$\%Ret. = 100 \times \frac{P_{NR}}{P_{ne}}$$

$$\%Ret. ac. = \%Ret._{n+1}$$

$$\%Pasa = 100 - \%Ret. ac.$$





## 8. CÁLCULOS

En este capítulo se trabajan los ensayos correspondientes al tema en investigación, según las indicaciones propias de las normas AASHTO, ASTM e INV de los datos obtenidos en el laboratorio.

### **8.1. Alturas y diámetros por espécimen o cilindros asfálticos de ensayo.**

Se tomaron como muestra tres alturas y tres diámetros, haciendo un promedio para el espécimen uno y el espécimen dos, en el rango de temperaturas de 70°C - 80°C, para los respectivos cálculos en los que intervienen estos datos.

$$T_{Compactación} = 70^{\circ}\text{C}$$

Espécimen I

$$h_{Promedió} = \frac{72,85\text{mm} + 73,35\text{mm} + 72,79\text{mm}}{3}$$

$$h_{Promedió} = 72,997\text{mm}$$

$$\phi_{Promedió} = \frac{101,16\text{mm} + 101,02\text{mm} + 101,41\text{mm}}{3}$$

$$\phi_{Promedió} = 101,197\text{mm}$$

Espécimen II

$$h_{Promedió} = \frac{73,13\text{mm} + 71,72\text{mm} + 73,38\text{mm}}{3}$$

$$h_{Promedió} = 72,743\text{mm}$$

$$\phi_{Promedió} = \frac{101,02\text{mm} + 100,63\text{mm} + 101,32\text{mm}}{3}$$

$$\phi_{Promedió} = 100,990\text{mm}$$

$$T_{Compactación} = 80^{\circ}\text{C}$$

Espécimen I

$$h_{Promedió} = \frac{70,80\text{mm} + 69,81\text{mm} + 70,24\text{mm}}{3}$$

$$h_{Promedió} = 70,283\text{mm}$$

$$\phi_{Promedió} = \frac{101,58\text{mm} + 102,07\text{mm} + 101,71\text{mm}}{3}$$

$$\phi_{Promedió} = 101,787\text{mm}$$

Espécimen II

$$h_{Promedió} = \frac{70,72\text{mm} + 70,80\text{mm} + 70,12\text{mm}}{3}$$

$$h_{Promedió} = 70,547\text{mm}$$

$$\phi_{Promedió} = \frac{101,04\text{mm} + 101,48\text{mm} + 100,93\text{mm}}{3}$$

$$\phi_{Promedió} = 101,150\text{mm}$$

$$T_{Compactación} = 90^{\circ}\text{C}$$

Espécimen I

$$h_{Promedió} = \frac{68,89\text{mm} + 69,08\text{mm} + 69,89\text{mm}}{3}$$

$$h_{Promedió} = 69,287\text{mm}$$

$$\phi_{Promedió} = \frac{101,45\text{mm} + 100,20\text{mm} + 101,38\text{mm}}{3}$$

$$\phi_{Promedió} = 101,010\text{mm}$$

Espécimen II

$$h_{Promedió} = \frac{69,68\text{mm} + 69,54\text{mm} + 69,22\text{mm}}{3}$$

$$h_{Promedió} = 69,480\text{mm}$$

$$\phi_{Promedió} = \frac{100,20\text{mm} + 101,05\text{mm} + 101,62\text{mm}}{3}$$

$$\phi_{Promedió} = 100,957\text{mm}$$

$$T_{Compactación} = 100^{\circ}\text{C}$$

### Espécimen I

$$h_{Promedió} = \frac{68,04\text{mm} + 68,05\text{mm} + 68,76\text{mm}}{3}$$

$$h_{Promedió} = 68,283\text{mm}$$

$$\phi_{Promedió} = \frac{101,76\text{mm} + 101,40\text{mm} + 101,55\text{mm}}{3}$$

$$\phi_{Promedió} = 101,570\text{mm}$$

### Espécimen II

$$h_{Promedió} = \frac{70,27\text{mm} + 70,70\text{mm} + 70,42\text{mm}}{3}$$

$$h_{Promedió} = 70,463\text{mm}$$

$$\phi_{Promedió} = \frac{100,80\text{mm} + 101,00\text{mm} + 102,11\text{mm}}{3}$$

$$\phi_{Promedió} = 101,303\text{mm}$$

$$T_{Compactación} = 110^{\circ}\text{C}$$

### Espécimen I

$$h_{Promedió} = \frac{67,71\text{mm} + 66,56\text{mm} + 67,15\text{mm}}{3}$$

$$h_{Promedió} = 67,140\text{mm}$$

$$\phi_{Promedió} = \frac{101,02\text{mm} + 101,59\text{mm} + 101,24\text{mm}}{3}$$

$$\phi_{Promedió} = 101,283\text{mm}$$

### Espécimen II

$$h_{Promedió} = \frac{66,54\text{mm} + 66,59\text{mm} + 68,20\text{mm}}{3}$$

$$h_{Promedió} = 67,110\text{mm}$$

$$\phi_{Promedió} = \frac{101,78\text{mm} + 101,97\text{mm} + 101,78\text{mm}}{3}$$

$$\phi_{Promedió} = 101,843\text{mm}$$

$$T_{Compactación} = 120^{\circ}\text{C}$$

### Espécimen I

$$h_{Promedió} = \frac{65,35\text{mm} + 64,45\text{mm} + 66,89\text{mm}}{3}$$

$$h_{Promedió} = 65,563\text{mm}$$

$$\phi_{Promedió} = \frac{101,43\text{mm} + 101,81\text{mm} + 101,18\text{mm}}{3}$$

$$\phi_{Promedió} = 101,473\text{mm}$$

### Espécimen II

$$h_{Promedió} = \frac{68,08\text{mm} + 67,68\text{mm} + 67,84\text{mm}}{3}$$

$$h_{Promedió} = 67,867\text{mm}$$

$$\phi_{Promedió} = \frac{101,40\text{mm} + 100,85\text{mm} + 101,40\text{mm}}{3}$$

$$\phi_{Promedió} = 101,217$$



$$T_{Compactación} = 130^{\circ}\text{C}$$

Espécimen I

$$h_{Promedió} = \frac{64,60\text{mm} + 65,19\text{mm} + 65,30\text{mm}}{3}$$

$$h_{Promedió} = 65,03\text{mm}$$

$$\phi_{Promedió} = \frac{101,30\text{mm} + 100,92\text{mm} + 100,20\text{mm}}{3}$$

$$\phi_{Promedió} = 100,807\text{mm}$$

Espécimen II

$$h_{Promedió} = \frac{65,02\text{mm} + 64,85\text{mm} + 65,75\text{mm}}{3}$$

$$h_{Promedió} = 65,207\text{mm}$$

$$\phi_{Promedió} = \frac{100,10\text{mm} + 101,44\text{mm} + 100,66\text{mm}}{3}$$

$$\phi_{Promedió} = 100,733\text{mm}$$

$$T_{Compactación} = 140^{\circ}\text{C}$$

### Espécimen I

$$h_{Promedió} = \frac{64,85\text{mm} + 64,37\text{mm} + 64,74\text{mm}}{3}$$

$$h_{Promedió} = 64,653\text{mm}$$

$$\phi_{Promedió} = \frac{101,40\text{mm} + 101,25\text{mm} + 101,43\text{mm}}{3}$$

$$\phi_{Promedió} = 101,360\text{mm}$$

### Espécimen II

$$h_{Promedió} = \frac{64,33\text{mm} + 65,34\text{mm} + 64,46\text{mm}}{3}$$

$$h_{Promedió} = 64,710\text{mm}$$

$$\phi_{Promedió} = \frac{100,90\text{mm} + 101,64\text{mm} + 101,70\text{mm}}{3}$$

$$\phi_{Promedió} = 101,413\text{mm}$$

$$T_{Compactación} = 150^{\circ}\text{C}$$

### Espécimen I

$$h_{Promedió} = \frac{64,60\text{mm} + 64,75\text{mm} + 64,46\text{mm}}{3}$$

$$h_{Promedió} = 64,603\text{mm}$$

$$\phi_{Promedió} = \frac{101,62\text{mm} + 101,71\text{mm} + 100,41\text{mm}}{3}$$

$$\phi_{Promedió} = 101,247\text{mm}$$

### Espécimen II

$$h_{Promedió} = \frac{64,55\text{mm} + 64,27\text{mm} + 64,06\text{mm}}{3}$$

$$h_{Promedió} = 64,293\text{mm}$$

$$\phi_{Promedió} = \frac{100,58\text{mm} + 101,69\text{mm} + 102,13\text{mm}}{3}$$

$$\phi_{Promedió} = 101,467\text{mm}$$

$$T_{Compactación} = 160^{\circ}\text{C}$$

### Espécimen I

$$h_{Promedió} = \frac{63,63\text{mm} + 63,74\text{mm} + 64,55\text{mm}}{3}$$

$$h_{Promedió} = 63,973\text{mm}$$

$$\phi_{Promedió} = \frac{10,17\text{mm} + 101,30\text{mm} + 101,32\text{mm}}{3}$$

$$\phi_{Promedió} = 101,263\text{mm}$$

### Espécimen II

$$h_{Promedió} = \frac{64,10\text{mm} + 64,90\text{mm} + 64,90\text{mm}}{3}$$

$$h_{Promedió} = 64,633\text{mm}$$

$$\phi_{Promedió} = \frac{101,26\text{mm} + 100,94\text{mm} + 101,37\text{mm}}{3}$$

$$\phi_{Promedió} = 101,190\text{mm}$$

$$T_{Compactación} = 170^{\circ}\text{C}$$

Espécimen I

$$h_{Promedió} = \frac{63,35\text{mm} + 63,85\text{mm} + 63,18\text{mm}}{3}$$

$$h_{Promedió} = 63,460\text{mm}$$

$$\phi_{Promedió} = \frac{100,39\text{mm} + 101,29\text{mm} + 101,45\text{mm}}{3}$$

$$\phi_{Promedió} = 101,043\text{mm}$$

Espécimen II

$$h_{Promedió} = \frac{64,88\text{mm} + 63,16\text{mm} + 63,74\text{mm}}{3}$$

$$h_{Promedió} = 63,927\text{mm}$$

$$\phi_{Promedió} = \frac{100,71\text{mm} + 101,33\text{mm} + 101,08\text{mm}}{3}$$

$$\phi_{Promedió} = 101,040\text{mm}$$

$$T_{Compactación} = 180^{\circ}\text{C}$$

### Espécimen I

$$h_{Promedió} = \frac{63,12\text{mm} + 63,61\text{mm} + 64,15\text{mm}}{3}$$

$$h_{Promedió} = 63,627\text{mm}$$

$$\phi_{Promedió} = \frac{101,33\text{mm} + 102,22\text{mm} + 102,00\text{mm}}{3}$$

$$\phi_{Promedió} = 101,850\text{mm}$$

### Espécimen II

$$h_{Promedió} = \frac{63,12\text{mm} + 63,37\text{mm} + 63,86\text{mm}}{3}$$

$$h_{Promedió} = 63,450\text{mm}$$

$$\phi_{Promedió} = \frac{101,47\text{mm} + 100,53\text{mm} + 100,37\text{mm}}{3}$$

$$\phi_{Promedió} = 100,790\text{mm}$$

## 8.2. Extracción cuantitativa del asfalto en mezclas en caliente para pavimentos

Se tomaron dos muestras del concreto asfáltico tipo E, para realizar la extracción cuantitativa del asfalto o bitumen, las cuales, fueron ensayadas por separadas dando como resultados los datos de la tabla II.

Tabla III. Resumen de resultados del ensayo del contenido de bitumen

Contenido de bitumen		
Material	700 g	700 g
Tara	250,52 g	248,54 g
Peso filtro seco	11,13 g	11,11 g
Material + tara	950,52 g	948,54 g
Material – asfalto + tara	897,30 g	891,10 g
Peso filtro + material	17,19 g	20,83 g

Fuente: elaboración propia.

$$\%AC_I = \frac{(950,52 - W_2) - (897,30 + 17,19 \text{ g} - 11,13 \text{ g})}{950,52 - W_2}$$

$$\%AC_I = 4,961$$

$$\%AC_{II} = \frac{(948,54 \text{ g} - W_2) - (891,10 \text{ g} + 20,83 \text{ g} - 11,11 \text{ g})}{948,54 \text{ g} - W_2}$$

$$\%AC_{II} = 5,031$$

$$\%AC_{\text{Promedio}} = \frac{4,961 + 5,031}{2}$$

$$\%AC_{\text{Promedio}} = 4,966$$

### 8.3. Gravedad específica bulk y densidad de la mezcla asfáltica

Se tomaron dos especímenes compactados de la mezcla asfáltica tipo E, para la realización de la gravedad específica bulk, por cada temperatura del intervalo de 70°C - 180°C.

