



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

**INFLUENCIA DE LA GRANULOMETRÍA EN LAS CARACTERÍSTICAS VOLUMÉTRICAS
DEL DISEÑO EN MEZCLAS ASFÁLTICAS**

José Juan Istupe Ibañez

Asesorado por el Ing. Yefry Valentín Rosales Juárez

Guatemala, mayo de 2017

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**INFLUENCIA DE LA GRANULOMETRÍA EN LAS CARACTERÍSTICAS
VOLUMÉTRICAS DEL DISEÑO EN MEZCLAS ASFÁLTICAS**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR

JOSÉ JUAN ISTUPE IBAÑEZ

ASESORADO POR EL ING. YEFRY VALENTÍN ROSALES JUÁREZ

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO CIVIL

GUATEMALA, MAYO 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 Núñez
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

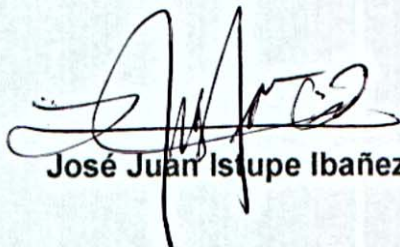
DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
EXAMINADOR	Ing. Alejandro Castañón López
EXAMINADOR	Ing. Víctor Manuel López Juárez
EXAMINADOR	Ing. José Mauricio Arriola Donis
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

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:

INFLUENCIA DE LA GRANULOMETRÍA EN LAS CARACTERÍSTICAS VOLUMÉTRICAS DEL DISEÑO EN MEZCLAS ASFÁLTICAS

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Civil,
con fecha 26 de noviembre de 2015.



José Juan Istupe Ibañez

Guatemala, 23 de marzo del 2017.

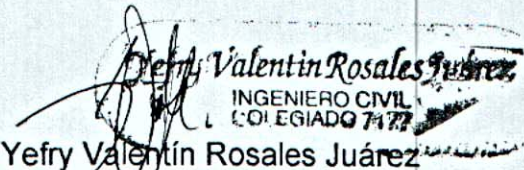
Ingeniero
José Gabriel Ordoñez Morales
Coordinador del Área de Materiales y Construcciones Civiles
Universidad de San Carlos de Guatemala
Guatemala

Ingeniero Ordoñez:

Al saludarle cordialmente, me dirijo a usted para informarle que ha sido concluido satisfactoriamente el trabajo de graduación titulado: "INFLUENCIA DE LA GRANULOMETRÍA EN LAS CARACTERÍSTICAS VOLUMÉTRICAS DEL DISEÑO EN MEZCLAS ASFÁLTICAS" elaborado por el estudiante José Juan Istupe Ibañez con carné 200313368, 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 de las conclusiones del mismo.

Atentamente,


INGENIERO CIVIL
COLEGIADO 7177
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,
31 de marzo de 2017

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

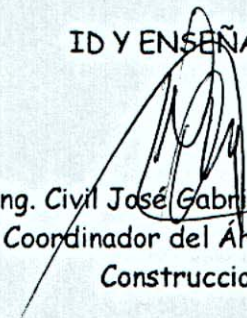
Estimado Ingeniero Montenegro.

Le informo que he revisado el trabajo de graduación **INFLUENCIA DE LA GRANULOMETRÍA EN LAS CARACTERÍSTICAS VOLUMÉTRICAS DEL DISEÑO EN LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS** desarrollado por el estudiante de Ingeniería Civil José Juan Istupe Ibañez 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.



Mas de 136 años de Trabajo y Mejora Continua



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 del estudiante Jose Juan Istupe Ibañez **INFLUENCIA DE LA GRANULOMETRÍA EN LAS CARACTERÍSTICAS VOLUMÉTRICAS DEL DISEÑO EN MEZCLAS ASFÁLTICAS** da por este medio su aprobación a dicho trabajo.


 Ing. Hugo Leonel Montenegro Franco



Guatemala, mayo 2017
 /mrrm.



Universidad de San Carlos
de Guatemala

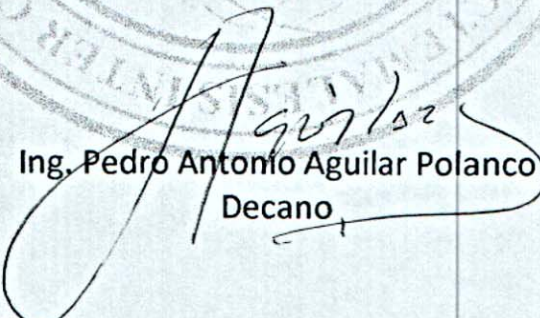


Facultad de Ingeniería
Decanato

DTG. 213.2017

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: **INFLUENCIA DE LA GRANULOMETRÍA EN LAS CARACTERÍSTICAS VOLUMÉTRICAS DEL DISEÑO EN MEZCLAS ASFÁLTICAS**, presentado por el estudiante universitario: **José Juan Istupe Ibañez**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMP RÍMASE:


Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
Decano

Guatemala, mayo de 2017

/gdec



ACTO QUE DEDICO A:

- Dios** Por cuidar de mis pasos; darme fe, esperanza y guiarme en esta vida.
- Mis padres** Justiniano Istupe y Enriqueta Ibañez, por ser mis guías y mi razón de ser; por darme todo el apoyo para poder llegar a esta meta.
- Mis hermanos** Aura, Julio, César, por tenerme paciencia, cuidarme y apoyarme. Siempre en mis pensamientos. Con cariño especial para Alberto y Antonio (q.e.p.d.)
- Mis sobrinos** Por ser parte de la fuerza para culminar esta meta.
- Mis amigos** Paola Roque, Guillermo Castaneda, Melina Antonio, Andrés Lam, Beatriz Rosado, Michelle Balconi, por el apoyo brindado a lo largo de la carrera y en mi vida.

AGRADECIMIENTOS A:

Universidad de San Carlos de Guatemala	Por brindarme la oportunidad de estudiar en ella, mi <i>alma mater</i> .
Facultad de Ingeniería	Por formarme como estudiante para lograr ser profesional.
Sección de Mecánica de Suelos	Ing. Omar Medrano, Byron Vielman, Moisés Mejía, Mynor Castillo, Rómulo Marroquín, por la amistad y apoyo brindado. Así como por los consejos y aprendizaje obtenidos.
Ing. Yefry Rosales	Por ser mi asesor y brindar su apoyo y amistad para culminar este trabajo.
Mis amigos	Lourdes Montes, Karla Mis, Regina López, Jairon Roldán, Jorge Ortiz, Rafael Ortiz, Julio Rivera, Elvis Ávila, Iris Prado, Flor Pérez, Ashley Hernández, Werner Ajín, Marly López.
Mis amigos y compañeros del Laboratorio de Asfaltos	Gustavo Estrada, Paola Pérez, Jorge Sipaque, Jorge Vaquiaux, Réne Díaz, Gabriela Ramírez, Javier del Cid, Jorge Coronado, Vodenith Villacinda, Rigoberto Velazco, Ricardo Pérez, Edgar Morales, Brian Ortiz, Herbert López, Edgar Coronado, Pablo Tello, Ingrid Suriano,

Maria Días, Carlos Gómez, Melany Barrillas,
Blanca Barrera, María Rene, Juan Reyes,
Roberto Tanimoto, Jhonatan Cuesi.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	IX
LISTA DE SÍMBOLOS	XIII
GLOSARIO	XV
RESUMEN.....	XIX
OBJETIVOS.....	XXI
INTRODUCCIÓN.....	XXIII
1. MARCO TEÓRICO.....	1
1.1. Composición del asfalto.....	1
1.1.1. Estructura química de los asfaltos	1
1.1.2. Asfaltenos.....	2
1.1.3. Máltenos	2
1.1.4. Aromáticos.....	2
1.1.5. Saturados	3
1.2. Datos importantes del diseño de mezclas asfálticas en caliente	3
1.3. Empleo y función de las mezclas asfálticas.....	3
1.4. Antecedentes del diseño de mezcla Superpave.....	5
1.5. Clasificación de las mezclas asfálticas y métodos de diseño	5
1.5.1. Tipos de mezclas asfálticas	5
1.5.1.1. Mezclas asfálticas en caliente	6
1.5.1.2. Mezclas asfálticas tibias	6
1.5.1.3. Mezclas asfálticas frías.....	7
1.5.2. Método de diseño Marshall.....	7
1.5.2.1. Características de la mezcla.....	8

1.5.2.2.	Pruebas a las mezclas asfálticas compactadas	9
1.5.2.2.1.	Determinación de la gravedad específica	9
1.5.2.2.2.	Prueba de estabilidad y flujo.....	9
1.5.2.2.3.	Análisis de densidad y vacíos.....	10
1.5.3.	Método Superpave	11
1.5.3.1.	Pruebas al agregado mineral	11
1.5.3.2.	Propiedades de consenso	12
1.5.3.3.	Propiedades de la fuente de origen.....	12
1.5.3.4.	Pruebas al cemento asfáltico	12
1.5.3.5.	Pruebas a las mezclas asfálticas	14
1.5.3.5.1.	Requerimientos volumétricos de la mezcla.....	14
1.5.3.5.2.	Proporción de polvo	14
1.5.3.5.3.	Susceptibilidad a la humedad	14
1.5.4.	Proporción de vacíos en una mezcla asfáltica	15
1.5.4.1.	Análisis de vacíos.....	15
1.6.	Granulometrías utilizadas para diseño de mezclas Superpave y Marshall.....	16
1.6.1.	Diseño de granulometría Superpave	16
1.6.2.	Agregados minerales Superpave	16
1.6.2.1.	Propiedades de consenso	17
1.6.2.1.1.	Angularidad del agregado grueso	18

	1.6.2.1.2.	Angularidad del Agregado Fino	19
	1.6.2.1.3.	Partículas planas y alargadas.....	20
	1.6.2.1.4.	Contenido de Arcilla	21
1.6.3.		Análisis de la granulometría Superpave	22
	1.6.3.1.	Gráfica elevada al exponente 0,45	22
	1.6.3.2.	Origen de la gráfica de Fuller.....	23
	1.6.3.3.	Importancia de la gráfica de Fuller.....	24
	1.6.3.4.	Diseño de la granulometría Superpave	26
	1.6.3.5.	Mecanismos de control de la granulometría.....	29
	1.6.3.6.	La zona restringida	31
1.7.		Parámetros de la Dirección General de Caminos para Método Marshall	33
	1.7.1.	Requisitos de los materiales pétreos	34
	1.7.1.1.	Especificaciones para el agregado grueso.....	34
	1.7.1.2.	Especificaciones para el agregado fino	35
	1.7.1.3.	Mezcla compuesta de agregados	35
	1.7.1.4.	Requisitos para el cemento asfáltico ...	38
1.8.		Componentes de una mezcla asfáltica	42
	1.8.1.	Definición de asfalto	42
	1.8.2.	Viscosidad	43
	1.8.3.	Función del asfalto en la mezcla asfáltica	45
	1.8.4.	Temperatura de mezcla y compactación	45
	1.8.4.1.	Temperatura de mezcla.....	46

	1.8.4.2.	Temperatura de compactación de mezcla en laboratorio	47
	1.8.4.3.	Temperatura de compactación en campo.....	47
1.9.		Agregados pétreos.....	47
	1.9.1.	Definición de agregados.....	47
	1.9.1.1.	Agregados naturales	48
	1.9.1.2.	Artificiales o reparados industrialmente	48
	1.9.1.3.	Agregados artificiales o sintéticos	48
	1.9.2.	Clasificación de agregados pétreos de acuerdo a su tamaño.....	49
	1.9.2.1.	Agregado grueso	49
	1.9.2.2.	Agregado fino	49
	1.9.2.3.	Polvo mineral.....	50
2.		DESARROLLO EXPERIMENTAL.....	51
	2.1.	Trabajo de laboratorio para el diseño de mezcla	51
	2.1.1.	Características de la mezcla asfáltica	51
	2.1.2.	Definición de granulometrías para diseño de mezclas	51
	2.2.	Ensayos realizados	54
	2.2.1.	Resistencia de mezclas asfálticas Marshall AASHTO T 245 y ASTM D 1559	54
	2.2.1.1.	Objeto.....	54
	2.2.1.2.	Preparación de la muestra	54
	2.2.1.3.	Instrumentos.....	55
	2.2.1.4.	Procedimiento	58
	2.2.1.5.	Estabilidad y Flujo Marshall.....	58

2.2.1.6.	Para el informe	59
2.2.2.	Gravedad específica <i>Bulk</i> de briquetas ASTM D 1188.....	60
2.2.2.1.	Instrumentos.....	60
2.2.2.2.	Procedimiento.....	61
2.2.2.3.	Forma de calcular	61
2.2.2.4.	Para el informe	61
2.2.3.	Gravedad específica teórica máxima <i>Rice</i> ASTM D 2041 y AASHTO T 209	62
2.2.3.1.	Preparación de la muestra.....	62
2.2.3.2.	Instrumentos.....	62
2.2.3.3.	Procedimiento.....	63
2.2.4.	Porcentaje de vacíos – densidad ASTM D 3203, AASHTO 7 269	65
2.2.4.1.	Procedimiento.....	65
2.2.5.	Porcentaje de vacíos en el agregado mineral ASTM D 1559	65
2.2.5.1.	Procedimiento.....	65
2.3.	Resultado de los ensayos de laboratorio obtenidos en diseño granulométrico Marshall.....	66
2.3.1.	Resultados obtenidos de gravedad específica <i>Bulk</i> de briquetas ASTM D 1188.....	66
2.3.2.	Gravedad específica teórica máxima.....	69
2.3.3.	Porcentaje de vacíos – densidad ASTM D 3203, AASHTO T 269.....	72
2.3.4.	Prueba de Estabilidad – Flujo Marshall	73
2.3.5.	Porcentaje de vacíos en el agregado mineral ASTM D 1559	77

2.3.6.	Resultados obtenidos en diseño granulométrico Superpave	78
2.3.6.1.	Resultados obtenidos de gravedad específica <i>Bulk</i> de briquetas ASTM D 1188.....	78
2.3.7.	Gravedad específica teórica máxima	81
2.3.8.	Porcentaje de vacíos – densidad ASTM D 3203, AASHTO T 269	84
2.3.9.	Resistencia de mezclas asfálticas Marshall AASHTO T 245 y ASTM D 1559	85
2.3.10.	Porcentaje de vacíos en el agregado mineral ASTM D 1559.....	89
3.	ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	91
3.1.	Datos de análisis de resultados	91
3.1.1.	Resistencia de mezclas asfálticas Marshall, estabilidad y flujo Marshall, AASHTO T 245 y ASTM D 1559.....	91
3.1.2.	Resultados obtenidos gravedad específica <i>Bulk</i> de briquetas ASTM D 1188	95
3.1.3.	Gravedad específica teórica máxima	96
3.1.4.	Porcentaje de vacíos – densidad	98
3.1.5.	Porcentaje de vacíos en el agregado mineral ASTM D 1559.....	99
	CONCLUSIONES.....	101
	RECOMENDACIONES.....	103
	BIBLIOGRAFÍA.....	105
	APÉNDICES.....	107

ANEXOS.....109

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Representación gráfica de granulometrías según la FHWA.....	25
2.	Ilustración de cómo se grafican las abscisas	26
3.	Graduación de máxima densidad para tamaño máximo nominal de 19,00 mm	27
4.	Distintos tipos de requerimientos para granulometrías Superpave	28
5.	Límites para las granulometrías Superpave.....	31
6.	Gráfica viscosidad vs temperatura	46
7.	Gráfica granulométrica de diseño Marshall	52
8.	Gráfica granulométrica de diseño Superpave	53
9.	Gráfica de gravedad específica <i>Bulk</i> en mezcla con granulometría Marshall.....	69
10.	Gráfica de gravedad específica <i>Bulk</i> de mezcla con granulometría Marshall.....	71
11.	Gráfica de porcentaje de vacíos – densidad de mezcla Marshall	73
12.	Gráfica de Flujo vs porcentaje de bitumen	75
13.	Gráfica de Estabilidad vs porcentaje de bitumen	76
14.	Gráfica de VAM vs porcentaje de bitumen	78
15.	Gráfica de gravedad específica <i>Bulk</i> vs porcentaje de bitumen.....	81
16.	Gráfica de gravedad específica teórica máxima con granulometría Superpave.....	83
17.	Porcentaje de vacíos vs porcentaje de bitumen.....	85
18.	Gráfica Flujo vs porcentaje de bitumen	87
19.	Gráfica Estabilidad vs porcentaje bitumen	88

20.	Gráfica VAM vs porcentaje de bitumen.....	90
21.	Gráfica de comparación, estabilidad vs porcentaje de bitumen.....	92
22.	Gráfica de comparación, flujo vs porcentaje de bitumen	94
23.	Gráfica de comparación, <i>Bulk</i> vs porcentaje de bitumen	96
24.	Gráficas de comparación, gravedad específica teórica máxima vs porcentaje de bitumen	97
25.	Gráficas de comparación, flujo vs porcentaje de bitumen.....	99
26.	Graficas de comparación VAM	100

TABLAS

I.	Propósito de las pruebas de asfaltos Superpave.....	13
II.	Requerimientos de vacíos en la mezcla asfáltica	16
III.	Muestra de valores mínimos requeridos para la angularidad del agregado grueso en función del nivel de tránsito y la posición en el pavimento.....	19
IV.	Requerimientos de Superpave para la angularidad del agregado fino.....	20
V.	Requerimientos de Superpave para las partículas chatas y alargadas	21
VI.	Requerimientos de Superpave para el contenido de arcilla.....	22
VII.	Requisitos del agregado grueso	34
VIII.	Requisitos para el agregado fino	35
IX.	Graduación de agregados para pavimento de concreto asfáltico (ASTM D 3515).....	37
X.	Requisitos de graduación para polvo mineral	38
XI.	Especificaciones para el cemento asfáltico	39
XII.	Requisitos para la mezcla de concreto asfáltico	40
XIII.	Vacíos en el agregado mineral (VAM)	41

XIV.	Especificaciones para cementos asfálticos. Clasificados por su viscosidad a 60°C	44
XV.	Requisitos de graduación para el polvo mineral.....	50
XVI.	Diseño granulométrico por el Método Marshall	52
XVII.	Diseño granulométrico por el Método Superpave	53
XVIII.	Datos de gravedad específica <i>Bulk</i> de mezcla con granulometría Marshall.....	67
XIX.	Resultados de gravedad específica <i>Bulk</i> de mezcla con granulometría Marshall.....	68
XX.	Resumen densidad <i>Bulk</i> vs porcentaje de bitumen	68
XXI.	Datos de gravedad específica teórica máxima con granulometría Marshall.....	70
XXII.	Resumen densidad teórica máxima vs porcentaje de bitumen	71
XXIII.	Resumen densidad teórica máxima vs porcentaje de bitumen	72
XXIV.	Datos de Estabilidad y Flujo Marshall	74
XXV.	Resumen flujo vs porcentaje de bitumen	75
XXVI.	Resumen de Estabilidad vs porcentaje de bitumen	76
XXVII.	Resumen de datos VAM	77
XXVIII.	Datos de gravedad específica <i>Bulk</i> de mezcla con granulometría Superpave.....	79
XXIX.	Resultados de gravedad específica <i>Bulk</i> de mezcla con granulometría Superpave.....	80
XXX.	Resumen de densidad vs porcentaje de bitumen	80
XXXI.	Datos de gravedad específica teórica máxima de mezcla con granulometría Superpave.....	82
XXXII.	Resumen densidad teórica máxima vs porcentaje de bitumen	83
XXXIII.	Porcentaje de vacíos.....	84
XXXIV.	Datos Estabilidad y Flujo Marshall	86
XXXV.	Resumen Flujo vs porcentaje de bitumen	87

XXXVI.	Resumen Estabilidad vs porcentaje de bitumen	88
XXXVII.	Resumen de datos VAM	89
XXXVIII.	Parámetros y resultados para estabilidad	91
XXXIX.	Resultado de ensayo de estabilidad	92
XL.	Parámetros y resultados de flujo Marshall	93
XLI.	Resultados de ensayo de flujo Marshall	94
XLII.	Parámetros y resultados de gravedad específica <i>Bulk</i> diseño Marshall	95
XLIII.	Parámetros y resultados porcentaje de vacíos	97
XLIV.	Parámetros y resultado porcentaje de vacíos	98
XLV.	Parámetros y resultados de vacíos	98
XLVI.	Parámetros y resultados VAM	100

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
AC	<i>Asphalt cement.</i>
cS	<i>centiStokes.</i>
ESAL	<i>Equivalent simple axial load</i> (factor de equivalencia de carga).
G_{mb}	Gravedad específica <i>bulk</i> de la mezcla asfáltica.
G_{se}	Gravedad específica efectiva de los agregados.
G_{mm}	Gravedad específica teórica máxima de la mezcla asfáltica.
kPa	Kilopascal.
lbf	Libras-fuerza.
A	Masa del espécimen de mezcla asfáltica.
B	Masa del espécimen de mezcla asfáltica saturado y con superficie seca
C	Masa del espécimen de mezcla asfáltica sumergido en agua.
D	Masa del picnómetro lleno de agua.
E	Masa del picnómetro con la muestra y lleno de agua.
Pa-s	Pascales-segundo.
P_{ac}	Porcentaje de ligante asfáltico en relación al total de la masa de la mezcla.
VA	Porcentaje de vacíos.

psi

Pounds-force per square inch (libras-fuerza por pulgada cuadrada).

GLOSARIO

Aglomerante	Material que en estado pastoso y con consistencia variable, es capaz de unir fragmentos de una o varias sustancias y dar cohesión al conjunto.
AASHTO	Siglas en inglés para la American Association of State Highway and Transportation Officials (La Asociación Americana de Oficiales de Carreteras Estatales y Transportes)
ASTM	Siglas en inglés para la American Society of Testing Materials (Asociación Americana de Ensayos de Materiales).
Agregado pétreo	Agregado proveniente de la trituración de roca, de piedra o de un peñasco.
Anillo dinamométrico	Instrumento utilizado para conocer la carga de compresión aplicada en una máquina de ensayo.
Bomba de vacío	Máquina utilizada para extraer, impulsar o elevar moléculas de gas de un volumen sólido.
Cemento asfáltico	Aglomerante proveniente de la fracción pesada de la destilación del petróleo crudo.

Contenido de asfalto	Cantidad de asfalto que se adiciona a la mezcla de agregados pétreos para obtener las cualidades deseadas de la mezcla
Deformímetro	Instrumento que mide desplazamientos lineales.
Densidad	Relación que existe entre la masa y el volumen que ocupa una sustancia.
Estabilidad	Capacidad de la mezcla asfáltica para resistir desplazamiento y deformación bajo la aplicación de carga.
Fluencia	Deformación en centésimas de pulgada de la briqueta, bajo la carga de estabilidad Marshall.
Granulometría	Distribución de los diferentes tamaños de las partículas de un agregado.
Gravedad específica	Propiedad obtenida de la comparación de la densidad de una sustancia con la densidad de una sustancia patrón.
Ligante	Material cuya función es de pegar o unir partículas de otros materiales.
Manómetro	Instrumento utilizado para medir la presión de un fluido, especialmente de los gases.

PG	Siglas en inglés para clasificar un cemento asfáltico <i>Performance Grade</i> (Grado de Desempeño).
Picnómetro	Instrumento de medición utilizado para conocer la densidad o peso específico de un fluido líquido o sólido.
Poise	Unidad de viscosidad dinámica que equivale a un dina sobre una superficie de un centímetro cuadrado.
Polvo mineral	Material que pasa el tamiz núm. 200 utilizado como relleno mineral en la mezcla asfáltica.
Probeta	Pieza sometida a ensayos para estudio del material del que está hecha.
Reología	Rama de la física de medios continuos que se dedica al estudio de la deformación y el fluir de la materia.
SHRP	Siglas en inglés para la Strategic Highway Research Program (Programa de Investigación Estratégica de Carreteras).
Vacíos de aire	Espacios pequeños de aire o bolsas de aire, que están presentes entre las partículas de la mezcla asfáltica.
Viscosidad	Medida de la resistencia a la deformación de un fluido producida por fuerzas cortantes.

RESUMEN

Para diseñar una mezcla asfáltica con las características que cumplan las especificaciones de la Dirección General de Caminos, se debe de emplear agregados y cemento asfáltico de calidad óptima. Al obtener resultados positivos en los ensayos de las materias primas de la mezcla asfáltica se procede al diseño granulométrico del mismo. De este diseño se habla en el presente trabajo de investigación. Se conocen las especificaciones más utilizadas en el diseño Marshall que se establece en la norma ASTM D 3515 y se comparara con las especificaciones de graduación Superpave para agregado, esto en el tamaño máximo nominal de $\frac{3}{4}$ ".

En la primera parte de la investigación se habla de las características de los materiales y la metodología de los diseño a utilizar. Se especifica la calidad de los agregados y cemento asfáltico según las Especificaciones Generales para la Construcción de Carreteras y Puentes de la Dirección General de Caminos.

En la segunda parte del trabajo se muestran los diseños granulométricos evaluados para los dos tipos de mezclas asfálticas a utilizar, siguiendo la metodología de diseño de mezclas asfálticas Marshall. Los datos obtenidos en los distintos ensayos realizados se muestran en tablas resumen y gráficas para su posterior interpretación.

