



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

**DISEÑO DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA POR EL MÉTODO MARSHALL, EFECTUANDO
VARIACIONES DEL TAMAÑO MÁXIMO NOMINAL PARA UNA GRANULOMETRÍA
CONTROLADA**

Paola Judith Pérez Urquizú

Asesorado por el Ing. Yefry Valentín Rosales Juárez

Guatemala, abril de 2017

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**DISEÑO DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA POR EL MÉTODO MARSHALL, EFECTUANDO
VARIACIONES DEL TAMAÑO MÁXIMO NOMINAL PARA UNA GRANULOMETRÍA
CONTROLADA**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

PAOLA JUDITH PÉREZ URQUIZÚ

ASESORADO POR EL ING. YEFRY VALENTÍN ROSALES JUÁREZ

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERA CIVIL

GUATEMALA, ABRIL DE 2017

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	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Jurgen Andoni Ramírez Ramírez
VOCAL V	Br. Oscar Humberto Galicia Nuñez
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

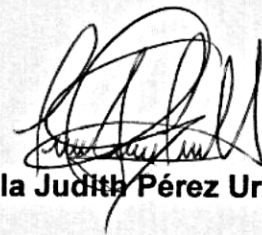
DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
EXAMINADORA	Inga. Karla Giovanna Pérez Loarca
EXAMINADOR	Ing. Omar Enrique Medrano Méndez
EXAMINADOR	Ing. José Mauricio Arriola Donis
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

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:

**DISEÑO DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA POR EL MÉTODO MARSHALL, EFECTUANDO
VARIACIONES DEL TAMAÑO MÁXIMO NOMINAL PARA UNA GRANULOMETRÍA
CONTROLADA**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Civil,
con fecha 30 de julio de 2015.



Paola Judith Pérez Urquizú

Guatemala, 01 de marzo de 2017.

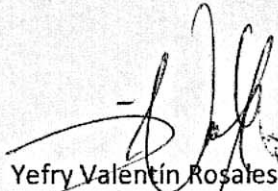
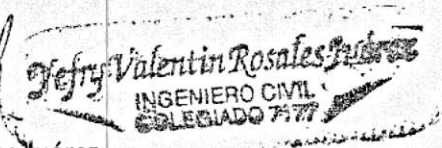
Ingeniero
José Gabriel Ordóñez Morales
Coordinador del Área de Materiales y Construcciones Civiles
Universidad de San Carlos de Guatemala
Guatemala

Respetado Ingeniero Ordóñez:

Al saludarle cordialmente, me dirijo a usted para informarle que ha sido concluido satisfactoriamente el trabajo de graduación titulado "DISEÑO DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA POR EL MÉTODO MARSHALL, EFECTUANDO VARIACIONES DEL TAMAÑO MÁXIMO NOMINAL PARA UNA GRANULOMETRÍA CONTROLADA" elaborado por la estudiante Paola Judith Pérez Urquizú con carné 200819706, tema para el cual fui asignado como asesor.

Considero que se han cumplido las metas propuestas al inicio del trabajo, por lo que recomiendo se apruebe en el entendido de que el autor y el suscrito son los responsables de lo trabajado y las conclusiones del mismo.

Atentamente,



Yefry Valentín Rosales Juárez
Msc. Ingeniero Civil Colegiado No. 7177



USAC
TRICENTENARIA
 Universidad de San Carlos de Guatemala
FACULTAD DE INGENIERÍA

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

ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL



Guatemala,
 15 de marzo de 2017

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

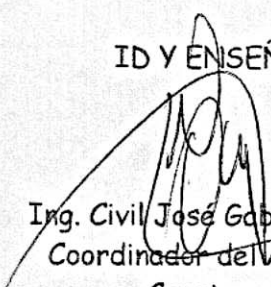
Estimado Ingeniero Montenegro.

Le informo que he revisado el trabajo de graduación **DISEÑO DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA POR EL MÉTODO MARSHALL, EFECTUANDO VARIACIONES DEL TAMAÑO MÁXIMO NOMINAL PARA UNA GRANULOMETRÍA CONTROLADA** desarrollado por la estudiante de Ingeniería Civil Paola Judith Pérez Urquizú 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
 Coordinador del Área de Materiales y
 Construcciones Civiles



FACULTAD DE INGENIERIA
 AREA DE MATERIALES Y
 CONSTRUCCIONES CIVILES
USAC

/mrrm.





USAC
 TRICENTENARIA
 Universidad de San Carlos de Guatemala
 FACULTAD DE INGENIERÍA

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

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 de la estudiante Paola Judith Pérez Urquizú titulado DISEÑO DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA POR EL MÉTODO MARSHALL, EFECTUANDO VARIACIONES DEL TAMAÑO MÁXIMO NOMINAL PARA UNA GRANULOMETRÍA CONTROLADA da por este medio su aprobación a dicho trabajo.

Hugo Leonel Monteregro Franco
 Ing. Hugo Leonel Monteregro Franco



Guatemala, abril 2017
 /mrrm.

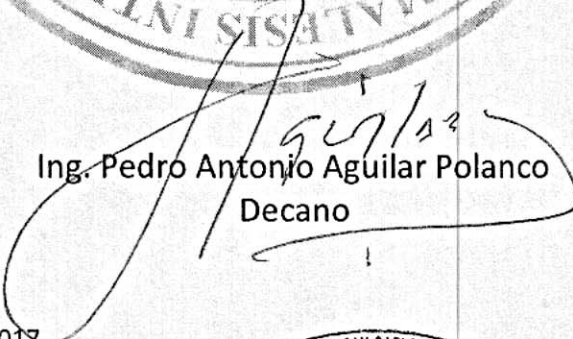




DTG. 166.2017

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: **DISEÑO DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA POR EL MÉTODO MARSHALL, EFECTUANDO VARIACIONES DEL TAMAÑO MÁXIMO NOMINAL PARA UNA GRANULOMETRÍA CONTROLADA**, presentado por la estudiante universitaria: **Paola Judith Pérez Urquizú**, 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, abril de 2017

/gdech



ACTO QUE DEDICO A:

Mis padres

Julia Catalina Urquizú Silva y Ricardo Pérez Meckler, por brindarme siempre su amor, por ser mi modelo de personas a seguir y por su apoyo incondicional.

Mis hermanos

María Soledad Pérez Urquizú y Julio Alberto Woods Urquizú, por creer en mí y ser mi motivo de superación, día a día.

Mi abuelita

Josefina Soledad Meckler Barrios Viuda de Pérez, por su amor y sabios consejos.

Mi novio

Luis Fernando Berducido Arana, por tu amor, paciencia y esperanza en mí. Te amo.

AGRADECIMIENTOS A:

Dios	Por iluminar siempre mi camino, aumentar mi fe y fortaleza para alcanzar esta meta.
Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala	Por ser mi casa de estudios y centro de mi formación académica.
Catedráticos de la Facultad de Ingeniería	Por brindarme los conocimientos necesarios para culminar mis estudios. En especial a Ing. José Gabriel Ordóñez Morales, Ing. Guillermo Francisco Melini Salguero, Ing. Hugo Leonel Montenegro Franco e Ing. Dennis Argueta.
Mi asesor	Ing. Yefry Rosales, por la asesoría y motivación para concluir mi trabajo de graduación.
José Juan Istupe	Por su amistad, apoyo incondicional y asesoría. Por compartir sus conocimientos en la realización de los distintos ensayos de laboratorio relacionados con este trabajo de graduación.
Amigos de la Facultad de Ingeniería	Por su amistad y apoyo. En especial a María René Mazariegos.

**Amigos de la sección
de Laboratorio de
Asfaltos**

Por compartir su amistad, conocimientos y su motivación constante.

**Ing. Álvaro César
Guillermo Estrada**

Por su amistad, por compartir sus conocimientos y apoyo en la realización de los ensayos y asesoría en el tema de investigación.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	IX
LISTA DE SÍMBOLOS.....	XV
GLOSARIO.....	XVII
RESUMEN.....	XXI
OBJETIVOS.....	XXIII
INTRODUCCIÓN.....	XXVII
1. GENERALIDADES DEL CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERÍA, USAC.....	1
1.1. Historia.....	1
1.2. Ubicación.....	1
1.3. Misión.....	2
1.4. Visión.....	3
1.5. Política de Calidad.....	3
1.6. Organigrama.....	4
1.7. Planteamiento del problema.....	5
1.8. Metodología.....	5
1.9. ¿Qué son las Normas ASTM y AASHTO?.....	6
1.10. Elaboración y control de cálculos, documentos y registros según Norma ASTM D 1559 y AASHTO T 245.....	7
2. DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA.....	9
2.1. Importancia del muestreo y reducción de agregado con base en el tamaño máximo nominal.....	9
2.1.1. Importancia del muestreo de agregado.....	9

2.1.2.	Importancia de la reducción de agregado	11
2.1.2.1.	Método usando cuarteador mecánico de muestras	12
2.1.2.2.	Método por cuarteo manual	13
2.2.	Propiedades de los agregados que se utilizan en mezclas asfálticas en caliente (MAC).....	13
2.2.1.	Propiedades de los agregados utilizados en MAC	14
2.2.1.1.	Características físicas.....	14
2.2.1.1.1.	Forma de la partícula	15
2.2.1.1.2.	Textura superficial	16
2.2.1.1.3.	Tamaño máximo del agregado	16
2.2.1.1.4.	Tamaño máximo nominal del agregado ...	17
2.2.1.2.	Propiedades mecánicas.....	17
2.2.1.2.1.	Afinidad con el bitumen.....	17
2.2.1.2.2.	Capacidad de absorción	17
2.2.1.2.3.	Dureza	18
2.2.1.2.4.	Graduación	18
2.2.1.2.5.	Peso específico	19
2.3.	Análisis granulométrico	19
2.3.1.	Método por Tamizado.....	20
2.3.1.1.	Tamizado en seco	21
2.3.1.2.	Tamizado por vía húmeda	21
2.4.	Generalidades de mezclas asfálticas en caliente	22
2.4.1.	Definición de mezcla asfáltica en caliente	22

2.4.2.	Clasificación de las mezclas asfálticas.....	23
2.4.2.1.	Por posición relativa.....	23
2.4.2.2.	Por agregado pétreo en la mezcla.....	24
2.4.2.3.	Por temperatura	24
2.4.2.4.	Por vacíos en la mezcla asfáltica	25
2.4.2.5.	Por granulometría	25
	2.4.2.5.1. Por tamaño máximo del agregado pétreo	25
2.4.3.	Evolución de los diseños de las mezclas asfálticas en caliente.....	26
2.4.3.1.	Método The Hubbard-Field.....	26
2.4.3.2.	Método Marshall.....	27
2.4.3.3.	Método SUPERPAVE	27
2.4.4.	Características y comportamiento de la mezcla en el Método Marshall.....	27
2.4.4.1.	Contenido de asfalto	27
2.4.4.2.	Densidad.....	28
2.4.4.3.	Vacíos de Aire.....	29
2.4.4.4.	Vacíos en el Agregado Mineral	29
2.4.5.	Propiedades de las mezclas asfálticas en el Método Marshall	30
2.4.5.1.	Durabilidad.....	30
2.4.5.2.	Estabilidad	31
2.4.5.3.	Flexibilidad	31
2.4.5.4.	Impermeabilidad.....	32
2.4.5.5.	Resistencia al deslizamiento	32
2.4.5.6.	Resistencia a la fatiga	33
2.4.5.7.	Trabajabilidad.....	34
2.5.	Método de diseño Marshall	35

2.5.1.	Metodología.....	35
2.5.2.	Propósito de la metodología	35
2.5.3.	Descripción de la metodología.....	36
2.5.4.	Especificaciones de la metodología.....	36
2.5.5.	Evaluación en el diseño de mezcla asfáltica.....	37
2.5.6.	Ajustes al diseño de mezcla asfáltica	38
2.6.	Procedimiento de ensayos Marshall	40
2.6.1.	Gravedad Específica Bruta (ASTM D 2726 y ASTM D 1188).....	41
2.6.2.	Gravedad Específica Teórica Máxima (ASTM D 2041)	41
2.6.3.	Porcentaje de Vacíos-Densidad (ASTM D 2041)....	41
2.6.4.	Prueba de Estabilidad-Flujo (ASTM D 1559 y AASHTO T 245)	42
2.6.5.	Valor de Estabilidad.....	42
2.6.6.	Valor de Fluencia.....	42
2.7.	Procedimiento de diseño de mezclas asfálticas en caliente	43
2.7.1.	Granulometría y dosificación de agregados (ASTM C 136 y AASHTO T 27)	44
2.7.2.	Preparación de probetas de mezclas asfálticas en caliente (AASHTO T 245 y ASTM D 1559)	47
2.7.2.1.	Metodología en preparación de probetas.....	47
2.7.2.2.	Gravedad Específica <i>Bulk</i> de la mezcla asfáltica	48
2.7.2.2.1.	Metodología.....	48
2.7.2.3.	Gravedad Específica Bruta de los agregados.....	49
2.7.2.3.1.	Metodología.....	49

2.7.2.4.	Gravedad Específica Teórica Máxima <i>Rice</i> de la mezcla asfáltica.....	50
2.7.2.4.1.	Metodología	50
2.7.2.5.	Gravedad Específica Efectiva de los agregados	51
2.7.2.5.1.	Metodología	51
2.7.2.6.	Peso Unitario de la mezcla asfáltica.....	52
2.7.2.6.1.	Metodología	52
2.7.2.7.	Porcentaje de Vacíos-Densidad de la mezcla asfáltica.....	53
2.7.2.7.1.	Metodología	53
2.7.2.8.	Porcentaje de Vacíos en el Agregado Mineral.....	54
2.7.2.8.1.	Metodología	54
2.7.2.9.	Porcentaje de Vacíos Llenados con Cemento Asfáltico	55
2.7.2.9.1.	Metodología	55
2.7.2.10.	Relación de Relleno Mineral/Asfalto.....	56
2.7.2.10.1.	Metodología	56
2.7.2.11.	Contenido de Humedad	57
2.7.2.11.1.	Metodología	57
2.7.3.	Prueba de Estabilidad-Flujo Marshall.....	58
2.7.3.1.	Metodología	58
2.7.3.2.	Equipo.....	58
3.	DESARROLLO EXPERIMENTAL	61
3.1.	Trabajo de Laboratorio para el Diseño de Mezcla Asfáltica	61
3.1.1.	Gravedad Específica <i>Bulk</i>	61
3.1.1.1.	Resultados	62

3.1.2.	Gravedad Específica Bruta de los agregados.....	64
3.1.2.1.	Resultados.....	65
3.1.3.	Gravedad Específica Teórica Máxima <i>Rice</i>	65
3.1.3.1.	Resultados.....	66
3.1.4.	Gravedad Específica Efectiva de los agregados.....	67
3.1.4.1.	Resultados.....	68
3.1.5.	Peso Unitario de la mezcla asfáltica	70
3.1.5.1.	Resultados.....	71
3.1.6.	Porcentaje de Vacíos-Densidad	73
3.1.6.1.	Resultados.....	74
3.1.7.	Porcentaje de Vacíos en el Agregado Mineral	75
3.1.7.1.	Resultados.....	76
3.1.8.	Porcentaje de Vacíos Llenados con Cemento Asfáltico.....	77
3.1.8.1.	Resultados.....	78
3.1.9.	Relación Relleno Mineral/Asfalto	80
3.1.9.1.	Resultados Porcentaje de Ligante Asfáltico Absorbido	81
3.1.9.2.	Resultados Porcentaje de Ligante Asfáltico Efectivo	83
3.1.9.3.	Resultados.....	85
3.1.10.	Contenido de Humedad.....	86
3.1.10.1.	Resultados.....	87
3.1.11.	Estabilidad-Flujo Marshall.....	89
3.1.11.1.	Resultados.....	89
3.2.	Análisis de resultados	91
3.3.	Interpretación de resultados	102
3.3.1.	Diseño para Granulometría en Gravedad Específica <i>Bulk</i>	102

3.3.2.	Diseño para Granulometría en Gravedad Específica Teórica Máxima <i>Rice</i>	103
3.3.3.	Diseño para Granulometría de Gravedad Específica Efectiva de los agregados.....	103
3.3.4.	Diseño para Peso Unitario de la mezcla.....	104
3.3.5.	Diseño para Granulometría en Porcentaje de Vacíos-Densidad.....	104
3.3.6.	Diseño para Granulometría en Porcentaje de Vacíos en Agregado Mineral.....	105
3.3.7.	Diseño para Granulometría en Porcentaje de Vacíos Llenados con Cemento Asfáltico.....	106
3.3.8.	Diseño para Granulometría en Relación Relleno Mineral/Asfalto.....	106
3.3.9.	Diseño para Granulometría en Porcentaje de Contenido de Humedad.....	107
3.3.10.	Diseño para Granulometría en Estabilidad Marshall.....	107
3.3.11.	Diseño para Granulometría en Flujo Marshall.....	108
CONCLUSIONES.....		109
RECOMENDACIONES.....		113
BIBLIOGRAFÍA.....		115
APÉNDICES.....		117
ANEXOS.....		121

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Ubicación de Laboratorio de Asfaltos del Centro de Investigaciones de Ingeniería – CII – USAC	2
2.	Organigrama del Centro de Investigaciones de Ingeniería – CII- USAC... ..	4
3.	Operación del muestreo de agregado	10
4.	Acopio y manejo del muestreo de agregado	10
5.	Cuartheador mecánico	12
6.	Cuarteo manual.....	13
7.	Forma de los agregados	15
8.	Análisis de tamices	20
9.	Estructura de mezcla asfáltica convencional	23
10.	Vacíos en el Agregado Mineral	29
11.	Daños visibles debido a la mala resistencia a la fatiga	34
12.	Bajo contenido de vacíos	39
13.	Alto contenido de vacíos	39
14.	Contenido satisfactorio de vacíos.....	40
15.	Estabilidad y Fluencia en probeta elaborada con mezcla asfáltica en caliente.....	43
16.	Curva de Granulometría Ideal en el diseño de MAC	45
17.	Curva de Granulometría Máxima en el diseño de MAC.....	46
18.	Curva de Granulometría Mínima en el diseño de MAC.....	47
19.	Gráfica comparativa de Gravedad Específica <i>Bulk</i>	91

20.	Gráfica comparativa de Gravedad Específica Teórica Máxima <i>Rice</i>	92
21.	Gráfica comparativa de Gravedad Específica de los agregados	93
22.	Gráfica comparativa de Peso Unitario en la mezcla.....	94
23.	Gráfica comparativa de Porcentaje de Vacíos-Densidad	95
24.	Gráfica comparativa de Porcentaje de Vacíos en el Agregado Mineral.....	96
25.	Gráfica comparativa de Porcentaje de Vacíos Llenados con Cemento Asfáltico	97
26.	Gráfica comparativa de Relación Relleno Mineral/Asfalto.....	98
27.	Gráfica comparativa de Porcentaje de Contenido de Humedad.....	99
28.	Gráfica comparativa de Estabilidad Marshall	100
29.	Gráfica comparativa de Flujo Marshall.....	101

TABLAS

I.	Tamaño de muestras.....	11
II.	Graduación de agregados para pavimento de concreto asfáltico (ASTM D 3515).....	19
III.	Temperaturas para la colocación de la mezcla de concreto asfáltico...	24
IV.	Cantidad de cemento asfáltico (ASTM D 3515)	28
V.	Vacíos en el Agregado Mineral	30
VI.	Requisitos para la mezcla de concreto asfáltico	37
VII.	Tolerancias en la fórmula de trabajo	38
VIII.	Diseño núm. 1: Granulometría Ideal en MAC.....	44
IX.	Diseño núm. 2: Granulometría Máxima en MAC.....	45
X.	Diseño núm. 3: Granulometría Mínima en MAC.....	46
XI.	Procedimiento en preparación de probetas	48

XII.	Procedimiento para determinar los valores de la Gravedad Específica <i>Bulk</i>	49
XIII.	Procedimiento para determinar la Gravedad Específica Bruta de los agregados.....	50
XIV.	Procedimiento para la determinación de Gravedad Específica Teórica Máxima <i>Rice</i>	51
XV.	Procedimiento para determinar la Gravedad Específica Efectiva de los agregados.....	52
XVI.	Procedimiento para determinar el Peso Unitario de la mezcla asfáltica.....	53
XVII.	Procedimiento para determinar el Porcentaje de Vacíos-Densidad de la mezcla asfáltica....	54
XVIII.	Procedimiento para determinar el Porcentaje de Vacíos en el Agregado Mineral.....	55
XIX.	Procedimiento para determinar el Porcentaje de Vacíos Llenados con Cemento Asfáltico.	56
XX.	Procedimiento para determinar la Relación de Relleno Mineral/Asfalto.....	57
XXI.	Procedimiento para determinar el Contenido de Humedad	58
XXII.	Procedimiento para realizar el ensayo de Estabilidad-Flujo Marshall ..	59
XXIII.	Resultados de Gravedad Específica <i>Bulk</i> , Granulometría Ideal	62
XXIV.	Resultados de Gravedad Específica <i>Bulk</i> , Granulometría Máxima.....	63
XXV.	Resultados de Gravedad Específica <i>Bulk</i> , Granulometría Mínima	63
XXVI.	Resultados de Gravedad Específica Bruta de los agregados	65
XXVII.	Resultados de Gravedad Específica Teórica Máxima <i>Rice</i> , Granulometría Ideal	66
XXVIII.	Resultados de Gravedad Específica Teórica Máxima <i>Rice</i> , Granulometría Máxima.....	67

XXIX.	Resultados de Gravedad Específica Teórica Máxima <i>Rice</i> , Granulometría Mínima	67
XXX.	Resultados de Gravedad Específica Efectiva de los agregados, Granulometría Ideal	69
XXXI.	Resultados de Gravedad Específica Efectiva de los agregados, Granulometría Máxima	69
XXXII.	Resultados de Gravedad Específica Efectiva de los agregados, Granulometría Mínima	70
XXXIII.	Resultados de Peso Unitario, Granulometría Ideal	71
XXXIV.	Resultados de Peso Unitario, Granulometría Máxima.....	72
XXXV.	Resultados de Peso Unitario, Granulometría Mínima	72
XXXVI.	Resultados de Vacíos-Densidad, Granulometría Ideal.....	74
XXXVII.	Resultados de Vacíos-Densidad, Granulometría Máxima.....	74
XXXVIII.	Resultados de Vacíos-Densidad, Granulometría Mínima.....	75
XXXIX.	Resultados de Porcentaje de Vacíos en el Agregado Mineral, Granulometría Ideal	76
XL.	Resultados de Porcentaje de Vacíos en el Agregado Mineral, Granulometría Máxima	77
XLI.	Resultados de Porcentaje de Vacíos en el Agregado Mineral, Granulometría Mínima	77
XLII.	Resultados de Porcentaje de Vacíos Llenados con Cemento Asfáltico, Granulometría Ideal	79
XLIII.	Resultados de Porcentaje de Vacíos Llenados con Cemento Asfáltico, Granulometría Máxima	79
XLIV.	Resultados de Porcentaje de Vacíos Llenados con Cemento Asfáltico, Granulometría Mínima	79
XLV.	Porcentaje de Ligante Asfáltico Absorbido, Granulometría Ideal	81
XLVI.	Porcentaje de Ligante Asfáltico Absorbido, Granulometría Máxima	81
XLVII.	Porcentaje de Ligante Asfáltico Absorbido, Granulometría Mínima.....	82

XLVIII.	Porcentaje de Ligante Asfáltico Efectivo, Granulometría Ideal	83
XLIX.	Porcentaje de Ligante Asfáltico Efectivo, Granulometría Máxima	83
L.	Porcentaje de Ligante Asfáltico Efectivo, Granulometría Mínima	84
LI.	Porcentaje de Relación Relleno Mineral/Asfalto, Granulometría Ideal.....	85
LII.	Porcentaje de Relación Relleno Mineral/Asfalto, Granulometría Máxima.....	85
LIII.	Porcentaje de Relación Relleno Mineral/Asfalto, Granulometría Mínima.....	86
LIV.	Resultados de Contenido de Humedad, Granulometría Ideal.....	87
LV.	Resultados Contenido de Humedad, Granulometría Máxima	88
LVI.	Resultados Contenido de Humedad, Granulometría Mínima	88
LVII.	Resultados de Estabilidad-Flujo, Granulometría Ideal	90
LVIII.	Resultados de Estabilidad-Flujo, Granulometría Máxima	90
LIX.	Resultados de Estabilidad-Flujo, Granulometría Mínima	90
LX.	Comparación de Gravedad Específica <i>Bulk</i>	91
LXI.	Comparación de Gravedad Específica Teórica Máxima <i>Rice</i>	92
LXII.	Comparación de Gravedad Específica Efectiva de los agregados	93
LXIII.	Comparación de Peso Unitario en la mezcla.....	94
LXIV.	Comparación de Porcentaje de Vacíos-Densidad	95
LXV.	Comparación de Porcentaje de Vacíos en el Agregado Mineral.....	96
LXVI.	Comparación de Porcentaje de Vacíos Llenados con Cemento Asfáltico.....	97
LXVII.	Comparación de Relación Relleno Mineral/Asfalto	98
LXVIII.	Comparación de Porcentaje de Contenido de Humedad.....	99
LXIX.	Comparación de Estabilidad Marshall	100
LXX.	Comparación de Flujo Marshall	101

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
cm	Centímetro
Deflt	Deformación igual a 0,0001”
°C	Grados centígrados
g	Gramo
Gmb	Gravedad específica <i>Bulk</i>
Gfino	Gravedad específica del agregado fino
Ggrueso	Gravedad específica del agregado grueso
Gac	Gravedad específica del ligante asfáltico
Gse	Gravedad específica efectiva de los agregados
Gmm	Gravedad específica teórica máxima <i>Rice</i>
m	Metro
mm	Milímetro
%	Porcentaje
%H	Porcentaje de contenido de humedad
Pba	Porcentaje de ligante asfáltico absorbido
Pbe	Porcentaje de ligante asfáltico efectivo
“	Pulgada

GLOSARIO

Absorción	Proceso por el cual la masa de mezcla, llena los poros permeables de las partículas de agregado.
AC	Cemento asfáltico. Material procedente del petróleo, utilizado para la pavimentación de carreteras.
AF	Agregado fino.
AG	Agregado grueso.
Agregado	Material granular, constituido por minerales y usado para mezclarse en diferentes tamaños.
Asfalto	Término designado al líquido cementante, que varía en consistencia, entre sólido y semisólido.
Bitumen	Sustancia utilizada en asfaltos, de color negro oscuro, fabricado con hidrocarburos sometidos a tratamientos de calor.
Capacidad	Habilidad que tiene una mezcla asfáltica para servir al tráfico para el cual ha sido diseñado.

Cohesión	Propiedad que conserva a un cuerpo sólido en su forma, para resistir a las aplicaciones de fuerzas externas.
Comportamiento	De la mezcla asfáltica. Puede ser definido como su capacidad para servir al tráfico a lo largo del tiempo.
Concreto asfáltico	Consiste en la elaboración en planta, en caliente, de una mezcla de proporciones.
Contenido de asfalto	Cantidad de materiales minerales (gruesos y finos) que deben ser adicionados a la mezcla para producir las cualidades deseadas.
Densidad	Relación entre la masa que posee un cuerpo o sustancia y el volumen que ocupa.
Estabilidad	Propiedad de la mezcla asfáltica a la resistencia de deformación y desplazamiento, causada por las cargas impuestas. Esta propiedad depende de la cohesión y fricción interna del material.
F/A	Relación relleno mineral/asfalto.
Fluencia	Deformación que sufre la probeta al ser sometida bajo la carga de Estabilidad Marshall.
Granulometría	Propiedad más característica del suelo. Estudia la distribución de las partículas que conforman un suelo

según su tamaño.

Granulometría Fina	Característica cuya graduación es continua, desde los tamaños gruesos hasta los tamaños finos. Predominan los últimos.
Granulometría Gruesa	La graduación de los agregados es continua, desde tamaños gruesos hasta tamaños finos. Predominan los tamaños gruesos.
MAC	Mezcla asfáltica en caliente. Consiste en una mezcla de cemento asfáltico con agregados, que cumple con granulometría fabricada en planta.
PG	<i>Performance Grade</i> (grado de desempeño)
Picnómetro	Instrumento de medición el cual se utiliza para determinar el peso específico o densidad de un fluido.
Probeta	Pieza sometida a ensayos para estudio determinado del material del que está conformada.
Tamaño Máximo Nominal	Es el mayor tamaño del tamiz por el cual debe pasar el agregado y lo retiene, usualmente no mayor al diez por ciento.