$$T_{Compactación} = 70^{\circ}\text{C}$$

Pastilla I

$$G_{mb} = \frac{1\,195,55g}{1\,223,61g - 680,10g}$$

$$G_{mb} = 2,200$$

$$Volumen = 543,510[\text{cm}^3]$$

Pastilla II

$$G_{mb} = \frac{1\,189,85g}{1\,221,64g - 679,30g}$$

$$G_{mb} = 2,194$$

$$Volumen = 542,340[\text{cm}^3]$$

$$T_{Compactación} = 80^{\circ}\text{C}$$

Pastilla I

$$G_{mb} = \frac{1\,191,81g}{1\,214,04g - 684,40g}$$

$$G_{mb} = 2,250$$

$$Volumen = 529,640[\text{cm}^3]$$

Pastilla II

$$G_{mb} = \frac{1\,190,81g}{1\,215,62g - 683,30g}$$

$$G_{mb} = 2,237$$

$$Volumen = 532,32[\text{cm}^3]$$

$$T_{Compactación} = 90^{\circ}\text{C}$$

Pastilla I

$$G_{mb} = \frac{1\,195,25g}{1\,216,60g - 685,70g}$$

$$G_{mb} = 2,251$$

$$Volumen = 530,900[\text{cm}^3]$$

Pastilla II

$$G_{mb} = \frac{1\,196,60g}{1\,222,17g - 687,80g}$$

$$G_{mb} = 2,239$$

$$Volumen = 534,370[\text{cm}^3]$$



$$T_{Compactación} = 100^{\circ}\text{C}$$

Pastilla I

$$G_{mb} = \frac{1\,196,80g}{1\,216,04g - 686,70g}$$

$$G_{mb} = 2,261$$

$$Volumen = 529,340[\text{cm}^3]$$

Pastilla II

$$G_{mb} = \frac{1\,190,05g}{1\,214,22g - 684,20g}$$

$$G_{mb} = 2,245$$

$$Volumen = 530,020[\text{cm}^3]$$

$$T_{Compactación} = 110^{\circ}\text{C}$$

Pastilla I

$$G_{mb} = \frac{1\,177,94g}{1\,195,15g - 679,30g}$$

$$G_{mb} = 2,283$$

$$Volumen = 515,850[\text{cm}^3]$$

Pastilla II

$$G_{mb} = \frac{1\,193,71g}{1\,211,72g - 687,10g}$$

$$G_{mb} = 2,275$$

$$Volumen = 524,620[\text{cm}^3]$$

$$T_{Compactación} = 120^{\circ}\text{C}$$

Pastilla I

$$G_{mb} = \frac{1\,189,82g}{1\,204,03g - 688,10g}$$

$$G_{mb} = 2,306$$

$$Volumen = 515,930[\text{cm}^3]$$

Pastilla II

$$G_{mb} = \frac{1\,194,71g}{1\,214,33g - 688,30g}$$

$$G_{mb} = 2,271$$

$$Volumen = 526,030[\text{cm}^3]$$

$$T_{Compactación} = 130^{\circ}\text{C}$$

Pastilla I

$$G_{mb} = \frac{1\,181,14g}{1\,188,77g - 685,50g}$$

$$G_{mb} = 2,347$$

$$Volumen = 503,270[\text{cm}^3]$$

Pastilla II

$$G_{mb} = \frac{1\,184,02g}{1\,192,20g - 687,40g}$$

$$G_{mb} = 2,346$$

$$Volumen = 504,800[\text{cm}^3]$$

$$T_{Compactación} = 140^{\circ}\text{C}$$

Pastilla I

$$G_{mb} = \frac{1\,181,34g}{1\,186,46g - 687,70g}$$

$$G_{mb} = 2,369$$

$$Volumen = 498,760[\text{cm}^3]$$

Pastilla II

$$G_{mb} = \frac{1\,197,83g}{1\,204,72g - 697,80g}$$

$$G_{mb} = 2,363$$

$$Volumen = 506,920[\text{cm}^3]$$

$$T_{Compactación} = 150^{\circ}\text{C}$$

Pastilla I

$$G_{mb} = \frac{1\,186,04g}{1\,193,21g - 691,60g}$$

$$G_{mb} = 2,364$$

$$Volumen = 501,610[\text{cm}^3]$$

Pastilla II

$$G_{mb} = \frac{1\,190,53g}{1\,196,10g - 695,70g}$$

$$G_{mb} = 2,379$$

$$Volumen = 500,400[\text{cm}^3]$$

$$T_{Compactación} = 160^{\circ}\text{C}$$

Pastilla I

$$G_{mb} = \frac{1\,180,81g}{1\,187,23g - 689,90g}$$

$$G_{mb} = 2,374$$

$$Volumen = 497,330[\text{cm}^3]$$

Pastilla II

$$G_{mb} = \frac{1\,187,94g}{1\,195,64g - 694,68g}$$

$$G_{mb} = 2,371$$

$$Volumen = 500,960[\text{cm}^3]$$

$$T_{Compactación} = 170^{\circ}\text{C}$$

Pastilla I

$$G_{mb} = \frac{1\,170,55g}{1\,176,31g - 682,10g}$$

$$G_{mb} = 2,369$$

$$Volumen = 494,210[\text{cm}^3]$$

Pastilla II

$$G_{mb} = \frac{1\,198,46g}{1\,202,34g - 704,85g}$$

$$G_{mb} = 2,409$$

$$Volumen = 497,490[\text{cm}^3]$$

$$T_{\text{Compactación}} = 180^{\circ}\text{C}$$

Pastilla I

$$G_{mb} = \frac{1\,185,52\text{g}}{1\,189,53\text{g} - 694,53\text{g}}$$

$$G_{mb} = 2,395$$

$$\text{Volumen} = 495,000[\text{cm}^3]$$

Pastilla II

$$G_{mb} = \frac{1\,179,84\text{g}}{1\,184,24\text{g} - 693,21\text{g}}$$

$$G_{mb} = 2,403$$

$$\text{Volumen} = 491,300[\text{cm}^3]$$

#### 8.4. Gravedad específica máxima teórica y densidad de mezclas asfálticas para pavimentos

Del concreto asfáltico tipo E se realizaron dos ensayos para la gravedad específica teórica máxima, según las respectivas normas AASHTO T 209-05, ASTM D 2041-00, INV E-735-07.

$$G_{mm_I} = \frac{1\,000\text{g}}{1\,000\text{g} + 7\,379,8\text{g} - 7\,976,16\text{g}}$$

$$G_{mm_I} = 2,477$$

$$G_{mm_{II}} = \frac{1\,000\text{g}}{1\,000\text{g} + 7\,367,0\text{g} - 7\,968,00\text{g}}$$

$$G_{mm_{II}} = 2,506$$

$$G_{mm_{\text{promedio}}} = \frac{2,477 + 2,506}{2}$$

$$G_{mm_{\text{promedio}}} = 2,492$$

### 8.5. Porcentaje de vacíos de aire en la mezcla compactada respecto al volumen del espécimen

El porcentaje de vacíos, se obtuvo de los resultados propiamente de la gravedad específica bulk y gravedad específica máxima, para cada espécimen de los cuales se obtuvieron los siguientes datos:

$$T_{Compactación} = 70^{\circ}\text{C}$$

Pastilla I

$$V_a = 100 \left( 1 - \frac{2,200}{2,492} \right)$$

$$V_a = 11,717$$

Pastilla II

$$V_a = 100 \left( 1 - \frac{2,194}{2,492} \right)$$

$$V_a = 11,958$$

$$T_{Compactación} = 80^{\circ}\text{C}$$

Pastilla I

$$V_a = 100 \left( 1 - \frac{2,250}{2,492} \right)$$

$$V_a = 9,711$$

Pastilla II

$$V_a = 100 \left( 1 - \frac{2,237}{2,492} \right)$$

$$V_a = 10,233$$

$$T_{Compactación} = 90^{\circ}\text{C}$$

Pastilla I

$$V_a = 100 \left( 1 - \frac{2,251}{2,492} \right)$$

$$V_a = 9,671$$

Pastilla II

$$V_a = 100 \left( 1 - \frac{2,239}{2,492} \right)$$

$$V_a = 10,152$$

$$T_{Compactación} = 100^{\circ}\text{C}$$

Pastilla I

$$V_a = 100 \left( 1 - \frac{2,261}{2,492} \right)$$

$$V_a = 9,270$$

Pastilla II

$$V_a = 100 \left( 1 - \frac{2,245}{2,492} \right)$$

$$V_a = 9,912$$

$$T_{Compactación} = 110^{\circ}\text{C}$$

Pastilla I

$$V_a = 100 \left( 1 - \frac{2,283}{2,492} \right)$$

$$V_a = 8,387$$

Pastilla II

$$V_a = 100 \left( 1 - \frac{2,275}{2,492} \right)$$

$$V_a = 8,708$$

$$T_{Compactación} = 120^{\circ}\text{C}$$

Pastilla I

$$V_a = 100 \left( 1 - \frac{2,306}{2,492} \right)$$

$$V_a = 7,464$$

Pastilla II

$$V_a = 100 \left( 1 - \frac{2,271}{2,492} \right)$$

$$V_a = 8,868$$

$$T_{Compactación} = 130^{\circ}\text{C}$$

Pastilla I

$$V_a = 100 \left( 1 - \frac{2,347}{2,492} \right)$$

$$V_a = 5,819$$

Pastilla II

$$V_a = 100 \left( 1 - \frac{2,346}{2,492} \right)$$

$$V_a = 5,859$$

$$T_{Compactación} = 140^{\circ}\text{C}$$

Pastilla I

$$V_a = 100 \left( 1 - \frac{2,369}{2,492} \right)$$

$$V_a = 4,936$$

Pastilla II

$$V_a = 100 \left( 1 - \frac{2,363}{2,492} \right)$$

$$V_a = 5,177$$

$$T_{Compactación} = 150^{\circ}\text{C}$$

Pastilla I

$$V_a = 100 \left( 1 - \frac{2,364}{2,492} \right)$$

$$V_a = 5,136$$

Pastilla II

$$V_a = 100 \left( 1 - \frac{2,379}{2,492} \right)$$

$$V_a = 4,535$$

$$T_{Compactación} = 160^{\circ}\text{C}$$

Pastilla I

$$V_a = 100 \left( 1 - \frac{2,374}{2,492} \right)$$

$$V_a = 4,735$$

Pastilla II

$$V_a = 100 \left( 1 - \frac{2,371}{2,492} \right)$$

$$V_a = 4,856$$

$$T_{Compactación} = 170^{\circ}\text{C}$$

Pastilla I

$$V_a = 100 \left( 1 - \frac{2,369}{2,492} \right)$$

$$V_a = 4,936$$

Pastilla II

$$V_a = 100 \left( 1 - \frac{2,409}{2,492} \right)$$

$$V_a = 3,331$$

$$T_{Compactación} = 180^{\circ}\text{C}$$

Pastilla I

$$V_a = 100 \left( 1 - \frac{2,395}{2,492} \right)$$

$$V_a = 3,892$$

Pastilla II

$$V_a = 100 \left( 1 - \frac{2,403}{2,492} \right)$$

$$V_a = 3,571$$

## 8.6. Resistencia de mezclas asfálticas en caliente empleando el aparato Marshall

La resistencia a la carga y la deformación, son dos factores importantes, para las mezclas asfálticas en caliente, estos datos son obtenidos directamente del ensayo de resistencia Marshall. Los cuales son los siguientes:

$$T_{\text{Compactación}} = 70^{\circ}\text{C}$$

**Pastilla I**

$$E = 108$$

$$F = 21$$

$$\text{Estabilidad} = \frac{108(1\,050)\text{lbs}}{110,4}$$

$$\text{Flujo} = 21(0,01)\text{in}$$

$$\text{Flujo} = 0,21\text{in}$$

$$\text{Estabilidad} = 1\,027,174\text{lbs}$$

**Pastilla II**

$$E = 107$$

$$F = 22$$

$$\text{Estabilidad} = \frac{107(1\,050)\text{lbs}}{110,4}$$

$$\text{Flujo} = 22(0,01)\text{in}$$

$$\text{Flujo} = 0,22\text{in}$$

$$\text{Estabilidad} = 1\,017,663\text{lbs}$$

$$T_{\text{Compactación}} = 80^{\circ}\text{C}$$

**Pastilla I**

$$E = 146$$

$$F = 18$$

$$\text{Estabilidad} = \frac{146(1\,400)\text{lbs}}{147,3}$$

$$\text{Flujo} = 18(0,01)\text{in}$$

$$\text{Flujo} = 0,18\text{in}$$

$$\text{Estabilidad} = 1\,387,644\text{lbs}$$

**Pastilla II**

$$E = 156$$

$$F = 20$$

$$\text{Estabilidad} = \frac{156(1\,500)\text{lbs}}{157,9}$$

$$\text{Flujo} = 20(0,01)\text{in}$$

$$\text{Flujo} = 0,20\text{in}$$

$$\text{Estabilidad} = 1\,481,951\text{lbs}$$

$$T_{\text{Compactación}} = 90^{\circ}\text{C}$$

**Pastilla I**

$$E = 125$$

$$F = 17$$

$$\text{Estabilidad} = \frac{125(1\,200)\text{lbs}}{126,2}$$

$$\text{Flujo} = 17(0,01)\text{in}$$

$$\text{Flujo} = 0,17\text{in}$$

$$\text{Estabilidad} = 1\,188,590\text{lbs}$$

**Pastilla II**

$$E = 140$$

$$F = 18$$

$$\text{Estabilidad} = \frac{140(1\,350)\text{lbs}}{142,0}$$

$$\text{Flujo} = 18(0,01)\text{in}$$

$$\text{Flujo} = 0,18\text{in}$$

$$\text{Estabilidad} = 1\,330,986\text{lbs}$$

$$T_{\text{Compactación}} = 100^{\circ}\text{C}$$

**Pastilla I**

$$E = 170$$

$$F = 17$$

$$\text{Estabilidad} = \frac{170(1\,650)\text{lbs}}{173,7}$$

$$\text{Flujo} = 17(0,01)\text{in}$$

$$\text{Flujo} = 0,17\text{in}$$

$$\text{Estabilidad} = 1\,614,853\text{lbs}$$

**Pastilla II**

$$E = 160$$

$$F = 17$$

$$\text{Estabilidad} = \frac{160(1\,550)\text{lbs}}{163,2}$$

$$\text{Flujo} = 17(0,01)\text{in}$$

$$\text{Flujo} = 0,17\text{in}$$

$$\text{Estabilidad} = 1\,519,608\text{lbs}$$



$$T_{\text{Compactación}} = 110^{\circ}\text{C}$$

**Pastilla I**

$$E = 172$$

$$F = 20$$

$$\text{Estabilidad} = \frac{172(1\,650)\text{lbs}}{173,7}$$

$$\text{Flujo} = 20(0,01)\text{in}$$

$$\text{Flujo} = 0,20\text{in}$$

$$\text{Estabilidad} = 1\,633,851\text{lbs}$$

**Pastilla II**

$$E = 190$$

$$F = 17$$

$$\text{Estabilidad} = \frac{190(1\,850)\text{lbs}}{194,9}$$

$$\text{Flujo} = 17(0,01)\text{in}$$

$$\text{Flujo} = 0,17\text{in}$$

$$\text{Estabilidad} = 1\,803,489\text{lbs}$$

$$T_{\text{Compactación}} = 120^{\circ}\text{C}$$

**Pastilla I**

$$E = 204$$

$$F = 18$$

$$\text{Estabilidad} = \frac{204(1\,950)\text{lbs}}{205,4}$$

$$\text{Flujo} = 18(0,01)\text{in}$$

$$\text{Flujo} = 0,18\text{in}$$

$$\text{Estabilidad} = 1\,936,709\text{lbs}$$

**Pastilla II**

$$E = 195$$

$$F = 17$$

$$\text{Estabilidad} = \frac{195(1\,900)\text{lbs}}{200,1}$$

$$\text{Flujo} = 17(0,01)\text{in}$$

$$\text{Flujo} = 0,17\text{in}$$

$$\text{Estabilidad} = 1\,851,574\text{lbs}$$

$$T_{Compactación} = 130^{\circ}\text{C}$$

**Pastilla I**

$$EE = 239$$

$$F = 15$$

$$Estabilidad = \frac{239(2\ 300)lbs}{242,5}$$

$$Flujo = 15(0,01)in$$

$$Flujo = 0,15in$$

$$Estabilidad = 2\ 266,804lbs$$

**Pastilla II**

$$E = 250$$

$$F = 17$$

$$Estabilidad = \frac{250(2\ 400)lbs}{253,1}$$

$$Flujo = 17(0,01)in$$

$$Flujo = 0,17in$$

$$Estabilidad = 2\ 370,605lbs$$

$$T_{Compactación} = 140^{\circ}\text{C}$$

**Pastilla II**

$$E = 271$$

$$F = 11$$

$$Estabilidad = \frac{271(2\ 600)lbs}{274,3}$$

$$Flujo = 11(0,01)in$$

$$Flujo = 0,11in$$

$$Estabilidad = 2\ 568,720lbs$$

**Pastilla II**

$$E = 325$$

$$F = 17$$

$$Estabilidad = \frac{325(3\ 100)lbs}{327,4}$$

$$Flujo = 17(0,01)in$$

$$Flujo = 0,17in$$

$$Estabilidad = 3\ 077,276lbs$$

$$T_{Compactación} = 150^{\circ}\text{C}$$

**Pastilla I**

$$E = 317$$

$$F = 10$$

$$Estabilidad = \frac{317(3\ 050)lbs}{322,1}$$

$$Flujo = 10(0,01)in$$

$$Flujo = 0,10in$$

$$Estabilidad = 3\ 001,708lbs$$

**Pastilla II**

$$E = 312$$

$$F = 17$$

$$Estabilidad = \frac{312(3\ 000)lbs}{316,8}$$

$$Flujo = 17(0,01)in$$

$$Flujo = 0,17in$$

$$Estabilidad = 2\ 954,545lbs$$

$$T_{Compactación} = 160^{\circ}\text{C}$$

**Pastilla II**

$$E = 315$$

$$F = 9$$

$$Estabilidad = \frac{315(3\ 000)lbs}{316,8}$$

$$Flujo = 9(0,01)in$$

$$Flujo = 0,09in$$

$$Estabilidad = 2\ 982,955lbs$$

**Pastilla II**

$$E = 325$$

$$F = 13$$

$$Estabilidad = \frac{325(3\ 100)lbs}{327,4}$$

$$Flujo = 13(0,01)in$$

$$Flujo = 0,13in$$

$$Estabilidad = 3\ 077,276lbs$$

$$T_{Compactación} = 170^{\circ}\text{C}$$

**Pastilla I**

$$E = 320$$

$$F = 11$$

$$Estabilidad = \frac{320(3\ 050)lbs}{322,1}$$

$$Flujo = 11(0,01)in$$

$$Flujo = 0,11in$$

$$Estabilidad = 3\ 030,115lbs$$

**Pastilla II**

$$E = 324$$

$$F = 10$$

$$Estabilidad = \frac{324(3\ 100)lbs}{327,4}$$

$$Flujo = 10(0,01)in$$

$$Flujo = 0,10in$$

$$Estabilidad = 3\ 067,807lbs$$

$$T_{Compactación} = 180^{\circ}\text{C}$$

**Pastilla I**

$$E = 310$$

$$F = 10$$

$$Estabilidad = \frac{310(2\ 950)lbs}{311,5}$$

$$Flujo = 10(0,01)in$$

$$Flujo = 0,10in$$

$$Estabilidad = 2\ 935,795lbs$$

**Pastilla II**

$$E = 370$$

$$F = 9$$

$$Estabilidad = \frac{370(3\ 500)lbs}{370}$$

$$Flujo = 9(0,01)in$$

$$Flujo = 0,09in$$

$$Estabilidad = 3\ 500,000lbs$$

## 8.7. Análisis granulométrico de los agregados extraídos de mezclas asfálticas

Tabla IV. Análisis granulométrico de los agregados extraídos de mezclas asfálticas I

Granulometría I						
Tamiz	Diámetro (mm)	$P_{BR}$	$P_{NR}$	%Ret.	%Ret. ac.	%Pasa
1	25,000					
¾	19,000	250,520	0	0	0	100
½	12,500	273,460	22,94	3,547	3,547	96,453
Nro.4	4,750	526,390	252,93	39,106	42,653	57,347
Nro.8	2,360	648,680	122,29	18,908	61,560	38,440
Nro.50	0,300	833,250	184,57	28,537	90,097	9,903
Nro.200	0,075	857,830	24,58	3,800	93,897	6,103
Σ			607,31			

Fuente: elaboración propia.

Tabla V. Análisis granulométrico de los agregados extraídos de mezclas asfálticas II

Granulometría II						
Tamiz	Diámetro (mm)	$P_{BR}$	$P_{NR}$	%Ret.	%Ret. ac.	%Pasa
1	25,000					
¾	19,000	248,540	0	0	0	100
½	12,500	283,780	35,24	5,484	5,484	94,516
Nro.4	4,750	483,260	199,48	31,045	36,529	63,471
Nro.8	2,360	653,340	170,08	26,469	62,998	37,002
Nro.50	0,300	812,430	159,09	24,759	87,757	12,243
Nro.200	0,075	852,310	39,88	6,206	93,963	6,037
Σ			603,77			

Fuente: elaboración propia.

## 9. TABLAS DE RESUMEN

Las tablas de resúmenes son la forma ordenada de observar los resultados obtenidos, a las cuales nos podemos abocar para percibir de una forma resumida el comportamiento del concreto asfáltico tipo “E” a los diferentes ensayos.

Tabla VI. **Extracción cuantitativa del asfalto en mezclas en caliente para pavimentos**

Espécimen I	Espécimen II
4,961	5,031

Fuente: elaboración propia.

Tabla VII. **Gravedad específica bulk y densidad de la mezcla asfáltica**

Temperatura(°C)	Espécimen I		Espécimen II	
	$G_{mb}$	Volumen(cm <sup>3</sup> )	$G_{mb}$	Volumen(cm <sup>3</sup> )
70	2,200	543,510	2,194	542,340
80	2,250	529,640	2,237	532,320
90	2,251	530,900	2,239	534,370
100	2,261	529,340	2,245	530,020
110	2,283	515,850	2,275	524,620
120	2,306	515,930	2,271	526,030
130	2,347	503,270	2,346	504,800
140	2,369	498,760	2,363	506,920
150	2,364	501,610	2,379	500,400
160	2,374	497,330	2,371	500,960
170	2,369	494,210	2,409	497,490
180	2,395	495,000	2,403	491,030

Fuente: elaboración propia.

**Tabla VIII. Gravedad específica máxima teórica y densidad de mezclas asfálticas para pavimentos**

Espécimen I	Espécimen II
2,477	2,506

Fuente: elaboración propia.

**Tabla IX. Porcentaje de vacíos de aire en la mezcla compactada respecto al volumen del espécimen**

Temperatura(°C)	Espécimen I	Espécimen II
70	11,717	11,958
80	9,711	10,233
90	9,671	10,152
100	9,270	9,912
110	8,387	8,708
120	7,464	8,868
130	5,819	5,859
140	4,936	5,177
150	5,136	4,535
160	4,735	4,856
170	4,936	3,331
180	3,892	3,571

Fuente: elaboración propia.

Tabla X. **Resistencia de mezclas asfálticas en caliente empleando el aparato Marshall**

Temperatura(°C)	Espécimen I		Espécimen II	
	Estabilidad	Flujo	Estabilidad	Flujo
70	1 027,174	0,21	1 017,663	0,22
80	1 387,644	0,18	1 481,951	0,20
90	1 188,590	0,17	1 330,986	0,18
100	1 614,853	0,17	1 519.608	0,17
110	1 633,851	0,20	1 803.489	0,17
120	1 936,709	0,18	1 851.574	0,17
130	2 266,804	0,15	2 370.605	0,17
140	2 568,720	0,11	3 077.276	0,17
150	3 001,708	0,10	2 954.545	0,17
160	2 982,955	0,09	3 077.276	0,13
170	3 030,115	0,11	3 067.807	0,10
180	2 935,795	0,10	3 500.000	0,09

Fuente: elaboración propia.



Tabla XI. **Análisis granulométrico I de los agregados extraídos de mezclas asfálticas**

Granulometría I						
Tamiz	Diámetro (mm)	$P_{BR}$	$P_{NR}$	%Ret.	%Ret. ac.	%Pasa
1	25,000					
¾	19,000	250,520	0	0	0	100
½	12,500	273,460	22,94	3,547	3,547	96,453
Nro.4	4,750	526,390	252,93	39,106	42,653	57,347
Nro.8	2,360	648,680	122,29	18,908	61,560	38,440
Nro.50	0,300	833,250	184,57	28,537	90,097	9,903
Nro.200	0,075	857,830	24,58	3,800	93,897	6,103
Σ			607,31			

Fuente: elaboración propia.

Tabla XII. **Análisis granulométrico II de los agregados extraídos de mezclas asfálticas**

Granulometría II						
Tamiz	Diámetro (mm)	$P_{BR}$	$P_{NR}$	%Ret.	%Ret. ac.	%Pasa
1	25,000					
¾	19,000	248,540	0	0	0	100
½	12,500	283,780	35,24	5,484	5,484	94,516
Nro.4	4,750	483,260	199,48	31,045	36,529	63,471
Nro.8	2,360	653,340	170,08	26,469	62,998	37,002
Nro.50	0,300	812,430	159,09	24,759	87,757	12,243
Nro.200	0,075	852,310	39,88	6,206	93,963	6,037
Σ			603,77			

Fuente: elaboración propia.

Tabla XIII. **Resumen de promedios**

Temperatura(°C)	$G_{mb}$	$G_{mm}$	Estabilidad	Flujo
70	2,197	2,492	1 022,419	0,215
80	2,244	2,492	1 434,798	0,190
90	2,245	2,492	1 259,788	0,175
100	2,253	2,492	1 567,231	0,170
110	2,279	2,492	1 718,670	0,185
120	2,289	2,492	1 894,142	0,175
130	2,347	2,492	2 318,705	0,160
140	2,366	2,492	2 822,998	0,140
150	2,372	2,492	2 978,127	0,135
160	2,373	2,492	3 030,116	0,110
170	2,389	2,492	3 048,961	0,105
180	2,389	2,492	3 217,898	0,095

Fuente: elaboración propia.



## CONCLUSIONES

1. Se tomó en un rango de trabajo mayor a 70°C y menor que 180°C, por razones que el concreto asfáltico pierde maleabilidad a temperaturas menores a los 70°C dejando una gran cantidad de vacíos, mientras que, por otro lado, a temperaturas mayores de los 180°C, pierde por el calor la mayoría de sus adherentes bituminosos restándole al mismo, características como los son la adherencia y ductilidad.
2. Conforme a los datos obtenidos en los diferentes ensayos de laboratorio para los diferentes especímenes a temperaturas en un rango de 70°C a 180°C de un concreto asfáltico tipo "E", podemos decir que, mientras aumenta la temperatura de compactación disminuye su porcentaje de vacíos y flujo, mientras que la densidad bulk y la estabilidad van en aumento, lo cual lo podemos observar en los apéndices 7 y 8.
3. Tomando en cuenta que la estabilidad y flujo son valores donde el primero indica la carga que soporta el concreto asfáltico y el segundo la deformación del mismo, de lo cual podemos concluir, que lo que se observa en el intervalo del estudio de 70°C - 180°C, es que mientras aumenta la temperatura el concreto asfáltico gana mayor resistencia pero se muestra menos dúctil, guiándonos en las Especificaciones Generales para la Construcción de Carreteras y Puentes, se puede apreciar que la estabilidad apéndice 6 cumple en la mayoría de sus parámetros, pero el flujo del apéndice 7 nos restringe en rango 140-180°C tráfico liviano, y en el rango de 130-180°C para tráfico pesado.

4. El cambio volumétrico en el asfalto se puede observar en el método de bulk, donde la diferencia entre la masa en el aire del espécimen saturado, superficie seca en gramos y la masa del espécimen en el agua en gramos, nos da como resultado el volumen del espécimen en centímetros cúbicos lo cual, si se compara respecto con el método geométrico para encontrar el volumen, varía en cifras, pero los resultados en ambos métodos son muy similares. Apéndices 9, 10 y 11.
  
5. Si se hace una comparación de los volúmenes, encontrados, tanto, por el método bulk como por el método geométrico, de lo cual, podemos concluir que el método de bulk es un volumen más aproximado ya que se toman menos vacíos por la forma en que se realiza dicho ensayo. Por otro lado, al hacer una comparación de la gráfica de vacíos por el método Bulk, respecto al método geométrico podemos ver que las gráficas muestran un comportamiento muy similar con respecto a los datos obtenidos en cada uno de estos.

## RECOMENDACIONES

1. Se tiene que tomar en rango de temperaturas donde el concreto cumpla con todas las características propias para su colocación, respecto a su adherencia, ductilidad y principalmente porcentaje de vacíos.
2. En un rango de 70°C a 180°C en el laboratorio para mezclas asfálticas tipo “E” si aumenta la temperatura de compactación disminuye su porcentaje de vacíos y flujos, y aumenta la gravedad específica bulk y la estabilidad.
3. Mientras aumenta la temperatura en las mezclas asfálticas en caliente tipo “E”, estas ganan resistencia, pero se tornan más dúctiles lo cual nos restringe en un rango de 140-180°C tráfico liviano, y en un rango de 130-180°C para tráfico pesado.
4. Al calcular el volumen utilizando el método geométrico o el método bulk se obtiene en ambos muy buenos resultados.
5. Para calcular volúmenes de especímenes compactados de mezclas asfálticas, es mejor utilizar el método bulk ya que se toman menos vacíos por la forma en que se realiza.