En la tercera parte se muestra la combinación de resultados para los dos diseños granulométricos y se comparan con las especificaciones de la Dirección General de Caminos para determinar si las propiedades de los dos diseños

granulométricos cumplen en sus características físicas y propiedades mecánicas para utilizarse en un pavimento flexible.

OBJETIVOS

General

Determinar las diferentes características del diseño de granulometría para mezclas asfálticas en caliente por medio de las especificaciones de la Dirección General de Caminos y el Método de Abertura de Tamices elevado a la potencia 0,45.

Específicos

1. Caracterizar el comportamiento de las mezclas asfálticas por dos métodos de granulometría para determinar los cambios físicos y mecánicos que se obtienen de los ensayos del diseño de mezclas asfálticas por el método Marshall.
2. Utilizar un cemento asfáltico AC-40 para mejorar la resistencia a la temperatura y un mejor recubrimiento en las partículas de agregado.
3. Determinar cómo se modifica el porcentaje de vacíos para cada granulometría y establecer cuál de las dos varía de una mejor forma el porcentaje de vacíos.

INTRODUCCIÓN

Dentro de los parámetros para realizar un diseño de mezcla asfáltica se aplican varios ensayos físicos y mecánicos para optimizar su rendimiento dentro de una estructura de pavimento. Los requerimientos para poder diseñar una mezcla asfáltica para Guatemala se encuentran en la sección 400 de las Especificaciones Generales para la Construcción de Carreteras y Puentes de la Dirección General de Caminos. Uno de los parámetros que se da es el que respecta a la granulometría, el cual nos muestra las cantidades máximas y mínimas de los porcentajes a utilizar en el tamaño de los agregados pétreos para poder ser utilizados; Estos parámetros son demasiado generales dado que, aunque se cumpla con las especificaciones de la granulometría, la mezcla asfáltica puede no cumplir en otro parámetro como lo son el porcentaje de vacíos, estabilidad y deformación.

Cuando se creó el método Superpave (*Superior Performing Asphalt Pavement*), los parámetros de granulometría se vieron afectados y por lo tanto se definió una nueva granulometría más eficiente en lo que respecta a la abertura de los tamices para graficar. La abertura de los tamices se eleva a la potencia 0,45, con lo cual los porcentajes de material pétreo a utilizar se ven afectados directamente.

Adicionalmente se debe entender que al utilizar una granulometría para un método de diseño diferente (el método Superpave es aquel en el cual los cementos asfálticos se clasifican por grado de rendimiento PG y se le puede incluir polímeros para modificar su resistencia), la calidad del cemento asfáltico debe mejorarse.

1. MARCO TEÓRICO

1.1. Composición del asfalto

El asfalto, también denominado betún o bitumen, es un material viscoso, pegajoso y de color oscuro. Se utiliza mezclado con arena y agregados pétreos para pavimentar caminos y como revestimiento impermeabilizante de muros y techados. En las mezclas asfálticas es usado como aglomerante para la construcción de carreteras, autovías o autopistas. Está presente en el petróleo crudo.

1.1.1. Estructura química de los asfaltos

Cuando el asfalto es disuelto en n-heptano, los materiales duros son precipitados, estos materiales son llamados asfáltenos, nombre propuesto por Boussingault en 1837. Existen otras fracciones asfálticas precipitadas por otros solventes, pero esta es la mejor manera de distinguir a estos materiales como insolubles en n-pentano.

Las sustancias solubles en n-heptano se denominan en general petrolenos, también llamados máltenos. Las resinas se encuentran en los petrolenos, pueden ser parcialmente precipitadas por algunos solventes o absorbidas de los petrolenos por medio de arcillas u otros minerales activados. Estas resinas, previamente absorbidas, pueden pasar a un proceso de desorción del mineral por solventes previamente seleccionados.

1.1.2. Asfaltenos

Son estructuras complejas de compuestos aromáticos de color negro o marrón que contienen, además del carbón, otros elementos químicos tales como nitrógeno, azufre, oxígeno; en general, son compuestos polares, de alto peso molecular.

1.1.3. Máltenos

Son sustancias solubles en normal h-heptano y están constituidos por resinas, saturados y aromáticos.

Son compuestos muy polares de color marrón o marrón claro, sólido o semisólido, soluble en n-heptano y, al igual que los asfáltenos, son compuestos de carbón, hidrógeno y cantidades menores de nitrógeno, oxígeno y azufre. Las resinas son materiales muy adhesivos y actúan como dispersantes o peptizantes de los asfáltenos.

1.1.4. Aromáticos

Los aromáticos constituyen entre el 40 y 65 % de la composición total de los asfaltos, son las fracciones de menor peso molecular en la estructura de los asfaltos, representan la mayor proporción de los dispersantes de los asfáltenos peptizados. Los aromáticos son compuestos en los cuales predominan las moléculas insaturadas de peso molecular de entre 300 a 2 000, no polares, con especial capacidad para actuar como disolventes de otras cadenas hidrocarbonadas de alto peso molecular.

1.1.5. Saturados

Son cadenas lineales y ramificadas, saturadas, no polares.

1.2. Datos importantes del diseño de mezclas asfálticas en caliente

Para diseñar una mezcla asfáltica en caliente se necesita tener material pétreo y cemento asfáltico, AC; la buena calidad y dosificación de los materiales son la clave para obtener una mezcla asfáltica en caliente de buena calidad.

Los materiales pétreos triturados presentan un mejor rendimiento que los materiales de canto rodado, por lo que es muy importante saber el origen del material. Otro dato importante es saber el origen de la roca del agregado, si es de origen calizo o basáltico.

El cemento asfáltico, AC; es de características variables y las propiedades mejoran conforme el grado de viscosidad aumenta. Pero cabe mencionar que el uso del AC se determina por la temperatura ambiental que afectará la región.

1.3. Empleo y función de las mezclas asfálticas

Las mezclas asfálticas se emplean en la construcción de pavimentos, ya sea en capas de rodadura o en capas inferiores, su función es proporcionar una superficie de rodamiento cómoda, segura y económica a los usuarios de las vías de comunicación, facilitando la circulación de los vehículos, aparte de transmitir suficientemente las cargas debidas al tráfico a las capas inferiores que conforman el pavimento, para que sean soportadas por este.

Las mezclas asfálticas sirven para soportar directamente las acciones de los neumáticos y transmitir las cargas a las capas inferiores, proporcionando unas condiciones adecuadas de rodadura, cuando se emplean en capas superficiales; y como material con resistencia simplemente estructural o mecánica en las demás capas de los pavimentos.

Como material simplemente estructural se pueden caracterizar de varias formas. La evaluación de parte de sus propiedades por la cohesión y el rozamiento interno es comúnmente utilizada; o por un módulo de rigidez longitudinal y un módulo transversal, o incluso por un valor de estabilidad y de deformación.

Como en otros materiales hay que considerar también la resistencia a la rotura, las leyes de fatiga y las deformaciones plásticas. El comportamiento de la mezcla depende de circunstancias externas a ellas mismas, tales como el tiempo de aplicación de la carga y de la temperatura.

Por esta causa, su caracterización y propiedades tienen que estar vinculadas a estos factores, temperatura y duración de la carga, lo que implica la necesidad del conocimiento de la reología del material. Las cualidades funcionales del firme residen fundamentalmente en su superficie. De su acabado y de los materiales que se hayan empleado en su construcción dependen aspectos tan interesantes y preocupantes para los usuarios como:

- La adherencia del neumático al firme
- Las proyecciones de agua en tiempo de lluvia
- El desgaste de los neumáticos
- El ruido en el exterior y en el interior del vehículo
- La comodidad y estabilidad en marcha

- Las cargas dinámicas del tráfico
- La resistencia a la rodadura (consumo de carburante)
- El envejecimiento de los vehículos
- Las propiedades ópticas

1.4. Antecedentes del diseño de mezcla Superpave

El método Superpave se creó por medio del Programa Estratégico de Investigación de Carreteras, (conocido por sus siglas en inglés como SHRP), sobre el diseño de mezclas asfálticas en caliente.

Actualmente en Guatemala, el diseño de Superpave no se maneja, solo se han tomado factores del método de diseño para acoplarlos al diseño Marshall, el cual es el más utilizado a nivel nacional. Uno de los factores que ha implicado la no utilización de este método es por los altos costos del equipo para realizar las pruebas y la falta de actualización en los métodos de diseño por medio de los entes encargados de la aplicación de las normas de pavimentos (aunque en las Especificaciones Generales para la Construcción de Carreteras y Puentes, de la Dirección General de Caminos aparecen las especificaciones de construcción de Superpave, aún no se diseña bajo este método).

1.5. Clasificación de las mezclas asfálticas y métodos de diseño

1.5.1. Tipos de mezclas asfálticas

La clasificación de las mezclas asfálticas se divide en:

- Mezclas asfálticas en caliente
- Mezclas asfálticas tibias

- Mezclas asfálticas en frío

1.5.1.1. Mezclas asfálticas en caliente

Fabricadas con asfaltos a temperaturas elevadas, en el rango de los 150 a 170 grados centígrados. Según la viscosidad del ligante, se calientan también los agregados, para que el asfalto no se enfríe al entrar en contacto con ellos. La puesta en obra se realiza a temperaturas muy superiores al ambiente, pues en caso contrario, estos materiales no pueden extenderse y menos aún compactarse adecuadamente. Es el tipo de mezcla asfáltica más utilizada para la construcción de carreteras en Guatemala.

1.5.1.2. Mezclas asfálticas tibias

Las mezclas asfálticas tibias son un conjunto de tecnologías desarrolladas en Europa como respuesta a los problemas ambientales causados por el efecto invernadero, causado por los gases emanados de las mezclas asfálticas convencionales, para lo cual el principal objetivo de estas tecnologías es bajar las temperaturas de trabajo, principalmente de compactación en el momento de colocar las mezclas. Esto es posible mediante cuatro diferentes metodologías: reducción de la viscosidad utilizando aditivos orgánicos, asfaltos espumados, tecnologías con bases acuosas y uso de aditivos químicos (emulsiones). Por lo tanto, una alternativa al uso de las mezclas asfálticas tradicionales utilizadas en el país, es la implementación de este tipo de mezclas asfálticas tibias; con lo cual se obtendrían grandes beneficios ambientales y una reducción en los costos de producción.

1.5.1.3. Mezclas asfálticas frías

Son las mezclas fabricadas con emulsiones asfálticas, y su principal campo de aplicación es en la construcción de carreteras secundarias y bacheos. Para retrasar el envejecimiento de las mezclas abiertas en frío se suele recomendar el sellado por medio de lechadas asfálticas.

Se caracterizan por su trabajabilidad tras la fabricación, incluso durante semanas (realmente se puede almacenar para luego poder utilizarse), lo cual se debe a que el ligante permanece un largo periodo de tiempo con una viscosidad baja debido a que se emplean emulsiones con asfalto fluidificado: el aumento de la viscosidad es muy lento en los acopios, haciendo viable el almacenamiento; pero después de la puesta en obra en una capa de espesor reducido, el endurecimiento es relativamente rápido en las capas ya extendidas, debido a la evaporación del fluidificante.

Existe un grupo de mezclas en frío, el cual se fabrica con una emulsión de rotura lenta, sin ningún tipo de fluidificante; pero es menos usual, y pueden compactarse después de haber roto la emulsión. Al aumento paulatino de la resistencia se le suele llamar maduración, que consiste básicamente en la evaporación del agua procedente de la rotura de la emulsión, con el consiguiente aumento de la cohesión de la mezcla.

1.5.2. Método de diseño Marshall

Método de diseño de mezclas asfálticas, desarrollado durante la segunda Guerra Mundial; después fue adaptado para su uso en carreteras. Utiliza una estabilidad y porcentaje de vacíos como pruebas, fundamentalmente; excepto

cambios en las especificaciones, el método no ha sufrido modificación desde los años 40's.

1.5.2.1. Características de la mezcla

El concepto de Método Marshall de diseño de mezclas de pavimentación fue desarrollado por Bruce Marshall, ex-ingeniero de Bitúmenes del Departamento de Carreteras del Estado de Mississippi. El ensayo Marshall, en su forma actual, surgió de una investigación iniciada por el Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos en 1943. Varios métodos, para el diseño y control de mezclas asfálticas fueron comparados y evaluados para desarrollar un método simple. El Cuerpo de Ingenieros decidió adoptar el Método Marshall, desarrollarlo y adaptarlo para diseño y control de mezclas de pavimento bituminoso en el campo, debido en parte a que el método utilizaba equipo portátil. A través de una extensa investigación de pruebas de tránsito y de estudios de correlación, en laboratorio, el Cuerpo de Ingenieros mejoró y agregó ciertos detalles al procedimiento del ensayo Marshall y posteriormente criterios de diseño de mezclas. El propósito del Método Marshall es determinar el contenido óptimo de asfalto, para una combinación específica de agregados. El método también provee información sobre propiedades de la mezcla asfáltica en caliente y establece densidades y contenidos óptimos de vacío que deben ser cumplidos durante la construcción del pavimento.

El Método *Marshall*, sólo se aplica a mezclas asfálticas en caliente (aunque se usa satisfactoriamente para el diseño de mezclas tibias y frías con ligeras variantes en su diseño) de pavimentación que usan cemento asfáltico clasificado con viscosidad y penetración, que contiene agregados con tamaños máximo de una pulgada (25,0 mm) o menos. El método puede ser usado, para

el diseño en laboratorio, como para el control de campo de mezclas asfálticas de pavimentación.

1.5.2.2. Pruebas a las mezclas asfálticas compactadas

En el método Marshall se elaboran tres tipos de pruebas para conocer tanto sus características volumétricas como mecánicas.

1.5.2.2.1. Determinación de la gravedad específica

La prueba de gravedad específica puede desarrollarse tan pronto como el espécimen se haya enfriado en un cuarto de temperatura. Esta prueba se hace de acuerdo con la Norma ASTM D1188, gravedad específica de mezclas asfálticas compactadas utilizando parafina; o la ASTM D2726, gravedad específica de mezclas asfálticas compactadas mediante superficies saturadas de especímenes secos. Para determinar cuál norma se debe utilizar, se realizan pruebas de absorción a la mezcla asfáltica compactada; si la absorción es mayor al 2 %, se recurre a la norma ASTM D1188; en caso contrario, se emplea la norma ASTM D2726.

1.5.2.2.2. Prueba de estabilidad y flujo

Después de que la gravedad específica se ha determinado, se procede a la prueba de estabilidad y flujo, que consiste en sumergir el espécimen en un baño María a $60\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($140\text{ }^{\circ}\text{F} \pm 1,8\text{ }^{\circ}\text{F}$) de 30 a 40 minutos antes de la prueba. Con el equipo de prueba listo se remueve el espécimen colocado en baño María y cuidadosamente se seca la superficie. Ubicando y centrando el

espécimen en la mordaza inferior, se coloca la mordaza superior y se centra completamente en el aparato de carga. Posteriormente, se aplica la carga de prueba al espécimen a una deformación constante de 51 mm (5") por minuto, hasta la falla. El punto de falla se define por la lectura de carga máxima obtenida. El número total de Newtons (lb) requeridos para que se produzca la falla del espécimen, deberá registrarse como el valor de estabilidad Marshall. Mientras la prueba de estabilidad está en proceso, si no se utiliza un equipo de registro automático, se deberá mantener el medidor de flujo sobre la barra guía, y cuando la carga empiece a disminuir, se deberá tomar la lectura, y registrarla como el valor de flujo final. La diferencia entre el valor de flujo final e inicial, expresado en unidades de 0,25 mm (1/100"), será el valor del flujo Marshall.

1.5.2.2.3. Análisis de densidad y vacíos

Después de completar las pruebas de estabilidad y flujo, se lleva a cabo el análisis de densidad y vacíos para cada serie de especímenes de prueba. Se debe determinar la gravedad específica teórica máxima (ASTM D2041) para al menos dos contenidos de asfalto, preferentemente los que estén cerca del contenido óptimo de asfalto. Un valor promedio de la gravedad específica efectiva del total del agregado, se calcula de estos valores. Utilizando la gravedad específica y la gravedad específica efectiva del total del agregado, así como el promedio de las gravedades específicas de las mezclas compactadas, la gravedad específica del asfalto y la gravedad específica teórica máxima de la mezcla asfáltica, se calcula el porcentaje de asfalto absorbido en peso del agregado seco, porcentaje de vacíos (V_a), porcentaje de vacíos llenados con asfalto (VFA), y el porcentaje de vacíos en el agregado mineral (VMA).

1.5.3. Método Superpave

En 1987, el *Strategic Highway Research Program* (SHRP) fue establecido por el Congreso de los Estados Unidos con un presupuesto de 150 millones de dólares en programas de investigación, a fin de mejorar el desempeño y duración de las carreteras volviéndolas más seguras tanto para automovilistas como para los trabajadores de las mismas.

Un tercio de este presupuesto se empleó en el desarrollo de especificaciones de desempeños basados en asfalto, directamente relacionados con análisis de laboratorio y con aplicaciones en campo. Iniciando el desarrollo de un nuevo sistema para especificar materiales asfálticos, el producto final del programa es un nuevo sistema llamado Superpave (*Superior Performing Asphalt Pavement*).

Representa una tecnología provista de tal manera que pueda especificar cemento asfáltico y agregado mineral; desarrollar diseños de mezclas asfálticas; analizar y establecer predicciones del desempeño del pavimento. Este método evalúa los componentes de la mezcla asfáltica en forma individual (agregado mineral y asfalto), y su interacción cuando están mezclados.

1.5.3.1. Pruebas al agregado mineral

Las propiedades del agregado mineral son obviamente importantes para el desempeño de mezclas asfálticas. El criterio de agregados está directamente incorporado en el procedimiento Superpave. Hubo otros procedimientos que se refinaron para concordar con el sistema Superpave. Al respecto, dos tipos de propiedades de agregados se especifican en el sistema Superpave: propiedades de consenso y propiedades de origen.

1.5.3.2. Propiedades de consenso

Las propiedades de consenso del Superpave son: angularidad del agregado grueso; angularidad del agregado fino; partículas alargadas y aplanadas; y equivalente de arena.

1.5.3.3. Propiedades de la fuente de origen

Además de las propiedades de consenso, los expertos viales pensaron que había otras características críticas del agregado. Aun cuando estas son relevantes en el proceso de diseño de la mezcla, podrían también usarse como un control de aceptación de la fuente de origen. Las propiedades que se consideraron fueron: la tenacidad mediante la prueba de desgaste de Los Ángeles; la durabilidad a través de la prueba de intemperismo acelerado; y la prueba de materiales deletéreos.

1.5.3.4. Pruebas al cemento asfáltico

Las pruebas Superpave para cementos asfálticos miden propiedades físicas que pueden estar directamente relacionadas con el desempeño en campo a través de principios ingenieriles. Las pruebas Superpave para cemento asfáltico, también son llevadas a temperaturas a las que se encuentran los pavimentos en servicio.

El tema central de las especificaciones Superpave es la confianza sobre las pruebas del cemento asfáltico en condiciones que simulan las tres etapas críticas durante la vida del asfalto. Las pruebas realizadas en el asfalto original, representan la primera etapa: transportación, almacenamiento, y manejo. La segunda etapa representa el asfalto durante la producción, mezcla y

construcción; es simulada por las especificaciones mediante el envejecimiento del asfalto en el Horno Rotatorio de Película Delgada (RTFO). Este procedimiento expone una película delgada de asfalto a calor y aire para aproximar el envejecimiento que sufre el asfalto durante su mezcla y construcción.

La tercera etapa ocurre cuando envejece el cemento asfáltico desde que se coloca en la mezcla asfáltica, y carpeta asfáltica, hasta el fin de su vida de diseño para la cual fue planeado. Esta etapa se simula en la vasija de envejecimiento a presión (PAV), mediante la exposición de muestras de asfalto a calor y presión, para representar el envejecimiento del pavimento a lo largo de los años de servicio.

En la tabla I se pueden observar las pruebas utilizadas en el Superpave, y el propósito de las mismas.

Tabla I. Propósito de las pruebas de asfaltos Superpave

Equipo	Propósito
Horno Rotatorio de Película Delgada (RTFO) Vasija de Envejecimiento a Presión (PAV)	Simula las características del Envejecimiento del Asfalto
Reómetro de Corte Dinámico (DSR)	Mide las propiedades del asfalto a temperaturas altas e intermedias
Viscosímetro Rotacional (RV)	Mide las propiedades del asfalto a altas temperaturas
Reómetro de Viga en Flexión (BBR) Ensayo de Tensión Directa (DTT)	Mide las propiedades del asfalto a bajas temperaturas

Fuente: *Análisis Comparativo de los Métodos Marshall y Superpave para Compactación de Mezclas Asfálticas*. p.4.

1.5.3.5. Pruebas a las mezclas asfálticas

Los requerimientos del diseño de mezclas asfálticas de Superpave son:

1.5.3.5.1. Requerimientos volumétricos de la mezcla

Los requerimientos volumétricos de la mezcla son: vacíos de aire; vacíos del agregado mineral y vacíos llenos de asfalto. El contenido de vacíos de aire es una propiedad importante que se utiliza como base para la selección del contenido del cemento asfáltico. Superpave define los vacíos del agregado mineral (VAM), como la suma del volumen de vacíos de aire y del asfalto efectivo en una muestra compactada. Representa los vacíos entre las partículas del agregado. Los vacíos llenos de asfalto (VFA) son el porcentaje de VAM que contiene cemento asfáltico. Consecuentemente, VFA es el volumen de cemento asfáltico efectivo, expresado como el porcentaje de VAM.

1.5.3.5.2. Proporción de polvo

Otro requerimiento de la mezcla es la proporción de polvo; se calcula como la relación entre el porcentaje en peso del agregado más fino que el tamiz 0.075 mm y el contenido de asfalto efectivo en porcentaje de peso total en la mezcla, menos el porcentaje de asfalto absorbido.

1.5.3.5.3. Susceptibilidad a la humedad

El ensayo de susceptibilidad a la humedad para evaluar una HMA al desprendimiento es la Norma AASHTO T-283, Resistencia de mezclas bituminosas compactadas al daño inducido por humedad. Este ensayo, que no

se basa en el desempeño, sirve para dos propósitos; primero, identificar si una combinación de cemento asfáltico y agregado es susceptible a la acción del agua; segundo, mide la efectividad de los aditivos anti desprendimiento o de mejora de adherencia.

1.5.4. Proporción de vacíos en una mezcla asfáltica

1.5.4.1. Análisis de vacíos

Los vacíos son las pequeñas bolsas o separaciones de aire que se encuentran entre las partículas de agregado revestidas de asfalto. El porcentaje de vacíos se calcula a partir del peso específico de las probetas compactadas y la gravedad específica teórica máxima.

Los vacíos en una mezcla asfáltica son de una gran importancia, ya que de ellos depende en gran parte la durabilidad de la carpeta de rodadura. La dosificación en los agregados pétreos como el tipo de cemento asfáltico impactan directamente en esta propiedad. Otros aspectos que influyen en esta propiedad son la temperatura y el tipo de compactación.

Cuando no se controlan de una forma adecuada, pueden causar una capa de rodadura muy porosa y permeable, facilitando la oxidación y envejecimiento de la mezcla asfáltica.

Tabla II. **Requerimientos de vacíos en la mezcla asfáltica**

Método de Diseño	Valores Limites	
	Mínimo	Máximo
Marshall (AASHTO T 245)		
Porcentaje de Vacíos de la Mezcla Asfáltica Compactada	3	5

Fuente: Dirección General de Caminos. *Especificaciones Generales para la Construcción de Carreteras y Puentes*. p. 401-7.

1.6. **Granulometrías utilizadas para diseño de mezclas Superpave y Marshall**

Las granulometrías utilizadas para el diseño de mezclas asfálticas dependen de las especificaciones técnicas de los distintos métodos de diseño. En este caso se analizarán los métodos de diseño granulométrico Marshall y Superpave.

1.6.1. **Diseño de granulometría Superpave**

La aparición de nuevos criterios para la evaluación de la graduación de agregados, es debido al surgimiento de la metodología de diseño Superpave, la cual forma parte del programa estratégico de investigación en carreteras (*Strategic Highway Research Program, SRHP*), el cual está dirigido a mejorar el desempeño y vida útil de las carreteras.

1.6.2. **Agregados minerales Superpave**

Los diferentes criterios establecidos por el método Superpave para la evaluación de los agregados minerales para mezclas asfálticas en caliente, los

cuales forma parte del programa estratégico de investigación en carreteras (*Strategic Highway Research Program*, SRHP), el cual está dirigido a mejorar el desempeño y vida útil de los pavimentos. Los investigadores de SHRP confiaron en la experiencia de esos expertos y en la suya propia para identificar dos categorías de propiedades de los agregados que se necesitan en el sistema de Superpave, si bien no se desarrolló ningún nuevo procedimiento para ensayar agregados, si se refinaron los procedimientos existentes para adaptarlos al sistema, estas propiedades son: las propiedades de consenso y las propiedades de la fuente de origen; así como también una nueva forma de especificación granulométrica del agregado; esto se llama estructura del agregado de diseño.