Tamizado	Método de separación de elementos de diferente tamaño que permite el paso de los más pequeños y retiene a los mayores.
VA	Porcentaje de vacíos en la mezcla asfáltica.
VAM	Vacíos en el Agregado Mineral.
Viscosidad	Característica del fluido mediante la cual ofrece resistencia al esfuerzo de corte.

RESUMEN

En un diseño para mezcla asfáltica de pavimentación en caliente, el asfalto y el agregado son combinados en diferentes dosificaciones, las cuales determinan las propiedades físicas de la mezcla y su desempeño como tal. En el presente documento se analiza el Método Marshall con granulometría tipo D (19 mm) y uso de cemento asfáltico con nomenclatura AC-20. Los capítulos que se abordan son los siguientes:

En el Capítulo uno, se describen las generalidades del Centro de Investigaciones de Ingeniería – CII -; justificación, planteamiento del problema y metodología que determina el trabajo de graduación. El diseño de mezcla asfáltica requiere un estudio cuidadoso de todos los factores involucrados y cómo todos estos parámetros influyen en el diseño. El Capítulo dos, abarca una recopilación teórica de los agregados para el diseño de mezcla asfáltica, como importancia del muestreo y reducción de los agregados, especificaciones y breve mención de las características y propiedades más importantes de los materiales pétreos utilizados para el respectivo diseño de mezcla asfáltica.

La Segunda parte determina el marco experimental; se describen los ensayos realizados y los resultados obtenidos; conjuntamente los respectivos análisis para el tema de investigación: *Diseño de una mezcla asfáltica por el Método Marshall, efectuando variaciones del tamaño máximo nominal para una granulometría controlada.*

OBJETIVOS

General

Brindar al profesional especializado en el área de asfaltos los lineamientos de diseño de mezcla asfáltica en caliente, iniciando con la graduación de agregado que se acerque a la media de los límites establecidos por el Método Marshall, efectuando variaciones del tamaño máximo nominal para una granulometría controlada.

Específicos

1. Determinar los criterios de diseño para mezcla asfáltica mediante el Método Marshall.
2. Identificar los ensayos de laboratorio de los materiales utilizados para la dosificación de la mezcla asfáltica por el Método Marshall.
3. Interpretar los resultados de los ensayos realizados a las muestras extraídas de la mezcla asfáltica en caliente, mediante los límites de la especificación y media en las curvas granulométricas de agregado fino y grueso.
4. Promover soluciones cuando el tamaño máximo nominal del agregado sobrepase o sea menor al 10 % en masa que pasa el tamiz designado.
5. Indicar las causas y efectos de inestabilidad en el pavimento.

JUSTIFICACIÓN

En la mayoría de ensayos de laboratorio no se considera el parámetro del diez por ciento de material retenido, principalmente porque las *Especificaciones Generales para Construcción de Carreteras y Puentes, Sección 401, Pavimento de Concreto Asfáltico en Caliente*, no los indican, siendo así un factor influyente en la resistencia alta o baja de la mezcla asfáltica en caliente. El objetivo del trabajo es determinar la variación del porcentaje de vacíos y tratar temas como: Análisis granulométrico, Causas y Efectos de la Inestabilidad en el Pavimento, Análisis de densidad – vacíos.

INTRODUCCIÓN

El método de dosificación Marshall desarrollado por Bruce Marshall, quien fue ingeniero de Bitúmenes del departamento de carreteras del estado de Mississippi, inicialmente fue utilizado por el Cuerpo de Ingenieros del Ejército norteamericano. Dicho cuerpo decidió adoptar el método, desarrollarlo y adaptarlo para el diseño y control de mezclas de pavimento bituminoso en el campo, debido al equipo portátil. El criterio para conseguir una mezcla asfáltica satisfactoria se basa en requisitos mínimos de estabilidad, fluencia, densidad y porcentaje de vacíos.

El interés que lleva a realizar este trabajo es diseñar mezcla asfáltica por el Método Marshall, específicamente con el diez por ciento de material retenido, dado que este parámetro no se toma en cuenta en la mayoría de ensayos de laboratorio. Se pretende variar el porcentaje de tamaño máximo nominal desde un ensayo que sí cumpla el parámetro del diez por ciento de material retenido y dos ensayos que no cumplan, es decir, menores y mayores al diez por ciento del material retenido. Como finalidad, se tiene determinar la variación del porcentaje de vacíos en el Diseño Marshall, sin tomar en cuenta los requisitos de flujo y estabilidad, siguiendo normas (ASTM D 1559 Y AASHTO T 245) que certifican la seguridad para los usuarios y que el servicio sea adecuado. Se realiza para establecer los parámetros en control de calidad del Diseño de Mezcla Asfáltica por el Método Marshall.

1. GENERALIDADES DEL CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERÍA, USAC

1.1. Historia

El Centro de Investigaciones de Ingeniería (CII), fue creado por Acuerdo del Consejo Superior Universitario, punto noveno del acta número ochocientos cuarenta y dos (842) de sesión celebrada el 27 de julio de 1963 y está integrado por todos los laboratorios de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

La base para construir el Centro, fue la unificación de los laboratorios de Materiales de Construcción de dicha facultad y de la Dirección General de Obras Públicas en 1959 y la subsiguiente adición a los mismos de los laboratorios de Química y Microbiología Sanitaria de las entidades ya mencionadas. En 1965 se agregó al CII, el Laboratorio de Análisis de Aguas de la Municipalidad de Guatemala. En 1967 se incorporaron los laboratorios del Departamento de Ingeniería Química, que pasó a formar parte de la Facultad de Ingeniería como Escuela de Ingeniería Química, y posteriormente los laboratorios de Mecánica e Ingeniería Eléctrica, al formarse las respectivas escuelas. Actualmente el CII cuenta con seis nuevas secciones adscritas: el Laboratorio de Investigación de Extracción de Vegetales, la Planta Piloto de Biodiesel, la Sección de Ecomateriales, la Sección de Gestión de la Calidad, la Sección de la Tecnología de la Madera y la Sección de Topografía y Catastro.

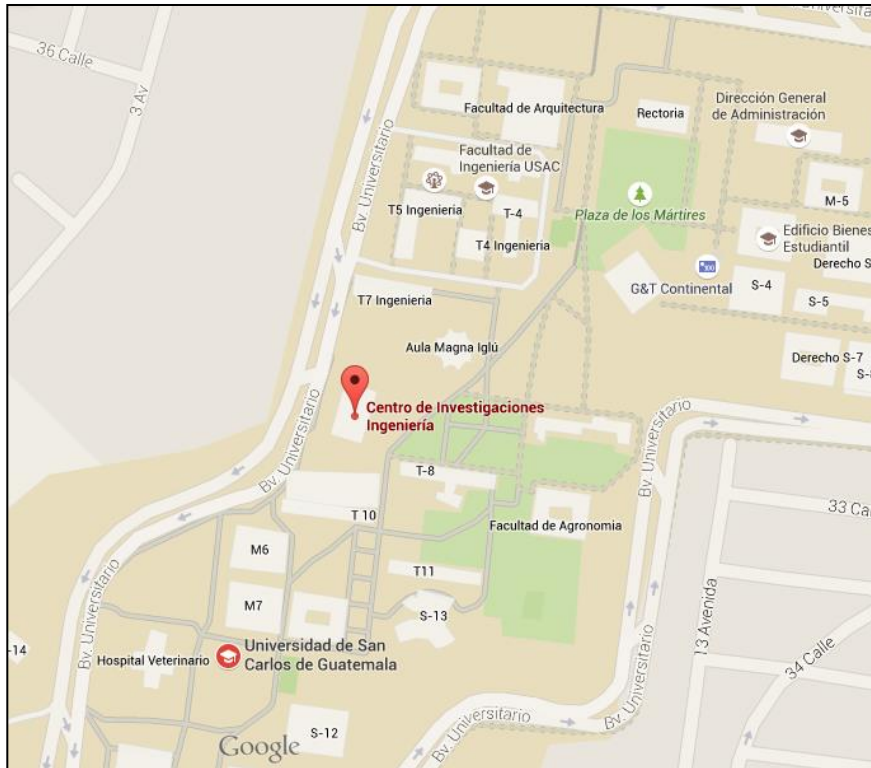
El Laboratorio de Asfaltos tiene como finalidad realizar investigación y prestar servicios sobre las características del bitumen, mezclas asfálticas y emulsiones, analizando sus características químicas, fisicoquímicas, físicas y mecánicas para su uso en la industria de la construcción. Promueve proyectos de investigación con entidades públicas y privadas¹.

1.2. Ubicación

El Laboratorio de Asfaltos dirigido por el Centro de Investigaciones de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, se ubica en el bulevar universitario, ciudad universitaria zona 12 Guatemala, Guatemala.

¹ Centro de Investigaciones de la Facultad de Ingeniería, Usac. *Reseña histórica de CII*. <http://cii.ingenieria.usac.edu.gt/>. Consulta: 7 de noviembre de 2015.

Figura 1. **Ubicación de Laboratorio de Asfaltos del Centro de Investigaciones de Ingeniería – CII – USAC**



Fuente: *Google Earth*. <https://www.google.com.gt/maps>. Consulta: 7 de noviembre de 2015.

1.3. Misión

Investigar alternativas de solución científica y tecnológica para la resolución de la problemática científico-tecnológica del país en las áreas de ingeniería, que estén orientadas a dar respuesta a los problemas nacionales; realizar análisis y ensayos de caracterización y control de calidad de materiales, estructuras y productos terminados de diversa índole; desarrollar programas docentes orientados a la formación de profesionales, técnicos de laboratorio y operarios calificados; realizar inspecciones, evaluaciones, expertajes y prestar servicios de asesoría técnica y consultoría en áreas de la ingeniería; actualizar, procesar y divulgar información técnica y documental en las materias relacionadas con la ingeniería.²

² Centro de Investigaciones de la Facultad de Ingeniería, Usac. *Reseña histórica de CII*. <http://cii.ingenieria.usac.edu.gt/>. Consulta: 7 de noviembre de 2015.

1.4. Visión

Desarrollar investigación científica como el instrumento para la resolución de problemas de diferentes campos de la ingeniería, orientada a la optimización de los recursos del país y a dar respuesta a los problemas nacionales; contribuir al desarrollo de la prestación de servicios de ingeniería de alta calidad científico-tecnológica para todos los sectores de la sociedad guatemalteca; colaborar en la formación profesional de ingenieros y técnicos; propiciar la comunicación con otras entidades que realizan actividades afines, dentro y fuera de la República de Guatemala, dentro del marco definido por la Universidad de San Carlos de Guatemala. Mantener un liderazgo en todas las áreas de Ingeniería a nivel nacional y regional centroamericano, en materia de investigación, análisis y ensayos de control de calidad, expertaje, asesoría técnica y consultoría, formación de recurso humano, procesamiento y divulgación de información técnica y documental, análisis, elaboración y aplicación de normas.³

1.5. Política de Calidad

El Centro de Investigaciones de Ingeniería cuenta con un arancel en el cual se presentan de manera ordenada los servicios en función del tipo de ensayo, proporcionando al interesado que lo solicita, un informe técnico de laboratorio como constancia del ensayo realizado.

Se propone además, como un laboratorio de asfaltos:

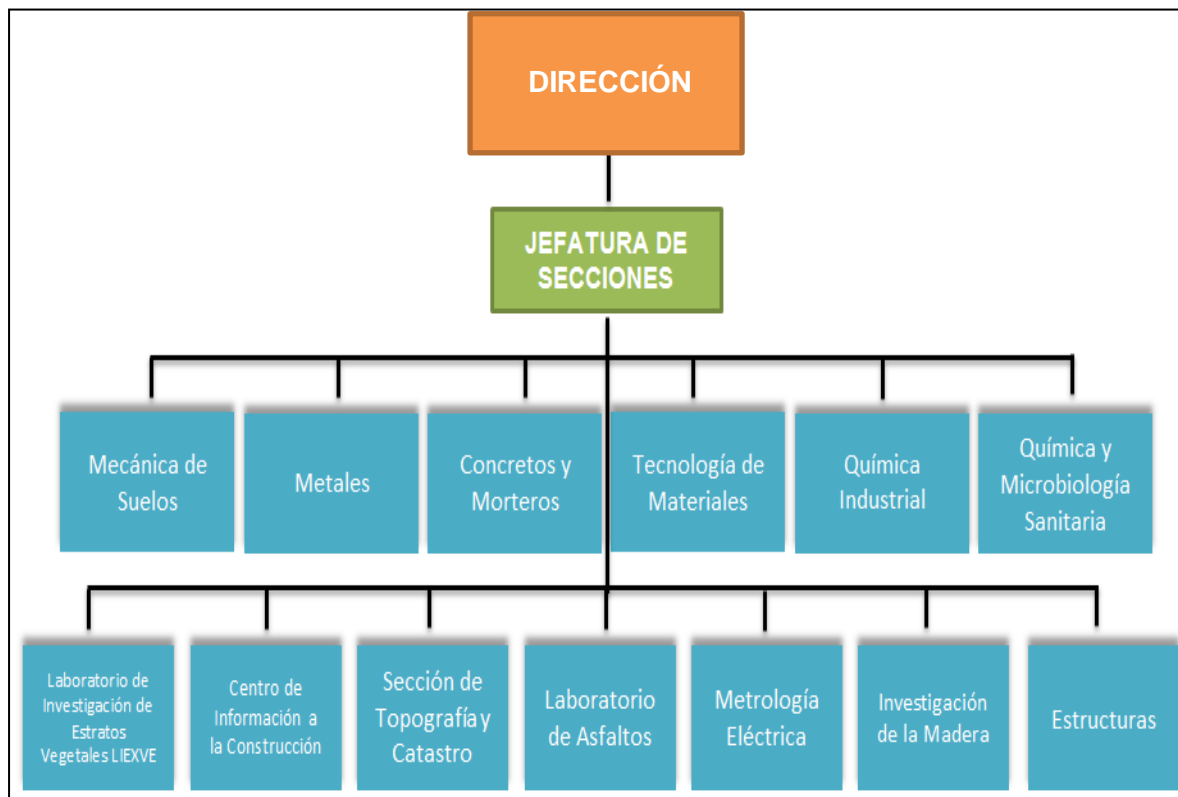
- Alta calidad científica y tecnológica en el campo de los pavimentos flexibles, que ofrecerá servicios arancelados de control de calidad.
- Cursos de capacitación.
- Talleres dirigidos a estudiantes universitarios, profesionales y público en general.

³ Centro de Investigaciones de la Facultad de Ingeniería, Usac. *Reseña histórica de CII.* <http://cii.ingenieria.usac.edu.gt/>. Consulta: 7 de noviembre de 2015.

1.6. Organigrama

A continuación, se presenta la organización de las diferentes secciones dentro del Centro de Investigaciones de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

Figura 2. **Organigrama del Centro de Investigaciones de Ingeniería – CII- USAC**



Fuente: elaboración propia.

1.7. Planteamiento del problema

Actualmente, y de manera general, en la República de Guatemala existen normativas que determinan los ensayos de laboratorio que deben aplicarse a las muestras extraídas de la mezcla asfáltica en caliente, estos son conocidos a nivel macro por los profesionales involucrados como ingenieros civiles, ingenieros geotécnicos; pero no cuentan con la supervisión adecuada que certifica la calidad en los materiales que se utilizan para construir carreteras, como tamaño máximo nominal del agregado, si es mayor o menor al 10 % de material retenido, cumplimiento de la curva granulométrica sin quiebres bruscos. Todo esto conlleva a crear un diseño de mezcla asfáltica por el Método Marshall, efectuando variaciones del tamaño máximo nominal para una granulometría controlada y concientizar una ética profesional y laboral en los ejecutores de las obras, lo cual es un factor clave que se debe tomar en cuenta para que la red vial nacional sea propia, de calidad y de servicio a los ciudadanos.

1.8. Metodología

Para la investigación se obtendrán las normativas que exigen los códigos y se expondrán los principios conceptuales del diseño de mezclas asfálticas por el Método Marshall (ASTM D 1559 Y AASHTO T 245).

Se dedicará una parte, en la cual se harán ensayos en el Laboratorio de Asfaltos del Centro de Investigaciones de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, bajo la Supervisión del Ingeniero Darío Francisco Lucas Mazariegos, jefe de laboratorio y del personal del laboratorio, solicitando así un reporte formal y se procederá a explicar los resultados obtenidos y cómo se

transcriben a valores para el chequeo de materiales en obra, donde se trabaje con carácter profesional.

1.9. ¿Qué son las Normas ASTM y AASHTO?

American Society for Testing Materials, por sus siglas en inglés, Sociedad Americana para Ensayo de Materiales. Las Normas ASTM se crean usando un procedimiento que adopta los principios del Convenio de barreras técnicas al comercio de la Organización Mundial del Comercio. El proceso de creación de Normas de ASTM es abierto y transparente, lo que permite una decisión global consensuada.

Las Normas de ASTM Internacional se usan en investigaciones y proyectos de desarrollo, sistemas de calidad, comprobación y aceptación de productos y transacciones comerciales por todo el mundo. ASTM Internacional es uno de los editores técnicos de normas, artículos y documentos técnicos e información relacionada, más reconocido en el mundo. Las Normas ASTM contienen:

- Métodos de prueba
- Especificaciones de materiales
- Prácticas recomendadas
- Nomenclaturas
- Guías

Estas normas son utilizadas y aceptadas mundialmente y abarcan áreas tales como: metales, pinturas, plásticos, textiles, petróleo, construcción, energía, el medio ambiente, entre otros.

La Norma AASHTO, *American Association of State Highway and Transportation Officials*, por sus siglas en inglés, es la Asociación Americana de Oficiales de Carreteras Estatales y Transportes. Órgano que establece normas, publica especificaciones y hace pruebas de protocolos y guías usadas en el diseño y construcción de autopistas.

Es una norma para el cálculo y diseño vial, se indican los mínimos y máximos parámetros para el cálculo de curvas verticales, curvas horizontales, carriles, especificaciones del nivel de servicio al que ha sido diseñado, entre otros.

1.10. Elaboración y control de cálculos, documentos y registros según Norma ASTM D 1559 y AASHTO T 245

El alcance de estas normas describe el procedimiento que debe seguirse para determinar la densidad *Bulk* y el porcentaje de vacíos para cada serie de muestras asfálticas, mediante el cálculo y análisis de los diferentes pesos y volúmenes. Se debe mantener y mejorar continuamente su eficacia de acuerdo con los requisitos de esta norma internacional.

2. DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA

Los agregados pétreos para conformar carpetas asfálticas son suelos originarios de ríos, banco de materiales; incluyen arena, grava, roca triturada y polvo de roca. Estos materiales tienen composición granular sólida los cuales, por lo general, requieren proceso de trituración para su utilización.

2.1. Importancia del muestreo y reducción de agregado con base en el tamaño máximo nominal

Toda muestra posee características naturales de los materiales que representa, basados en tamaño, tipo, forma, uso y otras características. El muestreo debe realizarse con base en la Norma ASTM D 75.

2.1.1. Importancia del muestreo de agregado

La prioridad del muestreo del agregado incluye la inspección de las fuentes de suministro de los materiales, control de producción, acopio, manejo y operación de los mismos. Los materiales más utilizados para construcción de carreteras siguen la extracción de muestras: roca, grava y arena.

Los controles para dicho muestreo aseguran que se use el material satisfactorio en la mezcla de pavimentación; por tanto, proporcionan el registro permanente que cumplen con las especificaciones propias de la obra.

Figura 3. **Operación del muestreo de agregado**



Fuente: elaboración propia, tomada en Asfaltos del Sur, ASFALSUR.

Figura 4. **Acopio y manejo del muestreo de agregado**



Fuente: elaboración propia, tomada en Asfaltos del Sur, ASFALSUR.

La muestra seleccionada debe ser representativa de todo el agregado para que los resultados de los ensayos de laboratorio sean confiables.

A continuación, se presentan las cantidades requeridas en el muestreo que indica la Norma ASTM D 75-87.

Tabla I. **Tamaño de muestras**

Tamaño Máximo Nominal del Agregado		Masa Mínima Aproximada de Muestra de Campo	
		kg	Lb
Agregado Fino			
Núm. 8	2,36 mm	25	10
Núm. 4	4,75 mm	25	10
Agregado Grueso			
3/8 "	9,5 mm	25	10
1/2 "	12,5 mm	35	15
3/4 "	19,0 mm	55	25
1 "	25,0 mm	110	50
1 1/2 "	37,5 mm	165	75
2 "	50,0 mm	220	100
2 1/2 "	63,0 mm	275	125
3 "	75,0 mm	330	150
3 1/2 "	90,0 mm	385	175

Fuente: Norma ASTM D 75-87.

2.1.2. **Importancia de la reducción de agregado**

Una vez seleccionada la muestra de agregado, en algunos casos, es necesario reducir el volumen al solicitado en la tabla I, siendo como características principales la homogeneidad y la calidad del mismo.

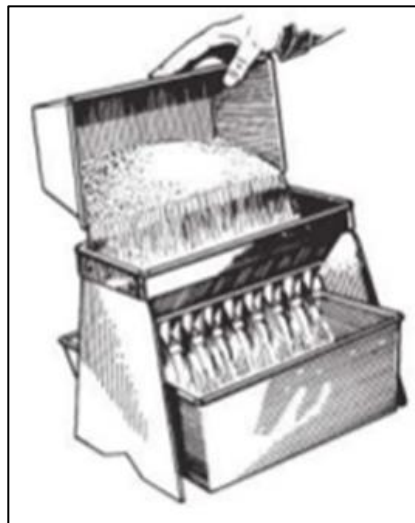
El propósito de la reducción de agregado es modificar su tamaño para el ensayo correspondiente, mediante métodos aplicables y técnicas que pretenden

minimizar las variaciones y maximizar la resistencia a corte. Algunos de ellos son los siguientes:

2.1.2.1. Método usando cuarteador mecánico de muestras

Se coloca una muestra en un recipiente y se deposita el material en un cuarteador mecánico (figura 5); distribuirlo uniformemente en dos partes iguales; de estas dos, se toma de muestra una de ellas y se repite el procedimiento para obtener otras dos partes iguales, de tal manera que sea reducida al tamaño especificado en el ensayo. Este método es preferible aplicarlo con muestras de agregado fino seco o agregado grueso seco.

Figura 5. Cuarteador mecánico



Fuente: *Partidor mecánico*.

<https://www.google.com.gt/search?q=partidor+mecanico&tbm=isch&tbo=u&source=univ&sa=X&ved=0ahUKEwjz8YrUgdzSAhVN-GMKHewQBhIQsAQIFw&biw=1366&bih=662#imgrc=4JaP2RyuCZF7cM:>. Consulta: 7 de noviembre de 2015.

2.1.2.2. Método por cuarteo manual

En caso la muestra se encuentre húmeda, es necesario aplicar este método. La superficie en la cual se dispersa la muestra de agregado debe ser plana, lisa y limpia. Una vez establecida el área de cuarteo, se coloca la muestra, se mezcla y esparce uniformemente. Con una pala se separa en cuatro partes iguales y se eliminan dos de los extremos opuestos.

Figura 6. Cuarteo manual



Fuente: elaboración propia, tomada en el Laboratorio de Asfaltos – CII- USAC.

2.2. Propiedades de los agregados que se utilizan en mezclas asfálticas en caliente (MAC)

Consiste en una mezcla de cemento asfáltico (en este tema de investigación se hace referencia al AC-20) con agregados que cumplen la granulometría (tipo D – 19 mm) fabricada en planta.

La clasificación de agregados pétreos depende de su procedencia, fabricación, uso y otros factores. A continuación, se enlistan algunas acepciones de los mismos.

- Agregado fino: agregado que pasa por el tamiz de 4,75mm (núm. 4) y queda retenido en el tamiz 0,075mm (núm. 200).
- Agregado grueso: agregado que pasa por el tamiz de 3" (76,2 mm) y queda retenido en el tamiz de 4,75 mm (núm. 4).
- Polvo mineral: porción del agregado fino que pasa por el tamiz núm. 200.
- Relleno mineral: producto muy fino del cual más del 70 % pasa el tamiz núm. 200.

2.2.1. Propiedades de los agregados utilizados en MAC

Para que un agregado sea considerado apropiado y apto para conformar una mezcla asfáltica en caliente, debe cumplir con ciertas características y propiedades, las cuales tienen vital importancia en la siguiente clasificación:

2.2.1.1. Características físicas

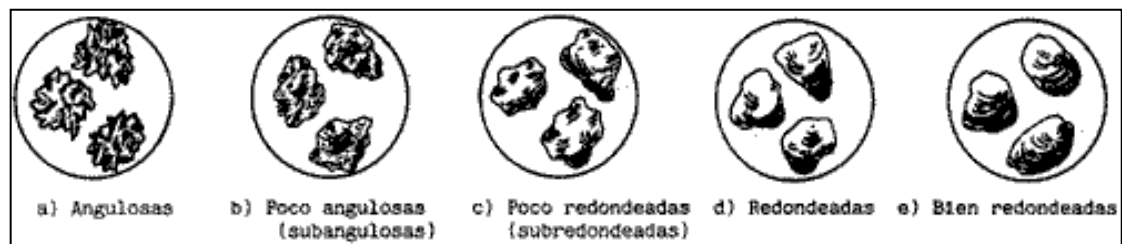
Son aquellas que sin afectar su composición en el agregado, pueden medirse. Es decir, estas describen las transformaciones y evoluciones temporales de los estados instantáneos, las cualidades de sí mismo. Dichas mediciones pueden compararse con cierto patrón (criterio propio). Por ejemplo, forma y textura de la partícula.

2.2.1.1.1. Forma de la partícula

Las partículas naturales del agregado pueden ser (durante la historia geológica) esféricas, cúbicas, entre otros. En términos descriptivos, la forma de los agregados puede ser:

- Angular: los bordes están definidos y formados por la intersección de sus caras planas, poco desgaste en las caras y en los bordes.
- Subangular: se observa poco desgaste en las caras y en los bordes, pero las caras resultan intactas.
- Subredondeado: los bordes, debido al desgaste, están parcialmente eliminados.
- Muy redondeados: no presenta caras ni bordes.

Figura 7. Forma de los agregados



Fuente: *Agregados*.

https://www.google.com.gt/search?q=forma+de+los+agregados&noj=1&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ved=0ahUKEwj-vY3iiNzSAhVLKiYKHSpCBIEQ_AUICCGB&biw=1366&bih=662#imgrc=Po5jj3s-tnyRQM. Consulta: 7 de noviembre de 2015.

Los agregados triturados, que son el resultado de procesar material basáltico en etapas de trituradora de quijadas y trituradoras de cono, adquieren como característica, la alta resistencia a la flexión y a la tensión, por lo cual son preferidos para mezclas asfálticas de carreteras.

Un agregado puede considerarse físicamente sano cuando aún bajo cambios de humedad, temperatura y resistencia a la intemperie, conserva su integridad.

2.2.1.1.2. Textura superficial

Existen agregados rugosos, difíciles de compactar pero que se adhieren mejor entre sí. Debido a su aumento en la estabilidad, son preferibles para mezclas asfálticas y su respectivo diseño. Los agregados rugosos, principalmente se concentran en la manejabilidad de la mezcla asfáltica.

2.2.1.1.3. Tamaño máximo del agregado

Previo a cualquier procedimiento, se determina el tamaño de la muestra del agregado; en este tema de investigación corresponde a 3/4". Se denomina tamaño máximo del agregado, al tamiz más grande por el cual pasa o atraviesa el cien por ciento (100 %) de las partículas del agregado.

2.2.1.1.4. Tamaño máximo nominal del agregado

Es el mayor tamaño del tamiz por el cual debe pasar el agregado (3/8") y lo retiene; usualmente no sobrepasa al diez por ciento (10 %), esto en una serie normal de tamices.

2.2.1.2. Propiedades mecánicas

La mecánica de los materiales estudia los efectos internos que experimenta un cuerpo bajo carga, considerando los parámetros básicos de resistencia al desgaste. Los agregados pétreos se consideran apropiados para mezclas asfálticas, de acuerdo a las propiedades que cada uno posee. A continuación se describen algunas.

2.2.1.2.1. Afinidad con el bitumen

Cuando los agregados pétreos se combinan o mezclan con bitumen, adquieren características importantes como: consistencia, pureza y seguridad.