## BIBLIOGRAFÍA

1. ASTM. *Book of Standards. Standard specification for concrete aggregates*. Estados Unidos de América: D 2172-01, D 2726-00, D 2041-00, D 3203-00.
2. AASHTO. *American Society for Testing and Materials. Estados Unidos de América*: T 164-05, T 166-05, T 209-05, T 269-03, T 245-04, T 030-03.
3. COX TUCH, Pablo Missael. *Manual de laboratorio para estudiantes para el desarrollo de ensayos en concreto asfáltico en caliente*. Trabajo de graduación de Ing. Civil. Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala, Marzo 2015. 153 p.
4. Dirección General de Caminos, Ministerio de Comunicaciones Infraestructura y Vivienda República de Guatemala. *Especificaciones generales para la construcción de carreteras y puentes*. Ingenieros Consultores de Centroamérica S.A. Diciembre 2000.401-3, 526 p.
5. INV. Instituto Nacional de Vías. *Normas de ensayos de materiales para carretera*. República de Colombia: E-732-07, E-733-07, E-735-07, E-736-07, E-748-07, E-782-07.





## APÉNDICES

### Apéndice 1. Resumen de promedio de datos obtenidos en laboratorio por temperatura

Temperatura (°C)	Alturas (mm)	Diámetros (mm)	%AC (%)	Bulk	Estabilidad (lbs)	Rice	Flujo (in)	Vacios (%)	Volumen (mm <sup>3</sup> )
70	72,870	101,094	4,966	2,197	1 022,419	2,492	21,5	11,828	584 910,493
80	70,415	101,469	4,966	2,244	1 434,798	2,492	19,0	09,972	569 405,720
90	69,384	100,984	4,966	2,245	1 259,788	2,492	17,5	09,912	555 717,858
100	69,373	101,437	4,966	2,253	1 567,231	2,492	17,0	09,591	560 625,890
110	67,125	101,563	4,966	2,279	1 718,670	2,492	18,5	08,548	543 807,536
120	66,715	101,345	4,966	2,289	1 894,142	2,492	17,5	08,166	538 168,192
130	65,119	100,770	4,966	2,347	2 318,705	2,492	16,0	05,839	519 349,982
140	64,682	101,387	4,966	2,366	2 822,998	2,492	14,0	05,057	522 201,201
150	64,448	101,357	4,966	2,372	2 978,127	2,492	13,5	04,836	520 004,164
160	64,303	101,227	4,966	2,373	3 030,116	2,492	11,0	04,796	517 504,164
170	63,694	101,042	4,966	2,389	3 048,961	2,492	10,5	04,134	510 731,063
180	63,539	101,320	4,966	2,399	3 217,898	2,492	9,50	03,732	512 295,592

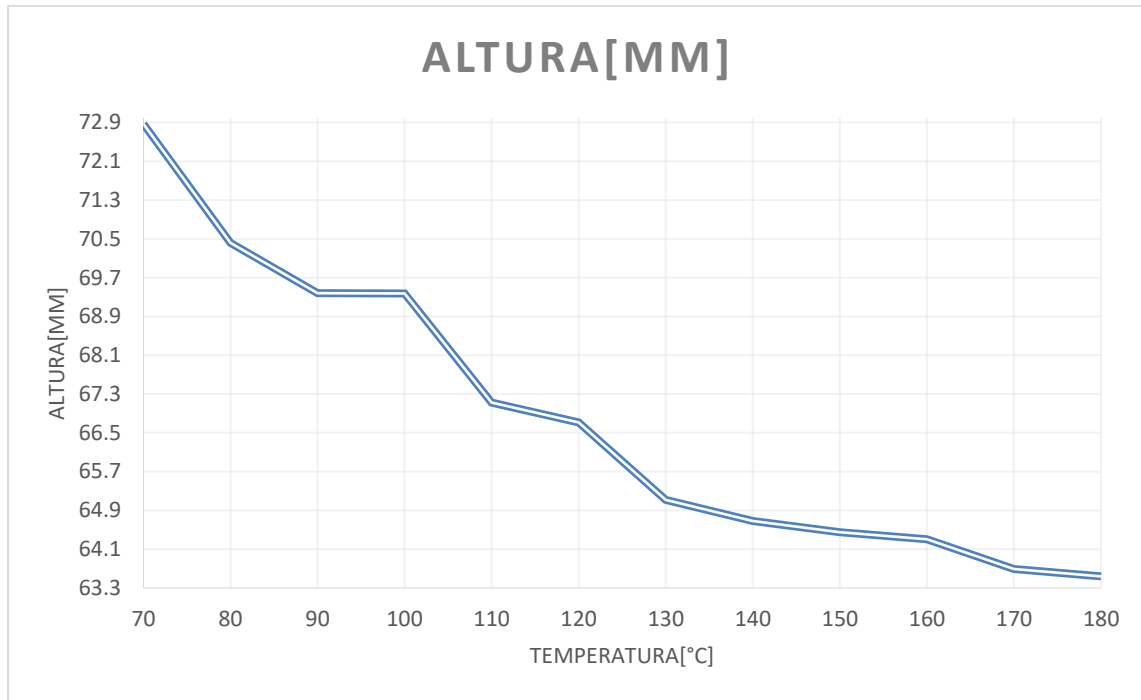
Fuente: elaboración propia.

### Apéndice 2. Resumen de promedio de datos obtenidos en laboratorio por temperatura incluyendo volumen por método bulk

Temperatura (°C)	Alturas (mm)	Diámetros (mm)	%AC (%)	Bulk	Estabilidad (lbs)	Rice	Flujo (in)	Vacios (%)	Volumen B (mm <sup>3</sup> )	Volumen G (mm <sup>3</sup> )
70	72,870	101,094	4,966	2,197	1 022,419	2,492	21,5	11,828	542 925,00	584 910,493
80	70,415	101,469	4,966	2,244	1 434,798	2,492	19,0	09,972	530 980,00	569 405,720
90	69,384	100,984	4,966	2,245	1 259,788	2,492	17,5	09,912	532 635,00	555 717,858
100	69,373	101,437	4,966	2,253	1 567,231	2,492	17,0	09,591	529 680,00	560 625,890
110	67,125	101,563	4,966	2,279	1 709,171	2,492	18,5	08,548	520 235,00	543 807,536
120	66,715	101,345	4,966	2,289	1 894,142	2,492	17,5	08,166	520 980,00	538 168,192
130	65,119	100,770	4,966	2,347	2 318,705	2,492	16,0	05,839	504 035,00	519 349,982
140	64,682	101,387	4,966	2,366	2 822,998	2,492	14,0	05,057	502 840,00	522 201,201
150	64,448	101,357	4,966	2,372	2 978,127	2,492	13,5	04,836	501 005,00	520 004,164
160	64,303	101,227	4,966	2,373	3 030,116	2,492	11,0	04,796	499 145,00	517 504,164
170	63,694	101,042	4,966	2,389	3 048,961	2,492	10,5	04,134	495 850,00	510 731,063
180	63,539	101,320	4,966	2,382	3 217,898	2,492	9,50	03,732	493 015,00	512 295,592

Fuente: elaboración propia.

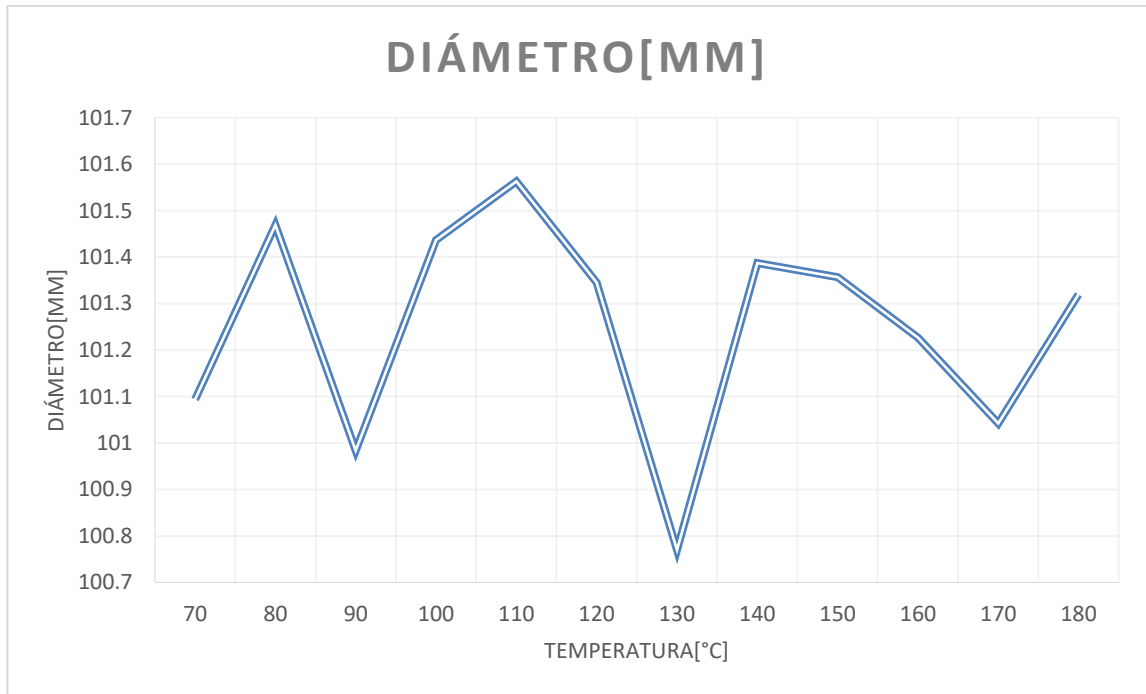
### Apéndice 3. Gráfica temperatura - altura



Temperatura (°C)	Alturas (mm)	
70	72,870	<p>La altura promediada de los especímenes compactados muestra un decrecimiento, en función del aumento de temperatura pero se puede observar que en el intervalo de 170-180°C muestra menor disminución de la altura. Esto nos lleva a suponer que a mayores temperaturas, usando un mismo volumen para el moldeado de los especímenes, se llegará a un punto donde la compactación no varié así mismo el porcentaje de vacíos y la altura de los especímenes. Pero se deberá de tener a una temperatura mayor de 180°C se tendrá un decrecimiento bastante considerable de los ligantes por incineración, dejando en su mayoría solo los agregados del concreto asfáltico.</p>
80	70,415	
90	69,384	
100	69,373	
110	67,125	
120	66,715	
130	65,119	
140	64,682	
150	64,448	
160	64,303	
170	63,694	
180	63,539	

Fuente: elaboración propia.

#### Apéndice 4. Gráfica temperatura – diámetro

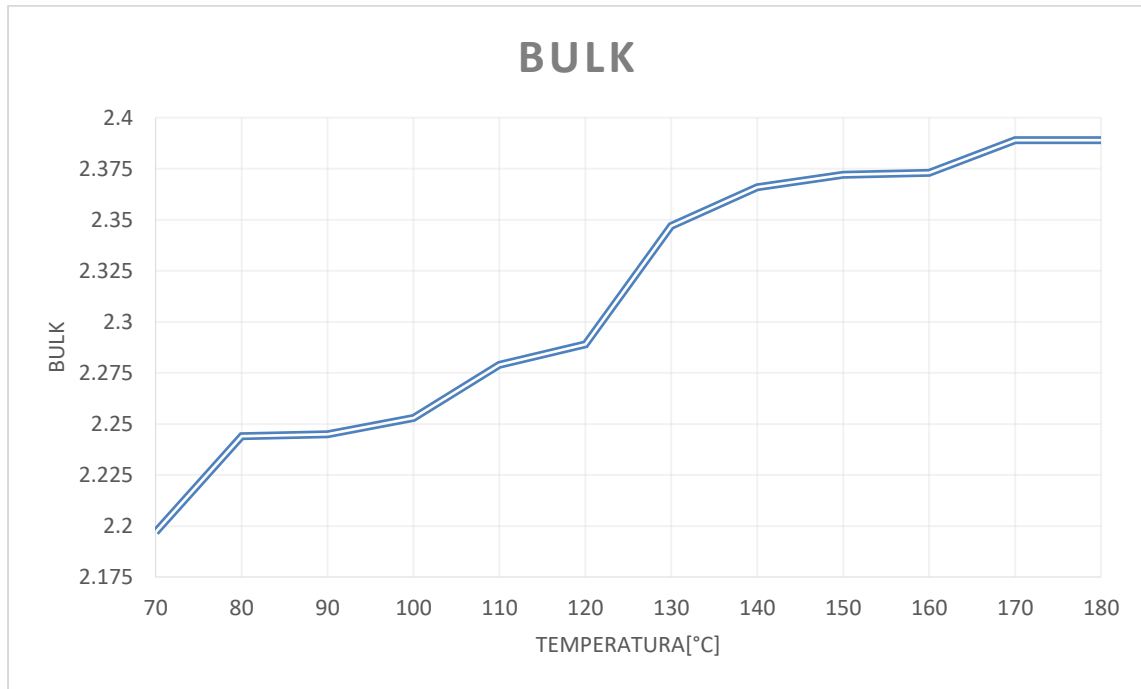


Temperatura (°C)	Diámetros (mm)
70	101,094
80	101,469
90	100,984
100	101,437
110	101,563
120	101,345
130	100,770
140	101,387
150	101,357
160	101,227
170	101,042
180	101,320

Observando el apéndice 4, podemos decir que la gráfica promediada de los diámetros se comporte de una manera desordenada, pero se debe tener en cuenta que los especímenes no son geoméricamente exactos en su totalidad por las características de los materiales, así como las unidades en las que se encuentra medido, ya que el valor de mayor altura más tabulado de los promedios de los diámetros viene siendo 101.563 mm mientras que el más bajo viene dado el valor de 100.770 mm teniendo una diferencia entre estos valores de 0.793 mm aproximadamente de un milímetro.

Fuente: elaboración propia.