1.6.2.1. Propiedades de consenso

Las propiedades de consenso son consideradas críticas para alcanzar un alto comportamiento de la mezcla asfáltica y se asocian a la calidad del agregado para producir una mezcla resistente y durable. Estas propiedades son:

- Angularidad del agregado grueso (caras fracturadas)
- Angularidad del agregado fino (vacíos sin compactar)
- Partículas planas y alargadas
- Contenido de arcilla

Hay requerimientos estándar para esas propiedades de los agregados. Las normas de consenso varían en función del nivel del tránsito y de la posición de los agregados en la estructura del pavimento. Los materiales ubicados cerca de la superficie del pavimento, sujetos a altos niveles de tránsito, demandan normas de consenso más exigentes.

Estas propiedades se aplican a una mezcla de agregados propuesta antes que a los componentes individuales, no obstante, en la realidad corrientemente aplican estos requerimientos a agregados individuales con el objeto de identificar así un componente indeseable. A continuación se define cada una de las propiedades y se presentan los requerimientos establecidos por la metodología Superpave.

1.6.2.1.1. Angularidad del agregado grueso

Esta propiedad asegura un alto grado de fricción interna del agregado y resistencia al ahuellamiento. Se define como el porcentaje en peso del agregado mayor de 4,75 mm con una o más caras fracturadas (Norma ASTM D 5821).

Muchos Departamentos de Transporte de los E.E.U.U tienen protocolos para medir la angularidad del agregado grueso. Se considera una cara fracturada si el área proyectada es mayor o igual al 25% del área máxima proyectada y la cara es puntiaguda y margen bien definido. La determinación es subjetiva y es considerada buena.

Uno de los propósitos de esta estimación es maximizar la resistencia al corte, mediante el incremento de la fricción entre partículas de las mezclas de agregado. Otro propósito es proveer estabilidad para tratamientos superficiales de agregados mediante el incremento de la fricción y textura del agregado utilizado carpetas asfálticas delgadas.

Tabla III. **Muestra de valores mínimos requeridos para la angularidad del agregado grueso en función del nivel de tránsito y la posición en el pavimento**

Tránsito en 10 ⁶ ESALs	Prof. Desde la sup. < 100mm	Prof. Desde la sup. > 100mm
< 0.3	55/-	
< 1	65/-	
< 3	75/-	50/-
< 10	85/80	60/-
< 30	95/90	80/75
< 100	100/100	95/90
≥100	100/100	100/100

85/80, 85 % del agregado grueso tiene una cara fracturada y 80 % tiene dos caras fracturadas.

Fuente: Instituto Mexicano del Transporte. *Influencia de la Granulometría en las propiedades volumétricas de la mezcla asfáltica*, publicación núm. 299. p. 23,24.

1.6.2.1.2. Angularidad del Agregado Fino

Esta propiedad asegura un alto grado de fricción interna del agregado fino y provee resistencia al ahuellamiento. Se define como el porcentaje de vacíos de aire presente en los agregados menores de 2.36 mm, levemente compactados (Norma ASTM C1252). Contenidos de vacíos mayores, significan más caras fracturadas.

Tabla IV. **Requerimientos de Superpave para la angularidad del agregado fino**

Tránsito en 10⁶ ESALs	Prof. Desde la sup. < 100mm	Prof. Desde la sup. > 100mm
< 0.3	-	-
< 1	40	-
< 3	40	40
< 10	45	40
< 30	45	40
< 100	45	45
≥100	45	45

Los valores son los porcentajes de vacíos para los agregados finos levemente compactados.

Fuente: Instituto del Transporte. *Influencia de la Granulometría en las propiedades volumétricas de la Mezcla Asfáltica*, publicación núm. 299. p. 23,24.

1.6.2.1.3. Partículas planas y alargadas

El concepto es el porcentaje en peso del agregado grueso cuya relación entre las dimensiones máximas y mínima es mayor que 5. Las partículas alargadas son indeseables porque tienden a quebrarse durante la construcción y bajo tránsito. El procedimiento es la norma ASTM D 4791.

Tabla V. **Requerimientos de Superpave para las partículas chatas y alargadas**

Tránsito en 10⁶ ESALs	Porcentaje
< 0,3	-
< 1	-
< 3	10
< 10	10
< 30	10
< 100	10
≥100	10

Los valores son los porcentajes de vacíos para los agregados finos levemente compactados.

Fuente: Instituto Mexicano del Transporte. *Influencia de la Granulometría en las propiedades volumétricas de la Mezcla Asfáltica*, publicación núm 299. p. 23,24.

1.6.2.1.4. Contenido de Arcilla

El contenido de arcilla, es el porcentaje de material arcilloso presente en la fracción de agregado menor de 4,75 mm (norma AASHTO T 176 ó ASTM 2419).

Tabla VI. **Requerimientos de Superpave para el contenido de arcilla**

Tránsito en 10⁶ ESALs	Porcentaje
< 0,3	40
< 1	40
< 3	40
< 10	45
< 30	45
< 100	50
≥100	50

Fuente: Instituto Mexicano del Transporte. *Influencia de la Granulometría en las propiedades volumétricas de la Mezcla Asfáltica*, publicación núm. 299. p. 23,24.

1.6.3. Análisis de la granulometría Superpave

A continuación se discutirán los diferentes criterios establecidos por el método Superpave para la evaluación de una granulometría para mezclas asfálticas en caliente.

La aparición de nuevos criterios para la evaluación de la graduación de agregados es debido al surgimiento de la metodología de diseño Superpave, la cual forma parte del programa estratégico de investigación en carreteras (*Strategic Highway Research Program*, SRHP), el cual está dirigido a mejorar el desempeño y vida útil de las carreteras.

1.6.3.1. Gráfica elevada al exponente 0,45

Para especificar la granulometría, Superpave ha modificado el enfoque de la granulometría Marshall, tomando en consideración recomendaciones de la FHWA. Emplea el exponente 0,45 en la carta de granulometría para definir la

granulometría permitida (gráfica de Fuller), mediante una técnica grafica única para juzgar la distribución de tamaños acumulados de partículas de una mezcla de agregados. Las ordenadas de la carta son los porcentajes que pasan en escala aritmética, las abscisas representan las aberturas de los tamices en mm elevadas a la potencia 0,45.

1.6.3.2. Origen de la gráfica de Fuller

La curva de distribución granulométrica de un material grueso, no uniforme, o gráfica de Fuller tiene su origen en la ecuación de Fuller, la cual representa condiciones de máxima densidad y mínimo de vacíos en el agregado mineral (VMA), la ecuación de Fuller se describe a continuación:

$$P_i = \left(\frac{D_i}{D_{max}} \right)^n$$

Dónde:

P_i= acumulado que pasa, en decimal, para el diámetro de la partícula D_i

D_i= diámetro de la partícula

D_{max}= tamaño máximo de material

n= valor asociado a la forma de la curva

Con la expresión de Fuller, la graduación de agregados para una mezcla asfáltica se puede expresar por un par de números, esto es, un coeficiente de forma (n) y el tamaño máximo (D_{max}). La literatura sugiere que cuando el factor de forma tiene un valor de 0,45 la mezcla es capaz de alcanzar las máximas densidades cuando se compacta. Lo que hay que resaltar aquí es que solo las curvas con n igual o cercana a 0,45 producen la máxima densificación; aunque esto se ha desvirtuado en la actualidad.

La figura 1 muestra la representación con el diámetro elevado a la potencia de 0.45 que fue introducida en los años 60's por la FHWA (*Federal Highway Association*) de Estados Unidos. Esta representación permite visualizar la línea de máxima densificación y evitar que la curva de graduación de diseño caiga encima de ella. En general, la curva de máxima densificación es temida porque produciría inaceptablemente bajos valores de vacíos en el agregado mineral VMA.

1.6.3.3. Importancia de la gráfica de Fuller

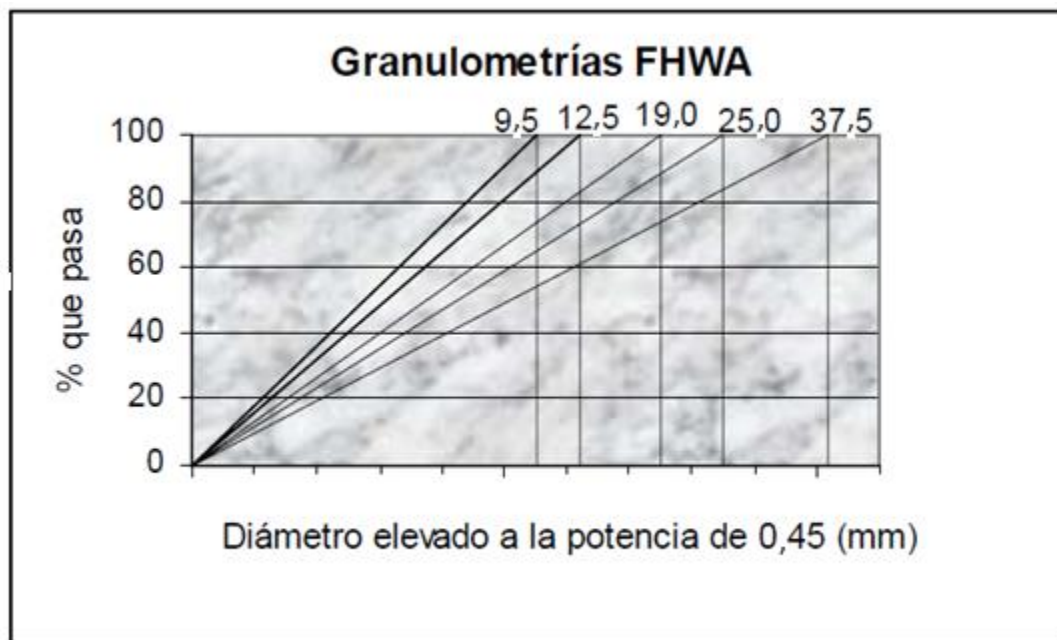
La importancia de usar la gráfica de Fuller, es que permite expresar la graduación de agregados en una mezcla asfáltica con dos números (n_i/D_i). el primer número está referido a la forma de la curva y a la estructura y arreglo geométrico de la potencial masa compactada, mientras el otro se refiere al tamaño máximo del agregado. Esto facilita la expresión y manejo de la graduación, de las especificaciones granulométricas y hasta la definición de la buena graduación y el potencial de densificación de la mezcla.

El ajuste de Fuller también puede servir para controlar la variabilidad de la producción diaria de la mezcla en planta. Este método para evaluar la variabilidad de una granulometría aventaja al método tradicional de tolerancias de mallas individuales, pues aquel considera a la graduación de manera integral; las tolerancias individuales introducen de por sí un sesgo muy significativo que afecta principalmente al contratista.

Una combinación de agregados es un todo, de esto pueden dar fe los manejadores de plantas trituradoras y cribadoras que cuando intentan modificar el porcentaje que pasa de un tamaño, los otros se alteran irremediablemente.

Se observa que hay una influencia igualitaria de D_{max} y n en la trabajabilidad. En el ámbito de las graduaciones de Superpave, la facilidad de manejo y colocación aumenta a medida que las mezclas tienen a la vez tamaños máximos más pequeños y estructuras más densas. Una mezcla densa y otra abierta tienen significativamente diferentes trabajabilidades para un mismo tamaño máximo.

Figura 1. **Representación gráfica de granulometrías según la FHWA**



Fuente: Instituto Mexicano del Transporte. *Influencia de la Granulometría en las propiedades volumétricas de la Mezcla Asfáltica*, publicación núm. 299. p. 3.

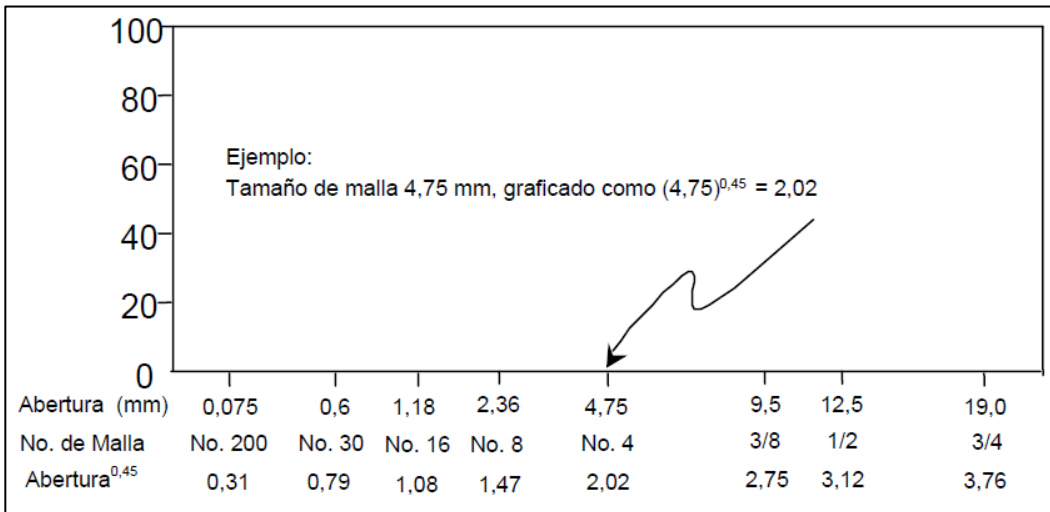
Un rango importante de esta carta es la granulometría de máxima densidad; la cual corresponde a una línea recta extendida desde la abscisa de tamaño máximo de agregado y ordenada 100 %, hasta el origen (0 %, 0 mm).

1.6.3.4. Diseño de la granulometría Superpave

Para especificar la granulometría, Superpave ha modificado un enfoque ya en uso en algunas agencias. Utiliza el exponencial 0.45 en la carta granulométrica para definir una granulometría permitida. Esta carta usa una técnica grafica única para juzgar la distribución de tamaños acumulados de partículas de una mezcla de agregados. Las ordenadas de la carta son los porcentajes que pasan, las abscisas en escala aritmética representan las aberturas de los tamices en mm elevadas a la potencia 0,45.

La figura 2, muestra como es la escala de las abscisas; en este ejemplo el tamiz de 4,75 mm es dibujado a 2,02 unidades a la derecha del origen de coordenadas ($4,75^{0,45} = 2,02$).

Figura 2. Ilustración de cómo se grafican las abscisas



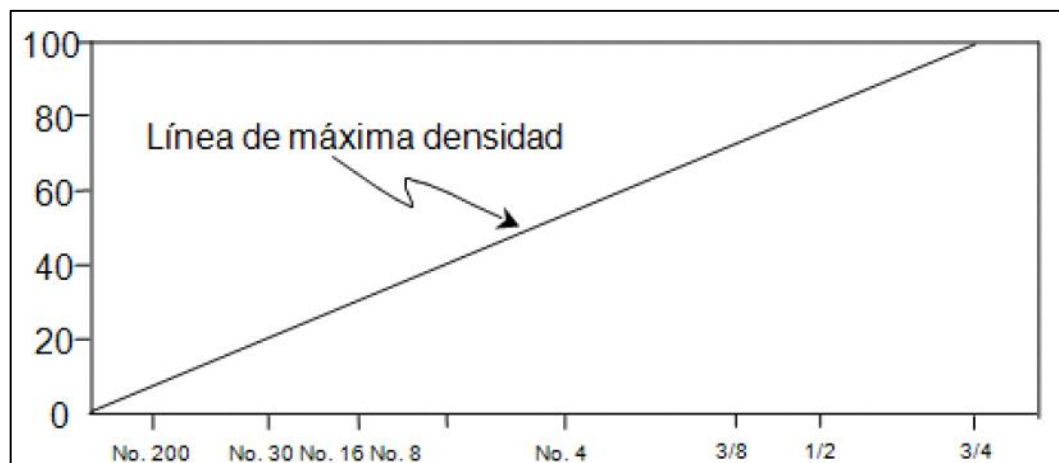
Fuente: Instituto Mexicano del Transporte. *Influencia de la Granulometría en las propiedades volumétricas de la Mezcla Asfáltica*, publicación núm. 299. p. 4.

Superpave emplea la serie estándar de tamices de ASTM y las siguientes definiciones con respecto al tamaño del agregado.

- Tamaño máximo nominal: Tamaño de tamiz mayor que el primer tamiz que retiene más del 10 %.
- Tamaño máximo: Tamaño de tamiz mayor que el tamaño máximo nominal.

La granulometría de máxima densidad (figura 3) representa la graduación para la cual las partículas del agregado se acomodan entre si conformando el arreglo volumétrico más compacto posible.

Figura 3. **Graduación de máxima densidad para tamaño máximo nominal de 19,00 mm**



Fuente: Instituto Mexicano del Transporte. *Influencia de la Granulometría en las propiedades volumétricas de la Mezcla Asfáltica*, publicación núm. 299. p. 5.

Evidentemente, esta granulometría debe evitarse, porque habría muy poco espacio entre los agregados como para permitir el desarrollo de un *film* de asfalto lo suficientemente grueso como para obtener una mezcla durable. La figura 3 muestra la carta granulométrica elevada a la 0,45 con la graduación de máxima densidad para un tamaño máximo del agregado de 19 mm y 12,5 mm de tamaño máximo nominal.

Para especificar la granulometría del agregado, dos conceptos adicionales se emplean: puntos de control y una zona restringida. Los puntos de control son puntos de paso obligado para la curva granulométrica. Corresponden al tamaño máximo nominal, un tamaño intermedio (2,36 mm) y un tamaño de polvo (0,075 mm).

A continuación se presentan los requerimientos de Superpave para la granulometría de los cinco tipos de mezcla asfáltica que define.

Figura 4. Distintos tipos de requerimientos para granulometrías Superpave

Tamiz, mm	Tamaño máximo nominal 37.5 mm				Tamaño máximo nominal 25.0 mm				Tamaño máximo nominal 19.0 mm				Tamaño máximo nominal 12.5 mm				Tamaño máximo nominal 9.5 mm					
	Puntos de control		Zona restringida		Puntos de control		Zona restringida		Puntos de control		Zona restringida		Puntos de control		Zona restringida		Puntos de control		Zona restringida			
	mini	máximo	mini	máximo	mini	máximo	mini	máximo	mini	máximo	mini	máximo	mini	máximo	mini	máximo	mini	máximo	mini	máximo		
50		100																				
37.5	90	100				100																
25					90	100																
19									90	100												
12.5													90	100							100	
9.5																		90	100			
4.75			34.7	34.7			39.5	39.5														
2.36	15	41	23.3	27.3	19	45	26.8	30.8	23	49	34.6	34.6	28	58	39.1	39.1	32	67	47.2	47.2		
1.18			15.5	21.5			18.1	24.1			22.3	28.3			25.6	31.6				31.6	37.6	
0.6			11.7	15.7			13.6	17.6			16.7	20.7			19.1	23.1				23.5	27.5	
0.3			10	10			11.4	11.4			13.7	13.7			15.5	15.5				18.7	18.7	
0.15																						
0.075	0	6			1	7			2	8			2	10			2	10				

Fuente: <http://www.pavementinteractive.org/superpave-gradation-requirements/>. Consulta: 20 de febrero de 2017.

1.6.3.5. Mecanismos de control de la granulometría

Históricamente las especificaciones de las granulometrías han consistido en bandas de trabajo (límite superior e inferior) en los cuales se especifica el máximo y mínimo porcentaje que pasa para cada malla. Tales especificaciones tienen una característica indeseable inherente. Las mezclas pueden estar diseñadas dentro de las especificaciones y sin embargo tener un desempeño pobre en servicio. Específicamente, estas mezclas tienen una estructura de agregado pobre y son susceptibles a la deformación permanente. De igual forma las mezclas pueden ser diseñadas demasiado densas, lo que reduce el contenido de asfalto y conduce a problemas de durabilidad.

Para especificar la granulometría del agregado, se emplearon dos conceptos: los puntos de control y la zona restringida. Los puntos de control son puntos de paso obligado para la curva granulométrica y corresponden al tamaño máximo nominal, un tamaño intermedio (2,36 mm) y un tamaño de finos (0,075 mm).

Los puntos de control fueron seleccionados para cumplir objetivos específicos, los cuatro puntos de control superiores, mínimo 100 % que pasa la malla de tamaño máximo, 90 a 100 % pasando la malla del tamaño máximo nominal y 90 % máximo que pasa la malla menor inmediata que la del tamaño máximo nominal, se utilizan para verificar que se cumpla con la definición de tamaño máximo nominal y tamaño máximo.

Los cuatro puntos de control inferiores sirven para propósitos diferentes. Los requerimiento máximos y mínimos para la malla No. 200 (75 μ m), son típicamente para mezclas asfálticas de granulometría cerrada. Otras mezclas

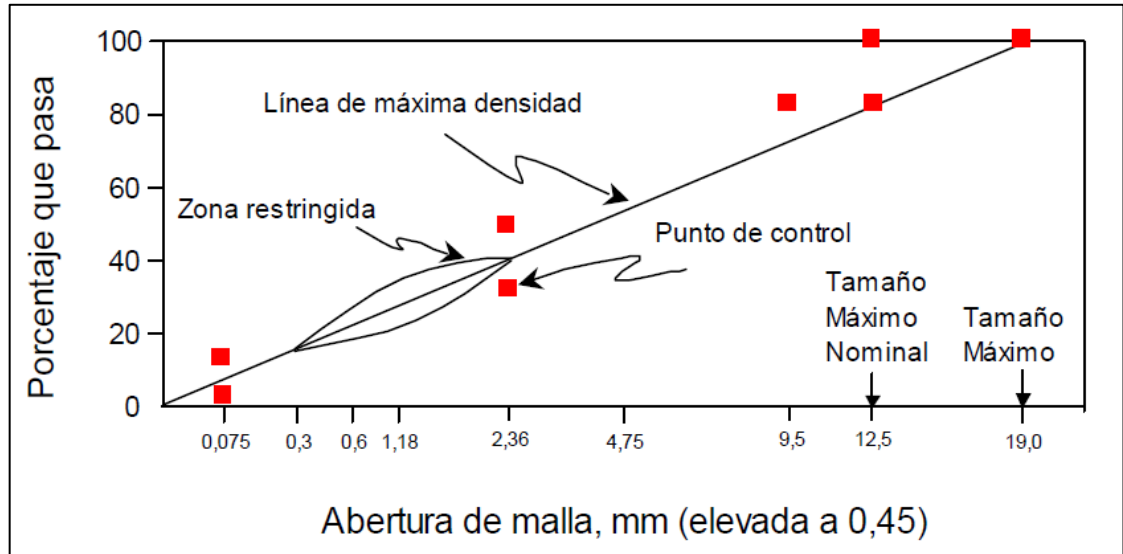
como las SMA, las cuales tienen porcentajes que pasan la malla No. 200 de 10 a 14 % no cumplen con esta especificación..

Los puntos de control para la malla No 8 (2,36 mm), son utilizados para controlar partículas con tamaño de arena en la mezcla. El punto superior limita la cantidad de arena en la mezcla con el fin de evitar mezclas asfálticas arenosas las cuales generalmente no cumplen con las especificaciones. El punto inferior asegura una cantidad de arena adecuada en la mezcla para cumplir con los requerimientos de una granulometría densa. Una granulometría con granulometría abierta (*open graded*) o mezcla porosa no cumplirá con estos puntos de control.

La zona restringida ha sido especificada para asegurarse que se desarrolla una adecuada estructura en la mezcla. La zona restringida se ubica entre los tamaños intermedios (4,75 o 2,36 mm) y 0,3 mm. Forma una banda por la cual la curva granulométrica no deberá pasar. Se especifica que las granulometrías deben pasar ya sea abajo o arriba de la zona. Mezclas que pasan por arriba tenderán a ser arenosas y a tener estructuras de agregado débiles en comparación con las que pasan debajo de la zona restringida.

Granulometrías que pasan a través de la zona de restricción (desde abajo), se llaman "*humped graduations*" (graduaciones con joroba) por la forma característica de joroba que se forma en la curva al pasar por aquella zona. En la mayoría de los casos, estas curvas indican una mezcla con mucha arena fina en relación con el total de la arena. Las granulometrías que violan la zona restringida poseen un esqueleto granular débil que depende demasiado de la rigidez del cemento asfáltico para alcanzar una mezcla con resistencia al corte. La figura 5 muestra un esquema para un tamaño máximo de agregado de 19 mm.

Figura 5. Límites para las granulometrías Superpave



Fuente: Instituto Mexicano del Transporte. *Influencia de la Granulometría en las propiedades volumétricas de la Mezcla Asfáltica*, publicación núm. 299. p. 5.

1.6.3.6. La zona restringida

El Reporte SHRP-A-408 de la SHRP, resume el desarrollo de los aspectos de diseño volumétrico de Superpave bajo el Programa Estratégico de Investigación de Carreteras (SHRP). Bajo este programa se reunió a un grupo de expertos en el área de producción de agregados y diseño y comportamiento de mezclas asfálticas en caliente, con la finalidad de presentar ante ellos una serie de cuestionamientos consistente básicamente en siete características del agregado:

- Límites de graduación
- Caras fracturadas
- Contenido de arenas naturales

- Abrasión de L.A
- Agregados redondeados
- Materiales deletéreos
- Equivalente de arena

La respuesta para determinar qué características deberían modificarse de esta serie fue basada únicamente en acuerdos y desacuerdos acerca de las modificaciones, sin una base científica.