2.2.1.2.2. Capacidad de absorción

Cualquier agregado posee porosidad, y algunos más que otros; es por ello que si un agregado es altamente absorbente, continúa absorbiendo asfalto, y una vez sea mezclado en la planta, deja en su superficie menos asfalto para ligar las demás partículas de agregado. Se debe analizar si el agregado proporciona las características deseables para conformar la mezcla asfáltica en caliente y evitar que el diseño sea inadecuado. Las Normas que rigen esta

propiedad son AASHTO T85-91, para agregado grueso; y AASHTO T84-00, para agregado fino.

2.2.1.2.3. Dureza

El agregado que se utilice para mezcla asfáltica en caliente debe ser capaz de resistir al desgaste. Esta propiedad proporciona a las rocas desgastar la superficie de contacto de otro cuerpo más duro durante la fricción. La Norma AASHTO T 96-202, estandariza el ensayo de Desgaste de Los Ángeles el cual mide la resistencia de un agregado a la abrasión y al desgaste.

2.2.1.2.4. Graduación

La graduación está específicamente ligada a la distribución del tamaño de las partículas. Dicha propiedad es el resultado de realizar el análisis granulométrico.

Una vez realizado el análisis respectivo es necesario determinar si la graduación del agregado satisface los requisitos o no.

El diseño de la mezcla debe interpretarse con una curva granulométrica continua, sin quiebres bruscos, dentro de los límites para el tamaño máximo nominal del agregado requerido.

Los límites para la graduación designada y tamaño máximo nominal de acuerdo al tamaño del tamiz, los determina la tabla II.

Tabla II. **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 Designada y Tamaño Máximo Nominal ⁽¹⁾					
	A (50.8 mm)	B (38.1 mm)	C (25.4 mm)	D (19 mm)	E (12.5 mm)	F (9.5 mm)
	2"	1 ½"	1"	¾"	½"	? "
63.00 mm	100					
50.00 mm	90-100	100				
38.10 mm	-	90-100	100			
25.00 mm	60-80	-	90-100	100		
19.00 mm	-	56-80	-	90-100	100	
12.50 mm	35-65	-	56-80	-	90-100	100
9.50 mm	-	-	-	56-80	-	90-100
4.75 mm	17-47	23-53	29-59	35-65	44-74	55-85
2.36 mm	10-36	15-41	19-45	23-49	28-58	32-67
0.30 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

⁽¹⁾ 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 del tamiz mayor al correspondiente al tamaño máximo nominal.

Fuente: Dirección General de Caminos. *Especificaciones Generales para Construcción de Carreteras y Puentes*. p. 401-3.

2.2.1.2.5. **Peso específico**

Denominado, Gravedad Específica. De una muestra de agregado, se compara el peso de un volumen dado de agregado con el peso de un volumen igual de agua, a la misma temperatura. Esta característica es importante especialmente en la producción de mezclas asfálticas debido a que el agregado y el bitumen son dosificados según su peso. La Norma ASTM C 127-04 establece dicha característica.

2.3. **Análisis granulométrico**

Consiste en la clasificación y separación por tamaños de los granos que componen la muestra de agregado, desde una formación sedimentaria hasta el

cálculo de los tamaños previstos por una escala granulométrica. La Norma que regula y estandariza este tipo de análisis es AASHTO T 27-99.

2.3.1. Método por Tamizado

Se realiza mediante una serie de tamices en orden decreciente ($3/4''$, $3/8''$, núm. 4, núm. 8, núm. 50, núm. 200 y fondo) para tamaños grandes y medianos de las partículas que respectivamente se denominan granulometría gruesa (Tipo D – 19 mm) y fina.

Figura 8. **Análisis de tamices**



Fuente: elaboración propia, tomada en el Laboratorio de Mecánica de Suelos – CII – USAC.

Se debe considerar el estado de las partículas; cuando estas estén cubiertas de polvo o material, parcialmente secas, se debe efectuar un tamizado por lavado.

2.3.1.1. Tamizado en seco

Este, por lo general, se utiliza con agregado grueso. En primer lugar, las muestras son reducidas mediante cuarteo manual o partidoreo mecánico. Una vez secada la muestra hasta una temperatura de 105 °C, se deja enfriar a temperatura ambiente y se pesa la cantidad requerida para hacer el ensayo. Se coloca el juego de tamices, se agrega el material y se tapa.

Se agita todo el juego de tamices, con movimientos de rotación mediante el uso de tamizadora mecánica y eléctrica denominada "Ro-Tap". Una vez transcurridos 15 minutos, se quita la tapadera y se separan los tamices, vaciando la fracción de agregado en cada uno de ellos.

Las partículas que quedan entre la malla no deben forzarse a pasar a través de ella, sino, con ayuda de una brocha, se desprende.

El material obtenido en cada tamiz se deposita sobre un papel o recipiente totalmente limpio y libre de asperezas (para evitar que se quede material acumulado). Se agrega y pesa, acumulativamente, las fracciones retenidas en cada uno de los otros tamices y, a su vez, la parte que se encuentra en el "fondo". Todos estos datos deben anotarse en el registro de cálculo.

2.3.1.2. Tamizado por vía húmeda

Las muestras para este tipo de tamizado son lavadas, con el objeto de remover y desprender de ellas cualquier material limoso o arcilloso; una vez hayan sido separadas, secadas y pesadas. Se debe aclarar que la diferencia entre los pesos (antes y después del lavado) indica la cantidad de polvo y/o

material en la muestra original. Una vez obtenida la muestra de material seco, se procede a operar "Tamizado en seco" (ver numeral 2.3.1.1.).

Para determinar el procedimiento de este tamizado (vía húmeda) puede consultarse la Norma AASHTO T 11-97.

2.4. Generalidades de mezclas asfálticas en caliente

Las mezclas asfálticas en caliente son fabricadas en plantas fijas, es decir, el conjunto de dispositivos y mecanismos para que los agregados sean combinados, calentados y mezclados, dependiendo de la dosificación de los mismos para la cantidad y tipo de mezcla requerida. Son utilizadas en la construcción, principalmente de carreteras, aeropuertos, entre otros. La constitución de estas es aproximadamente del 90 % de agregados, 5 % de polvo mineral y otro 5 % de bitumen.

2.4.1. Definición de mezcla asfáltica en caliente

Esta se describe como la mezcla entre asfalto líquido y agregados pétreos usados en pavimentación. Consiste en la elaboración en planta, en caliente, con control estricto de las dosificaciones, tanto de materiales pétreos, polvo mineral, cemento asfáltico, como aditivos para la obtención de un producto de alta resistencia y duración con características de calidad, con el objetivo de que se pueda tender y compactar de inmediato en la carretera y con ello proporcionar las propiedades de resistencia a las capas de la superficie.

2.4.2. Clasificación de las mezclas asfálticas

Las mezclas asfálticas se pueden clasificar en distintos parámetros, de acuerdo a su composición, uso y temperatura, entre ellos:

2.4.2.1. Por posición relativa

- Carpeta de rodadura
- Capa intermedia
- Base asfáltica

Figura 9. Estructura de mezcla asfáltica convencional



Fuente: *Estructura de mezcla asfáltica convencional.*

https://www.google.com.gt/search?q=forma+de+los+agregados&noj=1&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ved=0ahUKEwj-vY3iiNzSAhVLKiYKHSpCBIEQ_AUICCGB&biw=1366&bih=662#imgrc=Po5jj3s-tnyRQM. Consulta: 7 de noviembre de 2015.

2.4.2.2. Por agregado pétreo en la mezcla

- Concreto asfáltico: agregado grueso, más mortero
- Macadam asfáltico: agregado grueso, más ligante asfáltico y compactado
- Masilla asfáltica: polvo mineral, más ligante
- Mortero asfáltico: agregado fino, más masilla

2.4.2.3. Por temperatura

- Mezclas en frío: la emulsión asfáltica y la puesta en obra se realiza a temperatura ambiente.
- Mezclas en caliente: de acuerdo a la viscosidad del ligante, mayor a los 150 °C, la puesta en obra se realiza a temperatura superior a la del ambiente.
- Mezclas tibias: rango entre 100 °C – 135 °C, nueva tecnología surgida en Europa con la necesidad de ofrecer economía y mismo desempeño de mezclas asfálticas en caliente.

Tabla III. **Temperaturas para la colocación de la mezcla de concreto asfáltico**

Espesor Compactado de la Capa ⇒	< 50 mm	50 – 75 mm	> 75 mm
Temperatura de la Superficie de la Carretera en °C	Temperatura mínima de colocación en °C		
4 – 7.9	No se permitirá	141	140
8 – 14.9	146	140	140
≥ 15	141	140	140

Fuente: Dirección General de Caminos. *Especificaciones Generales para Construcción de Carreteras y Puentes*. p. 401-15.

2.4.2.4. Por vacíos en la mezcla asfáltica

Este indica las deformaciones plásticas que posiblemente sean producidas por las imposiciones de cargas y de variaciones térmicas.

- Mezclas cerradas: mezcla densa, vacíos no mayor al 5 % de ellos.
- Mezclas semi-cerradas: proporción de vacíos entre 5 % - 10 %.
- Mezclas abiertas: la cantidad de los vacíos excede del 12 %.
- Mezclas drenantes: permiten paso de agua, sus vacíos son mayores al 20 %.

2.4.2.5. Por granulometría

- Mezclas continuas: distribución adecuada del agregado pétreo en la granulometría.
- Mezclas discontinuas: cantidad limitada de tamaños de agregado pétreo en la granulometría.

2.4.2.5.1. Por tamaño máximo del agregado pétreo

- Mezclas finas: incluyen agregado fino, polvo mineral y ligante asfáltico.
- Mezclas gruesas: el tamaño máximo del agregado pétreo excede de 10 mm.

2.4.3. Evolución de los diseños de las mezclas asfálticas en caliente

En 1850, en el Reino Unido, se originan las mezclas asfálticas con el uso de algunos riegos superficiales en la pavimentación de las carreteras. Se decide el desarrollo de la técnica de la iluminación con gas, la cual obtiene como subproducto, el ligante. Entre 1847 y 1854, España pavimenta las zonas peatonales. A inicios de 1870, en Estados Unidos, se utilizan mezclas producidas a partir de materiales naturales. Con el desarrollo de la industria petrolera, se inicia el empleo de betunes de destilación.

El norteamericano C. Richardson, a finales del siglo XIX, instala la tecnología de las mezclas para pavimentos. Con la aprobación del *Plan de modernización de las carreteras*, en 1950, se mejoran las infraestructuras viales. Entre 1960 y 1970 se producen algunos avances tecnológicos de las plantas asfálticas.

La evolución de los métodos para el diseño de mezclas asfálticas en caliente parte de 1920. A continuación una reseña de ellos:

2.4.3.1. Método The Hubbard-Field

Año 1920. Se caracteriza por ser uno de los métodos iniciadores en la evaluación del contenido de vacíos en la mezcla y agregado mineral. Este se especializa en granulometrías finas.

2.4.3.2. Método Marshall

Desarrollado durante la II Guerra Mundial, 1930. Se considera como un experimento de laboratorio dirigido al diseño de una mezcla adecuada, mediante el análisis fundamental de estabilidad, fluencia, densidad y vacíos.

2.4.3.3. Método SUPERPAVE

Por sus siglas en inglés, *Superior Performing Asphalt Pavements* (SUPERPAVE), 1993. Es más que un *software*, representa especificaciones de los materiales, diseño y su respectivo análisis; incluye equipos y técnicas para el ensayo. Este proporciona modelos y métodos para requerimientos específicos del comportamiento de tránsito, estructura del pavimento, clima y, de ser necesario, aditivos. El diseño volumétrico de las mezclas en SUPERPAVE ha tenido buenos resultados y aceptación en el control de calidad de las propiedades volumétricas de la mezcla asfáltica en caliente.

2.4.4. Características y comportamiento de la mezcla en el Método Marshall

De una mezcla asfáltica en caliente, en laboratorio, el análisis está enfocado en cuatro características principales relacionadas a su comportamiento:

2.4.4.1. Contenido de asfalto

Este depende de las características del agregado y su capacidad de absorción; de acuerdo a esta última, se puede clasificar en:

- Contenido total de asfalto: cantidad adicionada a la mezcla, para producir cualidades deseadas de la misma.
- Contenido efectivo de asfalto: forma una película de ligante sobre la superficie del agregado, es decir, la cantidad de asfalto no absorbido.

Tabla IV. **Cantidad de cemento asfáltico (ASTM D 3515)**

Graduación Designada y Tamaño Máximo Nominal					
A (50.8 mm)	B (38.1 mm)	C (25.4 mm)	D (19 mm)	E (12.5 mm)	F (9.5 mm)
2"	1 1/2"	1"	3/4"	1/2"	?"
2-7	3-8	3-9	4-10	4-11	5-12

^(*) La cantidad de cemento asfáltico está dada en términos del porcentaje de peso de la mezcla total. La amplia diferencia en el valor de gravedad específica de la variedad de agregados, así como la gran diferencia en el porcentaje de absorción para los agregados, da como resultado un rango amplio para la cantidad de cemento asfáltico especificado. La cantidad de cemento asfáltico requerido para una mezcla dada debe ser determinada ejecutando los ensayos de laboratorio apropiados.

Fuente: Dirección General de Caminos. *Especificaciones Generales para construcción de Carreteras y Puentes*, p. 401-13.

2.4.4.2. Densidad

Se define como el peso unitario que frecuentemente es utilizado para la determinación de los valores del peso específico que se requiere para seleccionar la proporción de las mezclas. Se expresa en kg/m^3 ó lb/ft^3 . Se debe analizar que a densidad baja, la cantidad de vacíos es mayor; por el contrario, si la densidad de la muestra compactada es alta, la cantidad de vacíos es menor; todo esto afecta o beneficia la carpeta de rodadura con la presencia del agua.

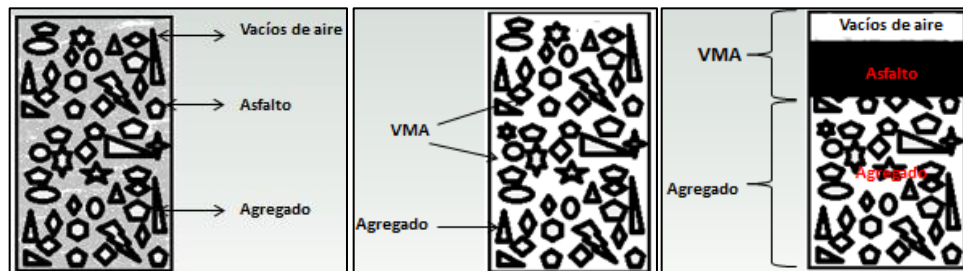
2.4.4.3. Vacíos de Aire

La permeabilidad de una mezcla asfáltica está relacionada directamente con el contenido de vacíos en ella. Estos son pequeños espacios de aire y son revestidos de asfalto en la mezcla compactada.

2.4.4.4. Vacíos en el Agregado Mineral

Por simbología, VAM. Los vacíos en el agregado mineral se definen como una relación de los espacios de aire. Estos existen, entre partículas de agregado y los espacios que están llenos de asfalto, en la mezcla asfáltica compactada. La Norma que indica este ensayo es ASTM D 1559.

Figura 10. Vacíos en el Agregado Mineral



Fuente: *Agregado mineral*.

https://www.google.com.gt/search?q=forma+de+los+agregados&noj=1&source=lnms&tbn=isch&sa=X&ved=0ahUKEwj-vY3iiNzSAhVLKiYKHSpCBIEQ_AUICCGB&biw=1366&bih=662#imgrc=Po5jj3s-tnyRQM. Consulta: 7 de febrero de 2017.

Tabla V. **Vacíos en el Agregado Mineral**

Tamaño nominal máximo del agregado en mm	Porcentaje de vacíos del agregado mineral (VAM)			
	Marshall			Superpave
	3% ⁽¹⁾	4% ⁽¹⁾	5% ⁽¹⁾	4% ⁽¹⁾
9.50	14	15	16	15
12.50	13	14	15	14
19.00	12	13	14	13
25.00	11	12	13	12
37.50	10	11	12	11
50.00	9.5	10.5	11.5	No aplicable

⁽¹⁾ Porcentaje de vacíos con aire de la mezcla compactada.

Fuente: Dirección General de Caminos. *Especificaciones Generales para Construcción de Carreteras y Puentes*. p. 401-8.

2.4.5. Propiedades de las mezclas asfálticas en el Método Marshall

Para que las mezclas asfálticas trabajen adecuadamente, es necesario diseñarlas, producirlas y colocarlas de tal manera que se obtengan las propiedades deseadas. Existen varias propiedades que contribuyen a la buena calidad de estas. A continuación se describen:

2.4.5.1. Durabilidad

Esta se refiere a la capacidad de resistir a la desintegración del agregado, polimerización, oxidación y separación de las partículas de asfalto. Los factores que pueden afectar la durabilidad son:

- Acción del clima extremo
- Circulación no adecuada del tránsito
- Bajo Contenido de Asfalto (desintegración por pérdida de agregado)

- Alto Contenido de Vacíos (falta de compactación, agrietamiento)
- Agregados susceptibles al agua (provoca desgaste en el pavimento)

Para mejorar la durabilidad de una mezcla asfáltica puede hacerse manipulando el contenido óptimo de asfalto, utilizando una graduación densa y compactando dicha mezcla.

2.4.5.2. Estabilidad

El asfalto también posee distintas capacidades, entre ellas, la de resistir a desplazamientos y deformaciones causadas por las cargas del tránsito. Esta propiedad depende de:

- Fricción Interna: relacionada con las formas y texturas del agregado.
- Cohesión: resultado de la capacidad del ligante asfáltico; puede aumentar o disminuir dependiendo de la viscosidad.

Sin embargo, las especificaciones de la estabilidad de mezcla asfáltica indican que al obtener valores muy altos de ella, producen un pavimento demasiado rígido; por lo tanto, no cumple con el diseño durable y deseado en el comportamiento de una mezcla asfáltica flexible.

2.4.5.3. Flexibilidad

Debido a las constantes cargas y asentamientos en la sub-rasante, la mezcla asfáltica tiende a acomodarse, sin presentar grietas. La flexibilidad de una mezcla asfáltica está relacionada con los requisitos de estabilidad; por tanto, una mezcla de granulometría abierta con alto contenido de asfalto, es por

lo general, más flexible que una mezcla con granulometría densa y bajo contenido de asfalto.

2.4.5.4. Impermeabilidad

Es la capacidad que posee un pavimento a la resistencia del paso de aire y agua hacia su interior. Las causas de la permeabilidad se deben a:

- Bajo contenido de asfalto (envejecimiento prematuro, desintegración).
- Alto contenido de vacíos en el diseño de mezcla (oxidación, desintegración).
- Compactación inadecuada (alto contenido de vacíos, baja estabilidad).

Para que la mezcla asfáltica compactada brinde adecuadamente esta propiedad, la cantidad de vacíos en el agregado mineral, indicada en la tabla V, debe relacionarse con el tamaño máximo nominal del agregado, 19 mm (para este trabajo de investigación).

2.4.5.5. Resistencia al deslizamiento

Cuando la superficie de rodadura se encuentra en estado de saturación o mojada, las ruedas de los vehículos tienden a deslizarse; es entonces, que el pavimento inicia su función para el que ha sido diseñado (con superficie áspera y rugosa). Tiene como objetivo minimizar el deslizamiento de los neumáticos, manteniendo contacto con las partículas de agregado, evitando que rueden sobre la película de agua formada en la superficie de la mezcla asfáltica.

2.4.5.6. Resistencia a la fatiga

Los elementos que intervienen en la resistencia a la flexión son los vacíos, contenido de asfalto y su respectiva viscosidad. La mezcla asfáltica deber ser diseñada con el tipo de servicio que va a prestar, capacidad soporte de la subrasante, su resistencia y espesor.

Cuando se obtiene una resistencia baja a la fatiga, posiblemente sea causa del envejecimiento y endurecimiento de la mezcla asfáltica en la carpeta de rodadura. Las posibles causas y efectos que enmarcan baja resistencia a la fatiga en el pavimento se pueden enlistar de la siguiente manera:

- Mala compactación
- Espesor inadecuado
- Presencia de asentamientos
- Exceso de circulación vehicular
- Demasiada flexión
- Diseño de mezcla asfáltica con granulometría abierta
- Desintegración superficial de la carpeta asfáltica
- Pérdida de ligante bituminoso
- Falta de la consideración del clima

En la figura 11 se puede observar los daños ocasionados a la carpeta de mezcla asfáltica, debido a la mala resistencia a la fatiga.

Figura 11. **Daños visibles debido a la mala resistencia a la fatiga**



Fuente: elaboración propia, tomada en calzada Raúl Aguilar Batres, zona 12, ciudad, Guatemala.

2.4.5.7. Trabajabilidad

Las mezclas asfálticas que facilitan su colocación y compactación, son las que poseen una trabajabilidad adecuada a las circunstancias y necesidades que se presentan en dicho proceso. Las causas de la mala trabajabilidad son:

- Mala graduación en el contenido del asfalto
- Alto porcentaje de agregado grueso
- Segregación durante el manejo
- Difícil de compactar
- Temperatura demasiado baja
- Alto contenido de vacíos
- Alto contenido de relleno mineral

- Partículas con caras fracturadas y angulares
- Poca humedad en la mezcla
- Viscosidad del asfalto

2.5. Método de diseño Marshall

En 1943, este ensayo surge de una investigación por el Cuerpo de Ingenieros del ejército de los Estados Unidos. Esta entidad decide adoptar el método, debido a que en gran parte el equipo utilizado se considera de fácil manejo, portátil y rápido manejo en obra. Para la evaluación del comportamiento de las mezclas asfálticas, se practicaron varias pruebas variando su composición para establecer la energía de compactación necesaria en la fabricación de las probetas con densidad similar a las obtenidas en obra.

2.5.1. Metodología

La metodología aplicada al ensayo Marshall, se basa en tres procedimientos: determinación del peso específico total, medición de la estabilidad y, por último, el análisis de la densidad y el contenido de vacíos en las probetas. El procedimiento completo y detallado que debe seguirse para desarrollar el Diseño Marshall de mezclas se encuentra en las Normas AASHTO T 245 Y ASTM D 1559.

2.5.2. Propósito de la metodología

Debido a que este método se enfoca principalmente en el diseño en laboratorio, también se puede aplicar para el control de campo. Es necesario comprender que este ensayo es uno de los más utilizados en la dosificación de

mezclas asfálticas, incluyendo su control en planta mediante la verificación de parámetros de diseño de las muestras tomadas.

Para obtener el comportamiento y propiedades de la mezcla asfáltica en caliente, densidades, porcentaje de vacíos y una combinación específica del agregado, es importante determinar el contenido óptimo del asfalto.

2.5.3. Descripción de la metodología

Una vez seleccionado el tamaño máximo del agregado, la clasificación de la viscosidad del cemento asfáltico, cantidad de bitumen, se prepara un procedimiento específico para calentar, mezclar y compactar la mezcla.

Las Normas AASHTO T 245 y ASTM D 1559 indican que las muestras de prueba deben ser sometidas a ensayos en probetas, con un espesor de 64 mm y diámetro de 103 mm. Los parámetros de análisis que influyen en diseño son: tamaño máximo nominal del agregado, límites superior e inferior para la curva granulométrica, densidad – vacíos y estabilidad – flujo.

2.5.4. Especificaciones de la metodología

La mezcla de material pétreo y bitumen, debe cumplir con la tabla VI.

Tabla VI. **Requisitos para la mezcla de concreto asfáltico**

METODO DE DISEÑO ¹⁾	VALORES LIMITES	
	MINIMO	MAXIMO
1) <u>MARSHALL</u> (AASHTO T 245)		
• Temperatura de compactación de pastilla para producir una viscosidad de	0.25 Pa-s (250 cS)	0.31 Pa-s (310 cS)
• Número de golpes de compactación en cada extremo del espécimen ⁽²⁾	75	75
• Estabilidad	5,338 N (1,200 libras)	
• Fluencia en 0.25 mm (0.01 pulg.)		
• Tránsito < 10 ⁶ ESAL	8	16
• Tránsito > 10 ⁶ ESAL	8	14
• Relación Estabilidad/Fluencia (lb./0.01 pulg.)	120	275
• Porcentaje de vacíos de la mezcla compactada ⁽³⁾	3	5
• Porcentaje de vacíos en agregado mineral (VAM)	Tabla 401-13	
• Porcentaje de vacíos rellenos con asfalto		
• Tránsito < 10 ⁶ ESAL	65	78
• Tránsito > 10 ⁶ ESAL	65	75
• Relación finos/bitumen ⁽⁴⁾	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: Dirección General de Caminos. *Especificaciones Generales para Construcción de Carreteras y Puentes*. p. 401-7.

2.5.5. Evaluación en el diseño de mezcla asfáltica

Una vez determinado el diseño de mezcla, se toma una muestra de ella y esta sirve de guía, entre los límites, para la evaluación de las pruebas siguientes. Dichas pruebas sirven para determinar las tolerancias en la fórmula de trabajo. La tabla VII indica que la mezcla suministrada debe cumplir con los requisitos, dentro de las tolerancias.

Tabla VII. **Tolerancias en la fórmula de trabajo**

Requisitos de la Fórmula de Trabajo	Tolerancia en más o en menos
▪ Agregado retenido en Tamiz N°4 (4.750 mm)	➤ 4 % en peso del material pétreo
▪ Agregado retenido en Tamiz N°8 (2.360 mm)	➤ 3 % en peso del material pétreo
▪ Agregado retenido en Tamiz N°30 (0.600 mm)	➤ 2 % en peso del material pétreo
▪ Agregado que pasa el Tamiz N°200 (0.075 mm)	➤ 1 % en peso del material pétreo
▪ Contenido de cemento asfáltico	➤ 0.3 % en peso de la mezcla total
▪ Temperatura para mezclar, tender y compactar	➤ 5° Centígrados

Fuente: Dirección General de Caminos. *Especificaciones Generales para Construcción de Carreteras y Puentes*. p. 401-18.

2.5.6. Ajustes al diseño de mezcla asfáltica

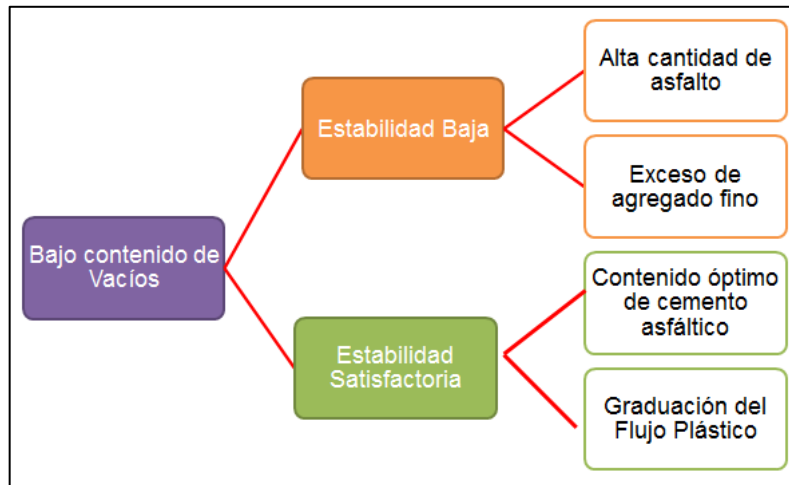
Realizados mediante los límites establecidos en la curva granulométrica. Para este trabajo de investigación aplica únicamente para agregado grueso.

Parte de la evaluación al diseño de mezcla asfáltica en caliente, implica:

- Bajo contenido de vacíos
- Alto contenido de vacíos
- Satisfactorio contenido de vacío

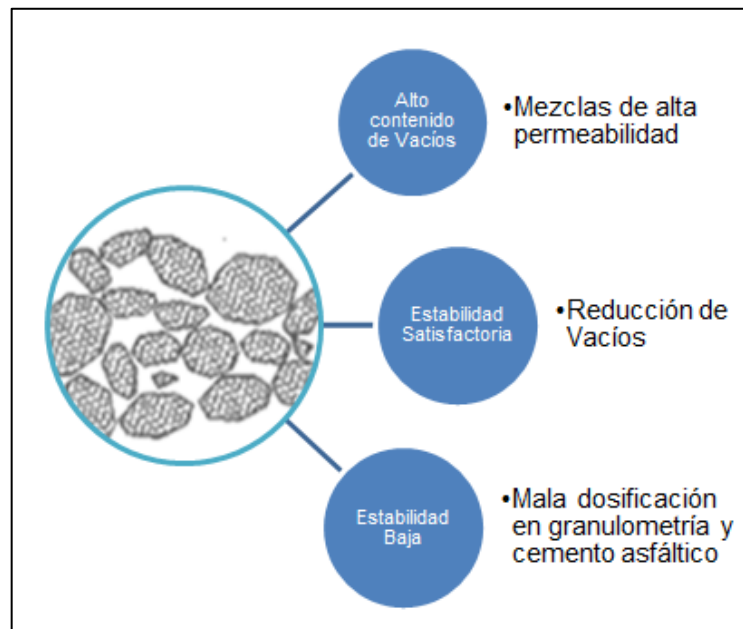
A continuación se presentan figuras del contenido de vacíos y los factores que intervienen en sus resultados.