## Apéndice 5. Gráfica temperatura – bulk

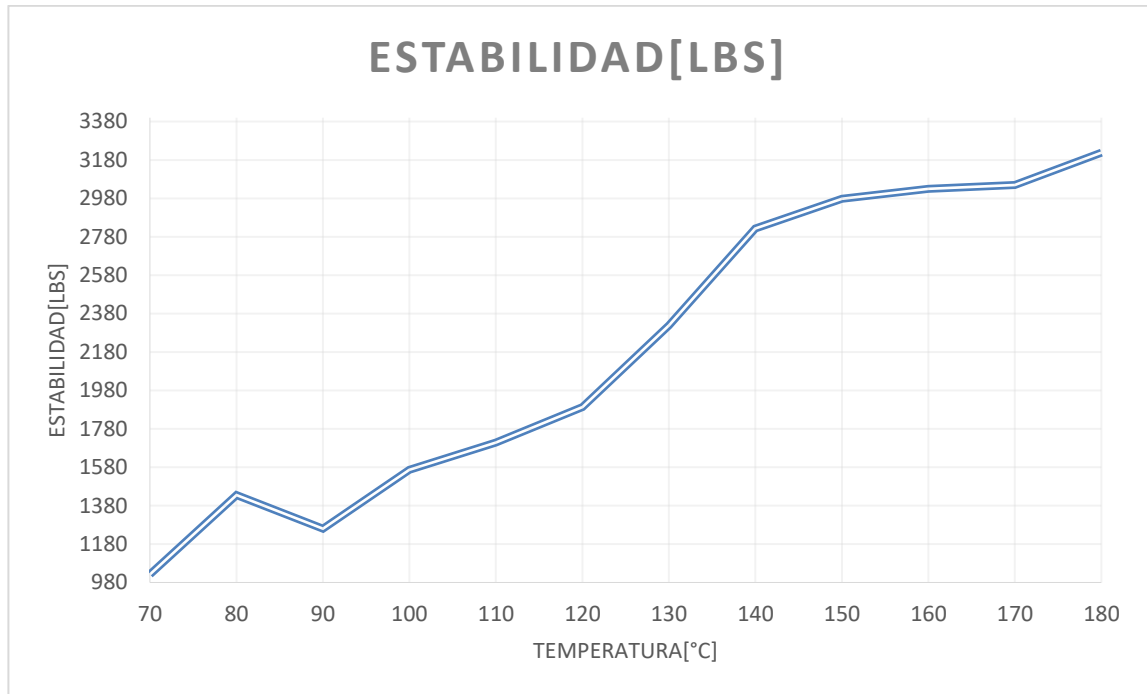


Temperatura (°C)	Bulk
70	2,197
80	2,244
90	2,245
100	2,253
110	2,279
120	2,289
130	2,347
140	2,366
150	2,372
160	2,373
170	2,389
180	2,382

La gravedad específica bulk muestra un aumento, conforme aumenta la temperatura. Además, se puede observar que luego de llegar a la temperatura de 170°C no varía en una forma considerablemente hasta 180°C mostrando un comportamiento casi lineal, y se puede decir que respecto a los datos promediados tabulados el valor máximo para la gravedad bulk se obtuvo en la temperatura 170°C ya que empieza a decrecer de una manera leve. Además, compara bulk (apéndice 5) con los vacíos (apéndice 8). Se puede observar que a menor temperatura hay menor porcentaje de vacíos por lo cual tenemos una mayor densidad en los especímenes.

Fuente: elaboración propia.

## Apéndice 6. Gráfica temperatura – estabilidad

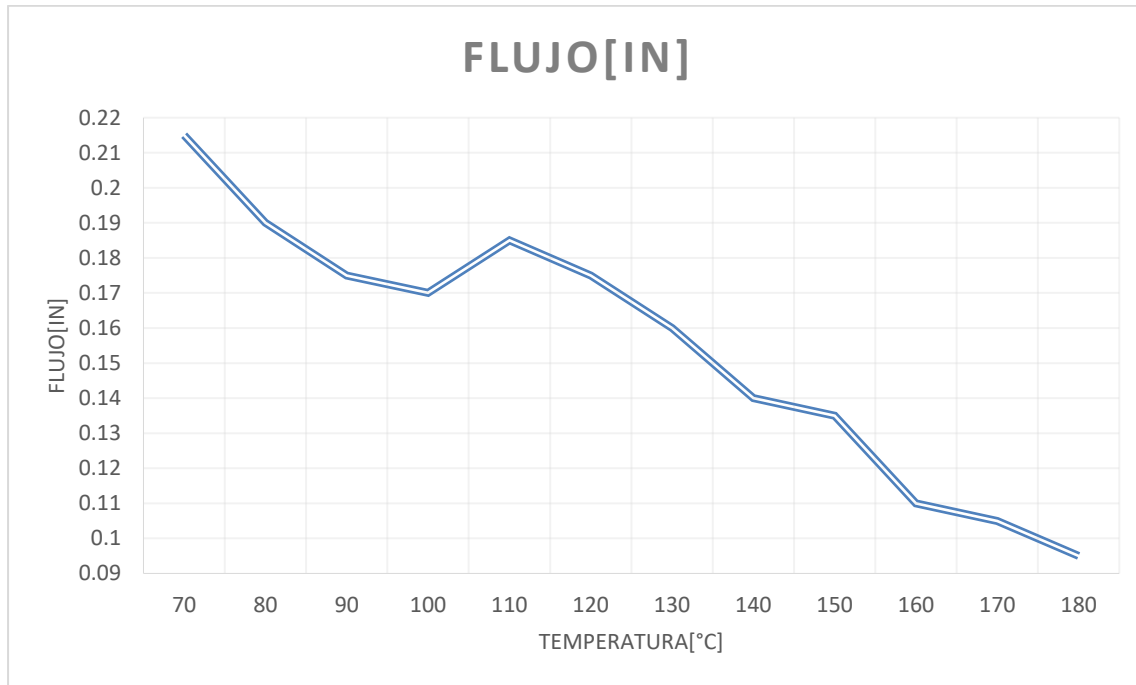


Temperatura (°C)	Estabilidad (lbs)
70	1 022,419
80	1 434,798
90	1 259,788
100	1 567,231
110	1 709,171
120	1 894,142
130	2 318,705
140	2 822,998
150	2 978,127
160	3 030,116
170	3 048,961
180	3 217,898

Basándonos en las especificaciones generales para construcción de carreteras y puentes, sección 401, tabla 401-12, para el ensayo de estabilidad, tenemos en cuenta que el resultado debe ser mayor que 5,338 N (1,200 lb.), por lo cual, para los ensayos realizados en el laboratorio con el aparato Marshall, para encontrar la estabilidad, de lo cual, podemos decir que estos cumplen desde el rango de 80-180°C, aumentando la estabilidad conforme aumenta la temperatura como se puede observar en la apéndice 6.

Fuente: elaboración propia.

## Apéndice 7. Gráfica temperatura – flujo



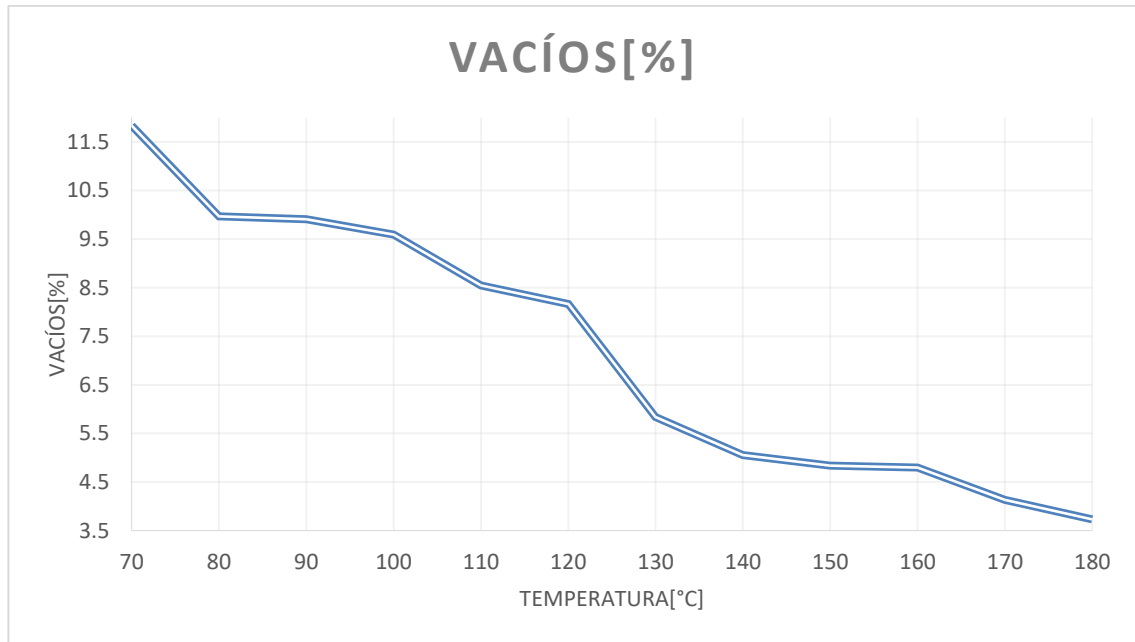
Temperatura (°C)	Flujo 0,01"
70	21,5
80	19,0
90	17,5
100	17,0
110	18,5
120	17,5
130	16,0
140	14,0
150	13,5
160	11,0
170	10,5
180	9,50

El flujo, fluencia, o deformación del concreto asfaltico sometido a cargas muestra un decrecimiento respecto a la temperatura según los datos tabulados promediados, basándonos según las especificaciones generales para construcción de carreteras y puentes 2001, sección 401, tabla 401-12, nos indica que la fluencia se debe encontrar en el rango de 8-16 para tránsito liviano y de 8-14 para tránsito pesado.

Para las temperaturas de compactación según la fluencia podemos decir que el rango 140-180°C puede ser utilizado para tráfico liviano, y en el rango de 130-180°C para tráfico pesado.

Fuente: elaboración propia.

## Apéndice 8. Gráfica temperatura – vacíos

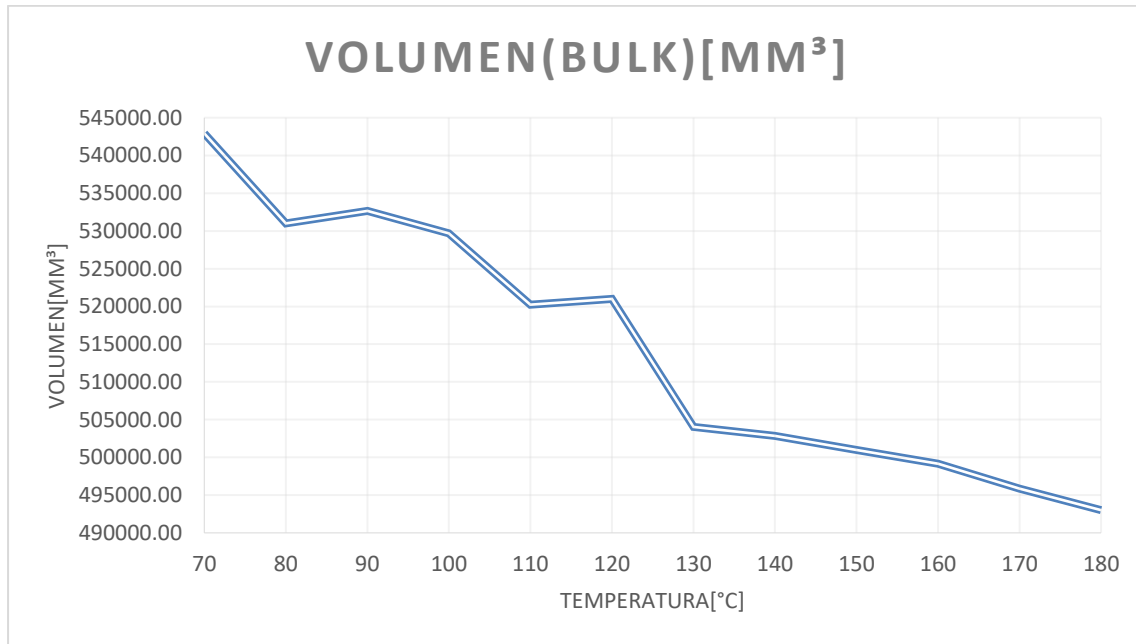


Temperatura (°C)	Vacíos (%)	
70	11,828	<p>Según las especificaciones generales para la construcción de carreteras y puentes 2001, sección 401, tabla 401-12, el porcentaje de vacíos se debe de encontrar en un rango de 3-5%, pero un 6% es aceptable para carreteras de tráfico liviano (esto puede ayudar a aumentar el periodo de vida de la carretera). Podemos observar en los datos obtenidos que esto se cumple en el rango de la temperatura de 140-180°C sin tomar en cuenta los valores mayores a este rango por razones ya mencionadas. Aun el porcentaje de vacíos en 130 puede ser utilizado si se toma en cuenta lo mencionado respecto al tráfico liviano.</p>
80	09,972	
90	09,912	
100	09,591	
110	08,548	
120	08,166	
130	05,839	
140	05,057	
150	04,836	
160	04,796	
170	04,134	
180	03,732	

Fuente: elaboración propia.