Una vez acordadas las características a modificar, establecieron limitaciones en los límites de graduación. De esta manera se agregaron características adicionales como mínimo/máximo tamaños de agregados, puntos de control/zona restringida y puntos de control.

La mayoría de los expertos especificaron graduaciones arriba y abajo de la zona de restricción aunque la mitad de ellos recomendaron graduaciones debajo de la zona de restricción para altas condiciones de tráfico.

Como ya se dijo, la zona de restricción forma una banda a través de la cual fue recomendado no pasar graduaciones de agregados. La zona de restricción fue adoptada para reducir la incidencia de tender o estar propensa a roderas en las HMA. Aunque la zona restringida fue incluida por Superpave como una guía recomendada, no como una especificación requerida, algunas agencias en EU la interpretaron como un requerimiento.

Según esto, la intención original de incluir una zona restringida, debido a que algunas graduaciones particularmente se ven afectadas por: 1) el uso de arenas naturales redondeadas o con distribución de tamaños limitada y 2) la proporción admisible de la fracción fina (0,15 a 0,6 mm) del total de la arena

(que pasa por 2,36 mm), fue la de ayudar a reducir la incidencia de tender o ser propenso a roderas en las HMA.

El proyecto “*Report 464 The Restricted Zone in the Superpave Aggregate Gradation Specification*”, de acuerdo con algunos expertos en EU, cumplir con el criterio de la zona de restricción, quizás no es deseable o necesario para producir mezclas que den buen comportamiento en términos de roderas.

Algunas agencias de carreteras de EU, pueden proveer ejemplos de graduaciones de agregados que pasan a través de la zona de restricción, sin embargo estas producen mezclas que presentan buen comportamiento. Por ejemplo si se tiene una mezcla de agregados con un valor alto de angularidad (p.e. valor alto de angularidad de agregado fino FAA), es probable que la mezcla no exhiba ninguna tendencia durante la construcción y sería resistente a las roderas bajo tráfico sin tener en cuenta si la graduación pasa a través de esta zona restringida. Algunos cuestionaron también la necesidad de la zona de restricción cuando las mezclas requieren propiedades volumétricas tales como el VAM y Va especificados para los números de giros Ni inicial, N diseño y N máximo en la compactación giratoria.

1.7. Parámetros de la Dirección General de Caminos para Método Marshall

Como ya se ha mencionado, el método de diseño Marshall es el más utilizado a nivel nacional. Los requisitos de técnicos se encuentran la Especificaciones Generales para la Construcción de Carreteras y Puentes de la Dirección General de Caminos.

1.7.1. Requisitos de los materiales pétreos

Los agregados pétreos ocupan alrededor del 94 % del total de la mezcla asfáltica, por lo cual mantener su control de calidad es de suma importancia para obtener una calidad óptima.

1.7.1.1. Especificaciones para el agregado grueso

El agregado grueso es todo aquel material retenido en el tamiz de 4,75 mm, proveniente de roca, piedra o grava triturada. El material deberá presentar las características mostrados en la tabla VII.

Tabla VII. **Requisitos del agregado grueso**

Ensayo	Especificación
Abrasión, AASHTO T 96	35 % máximo
Desintegración al Sulfato de Sodio (5 ciclos), AASHTO T 104	12 % máximo
Caras fracturadas: 1 Cara Fracturada 2 Caras Fracturadas	90 % mínimo 75 % mínimo
Partículas Planas o Alargadas, ASTM D 4791	8 % máximo

Fuente: Dirección General de Caminos. *Especificaciones Generales para la Construcción de Carreteras y Puentes*.p.401-2.

1.7.1.2. Especificaciones para el agregado fino

El agregado fino es el material que pasa el 100 % del tamiz de 4,75 mm., comprendido por arena, piedra triturada, grava tamizada, o una combinación de estas que cumplan los siguientes requisitos:

Tabla VIII. Requisitos para el agregado fino

Ensayo	Especificación
Equivalente de Arena, AASHTO T 176	35 % máximo
Índice Plástico, AASHTO T 90	12 % máximo
Graduación N° 2 o N° 3 de AASHTO M29	90 % mínimo 75 % mínimo

Fuente: Dirección General de Caminos. *Especificaciones Generales para la Construcción de Carreteras y Puentes*.p.401-2.

1.7.1.3. Mezcla compuesta de agregados

Según las especificaciones, se debe de dimensionar y combinar las fracciones de agregados en proporciones mixtas, de acuerdo con lo siguiente:

- Graduación: Las fracciones de agregado deben ser dimensionadas, graduadas y combinadas en proporciones dosificadas que resulten en una mezcla compuesta con una curva granulométrica continua, sin

queiebres bruscos, situado dentro de los límites para el tamaño máximo nominal apropiado según se indica en la tabla IX, correspondiente a las graduaciones densas.

- La mezcla del material pétreo debe de estar libre de materia vegetal, basura, terrones de arcilla o substancias que puedan causar fallas en el pavimento.
- La mezcla de agregados debe ser uniforme en calidad y densidad y su peso unitario AASHTO T 19 no debe ser menor de 1 360 kilogramos por metro cubico.
- La mezcla de agregados o de agregados y polvo mineral debe tener un índice plástico determinado según el método AASHTO T 90, menor del cuatro por ciento excepto cuando el polvo mineral esté constituido por cal hidratada o cemento hidráulico.

La graduación de los agregados pétreos tiene que cumplir con los requisitos de la siguiente tabla:

Tabla IX. **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 1/2"	1"	3/4"	1/2"	3/8"
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	
12,5 mm	35-65	-	56-80	-	90-100	100
9,5 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 máximo es el del tamiz mayor al correspondiente al tamaño máximo nominal.

Fuente: Dirección General de Caminos. *Especificaciones Generales para la Construcción de caminos*. p. 401-2.

- Cuando se necesite polvo mineral como ingrediente separado, en adición al que contiene el agregado pétreo después de su trituración, este debe consistir en: polvo de roca, cemento hidráulico, cal hidratada u otro

material inerte no absorbente, que llene, según AASHTO M 17, los requisitos siguientes:

El polvo mineral debe llenar los requisitos de graduación, determinada según AASHTO T 37, de la siguiente tabla:

Tabla X. **Requisitos de graduación para polvo mineral**

Estándar mm	Tamiz N°	Porcentaje Total que Pasa un Tamiz de Abertura Cuadrada (AASHTO T 37)
0,600	30	100 %
0,300	50	95 - 100 %
0,075	200	70 - 100 %

Fuente: Dirección General de Caminos. *Especificaciones Generales para la Construcción de caminos*. p. 401-2.

1.7.1.4. **Requisitos para el cemento asfáltico**

El tipo, grado y especificación del cemento asfáltico o del cemento asfáltico modificado con polímeros a usar, debe de ser uno de los establecidos en la tabla XI.

Para el caso de asfaltos con clasificación PG, el grado se indicará en las Disposiciones, de acuerdo con el rango comprendido entre el promedio de las temperaturas máximas durante los siete días más calurosos del año y la temperatura mínima donde se localice el proyecto, incrementando el valor de temperatura alta un grado de conformidad con el manual SP-2 del Instituto del Asfalto para tránsito lento y un grado adicional si el tránsito esperado excede ESAL de 30×10^6 en el carril de diseño, pudiéndose fijar grados intermedio

para los rangos de temperaturas indicados en la tabla XI, o grados mayores que los indicados cuando así se requiera.

El rango de las temperaturas del cemento asfáltico para la preparación de la mezcla de los especímenes en el laboratorio, será el correspondiente para producir una viscosidad cinemática entre 0,15 y 0,19 Páscale segundo (Pa-s) (150 y 190 *centiStokes* cS).

Para el diseño de mezcla asfáltica con el procedimiento Superpave, sólo se podrán usar los grados con graduación PG.

Tabla XI. **Especificaciones para el cemento asfáltico**

TIPO Y GRADO DEL CEMENTO ASFALTICO	ESPECIFICACION
Graduación por Viscosidad <ul style="list-style-type: none"> • AC-10 • AC-20 • AC-40 	AASHTO M 226
Graduación por Viscosidad <ul style="list-style-type: none"> • 40-50 • 60-70 • 85-100 	AASHTO M 20
Graduación por PG <ul style="list-style-type: none"> • 64-22 • 70-22 • 76-22 • 82-22 	AASHTO MP 1

Fuente: Dirección General de Caminos. *Especificaciones Generales para la Construcción de caminos*. 401-7.

- Requisitos para la mezcla. La mezcla de materia petreo y material bituminoso, debe llenar los requisitos del método de diseño establecido en la tabla XI.

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

MÉTODO DE DISEÑO ⁽¹⁾	VALORES LÍMITES	
	MINIMO	MAXIMO
1) MARSHALL (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 XIII	
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 %	

Continuación de la tabla XII.

(¹) El porcentaje de vacíos con aire se basa en AASHTO T 166, AASHTO T 209 Y AASHTO T 269
(²) Cuando se establezca en las Disposiciones Especiales, los especímenes podrán ser preparados usando el compactador giratorio aplicando las mismas especificaciones de compactación indicadas más adelante para mezclas Superpave.
(³) Este valor deberá calcularse en función de la gravedad específica máxima de la mezcla compactada determinada directamente conforme el ensayo Rice-AASHTO T 209.
(⁴) La razón polvo-asfalto se define como el porcentaje de material que pasa el tamiz de 75 micrómetros dividido por el contenido efectivo de asfalto calculado por masa de la mezcla.

Fuente: Dirección General de Caminos. *Especificaciones Generales para la Construcción de caminos*. p. 401-7.

Tabla XIII. **Vacíos en el agregado mineral (VAM)**

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 la Construcción de caminos*. p. 401-8.

1.8. Componentes de una mezcla asfáltica

1.8.1. Definición de asfalto

La definición de betún o bitumen es: mezclas de hidrocarburos de origen natural o pirógeno (producto de la destilación del petróleo), o de ambos tipos, frecuentemente acompañadas por sus derivados no metálicos, los cuales pueden ser gaseosos, líquidos, semi-sólidos. Los betunes o bitúmenes empleados en la construcción de carreteras son de dos tipos, a saber: Asfaltos y alquitranes. Según Herbert Lynch (1980) el asfalto es un material aglomerante de color que varía de pardo oscuro a negro, de consistencia sólida, semisólida o líquida, cuyos constituyentes predominantes son betunes que se dan en la naturaleza o que se obtienen en la destilación del petróleo y el cual entra en proporciones variables en la constitución de la mayor parte de los crudos de petróleo. El asfalto es un producto cuyo empleo data de la antigüedad y fue usado de muchas formas en Mesopotamia, Siria, Egipto, etc., con fines de impermeabilización, *mastic* de unión entre los elementos de construcción, momificación, etc., incluso reservorios y piscinas fueron impermeabilizados con asfalto. La ASTM define a los asfaltos como “materiales aglomerantes sólidos o semi-sólidos de color que varía de negro a pardo oscuro y que se licuan gradualmente al calentarse, cuyos constituyentes predominantes son betunes que se dan en la naturaleza en forma sólida o semi-sólida que se obtienen de la destilación del petróleo, o combinaciones de estos entre sí o con el petróleo o productos derivados de estas combinaciones. Según el *Asphalt Institute* el asfalto es un material negro, cementante, que varía ampliamente en consistencia, entre sólido y semisólido (sólido blando), a temperaturas ambientales normales. Cuando se calienta lo suficiente, el asfalto

se ablanda y se vuelve líquido, lo cual le permite cubrir las partículas de agregado durante la producción de mezcla en caliente. Durante el primer proceso de separación en la mayoría de las refinerías se obtienen 5 productos que pueden ser clasificados como sigue:

- **Base Parafinica** Aquellos en los cuales el material restante, después de la destilación de los constituyentes más volátiles. Es principalmente parafina.
- **Base Asfáltica** La porción pesada del Asfalto. En su porción más pesada presentan una mezcla de parafina y asfalto. En pavimentación los asfaltos comúnmente usados son los cementos asfálticos y los asfaltos líquidos.

1.8.2. Viscosidad

Las especificaciones de los trabajos de pavimentación requieren, generalmente, ciertos valores de viscosidad a temperaturas de 60C y 135C. las viscosidades a 60C es la viscosidad usada para clasificar el cemento asfáltico. Ella representa la viscosidad del cemento asfáltico a la temperatura más alta que el pavimento puede llegar a experimentar durante su servicio. La viscosidad a 135C corresponde, aproximadamente, a la viscosidad del asfalto durante el mezclado y la colocación. El conocer la consistencia de un asfalto dado a estas dos temperaturas ayuda a determinar si el asfalto es apropiado o no para el pavimento que está siendo diseñado. La prueba de viscosidad a 60°C utiliza un viscosímetro de tubo capilar el cual consiste en un tubo calibrado de vidrio que mide el flujo del asfalto. El viscosímetro es colocado en un baño de agua con temperatura controlada y es pre-calentado a 60C. Luego se vierte, en el extremo ancho del viscosímetro, una muestra de cemento asfáltico calentada a la misma temperatura.

A una temperatura de 60°C, es necesario aplicar un vacío parcial al extremo pequeño del tubo para pasar el asfalto a través del mismo, debido a que el cemento asfáltico es muy viscoso y no puede fluir fácilmente a través de la estrecha abertura del tubo capilar. El tiempo que el asfalto toma para pasar de una marca a otra del tubo es registrado, a medida que este comienza a fluir.

Este tiempo es convertido fácilmente a poises, siendo la unidad normal de medida para viscosidad de asfaltos. El ensayo de viscosidad a 135°C es similar al ensayo descrito anteriormente; sin embargo, debe haber ciertas variaciones debido a que la temperatura es más alta. En primer lugar, es necesario usar un aceite claro en el baño con temperatura controlada debido a que el agua se evaporaría a 135°C. En segundo lugar, se utiliza un viscosímetro que no requiera de la aplicación de vacío debido a que el cemento asfáltico posee suficiente fluidez a 135°C. Por último, la medida de viscosidad utilizada se convierte a *centistokes* en vez de *poises* debido que el flujo a través del tubo es inducido por gravedad y no por vacíos.

Tabla XIV. **Especificaciones para cementos asfálticos. Clasificados por su viscosidad a 60°C**

CARACTERÍSTICA	UNIDADES	MÉTODO ASTM	Grado de Viscosidad		
			AC-20	AC-30	AC-40
Viscosidad, 60° C	N s/m ²	D-2170	2000 ± 400	3000 ± 600	4000 ± 800
Viscosidad, 135°C, mínimo	mm ² /s	D,2170	300	350	400
Penetración, 25°C, 100g, 5s, mínimo	1/10 mm	D-5	60	50	40
Punto de inflamación, Cleveland Copa Abierta, mínimo	°C	D-90	232	232	232

Continuación de la tabla XIV.

Solubilidad en tricloroetileno, mínimo	%	D-2042	99	99	99
Pruebas sobre residuo del ensayo de horno sobre película delgada:		D-1754			
Viscosidad, 60° C, max	N s/m ²	D-2171	10000	15000	20000
Ductilidad, 25°C, 5 cm/min, mínimo	cm	D-113	50	40	25

Fuente: Reglamento Técnico Centroamericano (RTCA 75.01.22:047). *Guía para la realización de ensayos y clasificación de asfaltos, emulsiones asfálticas y asfaltos rebajados*. p. 27

1.8.3. Función del asfalto en la mezcla asfáltica

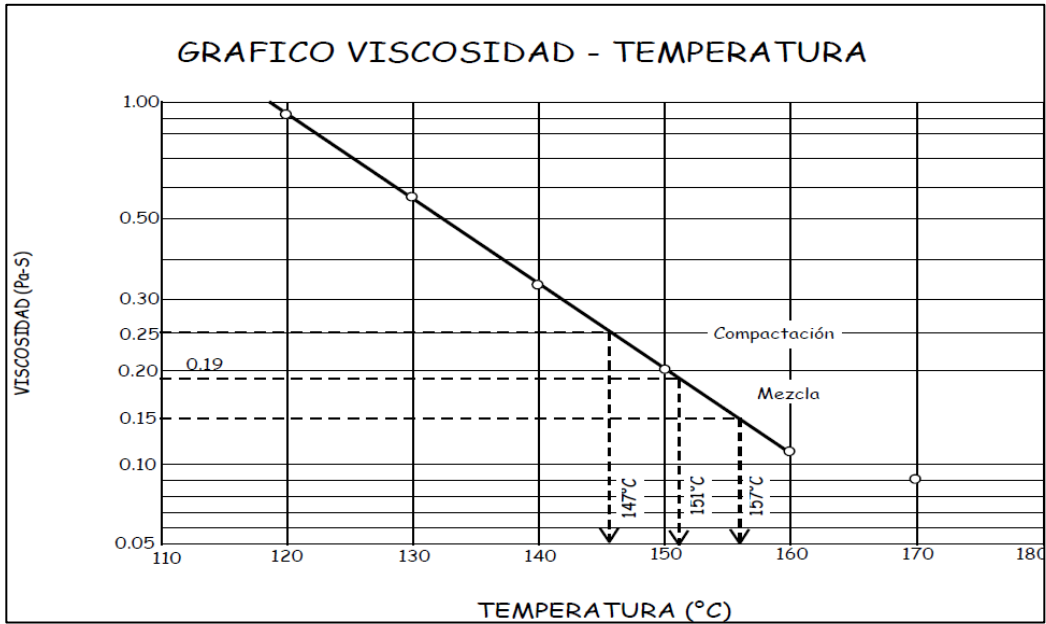
La función del asfalto en una mezcla asfáltica es la de mantener los agregados pétreos en su lugar. Interviene directamente en el esfuerzo de mantener los agregados unidos, este esfuerzo va ligado con la viscosidad del cemento asfáltico.

Junto con el fino (*filler*), se encarga de crear el mastico que da mayor resistencia a la mezcla asfáltica.

1.8.4. Temperatura de mezcla y compactación

La temperatura de mezclado y compactación, están definidos por el ensayo al bitumen de viscosidad dinámica (viscosímetro Brookfield), el cual a través de la carta reológica se obtiene la temperatura de mezclado en planta y colocación en campo.

Figura 6. **Gráfica viscosidad vs temperatura**



Fuente: Capacitación de Ing. Leonel Aguilar. *Diseño de Mezclas Asfálticas, Método Marshall ASTM D 1559-06.*

1.8.4.1. Temperatura de mezcla

Temperatura para producir una viscosidad cinemática entre 0.15 y 0.19 Pascal-segundo (Pa-s) (150 y 190 *centiStokes cS*).

En planta en ningún caso temperatura del cemento asfáltico mayor que la correspondiente a su grado, ni mayor de 170 °.

La temperatura de salida de la planta no deberá exceder 165°C.

1.8.4.2. Temperatura de compactación de mezcla en laboratorio

Temperatura para producir una viscosidad mínima de 0,25 Pa-s (250 cS) y máxima de 0,31 Pa-s (310 cS).

1.8.4.3. Temperatura de compactación en campo

Temperatura mayor a correspondiente a una viscosidad mínima de 0,25 Pa-s.

La compactación se debe iniciar a una temperatura no menor de 140°C y finalizar a más de 85°C.

1.9. Agregados pétreos

1.9.1. Definición de agregados

Según el *Asphalt Institute* es cualquier material mineral duro e inerte usado, en forma de partículas graduadas o fragmentos, como parte de un pavimento de mezclas asfálticas en caliente. Los agregados típicos incluyen arena, grava, piedra triturada, escoria y polvo de roca. El comportamiento de la mezcla se ve altamente influenciado por la selección apropiada del agregado, debido a que el mismo proporciona la mayoría de las características de capacidad portante. De acuerdo con Herbert Lynch (1980) en los concretos asfálticos, los agregados normalmente constituyen del 90 al 95 % del peso total o entre el 80 y el 85 % del volumen de la mezcla. Son los principales responsables de la capacidad de soportar las cargas de las mezclas asfálticas; por ello se hace necesario realizar un análisis de sus propiedades para el buen

diseño y comportamiento de las mezclas asfálticas. Los agregados para mezclas asfálticas pueden ser de tres (3) tipos:

1.9.1.1. Agregados naturales

Son aquellos usados en su forma natural, con muy poco o ningún procesamiento. Ellos están constituidos por partículas producidas mediante el uso de procesos naturales de erosión y degradación, tales como la acción del viento, el agua, el movimiento del hielo y los químicos.

1.9.1.2. Artificiales o reparados industrialmente

Los agregados artificiales o preparados industrialmente son aquellos que han sido triturados y tamizados antes de ser usados. Existe dos fuentes principales de agregados procesados: La grava natural que son trituradas para volverlas más apropiadas para pavimentos de mezclas asfálticas y los fragmentos de lechos de rocas y piedra grandes que deben ser reducidos en tamaño antes de ser usados en pavimentación. (Herbert Lynch, 1980).

1.9.1.3. Agregados artificiales o sintéticos

No existen en la naturaleza, son el producto del procesamiento físico o químico de materiales. Algunos son sub.-productos de procesos industriales de producción, como el refinamiento de metales. Otros son producidos mediante procesamiento de materias primas para ser utilizados específicamente como agregados. Debe proceder de rocas duras y resistentes; no debe tener arcilla en terrones ni como película adherida a los granos; y debe estar libre de todo material orgánico. El agregado que se usa para la construcción de pavimentos de Concreto Asfáltico se clasifica en: grueso, fino, polvo mineral y llenante.

1.9.2. Clasificación de agregados pétreos de acuerdo a su tamaño

1.9.2.1. Agregado grueso

El agregado grueso es la fracción del Agregado que queda retenida en el tamiz N° 4. y este debe tener las siguientes propiedades características:

- Debe estar limpio y no debe tener más del 8 %, de su peso, de trozos alargados o planos.
- El porcentaje de desgaste, determinado no debe ser mayor del 35 % para las mezclas usadas como carpeta de rodamiento.
- No debe tener una pérdida de peso mayor del 12 % al ser sometido al Ensayo de Desgaste de Magnesio, 5 ciclos AASHTO T 104, para las mezclas usadas como carpeta de rodamiento.
- En el momento de ser mezclado, el porcentaje de caras producidas por fractura determinado, debe ser mayor del 90 %.

1.9.2.2. Agregado fino

El agregado fino según Las Especificaciones Generales Para La Construcción de Carreteras y Puentes, el contratista debe suministra arena, piedra triturada, grava tamizada, o una combinación de estas que cumpla con los siguientes requisitos:

- Equivalente de arena, AASHTO T 176 35 Mínimo
- Índice Plástico, AASHTO T 90 4 % Máximo
- Graduación N°2 o N°3 de AASHTO M 29

1.9.2.3. Polvo mineral

Cuando se necesite agregar polvo mineral como ingrediente separado, en adición al que contiene el agregado pétreo después de su trituración, éste debe consistir en: polvo de roca, cemento hidráulico, cal hidratada u otro material inerte no absorbente, que llene, según AASHTO M 17, los requisitos siguientes: Polvo mineral. Cuando se necesite agregar polvo mineral como ingrediente El polvo mineral debe llenar los requisitos de graduación, determinada según AASHTO T 37, de la siguiente tabla:

Tabla XV. **Requisitos de graduación para el polvo mineral**

Estándar mm	Tamiz N°	Porcentaje total que pasa un tamiz de abertura cuadrada (AASHTO T37)
0,600	30	100 %
0,300	50	95 – 100 %
0,075	200	70 – 100 %

Fuente: elaboración propia.

2. DESARROLLO EXPERIMENTAL

2.1. Trabajo de laboratorio para el diseño de mezcla

La dosificación de la mezcla de agregado pétreo se realizó con material proporcionado por AGRECA, en el tamaño de 3/4", 3/8" y de #4 a 0.

Se obtuvo una granulometría controlada por material retenida por tamaño de tamices.

El bitumen tiene las especificaciones de un AC-40.

Los agregados cumplen las especificaciones de la Dirección General de Caminos.

2.1.1. Características de la mezcla asfáltica

Las características de diseño se basaron en las especificaciones para la granulometría de 3/4" (tamaño máximo de agregado) para el diseño Marshall y Superpave mostrados en la tabla XII.

2.1.2. Definición de granulometrías para diseño de mezclas

Los diseños granulométricos se tomaron en base a las especificaciones de la Dirección General de Caminos.