Figura 12. **Bajo contenido de vacíos**



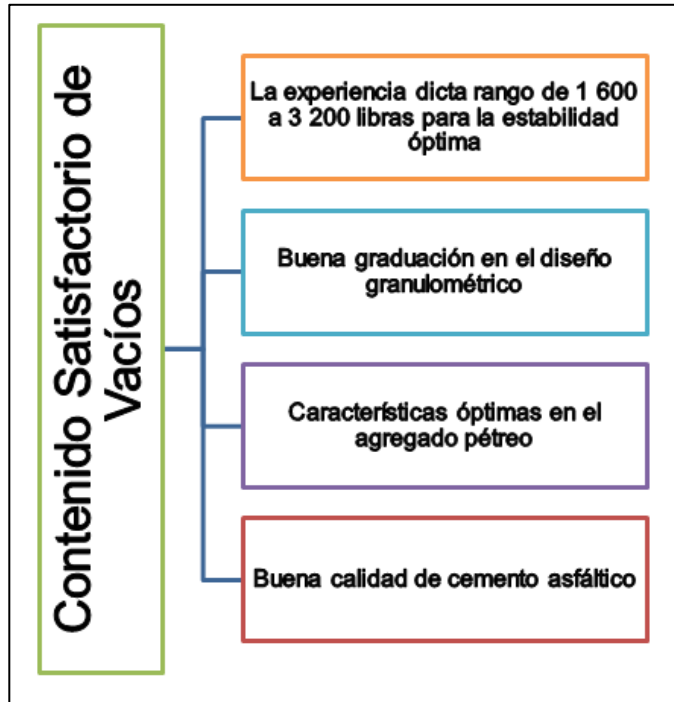
Fuente: elaboración propia.

Figura 13. **Alto contenido de vacíos**



Fuente: elaboración propia.

Figura 14. **Contenido satisfactorio de vacíos**



Fuente: elaboración propia.

2.6. Procedimiento de ensayos Marshall

El procedimiento lo determina la Norma ASTM D 1559. En ella se detalla el proceso que se debe emplear para la determinación de la resistencia a la deformación plástica del espécimen cilíndrico de la mezcla asfáltica en caliente.

Los ensayos de prueba son los siguientes: Gravedad Específica Bruta y Teórica, Porcentaje de Vacíos–Densidad y Estabilidad–Flujo; este último está ligado directamente con la carga a la cual es sometida la probeta, al alcanzar la falla y deformación.

2.6.1. Gravedad Específica Bruta (ASTM D 2726 y ASTM D 1188)

Conocida como Gravedad Específica *Bulk*, (*Gmb*). Es la relación existente entre la masa de volumen de un material y la masa de volumen igual de agua destilada, a la misma temperatura. Este ensayo representa la gravedad que debe poseer la mezcla colocada en campo.

Su cálculo corresponde a la relación entre el peso de la muestra seca al aire y la diferencia entre los pesos de la muestra saturada en agua y sumergida en el agua a temperatura ambiente.

2.6.2. Gravedad Específica Teórica Máxima (ASTM D 2041)

Rice, Gmm. Este ensayo tiene como objetivo determinar el porcentaje de vacíos de aire presente en la mezcla. Su variación se debe a la composición de la mezcla, cantidad de agregados y material asfáltico.

2.6.3. Porcentaje de Vacíos-Densidad (ASTM D 2041)

El valor obtenido de los vacíos y la densidad en términos de porcentaje, representa los espacios de aire entre las partículas del agregado en la mezcla compactada. El análisis de esta relación, garantiza que los rangos de la mezcla asfáltica cumplan con las proporciones volumétricas de los materiales, asegurando una mezcla de buena calidad.

El porcentaje de la cantidad de vacíos y la densidad, se relaciona con la Gravedad Específica *Bulk* y Gravedad Específica Teórica Máxima *Rice*.

2.6.4. Prueba de Estabilidad-Flujo (ASTM D 1559 y ASSHTO T 245)

Los especímenes se preparan mediante un procedimiento que calienta, combina y compacta la mezcla de agregados, cemento asfáltico y polvo mineral. Se realiza para medir la resistencia a la deformación plástica de la mezcla compactada.

2.6.5. Valor de Estabilidad

El aparato para este ensayo, cuenta con un cabezal superior y uno inferior, estos se acercan y la carga que se aplica lentamente sobre la probeta, aumenta; y al mismo tiempo aumenta la lectura del indicador de carga. La aplicación de la carga se puede suspender una vez haya sido tomada la lectura de la misma. Esta medida indica la carga bajo la cual la probeta cede o falla.

2.6.6. Valor de Fluencia

Representa la deformación de la muestra compactada, se expresa en centésimas de pulgada, 0,01". Es decir, la fluencia es la deformación indicada por la disminución del diámetro vertical de la probeta.

Los valores obtenidos, altos, son considerados como una mezcla demasiado plástica; los bajos, se consideran demasiado frágiles y rígidos de un pavimento.

Figura 15. **Estabilidad y Fluencia en probeta elaborada con mezcla asfáltica en caliente**



Fuente: elaboración propia, tomada en el Laboratorio de Asfaltos –CII-USAC.

2.7. **Procedimiento de diseño de mezclas asfálticas en caliente**

En la Norma ASTM D 3515 se presentan los valores máximos y mínimos para la gráfica de la curva granulométrica de los agregados de la mezcla.

Inicialmente, se define el tamaño máximo del agregado a utilizar. Seguido, se utiliza la tabla II para conocer los rangos de los porcentajes en masa que pasa la serie de tamices. Para el caso en estudio, del presente trabajo de investigación, se ha elegido una mezcla asfáltica tipo D; es decir, el tamaño máximo del agregado es de $\frac{3}{4}$ ".

2.7.1. Granulometría y dosificación de agregados (ASTM C 136 y AASHTO T 27)

De acuerdo a la experiencia y criterio del diseñador, se eligen los valores de porcentaje que pasan para cada tamiz; para que de tal manera, se construya la curva granulométrica del diseño de mezcla deseado.

El porcentaje de masa retenido en cada tamiz, es utilizado para conocer la cantidad de peso que representa cada tamaño de agregado en la mezcla total de los agregados, es decir, 1 200 g.

Este trabajo de investigación, como su título lo indica, se refiere al *Diseño de una mezcla asfáltica por el método Marshall, efectuando variaciones del tamaño máximo nominal para una granulometría controlada.*

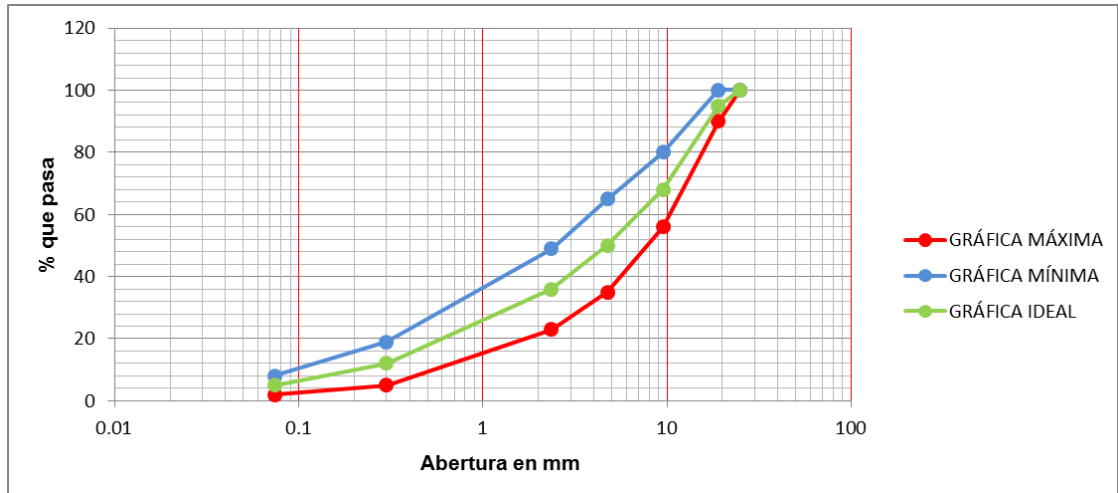
La tabla VIII, presenta los valores propuestos de porcentaje en masa que pasa cada tamiz; de la misma manera, el porcentaje de masa retenido para el diseño de Granulometría Ideal.

Tabla VIII. **Diseño núm. 1: Granulometría Ideal en MAC**

PULGADAS	ABERTURA EN mm	% PASA	% RETENIDO	GRAMOS
1 "	25,00	100	0	0
3/4 "	19,00	95	5	60,00
3/8 "	9,50	68	27	324,00
Núm. 4	4,75	50	18	216,00
Núm. 8	2,36	36	14	168,00
Núm. 50	0,30	12	24	288,00
Núm. 200	0,074	5	7	84,00
FONDO	---	0	5	60,00
SUMA TOTAL			100	1 200,00

Fuente: elaboración propia.

Figura 16. **Curva de Granulometría Ideal en el diseño de MAC**



Fuente: elaboración propia, empleando Excel 2010.

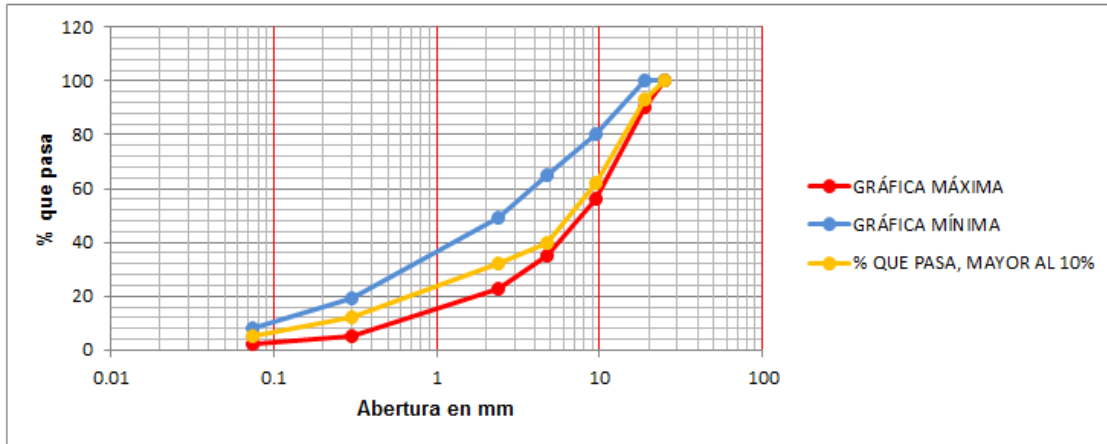
La tabla IX presenta los valores propuestos de porcentaje en masa que pasa cada tamiz; de la misma manera el porcentaje de masa retenido para el diseño de Granulometría Máxima.

Tabla IX. **Diseño núm. 2: Granulometría Máxima en MAC**

PULGADAS	ABERTURA EN mm	% PASA	% RETENIDO	GRAMOS
1 "	25,00	100	0	0
3/4 "	19,00	93	7	84,00
3/8 "	9,50	62	31	372,00
Núm. 4	4,75	40	22	264,00
Núm. 8	2,36	32	8	96,00
Núm. 50	0,3	12	20	240,00
Núm. 200	0,074	5	7	84,00
FONDO	---	0	5	60,00
SUMA TOTAL			100	1 200,00

Fuente: elaboración propia.

Figura 17. **Curva de Granulometría Máxima en el diseño de MAC**



Fuente: elaboración propia, empleando Excel 2010.

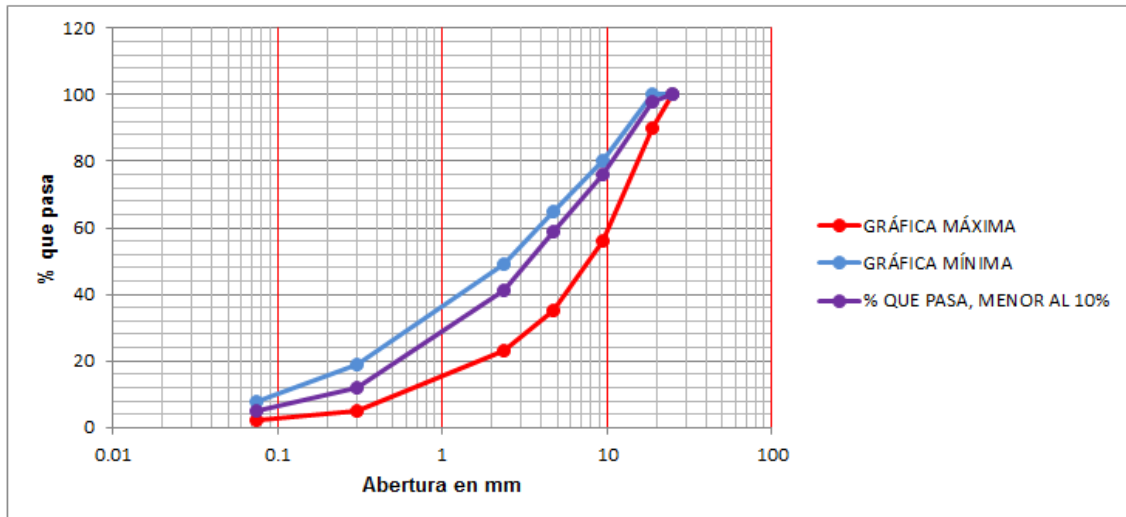
La tabla X presenta los valores propuestos de porcentaje en masa que pasa cada tamiz; de la misma manera, el porcentaje de masa retenido para el diseño de Granulometría Mínima.

Tabla X. **Diseño núm. 3: Granulometría Mínima en MAC**

PULGADAS	ABERTURA EN mm	% PASA	% RETENIDO	GRAMOS
1 "	25,00	100	0	0
3/4 "	19,00	98	2	24,00
3/8 "	9,50	76	22	264,00
Núm. 4	4,75	59	17	204,00
Núm. 8	2,36	41	18	216,00
Núm. 50	0,30	12	29	348,00
Núm. 200	0,074	5	7	84,00
FONDO	---	0	5	60,00
SUMA TOTAL			100	1 200,00

Fuente: elaboración propia.

Figura 18. **Curva de Granulometría Mínima en el diseño de MAC**



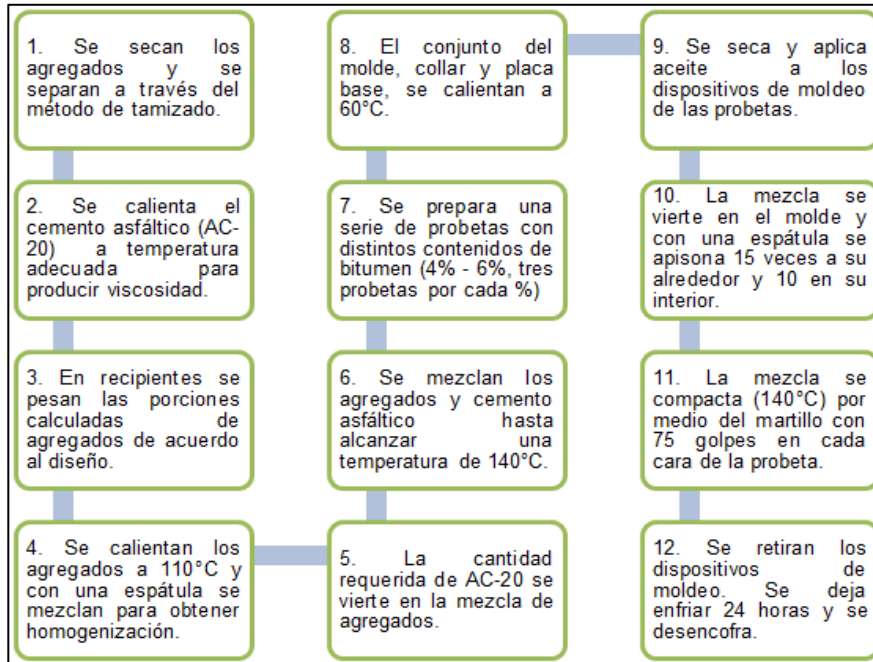
Fuente: elaboración propia, empleando Excel 2010.

2.7.2. **Preparación de probetas de mezclas asfálticas en caliente (AASHTO T 245 y ASTM D 1559)**

2.7.2.1. **Metodología en preparación de probetas**

Especifica los dispositivos y herramientas empleadas para la realización de las probetas, son: horno, placa de calefacción, termómetros (agregados y asfalto), balanza digital, juego de tamices, recipiente para mezclar, espátulas, molde cilíndrico con collar de extensión y placa de base plana para moldear probetas; martillo de compactación de operación manual: dispositivo de acero y pisón deslizante de 4,54 kg de masa total, $457,2 \pm 1,5$ mm; pedestal de compactación: pieza prismática de madera de 203,2 mm de lado y 457,2 mm de altura; platina cuadrada de acero de 304,8 mm de cada lado y 25,4 mm de espesor, dispositivo de resorte de tensión.

Tabla XI. Procedimiento en preparación de probetas



Fuente: elaboración propia.

2.7.2.2. Gravedad Específica *Bulk* de la mezcla asfáltica

A continuación, se presenta la metodología y se describe de manera concreta el procedimiento para determinar los valores de la Gravedad Específica *Bulk*.

2.7.2.2.1. Metodología

Las Normas utilizadas en este ensayo son: ASTM D 2726 y AASHTO T 166.

Tabla XII. **Procedimiento para determinar los valores de la Gravedad Específica *Bulk***

<p>1. Se determina la masa del espécimen seco.</p> <ul style="list-style-type: none">• Pesándolo después de haber permanecido al menos una hora a temperatura ambiente.
<p>2. Se sumerge la muestra.</p> <ul style="list-style-type: none">• En un recipiente de agua a temperatura ambiente durante cinco minutos.
<p>3. Se seca superficial la muestra y se pesa.</p> <ul style="list-style-type: none">• Se obtiene peso saturado.
<p>4. Se sumerge la muestra y se deja suspendida.</p> <ul style="list-style-type: none">• El agua debe estar a temperatura ambiente.
<p>5. Se calcula la gravedad específica de la muestra.</p> <ul style="list-style-type: none">• $G_{mb} = A / (B - C)$ donde, G_{mb}= gravedad específica <i>bulk</i> A= masa del espécimen (g) B= masa del espécimen saturado (g) C= masa del espécimen sumergido (g)

Fuente: elaboración propia.

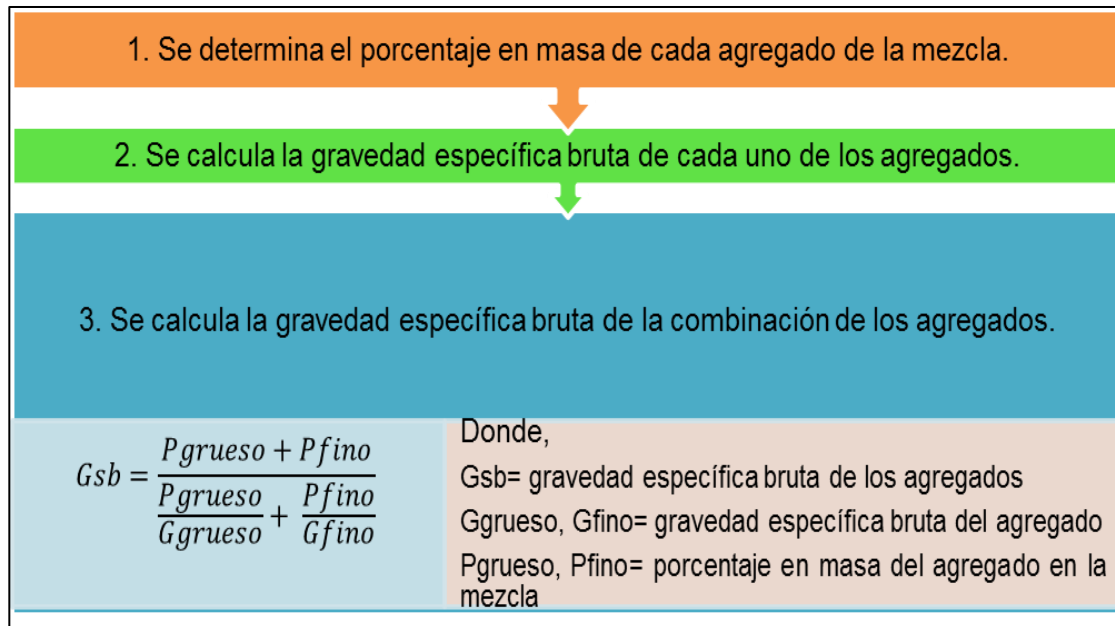
2.7.2.3. Gravedad Específica Bruta de los agregados

A continuación, se presenta la metodología y se describe el procedimiento para determinar la Gravedad Específica de la combinación de los agregados.

2.7.2.3.1. Metodología

La Norma que se utiliza para el ensayo de gravedad específica bruta de los agregados en mezclas bituminosas es la ASTM D 1559.

Tabla XIII. **Procedimiento para determinar la Gravedad Específica Bruta de los agregados**



Fuente: elaboración propia.

2.7.2.4. **Gravedad Específica Teórica Máxima Rice de la mezcla asfáltica**

A continuación, se presenta la metodología y se describe el procedimiento para la determinación de este tipo de gravedad.

2.7.2.4.1. **Metodología**

Las Normas utilizadas para la determinación de la Gravedad específica Teórica Máxima son ASTM D 2041 y AASHTO T 209.

Tabla XIV. **Procedimiento para la determinación de Gravedad Específica Teórica Máxima Rice**

1. Se seca la muestra. Se deja entibiar.
2. La probeta se desintegra con las manos. Se vierte lo obtenido en el picnómetro.
3. Se agrega agua a temperatura ambiente. El espejo de agua superior de 1 pulgada por encima de la mezcla.
4. Se coloca el picnómetro con la muestra y agua sobre el agitador y se activa la bomba de vacíos.
5. Se libera gradualmente la presión de vacíos, una vez hayan transcurrido 15 minutos.
6. Se llena el picnómetro de agua (evitando vacíos). Se seca totalmente. Se pesa en balanza la masa del picnómetro + muestra + agua.
7. Se calcula su valor: $G_{mm} = \frac{A}{A+D-E}$ Donde, A= masa de la muestra seca (g) D= masa del picnómetro lleno de agua (g) E= masa del picnómetro + muestra + agua

Fuente: elaboración propia.

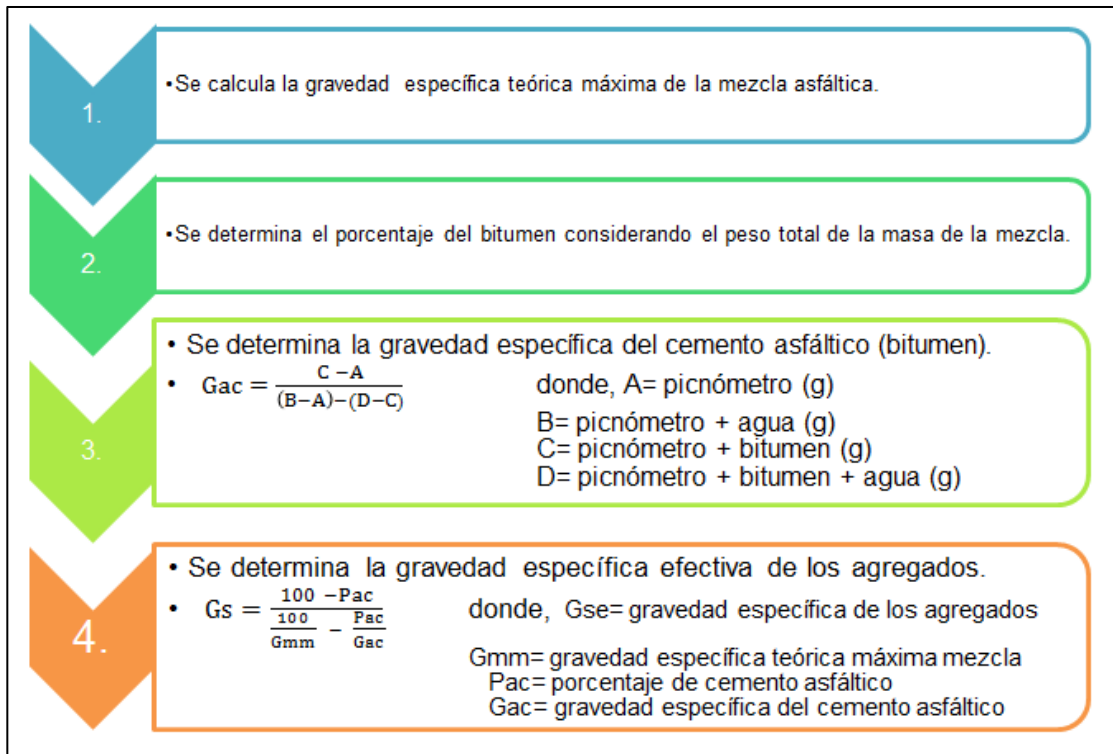
2.7.2.5. Gravedad Específica Efectiva de los agregados

A continuación, se presenta la metodología y se describe el procedimiento para determinar la Gravedad Específica Efectiva de los agregados.

2.7.2.5.1. Metodología

La Norma utilizada para la determinación de la gravedad específica efectiva de los agregados es ASTM D 1559.

Tabla XV. **Procedimiento para determinar la Gravedad Específica Efectiva de los agregados**



Fuente: elaboración propia.

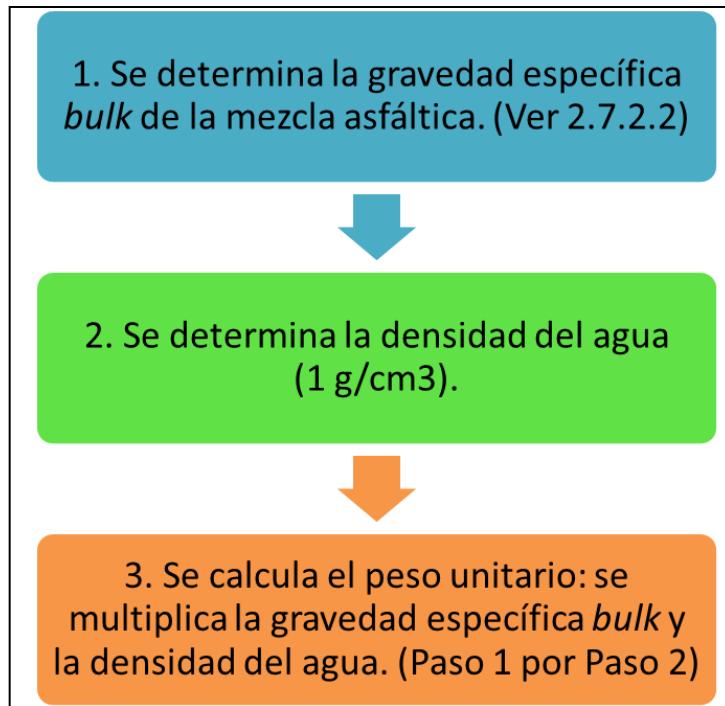
2.7.2.6. **Peso Unitario de la mezcla asfáltica**

A continuación, se presenta la metodología y se describe el procedimiento para determinar el Peso Unitario de los agregados mezclados.

2.7.2.6.1. **Metodología**

La Norma utilizada para la determinación del Peso Unitario de la mezcla asfáltica en caliente es ASTM D 1559.

Tabla XVI. **Procedimiento para determinar el Peso Unitario de la mezcla asfáltica**



Fuente: elaboración propia.