Apéndice 9. **Gráfica temperatura – volumen (bulk)**

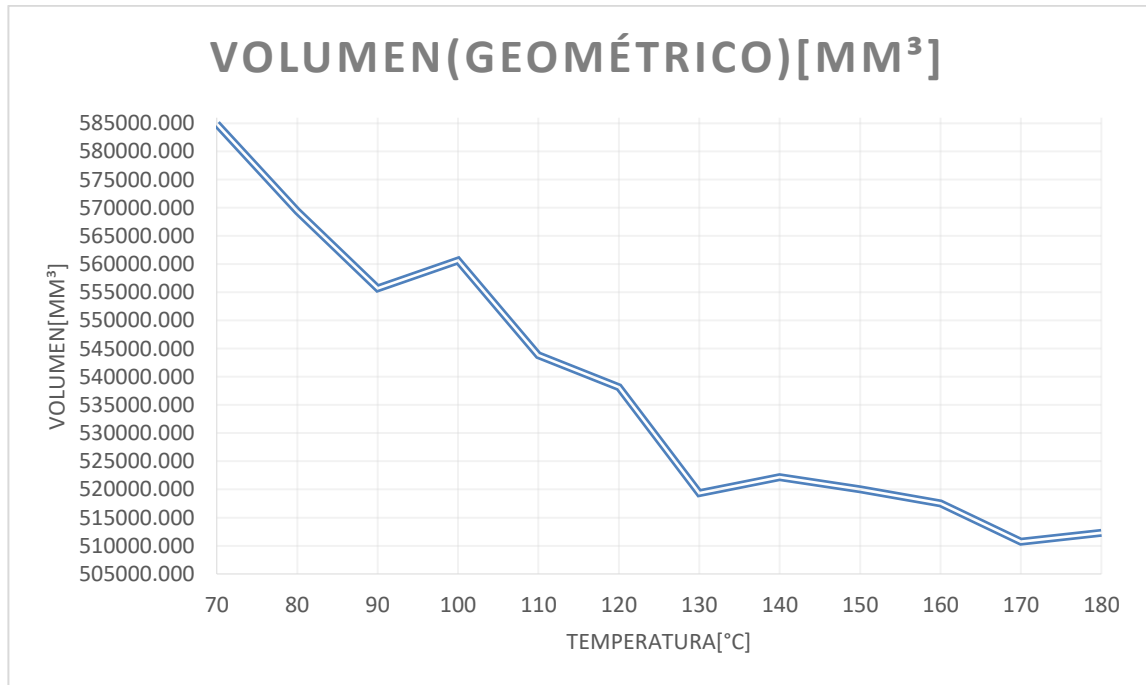


Temperatura (°C)	Volumen (mm <sup>3</sup> )
70	542 925,00
80	530 980,00
90	532 635,00
100	529 680,00
110	520 235,00
120	520 980,00
130	504 035,00
140	502 840,00
150	501 005,00
160	499 145,00
170	495 850,00
180	493 015,00

El volumen disminuye con respecto a la temperatura de compactación, verificándose que se presenta un cambio de aproximadamente 60 cm<sup>3</sup> entre la temperatura más alta a la más baja, como la temperatura de compactación va de 130 C a 140 C se observa que a esas temperaturas el volumen es constante, así mismo también se tiene la idea de que en un determinado momento, la compactación muestra un comportamiento continuo, ya que se pierden todo los ligantes por la temperatura.

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 10. **Gráfica temperatura – volumen (geométrico)**

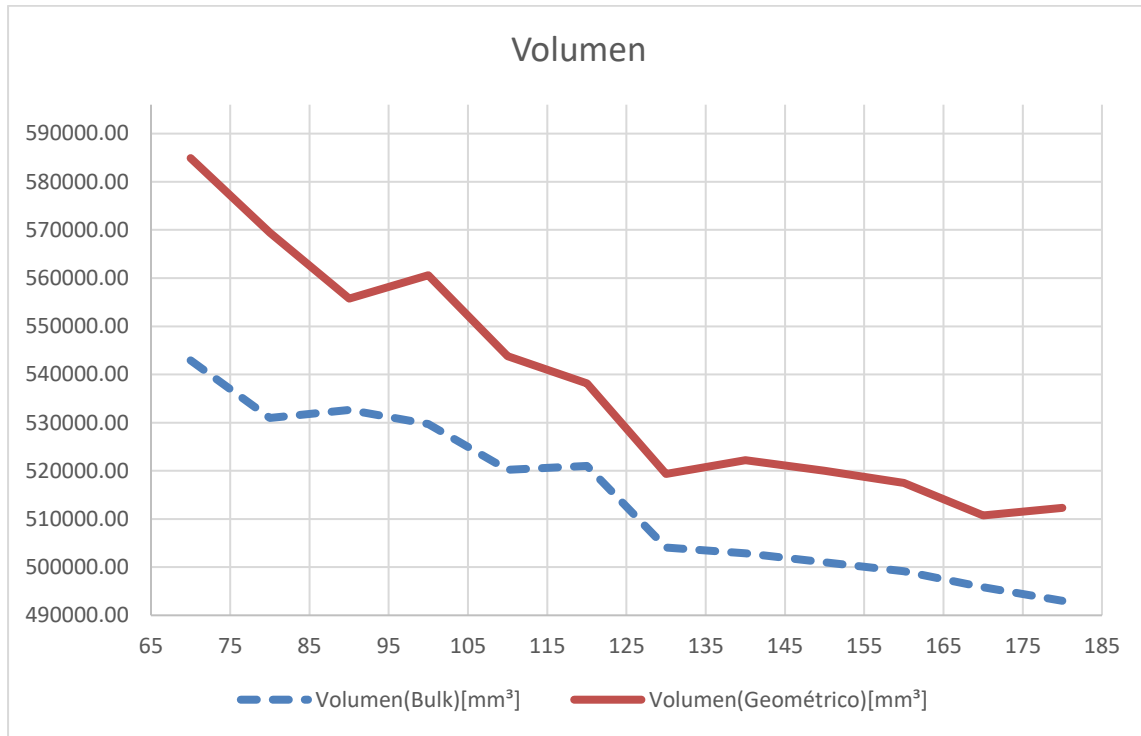


Temperatura (°C)	Volumen (mm <sup>3</sup> )
70	584 910,493
80	569 405,720
90	555 717,858
100	560 625,890
110	543 807,536
120	538 168,192
130	519 349,982
140	522 201,201
150	520 004,164
160	517 504,164
170	510 731,063
180	512 295,592

El volumen por el método geométrico muestra una tendencia muy similar a la del volumen por medio del método bulk, aunque si se observa los datos obtenidos en ambas tablas difieren por 23,449.7379 mm<sup>3</sup> en sus promedios, lo cual es un valor muy elevado. Tomando en cuenta que el método para encontrar el volumen por bulk que viene dado en cm<sup>3</sup>, es equivalente al volumen correspondiente de agua del espécimen, por lo cual no afecta la forma o hendiduras en el espécimen siendo más exacto, aunque esto difiere respecto al criterio y uso que se le piense dar, ya que los dos tienen buenos resultados como se puede observar en el apéndice 11.

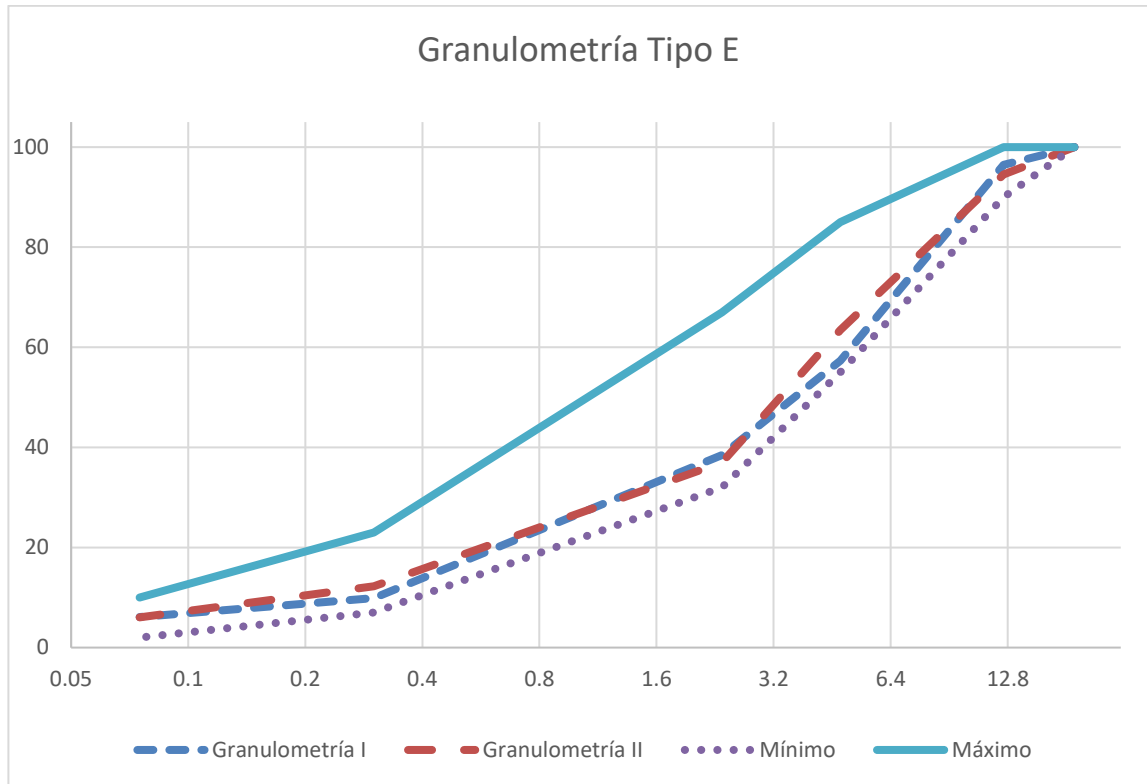
Fuente: elaboración propia.

## Apéndice 11. Comparacion de volúmenes



Fuente: elaboración propia.

## Apéndice 12. Gráfica temperatura – granulometría

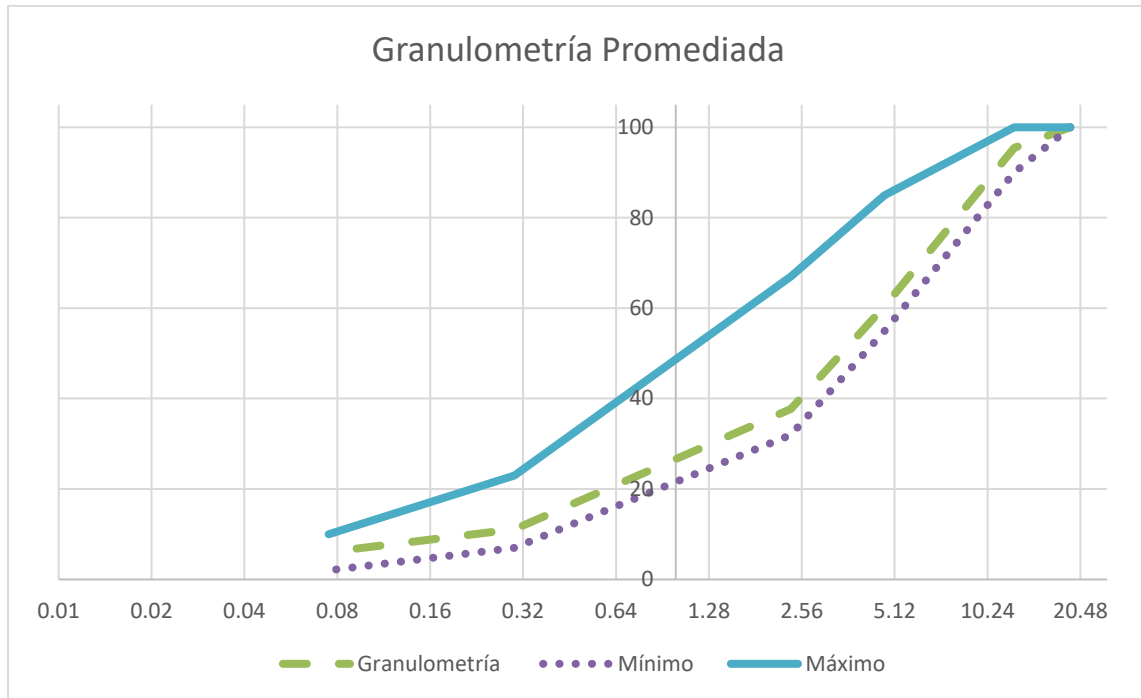


Tamiz	Abertura en mm	Granulometría I %Pasa	Granulometría II %Pasa
1	25,000		
¾	19,000	100	100
½	12,500	96,453	94,516
Nro.4	4,750	57,347	63,471
Nro.8	2,360	38,440	37,002
Nro.50	0,300	9,903	12,243
Nro.200	0,075	6,103	6,037

La gráfica de la granulometría después de realizar el contenido de asfalto, se encuentra dentro de los valores mínimos y máximos que indican las Especificaciones Generales para la Construcción de Carreteras y Puentes en las secciones 401, Tabla 401-1 correspondiente a pavimento de concreto asfáltico en caliente de Guatemala. Donde tanto la granulometría I como la granulometría II se encuentran dentro de los valores máximos y mínimos que nos pide dichas especificaciones como se observa en la apéndice 12, al igual que el promedio de ambas granulometrías como se puede ver en el apéndice 13.

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 13. **Gráfica temperatura – granulometría promediada**



Fuente: elaboración propia.

## Apéndice 14. Resumen de normas

<b>Nombre de la norma</b>	<b>AASHTO</b>	<b>ASTM</b>	<b>INV</b>	<b>NLT</b>
Extracción cuantitativa del asfalto en mezclas en caliente para pavimentos	T 164-05	D 2172-01	E-732-07	
Gravedad específica bulk y densidad de mezclas asfálticas compactadas no absorbentes empleando especímenes saturados y superficie seca	T 166-05	D 2726-00	E-733-07	
Gravedad específica máxima teórica y densidad de mezclas asfálticas para pavimentos	T 209-05	D 2041-00	E-735-07	
Porcentaje de vacíos de aire en mezclas asfálticas compactadas densas y abiertas	T 269-03	D 3203-00	E-736-07	
Resistencia de mezclas asfálticas en caliente empleando el aparato Marshall	T 245-04		E-748-07	159
Análisis granulométrico de los agregados extraídos de mezclas asfálticas	T 030-03		E-782-07	165/90

Fuente: elaboración propia.