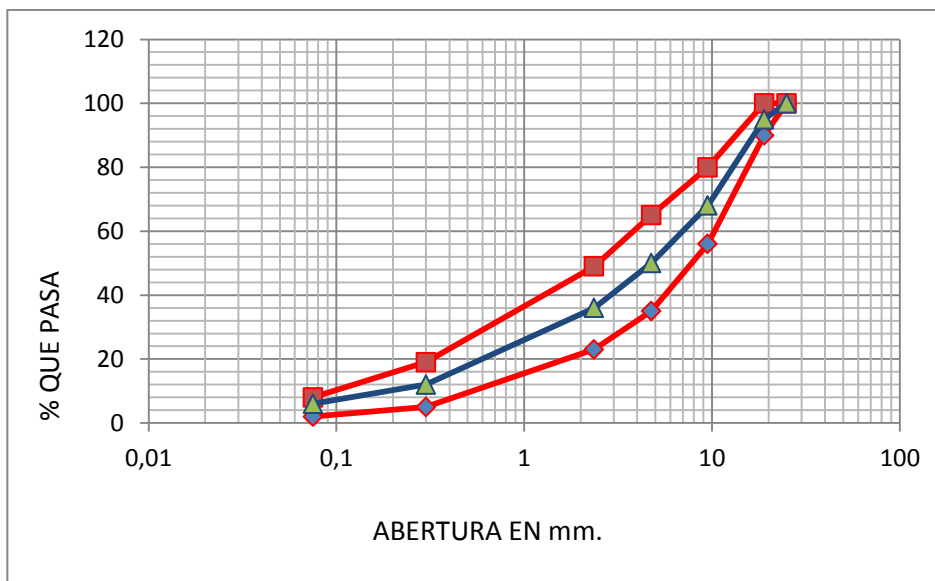
Los diseños utilizados se muestran a continuación:

Tabla XVI. **Diseño granulométrico por el Método Marshall**

No. DE TAMIZ	ABERTURA TAMICES EN mm	GRÁFICA MÁXIMA	GRÁFICA MÍNIMA	GRÁFICA DE DISEÑO
		% PASA	% PASA	% PASA
1"	25	100	100	100
3/4"	19	90	100	95
3/8"	9,5	56	80	68
#4	4,75	35	65	50
#8	2,36	23	49	36
#50	0,3	5	19	12
#200	0,075	2	8	6

Fuente: elaboración propia.

Figura 7. **Gráfica granulométrica de diseño Marshall**



	Parámetros de Diseño Marshall
	Gráfica de Diseño

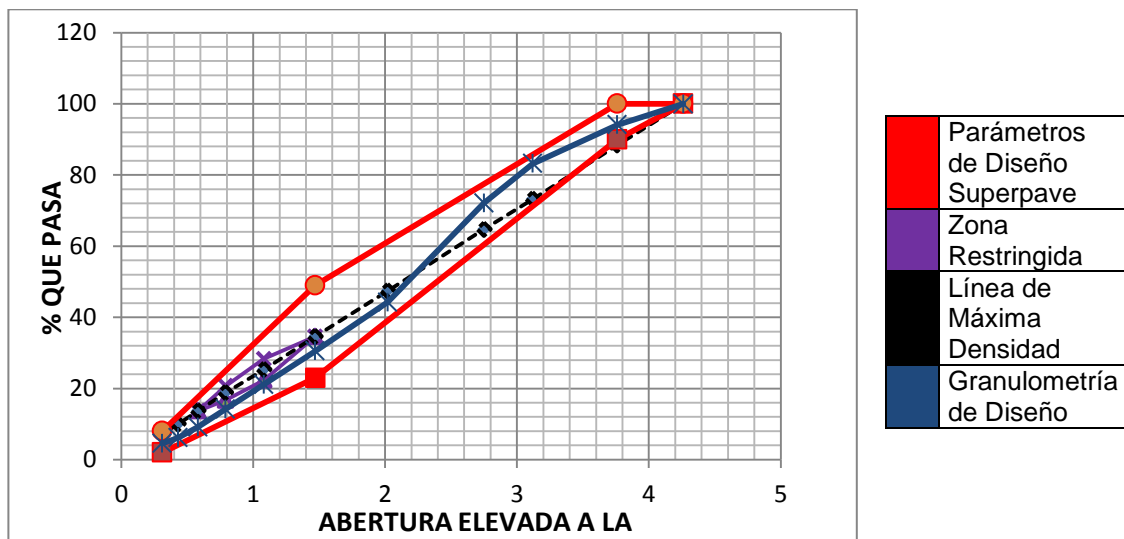
Fuente: elaboración propia, empleando programa Excel.

Tabla XVII. **Diseño granulométrico por el Método Superpave**

TAMIZ	ABERTURA	ABERTURA 0,45	MÁXIMA DENSIDAD	PUNTOS DE CONTROL		ZONA RESTRINGIDA		GRÁFICA DE DISEÑO
1"	25	4,26	100		100			100
3/4"	19	3,76	88,4	90	100			100
1/2"	12,5	3,12	73,2		90			86,2
3/8"	9,5	2,75	64,7					72,1
#4	4,75	2,02	47,4					44,2
#8	2,36	1,47	34,6	23	49	34,6	34,6	30,5
#16	1,18	1,08	25,3			22,3	28,3	21,1
#30	0,6	0,79	18,8			16,7	20,7	14,2
#50	0,3	0,58	13,7			13,7	13,7	9,15
#100	0,16	0,43	10					6,12
#200	0,075	0,31	7,3	2	8			4,56

Fuente: elaboración propia.

Figura 8. **Gráfica granulométrica de diseño Superpave**



Fuente: elaboración propia, empleando programa Excel.

2.2. Ensayos realizados

2.2.1. Resistencia de mezclas asfálticas Marshall AASHTO T 245 y ASTM D 1559

Para la realización de la prueba de estabilidad y flujo Marshall, se presenta a continuación la manera correcta de realizar el ensayo y cómo presentar el informe al momento de obtener los resultados.

2.2.1.1. Objeto

Esta norma describe el procedimiento que se debe seguir para la determinación de la resistencia a la deformación plástica de especímenes cilíndricos de mezclas asfálticas para pavimentación, empleando el aparato Marshall. Para este procedimiento se empleará en laboratorio para el control de calidad de la mezcla asfáltica.

Determinar el contenido óptimo de asfalto para una combinación específica de agregados. El método también provee información sobre propiedad de la mezcla asfáltica en caliente, y establece densidades y contenidos óptimos de vacío que deben ser cumplidos durante la construcción del pavimento.

2.2.1.2. Preparación de la muestra

Las muestras se preparan de la siguiente manera:

- El asfalto y el agregado se calientan y mezclan hasta que todas las partículas de agregado estén revestidas. Esto simula los procesos de calentamiento y mezclado que ocurren en la planta.
- La mezcla asfáltica caliente se coloca en moldes precalentados Marshall como preparación para la compactación, en donde se usa el martillo Marshall de compactación, el cual también es calentado para que no enfríe la superficie de la mezcla al golpearla.
- Las briquetas son compactadas mediante golpes del martillo Marshall de compactación. El número de golpes del martillo serán de 75, ambas caras de cada briqueta reciben el mismo número de golpes. Así, una probeta Marshall de 75 golpes recibe, realmente, un total de 150 golpes. Después de completar la compactación, las probetas son enfriadas y extraídas de los moldes.

2.2.1.3. Instrumentos

- Dispositivo para moldear probetas. Consiste en un molde cilíndrico con un collar de extensión y una placa de base plana. El molde deberá tener un diámetro interior de 101,6 mm (4") y una altura interna aproximada de 76,2 mm (3"); la placa de base y el collar de extensión deberán ser intercambiables, es decir ajustables en cualquiera de los dos extremos del molde.
- Extractor de probetas. Elemento de acero en forma de disco con diámetro de 100 mm (3,95") y 12,7 (1/2") de espesor, utilizado para extraer la probeta compactada del molde, con la ayuda del collar de

extensión. Se requiere de un elemento adecuado para transferir la carga a la probeta, de manera que esta pase suavemente del molde al collar.

- Martillo de compactación. Consiste en un dispositivo de acero formado por una base plana circular de 98,4 mm (3 7/8") de diámetro y un pisón deslizante de $4\,536 \pm 9$ g ($10 \pm 0,02$ lb) de peso total, montado en forma que proporcione una altura de caída de $457,2 \pm 1,524$ mm ($18 \pm 0,06$ "), como se describe en las figuras 3 y 4.
- Pedestal de compactación. Consistente en una pieza prismática de madera de base cuadrada de 203,2 mm de lado y 457,2 mm de altura (8" x 8" x 18") y provista en su cara superior de una platina cuadrada de acero de 304,8 mm de lado x 25,4 mm de espesor (12" x 12" x 1"), firmemente sujeta en la misma. La madera será roble u otra clase cuya densidad seca sea de 0,67 a 0,77 g/cm³ (42 a 48 lb/pie³). El conjunto se fijará firmemente a una base de concreto, debiendo quedar la platina de acero en posición horizontal.
- Sujetador para el molde. Consiste en un dispositivo con resorte de tensión diseñado para centrar rígidamente el molde de compactación sobre el pedestal. Deberá asegurar el molde completo en su posición el proceso de compactación.
- Mordazas y medidor de deformaciones. Las mordazas consisten en dos segmentos cilíndricos, con un radio interior de 50,8 mm (2") maquinado con exactitud. La mordaza inferior va montada sobre una base plana, provista de dos varillas perpendiculares a ella y que sirven de guía a la mordaza superior. El movimiento de la mordaza superior se debe efectuar sin un rozamiento apreciable. El medidor de deformación

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

- Prensa. Para la rotura de las probetas se empleará una prensa mecánica o hidráulica capaz de producir una velocidad uniforme de desplazamiento vertical de 50,8 mm por minuto (2"/min.). Su capacidad de carga mínima deberá ser de 40 kN.
- Medidor de estabilidad. La resistencia de la probeta en el ensayo se medirá con un anillo dinamométrico acoplado a la prensa, de 22,2 kN de capacidad, con una sensibilidad de 44,5 N hasta 4,45 kN y 111,2 N hasta 22,2 kN. Las deformaciones del anillo se medirán con un deformímetro graduado en 0,0025 mm (0,0001").
- Tanque para agua. De 152,4 mm (6") de profundidad mínima y manteniendo la temperatura a 60 ± 1 °C ($140 \pm 2,0$ °F). El tanque deberá tener un falso fondo perforado o estar equipado con un estante para sostener las probetas por lo menos a 50,8 mm (2") sobre el fondo del tanque.
- Termómetros blindados. De 9,9 a 204 °C (50 a 400 °F) para determinar las temperaturas del asfalto, agregados y mezcla, con sensibilidad de 2,8 °C. Para la temperatura del baño de agua se utilizará un termómetro con escala de 20 a 70 °C y sensibilidad de 0,2° C (68 a 158 °F $\pm 0,4$ °F).

- Balanzas. Una de 5 kg de capacidad, sensible a 1 g para pesar agregado y asfalto; otra de 2 kg de capacidad, sensible a 0,1 g para las probetas compactadas.

2.2.1.4. Procedimiento

Para este caso, se determinará la resistencia y la deformación de la probeta compactada, dando así un resultado para la estabilidad y la fluencia Marshall.

2.2.1.5. Estabilidad y Flujo Marshall

- Objeto

El ensayo de estabilidad está dirigido a medir la resistencia a la deformación de la mezcla. La fluencia mide la deformación bajo carga que ocurre en la mezcla.

- Procedimiento
 - Las probetas son calentadas en el baño de agua a 60 °C. Esta temperatura representa, normalmente, la temperatura más caliente que un pavimento en servicio va a experimentar.
 - La probeta es removida del baño, secada y colocada rápidamente en el aparato Marshall. El aparato consiste de un dispositivo que aplica una carga sobre la probeta y de unos medidores de carga y deformación (fluencia).

- La carga del ensayo es aplicada a la probeta a una velocidad constante de 51 mm (2 pulgadas) por minuto hasta que la muestra falle. La falla está definida como la carga máxima que la briqueta puede resistir.
- La carga de falla se registra como el valor de estabilidad Marshall y la lectura del medidor de fluencia se registra como la fluencia.
- Forma de Calcular

Para conocer la estabilidad Marshall, solamente se toma el dato que marca el dial al momento de la falla. De igual forma, para el flujo Marshall se toma el dato de deformación que marca el dial al momento de la falla.

2.2.1.6. Para el informe

El informe debe contener la siguiente información:

- Tipo de muestra ensayada en el laboratorio.
- Valor promedio de la máxima carga en Newtons (lb) de por lo menos tres probetas, corregido según la tabla Humboldt. Mfg. Co.
- Valor promedio del flujo, en 0,25 mm (0,01”) de por lo menos tres probetas.
- Temperatura de ensayo.

2.2.2. Gravedad específica *Bulk* de briquetas ASTM D 1188

Para la realización de la prueba de gravedad específica *Bulk*, se presenta a continuación la manera correcta de realizar el ensayo y cómo presentar el informe al momento de obtener los resultados.

- Objeto

Determinar la gravedad específica *Bulk*, y densidad de especímenes de mezclas asfálticas compactadas. El método de ensayo proporciona una guía para la determinación de la masa del espécimen seco. La gravedad específica se calcula a partir de estas masas. La densidad se obtiene multiplicando gravedad específica *Bulk* por la densidad del agua.

- Preparación

Se extrae del molde la probeta compactada por el compactador Marshall, se prepara para ser pesada, se toman las dimensiones como el diámetro y la altura.

2.2.2.1. Instrumentos

- Balanza
- Pileta de inmersión
- Vernier

2.2.2.2. Procedimiento

- Formada la muestra por el método Marshall, se pone a secar, se extrae de la probeta y se determina la masa seca de la muestra o testigo.
- Se pesa la masa sumergida.
- Se pesa la masa seca saturada, sumergiéndola en agua de 3 – 5 minutos.

Se toman las alturas y diámetros.

2.2.2.3. Forma de calcular

La gravedad específica *Bulk* de briquetas de una mezcla compactada, puede determinarse usando:

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

Dónde:

Gmb = gravedad específica *Bulk* de briquetas

A = masa seca del espécimen

B = masa seca saturada del espécimen

C = masa del espécimen sumergido

2.2.2.4. Para el informe

El informe debe contener la siguiente información:

- Tipo de muestra ensayada en el laboratorio

- Valor promedio de la gravedad específica *Bulk*
- Valor promedio de las alturas y diámetro para cada testigo

2.2.3. Gravedad específica teórica máxima *Rice* ASTM D 2041 y AASHTO T 209

Para la realización de la prueba se presenta a continuación la manera correcta de realizar el ensayo y cómo presentar el informe al momento de obtener los resultados.

- Objeto

Determinación de la gravedad específica teórica máxima.

2.2.3.1. Preparación de la muestra

Se deshace una muestra de asfalto compactado y se pesan 1 000 kg de mezcla suelta a temperatura ambiente.

2.2.3.2. Instrumentos

- Picnómetro de vacíos, de metal o plástico con un diámetro de 180 a 260 mm y una altura no menor de 160 mm. Este debe estar equipado con una tapa transparente, asegurada con un empaque de caucho y con una conexión para la aplicación del vacío.
- Balanza con capacidad adecuada y sensibilidad suficiente, para que las gravedades específicas de las muestras se puedan calcular al menos con cuatro cifras significativas.

- Bomba de vacío, capaz de evacuar el aire del recipiente de vacío hasta una presión residual de 25 psi.
- Manómetro de presión residual, para confirmar que se está aplicando la presión al recipiente, debe ser capaz de medir una presión residual de 25 psi o menos.
- Válvula de purga, para facilitar el ajuste del vacío que está siendo aplicado al recipiente y la liberación lenta de la presión de vacío.
- Dispositivo de agitación mecánica, capaz de aplicar una agitación suave pero consistente a la muestra.

2.2.3.3. Procedimiento

- Una vez que la muestra está seca y se encuentre tibia, desintegrar con las manos logrando separar sus partículas, teniendo cuidado de no fracturarlas. Las partículas de la porción del agregado fino no deben de ser mayores de 6 mm.
- Verter la muestra directamente en el picnómetro previamente tarado. Se pesa el recipiente con la muestra y se designa la masa neta (únicamente la masa de la muestra).
- Agregar agua a temperatura ambiente, suficiente para cubrir la muestra por completo. Se recomienda que el espejo de agua esté a una altura de por lo menos 1" por encima de la mezcla.

- Colocar el picnómetro con la muestra y agua sobre el dispositivo de agitación mecánica y asegurarlo a la superficie de este. Activar la bomba de vacío, poner en marcha la agitación e inmediatamente, por medio de la válvula de presión residual, se busca que la presión de vacío se encuentre dentro de un rango de 25 a 30 psi. La presión de vacío se deberá alcanzar en un tiempo no mayor a 1 minuto y, una vez alcanzado, se continuará el vacío y la agitación durante 15 minutos.
- Una vez transcuridos los 15 minutos, liberar gradualmente la presión de vacío usando la válvula de purga.
- Llenar lentamente el picnómetro con agua, teniendo el cuidado de no introducir aire dentro de la muestra. Secar cualquier humedad presente en el exterior del matraz y de la placa de vidrio. Se determina la masa del picnómetro más la placa, más la muestra, más agua.
- Calcular la gravedad específica teórica máxima por medio de la siguiente expresión:

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

Donde:

G_{mm} = gravedad específica teórica máxima

A = masa de la muestra seca (g)

D = masa del picnómetro lleno de agua (g)

E = masa del picnómetro con la muestra y agua (g)

2.2.4. Porcentaje de vacíos – densidad ASTM D 3203, AASHTO 7 269

2.2.4.1. Procedimiento

- Determinar la gravedad específica *Bulk* de la mezcla compactada, por medio del procedimiento descrito anteriormente.
- Determinar la gravedad específica teórica máxima de la mezcla suelta, por medio del procedimiento descrito anteriormente.
- Calcular el porcentaje de vacíos con aire en la mezcla asfáltica, por medio de la siguiente expresión:

$$V_A = \frac{G_{mm} - G_{mb}}{G_{mm}} \times 100$$

Donde:

V_A = porcentaje de vacíos

G_{mm} = gravedad específica teórica máxima

G_{mb} = gravedad específica bruta

2.2.5. Porcentaje de vacíos en el agregado mineral ASTM D 1559

2.2.5.1. Procedimiento

- Calcular la gravedad específica *Bulk* de la mezcla asfáltica.
- Determinar el porcentaje de agregado en la mezcla.

- Calcular la gravedad específica bruta de la combinación de agregados
- Calcular el porcentaje de vacíos en el agregado mineral por medio de la siguiente expresión:

$$VAM = 100 - \frac{G_{mb} P_s}{G_{sb}}$$

Donde:

VAM= porcentaje de vacíos en el agregado mineral

G_{mb} = gravedad específica *Bulk* de la mezcla asfáltica

P_s = porcentaje de agregados en la mezcla asfáltica

G_{sb} = gravedad específica bruta de los agregados

2.3. Resultado de los ensayos de laboratorio obtenidos en diseño granulométrico Marshall

2.3.1. Resultados obtenidos de gravedad específica *Bulk* de briquetas ASTM D 1188

A continuación, se presentan los datos y cálculos respectivos del ensayo descrito anteriormente.

Cálculo de gravedad específica bruta:

Datos:

Probeta 1, 4 % de bitumen, diseño tradicional

A: 1 236,7 g
 B: 1 249,05 g
 C: 721,12 g

$$G_{mb} = \frac{1\,236,7}{1\,249,05 - 721,12} = 2,344$$

Tabla XVIII. Datos de gravedad específica *Bulk* de mezcla con granulometría Marshall

1 PASTILLA 4 %		2 PASTILLA 4 %		3 PASTILLA 4 %	
Pseco	1 236,7	Pseco	1 247,6	Pseco	1 246,05
Psaturado	1 249,05	Psaturado	1 256,05	Psaturado	1 257,05
Psumergido	721,12	Psumergido	727,6	Psumergido	722,08
1 PASTILLA 4,5 %		2 PASTILLA 4,5 %		3 PASTILLA 4,5 %	
Pseco	1 236,7	Pseco	1 247,6	Pseco	1 246,05
Psaturado	1 249,05	Psaturado	1 256,05	Psaturado	1 257,05
Psumergido	721,12	Psumergido	727,6	Psumergido	722,08
1 PASTILLA 5 %		2 PASTILLA 5 %		3 PASTILLA 5 %	
Pseco	1 249,72	Pseco	1 242,07	Pseco	1 248,23
Psaturado	1 253,93	Psaturado	1 244,79	Psaturado	1 250,92
Psumergido	730,81	Psumergido	727,42	Psumergido	730,44
1 PASTILLA 5,5 %		2 PASTILLA 5,5 %		3 PASTILLA 5,5 %	
Pseco	1 253,14	Pseco	1 255,84	Pseco	1 255,65
Psaturado	1 255,8	Psaturado	1 258,35	Psaturado	1 258,16
Psumergido	732,59	Psumergido	740,25	Psumergido	737,37
1 PASTILLA 6 %		2 PASTILLA 6 %		3 PASTILLA 6 %	
Pseco	1 245,62	Pseco	1 251,23	Pseco	1 250,24
Psaturado	1 247,07	Psaturado	1 252,89	Psaturado	1 253,89
Psumergido	735,71	Psumergido	737,74	Psumergido	737,74

Fuente: elaboración propia con base en resultados de ensayo de laboratorio.

Tabla XIX. **Resultados de gravedad específica *Bulk* de mezcla con granulometría Marshall**

1 PASTILLA 4 %		2 PASTILLA 4 %		3 PASTILLA 4 %	
Gmb	2,343	Gmb	2,361	Gmb	2,329
Promedio					2,344
1 PASTILLA 4,5 %		2 PASTILLA 4,5 %		3 PASTILLA 4,5 %	
Gmb	2,343	Gmb	2,361	Gmb	2,329
Promedio					2,344
1 PASTILLA 5 %		2 PASTILLA 5 %		3 PASTILLA 5 %	
Gmb	2,389	Gmb	2,401	Gmb	2,398
Promedio					2,396
1 PASTILLA 5,5 %		2 PASTILLA 5,5 %		3 PASTILLA 5,5 %	
Gmb	2,395	Gmb	2,424	Gmb	2,411
Promedio					2,410
1 PASTILLA 6 %		2 PASTILLA 6 %		3 PASTILLA 6 %	
Gmb	2,436	Gmb	2,429	Gmb	2,422
Promedio					2,429

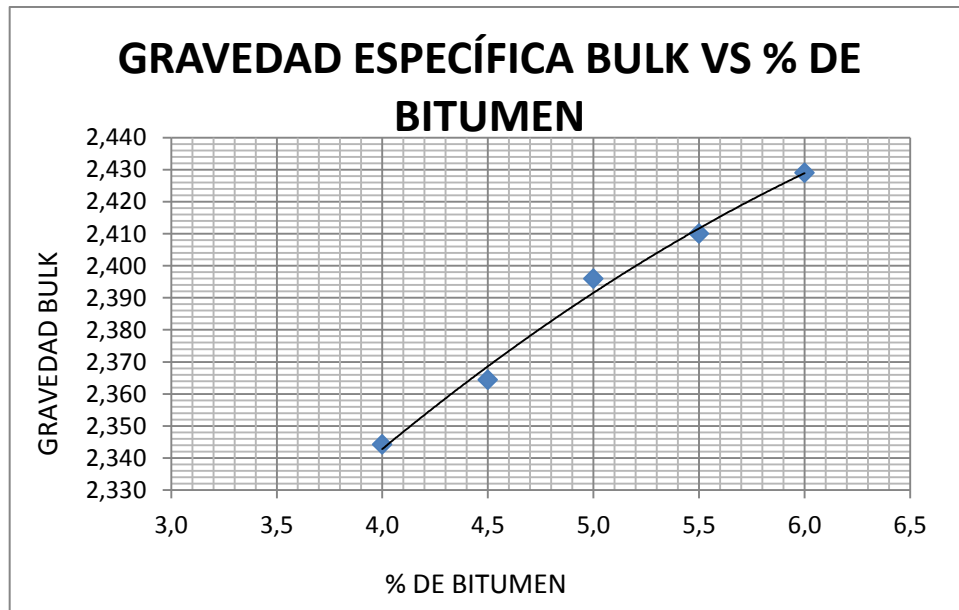
Fuente: elaboración propia con base en resultados de ensayo de laboratorio.

Tabla XX. **Resumen densidad *Bulk* vs porcentaje de bitumen**

% DE BITUMEN	PROMEDIO DENSIDAD BULK
4,0	2,344
4,5	2,364
5,0	2,396
5,5	2,410
6,0	2,429

Fuente: elaboración propia con base en resultados de ensayo de laboratorio.

Figura 9. **Gráfica de gravedad específica *Bulk* en mezcla con granulometría Marshall**



Fuente: elaboración propia, empleando programa Excel; con base en resultados de ensayo de laboratorio.

2.3.2. Gravedad específica teórica máxima

A continuación, se presentan los datos y cálculos respectivos del ensayo descrito anteriormente.