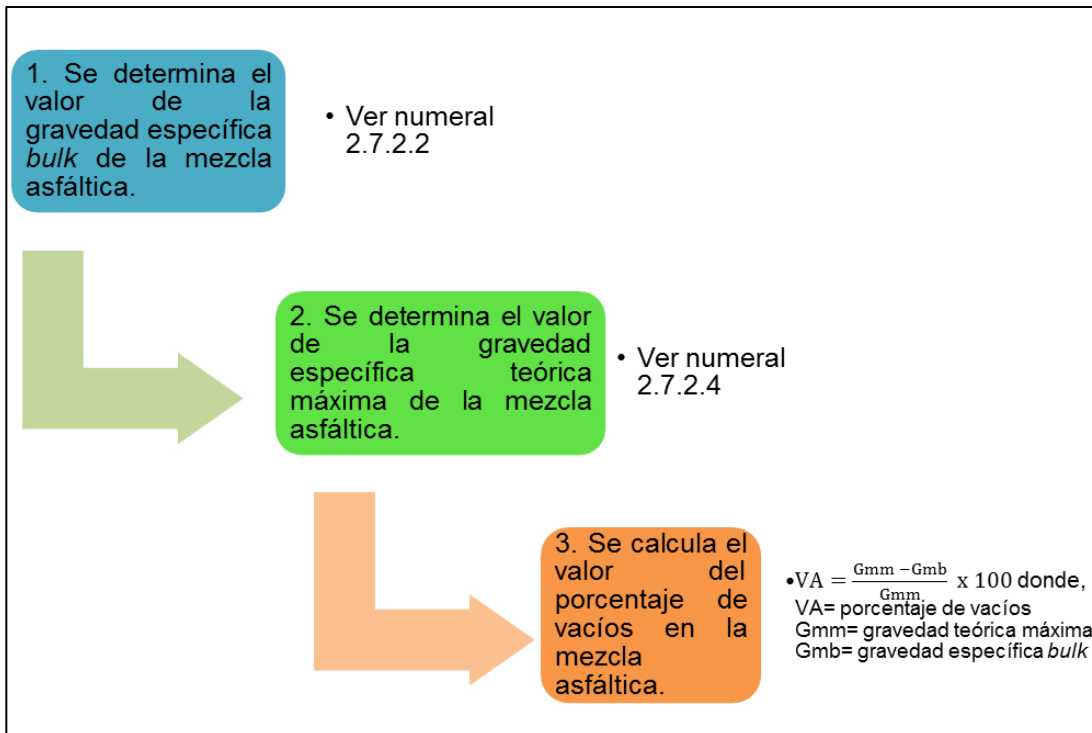
2.7.2.7. Porcentaje de Vacíos-Densidad de la mezcla asfáltica

A continuación se presenta la metodología y se describe el procedimiento para determinar el Porcentaje de Vacíos en la mezcla asfáltica compactada.

2.7.2.7.1. Metodología

Las Normas utilizadas son ASTM D 3203 y AASHTO T 269.

Tabla XVII. **Procedimiento para determinar el Porcentaje de Vacíos-Densidad de la mezcla asfáltica**



Fuente: elaboración propia.

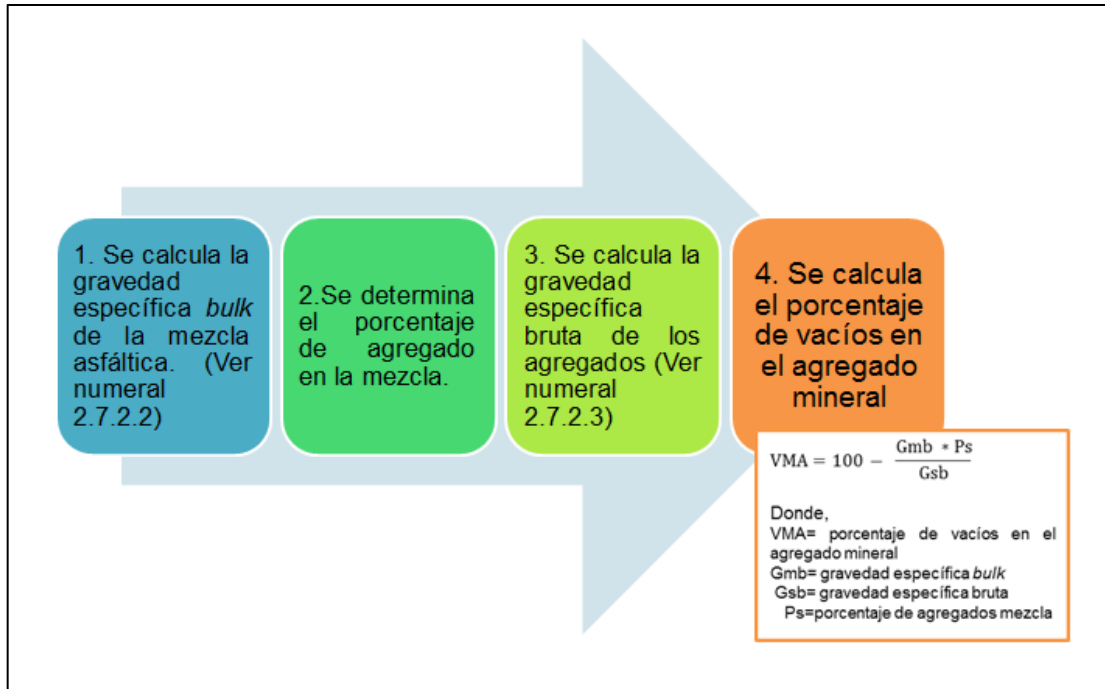
2.7.2.8. Porcentaje de Vacíos en el Agregado Mineral

A continuación, se presenta la metodología y se describe el procedimiento para determinar el Porcentaje de Vacíos en el Agregado Mineral.

2.7.2.8.1. Metodología

La Norma utilizada es ASTM D 1559.

Tabla XVIII. **Procedimiento para determinar el Porcentaje de Vacíos en el Agregado Mineral**



Fuente: elaboración propia.

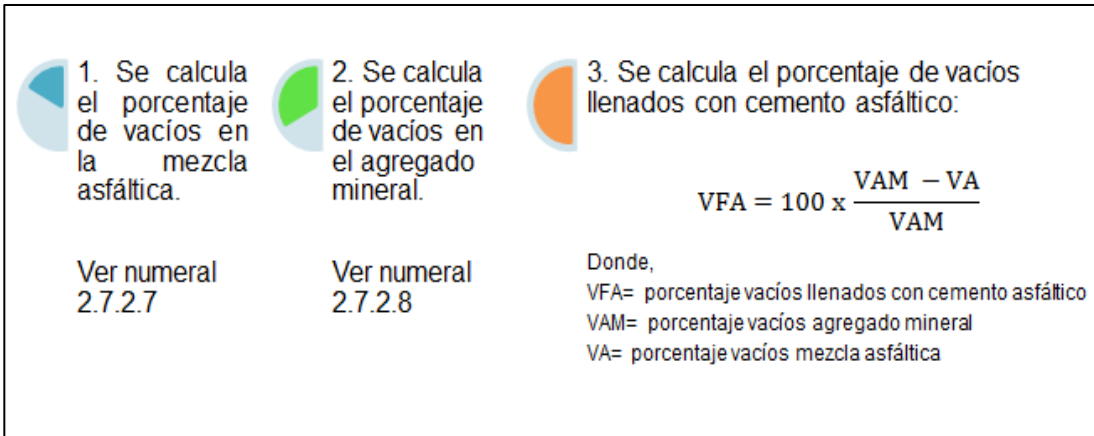
2.7.2.9. **Porcentaje de Vacíos Llenados con Cemento Asfáltico**

A continuación, se presenta la metodología y se describe el procedimiento para determinar el Porcentaje de Vacíos Llenados con Cemento Asfáltico.

2.7.2.9.1. **Metodología**

La Norma utilizada es ASTM D 1559.

Tabla XIX. **Procedimiento para determinar el Porcentaje de Vacíos Llenados con Cemento Asfáltico**



Fuente: elaboración propia.

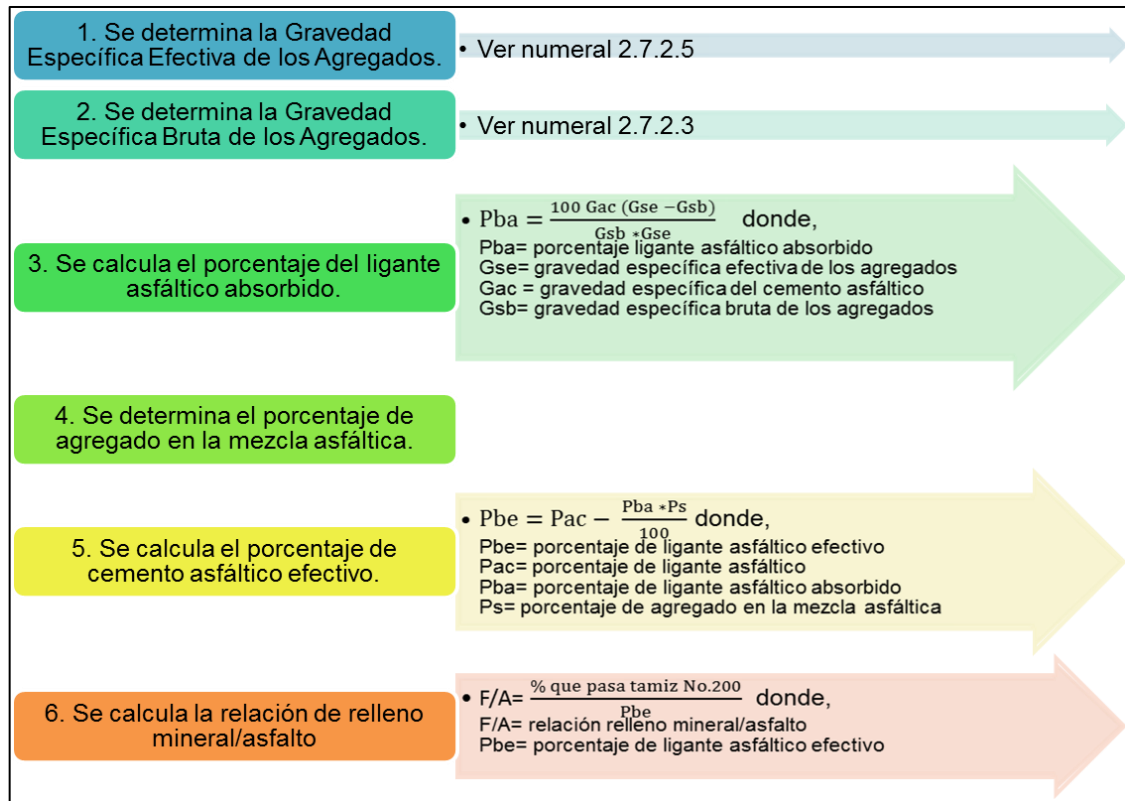
2.7.2.10. Relación de Relleno Mineral/Asfalto

A continuación, se presenta la metodología y se describe el procedimiento para determinar la Relación de Relleno Mineral/Asfalto.

2.7.2.10.1. Metodología

La Norma utilizada es ASTM D 1559.

Tabla XX. **Procedimiento para determinar la Relación de Relleno Mineral/Asfalto**



Fuente: elaboración propia.

2.7.2.11. Contenido de Humedad

A continuación, se presenta la metodología y se describe el procedimiento para determinar el Contenido de Humedad en la mezcla asfáltica compactada.

2.7.2.11.1. Metodología

La Norma utilizada es ASTM C 566 – 97.

Tabla XXI. Procedimiento para determinar el Contenido de Humedad

<p>1. Se determinan pesos a utilizar:</p> <ul style="list-style-type: none">• Los pesos utilizados son los indicados en la determinación de la gravedad específica <i>bulk</i>.	<p>2. Se calcula el valor del contenido de humedad:</p> <ul style="list-style-type: none">• $\%H = \frac{B - A}{B - C} \times 100$ donde, %H= porcentaje de humedad contenida A= masa seca del espécimen (g) B= masa del espécimen saturado (g) C= masa del espécimen sumergido (g)
------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Fuente: elaboración propia.

2.7.3. Prueba de Estabilidad-Flujo Marshall

A continuación, se presenta la metodología y se describe el procedimiento para realizar el ensayo de Estabilidad-Flujo en la mezcla asfáltica compactada.

2.7.3.1. Metodología

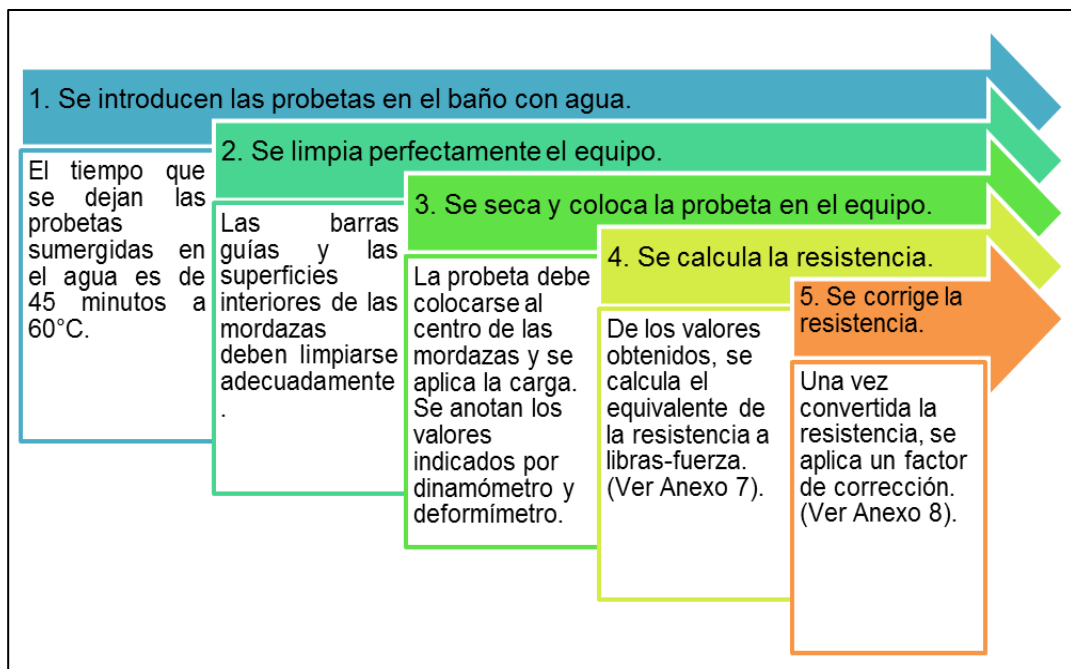
Las Normas que estandarizan y rigen este ensayo son: ASTM D 1559 y AASHTO T 245.

2.7.3.2. Equipo

- Mordazas de hierro fundido.
- Máquina de compresión para la rotura de las probetas.
- Anillo dinamométrico.

- Deformímetro de lectura final fija.
- Recipiente metálico capaz de retener las probetas sobre una película delgada de agua. Temperatura en todo el recipiente.

Tabla XXII. **Procedimiento para realizar el ensayo de Estabilidad-Flujo Marshall**



Fuente: elaboración propia.

3. DESARROLLO EXPERIMENTAL

3.1. Trabajo de Laboratorio para el Diseño de Mezcla Asfáltica

Los datos utilizados y los respectivos cálculos de cada ensayo descrito, se presentan a continuación.

3.1.1. Gravedad Específica *Bulk*

A continuación se analiza y determina el cálculo de Gravedad Específica *Bulk*, G_{mb} . Se hace la observación que todos los pesos tienen como unidad de medida, el gramo.

Muestra:

Datos

Peso seco= 1 236,76

Peso seco saturado= 1 245,10

Peso sumergido= 724,80

- Primera iteración

$$G_{mb} = \frac{1\,236,76}{1\,245,10 - 724,80} = 2,38$$

- Segunda iteración

$$Gmb = \frac{1\ 233,94}{1\ 243,42 - 708,03} = 2,30$$

- Tercera iteración

$$Gmb = \frac{1\ 238,50}{1\ 246,01 - 706,10} = 2,29$$

3.1.1.1. Resultados

Los resultados obtenidos en la realización del ensayo de Gravedad Específica *Bulk* para una Granulometría Ideal son los siguientes:

Tabla XXIII. **Resultados de Gravedad Específica *Bulk*, Granulometría Ideal**

PROBETA	% BITUMEN	PESO SECO	PESO SECO SATURADO	PESO SUMERGIDO	Gmb	PROMEDIO Gmb
1	3,50	1 236,76	1 245,10	724,80	2,38	2,30
2		1 233,94	1 243,42	708,03	2,30	
3		1 238,50	1 246,01	706,10	2,29	
4	4,00	1 246,68	1 258,42	728,04	2,35	2,38
5		1 244,16	1 251,80	729,67	2,38	
6		1 236,14	1 245,22	724,53	2,37	
7	4,50	1 244,30	1 249,54	732,43	2,41	2,40
8		1 255,74	1 262,25	733,30	2,37	
9		1 229,75	1 236,33	724,45	2,40	
10	5,00	1 260,35	1 263,30	730,30	2,36	2,43
11		1 245,60	1 248,45	736,66	2,43	
12		1 227,16	1 230,51	725,10	2,43	
13	5,50	1 253,72	1 255,90	740,10	2,43	2,43
14		1 256,86	1 258,90	743,36	2,44	
15		1 252,51	1 255,15	738,35	2,42	

Fuente: elaboración propia.

Los resultados obtenidos en la realización del ensayo Gravedad Específica *Bulk* para una Granulometría Máxima son los siguientes:

Tabla XXIV. **Resultados de Gravedad Específica *Bulk*, Granulometría Máxima**

PROBETA	% BITUMEN	PESO SECO	PESO SECO SATURADO	PESO SUMERGIDO	Gmb	PROMEDIO Gmb
1	3,50	1 227,15	1 239,57	721,57	2,37	2,36
2		1 230,40	1 241,15	720,11	2,36	
3		1 225,60	1 234,81	717,36	2,37	
4	4,00	1 225,86	1 237,60	722,60	2,38	2,38
5		1 233,76	1 242,05	725,60	2,39	
6		1 234,63	1 245,22	725,71	2,38	
7	4,50	1 242,15	1 252,12	745,09	2,45	2,44
8		1 242,54	1 253,87	747,35	2,45	
9		1 241,56	1 253,22	742,36	2,43	
10	5,00	1 246,93	1 256,13	744,55	2,44	2,44
11		1 241,30	1 251,30	751,56	2,48	
12		1 240,73	1 249,30	742,71	2,45	
13	5,50	1 243,29	1 248,01	745,59	2,47	2,46
14		1 242,35	1 245,40	738,60	2,45	
15		1 242,97	1 246,36	740,92	2,46	

Fuente: elaboración propia.

Los resultados obtenidos en la realización del ensayo, Gravedad Específica *Bulk* para una Granulometría Mínima son los siguientes:

Tabla XXV. **Resultados de Gravedad Específica *Bulk*, Granulometría Mínima**

PROBETA	% BITUMEN	PESO SECO	PESO SECO SATURADO	PESO SUMERGIDO	GMB	PROMEDIO GMB
1	4,00	1 248,83	1 256,93	722,60	2,34	2,34
2		1 235,94	1 246,88	719,73	2,34	
3		1 231,33	1 238,41	710,10	2,33	

Continuación de la tabla XXV.

4	4,50	1 241,25	1 250,10	724,35	2,36	2,35
5		1 246,23	1 253,70	726,14	2,36	
6		1 243,40	1 252,98	720,51	2,34	
7	5,00	1 250,74	1 255,59	736,94	2,41	2,41
8		1 255,71	1 259,50	736,32	2,40	
9		1 252,34	1 256,10	729,60	2,38	
10	5,50	1 256,96	1 259,10	734,95	2,40	2,40
11		1 242,66	1 245,85	727,63	2,40	
12		1 246,24	1 250,24	730,56	2,40	
13	6,00	1 260,76	1 263,37	742,51	2,42	2,38
14		1 250,60	1 263,29	738,80	2,38	
15		1 258,75	1 263,17	732,52	2,37	

Fuente: elaboración propia.

3.1.2. Gravedad Específica Bruta de los agregados

A continuación, se analiza y determina el cálculo de Gravedad Específica Bruta de la combinación de agregados, Gsb.

Muestra:

Datos

Pgrueso = 43,00 %

Pfino= 57,00 %

Ggrueso= 2,62

Gfino= 2,59

- Única iteración

$$Gsb = \frac{43,00 + 57,00}{\frac{43,00}{2,62} + \frac{57,00}{2,59}} = 2,60$$

3.1.2.1. Resultados

Los resultados del ensayo de Gravedad Específica Bruta de los agregados se presentan a continuación:

Tabla XXVI. **Resultados de Gravedad Específica Bruta de los agregados**

Tipo de mezcla	% Pgrueso	% Pfino	Ggrueso	Gfino	Gsb
Tradicional	43,00	57,00	2,62	2,59	2,60

Fuente: elaboración propia.

3.1.3. Gravedad Específica Teórica Máxima *Rice*

A continuación, se analiza y determina el cálculo de Gravedad Específica Teórica Máxima de la mezcla, Gmm. Se hace la observación que todos los pesos tienen como unidad de medida, el gramo.

Muestra:

Datos

Peso de la muestra= 1 146,00 g

Peso del matraz + agua= 7 380,10 g

Peso del matraz + agua + muestra= 8 075,20 g

- Primera iteración

$$Gmm = \frac{1\ 146,00}{1\ 146,00 + 7\ 380,10 - 8\ 075,20} = 2,54$$

- Segunda iteración

$$G_{mm} = \frac{1\ 185,05}{1\ 185,05 + 7\ 380,10 - 8\ 090,20} = 2,50$$

- Tercera iteración

$$G_{mm} = \frac{1\ 223,00}{1\ 223,00 + 7\ 383,10 - 8\ 115,20} = 2,49$$

3.1.3.1. Resultados

Los resultados obtenidos en la realización del ensayo, Gravedad Específica Teórica Máxima para una Granulometría Ideal son los siguientes:

Tabla XXVII. **Resultados de Gravedad Específica Teórica Máxima *Rice*, Granulometría Ideal**

PROBETA	% BITUMEN	PESO MUESTRA	PESO MATRAZ + AGUA	PESO MATRAZ + AGUA + MUESTRA	Gmm
1	3,50	1 146,00	7 380,10	8 075,20	2,54
2	4,00	1 185,05	7 380,10	8 090,20	2,50
3	4,50	1 223,00	7 383,10	8 115,20	2,49
4	5,00	1 245,50	7 380,10	8 123,10	2,48
5	5,50	1 280,90	7 383,10	8 143,10	2,46

Fuente: elaboración propia.

Los resultados obtenidos en la realización del ensayo Gravedad Específica Teórica Máxima para una Granulometría Máxima son los siguientes:

Tabla XXVIII. **Resultados de Gravedad Específica Teórica Máxima Rice, Granulometría Máxima**

PROBETA	% BITUMEN	PESO MUESTRA	PESO MATRAZ + AGUA	PESO MATRAZ + AGUA + MUESTRA	Gmm
1	3,50	1 227,35	7 380,00	8 132,10	2,58
2	4,00	1 234,16	7 380,00	8 122,10	2,51
3	4,50	1 220,16	7 382,20	8 110,30	2,48
4	5,00	1 249,22	7 379,80	8 121,50	2,46
5	5,50	1 245,40	7 381,10	8 120,90	2,46

Fuente: elaboración propia.

Los resultados obtenidos en la realización del ensayo Gravedad Específica Teórica Máxima para una Granulometría Mínima son los siguientes:

Tabla XXIX. **Resultados de Gravedad Específica Teórica Máxima Rice, Granulometría Mínima**

PROBETA	% BITUMEN	PESO MUESTRA	PESO MATRAZ + AGUA	PESO MATRAZ + AGUA + MUESTRA	Gmm
1	4,00	1 217,61	7 379,10	8 114,90	2,53
2	4,50	1 232,60	7 381,30	8 117,90	2,49
3	5,00	1 211,37	7 380,90	8 101,90	2,47
4	5,50	1 238,30	7 386,80	8 114,60	2,43
5	6,00	1 266,70	7 378,30	8 118,50	2,41

Fuente: elaboración propia.

3.1.4. Gravedad Específica Efectiva de los agregados

A continuación, se analiza y determina el cálculo de Gravedad Específica Efectiva de los agregados, Gse.

Muestra:

Datos

Pac= 3,5 %

Gmm= 2,54

Gac= 1,05

- Primera iteración

$$Gse = \frac{100 - 3,5}{\frac{100}{2,54} - \frac{3,5}{1,05}} = 2,68$$

- Segunda iteración

$$Gse = \frac{100 - 4}{\frac{100}{2,50} - \frac{4}{1,05}} = 2,65$$

- Tercera iteración

$$Gse = \frac{100 - 4,5}{\frac{100}{2,49} - \frac{4,5}{1,05}} = 2,66$$

3.1.4.1. Resultados

Los resultados obtenidos en la realización del ensayo, Gravedad Específica Efectiva de los agregados para una Granulometría Ideal son los siguientes:

Tabla XXX. **Resultados de Gravedad Específica Efectiva de los agregados, Granulometría Ideal**

PROBETA	% BITUMEN	GRANULOMETRÍA IDEAL Gmm	Gac	Gse
1	3,50	2,54	1,05	2,68
2	4,00	2,50	1,05	2,65
3	4,50	2,49	1,05	2,66
4	5,00	2,48	1,05	2,67
5	5,50	2,46	1,05	2,67

Fuente: elaboración propia.

Los resultados obtenidos en la realización del ensayo, Gravedad Específica Efectiva de los agregados para una Granulometría Máxima son los siguientes:

Tabla XXXI. **Resultados de Gravedad Específica Efectiva de los agregados, Granulometría Máxima**

PROBETA	% BITUMEN	GRANULOMETRÍA MÁXIMA Gmm	Gac	Gse
1	3,50	2,58	1,05	2,72
2	4,00	2,51	1,05	2,66
3	4,50	2,48	1,05	2,65
4	5,00	2,46	1,05	2,65
5	5,50	2,46	1,05	2,67

Fuente: elaboración propia.

Los resultados obtenidos en la realización del ensayo Gravedad Específica Efectiva de los agregados para una Granulometría Mínima son los siguientes:

Tabla XXXII. **Resultados de Gravedad Específica Efectiva de los agregados, Granulometría Mínima**

PROBETA	% BITUMEN	GRANULOMETRÍA MÍNIMA Gmm	Gac	Gse
1	4,00	2,53	1,05	2,69
2	4,50	2,49	1,05	2,66
3	5,00	2,47	1,05	2,66
4	5,50	2,43	1,05	2,63
5	6,00	2,41	1,05	2,63

Fuente: elaboración propia.

3.1.5. **Peso Unitario de la mezcla asfáltica**

A continuación, se analiza y determina el cálculo del Peso Unitario de la mezcla asfáltica compactada, PU.

Muestra:

Datos

Gmb= 2,30

$\rho = 1,00 \text{ g/cm}^3$

- Primera iteración

$$PU = (2,30) \left(1,00 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \right) = 2,30 \text{ g/cm}^3$$

- Segunda iteración

$$PU = (2,38) \left(1,00 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \right) = 2,38 \text{ g/cm}^3$$

- Tercera iteración

$$PU = (2,40) \left(1,00 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \right) = 2,40 \text{ g/cm}^3$$

3.1.5.1. Resultados

Los resultados obtenidos en la realización del ensayo Peso Unitario de la mezcla asfáltica compactada para una Granulometría Ideal, Máxima y Mínima son los siguientes:

Tabla XXXIII. **Resultados de Peso Unitario, Granulometría Ideal**

PROBETA	% BITUMEN	Gmb PROMEDIO	ρ (1 g/cm ³)	PU (1 g/cm ³)
1	3,50	2,30	1,00	2,30
2				
3				
4	4,00	2,38	1,00	2,38
5				
6				
7	4,50	2,40	1,00	2,40
8				
9				
10	5,00	2,43	1,00	2,43
11				
12				
13	5,50	2,43	1,00	2,43
14				
15				

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXIV. **Resultados de Peso Unitario, Granulometría Máxima**

PROBETA	% BITUMEN	Gmb PROMEDIO	ρ (1 g/cm ³)	PU (1 g/cm ³)
1	3,50	2,36	1,00	2,36
2				
3				
4	4,00	2,38	1,00	2,38
5				
6				
7	4,50	2,44	1,00	2,44
8				
9				
10	5,00	2,44	1,00	2,44
11				
12				
13	5,50	2,46	1,00	2,46
14				
15				

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXV. **Resultados de Peso Unitario, Granulometría Mínima**

PROBETA	% BITUMEN	Gmb PROMEDIO	ρ (1 g/cm ³)	PU (1 g/cm ³)
1	4,00	2,34	1,00	2,34
2				
3				
4	4,50	2,35	1,00	2,35
5				
6				
7	5,00	2,41	1,00	2,41
8				
9				
10	5,50	2,40	1,00	2,40
11				
12				
13	6,00	2,38	1,00	2,38
14				
15				

Fuente: elaboración propia.