**Apéndice 15. Graduación de agregados para pavimento de concreto  
asfáltico (ASTM D 3515)**

Tamaño del tamiz	Porcentaje en masa que pasa el tamiz designado (AASHTO T 27 y T 11)					
	Graduación densidad y tamaño máximo nominal					
	A (50,8 mm)	B (38,1 mm)	C (25,4 mm)	D (19,0 mm)	E (12,5 mm)	F (9,50 mm)
	2"	1½"	1"	¾"	½"	¾"
63,00 mm	100					
50,00 mm	90 - 100	100				
38,10 mm	-----	90-100	1000			
25,00 mm	60 - 80	-----	90-100	100		
19,00 mm	-----	56-80	-----	90-100	1000	
12,50 mm	35-65	-----	56-80	-----	90-100	100
09,50 mm	-----	-----	-----	56-80	-----	90-100
04,75 mm	17-47	23-53	29-59	35-65	44-74	55-85
02,36 mm	10-36	15-41	19-45	23-49	28-58	32-67
00,30 mm	3-15	4-16	5-17	5-19	5-21	7-23
0,075 mm	0-5	0-6	1-7	2-8	2-10	2-10

El tamaño máximo nominal es el tamaño del tamiz mayor siguiente al tamaño del primer tamiz que retenga más del 10% del agregado combinado. El tamaño máximo es el tamiz mayor al correspondiente al tamaño máximo nominal.

Fuente: elaboración propia con base en las especificaciones generales para construcción de carreteras y puentes 2001, sección 401, tabla 401-1.

## Apéndice 16. Requisitos para la mezcla de concreto asfáltico

<b>Método de diseño Marshall AASHTO T 245</b>	<b>Mínimo</b>	<b>Máximo</b>
• Temperatura de compactación de pastilla para producir una viscosidad de:	0.25 Pa-s (250cS)	0.31 Pa-s (250cS)
• Numero de golpes de compactación en cada extremo del espécimen	75	75
• Estabilidad	5,338 N (1,200 lb.)	
• Fluencia en 0,25 mm (0,01 pulg.)		
○ Transito < 10 <sup>6</sup> ESAL	8	16
○ Transito > 10 <sup>6</sup> ESAL	8	14
• Relación estabilidad/fluencia (lb./0.01 pulg.)	120	275
• Porcentaje de vacíos de la mezcla compactada	3	5
• Porcentaje de vacíos en agregado mineral (VAM)	Tabla 401-13	
• Porcentaje de vacíos rellenos con asfalto		
○ Transito < 10 <sup>6</sup> ESAL	65	78
○ Transito > 10 <sup>6</sup> ESAL	65	75
• Relación finos/bitumen	0.6	1.6
• Sensibilidad a la humedad AASHTO T 283 resistencia retenida.	80%	
• Partículas recubiertas con bitumen para definir tiempo de mezclado, AASHTO T 195	95%	

Fuente: elaboración propia con base en las especificaciones generales para construcción de carreteras y puentes 2001, sección 401, tabla 401-12.



## Apéndice 17. Tabla de calibración para el aparato Marshall

HUMBOLDT MFG. CO.

7300 W. AGATITE AVE.

NORRIDGE, IL 60706

4 SEP 2008

ECOMMEND RECALIBRATION ONE YEOR FORM START OF USE AFTER LAST COLIBRATION

CALIBRATIAN FOR MODEL H-4454.100 LBF SERIAL 2366 BY

CALIBRATED USING LOAD CELL 626314 CAL. DATE 10/11/07 DEFLT = .0001in.

LBF	DEFLT	LBF	DEFLT	LBF	DEFLT	LBF	DEFLT	LBF	DEFLT
0	0,1	1 000	105,1	3 500	370,0	6 000	637,9	8 500	908,9
20	2,2	1 050	110,4	3 550	375,3	6 050	643,3	8 550	914,4
40	4,3	1 100	115,7	3 600	380,7	6 100	648,7	8 600	919,8
60	6,4	1 150	121,0	3 650	386,0	6 150	654,1	8 650	925,3
80	8,5	1 200	126,2	3 700	391,3	6 200	659,5	8 700	930,7
100	10,5	1 250	131,5	3 750	396,7	6 250	664,9	8 750	936,2
120	12,6	1 300	136,8	3 800	402,0	6 300	670,3	8 800	941,6
140	14,7	1 350	142,0	3 850	407,3	6 350	675,7	8 850	947,1
160	16,8	1 400	147,3	3 900	412,7	6 400	681,1	8 900	952,6
180	18,9	1 450	152,6	3 950	418,0	6 450	686,5	8 950	958,0
200	21,0	1 500	157,9	4 000	423,3	6 500	691,9	9 000	963,5
220	23,1	1 550	163,2	4 050	428,7	6 550	697,3	9 050	968,9
240	25,2	1 600	168,4	4 100	434,0	6 600	702,7	9 100	974,4
260	27,3	1 650	173,7	4 150	439,4	6 650	708,1	9 150	979,9
280	29,4	1 700	179,0	4 200	444,7	6 700	713,5	9 200	985,5
300	31,5	1 750	184,3	4 250	450,1	6 750	718,9	9 250	990,8
320	33,6	1 800	189,6	4 300	455,4	6 800	724,3	9 300	996,3
340	35,7	1 850	194,9	4 350	460,8	6 850	729,7	9 350	1 001,8
360	37,8	1 900	200,1	4 400	466,1	6 900	735,1	9 400	1 007,8
380	39,9	1 950	205,4	4 450	471,5	6 950	740,5	9 450	1 012,7
400	42,0	2 000	210,7	4 500	476,8	7 000	746,0	9 500	1 018,2
420	44,1	2 050	216,0	4 550	482,2	7 050	751,4	9 550	1 023,6
440	46,2	2 100	221,3	4 600	487,5	7 100	756,8	9 600	1 029,1
460	48,3	2 150	226,6	4 650	492,9	7 150	762,2	9 650	1 034,6
480	50,4	2 200	231,9	4 700	498,2	7 200	767,6	9 700	1 040,1
500	52,5	2 250	237,2	4 750	503,6	7 250	773,0	9 750	1 045,6
520	54,6	2 300	242,5	4 800	508,9	7 300	778,5	9 800	1 051,0
540	56,7	2 350	247,8	4 850	514,3	7 350	783,9	9 850	1 056,5
560	58,8	2 400	253,1	4 900	519,7	7 400	789,3	9 900	1 062,0
580	61,0	2 450	258,4	4 950	525,0	7 450	794,7	9 950	1 067,5
600	63,1	2 500	263,7	5 000	530,4	7 500	800,2	10 000	1 073,0
620	65,2	2 550	269,0	5 050	535,8	7 550	805,6	10 050	1 078,5
640	67,3	2 600	274,3	5 100	541,1	7 600	811,0	10 100	1 084,0
660	69,4	2 650	279,6	5 150	546,5	7 650	816,4	10 150	1 089,5
680	71,5	2 700	284,9	5 200	551,9	7 700	821,9	10 200	1 094,9
700	73,6	2 750	290,2	5 250	557,2	7 750	827,3	10 250	1 100,4
720	75,7	2 800	295,5	5 300	562,6	7 800	832,7	10 300	1 105,9
740	77,8	2 850	300,8	5 350	568,0	7 850	838,2	10 350	1 111,4
760	79,9	2 900	306,2	5 400	573,3	7 900	843,6	10 400	1 116,9
780	82,0	2 950	311,5	5 450	578,7	7 950	849,0	10 450	1 122,4
800	84,1	3 000	316,8	5 500	584,1	8 000	854,5	10 500	1 127,9
820	86,2	3 050	322,1	5 550	589,5	8 050	859,9	10 550	1 133,4
840	88,3	3 100	327,4	5 600	594,9	8 100	865,4	10 600	1 138,9
860	90,4	3 150	332,7	5 650	600,2	8 150	870,8	10 650	1 144,4
880	92,5	3 200	338,1	5 700	605,6	8 200	876,2	10 700	1 149,9
900	94,6	3 250	343,4	5 750	611,0	8 250	881,7	10 750	1 155,4
920	96,7	3 300	348,7	5 800	616,4	8 300	887,1	10 800	1 160,9
940	98,8	3 350	354,0	5 850	621,2	8 350	892,6	10 850	1 166,4
960	100,9	3 400	359,3	5 900	627,2	8 400	898,0	10 900	1 172,0
980	103,0	3 450	364,7	5 950	632,5	8 450	903,5	10 950	1 177,5

Fuente: elaboración propia con base en *Ecommend recalibration one year form start of use after last calibration.*

# ANEXOS

## Anexo 1. Informe correspondiente al contenido de bitumen de la muestra asfáltica tipo E.


	<b>CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERIA FACULTAD DE INGENIERIA UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA</b>					
INFORME NÚMERO: 029 L.B.		ORDEN DE TRABAJO 35730				
		No. <b>6094</b>				
INTERESADO:	RIGOBERTO VELASCO CAMPO					
PROYECTO:	TRABAJO DE GRADUACION: CAMBIOS FISICOS, MECANICOS EN LA MEZCLA ASFALTICA EN CALIENTE TIPO E					
DIRECCION:	CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERIA					
ENSAYO:	CONTENIDO DE BITUMEN 2172-05					
FECHA:	06 DE SEPTIEMBRE DEL 2016					
MUESTRA:	MEZCLA ASFALTICA EN CALIENTE					
<table border="1"><tr><td>PASTILLA 1, % DE BITUMEN</td><td>4,961</td></tr><tr><td>PASTILLA 2, % DE BITUMEN</td><td>5,031</td></tr></table>			PASTILLA 1, % DE BITUMEN	4,961	PASTILLA 2, % DE BITUMEN	5,031
PASTILLA 1, % DE BITUMEN	4,961					
PASTILLA 2, % DE BITUMEN	5,031					
Atentamente,						
Vo. Bo. :						
	Ing. Francisco Javier Quiñonez de la Cruz DIRECTOR CII/USAC	Ing. Danilo Francisco Lucas Mazariegos Jefe Laboratorio de Asfaltos				
<small>FACULTAD DE INGENIERÍA —USAC— Edificio T-5, Ciudad Universitaria zona 12 Teléfono directo: 2418-9115, Planta: 2418-8000 Exts. 86209 y 86221 Fax: 2418-9121 Página web: <a href="http://cii.usac.edu.gt">http://cii.usac.edu.gt</a></small>						

Fuente: Laboratorio de Asfaltos de la Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala.

**Anexo 2. Informe uno correspondiente a gravedad específica  
bulk de los especímenes compactados**



**CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERIA  
FACULTAD DE INGENIERIA  
UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA**



---

INFORME NUMERO: 026 L.B.A                      ORDEN DE TRABAJO: 35730                      No. **6091**

INTERESADO:                      RIGOBERTO VELASCO CAMPOS

PROYECTO:                      TRABAJO DE GRADUACION: CAMBIOS FISICOS, MECANICOS EN LA  
MEZCLA ASFALTICA EN CALIENTE TIPO E

DIRECCION:                      CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERIA



ENSAYO:                      GRAVEDAD ESPECIFICA DE BULK ASTM 2726-05a

FECHA:                      06 DE SEPTIEMBRE DEL 2016

MUESTRA:                      MEZCLA ASFALTICA EN CALIENTE

PROBETA	GRAVEDAD ESPECIFICA	PROBETA	GRAVEDAD ESPECIFICA
1 - 70 °C	2,200	3 - 100 °C	2,24
2 - 70 °C	2,194	1 - 110 °C	2,28
3 - 70 °C	2,215	2 - 110 °C	2,28
1 - 80 °C	2,250	3 - 110 °C	2,29
2 - 80 °C	2,237	1 - 120 °C	2,31
3 - 80 °C	2,216	2 - 120 °C	2,27
1 - 90 °C	2,251	3 - 120 °C	2,27
2 - 90 °C	2,239	1 - 130 °C	2,35
3 - 90 °C	2,239	2 - 130 °C	2,346
1 - 100 °C	2,261	3 - 130 °C	2,359
2 - 100 °C	2,245	1 - 140 °C	2,369

Atentamente,

Vo. Bo. :   

Ing. Francisco Javier Quirónez de la Cruz                      Ing. Daniel Francisco Lucas Mazariegos  
DIRECTOR CII/USAC                      Jefe Laboratorio de Asfaltos

---


FACULTAD DE INGENIERÍA –USAC–  
Edificio T-5, Ciudad Universitaria zona 12  
Teléfono directo: 2418-9115, Planta: 2418-8000 Exts. 86209 y 86221 Fax: 2418-9121  
Página web: <http://cii.usac.edu.gt>

Fuente: Laboratorio de Asfaltos de la Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala.

Anexo 3. Informe dos correspondiente a gravedad específica bulk especímenes compactados



**CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERIA  
FACULTAD DE INGENIERIA  
UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA**



---

INFORME NUMERO: 027 L.B.A

ORDEN DE TRABAJO: 35730

No. 6092

INTERESADO: RIGOBERTO VELASCO CAMPOS

PROYECTO: TRABAJO DE GRADUACION: CAMBIOS FISICOS, MECANICOS EN LA MEZCLA ASFALTICA EN CALIENTE TIPO E

DIRECCION: CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERIA

ENSAYO: GRAVEDAD ESPECIFICA DE BULK ASTM 2726-05a

FECHA: 06 DE SEPTIEMBRE DEL 2016

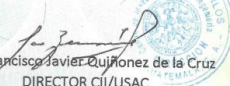
MUESTRA: MEZCLA ASFALTICA EN CALIENTE

PROBETA	GRAVEDAD ESPECIFICA
2 - 140 °C	2,363
3 - 140 °C	2,340
1 - 150 °C	2,364
2 - 150 °C	2,379
3 - 150 °C	2,388
1 - 160 °C	2,374
2 - 160 °C	2,371
3 - 160 °C	2,355
1 - 170 °C	2,369
2 - 170 °C	2,409
3 - 170 °C	2,365


PROBETA	GRAVEDAD ESPECIFICA
1 - 180 °C	2,395
2 - 180 °C	2,403
3 - 180 °C	2,535

Atentamente,

Vo. Bo. :



Ing. Francisco Javier Quiñonez de la Cruz  
DIRECTOR CI/USAC



Ing. Darío Francisco Lucas Mazarregos  
Jefe Laboratorio de Asfaltos

---

FACULTAD DE INGENIERIA –USAC–  
Edificio T-5, Ciudad Universitaria zona 12  
Teléfono directo: 2418-9115, Planta: 2418-8000 Exts. 86209 y 86221 Fax: 2418-9121  
Página web: <http://cii.usac.edu.gt>

Fuente: Laboratorio de Asfaltos de la Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala.