Cálculo de gravedad específica teórica máxima:

Datos:

4 % de bitumen, diseño tradicional:

A: 1 234,49 g

D: 7 378,50 g

E: 8 107,90 g

$$G_{mm} = \frac{1\ 247,3}{1\ 247,3 + 7\ 380,5 - 8\ 134,3} = 2,527$$

Tabla XXI. Datos de gravedad específica teórica máxima con granulometría Marshall

PASTILLA 4 %			
Peso Tara + Material	1 503,7	Gmm	2,527
Picnómetro + Agua	7 380,5		
Picnómetro + Mat + Agua	8 134,3		
Peso Tara	256,4		
PASTILLA 4,5 %			
Peso Tara + Material	1 496,5	Gmm	2,513
Picnómetro + Agua	7 375,6		
Picnómetro + Mat + Agua	8 121,7		
Peso Tara	257,2		
PASTILLA 5 %			
Peso Tara + Material	1496	Gmm	2,478
Picnómetro + Agua	7 380,4		
Picnómetro + Mat + Agua	8 119,9		
Peso Tara	256,1		
PASTILLA 5,5 %			
Peso Tara + Material	1 511,1	Gmm	2,445
Picnómetro + Agua	7 382,1		
Picnómetro + Mat + Agua	8 122,9		
Peso Tara	257,5		
PASTILLA 6 %			
Peso Tara + Material	1 505,0	Gmm	2,478
Picnómetro + Agua	7 379,0		
Picnómetro + Mat + Agua	8 121,8		
Peso Tara	259,6		

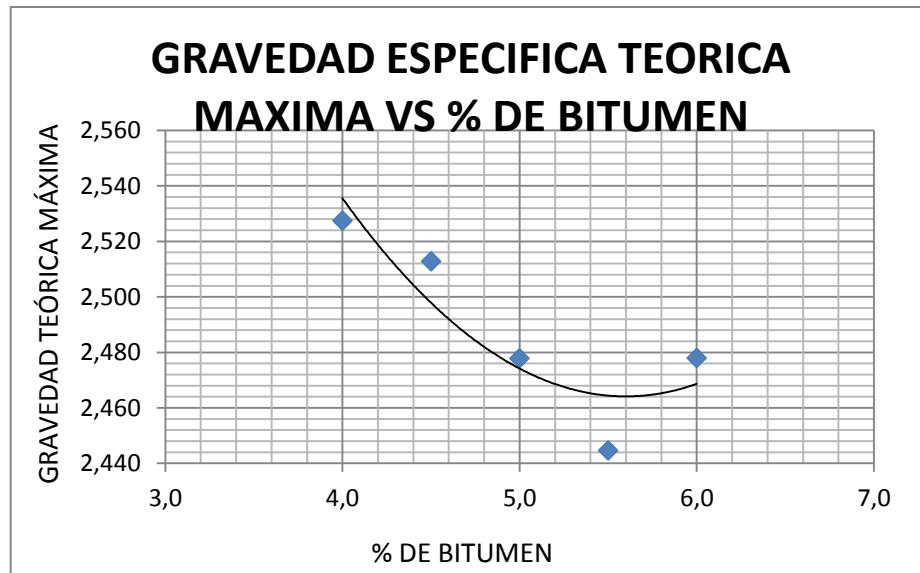
Fuente: elaboración propia con base en resultados de ensayo de laboratorio.

Tabla XXII. Resumen densidad teórica máxima vs % de bitumen

PORCENTAJE DE BITUMEN	PROMEDIO GRAVEDAD ESPECÍFICA TEÓRICA MÁXIMA
4,0	2,527
4,5	2,513
5,0	2,478
5,5	2,445
6,0	2,478

Fuente: elaboración propia con base en resultados de ensayo de laboratorio.

Figura 10. Gráfica de gravedad específica teórica máxima de mezcla con granulometría Marshall



Fuente: elaboración propia, empleando programa Excel; con base en resultados de ensayo de laboratorio.

2.3.3. Porcentaje de vacíos – densidad ASTM D 3203, AASHTO T 269

Con los datos obtenidos de la gravedad específica *Bulk* y la gravedad específica teórica máxima se calcula el porcentaje de vacíos en la mezcla asfáltica.

A continuación se presentan los datos y cálculos respectivos de los ensayos realizados:

Datos:

4 % de bitumen

$$G_{mb} = 2,27$$

$$G_{mm} = 2,47$$

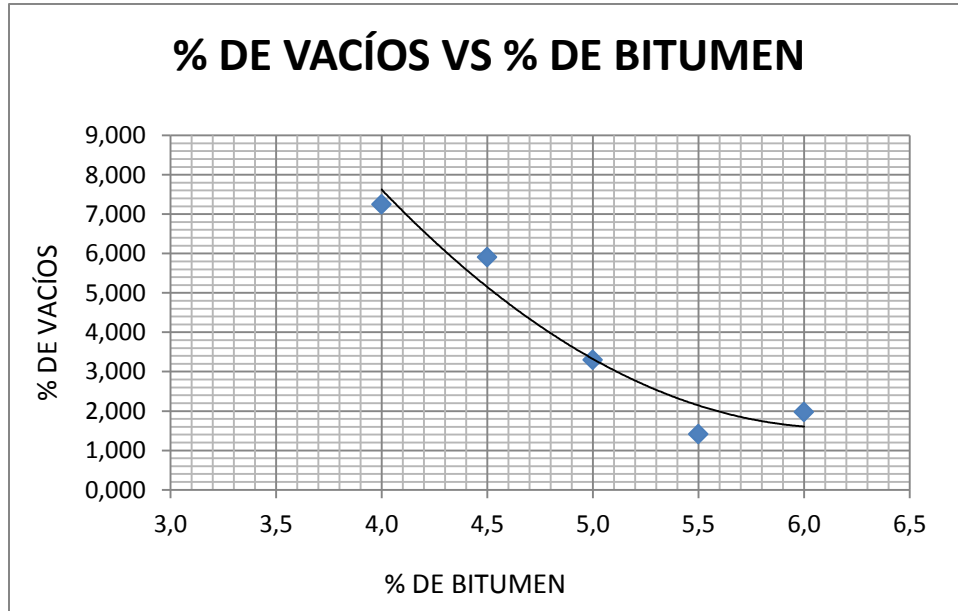
$$V_A = \frac{2,527 - 2,344}{2,527} \times 100 = 7,251 \%$$

Tabla XXIII. Resumen densidad teórica máxima vs porcentaje de bitumen

POCENTAJE DE BITUMEN	GRAVEDAD ESPECÍFICA BULK	GRAVEDAD ESPECÍFICA TEÓRICA MÁXIMA	PORCENTAJE DE VACÍOS %
4	2,344	2,527	7,251
4,5	2,364	2,513	5,906
5	2,396	2,478	3,303
5,5	2,410	2,445	1,415
6	2,429	2,478	1,974

Fuente: elaboración propia con base en resultados de ensayo de laboratorio.

Figura 11. **Gráfica de porcentaje de vacíos – densidad de mezcla Marshall**



Fuente: elaboración propia, empleando programa Excel; con base en resultados de ensayo de laboratorio.

2.3.4. Prueba de Estabilidad – Flujo Marshall

A continuación se muestra la tabla de resultados obtenidos en el ensayo de Estabilidad y Flujo Marshall:

Tabla XXIV. Datos de Estabilidad y Flujo Marshall

1 PROBETA 4 %		2 PROBETA 4 %		3 PROBETA 4 %		PROMEDIO CARGA 4 %
ESTABILIDAD	204	ESTABILIDAD	283	ESTABILIDAD	212	CARGA
lbf	1 950	lbf	2 700	lbf	2 025	2 136,0
CORRECCIÓN	1 872	CORRECCIÓN	2 592	CORRECCIÓN	1 944	FLUJO
FLUJO	8	FLUJO	14	FLUJO	14	12
1 PROBETA 4,5 %		2 PROBETA 4,5 %		3 PROBETA 4,5 %		PROMEDIO CARGA 4,5 %
ESTABILIDAD	212	ESTABILIDAD	238	ESTABILIDAD	261	CARGA
lbf	2 025	lbf	2 250	lbf	2 475	2 197,5
CORRECCIÓN	2 025	CORRECCIÓN	2 092,5	CORRECCIÓN	2 475	FLUJO
FLUJO	10	FLUJO	14	FLUJO	12	12
1 PROBETA 5 %		2 PROBETA 5 %		3 PROBETA 5 %		PROMEDIO CARGA 5 %
ESTABILIDAD	231	ESTABILIDAD	235	ESTABILIDAD	235	CARGA
lbf	2 200	lbf	2 225	lbf	2 225	2 187,33
CORRECCIÓN	2 112	CORRECCIÓN	2 225	CORRECCIÓN	2 225	FLUJO
FLUJO	16	FLUJO	12	FLUJO	12	13,33
1 PROBETA 5,5 %		2 PROBETA 5,5 %		3 PROBETA 5,5 %		PROMEDIO CARGA 5,5 %
ESTABILIDAD	195	ESTABILIDAD	212	ESTABILIDAD	200	CARGA
lbf	1 850	lbf	2 025	lbf	1 900	1 900,33
CORRECCIÓN	1 776	CORRECCIÓN	2 025	CORRECCIÓN	1 900	FLUJO
FLUJO	12	FLUJO	15	FLUJO	12	13
1 PROBETA 6 %		2 PROBETA 6 %		3 PROBETA 6 %		PROMEDIO CARGA 6 %
ESTABILIDAD	210	ESTABILIDAD	210	ESTABILIDAD	215	CARGA
lbf	2 000	lbf	2 000	lbf	2 000	2 000,0
CORRECCIÓN	2 000	CORRECCIÓN	2 000	CORRECCIÓN	2 000	FLUJO
FLUJO	15	FLUJO	15	FLUJO	16	15,33

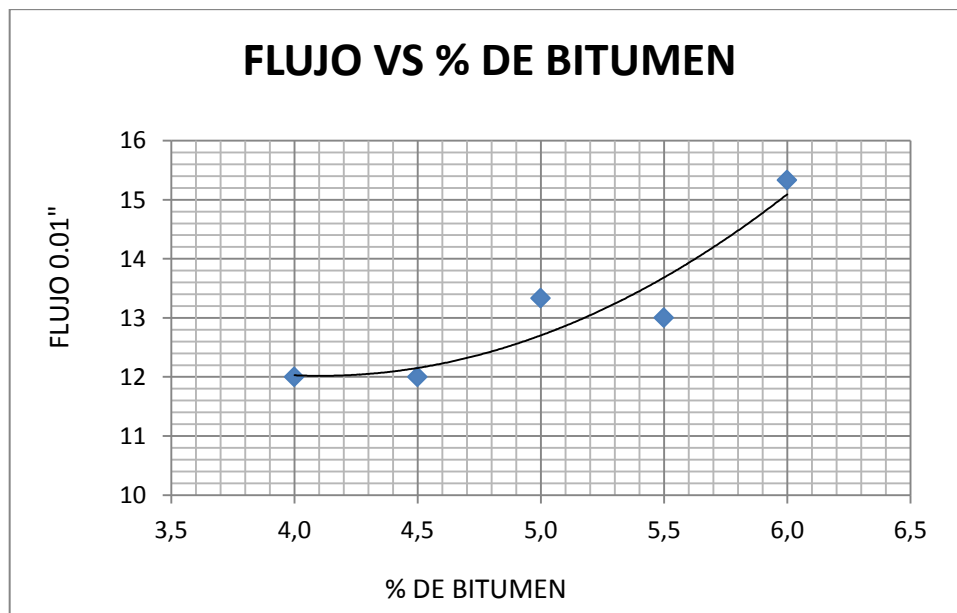
Fuente: elaboración propia con base en resultados de ensayo de laboratorio.

Tabla XXV. Resumen flujo vs % de bitumen

PORCENTAJE DE BITUMEN	FLUJO 0.01"
4,0	12
4,5	12
5,0	13,33
5,5	13
6,0	15,33

Fuente: elaboración propia con base en resultados de ensayo de laboratorio.

Figura 12. Gráfica de Flujo vs porcentaje de bitumen



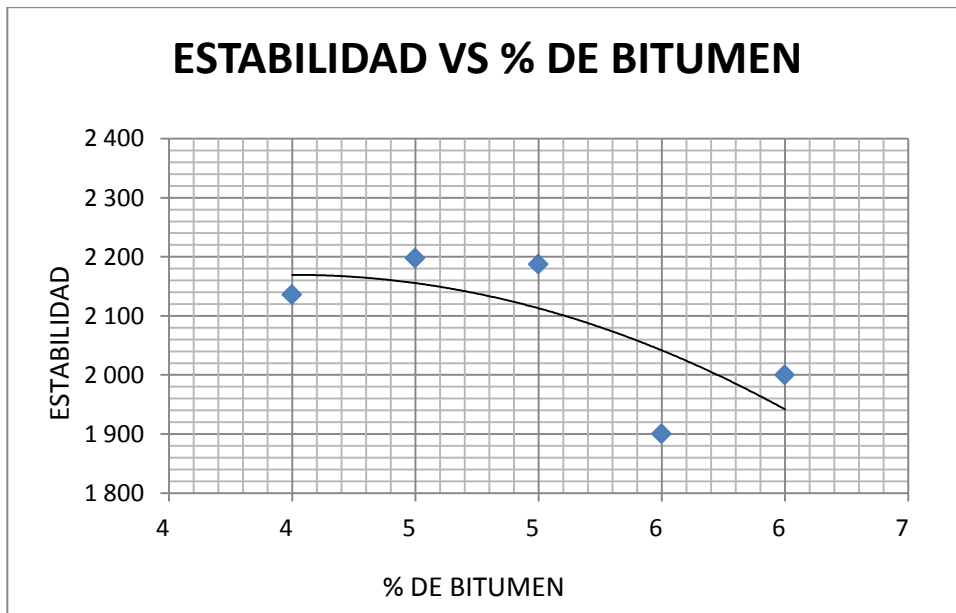
Fuente: elaboración propia, empleando programa Excel; con base en resultados de ensayo de laboratorio.

Tabla XXVI. Resumen de Estabilidad vs porcentaje de bitumen

PORCENTAJE DE BITUMEN	ESTABILIDAD lbf DISEÑO MARSHALL
4	2136
4,5	2197,5
5	2187,33
5,5	1900,33
6	2000

Fuente: elaboración propia con base en resultados de ensayo de laboratorio.

Figura 13. Gráfica de Estabilidad vs porcentaje de bitumen



Fuente: elaboración propia, empleando programa Excel; con base en resultados de ensayo de laboratorio.

2.3.5. Porcentaje de vacíos en el agregado mineral ASTM D 1559

A continuación se presentan los datos y cálculos respectivos del ensayo descrito anteriormente

Ejemplo de cálculo

Datos:

G_{mb} : 2,344

P_s : 96 %

G_{sb} : 2,60

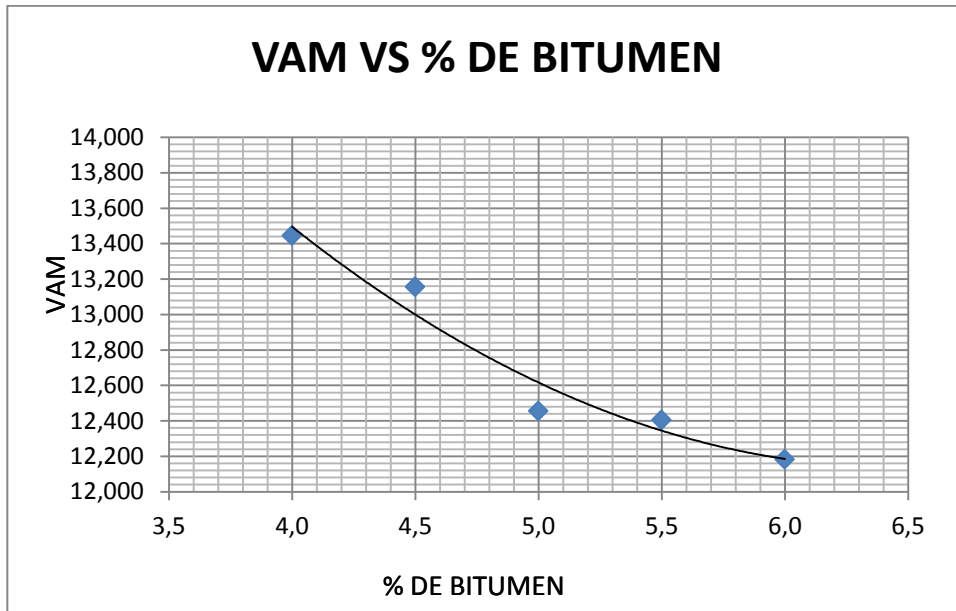
$$VAM = 100 - \frac{2,344 * 96}{2,60} = 14.105 \%$$

Tabla XXVII. Resumen de datos VAM

% DE BITUMEN	GRAVEDAD ESPECÍFICA BULK PROMEDIO	% DE AGREGADO EN LA MEZCLA ASFÁLTICA	GRAVEDAD ESPECÍFICA BRUTA DE LOS AGREGADOS	VACÍOS EN EL AGREGADO MINERAL VAM
4,0	2,344	96	2,6	13,445
4,5	2,364	95,5	2,6	13,155
5,0	2,396	95	2,6	12,455
5,5	2,410	94,5	2,6	12,405
6,0	2,429	94	2,6	12,182

Fuente: elaboración propia con base en resultados de ensayo de laboratorio.

Figura 14. Gráfica de VAM vs porcentaje de bitumen



Fuente: elaboración propia, empleando programa Excel; con base en resultados de ensayo de laboratorio.

2.3.6. Resultados obtenidos en diseño granulométrico Superpave

2.3.6.1. Resultados obtenidos de gravedad específica *Bulk* de briquetas ASTM D 1188

Cálculo de gravedad específica bruta:

Datos:

Probeta 1, 4 % de bitumen, diseño Superpave

A: 1 236,7 g

B: 1 249,05 g

C: 721,12 g

$$G_{mb} = \frac{1\ 241,58}{1\ 252,16 - 720,96} = 2,337$$

Tabla XXVIII. **Datos de gravedad específica Bulk de mezcla con granulometría Superpave**

1 PASTILLA 4 %		2 PASTILLA 4 %		3 PASTILLA 4 %	
Pseco	1 241,58	Pseco	1 208,22	Pseco	1 229,54
Psaturado	1 252,16	Psaturado	1 218,84	Psaturado	1 239,44
Psumergido	720,96	Psumergido	703,2	Psumergido	715,74
1 PASTILLA 4,5 %		2 PASTILLA 4,5 %		3 PASTILLA 4,5 %	
Pseco	1 221,40	Pseco	1 251,52	Pseco	1 246,29
Psaturado	1 226,79	Psaturado	1 257,39	Psaturado	1 250,75
Psumergido	710,04	Psumergido	728,12	Psumergido	728,11
1 PASTILLA 5 %		2 PASTILLA 5 %		3 PASTILLA 5 %	
Pseco	1 230,75	Pseco	1 207,86	Pseco	1 237,22
Psaturado	1 236,64	Psaturado	1 210,66	Psaturado	1 241,00
Psumergido	714,07	Psumergido	701,26	Psumergido	718,01
1 PASTILLA 5,5 %		2 PASTILLA 5,5 %		3 PASTILLA 5,5 %	
Pseco	1 242,33	Pseco	1 248,71	Pseco	1 269,48
Psaturado	1 246,94	Psaturado	1 250,64	Psaturado	1 271,24
Psumergido	718,34	Psumergido	727,87	Psumergido	740,14
1 PASTILLA 6 %		2 PASTILLA 6 %		3 PASTILLA 6 %	
Pseco	1 267,27	Pseco	1 249,58	Pseco	1 253,4
Psaturado	1 267,93	Psaturado	1 250,25	Psaturado	1 255,4
Psumergido	743,06	Psumergido	735,12	Psumergido	737,62

Fuente: elaboración propia con base en resultados de ensayo de laboratorio.

Tabla XXIX. **Resultados de gravedad específica Bulk de mezcla con granulometría Superpave**

1 PASTILLA 4 %		2 PASTILLA 4 %		3 PASTILLA 4 %	
Gmb	2,337	Gmb	2,343	Gmb	2,348
Promedio					2,343
1 PASTILLA 4,5 %		2 PASTILLA 4,5 %		3 PASTILLA 4,5 %	
Gmb	2,364	Gmb	2,365	Gmb	2,385
Promedio					2,371
1 PASTILLA 5 %		2 PASTILLA 5 %		3 PASTILLA 5 %	
Gmb	2,355	Gmb	2,371	Gmb	2,366
Promedio					2,364
1 PASTILLA 5,5 %		2 PASTILLA 5,5 %		3 PASTILLA 5,5 %	
Gmb	2,350	Gmb	2,389	Gmb	2,390
Promedio					2,376
1 PASTILLA 6 %		2 PASTILLA 6 %		3 PASTILLA 6 %	
Gmb	2,414	Gmb	2,426	Gmb	2,421
Promedio					2,420

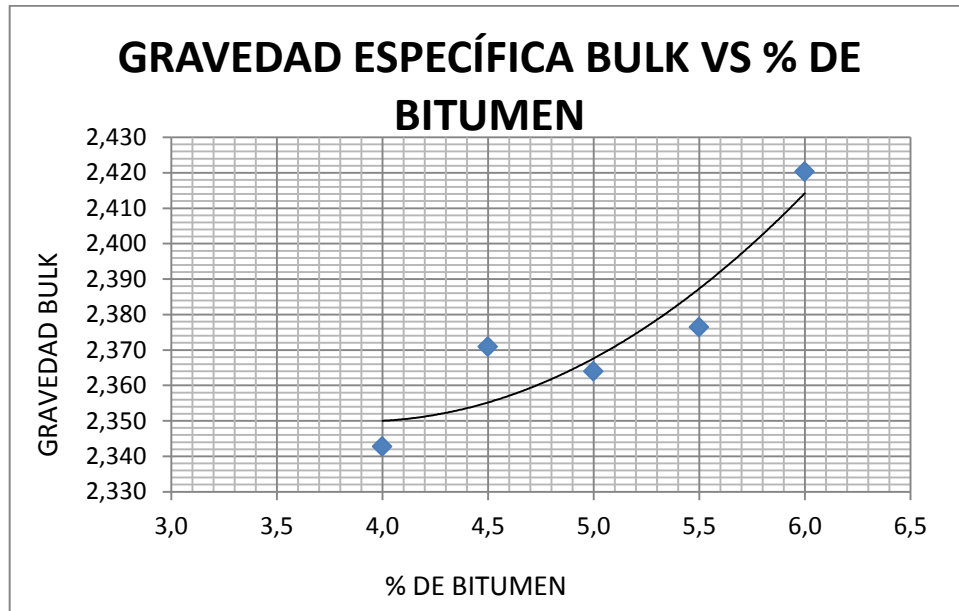
Fuente: elaboración propia con base en resultados de ensayo de laboratorio.

Tabla XXX. **Resumen de densidad vs porcentaje de bitumen**

POCENTAJE DE BITUMEN	GRAVEDAD ESPECÍFICA BULK
4,0	2,343
4,5	2,371
5,0	2,364
5,5	2,376
6,0	2,420

Fuente: elaboración propia con base a resultados de ensayo de laboratorio.

Figura 15. **Gráfica de gravedad específica Bulk vs porcentaje de bitumen**



Fuente: elaboración propia, empleando programa Excel; con base en resultados de ensayo de laboratorio.

2.3.7. Gravedad específica teórica máxima

A continuación, se presentan los datos y cálculos respectivos del ensayo descrito anteriormente.

Cálculo de gravedad específica teórica máxima:

Datos:

4 % de bitumen, diseño tradicional:

A: 1 195,5 g

D: 7 378,50 g

E: 8 107,90 g

$$G_{mm} = \frac{1\ 195,5}{1\ 195,5 + 7\ 377,4 - 8\ 108,2} = 2,573$$

Tabla XXXI. Datos de gravedad específica teórica máxima de mezcla con granulometría Superpave

PASTILLA 4 %			
Peso Tara + Material	1 453,2	Gmm	2,573
Picnómetro + Agua	7 377,4		
Picnómetro + Mat + Agua	8 108,2		
Peso Tara	257,7		
PASTILLA 4,5 %			
Peso Tara + Material	1 495,9	Gmm	2,516
Picnómetro + Agua	7 377,2		
Picnómetro + Mat + Agua	8 123,9		
Peso Tara	256,7		
PASTILLA 5 %			
Peso Tara + Material	1 456,1	Gmm	2,519
Picnómetro + Agua	7 376,4		
Picnómetro + Mat + Agua	8 098		
Peso Tara	259,4		
PASTILLA 5,5 %			
Peso Tara + Material	1 476,4	Gmm	2,459
Picnómetro + Agua	7 383,6		
Picnómetro + Mat + Agua	8 106,9		
Peso Tara	257,500		
PASTILLA 6 %			
Peso Tara + Material	1 519,3	Gmm	2,480
Picnómetro + Agua	7 377,5		
Picnómetro + Mat + Agua	8 129,7		
Peso Tara	258,7		

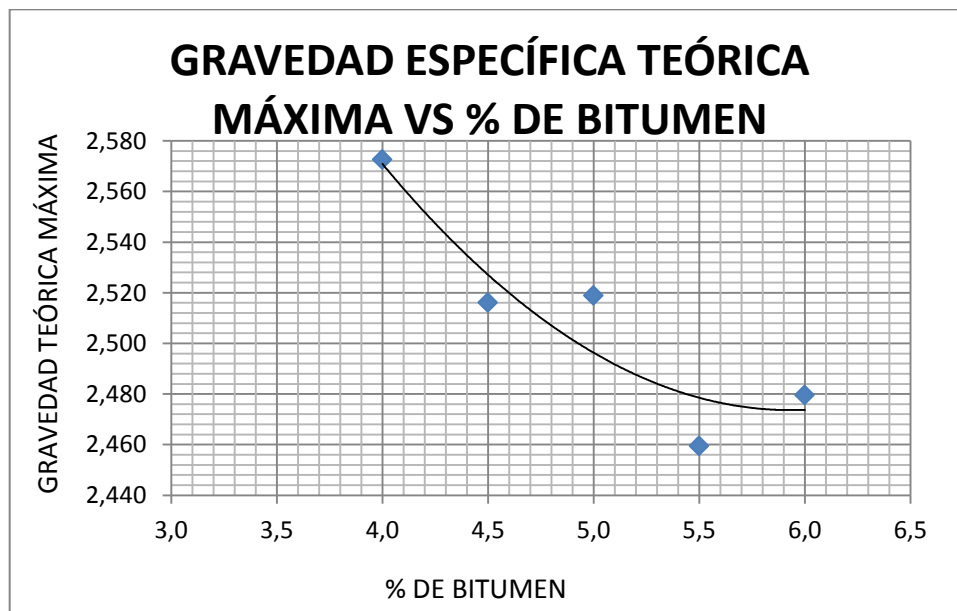
Fuente: elaboración propia con base en resultados de ensayo de laboratorio.

Tabla XXXII. Resumen densidad teórica máxima vs porcentaje de bitumen

POCENTAJE DE BITUMEN	GRAVEDAD ESPECÍFICA TEÓRICA MÁXIMA
4,0	2,573
4,5	2,516
5,0	2,519
5,5	2,459
6,0	2,480

Fuente: elaboración propia con base en resultados de ensayo de laboratorio.

Figura 16. Gráfica de gravedad específica teórica máxima con granulometría Superpave



Fuente: elaboración propia, empleando programa Excel; con base en resultados de ensayo de laboratorio.

2.3.8. Porcentaje de vacíos – densidad ASTM D 3203, AASHTO T 269

Con los datos obtenidos de la gravedad específica Bulk y la gravedad específica teórica máxima se calcula el porcentaje de vacíos en la mezcla asfáltica.

A continuación se presentan los datos y cálculos respectivos de los ensayos realizados:

Datos:

4 % de bitumen

$$G_{mb} = 2,343$$

$$G_{mm} = 2,573$$

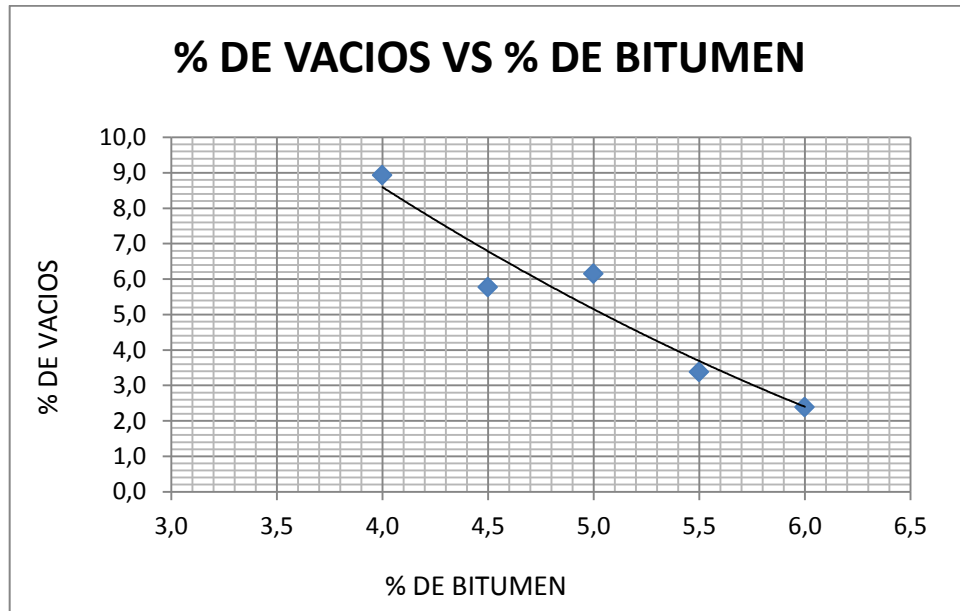
$$V_A = \frac{2,573 - 2,343}{2,573} \times 100 = 8,935 \%$$

Tabla XXXIII. Porcentaje de vacíos

POCENTAJE DE BITUMEN	GRAVEDAD ESPECÍFICA BULK	GRAVEDAD ESPECÍFICA TEÓRICA MÁXIMA	PORCENTAJE DE VACÍOS
4,0	2,343	2,573	8,935
4,5	2,371	2,516	5,771
5,0	2,364	2,519	6,147
5,5	2,376	2,459	3,377
6,0	2,420	2,480	2,389

Fuente: elaboración propia con base en resultados de ensayo de laboratorio.

Figura 17. **Porcentaje de vacíos vs porcentaje de bitumen**



Fuente: elaboración propia, empleando programa Excel; con base en resultados de ensayo de laboratorio.

2.3.9. Resistencia de mezclas asfálticas Marshall AASHTO T 245 y ASTM D 1559

A continuación se muestra la tabla de resultados obtenidos en el ensayo de Estabilidad y Flujo Marshall:

Tabla XXXIV. Datos Estabilidad y Flujo Marshall

1 PROBETA 4 %		2 PROBETA 4 %		3 PROBETA 4 %		PROMEDIO CARGA 4 %
ESTABILIDAD	250	ESTABILIDAD	218	ESTABILIDAD	215	CARGA
lbf	2 375	lbf	2 075	lbf	2 050	2 107,67
CORRECCIÓN	2 280	CORRECCIÓN	2 075	CORRECCIÓN	1 968	FLUJO
FLUJO	12	FLUJO	11	FLUJO	10	11,00
1 PROBETA 4,5 %		2 PROBETA 4,5 %		3 PROBETA 4,5 %		PROMEDIO CARGA 4,5 %
ESTABILIDAD	198	ESTABILIDAD	232	ESTABILIDAD	245	CARGA
lbf	1 875	lbf	2 200	lbf	2 325	2 073,00
CORRECCIÓN	1 875	CORRECCIÓN	2 112	CORRECCIÓN	2 232	FLUJO
FLUJO	8	FLUJO	8	FLUJO	14	10,00
1 PROBETA 5 %		2 PROBETA 5 %		3 PROBETA 5 %		PROMEDIO CARGA 5 %
ESTABILIDAD	191	ESTABILIDAD	185	ESTABILIDAD	181	CARGA
lbf	1 800	lbf	1 750	lbf	1 750	1 719,33
CORRECCIÓN	1 728	CORRECCIÓN	1 750	CORRECCIÓN	1 680	FLUJO
FLUJO	11	FLUJO	15	FLUJO	13	13,00
1 PROBETA 5,5 %		2 PROBETA 5,5 %		3 PROBETA 5,5 %		PROMEDIO CARGA 5,5 %
ESTABILIDAD	169	ESTABILIDAD	191	ESTABILIDAD	181	CARGA
lbf	1 850	lbf	1 800	lbf	1 600	1 680,00
CORRECCIÓN	1 776	CORRECCIÓN	1 728	CORRECCIÓN	1 536	FLUJO
FLUJO	12	FLUJO	13	FLUJO	12	12,33
1 PROBETA 6 %		2 PROBETA 6 %		3 PROBETA 6 %		PROMEDIO CARGA 6 %
ESTABILIDAD	230	ESTABILIDAD	230	ESTABILIDAD	235	CARGA
lbf	2 200	lbf	2 200	lbf	2 200	2 170,67
CORRECCIÓN	2 112	CORRECCIÓN	2 200	CORRECCIÓN	2 200	FLUJO
FLUJO	15	FLUJO	12	FLUJO	13	13,33

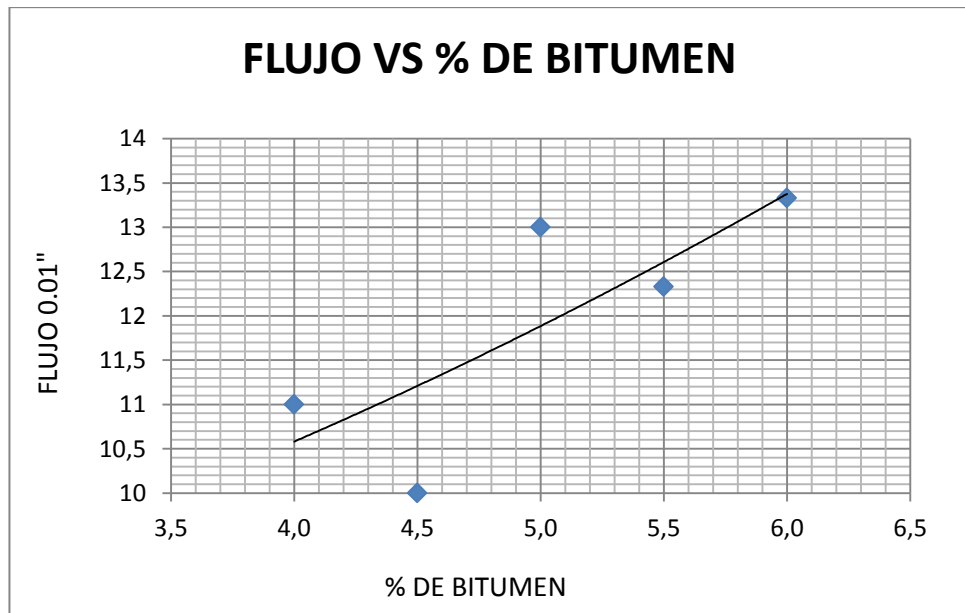
Fuente: elaboración propia con base en resultados de ensayo de laboratorio.

Tabla XXXV. Resumen Flujo vs % de bitumen

PORCENTAJE DE BITUMEN	FLUJO 0,01" DISEÑO 0.45
4,0	11
4,5	10
5,0	13
5,5	12,33
6,0	13,33

Fuente: elaboración propia con base en resultados de ensayo de laboratorio.

Figura 18. Gráfica Flujo vs porcentaje de bitumen



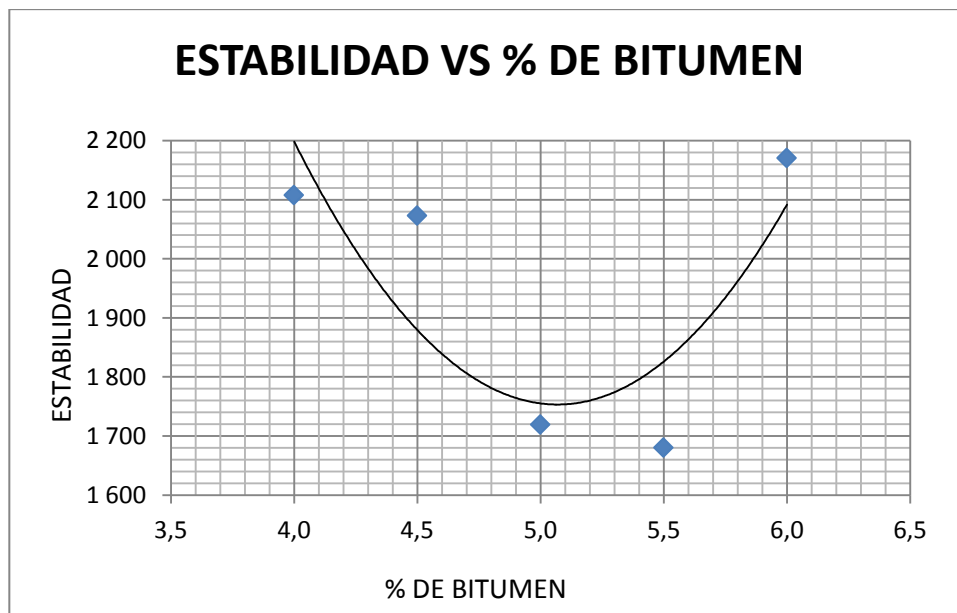
Fuente: elaboración propia, empleando programa Excel; con base en resultados de ensayo de laboratorio.

Tabla XXXVI. Resumen Estabilidad vs porcentaje de bitumen

PORCENTAJE DE BITUMEN	ESTABILIDAD lbf DISEÑO 0.45
4,0	2107,67
4,5	2073
5,0	1719,33
5,5	1680
6,0	2170,67

Fuente: elaboración propia con base en resultados de ensayo de laboratorio.

Figura 19. Gráfica Estabilidad vs porcentaje bitumen



Fuente: elaboración propia, empleando programa Excel; con base a resultados de ensayo de laboratorio.

2.3.10. Porcentaje de vacíos en el agregado mineral ASTM D 1559

A continuación se presentan los datos y cálculos respectivos del ensayo descrito anteriormente

Ejemplo de cálculo

Datos:

G_{mb} : 2,343

P_s : 96 %

G_{sb} : 2,60

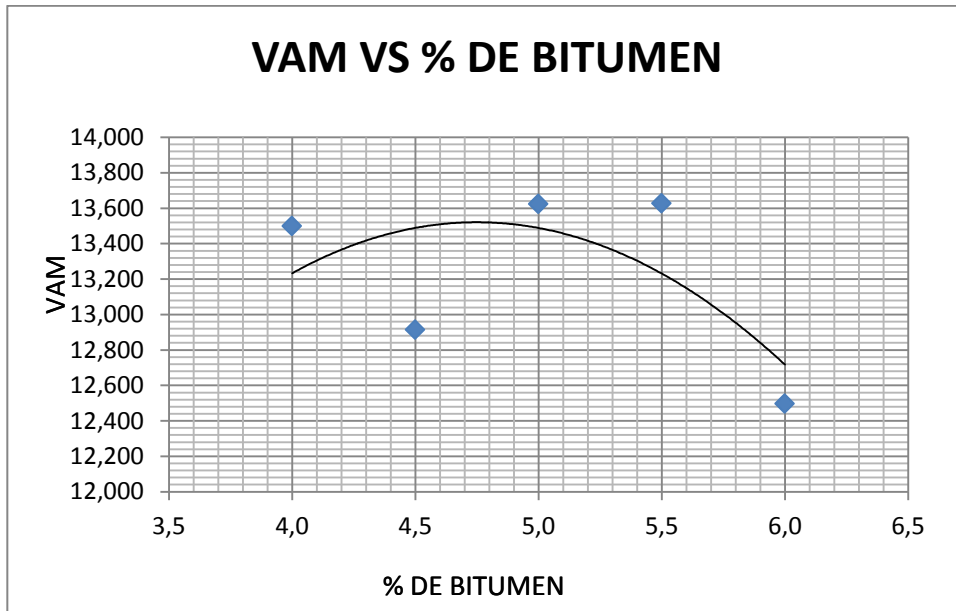
$$VAM = 100 - \frac{2,343 * 96}{2,60} = 13,498 \%$$

Tabla XXXVII. Resumen de datos VAM

POCENTAJE DE BITUMEN	GRAVEDAD ESPECÍFICA BULK PROMEDIO	PORCENTAJE DE AGREGADO EN LA MEZCLA ASFÁLTICA	GRAVEDAD ESPECÍFICA BRUTA DE LOS AGREGADOS	VACÍOS EN EL AGREGADO MINERAL VAM
4,0	2,343	96	2,6	13,498
4,5	2,371	95,5	2,6	12,913
5,0	2,364	95	2,6	13,623
5,5	2,376	94,5	2,6	13,628
6,0	2,420	94	2,6	12,497

Fuente: elaboración propia con base en resultados de ensayo de laboratorio.

Figura 20. Gráfica VAM vs porcentaje de bitumen



Fuente: elaboración propia, empleando programa Excel; con base en resultados de ensayo de laboratorio.

3. ANÁLISIS DE RESULTADOS

3.1. Datos de análisis de resultados

Para evaluar los resultados obtenidos con las dos granulometrías de diseño, se procede al análisis correspondiente de cada ensayo.

3.1.1. Resistencia de mezclas asfálticas Marshall, estabilidad y flujo Marshall, AASHTO T 245 y ASTM D 1559

Los resultados de la estabilidad cumplen satisfactoriamente. Para los dos diseños de granulometría ya que se realizó una dosificación controlada del diseño. El parámetro de carga solo establece que se tiene que tener una carga mayor a 1 200 lbf, por lo cual es difícil especificar el análisis de resultados si todos cumplen con la especificación.

Tabla XXXVIII. **Parámetros y resultados para estabilidad**

PARÁMETROS DE ESPECIFICACIÓN	DISEÑO 0,45	DISEÑO MARSHALL
Mayor a 1200 libras fuerza	TODOS LOS RESULTADOS MAYORES A 1200	TODOS LOS RESULTADOS MAYORES A 1200

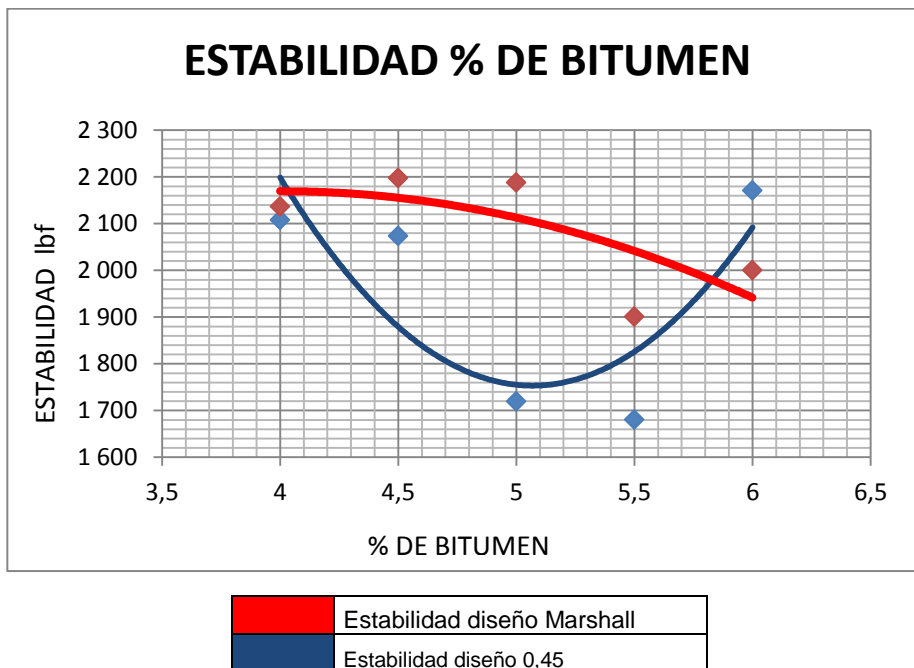
Fuente: elaboración propia con base en resultados de ensayo de laboratorio.

Tabla XXXIX. Resultado de ensayo de estabilidad

PORCENTAJE DE BITUMEN	ESTABILIDAD DISEÑO 0.45 lbf	ESTABILIDAD DISEÑO MARSHALL lbf
4	2 107,67	2 136
4,5	2 073	2 197,5
5	1 719,33	2 187,33
5,5	1 680	1 900,33
6	2 170,67	2 000

Fuente: elaboración propia con base en resultados de ensayo de laboratorio.

Figura 21. Gráfica de comparación, estabilidad vs porcentaje de bitumen



Fuente: elaboración propia, empleando programa Excel; con base a resultados de ensayo de laboratorio.

Los resultados para el flujo son satisfactorios, ya que aunque en la granulometría Marshall no se cumple en el 6 % de bitumen para tráfico mayor a $ESAL > 10^6$. El rango de deformación es menor en el diseño de 0.45, esto por el mayor número de tamices y restricciones utilizadas para su diseño en tamaño de partículas granulométricas, lo que hace que la granulometría tenga una dosificación de mayor calidad que la realizada con la granulometría Marshall.

Tabla XL. **Parámetros y resultados de flujo Marshall**

TRANSITO	PARAMETROS DE ESPECIFICACIÓN	DISEÑO 0,45	DISEÑO MARSHALL
ESAL < 10^6	8---16	TODOS CUMPLEN	TODOS CUMPLEN
ESAL > 10^6	8---14	TODOS CUMPLEN	NO CUMPLE EN EL 6 % DE BITUMEN

Fuente: elaboración propia con base en resultados de ensayo de laboratorio.

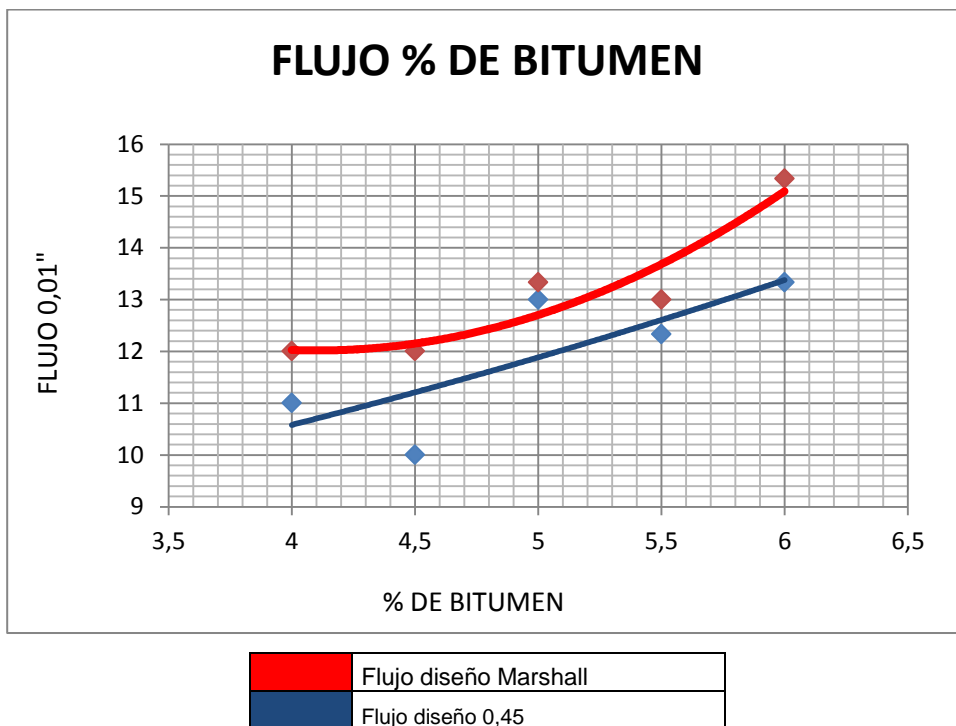
A continuación se muestran los resultados del ensayo de laboratorio de Flujo Marshall.

Tabla XLI. Resultados de ensayo de flujo Marshall

PORCENTAJE DE BITUMEN	FLUJO 0,01" DISEÑO 0.45	FLUJO 0,01" DISEÑO MARSHALL
4	11	12
4,5	10	12
5	13	13,33
5,5	12,33	13
6	13,33	15,33

Fuente: elaboración propia con base en resultados de ensayo de laboratorio.

Figura 22. Gráfica de comparación, flujo vs porcentaje de bitumen



Fuente: elaboración propia, empleando programa Excel; con base en resultados de ensayo de laboratorio.

3.1.2. Resultados obtenidos gravedad específica *Bulk* de briquetas ASTM D 1188

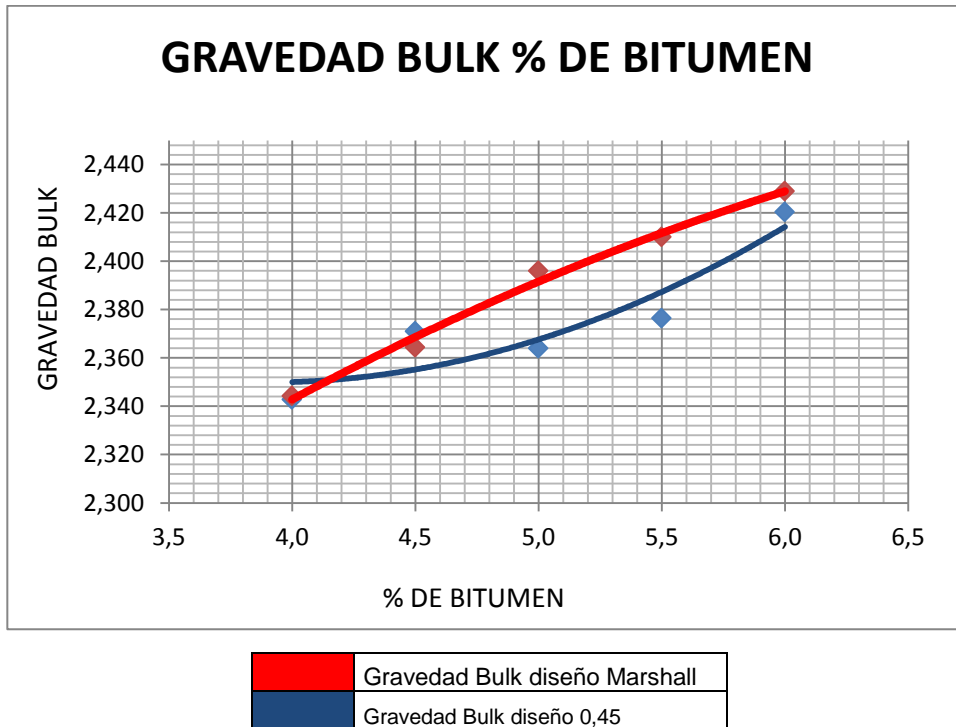
La gravedad específica Bulk, no tiene parámetros dentro del libro azul, pero se observa que la granulometría de diseño Marshall levemente más alta que la del diseño 0,45.

Tabla XLII. **Parámetros y resultados de gravedad específica *Bulk* diseño Marshall**

POCENTAJE DE BITUMEN	GRAVEDAD ESPECÍFICA BULK 0,45	GRAVEDAD ESPECÍFICA BULK MARSHALL
4,0	2,343	2,344
4,5	2,371	2,364
5,0	2,364	2,396
5,5	2,376	2,410
6,0	2,420	2,429

Fuente: elaboración propia con base en resultados de ensayo de laboratorio.

Figura 23. **Gráfica de comparación, Bulk vs porcentaje de bitumen**



Fuente: elaboración propia, empleando programa Excel; con base en resultados de ensayo de laboratorio.

3.1.3. Gravedad específica teórica máxima

La Gravedad específica teórica máxima aumenta en los primeros porcentajes de bitumen en el diseño 0,45, pero disminuye drásticamente para obtener casi los mismos valores que el diseño Marshall. Este ensayo tiene más diferencias que la densidad Bulk, por lo cual este es el ensayo que marca la diferencia en los porcentajes de vacíos.

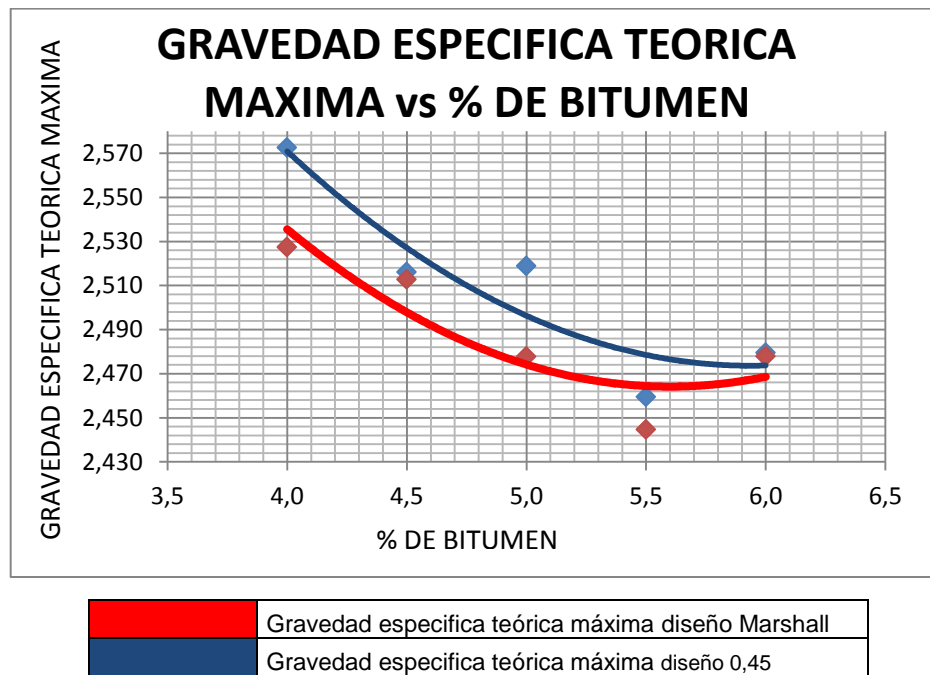
Los datos que se indican en la tabla XLIII muestran los parámetros y resultados de los porcentajes de vacíos de dicha gravedad.

Tabla XLIII. **Parámetros y resultados porcentaje de vacíos**

POCENTAJE DE BITUMEN	GRAVEDAD ESPECÍFICA TEÓRICA MÁXIMA 0,45	GRAVEDAD ESPECÍFICA TEÓRICA MÁXIMA MARSHALL
4,0	2,573	2,527
4,5	2,516	2,513
5,0	2,519	2,478
5,5	2,459	2,445
6,0	2,480	2,478

Fuente: elaboración propia con base en resultados de ensayo de laboratorio.

Figura 24. **Gráficas de comparación, gravedad específica teórica máxima vs porcentaje de bitumen**



Fuente: elaboración propia, empleando programa Excel; con base en resultados de ensayo de laboratorio.

3.1.4. Porcentaje de vacíos – densidad

Los vacíos presentan un comportamiento más estable en la dosificación en la cual se utilizó la gráfica elevada la potencia 0,45, Marshall tiene saltos en los porcentajes de vacíos más grandes. Esto significa que la mezcla realizada con la granulometría elevada a la potencia 0,45 es más estable para diseñar.

Tabla XLIV. **Parámetros y resultado porcentaje de vacíos**

PARÁMETROS DE ESPECIFICACIÓN	DISEÑO 0,45	DISEÑO MARSHALL
3 a 5 % de vacíos	5 % DE BITUMEN A 5,7%	4,5 % DE BITUMEN A 5,1

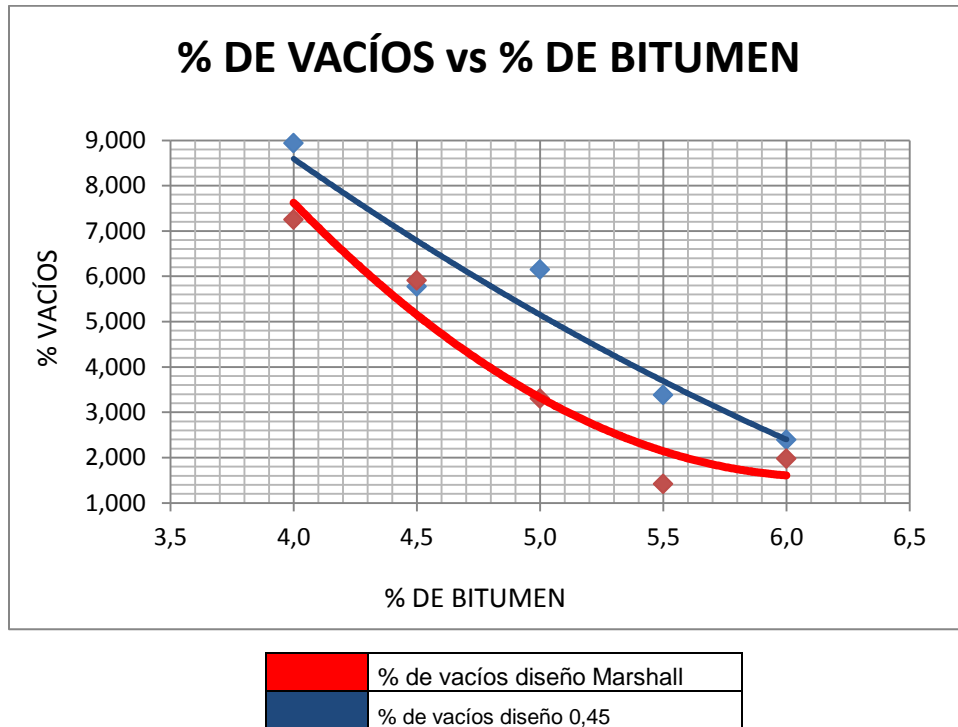
Fuente: elaboración propia con base en resultados de ensayo de laboratorio.

Tabla XLV. **Parámetros y resultados de vacíos**

POCENTAJE DE BITUMEN	PORCENTAJE DE VACÍOS 0,45	PORCENTAJE DE VACÍOS MARSHALL
4,0	8,935	7,251
4,5	5,771	5,906
5,0	6,147	3,303
5,5	3,377	1,415
6,0	2,389	1,974

Fuente: elaboración propia con base en resultados de ensayo de laboratorio.

Figura 25. Gráficas de comparación, flujo vs porcentaje de bitumen



Fuente: elaboración propia, empleando programa Excel; con base en resultados de ensayo de laboratorio.

3.1.5. Porcentaje de vacíos en el agregado mineral ASTM D 1559

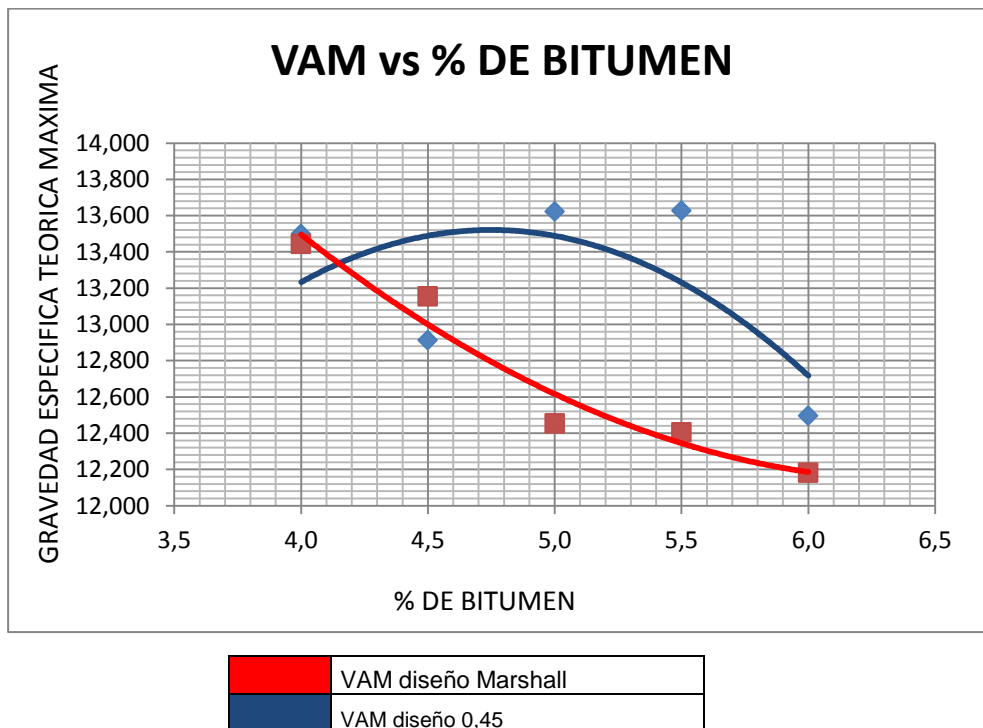
Los porcentajes de vacíos en el agregado mineral no tuvieron una separación en los resultados considerable, con lo cual se encuentran dentro de los parámetros requeridos por la Dirección General de Caminos.

Tabla XLVI. **Parámetros y resultados VAM**

POCENTAJE DE BITUMEN	VACÍOS EN EL AGREGADO MINERAL VAM 0,45	VACÍOS EN EL AGREGADO MINERAL VAM MARSHALL
4,0	13,498	13,445
4,5	12,913	13,155
5,0	13,623	12,455
5,5	13,628	12,405
6,0	12,497	12,182

Fuente: elaboración propia con base en resultados de ensayo de laboratorio.

Figura 26. **Graficas de comparación VAM**



Fuente: elaboración propia, empleando programa Excel; con base en resultados de ensayo de laboratorio.

CONCLUSIONES

1. El diseño granulométrico basado en la norma ASTM D 3515 y la graduación Superpave para agregado, se encuentran en las especificaciones de la Dirección General de Caminos. La diferencia entre ellas es que la granulometría Superpave hace más pequeño el rango de tamaños de abertura de tamices, además de adicionar mayor cantidad de tamices. Con ello la graduación del agregado es mucho más fácil de controlar, al no tener un rango demasiado amplio de tamaño de partículas de agregado pétreo.
2. El flujo (deformación) en la mezcla asfáltica diseñada con la graduación Superpave, se mantiene dentro del rango de las especificaciones y sufre menos cambios drásticos cuando se le añade AC al agregado. Cuando se controla mejor el agregado dosificado en la granulometría usada, la deformación se puede mantener dentro de los parámetros en todo el diseño.
3. Los vacíos en la mezcla asfáltica también se ven mejor controlados, es decir de nuevo los cambios no se dan de una forma abrupta ni en porcentajes muy bajos. Esto es de vital ayuda, ya que este parámetro es uno de los más difíciles de controlar junto con los vacíos en el agregado mineral VAM, ya que estos dos parámetros son de los más importantes para establecer si las propiedades de una mezcla asfáltica son óptimas para un pavimento flexible.

4. La carga ha cumplido en todos los porcentajes de bitumen en los dos tipos de diseño granulométrico, pero basados en otras investigaciones. En la presente se observa que muy difícilmente la estabilidad estará a bajo de las especificaciones salvo una baja cantidad de bitumen o un mal diseño granulométrico.
5. Un diseño granulométrico no se basa solo en los parámetros establecidos en las especificaciones, puede ser que aunque se diseñe dentro de los límites gráficos y aun así no obtener una buena mezcla asfáltica, en este caso se da en mayor manera si seguimos las especificaciones de la norma ASTM D 3515. Muchas veces se debe realizar más de un diseño para que se acople al tipo de agregado y AC. Otro factor es el tipo de AC a utilizar. En este caso utilizar AC-40 ayudo a mejorar las características de la mezcla asfáltica. Si bien hay diferencias físicas y mecánicas ambos diseños se toman como de buen desempeño para utilizar en un pavimento flexible.
6. Con los datos obtenidos se establece que la granulometría de diseño Superpave se puede utilizar para mejorar el control de calidad del diseño en las mezclas asfálticas por el método Marshall y así mejorar las características físicas y mecánicas en un pavimento flexible.
7. Los cambios mecánicos en la mezcla asfáltica son más estables en la granulometría Superpave y se mantienen dentro de las especificaciones a cumplir. Esto indica mayor estabilidad en el la mezcla asfáltica. Al tener más control sobre estos cambios y que no sean tan bruscos, se obtienen pavimentos de mayor calidad y durabilidad.

RECOMENDACIONES

1. En el Reporte 464 "*The restricted zone in the Superpave aggregate gradation specification*" del NCHRP, existe la información que el diseño granulométrico Superpave puede atravesar la zona restringida en el diseño granulométrico, por lo cual es conveniente poder realizar una investigación sobre el tema y así poder concluir si se puede utilizar cualquier diseño que pase sobre la zona restringida sin ocasionar deficiencias en la mezcla asfáltica.
2. La utilización de cementos asfálticos de mayor viscosidad, permite mejorar la calidad de las mezclas asfálticas en caliente, sobre todo aquellas que se modifican. Cuando se aplica mayor viscosidad de AC, se logra obtener mejores resultados en la reducción de vacíos de la mezcla. Estas propiedades se ven ampliamente mejoradas al modificar los AC con polímeros.
3. La utilización de arenas de río o sin triturar afectan las propiedades de la mezcla asfáltica, por lo que se recomienda utilizar agregado fino triturado para poder cumplir las especificaciones y mejorar las características físicas y propiedades mecánicas en el diseño de la mezcla asfáltica.

BIBLIOGRAFÍA

1. American Society for Testing and Materials. *Standard specification for coarse aggregate for bituminous paving mixtures*. ASTM D692. EUA: ASTM, 2000. 2 p.
2. _____ . *Standard specification for fine aggregate for bituminous paving mixtures*. ASTM D1073. EUA: ASTM, 1999. 2 p.
3. CORONADO VELIZ, Jorge. *Caracterización y análisis comparativo de diseño de mezclas asfálticas en caliente, empleando cemento asfáltico AC-20, AC-30 y AC-40*. Guatemala, trabajo de graduación de ingeniería civil. Universidad de San Carlos de Guatemala. Facultad de Ingeniería. 130 p.
4. CRESPIAN MOLINA, Rafael; SANTA CRUZ JOVEL, Ismael; TORRES LINARES, Pablo. *Aplicación del método marshall y granulometría superpave en el diseño de mezclas asfálticas en caliente con asfalto clasificación grado de desempeño*. Universidad de El Salvador, Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Escuela de Ingeniería Civil, El Salvador: 2012. 312 p.
5. DELGADO ALAMILLA, Horacio; GARNICA ANGUAS, Paul; RODRIGUEZ OROPEZA, Giovanni. Instituto Mexicano del Transporte. *Influencia de la granulometría en las propiedades volumétricas de la mezcla asfáltica*. México: Secretaría de Comunicaciones y Transportes, 2006. 99 p.

6. Dirección General de Caminos. *Especificaciones generales para construcción de carreteras y puentes*. Guatemala: Cámara Guatemalteca de la Construcción, 2001. 724 p.
7. Instituto Mexicano del Transporte. *Análisis comparativo de los métodos Marshall y Superpave para compactación de mezclas asfálticas*. México: Secretaría de Comunicaciones y Transportes, 2005. 62 p.
8. Instituto Mexicano del Transporte. *Análisis de la influencia de método de compactación en el comportamiento mecánico de mezclas asfálticas*. México: Secretaría de Comunicaciones y Transportes, 2004. 46 p.
9. VILLACINDA ORDOÑEZ, Vodenith. *Evaluación del estado actual de la carpeta asfáltica ubicada en el kilómetro 101,5 autopista a puerto quetzal, escuintla*. Trabajo de graduación de ingeniería civil, Universidad de San Carlos de Guatemala. Facultad de Ingeniería. 136 p.

APÉNDICES

Apéndice 1. **Agregado utilizado en el diseño de la mezcla asfáltica**



Fuente: elaboración propia. Laboratorio de Asfaltos. Centro de Investigaciones de Ingeniería, USAC.

Apéndice 2. **Mezcla asfáltica utilizada en el diseño**



Fuente: elaboración propia. Laboratorio de Asfaltos. Centro de Investigaciones de Ingeniería, USAC.

Apéndice 3. Ensayo de gravedad específica teórica máxima “rice”



Fuente: elaboración propia. Laboratorio de Asfaltos. Centro de Investigaciones de Ingeniería, USAC.

Apéndice 4. Probetas compactadas a diferentes porcentajes de bitumen



Fuente: elaboración propia. Laboratorio de Asfaltos. Centro de Investigaciones de Ingeniería, USAC.

ANEXOS

Anexo 1. Densidad específica teórica máxima "RICE"



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



INFORME NUMERO: 036 L.B.A.

ORDEN DE TRABAJO: 36914

No. 09545

INTERESADO: JOSÉ JUAN ISTUPE IBAÑEZ - 200313368
PROYECTO: TRABAJO DE GRADUACIÓN: INFLUENCIA DE LA GRANULOMETRÍA EN LAS CARACTERÍSTICAS VOLUMÉTRICAS DEL DISEÑO EN MEZCLAS ASFÁLTICAS.
DIRECCION: CII/FIUSAC
ENSAYO: DENSIDAD ESPECIFICA TEORICA MAXIMA "RICE" ASTM 2041
FECHA: 16 DE MARZO DEL 2017
MUESTRA: MEZCLA ASFALTICA EN CALIENTE AGREGADO FINO Y GRUESO

NORMAL

PROBETA	GMM
AC 40 4%	2,527
AC 40 4,5%	2,478
AC 40 5%	2,478
AC 40 5,5%	2,513
AC 40 6%	2,445

CEMENTO

PROBETA	GMM
AC 40 (0,45) 4%	2,572
AC 40 (0,45)4,5%	2,516
AC 40 (0,45) 5%	2,519
AC 40 (0,45) 5,5%	2,459
AC 40 (0,45) 6%	2,480

Atentamente,

Vo. Bo. :

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



Ing. Darío Francisco Lucas Mazariegos
Jefe Laboratorio de Asfaltos

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

Fuente: Centro de Investigaciones de Ingeniería, USAC.

Anexo 2. Densidad específica de *bulk*



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



INFORME NUMERO: 035 L.B.A.

ORDEN DE TRABAJO: 36914

No. 09544

INTERESADO: JOSÉ JUAN ISTUPE IBAÑEZ - 200313368

PROYECTO: TRABAJO DE GRADUACIÓN: INFLUENCIA DE LA GRANULOMETRÍA EN LAS CARACTERÍSTICAS VOLUMÉTRICAS DEL DISEÑO EN MEZCLAS ASFALTICAS.

DIRECCION: CII/FIUSAC

ENSAYO: DENSIDAD ESPECIFICA DE BULK ASTM 2726-05a

FECHA: 16 DE MARZO DEL 2017

MUESTRA: MEZCLA ASFALTICA EN CALIENTE NORMAL (AGREGADO GRUESO Y FINO)

PROBETA	GRAVEDAD ESPECIFICA
1 AC 40 4 %	2,343
2 AC 40 4 %	2,361
1 AC 40 4,5 %	2,376
2 AC 40 4,5 %	2,346
1 AC 40 5 %	2,389
2 AC 40 5 %	2,401
1 AC 40 5,5 %	2,395
2 AC 40 5,5 %	2,424
1 AC 40 6 %	2,436
2 AC 40 6 %	2,429
1 AC 40 (0,45) 4 %	2,337

PROBETA	GRAVEDAD ESPECIFICA
2 AC 40 (0,45) 4 %	2,343
1 AC 40 (0,45) 4,5 %	2,364
2 AC 40 (0,45) 4,5 %	2,365
1 AC 40 (0,45) 5 %	2,355
1 AC 40 (0,45) 5 %	2,371
1 AC 40 (0,45) 5,5 %	2,350
1 AC 40 (0,45) 5,5 %	2,389
1 AC 40 (0,45) 6 %	2,414
1 AC 40 (0,45) 6 %	2,426

Atentamente,

Vo. Bo. :

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



Ing. Darío Francisco Lucas Mazariegos
Jefe Laboratorio de Asfaltos

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

Fuente: Centro de Investigaciones de Ingeniería, USAC.

Anexo 3. Estabilidad y flujo Marshall



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



No. 09543

INFORME NUMERO: 034 L.B.A.

ORDEN DE TRABAJO: 36914

INTERESADO: JOSÉ JUAN ISTUPE IBAÑEZ - 200313368
PROYECTO: TRABAJO DE GRADUACIÓN: INFLUENCIA DE LA GRANULOMETRÍA EN LAS CARACTERISTICAS VOLUMETRICAS DEL DISEÑO EN MEZCLAS ASFALTICAS
DIRECCION: CII/FIUSAC
ENSAYO: ESTABILIDAD Y FLUJO MARSHALL ASTM D 1559
FECHA: 16 DE MARZO DEL 2017
MUESTRA: MUESTRA DE ASFALTO

PROBETA	ESTABILIDAD LBF	FLUJO 0,01"
1 AC 40 (0,45) 5,5%	1776,00	12
1 AC 40 (0,45) 5,5%	1728,00	13
1 AC 40 (0,45) 6%	2112,00	15
1 AC 40 (0,45) 6%	2200,00	12

Atentamente,

/o. Bo. :

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



Ing. Darío Francisco Lucas Mazariegos
Jefe Laboratorio de Asfaltos

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

Fuente: Centro de Investigaciones de Ingeniería, USAC.

Anexo 4. Estabilidad y flujo Marshall



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



No. 09541

INFORME NUMERO: 032 L.B.A.

ORDEN DE TRABAJO: 36914

INTERESADO: JOSÉ JUAN ISTUPE IBAÑEZ - 200313368

PROYECTO: TRABAJO DE GRADUACIÓN: INFLUENCIA DE LA GRANULOMETRÍA EN LAS CARACTERÍSTICAS VOLUMÉTRICAS DEL DISEÑO EN MEZCLAS ASFÁLTICAS

DIRECCION: CII/FIUSAC

ENSAYO: ESTABILIDAD Y FLUJO MARSHALL ASTM D 1559

FECHA: 16 DE MARZO DEL 2017

MUESTRA: MUESTRA DE ASFALTO

PROBETA	ESTABILIDAD LBF	FLUJO 0,01"
1 AC 40 4%	1872,00	8
2 AC 40 4%	2592,00	14
1 AC 40 4,5%	2025,00	10
2 AC 40 4,5%	2092,50	14
1 AC 40 5%	2112,00	16
2 AC 40 5%	2225,00	12
1 AC 40 5,5%	1776,00	12
2 AC 40 5,5%	2025,00	15

Atentamente,

Vo. Bo. :

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



Ing. Darío Francisco Lucas Mazariegos
Jefe Laboratorio de Asfaltos

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

Fuente: Centro de Investigaciones de Ingeniería, USAC.

Anexo 5. Estabilidad y flujo Marshall



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



No. 09542

INFORME NUMERO: 033 L.B.A.

ORDEN DE TRABAJO: 36914

INTERESADO: JOSÉ JUAN ISTUPE IBAÑEZ - 200313368

PROYECTO: TRABAJO DE GRADUACIÓN: INFLUENCIA DE LA GRANULOMETRÍA EN LAS CARACTERÍSTICAS VOLUMÉTRICAS DEL DISEÑO EN MEZCLAS ASFÁLTICAS

DIRECCION: CII/FIUSAC

ENSAYO: ESTABILIDAD Y FLUJO MARSHALL ASTM D 1559

FECHA: 16 DE MARZO DEL 2017

MUESTRA: MUESTRA DE ASFALTO

PROBETA	ESTABILIDAD LBF	FLUJO 0,01"
1 AC 40 6%	2000,00	15
2 AC 40 6%	2000,00	15
1 AC 40 (0,45) 4%	2280,00	12
2 AC 40 (0,45) 4%	2075,00	11
1 AC 40 (0,45) 4,5%	1875,00	10
2 AC 40 (0,45) 4,5%	2112,00	8
2 AC 40 (0,45) 5%	1728,00	11
2 AC 40 (0,45) 5%	1750,00	15

Atentamente,

Vo. Bo. :

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



Ing. Darío Francisco Luján 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: Centro de Investigaciones de Ingeniería, USAC.