3.1.6. Porcentaje de Vacíos-Densidad

A continuación, se analiza y determina el cálculo del Porcentaje de Vacíos-Densidad de la mezcla asfáltica, %VA.

Muestra:

Datos

Gmb= 2,30

Gmm= 2,54

- Primera iteración

$$VA = \frac{2,54 - 2,30}{2,54} \times 100 = 9,45 \%$$

- Segunda iteración

$$VA = \frac{2,50 - 2,38}{2,50} \times 100 = 4,80 \%$$

- Tercera iteración

$$VA = \frac{2,49 - 2,40}{2,49} \times 100 = 3,61 \%$$

3.1.6.1. Resultados

Los resultados obtenidos en la realización del ensayo Porcentaje de Vacíos-Densidad de la mezcla asfáltica para una Granulometría Ideal son los siguientes:

Tabla XXXVI. **Resultados de Vacíos-Densidad, Granulometría Ideal**

PROBETA	% BITUMEN	Gmb	Gmm	%VA
1	3,50	2,30	2,54	9,45
2	4,00	2,38	2,50	4,80
3	4,50	2,40	2,49	3,61
4	5,00	2,43	2,48	2,02
5	5,50	2,43	2,46	1,22

Fuente: elaboración propia.

Los resultados obtenidos en la realización del ensayo Porcentaje de Vacíos-Densidad de la mezcla asfáltica para una Granulometría Máxima son los siguientes:

Tabla XXXVII. **Resultados de Vacíos-Densidad, Granulometría Máxima**

PROBETA	% BITUMEN	Gmb	Gmm	% VA
1	3,50	2,36	2,58	8,53
2	4,00	2,38	2,51	5,18
3	4,50	2,44	2,48	1,61
4	5,00	2,44	2,46	0,81
5	5,50	2,46	2,46	0,00

Fuente: elaboración propia.

Los resultados obtenidos en la realización del ensayo Porcentaje de Vacíos-Densidad de la mezcla asfáltica para una Granulometría Mínima son los siguientes:

Tabla XXXVIII. **Resultados de Vacíos-Densidad, Granulometría Mínima**

PROBETA	% BITUMEN	Gmb	Gmm	% VA
1	4,00	2,34	2,53	7,51
2	4,50	2,35	2,49	5,62
3	5,00	2,41	2,47	2,43
4	5,50	2,40	2,43	1,23
5	6,00	2,38	2,41	1,24

Fuente: elaboración propia.

3.1.7. Porcentaje de Vacíos en el Agregado Mineral

A continuación, se analiza y determina el cálculo del Porcentaje de Vacíos en el Agregado Mineral, %VAM.

Muestra:

Datos

Gmb= 2,30

Ps= 96,5 %

Gsb= 2,60

- Primera Iteración

$$VAM = 100 - \frac{2,30 * 96,5}{2,60} = 14,63 \%$$

- Segunda Iteración

$$\text{VAM} = 100 - \frac{2,38 * 96,0}{2,60} = 12,12 \%$$

- Tercera Iteración

$$\text{VAM} = 100 - \frac{2,40 * 95,5}{2,60} = 11,85 \%$$

3.1.7.1. Resultados

Los resultados obtenidos en la realización del ensayo, Porcentaje de Vacíos en el Agregado Mineral para una Granulometría Ideal son los siguientes:

Tabla XXXIX. **Resultados de Porcentaje de Vacíos en el Agregado Mineral, Granulometría Ideal**

PROBETA	% BITUMEN	Gmb	% Ps	Gsb	% VAM
1	3,50	2,30	96,50	2,60	14,63
2	4,00	2,38	96,00	2,60	12,12
3	4,50	2,40	95,50	2,60	11,85
4	5,00	2,43	95,00	2,60	11,21
5	5,50	2,43	94,50	2,60	11,68

Fuente: elaboración propia.

Los resultados obtenidos en la realización del ensayo, Porcentaje de Vacíos en el Agregado Mineral para una Granulometría Máxima son los siguientes:

Tabla XL. **Resultados de Porcentaje de Vacíos en el Agregado Mineral, Granulometría Máxima**

PROBETA	% BITUMEN	Gmb	% Ps	Gsb	% VAM
1	3,50	2,36	96,50	2,60	12,41
2	4,00	2,38	96,00	2,60	12,12
3	4,50	2,44	95,50	2,60	10,38
4	5,00	2,44	95,00	2,60	10,85
5	5,50	2,46	94,50	2,60	10,59

Fuente: elaboración propia.

Los resultados obtenidos en la realización del ensayo, Porcentaje de Vacíos en el Agregado Mineral para una Granulometría Mínima son los siguientes:

Tabla XLI. **Resultados de Porcentaje de Vacíos en el Agregado Mineral, Granulometría Mínima**

PROBETA	% BITUMEN	Gmb	% Ps	Gsb	% VAM
1	4,00	2,34	96,00	2,60	13,60
2	4,50	2,35	95,50	2,60	13,68
3	5,00	2,41	95,00	2,60	11,94
4	5,50	2,40	94,50	2,60	12,77
5	6,00	2,38	94,00	2,60	13,95

Fuente: elaboración propia.

3.1.8. Porcentaje de Vacíos Llenados con Cemento Asfáltico

A continuación, se analiza y determina el cálculo del Porcentaje de Vacíos Llenados con Cemento Asfáltico, %VFA.

Muestra:

Datos

VAM= 14,63 %

VA= 9,45 %

- Primera iteración

$$VFA = 100 \times \frac{14,63 - 9,45}{14,63} = 35,44 \%$$

- Segunda iteración

$$VFA = 100 \times \frac{12,12 - 4,80}{12,12} = 60,41 \%$$

- Tercera iteración

$$VFA = 100 \times \frac{11,85 - 3,61}{11,85} = 69,49 \%$$

3.1.8.1. Resultados

Los resultados obtenidos en la realización del ensayo, Porcentaje de Vacíos Llenados con Cemento Asfáltico para una Granulometría Ideal, Máxima y Mínima son los siguientes:

Tabla XLII. Resultados de Porcentaje de Vacíos Llenados con Cemento Asfáltico, Granulometría Ideal

PROBETA	% BITUMEN	% VAM	% VA	% VFA
1	3,50	14,63	9,45	35,44
2	4,00	12,12	4,80	60,41
3	4,50	11,85	3,61	69,49
4	5,00	11,21	2,02	82,02
5	5,50	11,68	1,22	89,56

Fuente: elaboración propia.

Tabla XLIII. Resultados de Porcentaje de Vacíos Llenados con Cemento Asfáltico, Granulometría Máxima

PROBETA	% BITUMEN	% VAM	% VA	% VFA
1	3,50	12,41	8,53	31,28
2	4,00	12,12	5,18	57,28
3	4,50	10,38	1,61	84,46
4	5,00	10,85	0,81	92,50
5	5,50	10,59	0,00	100,00

Fuente: elaboración propia.

Tabla XLIV. Resultados de Porcentaje de Vacíos Llenados con Cemento Asfáltico, Granulometría Mínima

PROBETA	% BITUMEN	% VAM	% VA	% VFA
1	4,00	13,60	7,51	44,78
2	4,50	13,68	5,62	58,91
3	5,00	11,94	2,43	79,66
4	5,50	12,77	1,23	90,33
5	6,00	13,95	1,24	91,08

Fuente: elaboración propia.

3.1.9. Relación Relleno Mineral/Asfalto

A continuación, se analiza y determina el cálculo de la Relación Relleno Mineral/Asfalto, F/A.

Muestra:

Datos

Gac=1,05

Gsb= 2,60

Gse= 2,68

Pac= 3,50 %

- Primera Iteración

$$Pba = \frac{100 * 1,05 (2,68 - 2,60)}{2,60 * 2,68} = 1,21 \%$$

- Segunda iteración

$$Pba = \frac{100 * 1,05 (2,65 - 2,60)}{2,60 * 2,65} = 0,76 \%$$

- Tercera iteración

$$Pba = \frac{100 * 1,05 (2,66 - 2,60)}{2,60 * 2,66} = 0,91 \%$$

3.1.9.1. Resultados Porcentaje de Ligante Asfáltico Absorbido

Los resultados obtenidos en la realización del ensayo del Porcentaje de Ligante Asfáltico Absorbido para una Granulometría Ideal, Máxima y Mínima son los siguientes:

Tabla XLV. **Porcentaje de Ligante Asfáltico Absorbido, Granulometría Ideal**

PROBETA	% BITUMEN	Gac	Gsb	Gse	% Pba
1	3,50	1,05	2,60	2,68	1,21
2	4,00	1,05	2,60	2,65	0,76
3	4,50	1,05	2,60	2,66	0,91
4	5,00	1,05	2,60	2,67	1,06
5	5,50	1,05	2,60	2,67	1,06

Fuente: elaboración propia.

Tabla XLVI. **Porcentaje de Ligante Asfáltico Absorbido, Granulometría Máxima**

PROBETA	% BITUMEN	Gac	Gsb	Gse	% Pba
1	3,50	1,05	2,60	2,72	1,78
2	4,00	1,05	2,60	2,66	0,91
3	4,50	1,05	2,60	2,65	0,76
4	5,00	1,05	2,60	2,65	0,76
5	5,50	1,05	2,60	2,67	1,06

Fuente: elaboración propia.

Tabla XLVII. **Porcentaje de Ligante Asfáltico Absorbido, Granulometría
Mínima**

PROBETA	% BITUMEN	Gac	Gsb	Gse	% Pba
1	4,00	1,05	2,60	2,69	1,35
2	4,50	1,05	2,60	2,66	0,91
3	5,00	1,05	2,60	2,66	0,91
4	5,50	1,05	2,60	2,63	0,46
5	6,00	1,05	2,60	2,63	0,46

Fuente: elaboración propia.

Una vez determinados los Porcentajes de Ligante Asfáltico Absorbido se procede a calcular los valores del porcentaje de Ligante Asfáltico Efectivo (Pbe).

Muestra:

Datos

Pba= 1,21 %

Pac= 3,50 %

Ps= 96,5 %

- Primera iteración

$$Pbe = 3,50 - \frac{1,21 * 96,5}{100} = 2,34 \%$$

- Segunda iteración

$$Pbe = 4,00 - \frac{0,76 * 96,0}{100} = 3,27 \%$$

- Tercera iteración

$$P_{be} = 4,50 - \frac{0,91 * 95,5}{100} = 3,63 \%$$

3.1.9.2. Resultados Porcentaje de Ligante Asfáltico Efectivo

Los resultados obtenidos en la realización del ensayo de Porcentaje de Ligante Asfáltico Efectivo para una Granulometría Ideal, Máxima y Mínima son los siguientes:

Tabla XLVIII. **Porcentaje de Ligante Asfáltico Efectivo, Granulometría Ideal**

PROBETA	% BITUMEN	% Pba	% Pac	% Ps	% Pbe
1	3,50	1,21	3,50	96,50	2,34
2	4,00	0,76	4,00	96,00	3,27
3	4,50	0,91	4,50	95,50	3,63
4	5,00	1,06	5,00	95,00	3,99
5	5,50	1,06	5,50	94,50	4,50

Fuente: elaboración propia.

Tabla XLIX. **Porcentaje de Ligante Asfáltico Efectivo, Granulometría Máxima**

PROBETA	% BITUMEN	% Pba	% Pac	% Ps	% Pbe
1	3,50	1,78	3,50	96,50	1,78
2	4,00	0,91	4,00	96,00	3,13
3	4,50	0,76	4,50	95,50	3,77
4	5,00	0,76	5,00	95,00	4,28
5	5,50	1,06	5,50	94,50	4,50

Fuente: elaboración propia.

Tabla L. **Porcentaje de Ligante Asfáltico Efectivo, Granulometría
Mínima**

PROBETA	% BITUMEN	% Pba	% Pac	% Ps	% Pbe
1	4,00	1,35	4,00	96,00	2,70
2	4,50	0,91	4,50	95,50	3,63
3	5,00	0,91	5,00	95,00	4,13
4	5,50	0,46	5,50	94,50	5,06
5	6,00	0,46	6,00	94,00	5,57

Fuente: elaboración propia.

Una vez determinados los porcentajes de Ligante Asfáltico Efectivo se procede a calcular los valores de la Relación Relleno Mineral/Asfalto.

Muestra:

Datos

Porcentaje que pasa tamiz núm. 200= 5,00 %

Pbe= 2,37 %

- Primera iteración

$$\frac{F}{A} = \frac{5,00}{2,34} = 2,14 \%$$

- Segunda iteración

$$\frac{F}{A} = \frac{5,00}{3,27} = 1,53 \%$$

- Tercera iteración

$$\frac{F}{A} = \frac{5,00}{3,63} = 1,38 \%$$

3.1.9.3. Resultados

Los resultados obtenidos en la realización del ensayo de Relación Relleno Mineral/Asfalto para una Granulometría Ideal, Máxima y Mínima son los siguientes:

Tabla LI. **Porcentaje de Relación Relleno Mineral/Asfalto, Granulometría Ideal**

PROBETA	% BITUMEN	% que pasa tamiz núm. 200	% Pbe	% F/A
1	3,50	5,00	2,34	2,14
2	4,00	5,00	3,27	1,53
3	4,50	5,00	3,63	1,38
4	5,00	5,00	3,99	1,25
5	5,50	5,00	4,50	1,11

Fuente: elaboración propia.

Tabla LII. **Porcentaje de Relación Relleno Mineral/Asfalto, Granulometría Máxima**

PROBETA	% BITUMEN	% que pasa tamiz núm. 200	% Pbe	% F/A
1	3,50	5,00	1,78	2,81
2	4,00	5,00	3,13	1,60
3	4,50	5,00	3,77	1,33
4	5,00	5,00	4,28	1,17
5	5,50	5,00	4,50	1,11

Fuente: elaboración propia.

Tabla LIII. **Porcentaje de Relación Relleno Mineral/Asfalto, Granulometría Mínima**

PROBETA	% BITUMEN	% que pasa tamiz núm. 200	% Pbe	% F/A
1	4,00	5,00	2,70	1,85
2	4,50	5,00	3,63	1,38
3	5,00	5,00	4,13	1,21
4	5,50	5,00	5,06	0,99
5	6,00	5,00	5,57	0,90

Fuente: elaboración propia.

3.1.10. Contenido de Humedad

A continuación, se analiza y determina el cálculo del porcentaje de Contenido de Humedad, %H.

Muestra:

Datos

Peso seco= 1 236,76

Peso seco saturado= 1 245,10

Peso sumergido= 724,80

- Primera iteración

$$\%H = \frac{1\ 245,10 - 1\ 236,76}{1\ 245,10 - 724,80} \times 100 = 1,60 \%$$

- Segunda iteración

$$\%H = \frac{1\ 243,42 - 1\ 233,94}{1\ 243,42 - 708,03} \times 100 = 1,77 \%$$

- Tercera iteración

$$\%H = \frac{1\ 246,01 - 1\ 238,50}{1\ 246,01 - 706,10} \times 100 = 1,39 \%$$

3.1.10.1. Resultados

Los resultados obtenidos en la realización del ensayo del porcentaje de Contenido de Humedad para una Granulometría Ideal, Máxima y Mínima son los siguientes:

Tabla LIV. **Resultados de Contenido de Humedad, Granulometría Ideal**

PROBETA	% BITUMEN	PESO SECO	PESO SECO SATURADO	PESO SUMERGIDO	% H	% H Promedio
1	3,50	1 236,76	1 245,10	724,80	1,60	1,59
2		1 233,94	1 243,42	708,03	1,77	
3		1 238,50	1 246,01	706,10	1,39	
4	4,00	1 246,68	1 258,42	728,04	2,21	1,81
5		1 244,16	1 251,80	729,67	1,46	
6		1 236,14	1 245,22	724,53	1,74	
7	4,50	1 244,30	1 249,54	732,43	1,01	1,18
8		1 255,74	1 262,25	733,30	1,23	
9		1 229,75	1 236,33	724,45	1,29	
10	5,00	1 260,35	1 263,30	730,30	0,55	0,59
11		1 245,60	1 248,45	736,66	0,56	
12		1 227,16	1 230,51	725,10	0,66	
13	5,50	1 253,72	1 255,90	740,10	0,42	0,44
14		1 256,86	1 258,90	743,36	0,40	
15		1 252,51	1 255,15	738,35	0,51	

Fuente: elaboración propia.

Tabla LV. **Resultados Contenido de Humedad, Granulometría Máxima**

PROBETA	% BITUMEN	PESO SECO	PESO SECO SATURADO	PESO SUMERGIDO	% H	% H Promedio
1	3,50	1 227,15	1 239,57	721,57	2,40	2,08
2		1 230,40	1 241,15	720,11	2,06	
3		1 225,60	1 234,81	717,36	1,78	
4	4,00	1 225,86	1 237,60	722,60	2,28	1,97
5		1 233,76	1 242,05	725,60	1,61	
6		1 234,63	1 245,22	725,71	2,04	
7	4,50	1 242,15	1 252,12	745,09	1,97	2,16
8		1 242,54	1 253,87	747,35	2,24	
9		1 241,56	1 253,22	742,36	2,28	
10	5,00	1 246,93	1 256,13	744,55	1,80	1,83
11		1 241,30	1 251,30	751,56	2,00	
12		1 240,73	1 249,30	742,71	1,69	
13	5,50	1 243,29	1 248,01	745,59	0,94	0,74
14		1 242,35	1 245,40	738,60	0,60	
15		1 242,97	1 246,36	740,92	0,67	

Fuente: elaboración propia.

Tabla LVI. **Resultados Contenido de Humedad, Granulometría Mínima**

PROBETA	% BITUMEN	PESO SECO	PESO SECO SATURADO	PESO SUMERGIDO	% H	% H Promedio
1	4,00	1 248,83	1 256,93	722,60	1,52	1,64
2		1 235,94	1 246,88	719,73	2,08	
3		1 231,33	1 238,41	710,10	1,34	
4	4,50	1 241,25	1 250,10	724,35	1,68	1,63
5		1 246,23	1 253,70	726,14	1,42	
6		1 243,40	1 252,98	720,51	1,80	
7	5,00	1 250,74	1 255,59	736,94	0,94	0,79
8		1 255,71	1 259,50	736,32	0,72	
9		1 252,34	1 256,10	729,60	0,71	
10	5,50	1 256,96	1 259,10	734,95	0,41	0,60
11		1 242,66	1 245,85	727,63	0,62	
12		1 246,24	1 250,24	730,56	0,77	
13	6,00	1 260,76	1 263,37	742,51	0,50	1,25
14		1 250,60	1 263,29	738,80	2,42	
15		1 258,75	1 263,17	732,52	0,83	

Fuente: elaboración propia.

3.1.11. Estabilidad-Flujo Marshall

A continuación, se analiza y determina el cálculo de Estabilidad-Flujo Marshall.

Muestra:

Datos:

Estabilidad Marshall (no corregida)= 233,00

Flujo= 18,00

- La lectura tomada del anillo dinamométrico se convierte a libras con la hoja de cargas de anillo (ver Anexo 7).

Estabilidad = 233,00 equivale a 2210 lb

- Se realiza la corrección de carga por ASTM D 1559.
- De acuerdo al valor de altura o volumen de la probeta, se realiza la corrección:

Estabilidad = (2 210,00)(0,96) = 2 122 lb

3.1.11.1. Resultados

Los resultados obtenidos para los diferentes cálculos, se detallan a continuación:

Tabla LVII. **Resultados de Estabilidad-Flujo, Granulometría Ideal**

PROBETA	% BITUMEN	LECTURA DINANOMÉTRICO	ESTABILIDAD CORREGIDA (lbf)	FLUJO (0,01")
1	3,50	183,00	1 707,00	20,00
2	4,00	273,00	2 533,00	20,00
3	4,50	283,00	2 678,00	18,00
4	5,00	252,00	2 449,00	18,00
5	5,50	278,00	2 162,00	26,00

Fuente: elaboración propia.

Tabla LVIII. **Resultados de Estabilidad-Flujo, Granulometría Máxima**

PROBETA	% BITUMEN	LECTURA DINANOMÉTRICO	ESTABILIDAD CORREGIDA (lbf)	FLUJO (0,01")
1	3,50	245,00	2 314,00	10,00
2	4,00	273,00	2 587,00	16,00
3	4,50	245,00	2 374,00	18,00
4	5,00	206,00	2 000,00	18,00
5	5,50	239,00	2 219,00	19,00

Fuente: elaboración propia.

Tabla LIX. **Resultados de Estabilidad-Flujo, Granulometría Mínima**

PROBETA	% BITUMEN	LECTURA DINANOMÉTRICO	ESTABILIDAD CORREGIDA (lbf)	FLUJO (0,01")
1	4,00	271,00	2 466,00	11,00
2	4,50	257,00	2 340,00	17,00
3	5,00	316,00	2 926,00	14,00
4	5,50	253,00	2 346,00	20,00
5	6,00	200,00	1 823,00	18,00

Fuente: elaboración propia.

3.2. Análisis de resultados

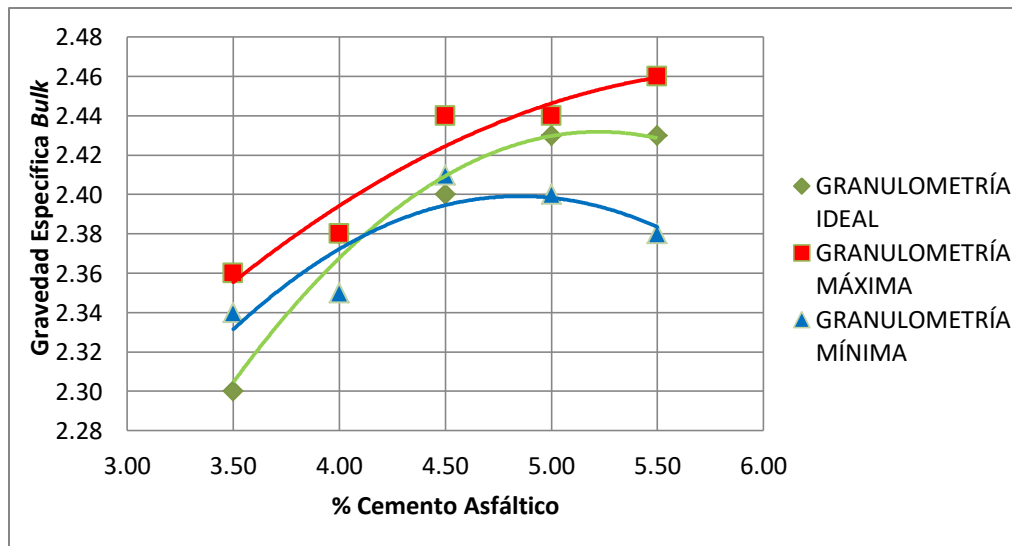
En este apartado se presentan los valores finales o resultados con sus correspondientes gráficas, de tal manera que se pueda realizar la comparación de los distintos diseños calculados.

Tabla LX. Comparación de Gravedad Específica *Bulk*

PROBETA	% BITUMEN	Granulometría Ideal Gmb	Granulometría Máxima Gmb	Granulometría Mínima Gmb
1	3,50	2,30	2,36	2,34
2	4,00	2,38	2,38	2,35
3	4,50	2,40	2,44	2,41
4	5,00	2,43	2,44	2,40
5	5,50	2,43	2,46	2,38

Fuente: elaboración propia.

Figura 19. Gráfica comparativa de Gravedad Específica *Bulk*



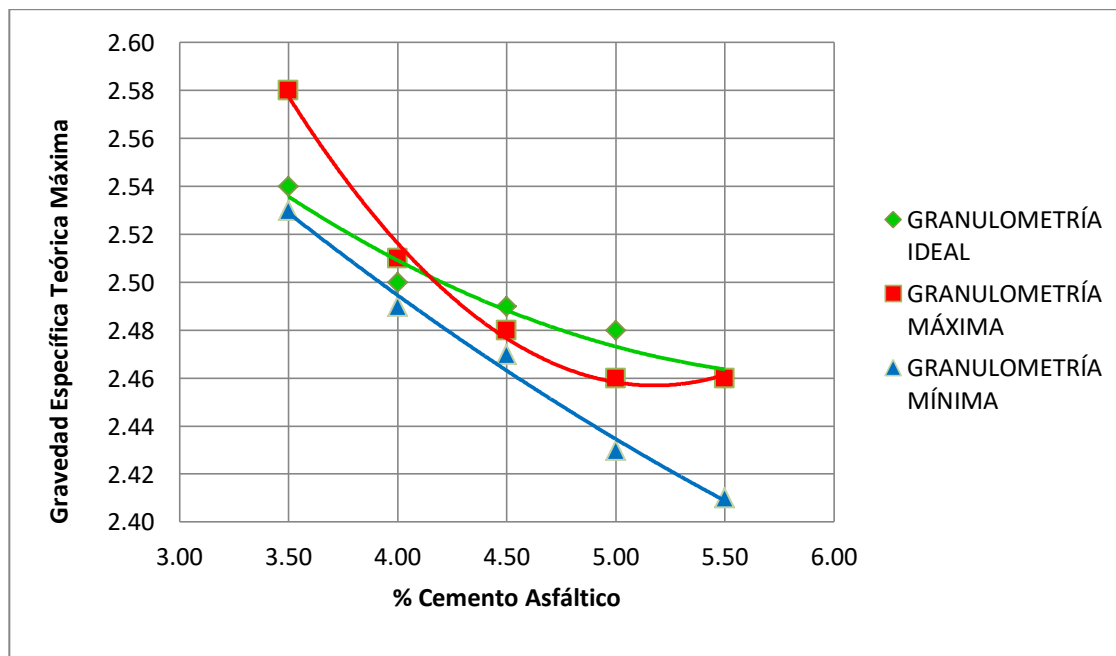
Fuente: elaboración propia, empleando Excel 2010.

Tabla LXI. **Comparación de Gravedad Específica Teórica Máxima Rice**

PROBETA	% BITUMEN	Granulometría Ideal Gmm	Granulometría Máxima Gmm	Granulometría Mínima Gmm
1	3,50	2,54	2,58	2,53
2	4,00	2,50	2,51	2,49
3	4,50	2,49	2,48	2,47
4	5,00	2,48	2,46	2,43
5	5,50	2,46	2,46	2,41

Fuente: elaboración propia.

Figura 20. **Gráfica comparativa de Gravedad Específica Teórica Máxima Rice**



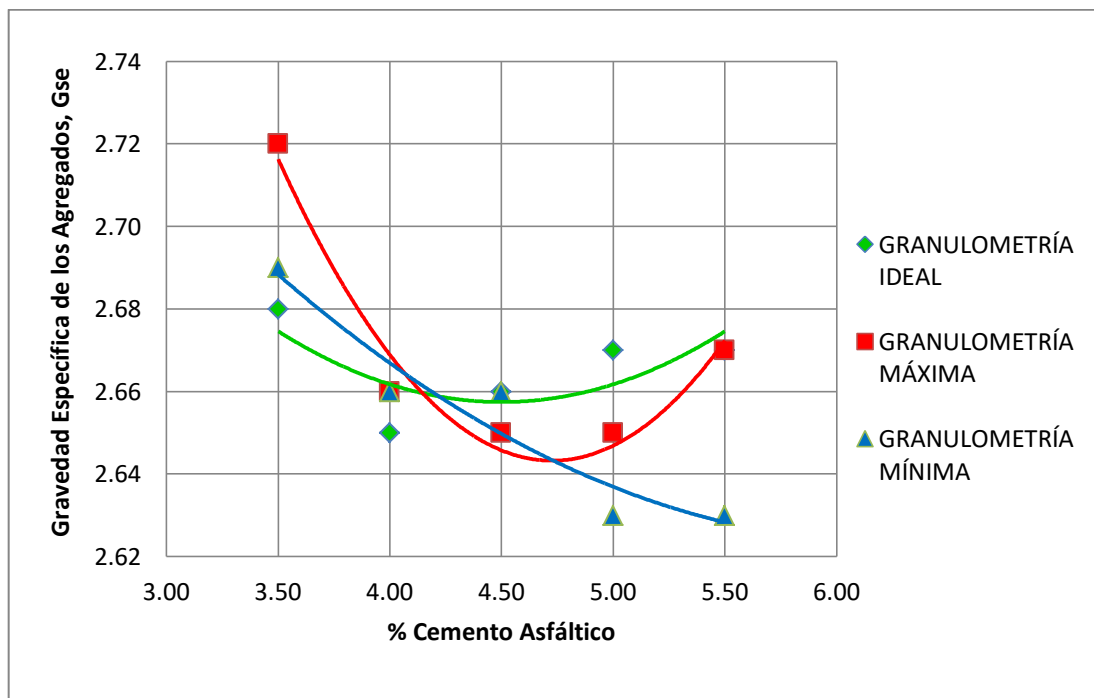
Fuente: elaboración propia, empleando Excel 2010.

Tabla LXII. **Comparación de Gravedad Específica Efectiva de los agregados**

PROBETA	% BITUMEN	Granulometría Ideal Gse	Granulometría Máxima Gse	Granulometría Mínima Gse
1	3,50	2,68	2,72	2,69
2	4,00	2,65	2,66	2,66
3	4,50	2,66	2,65	2,66
4	5,00	2,67	2,65	2,63
5	5,50	2,67	2,67	2,63

Fuente: elaboración propia.

Figura 21. **Gráfica comparativa de Gravedad Específica de los agregados**



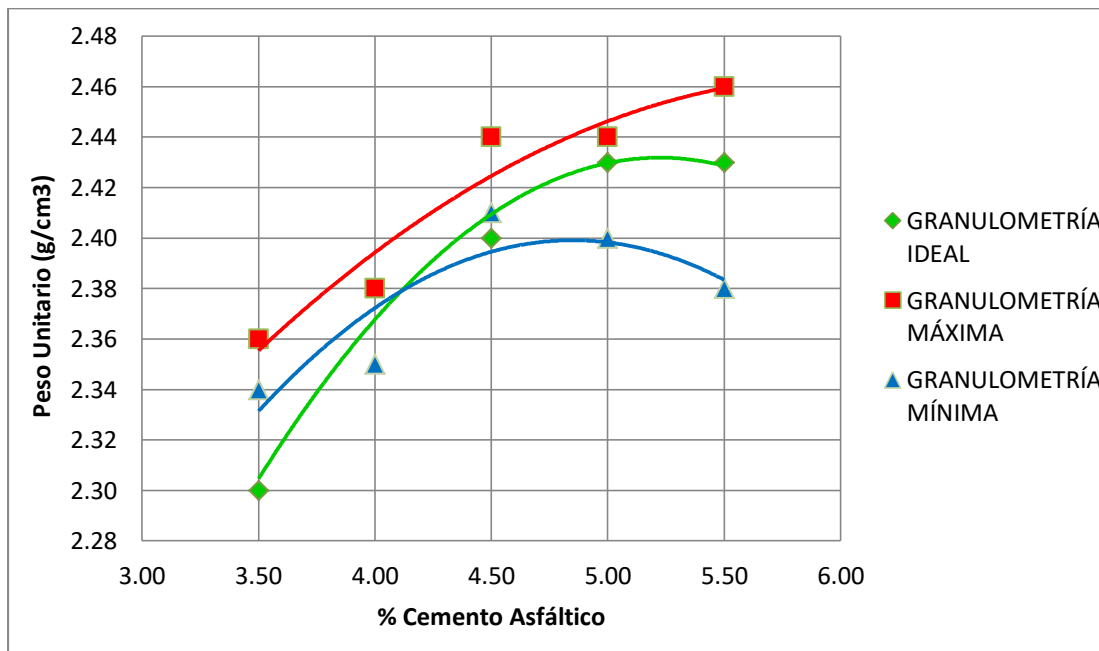
Fuente: elaboración propia, empleando Excel 2010.

Tabla LXIII. **Comparación de Peso Unitario en la mezcla**

PROBETA	% BITUMEN	Granulometría Ideal PU(g/cm ³)	Granulometría Máxima PU (g/cm ³)	Granulometría Mínima PU (g/cm ³)
1	3,50	2,30	2,36	2,34
2	4,00	2,38	2,38	2,35
3	4,50	2,40	2,44	2,41
4	5,00	2,43	2,44	2,40
5	5,50	2,43	2,46	2,38

Fuente: elaboración propia.

Figura 22. **Gráfica comparativa de Peso Unitario en la mezcla**



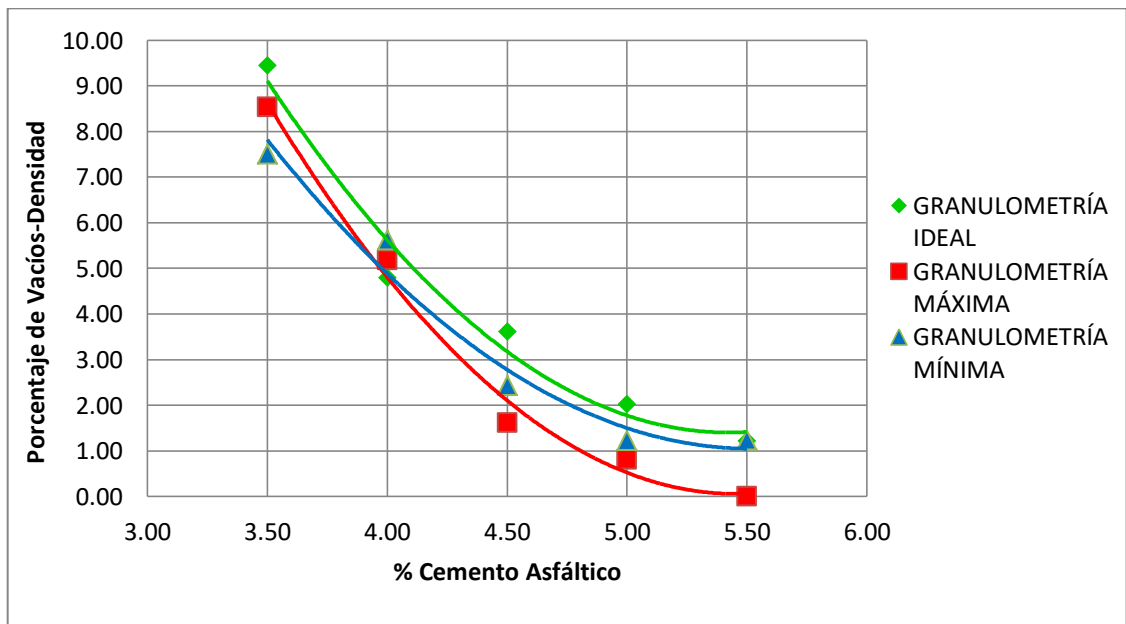
Fuente: elaboración propia, empleando Excel 2010.

Tabla LXIV. Comparación de Porcentaje de Vacíos-Densidad

PROBETA	% BITUMEN	Granulometría Ideal % VA	Granulometría Máxima % VA	Granulometría Mínima % VA
1	3,50	9,45	8,53	7,51
2	4,00	4,80	5,18	5,62
3	4,50	3,61	1,61	2,43
4	5,00	2,02	0,81	1,23
5	5,50	1,22	0,00	1,24

Fuente: elaboración propia.

Figura 23. Gráfica comparativa de Porcentaje de Vacíos-Densidad



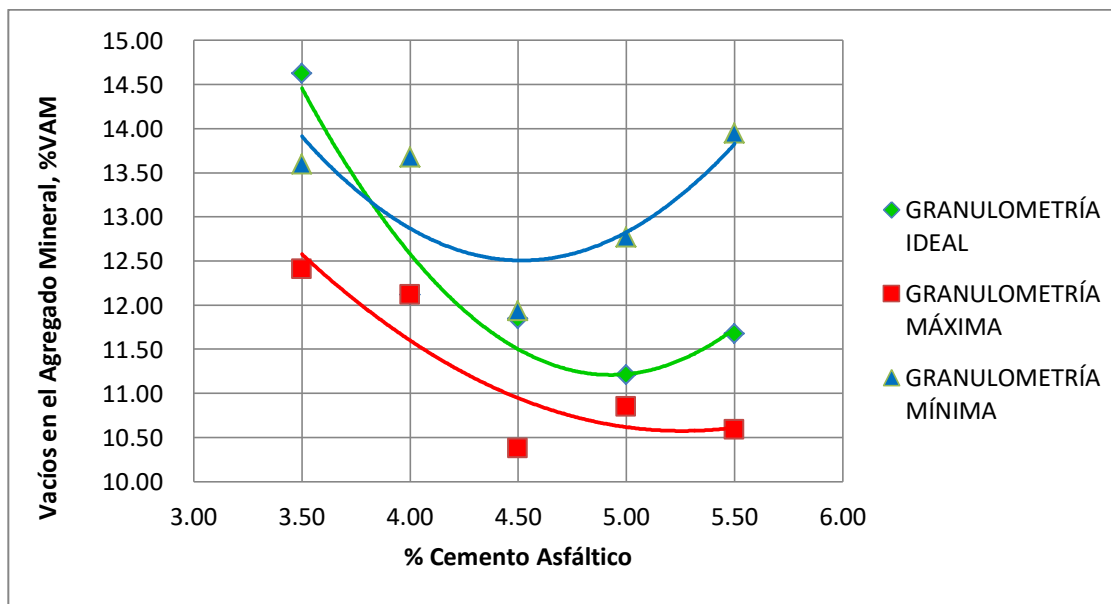
Fuente: elaboración propia, empleando Excel 2010.

Tabla LXV. **Comparación de Porcentaje de Vacíos en el Agregado Mineral**

PROBETA	% BITUMEN	Granulometría Ideal % VAM	Granulometría Máxima % VAM	Granulometría Mínima % VAM
1	3,50	14,63	12,41	13,60
2	4,00	12,12	12,12	13,68
3	4,50	11,85	10,38	11,94
4	5,00	11,21	10,85	12,77
5	5,50	11,68	10,59	13,95

Fuente: elaboración propia.

Figura 24. **Gráfica comparativa de Porcentaje de Vacíos en el Agregado Mineral**



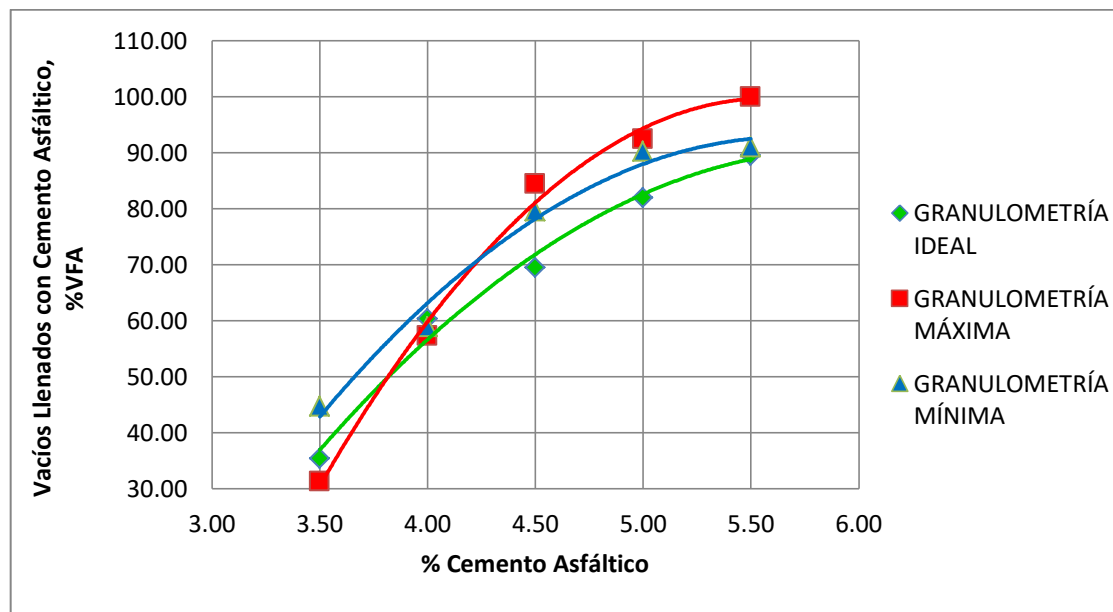
Fuente: elaboración propia, empleando Excel 2010.

Tabla LXVI. **Comparación de Porcentaje de Vacíos Llenados con Cemento Asfáltico**

PROBETA	% BITUMEN	Granulometría Ideal % VFA	Granulometría Máxima % VFA	Granulometría Mínima % VFA
1	3,50	35,44	31,28	44,78
2	4,00	60,41	57,28	58,91
3	4,50	69,49	84,46	79,66
4	5,00	82,02	92,50	90,33
5	5,50	89,56	100,00	91,08

Fuente: elaboración propia.

Figura 25. **Gráfica comparativa de Porcentaje de Vacíos Llenados con Cemento Asfáltico**



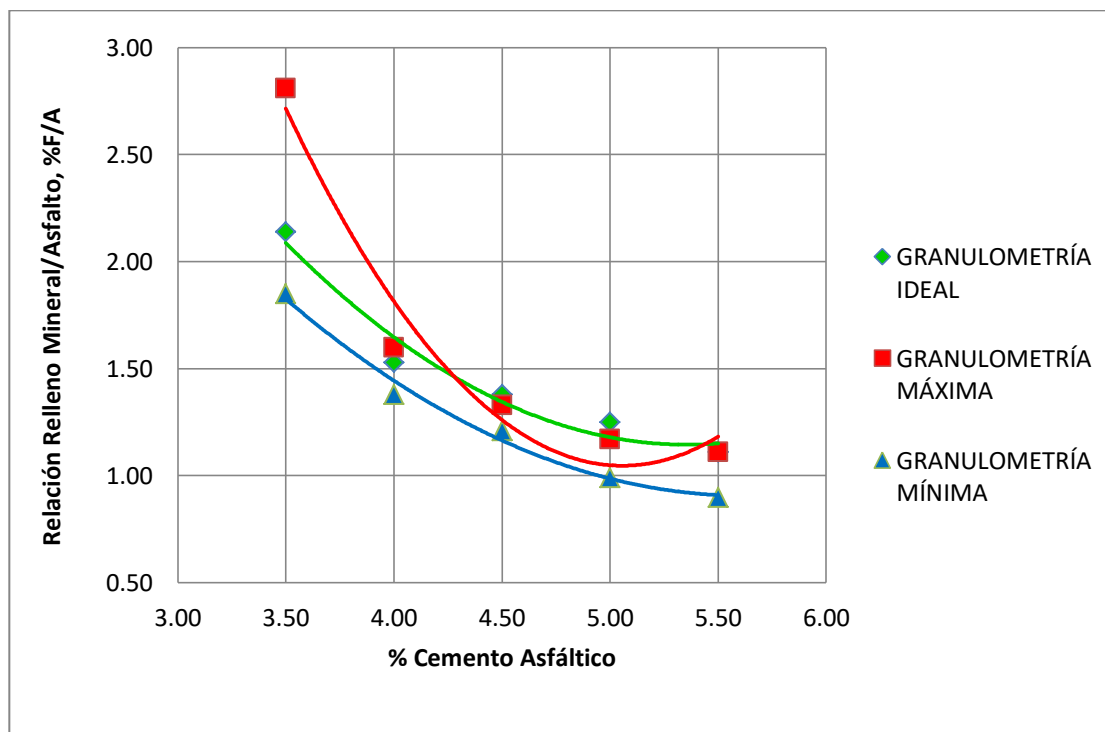
Fuente: elaboración propia, empleando Excel 2010.

Tabla LXVII. **Comparación de Relación Relleno Mineral/Asfalto**

PROBETA	% BITUMEN	Granulometría Ideal % F/A	Granulometría Máxima % F/A	Granulometría Mínima % F/A
1	3,50	2,14	2,81	1,85
2	4,00	1,53	1,60	1,38
3	4,50	1,38	1,33	1,21
4	5,00	1,25	1,17	0,99
5	5,50	1,11	1,11	0,90

Fuente: elaboración propia.

Figura 26. **Gráfica comparativa de Relación Relleno Mineral/Asfalto**



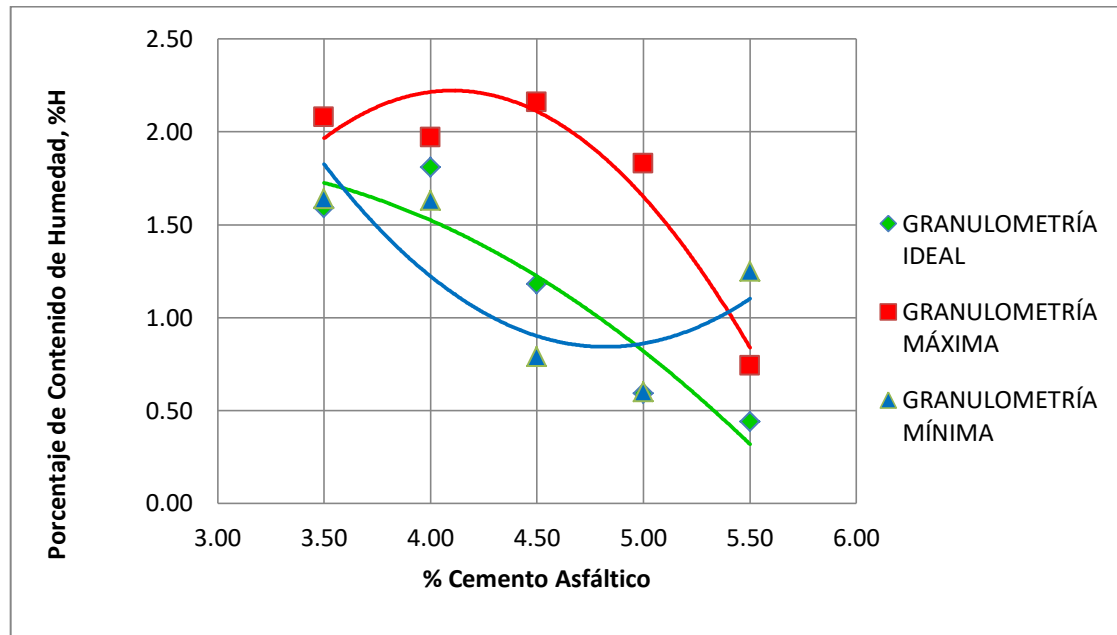
Fuente: elaboración propia, empleando Excel 2010.

Tabla LXVIII. **Comparación de Porcentaje de Contenido de Humedad**

PROBETA	% BITUMEN	Granulometría Ideal % H	Granulometría Máxima % H	Granulometría Mínima % H
1	3,50	1,59	2,08	1,64
2	4,00	1,81	1,97	1,63
3	4,50	1,18	2,16	0,79
4	5,00	0,59	1,83	0,60
5	5,50	0,44	0,74	1,25

Fuente: elaboración propia.

Figura 27. **Gráfica comparativa de Porcentaje de Contenido de Humedad**



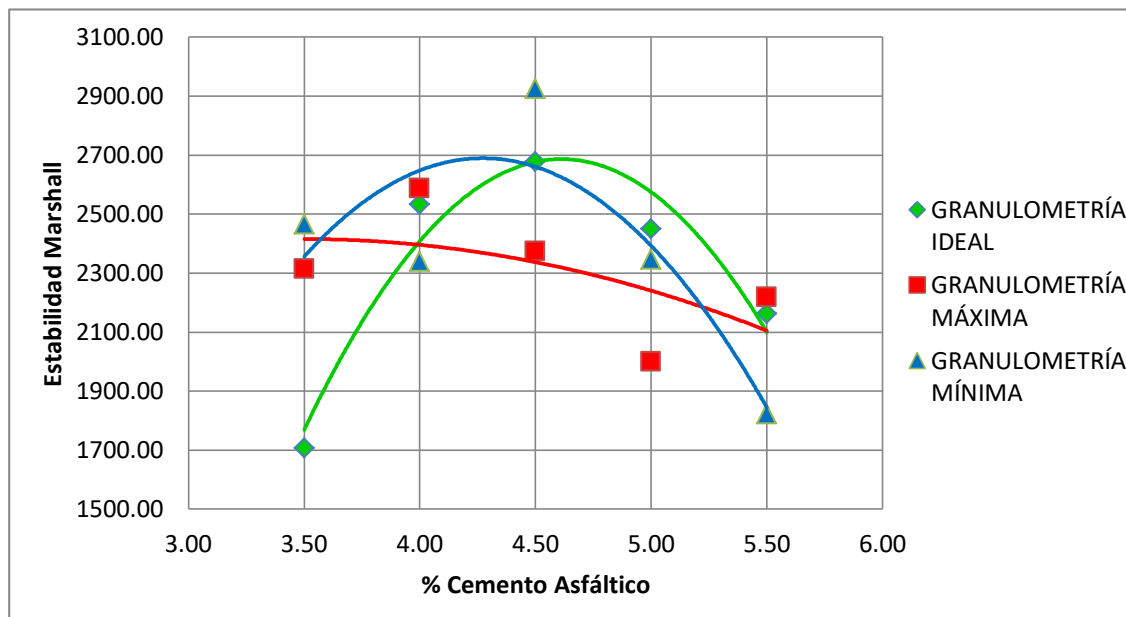
Fuente: elaboración propia, empleando Excel 2010.

Tabla LXIX. **Comparación de Estabilidad Marshall**

PROBETA	% BITUMEN	Granulometría Ideal Estabilidad	Granulometría Máxima Estabilidad	Granulometría Mínima Estabilidad
1	3,50	1 707,00	2 314,00	2 466,00
2	4,00	2 533,00	2 587,00	2 340,00
3	4,50	2 678,00	2 374,00	2 926,00
4	5,00	2 449,00	2 000,00	2 346,00
5	5,50	2 162,00	2 219,00	1 823,00

Fuente: elaboración propia.

Figura 28. **Gráfica comparativa de Estabilidad Marshall**



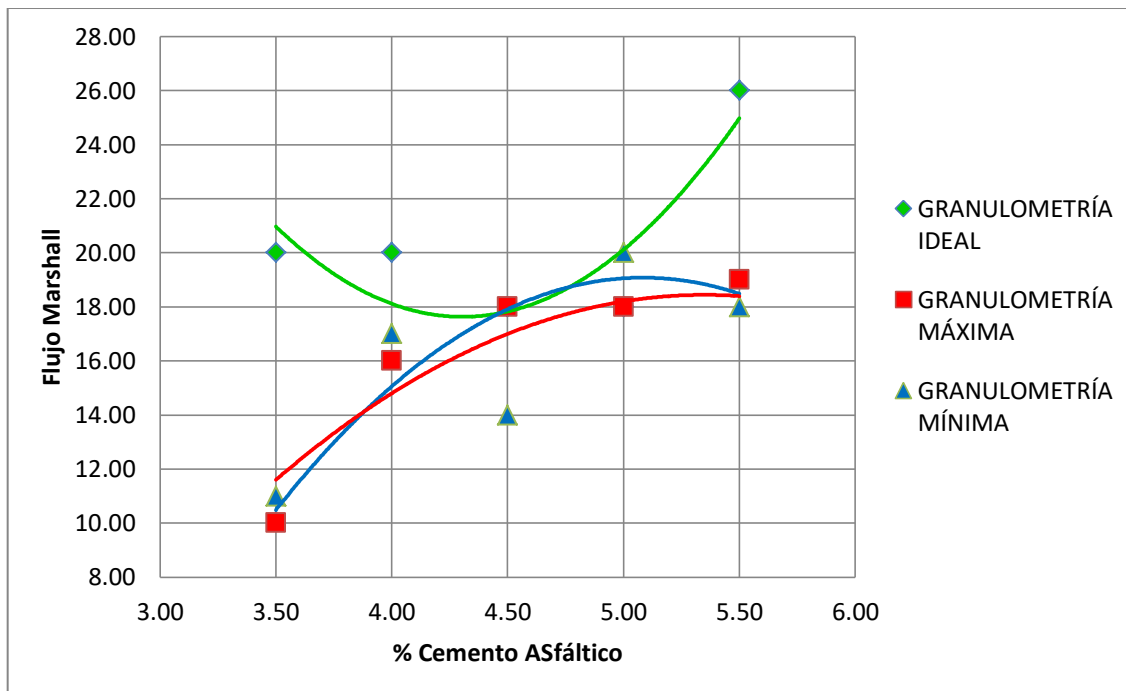
Fuente: elaboración propia, empleando Excel 2010.

Tabla LXX. Comparación de Flujo Marshall

PROBETA	% BITUMEN	Granulometría Ideal Flujo	Granulometría Máxima Flujo	Granulometría Mínima Flujo
1	3,50	20,00	10,00	11,00
2	4,00	20,00	16,00	17,00
3	4,50	18,00	18,00	14,00
4	5,00	18,00	18,00	20,00
5	5,50	26,00	19,00	18,00

Fuente: Elaboración propia.

Figura 29. Gráfica comparativa de Flujo Marshall



Fuente: elaboración propia, empleando Excel 2010.

3.3. Interpretación de resultados

La metodología aplicada sirve para la interpretación de los resultados, considerando los diferentes ensayos realizados a los tres diseños de mezcla asfáltica, es decir, para Granulometría Ideal, Granulometría Máxima y Granulometría Mínima. La Norma utilizada es ASTM D 1559.

La interpretación de resultados de la investigación se presenta para la mezcla asfáltica en caliente que posee como característica principal una granulometría variada (ideal, máxima y mínima) y ha sido obtenida de los valores presentados en las comparaciones y gráficas respectivas.

3.3.1. Diseño para Granulometría en Gravedad Específica *Bulk*

El comportamiento de la Gravedad Específica *Bulk* para la variación de las granulometrías en sus gráficas refleja un crecimiento de ella a medida que aumenta el porcentaje de cemento asfáltico; se puede decir que posee un comportamiento lineal. Esto es, la relación entre la masa de los volúmenes dados del material y la masa del volumen de agua. Se determina que estos son los valores aceptables que debe considerarse para la mezcla asfáltica colocada en campo.

Los valores promedio del contenido del cemento asfáltico de la mezcla diseñada con Granulometría Ideal y Máxima corresponden al 4,50 %; mientras tanto, para la Granulometría Mínima, el comportamiento es distinto, debido a que el inicio del contenido de cemento asfáltico es en 4,00 %, siendo el más aceptable, 5,00 %.

3.3.2. Diseño para Granulometría en Gravedad Específica Teórica Máxima Rice

Este tipo de gravedad específica representa la composición de la mezcla, haciendo énfasis en la cantidad de agregados y material asfáltico de una muestra sin compactar; es decir, el porcentaje de vacíos en el aire, existente en ella.

De acuerdo a los cálculos elaborados y resultados obtenidos, se interpreta que, a mayor cantidad de cemento asfáltico, el porcentaje de Vacíos en el Aire dentro de la mezcla sin compactar, disminuye gradualmente. Siendo el inicio de contenido de cemento asfáltico de 3,50 %, la Gravedad Específica Teórica Máxima corresponde a 2,54; mientras se aumenta al 5,50 % de cemento asfáltico, la Gravedad disminuye a un valor de 2,41.

3.3.3. Diseño para Granulometría de Gravedad Específica Efectiva de los agregados

Esta Gravedad Específica Efectiva de los agregados depende de la Gravedad Específica Teórica Máxima y de la Gravedad Específica del cemento asfáltico, para esta investigación, AC-20.

El comportamiento o tendencia de los resultados abarca que los valores efectivos de los agregados son como mínimos de 2,63 para un porcentaje de cemento asfáltico de 5,50 y máximo 2,72 para un porcentaje de 3,50 de cemento asfáltico. Las gráficas indican que tienen una variación absoluta máxima de 0,04 y mínima de 0,01, respectivamente; lo cual establece que se encuentra dentro de los límites admisibles para el diseño.

3.3.4. Diseño para Peso Unitario de la mezcla

Toda mezcla asfáltica en caliente, una vez haya sido compactada, debe poseer su respectivo peso unitario y esto determina la relación entre su propio volumen y el respectivo contenido de cemento asfáltico.

De acuerdo a la tabla de comparación y su gráfica comparativa para los tres diseños de granulometría (ideal, máxima y mínima) indica que la mezcla aumenta su peso según el aumento en el contenido de cemento asfáltico. Numéricamente, cuando se tiene un contenido de cemento asfáltico de 3,50 % la mezcla determina su peso unitario en $2,30 \text{ g/cm}^3$ y cuando el cemento asfáltico contiene 5,00 % el peso unitario de la mezcla aumenta a 2,44.

3.3.5. Diseño para Granulometría en Porcentaje de Vacíos-Densidad

En todo diseño de mezcla asfáltica en caliente, se pretende reducir a una cantidad apropiada el porcentaje de vacíos, siendo un rango aceptable de 3 % a 5 %, esto con base en las *Especificaciones Generales para Construcción de Carreteras y Puentes* (ver tabla VI, *Requisitos para la mezcla de concreto asfáltico*).

Las gráficas determinan que el comportamiento de la Granulometría Máxima posee 0,00 % de vacíos cuando su contenido de cemento asfáltico corresponde a un valor de 5,50 % y según tabla VI se excede en 0,05 %. Esto implica que al aumentar el contenido de asfalto se disminuyen los vacíos en la mezcla, más no puede obtenerse una mezcla continua satisfactoria (ver numeral 2.5.6 *Ajustes en el diseño de mezcla asfáltica*).

Para el caso de la Granulometría Ideal, el contenido de vacíos disminuye de 9,45 % a 1,22 % cuando el porcentaje de cemento asfáltico contempla rangos de 3,50 % a 5,50 %. En la Granulometría Mínima varía el contenido del cemento asfáltico respecto a las Granulometrías Ideal y Máxima. Este valor inicia en 4,00 % y finaliza en 6,00 % con porcentaje de vacíos de 7,51 a 1,24 respectivamente. La tendencia de los porcentajes de vacíos es decreciente.

3.3.6. Diseño para Granulometría en Porcentaje de Vacíos en Agregado Mineral

Este tiene como característica que disminuye al incrementarse el contenido de cemento asfáltico, hasta alcanzar un mínimo a partir del cual comienza a aumentar.

De acuerdo al párrafo anterior, en la Granulometría Ideal se determina que el cemento asfáltico de 3,50 % a 5,50 % establece valores en los Vacíos de Agregado Mineral de 14,63 % a 11,68 % siendo este último donde comienza su aumento. En la Granulometría Máxima los valores de Vacíos en Agregado Mineral oscila entre 12,41 % a 10,59 % mientras que en la Granulometría Mínima los valores son mayores dado que el contenido de cemento asfáltico inicia en 4,00 % a 6,00 % siendo respectivamente sus vacíos de 13,60 % a 13,95 %.

Se determina que el porcentaje de Vacíos en el Agregado Mineral, cumple en su mayoría con los requisitos impuestos en la tabla V, *Vacíos en el Agregado Mineral, VAM*.

3.3.7. Diseño para Granulometría en Porcentaje de Vacíos Llenados con Cemento Asfáltico

Como bien lo dice su diseño, está directamente relacionado con la cantidad de cemento asfáltico y su cantidad de Vacíos-Densidad, Vacíos en Agregado Mineral, en porcentajes, respectivamente. La finalidad de este es “compensar” o estabilizar la cantidad de los vacíos existentes entre el agregado mineral y la mezcla asfáltica.

De acuerdo a los límites establecidos en la tabla VI, los valores de vacíos llenados con cemento asfáltico, en porcentajes, deben comprender desde un 65,00 % hasta 78,00 % de vacíos.

De ello se determina que en la Granulometría Ideal para un cemento asfáltico del 3,50 % con %VFA de 35,44, no cumple con los requisitos indicados y puede ser causa de la dosificación en los agregados gruesos. En tanto, la granulometría mínima con 5,50 % de cemento asfáltico determina 91,08 % de vacíos. A diferencia de las dos granulometrías mencionadas, la Granulometría Máxima indica que el 100,00 % de los vacíos llenados con cemento asfáltico corresponde cuando el contenido de cemento asfáltico es de 5,50 %.

3.3.8. Diseño para Granulometría en Relación Relleno Mineral/Asfalto

De acuerdo a la tabla VI, se determina que la mayoría de los porcentajes cumplen con los valores solicitados, a excepción cuando el contenido de cemento asfáltico corresponde al 3,50 % reflejando valores de Relleno Mineral/Asfalto de 2,14 % y 2,81 % para las Granulometrías Ideal y Máxima, respectivamente.

Seguido de ello, se determina que el comportamiento de esta relación, disminuye al incrementar el contenido de cemento asfáltico, tendiendo hacia un mínimo.

3.3.9. Diseño para Granulometría en Porcentaje de Contenido de Humedad

Para la Granulometría Ideal el contenido en porcentaje de humedad varía considerablemente, presentando valores de 1,59 %, 1,81 % y 0,44 %; es decir, que su comportamiento aumenta para luego disminuir. La Granulometría Máxima indica valor máximo de 2,16 % cuando su contenido de cemento asfáltico corresponde a 4,50 %. Debido a la cantidad de material fino, la Granulometría Mínima indica como valor óptimo de humedad el 0,79 % cuando su contenido de cemento asfáltico es de 4,50 %.

3.3.10. Diseño para Granulometría en Estabilidad Marshall

La tendencia del comportamiento de este ensayo es similar a la de Peso Unitario; es decir, presenta valores mínimos, óptimos y máximos. Salvo que la máxima estabilidad ocurre (no siempre) a un contenido de asfalto ligeramente inferior al de la máxima densidad. En la Granulometría Ideal y Máxima, se inicia con 3,50 % de cemento asfáltico y finaliza con 5,50 % del mismo.

La Estabilidad Marshall en la Granulometría Ideal tiene como dato mínimo 1 707,00 lb, óptimo 2 678,00 lb y máximo 2 162,00 lb.

En la Granulometría Máxima y Mínima el comportamiento de la Estabilidad Marshall es logarítmico. En la primera, los porcentajes de cemento asfáltico son de 3,50 % a 5,50 % siendo valores de Estabilidad Marshall en inicio 2 314,00 lb

y en su terminación 2 219,00 lb. En la granulometría última, los valores de contenido de cemento asfáltico parten de 4,00 % para finalizar en 6,00 %; la Estabilidad Marshall respectivamente al contenido de cemento asfáltico es 2 466,00 a 1 823,00 lb.

3.3.11. Diseño para Granulometría en Flujo Marshall

La tendencia del comportamiento del Flujo Marshall en la Granulometría Ideal y Mínima es su aumento. Con valores de cemento asfáltico que inician en 3,50 % y finalizan en 5,50 % (Granulometría Ideal) y de 4,00 % a 6,00 % (Granulometría Mínima); los flujos obtenidos, respectivamente, están comprendidos en los rangos de 20,00 a 26,00 y de 11,00 a 18,00. Esto refleja que la deformación que sufre la probeta, aumenta con el porcentaje del contenido de cemento asfáltico.

La Granulometría Máxima en su Flujo, presenta comportamiento lineal y en aumento con valores de 10 a 19, siendo el contenido de cemento asfáltico de 3,50 % a 5,50 %.

CONCLUSIONES

1. Los lineamientos de diseño de mezcla asfáltica en caliente se establecen en las normas y especificaciones consultadas. Se hace una mención de las mismas y su enfoque correspondiente: ASTM D 75, muestreo de agregados; ASTM D 75-87, tabla de muestreo; ASTM C 702, reducción de agregados; AASHTO T 85-9, capacidad de absorción de agregado grueso; AASHTO T 84, capacidad de absorción de agregado fino; AASHTO T 96-202, ensayo de Desgaste de Los Ángeles; ASTM D 3515, graduación de agregados para pavimento de concreto asfáltico; ASTM C 127-04, peso específico; AASHTO T 27, análisis granulométrico de agregados finos y gruesos; AASHTO T 245, método Marshall; “Especificaciones Generales para Construcción de Carreteras y Puentes”, Dirección General de Caminos, Guatemala.
2. El análisis que se aplica a las mezclas asfálticas en caliente para sus respectivos ensayos, involucra las características físicas, propiedades mecánicas y su análisis granulométrico, hasta determinar el contenido de cemento asfáltico y sus agregados. La granulometría gruesa se determina por medios mecánicos y se ve influenciada por la cantidad de agregados gruesos y porcentaje de cemento asfáltico.
3. La calidad de la mezcla asfáltica en caliente depende, por lo general, de la calidad de los materiales constituyentes, es decir, materiales pétreos y cantidad de cemento asfáltico. Cuando se hace referencia al porcentaje de vacíos y la capacidad de carga de la mezcla asfáltica, se determina la estabilidad y flujo Marshall. Debido al presente trabajo de investigación,

en el desarrollo experimental, se concluye que a, mayor producción de mezcla asfáltica en caliente, mejores resultados (se adquiere experiencia).

4. Cuando el tamaño máximo nominal del agregado grueso tenga variaciones mayores o menores al diez por ciento en masa que pasa el tamiz de 3/8", el muestreo y los ensayos de laboratorio son los únicos medios para verificar si las especificaciones están siendo cumplidas, aún si estas requieren que el agregado cumpla con graduaciones durante la fabricación, acopio de reservas o producción de la mezcla.
5. La velocidad de deformación aumenta a medida que las cargas por eje equivalente aumentan; es decir, las deformaciones plásticas se reflejan con mayor presencia y severidad en las mezclas que son impuestas bajo cargas mayores. Estas dependen del agregado grueso porque provocan rigidez excesiva y por tanto, aumenta la carga y la deformación baja. La solución en este caso, puede darse con el contenido de material fino debido a que se puede estabilizar.
6. Una reducción en el contenido de asfalto del tres por ciento, puede ocasionar fracturas, oxidación acelerada e incremento en la permeabilidad. Si los mencionados no cumplen con los requisitos de una mezcla deseable, debe cambiarse.
7. El porcentaje de vacíos puede ser consecuencia de: los agregados no poseen uniformidad en sus características físicas; se puede obtener una mala dosificación y la temperatura no es homogénea en la mezcla asfáltica compactada.

8. Las causas de la inestabilidad en las mezclas asfálticas en caliente pueden resumirse en: exceso de asfalto en la mezcla; exceso de arena de tamaño medio en la mezcla y agregado redondeado sin, o con pocas superficies trituradas.
9. Los efectos que producen las causas en mezclas asfálticas en caliente se justifican en: ondulaciones y ahuellamientos; baja resistencia durante la compactación y canalización.
10. El tipo de granulometría gruesa a utilizar debe analizarse cuidadosamente debido a que aumenta la cantidad de cemento asfáltico, pero depende de la viscosidad del bitumen, es decir, a mayor viscosidad, mayor resistencia.

RECOMENDACIONES

1. Tener control de calidad en el cemento asfáltico en todas sus características y propiedades como: punto de ablandamiento, ductilidad, viscosidad; estos factores, siempre y cuando cumplan con las *Especificaciones generales para construcción de carreteras y puentes*.
2. Los dispositivos y equipos utilizados en los distintos ensayos de laboratorio, para control de calidad, deben estar calibrados adecuadamente para evitar errores en la toma de datos.
3. En la dosificación de agregados debe revisarse periódicamente la granulometría de agregados gruesos y finos.
4. Verificar la procedencia de los agregados y de los parámetros que influyen en su calidad.
5. Para que los resultados de los ensayos realizados en el laboratorio sean confiables, se sugiere elaborar tres probetas por cada variación del contenido del cemento asfáltico en la mezcla y determinar un promedio. Esto, por motivo que la mezcla no es totalmente homogénea en su producción.

BIBLIOGRAFÍA

1. American Association of State Highway and Transportation Officials. *Resistance to plastic flow of bituminous mixtures using Marshall apparatus*. AASHTO T 245. Estados Unidos de Norteamérica: AASHTO, 2001. 12 p.
2. American Society for Testing and Materials. *Hot-mixed, hot-laid bituminous paving mixtures*. ASTM D 3515. Estados Unidos de Norteamérica: ASTM, 2005. 5 p.
3. Cámara Guatemalteca de la Construcción. *Control de Calidad para Mezclas Asfálticas*. Guatemala: 2016, 139 p.
4. CRESPIÑ MOLINA, Rafael Alexander; SANTA CRUZ JOVEL, Ismael Ernesto; TORRES LINARES, Pablo Alberto. *Aplicación del método Marshall y granulometría SUPERPAVE en el diseño de mezclas asfálticas en caliente con asfalto clasificación grado de desempeño*. Editorial Universitaria, El Salvador, septiembre 2012. 312 p.
5. DEL CID MORALES, Javier Antonio. *Uso de cal hidratada como relleno mineral para el mejoramiento de las características físicas y propiedades mecánicas de la mezcla asfáltica en caliente*. Trabajo de graduación de Ingeniería Civil. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 2016. 114p.

6. Dirección General de Caminos. *Especificaciones Generales para Construcción de Carreteras y Puentes*. Gobierno de Guatemala, 2002. Sección 400. 22 p.

7. Instituto Nacional de Vías. *Manual de normas de ensayo de los materiales para carreteras, Secciones 700 y 800, Materiales y mezclas asfálticas y prospección de pavimentos*. Colombia: INVIAS, 2012. 7 p.

APÉNDICES

Apéndice 1. **Equipo utilizado para calentar agregados, cemento asfáltico y mezcla asfáltica**



Fuente: elaboración propia, Laboratorio de Asfaltos – CII – USAC.

Apéndice 2. **Pesado de cada porción de agregados previamente calculados en el diseño de MAC**



Fuente: elaboración propia, Laboratorio de Asfaltos – CII – USAC.

Apéndice 3. **Ensayo de Gravedad Específica *Bulk***



Fuente: elaboración propia, Laboratorio de Asfaltos – CII – USAC.

Apéndice 4. **Ensayo Gravedad Específica Teórica Máxima *Rice***



Fuente: elaboración propia, Laboratorio de Asfaltos – CII – USAC.

Apéndice 5. **Ensayo Marshall**



Fuente: elaboración propia, Laboratorio de Asfaltos – CII – USAC.

ANEXOS

Anexo 1. Informe de Densidad Específica *Bulk*



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



INFORME NUMERO: 011 L.B.A
ORDEN DE TRABAJO: 35961
No. 09520

INTERESADO: PAOLA JUDITH PÉREZ URQUIZÚ

PROYECTO: TESIS: DISEÑO DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA POR EL MÉTODO MARSHALL, EFECTUANDO VARIACIONES DEL TAMAÑO MÁXIMO NOMINAL PARA UNA GRANULOMETRÍA CONTROLADA.

DIRECCION: CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERÍA

ENSAYO: DENSIDAD ESPECIFICA DE BULK ASTM 2726-05a

FECHA: 16 DE ENERO DEL 2017

MUESTRA: MEZCLA ASFALTICA EN CALIENTE NORMAL (DISEÑO 1 Y 2)

DISEÑO 1

PROBETA	GRAVEDAD ESPECIFICA
1 AC 20 3,5%	2,30
2 AC 20 3,5%	2,29
3 AC 20 4,0%	2,38
4 AC 20 4,0%	2,37
5 AC 20 4,5%	2,41
6 AC 20 4,5%	2,40
7 AC 20 5,0%	2,43
8 AC 20 5,0%	2,43
9 AC 20 5,5%	2,43
10 AC 20 5,5%	2,44

DISEÑO 2

PROBETA	GRAVEDAD ESPECIFICA
1 AC 20 3,5%	2,36
2 AC 20 3,5%	2,37
3 AC 20 4,0%	2,39
4 AC 20 4,0%	2,38
5 AC 20 4,5%	2,45
6 AC 20 4,5%	2,43
7 AC 20 5,0%	2,44
8 AC 20 5,0%	2,45
9 AC 20 5,5%	2,45
10 AC 20 5,5%	2,46

Atentamente,

Vo. Bo. : 

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



Ing. Oscar Amador Cuevas Mazariegos
Jefe Laboratorio de Asfaltos

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

Fuente: Laboratorio de Asfaltos –CII-USAC.

Anexo 2. Informe de Densidad Especifica *Bulk*



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



INFORME NUMERO: 012 L.B.A

ORDEN DE TRABAJO: 35961

No. 09521

INTERESADO: PAOLA JUDITH PÉREZ URQUIZÚ

PROYECTO: TESIS: DISEÑO DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA POR EL MÉTODO MARSHALL, EFECTUANDO VARIACIONES DEL TAMAÑO MÁXIMO NOMINAL PARA UNA GRANULOMETRÍA CONTROLADA.

DIRECCION: CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERIA

ENSAYO: DENSIDAD ESPECIFICA DE BULK ASTM 2726-05a

FECHA: 16 DE ENERO DEL 2017

MUESTRA: MEZCLA ASFALTICA EN CALIENTE (DISEÑO 3)

DISEÑO 3

PROBETA	GRAVEDAD ESPECIFICA
1 AC 20 4,0%	2,340
2 AC 20 4,0%	2,330
3 AC 20 4,5%	2,360
4 AC 20 4,5%	2,340
5 AC 20 5,0%	2,410
6 AC 20 5,0%	2,400
7 AC 20 5,5%	2,400
8 AC 20 5,5%	2,400
9 AC 20 6,0%	2,380
10 AC 20 6,0%	2,370

Atentamente,

Vo. Bo. :



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



Ing. Darío Francisco López 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 85221 Fax: 2418-9121
 Página web: <http://cii.usac.edu.gt>

Fuente: Laboratorio de Asfaltos –CII-USAC.

Anexo 3. Informe de Densidad Específica Teórica Máxima *Rice*



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



INFORME NUMERO: 013 L.B.A.
ORDEN DE TRABAJO: 35961
No. 09522

INTERESADO: PAOLA JUDITH PÉREZ URQUIZÚ

PROYECTO: TESIS: DISEÑO DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA POR EL MÉTODO MARSHALL, EFECTUANDO VARIACIONES DEL TAMAÑO MÁXIMO NOMINAL PARA UNA GRANULOMETRÍA CONTROLADA.

DIRECCION: CII/FIUSAC LABORATORIO DE ASFALTOS

ENSAYO: DENSIDAD ESPECIFICA TEORICA MAXIMA "RICE" ASTM 2041

FECHA: 16 DE ENERO DEL 2017

MUESTRA: MEZCLA ASFALTICA EN CALIENTE (DISEÑO 1, 2 Y 3)

PROBETA DISEÑO 1	GMM
3,5% AC 20	2,5420
4,0% AC 20	2,4950
4,5% AC 20	2,4910
5,0% AC 20	2,4790
5,5% AC 20	2,4590

PROBETA DISEÑO 2	GMM
3,5% AC 20	2,5830
4,0% AC 20	2,5080
4,5% AC 20	2,4800
5,0% AC 20	2,4610
5,5% AC 20	2,4630

PROBETA DISEÑO 3	GMM
4,0% AC 20	2,5270
4,5% AC 20	2,4850
5,0% AC 20	2,4700
5,5% AC 20	2,4260
6,0% AC 20	2,4060

Atentamente,

Vo. Bo. :



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




Ing. Danilo Fernando Usac 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 –CII-USAC.

Anexo 4. Informe de Estabilidad y Flujo Marshall



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



No. 09517

INFORME NUMERO: 008 L.B.A.

ORDEN DE TRABAJO: 35961

INTERESADO: PAOLA JUDITH PÉREZ URQUIZÚ

PROYECTO: TESIS: DISEÑO DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA POR EL MÉTODO MARSHALL, EFECTUANDO VARIACIONES DEL TAMAÑO MÁXIMO NOMINAL PARA UNA GRANULOMETRÍA CONTROLADA.

DIRECCION: CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERÍA

ENSAYO: ESTABILIDAD Y FLUJO MARSHALL ASTM D 1559

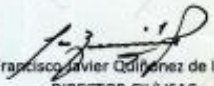
FECHA: 16 DE ENERO DEL 2017

MUESTRA: MEZCLA ASFALTICA EN CALIENTE (DISEÑO 1)


PROBETA	ESTABILIDAD LBF	FLUJO 0,01"
1 AC 20 3,5%	2182,00	20
2 AC 20 3,5%	1232,00	20
3 AC 20 4,0%	2412,00	20
4 AC 20 4,0%	2654,00	22
5 AC 20 4,5%	2654,00	20
6 AC 20 4,5%	2701,00	18
7 AC 20 5,0%	2000,00	18
8 AC 20 5,0%	2897,00	20
9 AC 20 5,5%	2000,00	26
10 AC 20 5,5%	2324,00	23


Atentamente,

Vo. Bo. :




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





Ing. Darío Francisco Luces 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 –CII – USAC.

Anexo 5. Informe de Estabilidad y Flujo Marshall



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



No. 09518

INFORME NUMERO: 009 L.B.A.

ORDEN DE TRABAJO: 35961

INTERESADO: PAOLA JUDITH PÉREZ URQUIZÚ
PROYECTO: TESIS: DISEÑO DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA POR EL MÉTODO MARSHALL, EFECTUANDO VARIACIONES DEL TAMAÑO MÁXIMO NOMINAL PARA UNA GRANULOMETRÍA CONTROLADA.
DIRECCION: CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERÍA
ENSAYO: ESTABILIDAD Y FLUJO MARSHALL ASTM D 1559
FECHA: 16 DE ENERO DEL 2017
MUESTRA: MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE (DISEÑO 2)

PROBETA	ESTABILIDAD LBF	FLUJO 0,01"
1 AC 20 3,5%	2465,00	10
2 AC 20 3,5%	2163,00	10
3 AC 20 4,0%	2324,00	12
4 AC 20 4,0%	2850,00	20
5 AC 20 4,5%	2612,00	18
6 AC 20 4,5%	1135,00	18
7 AC 20 5,0%	1378,00	14
8 AC 20 5,0%	2623,00	21
9 AC 20 5,5%	2104,00	17
10 AC 20 5,5%	2333,00	21

Atentamente,

Vo. Bo. :



Ing. Francisco Javier Quijón 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: 2418-8000 Exts. 86209 y 86221 Fax: 2418-9121
Página web: <http://cii.usac.edu.gt>

Fuente: Laboratorio de Asfaltos –CII – USAC.

Anexo 6. Informe de Estabilidad y Flujo Marshall



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



No. 09519

INFORME NUMERO: 010 L.B.A.

ORDEN DE TRABAJO: 35961

INTERESADO: PAOLA JUDITH PÉREZ URQUIZÚ

PROYECTO: TESIS: DISEÑO DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA POR EL MÉTODO MARSHALL, EFECTUANDO VARIACIONES DEL TAMAÑO MÁXIMO NOMINAL PARA UNA GRANULOMETRÍA CONTROLADA.

DIRECCION: CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERÍA

ENSAYO: ESTABILIDAD Y FLUJO MARSHALL ASTM D 1559


FECHA: 16 DE ENERO DEL 2017

MUESTRA: MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE (DISEÑO 3)


PROBETA	ESTABILIDAD LBF	FLUJO 0,01"
1 AC 20 4,0%	2620,00	11
2 AC 20 4,0%	2313,00	18
3 AC 20 4,5%	2548,00	18
4 AC 20 4,5%	2131,00	16
5 AC 20 5,0%	2852,00	11
6 AC 20 5,0%	3000,00	16
7 AC 20 5,5%	2321,00	20
8 AC 20 5,5%	2371,00	18
9 AC 20 6,0%	2004,00	21
10 AC 20 6,0%	1641,00	18

Atentamente,

Vo. Bo. :


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

R


 Ing. Danilo 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 –CII – USAC.

Anexo 7. Tabla Humboldt Mfg. Co. corrección Estabilidad Marshall

7300 W. AGATITE AVE.
NORRIDGE, IL 60706

4 SEP 20

RECOMMEND RECALIBRATION ONE YEAR FROM START OF USE AFTER LAST CALIBRATION
CALIBRATION FOR MODEL H-4454.100 11000 LBF SERIAL 2366 BY *B. Blackerman*
CALIBRATED USING LOAD CELL 626314 CAL. DATE 10/11/07 DEFLT=.0001 in.

LBF	DEFLT	LBF	DEFLT	LBF	DEFLT	LBF	DEFLT	LBF	DEFLT
0	.1	1000	105.1	3500	370.0	6000	637.9	8500	908.9
20	2.2	1050	110.4	3550	375.3	6050	643.3	8550	914.4
40	4.3	1100	115.7	3600	380.7	6100	648.7	8600	919.8
60	6.4	1150	121.0	3650	386.0	6150	654.1	8650	925.3
80	8.5	1200	126.2	3700	391.3	6200	659.5	8700	930.7
100	10.5	1250	131.5	3750	396.7	6250	664.9	8750	936.2
120	12.6	1300	136.8	3800	402.0	6300	670.3	8800	941.6
140	14.7	1350	142.0	3850	407.3	6350	675.7	8850	947.1
160	16.8	1400	147.3	3900	412.7	6400	681.1	8900	952.6
180	18.9	1450	152.6	3950	418.0	6450	686.5	8950	958.0
200	21.0	1500	157.9	4000	423.3	6500	691.9	9000	963.5
220	23.1	1550	163.2	4050	428.7	6550	697.3	9050	968.9
240	25.2	1600	168.4	4100	434.0	6600	702.7	9100	974.4
260	27.3	1650	173.7	4150	439.4	6650	708.1	9150	979.9
280	29.4	1700	179.0	4200	444.7	6700	713.5	9200	985.3
300	31.5	1750	184.3	4250	450.1	6750	718.9	9250	990.8
320	33.6	1800	189.6	4300	455.4	6800	724.3	9300	996.3
340	35.7	1850	194.9	4350	460.8	6850	729.7	9350	1001.8
360	37.8	1900	200.1	4400	466.1	6900	735.1	9400	1007.2
380	39.9	1950	205.4	4450	471.5	6950	740.5	9450	1012.7
400	42.0	2000	210.7	4500	476.8	7000	746.0	9500	1018.2
420	44.1	2050	216.0	4550	482.2	7050	751.4	9550	1023.6
440	46.2	2100	221.3	4600	487.5	7100	756.8	9600	1029.1
460	48.3	2150	226.6	4650	492.9	7150	762.2	9650	1034.6
480	50.4	2200	231.9	4700	498.2	7200	767.6	9700	1040.1
500	52.5	2250	237.2	4750	503.6	7250	773.0	9750	1045.6
520	54.6	2300	242.5	4800	508.9	7300	778.5	9800	1051.0
540	56.7	2350	247.8	4850	514.3	7350	783.9	9850	1056.5
560	58.8	2400	253.1	4900	519.7	7400	789.3	9900	1062.0
580	61.0	2450	258.4	4950	525.0	7450	794.7	9950	1067.5
600	63.1	2500	263.7	5000	530.4	7500	800.2	10000	1073.0
620	65.2	2550	269.0	5050	535.8	7550	805.6	10050	1078.5
640	67.3	2600	274.3	5100	541.1	7600	811.0	10100	1084.0
660	69.4	2650	279.6	5150	546.5	7650	816.4	10150	1089.5
680	71.5	2700	284.9	5200	551.9	7700	821.9	10200	1094.9
700	73.6	2750	290.2	5250	557.2	7750	827.3	10250	1100.4
720	75.7	2800	295.5	5300	562.6	7800	832.7	10300	1105.9
740	77.8	2850	300.8	5350	568.0	7850	838.2	10350	1111.4
760	79.9	2900	306.2	5400	573.3	7900	843.6	10400	1116.9
780	82.0	2950	311.5	5450	578.7	7950	849.0	10450	1122.4
800	84.1	3000	316.8	5500	584.1	8000	854.5	10500	1127.9
820	86.2	3050	322.1	5550	589.5	8050	859.9	10550	1133.4
840	88.3	3100	327.4	5600	594.9	8100	865.4	10600	1138.9
860	90.4	3150	332.7	5650	600.2	8150	870.8	10650	1144.4
880	92.5	3200	338.1	5700	605.6	8200	876.2	10700	1149.9
900	94.6	3250	343.4	5750	611.0	8250	881.7	10750	1155.4
920	96.7	3300	348.7	5800	616.4	8300	887.1	10800	1160.9
940	98.8	3350	354.0	5850	621.8	8350	892.6	10850	1166.4
960	100.9	3400	359.3	5900	627.2	8400	898.0	10900	1172.0
980	103.0	3450	364.7	5950	632.5	8450	903.5	10950	1177.5

Fuente: Humboldt Mfg. Corrección Estabilidad Marshall. p. 1.

Anexo 8. **Tabla de Factores de Corrección Estabilidad Marshall**

CORRECCION DE LOS VALORES DE ESTABILIDAD					
Volumen de la briqueta cm ³	Espesor aproximado de la briqueta en cm	Factor de corrección	Volumen de la briqueta cm ³	Espesor aproximado de la briqueta en cm	Factor de corrección
200-213	2.54	5.56	406-420	5.08	1.47
214-225	2.70	5.00	421-431	5.24	1.39
226-237	2.86	4.55	432-443	5.40	1.32
238-250	3.02	4.17	444-456	5.56	1.25
251-264	3.17	3.85	457-470	5.71	1.19
2.65-276	3.33	3.57	471-482	5.87	1.14
277-289	3.49	3.33	483-495	6.03	1.09
290-301	3.65	3.03	496-508	6.19	1.04
302-316	3.81	2.78	509-522	6.35	1.00
317-328	3.97	2.50	523-535	6.51	0.96
329-340	4.13	2.27	536-546	6.67	0.93
341-353	4.29	2.08	547-559	6.82	0.89
354-367	4.44	1.92	560-573	6.98	0.86
368-379	4.60	1.79	574-585	7.14	0.83
390-392	4.76	1.67	586-598	7.30	0.81
393-405	4.92	1.56	599-610	7.46	0.78
			611-625	7.62	0.76

Fuente: ASTM D 1559.