Anexo 4. Informe correspondiente a la gravedad específica teórica máxima de los agregados asfálticos de la muestra tipo

E

 CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERIA  
FACULTAD DE INGENIERIA  
UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA 

---

INFORME NUMERO: 028 L.B.A.      ORDEN DE TRABAJO: 35730      No. **6093**

INTERESADO: RIGOBERTO VELASCO CAMPOS

PROYECTO: TRABAJO DE GRADUACION: CAMBIOS FISICOS, MECANICOS EN LA MEZCLA ASFALTICA EN CALIENTE TIPO E.

DIRECCION: CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERIA

ENSAYO: GRAVEDAD ESPECIFICA TEORICA MAXIMA "RICE" ASTM 2041

FECHA: 06 DE SEPTIEMBRE DEL 2016

MUESTRA: MEZCLA ASFALTICA EN CALIENTE

PASTILLA 1	2,477
PASTILLA 2	2,506

Atentamente,

Vo. Bo. :   
Ing. Francisco Javier Quiñonez de la Cruz  
DIRECTOR CII/USAC


  
Ing. Dario Francisco Lucas Mazariegos  
Jefe Laboratorio de Asfaltos

---


FACULTAD DE INGENIERIA – USAC –  
Edificio T-5, Ciudad Universitaria zona 12  
Teléfono directo: 2418-9115, Planta: 2418-8000 Exts. 86209 y 86221 Fax: 2418-9121  
Página web: <http://cii.usac.edu.gt>

Fuente: Laboratorio de Asfaltos de la Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala.

Anexo 5. Informe uno correspondiente a estabilidad y flujo para especímenes compactados



CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERIA  
FACULTAD DE INGENIERIA  
UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



---

No. **6087**

INFORME NUMERO: 021 L.B.A.

ORDEN DE TRABAJO: 35730

INTERESADO: RIGOBERTO VELASCO CAMPOS

PROYECTO: TRABAJO DE GRADUACION: CAMBIOS FISICOS, MECANICOS EN LA MEZCLA ASFALTICA EN CALIENTE TIPO E

DIRECCION: CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERIA

ENSAYO: ESTABILIDAD Y FLUJO MARSHALL ASTM D 1559

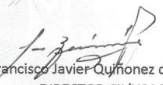
FECHA: 06 DE SEPTIEMBRE DEL 2016

MUESTRA: MEZCLA ASFALTICA EN CALIENTE


PROBETA	ESTABILIDAD LBF	FLUJO 0,01"
1 - 70 °C	1027,17	21
2 - 70 °C	1017,66	22
3 - 70 °C	1046,66	21
1 - 80 °C	1387,66	18
2 - 80 °C	1481,95	20
3 - 80 °C	1093,75	20
1 - 90 °C	1188,59	17
2 - 90 °C	1330,99	18


Atentamente,

Vo. Bo. :



Ing. Francisco Javier Quiñonez de la Cruz  
DIRECTOR CII/USAC






Ing. Dario Francisco Lucas Mazariegos  
Jefe Laboratorio de Asfaltos

---


FACULTAD DE INGENIERIA –USAC–  
Edificio T-5, Ciudad Universitaria zona 12  
Teléfono directo: 2418-9115, Planta: 2418-8000 Exts. 86209 y 86221 Fax: 2418-9121  
Página web: <http://cii.usac.edu.gt>

Fuente: Laboratorio de Asfaltos de la Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala.

Anexo 6. **Informe dos correspondiente a estabilidad y flujo para especímenes compactados**



**CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERIA  
FACULTAD DE INGENIERIA  
UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA**



---

**No. 6086**

INFORME NUMERO: 022 L.B.A.

ORDEN DE TRABAJO: 35730

INTERESADO: RIGOBERTO VELASCO CAMPOS

PROYECTO: TRABAJO DE GRADUACION: CAMBIOS FISICOS, MECANICOS EN LA MEZCLA ASFALTICA EN CALIENTE TIPO E

DIRECCION: CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERIA

ENSAYO: ESTABILIDAD Y FLUJO MARSHALL ASTM D 1559

FECHA: 06 DE SEPTIEMBRE DEL 2016

MUESTRA: MEZCLA ASFALTICA EN CALIENTE

PROBETA	ESTABILIDAD LBF	FLUJO 0,01"
3 - 90 °C	1283,270	17
1 - 100 °C	1614,853	17
2 - 100 °C	1519,608	17
3 - 100 °C	1519,949	20
1 - 110 °C	1633,851	20
2 - 110 °C	1803,489	17
3 - 110 °C	1615,202	20
1 - 120 °C	1936,709	18

Atentamente,

Vo. Bo. :



Ing. Francisco Javier Quiñonez de la Cruz  
DIRECTOR CII/USAC




Ing. Dario Francisco Lucas Mazariegos  
Jefe Laboratorio de Asfaltos

FACULTAD DE INGENIERÍA –USAC–  
Edificio T-5, Ciudad Universitaria zona 12  
Teléfono directo: 2418-9115, Planta: 2418-8000 Exts. 86209 y 86221 Fax: 2418-9121  
Página web: <http://cii.usac.edu.gt>


Fuente: Laboratorio de Asfaltos de la Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala.



**Anexo 7. Informe tres correspondiente a estabilidad y flujo para especímenes compactados**



**CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERIA  
FACULTAD DE INGENIERIA  
UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA**



---

**No. 5088**

INFORME NUMERO: 023 L.B.A.

ORDEN DE TRABAJO: 35730

**INTERESADO:** RIGOBERTO VELASCO CAMPOS

**PROYECTO:** TRABAJO DE GRADUACION: CAMBIOS FISICOS, MECANICOS EN LA MEZCLA ASFALTICA EN CALIENTE TIPO E

**DIRECCION:** CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERIA

**ENSAYO:** ESTABILIDAD Y FLUJO MARSHALL ASTM D 1559

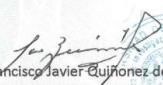
**FECHA:** 06 DE SEPTIEMBRE DEL 2016

**MUESTRA:** MEZCLA ASFALTICA EN CALIENTE


<i>PROBETA</i>	<i>ESTABILIDAD LBF</i>	<i>FLUJO 0,01"</i>
2 - 120 °C	1851,574	17
3 - 120 °C	1576,593	16
1 - 130 °C	2266,804	15
2 - 130 °C	2370,605	17
3 - 130 °C	2926,519	20
1 - 140 °C	2568,720	11
2 - 140 °C	3077,276	17
3 - 140 °C	2616,357	12

Atentamente,

Vo. Bo. :



Ing. Francisco Javier Gujón de la Cruz  
DIRECTOR CII/USAC



Ing. Darío Francisco Lucas Mazariegos  
Jefe Laboratorio de Asfaltos


---

FACULTAD DE INGENIERIA –USAC–  
Edificio T-5, Ciudad Universitaria zona 12  
Teléfono directo: 2418-9115, Planta: 2418-9000 Exts. 86209 y 86221 Fax: 2418-9121  
Página web: <http://cii.usac.edu.gt>


Fuente: Laboratorio de Asfaltos de la Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala.



Anexo 8. Informe cuatro correspondiente a estabilidad y flujo para especímenes compactados



**CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERIA  
FACULTAD DE INGENIERIA  
UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA**



---

No. **5089**

INFORME NUMERO: 024 L.B.A.                      ORDEN DE TRABAJO: 35730

INTERESADO:                      RIGOBERTO VELASCO CAMPOS

PROYECTO:                      TRABAJO DE GRADUACION: CAMBIOS FISICOS, MECANICOS EN LA MEZCLA ASFALTICA EN CALIENTE TIPO E

DIRECCION:                      CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERIA

ENSAYO:                      ESTABILIDAD Y FLUJO MARSHALL ASTM D 1559

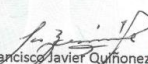
FECHA:                      06 DE SEPTIEMBRE DEL 2016

MUESTRA:                      MEZCLA ASFALTICA EN CALIENTE


PROBETA	ESTABILIDAD LBF	FLUJO 0,01"
1 - 150 °C	3001,708	10
2 - 150 °C	2954,545	17
3 - 150 °C	2926,519	10
1 - 160 °C	2982,955	9
2 - 160 °C	3077,276	13
3 - 160 °C	2748,333	17
1 - 170 °C	3030,115	11
2 - 170 °C	3067,807	10


Atentamente,

Vo. Bo. :




Ing. Francisco Javier Quiñonez de la Cruz  
DIRECTOR CII/USAC





Ing. Darío Francisco Lucas Mazariegos  
Jefe Laboratorio de Asfaltos




---

FACULTAD DE INGENIERÍA —USAC—  
Edificio T-5, Ciudad Universitaria zona 12  
Teléfono directo: 2418-9116, Planta: 2418-8000 Exts. 86209 y 86221 Fax: 2418-9121  
Página web: <http://cii.usac.edu.gt>

Fuente: Laboratorio de Asfaltos de la Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala.

Anexo 9. Informe cinco correspondiente a estabilidad y flujo para especímenes compactados



CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERIA  
FACULTAD DE INGENIERIA  
UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



---

No. **5090**

INFORME NUMERO: 025 L.B.A.

ORDEN DE TRABAJO: 35730

INTERESADO: RIGOBERTO VELASCO CAMPOS

PROYECTO: TRABAJO DE GRADUACION: CAMBIOS FISICOS Y MECANICOS EN LA MEZCLA ASFALTICA EN CALIENTE TIPO E

DIRECCION: CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERIA

ENSAYO: ESTABILIDAD Y FLUJO MARSHALL ASTM D 1559

FECHA: 06 DE SEPTIEMBRE DEL 2016

MUESTRA: MEZCLA ASFALTICA EN CALIENTE


PROBETA	ESTABILIDAD LBF	FLUJO 0,01"
3 - 170 °C	2663,269	14
1 - 180 °C	2935,795	10
2 -180 °C	3500,000	9
3 - 180 °C	3217,983	12

Atentamente,

Vo. Bo. :



Ing. Francisco Javier Quiñonez de la Cruz  
DIRECTOR CII/USAC



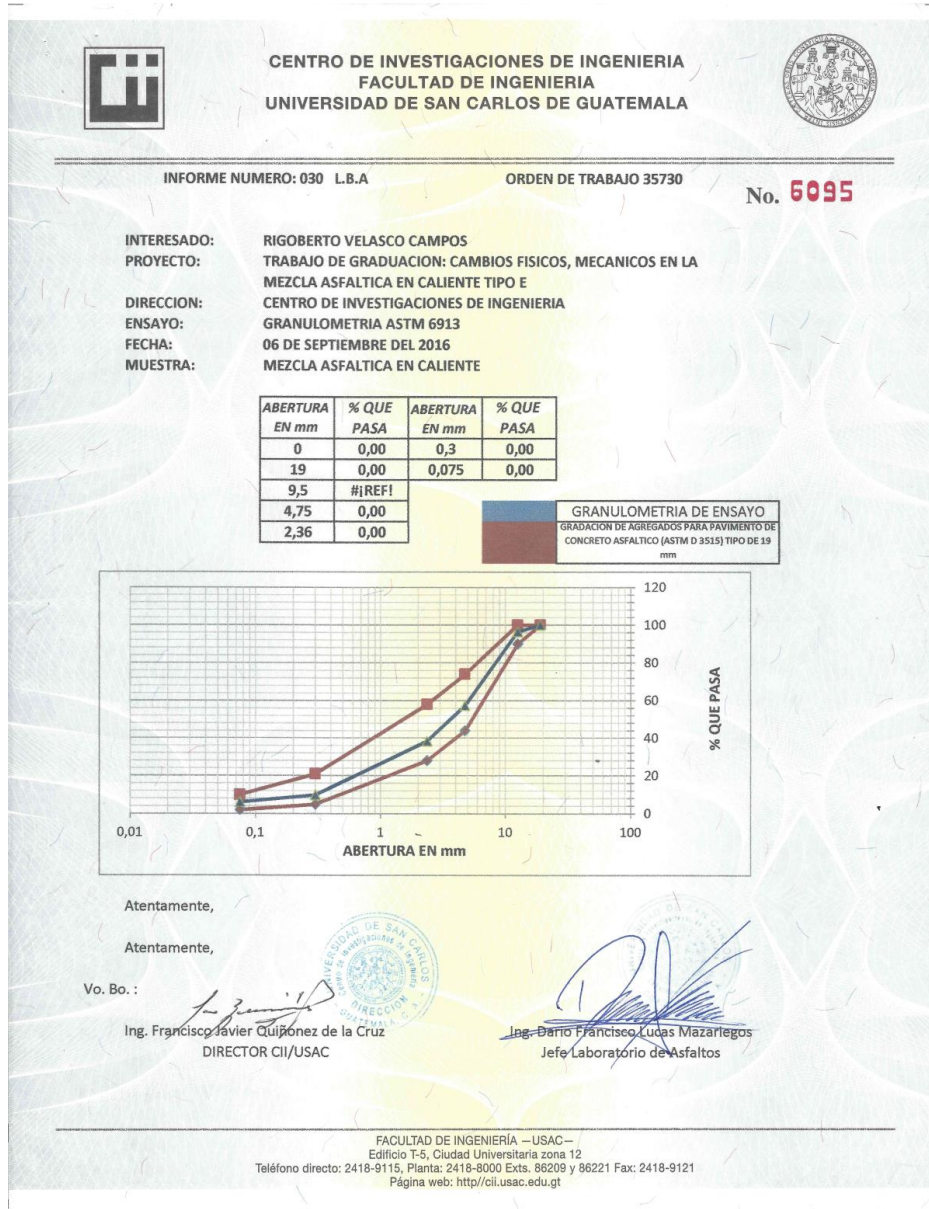
Ing. Darío Francisco Lucas Mazariegos  
Jefe Laboratorio de Asfaltos

---

FACULTAD DE INGENIERÍA –USAC–  
Edificio T-5, Ciudad Universitaria zona 12  
Teléfono directo: 2418-9115, Planta: 2418-8000 Exts. 86209 y 86221 Fax: 2418-9121  
Página web: <http://cii.usac.edu.gt>

Fuente: Laboratorio de Asfaltos de la Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala.

Anexo 10. Informe correspondiente a la gráfica de la granulometría de los agregados asfálticos de la muestra tipo E



Fuente: Laboratorio de Asfaltos de la Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala.