



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

**CAMBIOS VOLUMÉTRICOS Y FÍSICOS EN MEZCLAS ASFÁLTICAS EN
CALIENTE POR EL MÉTODO MARSHALL UTILIZANDO MATERIALES
FINOS**

Edgar Francisco Morales Donis

Asesorado por el Ing. Darío Francisco Lucas Mazariegos

Guatemala, noviembre de 2017

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**CAMBIOS VOLUMÉTRICOS Y FÍSICOS EN MEZCLAS ASFÁLTICAS EN
CALIENTE POR EL MÉTODO MARSHALL UTILIZANDO MATERIALES
FINOS**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

EDGAR FRANCISCO MORALES DONIS

ASESORADO POR EL ING. DARÍO FRANCISCO LUCAS MAZARIEGOS

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO CIVIL

GUATEMALA, NOVIEMBRE DE 2017

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL I	Ing. Angel Roberto Sic García
VOCAL II	Ing. Pablo Christian de León Rodríguez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Jurgen Andoni Ramírez Ramírez
VOCAL V	Br. Oscar Humberto Galicia Nuñez
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
EXAMINADOR	Ing. Ronald Estuardo Galindo Cabrera
EXAMINADOR	Ing. Guillermo Francisco Melini Salguero
EXAMINADOR	Ing. Nicolás de Jesús Guzmán Sáenz
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

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

CAMBIOS VOLUMÉTRICOS Y FÍSICOS EN MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE POR EL MÉTODO MARSHALL UTILIZANDO MATERIALES FINOS

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Civil, con fecha 11 de abril de 2016.

Edgar Francisco Morales Donis

Guatemala, 29 de Agosto del 2017

Ingeniero
José Gabriel Ordoñez Morales
Coordinador del Área de Materiales de Construcción
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: "CAMBIOS VOLUMÉTRICOS Y FÍSICOS EN MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE POR EL MÉTODO MARSHALL UTILIZANDO MATERIALES FINOS" elaborado por el estudiante Edgar Francisco Morales Donis con carné 201020194, 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,


Ing. Dario Francisco Lucas Mazariegos
Colegiado 10,266
~~Ing. Dario Francisco Lucas Mazariegos.~~
Colegiado 10266



USAC
TRICENTENARIA
Universidad de San Carlos de Guatemala
FACULTAD DE INGENIERÍA

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

ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL



Guatemala,
17 de octubre 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 **CAMBIOS VOLUMÉTRICOS Y FÍSICOS EN MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE POR EL MÉTODO MARSHALL UTILIZANDO MATERIALES FINOS** desarrollado por el estudiante de Ingeniería Civil Edgar Francisco Morales Donis quien contó con la asesoría del Ing. Darío Francisco Lucas Mazariegos.

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. Darío Francisco Lucas Mazariegos y Coordinador del Departamento de Materiales y Construcciones Civiles Ing. José Gabriel Ordóñez Morales, al trabajo de graduación del estudiante Edgar Francisco Morales Donis CAMBIOS VOLUMÉTRICOS Y FÍSICOS EN MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE POR EL MÉTODO MARSHALL UTILIZANDO MATERIALES FINOS da por este medio su aprobación a dicho trabajo.


Ing. Hugo Leonel Montenegro Franco



Guatemala, noviembre 2017

/mmm.

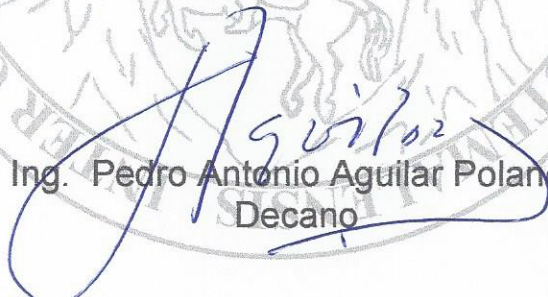


Mas de 136 años de Trabajo y Mejora Continua



El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Civil, al trabajo de graduación titulado: **CAMBIOS VOLUMÉTRICOS Y FÍSICOS EN MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE POR EL MÉTODO MARSHALL UTILIZANDO MATERIALES FINOS**, presentado por el estudiante universitario: **Edgar Francisco Morales Donis**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, se autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE.


Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
Decano

Guatemala, noviembre de 2017



ACTO QUE DEDICO A:

- Dios** Por brindarme las condiciones y las herramientas necesarias para culminar esta etapa muy importante.
- Mis padres** Rafael Antonio Morales Valdizón y Anabella Donis Fernández, por el apoyo incondicional, su comprensión, por desearme siempre lo mejor y permanecer a mi lado ante cualquier situación.
- Mis hermanos** Rafael Antonio y Amalia Marinés, porque han sido una motivación importante para llegar hasta este punto y porque nunca me han dejado de apoyar.
- Mi abuelito** Papá Juan, por su amor incondicional, por siempre ser ejemplo de rectitud y haberme acompañado en este camino de diferentes maneras, siempre he tenido claro que lo tengo a mi lado.
- Mis abuelitas** Mamá Nesh y Mamá Amalita, por acompañarme siempre con sus muestras de amor y comprensión, por ser esas personas que me motivan a superarme día con día.

Mi familia

Tías, tíos, primos, primasos y sobrinos, por ser personas espectaculares siempre, porque nunca me faltó apoyo de ellos y por ese vínculo especial que tengo con cada uno. Han sido parte fundamental de este triunfo.

Mis primos

Jorge Samuel Cabrera Morales y Rodolfo Ottoniel Donis Godínez, por apoyarme desde siempre y estar en los buenos como en los malos momentos juntos. Son una pieza importante en mi vida.

Mi papá Tonito

Porque durante todo el proceso estuvo conmigo con palabras de apoyo y mostrando amor sincero e incondicional, por compartirme tantas charlas que nunca olvidaré, por su amistad tan pura y sus enormes consejos, porque de alguna forma sigo aprendiendo de él. Su legado vive dentro de mí, en mis acciones y nuestros recuerdos.

AGRADECIMIENTOS A:

Mis padres

Porque durante todo este trayecto siempre me apoyaron, con amor y respeto. Por tenerme paciencia y permitirme amarlos cada día más. Son el motor de mi vida y lo mejor de mi día a día.

Mis hermanos

Porque su apoyo ha sido fundamental en todo momento, porque sin ustedes no habría podido dar este paso tan importante.

Mis tías

Tatiana, Odette, Norma y Vivian Morales. Telma Godínez y Karina Castillo, por las muestras de apoyo y cariño incondicional.

Mis tíos

Rodolfo, Guillermo, Ottoniel, Haroldo y Marvin Donis. Adolfo Mota y Ezequiel Herrera, por estar pendientes con palabras de ánimo y respaldo.

Mi asesor

Ingeniero Darío Francisco Lucas Mazariegos, por sus asesorías profesionales, su amistad y soporte brindado en todo momento.

**Universidad de San
Carlos de Guatemala**

Por ser mi segunda casa, en especial la facultad de Ingeniería y todos los que la conforman; a todo el personal docente de la escuela de civil por compartir conocimientos y momentos especiales.

Mis compañeros

A todos los que de alguna manera dejaron una huella importante en mi vida, en especial al TEAM CEIC 2016 y al TEAM PRIVADO.

**Colegio San José de los
Infantes**

A los señores: Oscar Adolfo Orozco y Orozco, Oscar René Morales Monroy, José Antonio Méndez García, Presbítero Manuel Chilín López Capellán y a todo el personal de la institución, por ser parte fundamental en mi formación, inculcándome principios y valores.

Promoción CCXXVIII

Por ser hermanos que siempre están ante cualquier situación, en especial: Ricardo López, Jorge Muñoz, Eduardo Vela, Erick Urizar, Eddy Rodas, Daniel Morales y Kevin Chávez.

Laboratorio de Asfaltos

En especial a José Istupe y Brayan Ortiz, por compartir conocimientos, amistad y motivación a lo largo de todo el proceso de la carrera.

Mis allegados

Doña Mela por su amor y compañía. Familia Herrera Cajina, por su gran amistad y muestras de apoyo.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	VII
LISTA DE SÍMBOLOS	XIII
GLOSARIO	XV
RESUMEN.....	XIX
OBJETIVOS.....	XXI
INTRODUCCIÓN	XXIII
1. MARCO TEÓRICO.....	1
1.1. Antecedentes.....	1
1.1.1. Estudios previos de granulometría en mezclas asfálticas en caliente	1
1.1.1.1. Estudio de la incidencia de la granulometría y de la cantidad de cemento asfáltico en las propiedades físico – mecánicas, principalmente en la durabilidad de las mezclas asfálticas en caliente diseñadas según la división 400, sección 401, tablas 401-1 y 201-16 del libro de especificaciones generales para construcción de carreteras y puentes, Dirección General de Caminos, edición septiembre 2001.....	1
1.1.1.1.1. Conclusiones.....	3
1.1.1.1.2. Recomendaciones.....	3

1.1.1.2.	Criterios para el diseño de mezclas asfálticas en caliente	4
1.1.1.2.1.	Conclusiones.....	5
1.1.1.2.2.	Recomendaciones	6
1.1.1.3.	Incidencia del origen de los materiales calizos y basálticos en el diseño de mezclas de concreto asfáltico, método Marshall.....	6
1.1.1.3.1.	Conclusiones.....	7
1.1.1.3.2.	Recomendaciones	8
1.2.	Características de una mezcla asfáltica	8
1.2.1.	Contenido de bitumen	10
1.2.2.	Resistencia a la deformación	10
1.2.3.	Resistencia a la fatiga	11
1.2.4.	Resistencia al agrietamiento por temperaturas bajas.....	12
1.2.5.	Durabilidad	12
1.2.6.	Trabajabilidad.....	13
1.2.7.	Resistencia a la humedad	13
1.3.	Evaluación y ajustes en un diseño de mezcla asfáltica.....	14
1.3.1.	Vacíos bajos y estabilidad baja	14
1.3.2.	Vacíos bajos y estabilidad apropiada	15
1.3.3.	Vacíos apropiados y estabilidad apropiada.....	15
1.3.4.	Vacíos altos y estabilidad apropiada	15
1.3.5.	Vacíos altos y estabilidad baja	16
1.4.	Graduación de los agregados para pavimentos de concreto asfáltico (ASTM D3515)	16
1.4.1.	Tipos de graduación de agregados	16
1.4.2.	Requisitos de las mezclas asfálticas	18

1.4.3.	Granulometría tipo A y tipo B.....	19
1.4.4.	Granulometrías tipo C, D, E y F.....	21
1.4.4.1.	Granulometría Tipo C (25,4mm)	21
1.4.4.2.	Granulometría tipo D (19mm)	22
1.4.4.3.	Granulometría tipo E (12,5mm)	22
1.4.4.4.	Granulometría tipo F(9,5mm).....	22
1.5.	Ensayos a realizar	23
1.5.1.	Densidad específica bruta “Bulk” (Gmb).....	23
1.5.2.	Densidad específica teórica máxima (Gmm)	24
1.5.3.	Resistencia al flujo plástico de mezclas bituminosas utilizando el equipo de Marshall	24
1.5.4.	Análisis de porcentaje de vacíos	25
2.	DESARROLLO EXPERIMENTAL	27
2.1.	Diseño del experimento	27
2.2.	Equipo utilizado	29
2.2.1.	Descripción del equipo utilizado	31
2.3.	Material utilizado.....	41
2.4.	Procedimiento.....	42
2.4.1.	Procedimiento para la elaboración de probetas.....	42
2.4.2.	Procedimiento para determinar la densidad específica bruta	44
2.4.3.	Procedimiento para realizar la prueba de estabilidad Marshall	44
2.4.4.	Procedimiento para obtener la densidad específica teórica máxima	45
2.4.5.	Procedimiento para obtener el porcentaje de vacíos	46

2.4.6	Procedimiento para obtener el porcentaje de vacíos de agregado mineral	46
2.5.	Datos obtenidos	46
2.5.1.	Datos de análisis para diseños de mezcla	46
2.5.2.	Datos de características físicas de los especímenes	48
2.5.3.	Datos del ensayo de densidad específica bruta	51
2.5.4.	Datos del ensayo estabilidad-flujo Marshall	53
2.5.5.	Datos del ensayo de densidad específica teórica máxima.....	55
2.5.6.	Datos para el porcentaje de vacíos en el agregado mineral	56
2.6.	Cálculos efectuados	57
2.6.1.	Densidad específica bruta	57
2.6.2.	Densidad específica teórica máxima	59
2.6.3.	Porcentaje de vacíos	60
2.6.4.	Porcentaje de vacíos de agregado mineral	62
2.7.	Presentación de resultados.....	63
2.7.1.	Tablas.....	63
2.7.1.1.	Volumen y densidad específica bruta...	63
2.7.1.2.	Resultados de densidad específica teórica máxima y porcentaje de vacíos.....	65
2.7.1.3.	Resultados de estabilidad-flujo Marshall.....	66
2.7.1.4.	Resultados de porcentaje de vacíos en el agregado mineral.....	68
2.7.2.	Gráficas.....	69

2.7.2.1.	Gráficas de deformación vs porcentaje de bitumen	69
2.7.2.2.	Gráficas de porcentaje de vacíos vs porcentaje de bitumen	71
2.7.2.3.	Gráficas de carga vs porcentaje de bitumen.....	73
2.7.2.4.	Gráficas de vacíos de agregado minera vs porcentaje de bitumen.....	74
3.	ANÁLISIS DE RESULTADOS	77
3.1.	Resistencia de mezclas asfálticas Marshall, estabilidad y flujo Marshall, ASHTTO T 245 y ASTM D 1559.....	77
3.2.	Densidad específica bruta "Bulk" de probetas ASTM D 1188..	81
3.3.	Densidad específica teórica máxima	82
3.4.	Porcentaje de vacíos-densidad	84
3.5.	Porcentaje de vacíos en el agregado mineral ASTM D1559 ..	86
	CONCLUSIONES	89
	RECOMENDACIONES.....	91
	BIBLIOGRAFÍA.....	93
	APÉNDICES	95
	ANEXOS.....	101

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Representación del agregado pétreo triturado	9
2.	Representación del agregado de canto rodado	9
3.	Esqueletos del agregado pétreo triturado y el agregado de canto rodado en la mezcla asfáltica	10
4.	Deterioro visible provocado por la fatiga en el pavimento	11
5.	Falla del pavimento debido a contracciones por bajas temperaturas...	12
6.	Estructura convencional de una carpeta asfáltica	17
7.	Muestra de capa intermedia Binder.....	20
8.	Muestra de una carpeta de rodadura de mezcla densa	23
9.	Gráfica de los límites de graduación de agregados para la granulometría tipo E	28
10.	Tamices.....	31
11.	Balanza analítica	32
12.	Espátula	32
13.	Guantes.....	33
14.	Horno utilizado para calentar los agregados y los moldes	33
15.	Estufa utilizada para calentar la mezcla asfáltica	34
16.	Termómetros.....	34
17.	Martillo de compactación.....	35
18.	Molde cilíndrico	36
19.	Pileta con agua para suspensión de especímenes	36
20.	Balanza con la capacidad adecuada y sensibilidad suficiente para densidad teórica máxima	37
21.	Bomba de vacío	37
22.	Manómetro de presión residual con válvula de purga	38

23.	Dispositivo de agitación mecánica	38
24.	Mordazas de hierro fundido	39
25.	Máquina de compresión para la ruptura de las probetas	39
26.	Deformímetro de lectura final fija	40
27.	Baño de maría	40
28.	Agregado utilizado	41
29.	Cemento asfáltico	42
30.	Gráfica de las curvas granulométricas para los tres diseños propuestos	48
31.	Gráfica deformación vs porcentaje de bitumen diseño 1	69
32.	Gráfica deformación vs porcentaje de bitumen diseño 2	70
33.	Gráfica deformación vs porcentaje de bitumen diseño 3	70
34.	Gráfica porcentaje de vacíos vs porcentaje de bitumen diseño 1	71
35.	Gráfica porcentaje de vacíos vs porcentaje de bitumen diseño 2	72
36.	Gráfica porcentaje de vacíos vs porcentaje de bitumen diseño 3	72
37.	Gráfica de carga vs porcentaje de bitumen diseño 1	73
38.	Gráfica de carga vs porcentaje de bitumen diseño 2	73
39.	Gráfica de carga vs porcentaje de bitumen diseño 3	74
40.	Gráfica de vacíos de agregado mineral vs porcentaje de bitumen diseño 1	74
41.	Gráfica de vacíos de agregado mineral vs porcentaje de bitumen diseño 2	75
42.	Gráfica de vacíos de agregado mineral vs porcentaje de bitumen diseño 3	75
43.	Gráfica comparativa de estabilidad vs porcentaje de bitumen	78
44.	Gráfica comparativa de flujo vs porcentaje de bitumen	80
45.	Gráfica comparativa de densidad Bulk vs porcentaje de bitumen	82
46.	Gráfica comparativa de densidad específica teórica máxima vs porcentaje de bitumen	84

47.	Gráfica comparativa de porcentaje de vacíos vs porcentaje de bitumen	86
48.	Gráfica comparativa de porcentaje de vacíos de agregado mineral vs porcentaje de bitumen	87

TABLAS

I.	Resumen de resultados	2
II.	Resultados finales	4
III.	Resultados obtenidos.....	7
IV.	Graduación de los agregados para pavimento de concreto asfáltico (ASTM D 3515)	17
V.	Requisitos de las mezclas de concreto asfáltico	18
VI.	Vacíos de agregado mineral (VAM)	19
VII.	Diseños utilizados en el experimento dentro de los parámetros de una granulometría tipo E	47
VIII.	Datos de diámetros y alturas de las muestras del diseño 1	49
IX.	Datos de diámetro y alturas de las muestras del diseño 2	49
X.	Datos de diámetros y alturas de las muestras del diseño 3	50
XI.	Peso de las muestras del diseño 1.....	51
XII.	Peso de muestras del diseño 2	51
XIII.	Peso de las muestras del diseño 3.....	52
XIV.	Carga y deformación de los especímenes del diseño 1	53
XV.	Carga y deformación de los especímenes del diseño 2	53
XVI.	Carga y deformación de los especímenes del diseño 3	54
XVII.	Pesos tomados de los especímenes escogidos, diseño 1	55
XVIII.	Pesos tomados de los especímenes escogidos, diseño 2	55

XIX.	Pesos tomados de los especímenes escogidos, diseño 3.....	55
XX.	Porcentaje de agregado en la mezcla asfáltica y densidad específica bruta de los agregados, diseño 1.....	56
XXI.	Porcentaje de agregado de la mezcla asfáltica y densidad específica bruta de los agregados, diseño 2.....	56
XXII.	Porcentaje de agregado de la mezcla asfáltica y densidad específica bruta de los agregados, diseño 3.....	56
XXIII.	Resultados de volumen y densidad específica bruta diseño 1	63
XXIV.	Resultados volumen y densidad específica bruta diseño 2	64
XXV.	Resultados volumen y densidad específica bruta diseño 3	64
XXVI.	Resultados de densidad específica teórica máxima y vacíos diseño 1.....	65
XXVII.	Resultados de densidad específica teórica máxima y vacíos diseño 2.....	65
XXVIII.	Resultados de densidad específica teórica máxima y vacíos diseño 3.....	65
XXIX.	Resultados de estabilidad-flujo diseño 1.....	66
XXX.	Resultados de estabilidad-flujo diseño 2.....	66
XXXI.	Resultados de estabilidad-flujo diseño 3.....	67
XXXII.	Resultados de porcentaje de bitumen y vacíos en el agregado mineral diseño 1.....	68
XXXIII.	Resultados de porcentaje de bitumen y vacíos en el agregado mineral diseño 2.....	68
XXXIV.	Resultados de porcentaje de bitumen y vacíos en el agregado mineral diseño 3.....	68
XXXV.	Resultados comparativos de ensayo de estabilidad Marshall.....	77
XXXVI.	Parámetros de flujo de Marshall	79
XXXVII.	Resultados comparativos de ensayo de flujo Marshall	79
XXXVIII.	Resultados comparativos de la densidad específica bruta	81

XXXIX.	Resultados comparativos de densidad específica teórica máxima	83
XL.	Resultados comparativos de porcentaje de vacíos	85
XLI.	Resultados comparativos de porcentaje de vacíos de agregado mineral..	87

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
h	Altura en centímetros
G_{mb}	Densidad Específica bruta “Bulk”
G_{mm}	Densidad Específica Teórica Máxima
G_{sb}	Densidad específica bruta de los agregados
∅	Diámetro en centímetros
Lbf	Libras-fuerza
nm	Nanómetro
Pa-s	Pascal por unidad de segundo
B	Peso en gramos del espécimen en condición seco
C	Peso en gramos del espécimen en condición sumergido.
F	Peso en gramos del espécimen en estado seco desintegrado.
A	Peso en gramos del espécimen saturado con la superficie seca.
E	Peso en gramos del picnómetro con la muestra y agua.
D	Peso en gramos del picnómetro lleno de agua
P_s	Porcentaje de agregados en la mezcla asfáltica
PSI	<i>Pounds-force per square inch</i> (libras-fuerza por pulgada cuadrada)
V_A	Porcentaje de vacíos en la mezcla
VAM	Porcentaje de vacíos en el agregado mineral

”

Pulgadas

V

Volumen del espécimen en metros cúbicos

GLOSARIO

AASHTO	American Association of State Highway and Transportation Officials (Asociación Americana de Oficiales de Carreteras Estatales y Transportes).
AC	Cemento asfáltico. Material de procedencia del petróleo que es utilizado para la pavimentación de calles y carreteras.
Agregados	Material que se obtienen de la trituración de roca, de peñasco o de piedra. También se puede encontrar en las partes bajas de cuerpos de agua.
Anillo dinamométrico	Instrumento utilizado para conocer la carga de compresión aplicada en una máquina de ensayo.
Antidesvestimiento	Que evita que caiga o se desplome la mezcla.
Asfalto	Material que es constituido por betunes naturales obtenidos como residuo de la destilación del petróleo. Es insoluble en agua y posee una consistencia sólida.
ASTM	American Society of Testing Materials (Asociación Americana de Ensayos de Materiales).

Binder	Estrato elástico que actúa como transmisor de cargas de la capa sobre la que circulan los vehículos, y la capa de base que soporta todo el peso.
Bitumen	Mezcla de líquidos orgánicos altamente viscosa, negra, pegajosa, completamente soluble en disulfuro de carbono y compuesta principalmente por hidrocarburos.
Bomba de vacío	Máquina utilizada para extraer, impulsar o elevar moléculas de gas de un volumen sólido.
Deformímetro	Instrumento que mide desplazamientos lineales.
Densidad	Relación que existe entre la masa de un cuerpo o sustancia y el volumen que el mismo ocupa.
Desencofrado	Acción de retirar los elementos que sostienen la mezcla una vez esta haya fraguado.
Escoria	Residuo que queda después del proceso de combustión del carbón.
Estabilidad	Es la capacidad que posee una mezcla asfáltica de resistir cargas dinámicas sin deformarse.
Granulometría	Estudia la distribución de las partículas que conforman un suelo según su tamaño.

Industria metalúrgica	Es el sector industrial que realiza diferentes actividades relacionadas con el proceso de metales para la fabricación de herramientas, piezas y maquinaria.
Ligante	Material que tiene como función unir o pegar dos o más partículas de diferentes materiales.
Pavimento	Estructura principal de una carretera pavimentada, tiene como función principal distribuir las cargas vehiculares al suelo para evitar deformaciones.
Perenco	Industria petrolera anglofrancesa, opera en Guatemala desde 2001 produciendo crudo del campo Xan, en la región de Petén.
Picnómetro	Instrumento de medición que se utiliza para determinar el peso específico o densidad de un fluido.
Presión residual	Exceso de presión que existe en un elemento respecto a la presión atmosférica.
Probeta	Elemento sometido a ensayos de laboratorio para un estudio determinado.
Superpave	Método de diseño del cual se obtiene como resultado un pavimento de alto desempeño.

Tamices

Elemento compuesto de malla metálica que consta de barras tejidas y que dejan un espacio entre sí por donde pasa material según sea su tamaño.

Vacíos de aire

Espacios de aire que existen dispersos entre las partículas del agregado que se encuentra recubierto de asfalto en una mezcla compactada.

RESUMEN

Los diseños de mezclas asfálticas se realizan en base a un periodo de diseño y un servicio definido, estas mezclas están conformadas por una dosificación de agregados, y un porcentaje de cemento asfáltico, los cuales determinan como actuara el pavimento, sus propiedades y su desempeño. En la presente investigación se analiza el método Marshall con una granulometría controlada tipo E que posee como tamaño máximo de agregado $\frac{3}{4}$ " , variando la cantidad de material fino dentro de los parámetros de diseño y utilizando cemento asfáltico AC-30.

En la primera parte se despliega el marco teórico, se mencionan antecedentes de estudios previos relacionados con el tema, así como diferentes características de las mezclas asfálticas y el comportamiento de las mismas. Se definen ajustes que se pueden realizar en un diseño para llevar al pavimento a reaccionar de la manera en la que se busque y se da una explicación de los requisitos y usos de los tipos de granulometrías que nos proporciona la norma ASTM D 3515.

Posterior al marco teórico se determina el desarrollo experimental, en este se presenta el diseño del experimento, se describen los ensayos realizados, los cálculos correspondientes y los resultados obtenidos; posterior a esto se representan los resultados en tablas y gráficas con el fin de comparar en el análisis de resultados y poder determinar así las conclusiones del trabajo de investigación.

OBJETIVOS

General

Determinar los cambios volumétricos, físicos y la cantidad de bitumen a utilizar realizando variaciones granulométricas en los agregados en la dosificación de mezcla asfáltica en caliente.

Específicos

1. Interpretar lo que sucede en una mezcla asfáltica al variar los porcentajes de finos en esta, para una granulometría controlada tipo E, de la sección 400 de las especificaciones generales para la construcción de carreteras y puentes de la Dirección General de Caminos.
2. Interpretar los resultados de los ensayos realizados a las muestras de la mezcla asfáltica en caliente, mediante los límites de la especificación y mediante las curvas granulométricas de agregado fino.
3. Promover soluciones que aseguren mejores resultados utilizando parámetros más específicos para las mezclas asfálticas en caliente.
4. Indicar las causas y efectos de inestabilidad en el diseño de mezcla.

INTRODUCCIÓN

La mezcla asfáltica tradicional en caliente es la utilizada comúnmente en pavimentos en la carpeta de rodadura o en capas inferiores a esta. Esta mezcla resulta de la combinación de cemento asfáltico, que posee como principal característica la viscosidad, con agregados pétreos. En Guatemala la red vial es de suma importancia para la economía y el desarrollo del país y, en la medida en que observamos deficiencias grandes, vemos que se deben a especialmente a diferentes factores los cuales suelen ser causados por desconocimientos del comportamiento de las mezclas asfálticas y falta de experiencia en el manejo de las mismas.

El propósito de llevar a cabo esta investigación es diseñar mezcla asfáltica dentro de los parámetros de una granulometría tipo E por el Método Marshall, variando la cantidad de finos y verificando los cambios que sufre la mezcla, tanto físicamente como mecánicamente, para poder definir si se cumplen con las especificaciones de diseño. Las variaciones se realizan, ya que existe una inconsistencia en cuanto a que se presenta un margen para diseño, sin embargo, al diseñar dentro de este margen, no siempre se cumple con las especificaciones, por lo cual es importante definir el motivo y brindar una posible solución o un criterio que pueda ayudar a evitar este inconveniente y poder brindar con mayor seguridad un mejor servicio.

1. MARCO TEÓRICO

1.1. Antecedentes

Existen antecedentes que pueden ayudar a comprender de mejor manera el comportamiento de una mezcla asfáltica y sus componentes.

1.1.1. Estudios previos de granulometría en mezclas asfálticas en caliente

Es importante mencionar estudios previos relacionados al tema del trabajo de graduación ya que estos nos sirven como una base y una guía para poder realizar con mayor solidez la investigación en curso.

1.1.1.1. Incidencia de la granulometría y de la cantidad de cemento asfáltico en las propiedades físico – mecánicas, principalmente en la durabilidad de las mezclas asfálticas en caliente diseñadas según la división 400, sección 401, tablas 401-1 y 201-16 del libro de especificaciones generales para construcción de carreteras y puentes, Dirección General de Caminos, edición septiembre 2001

Esta investigación realizada por el ingeniero Pedro Roberto Ávila Martínez fue presentada en el 2011, se enfoca en cómo la granulometría y la cantidad de cemento asfáltico inducen en las propiedades de una mezcla asfáltica. Para el

estudio se tomaron en cuenta todas las granulometrías con las que permite diseñar la tabla 401-1 mencionada en el título de la investigación, sin embargo solo se utilizaron las granulometrías B, C, D, E y F, ya que la granulometría tipo A posee un tamaño máximo nominal que no permite el método Marshall. El cemento asfáltico AC-20 PERENCO es el aplicado en cada uno de estos diseños. Conociendo las condiciones de servicio el diseñador se puede apoyar en esta investigación que aclare el criterio para escoger la granulometría utilizada y garantizar la durabilidad del pavimento.

Tabla I. **Resumen de resultados**

Características de la Mezcla	RESULTADOS PARA GRADACIONES				
	B	C	D	E	F
% de vacíos	4	4	4	4	4
Densidad de briqueta	2.318	2.330	2.332	2.344	2.335
% de Vacíos agregado mineral	14.4	14.3	14.9	16.6	15.1
% de Vacíos rellenos de asfalto	72	72	73	73	73
Estabilidad (libras)	1440	2010	2260	2470	2575
Flujo (0.001")	12.5	12.8	13.3	14.0	15.4
Relación estabilidad/flujo	197	158	168	176	170
% Óptimo de asfalto	5.4	5.6	6.0	6.2	6.3
% de asfalto efectivo	4.7	4.7	5	4.9	5.1
% que pasa la malla No. 200	4	5	5	6	7
Relación polvo-asfalto	0.85	1.06	1.00	1.22	1.37
Sensibilidad a la humedad	89%	91%	93%	94%	98%
Partículas recubiertas con bitumen	Mayor 95%	Mayor 95%	Mayor 95%	Mayor 95%	Mayor 95%

Fuente: ÁVILA MARTÍNEZ, Pedro Roberto. *Incidencia de la granulometría y de la cantidad del cemento asfáltico en las propiedades físico – mecánicas principalmente en la durabilidad de las mezclas asfálticas en caliente diseñadas según la división 400, sección 401, tablas 401-1, 401-2 y 401-16 del libro e especificaciones generales para construcción de carreteras y puentes, división general de caminos. p 168.*

1.1.1.1. Conclusiones

El tipo A de granulometría establecido en la tabla 401-1 de las especificaciones generales para la construcción de carreteras y puentes, de la Dirección General de Caminos, septiembre 2001, no es aplicable para el método de diseño Marshall ya que este solo permite 1" de tamaño máximo nominal. La granulometría aplicada se escoge teniendo en cuenta el espesor de la capa que se diseñe, la función del pavimento, la cercanía de los bancos de materiales y los lugares donde se realizará la mezcla. Las granulometrías tipo B y C son mezclas gruesas, por lo tanto poco durables, las tipo D y E son mezclas finas con una estructura superficial más fina y densa, lo que asegura durabilidad y balance favorable en cuanto a vacíos y estabilidad; las tipo F son muy finas lo que provoca mayor absorción de cemento asfáltico, mayor durabilidad y resistencia alta al desgaste.

1.1.1.2. Recomendaciones

Para cada tipo de granulometría, las tipo B y C para bases negras, las tipo D y E como diseño para superficies de rodadura, las tipo F para bacheo, superficies de desgaste, recapeos, etc. Se recomienda el uso de aditivos para adherencia entre el agregado y el cemento asfáltico, y el uso de asfalto modificado con polímeros para incrementar la durabilidad de los concretos asfálticos.

1.1.1.2. Criterios para el diseño de mezclas asfálticas en caliente

Antecedente presentado por el ingeniero José Luis León Fajardo en el año 1996, nos guía a la posible formación de un criterio para el diseño de una mezcla asfáltica, utilizando como especificación de diseño la norma AASHTO M-20, también nos desarrolla las condiciones ideales de almacenamiento para la mezcla y propiedades físicas y químicas del asfalto. Especifica los ensayos que se le pueden realizar al asfalto, los cuales son de suma importancia conocer y define la clasificación de agregados de rocas naturales o escorias producidas por la industria metalúrgica con sus principales características y los ensayos de laboratorio que se les realizan a los mismos. Se expone un marco teórico importante sobre las propiedades de la mezcla asfáltica y los ajustes que se le pueden realizar a un diseño para conseguir un resultado más adecuado a lo que se requiere. El estudio detalla el método Marshall, sus criterios, sus funciones y paso por paso como se lleva a cabo el experimento.

Tabla II. Resultados finales

Porcentaje de bitumen	Lectura del micrómetro	Promedio en libras	Promedio de Flujo	Densidad	Porcentaje de vacíos
4,5	180	2 850	15	2,40	2,83
4,5	170				
4,5	180				
5	218	3 133	16	2,42	1,22
5	168				
5	193				
5,5	148	2 733	13	2,40	1,23
5,5	171				
5,5	191				

Continuación de la tabla II.

6	151	2 583	17	2,38	1,24
6	162				
6	168				
6,5	163	2 433	20	2,38	0,41
6,5	139				
6,5	157				

Fuente: LEÓN FAJARDO, José Luis. *Criterios para el diseño de mezclas asfálticas en caliente. p. 76-7.*

1.1.1.2.1. Conclusiones

El desarrollo de carreteras en Guatemala debe de implementar un gran control de calidad verificando que se cumpla con las especificaciones de diseño y procurando utilizar una graduación granulométrica gruesa por la mayor ventaja que esta proporciona y dejar de utilizar mezclas muy finas tal cual se trabaja actualmente. La cantidad de finos influye directamente en la uniformidad y adaptabilidad de los agregados en la mezcla asfáltica, por lo cual es importante que los materiales que se recogen de los bancos sean seleccionados de acuerdo a los ensayos de los laboratorios y sus especificaciones técnicas. Para diseñar es importante que el encargado tenga toda la información del lugar donde se encuentre, ya que los métodos empleados en el país son adoptados de otros países por lo que las condiciones y requerimientos no son iguales en todos los casos. El pavimento de concreto asfáltico aumenta la capacidad de carga por sus propiedades y es el más adaptable a las condiciones generales del país.

1.1.1.2.2. Recomendaciones

Cumplir de manera estricta las especificaciones técnicas en todas las mezclas asfálticas. Se recomienda que se lleve a cabo una revisión de estas especificaciones que brinda la dirección general de caminos y actualizarlas conforme a las que proporciona el Instituto de Asfaltos. También nos indica que para el diseño de mezcla deben de tomarse en cuenta factores como el tránsito esperado y las instalaciones subterráneas para que la mezcla posea una larga duración, dando un mantenimiento adecuado para que el tiempo de servicio sea prolongado.

El ingeniero recomendó a la facultad de ingeniería, a través de la escuela de ingeniería civil y del laboratorio de suelos del Centro de investigaciones de Ingeniería implementar cursos y laboratorios para conocer más acerca de asfaltos y del material tratado en esta investigación, recomendación que ha sido tomada en cuenta e implementada por el curso de materiales de construcción.

1.1.1.3. Incidencia del origen de los materiales calizos y basálticos en el diseño de mezclas de concreto asfáltico método Marshall

El estudio presentado por el ingeniero Marco Antonio Mendoza Ixpanel en el año 2009 nos brinda generalidades del comportamiento de los materiales calizos y basálticos utilizados en las mezclas asfálticas en caliente. Las herramientas que se nos presentan en la investigación son de suma importancia ya que en el país los bancos de materiales son muy escasos en cuanto a la variedad de material que manejan y el ingeniero diseñador debe de tomar en cuenta este aspecto para utilizar el tipo de material que encuentre más

cercano al proyecto que maneje. Estos aspectos se proponen y se comparan para representar como responden las mezclas asfálticas utilizando cada tipo de material, mencionando ventajas y desventajas al elegir cada uno de ellos.

Tabla III. **Resultados Obtenidos**

Método marshall comparativo entre materiales					
Material Calizo			Material Basáltico		
% AC	Estabilidad	Flujo	% AC	Estabilidad	Flujo
4,0	1448	9	4,0	1847	10
4,5	1812	10	4,5	2083	12
5,0	2011	12	5,0	2157	13
5,5	1970	14	5,5	2038	14
6,0	1699	15	6,0	1852	15
6,5	1421	15	6,5	1700	15

Fuente: MENDOZA IXPANEL, Marco Antonio. *Incidencia del origen de los materiales calizos y basálticos en el diseño de mezclas de concreto asfáltico método marshall. p. 100-1.*

1.1.1.3.1. Conclusiones

Se determinó que ambos tipos de agregados tienen un comportamiento distinto cuando se realiza la mezcla asfáltica en caliente, el agregado de origen basáltico tiene una afinidad mayor con el cemento asfáltico que el de origen calizo. Sin embargo, resulta que ambos tipos resultan satisfactorios al utilizarse y las variaciones son fundamentales por la afinidad que tienen con el cemento asfáltico. La diferencia de afinidad incide en el tiempo de producción ya que el agregado calizo debe de tener un tiempo más prolongado de mezclado. En los ensayos realizados con los diferentes tipos de agregados ambos presentan diferencias mínimas debido a las similitudes en sus características, ambos arrojan estabilidades similares, sin embargo el agregado basáltico por su textura presenta una mayor estabilidad pero a pesar de eso ambos cumplen

con las especificaciones de la dirección general de caminos. La decisión de utilizar agregado calizo o basáltico dependerá de la región y ubicación en la cual se realizara el proyecto teniendo en cuenta que el material calizo posee cierta desventaja en el pavimento.

1.1.1.3.2. Recomendaciones

Diseñar con un contenido alto de vacíos para que existan los suficientes espacios en las mezclas compactadas donde pueda fluir el asfalto bajo las cargas de tráfico teniendo en cuenta la impermeabilidad del pavimento. Con el material calizo se debe de integrar el material con tendencia al lado grueso para tener una superficie áspera que es apreciable en una carretera con terreno ondulado o montañoso. El diseñador debe de escoger de dos a cinco grados mayor que la curva de densidad máxima si desea una textura fina en la mezcla, si se desea una textura gruesa, el grado debe de ser de dos a cinco por ciento por debajo de la curva. Cuando la mezcla posea un agregado calizo los tiempos de mezclado deben de ser mayores a diferencia con los de agregado basáltico. El aditivo antidesvestimiento puede ser utilizado en mezclas con agregado calizo pero no es necesario si se realiza un adecuado tiempo de mezclado y una manera correcta en el diseño. Si los tamaños de los materiales caen en la línea de densidad máxima no se debe de producir mezclas porque no quedan espacios para el asfalto líquido.

1.2. Características de una mezcla asfáltica

Una mezcla asfáltica posee características físicas y mecánicas que definen su función, esta función se alcanza de manera correcta en base a una planificación bien definida y minuciosa buscando aspectos que cumplan con los objetivos principales de la misma.

Las características principales que presente una mezcla serán en función a la calidad de materiales utilizados y el tipo de los mismos que el diseñador decida utilizar. En cuanto a los agregados se recomienda utilizar materiales pétreos triturados y no de canto rodado ya que por las caras fracturadas al comprimirse resulta una masa fuerte de material en cambio las de canto rodado al comprimirse tienden a deslizarse una sobre otra como se observa en la figura 3.

Figura 1. **Representación del agregado pétreo triturado**



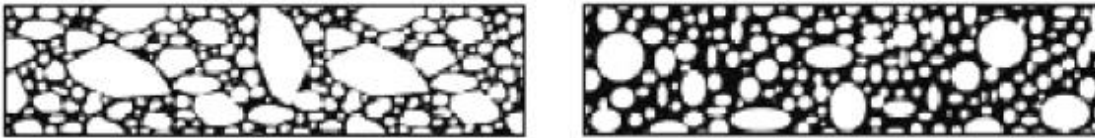
Fuente: <http://santamariaconstructores.com/materialespetreos>. Consulta: 15 de marzo de 2017.

Figura 2. **Representación del agregado de canto rodado**



Fuente: <http://www.promart.pe/canto-rodado-negro-20-kg/p>. Consulta: 15 de marzo de 2017.

Figura 3. **Esqueletos del agregado pétreo triturado y el agregado de canto rodado en la mezcla asfáltica**



Fuente: http://sedici.unlp.edu.ar/bitstream/handle/10915/1457/2_-_Deformaciones_permanentes_en_mezclas_asf%C3%A1lticas.pdf?sequence=7. Consulta: 15 de marzo de 2017.

1.2.1. Contenido de bitumen

Es la cantidad de cemento asfáltico que se utilizara en la mezcla, este actúa como un aglomerante ante los agregados y su contenido determina la estabilidad del pavimento. A mayor contenido de agregado fino en la mezcla mayor será la cantidad de asfalto requerido ya que existe mayor área superficial que cubrir.

Definir el contenido de bitumen que se utilizará en la mezcla asfáltica es de suma importancia ya que este valor le proporcionara mejores propiedades al pavimento. Se determina en base a un estudio de las condiciones en donde se aplicará el pavimento tomando en cuenta factores como clima, flujo vehicular que circulará en el lugar, tipo de vehículos y el tipo de agregados que se emplearán en la mezcla asfáltica.

1.2.2. Resistencia a la deformación

La resistencia a la deformación se vuelve crítica cuando el pavimento sufre temperaturas extremas y una carga vehicular excesiva, para poder

incrementar esta resistencia en el diseño de la mezcla se debe prestar atención a factores como el espesor de la carpeta de rodadura, la viscosidad del ligante asfáltico y la granulometría a utilizar.

1.2.3. Resistencia a la fatiga

La fatiga se produce debido a las cargas que el pavimento soporta, este fenómeno se debe a la no uniformidad de los materiales que componen la mezcla y los defectos que poseen cada uno de ellos. Es provocada en el momento que la carga vehicular produce una tensión continua por lo cual las partículas empiezan a separarse unas de otras, también pueden ser factores que provoquen una baja resistencia a la fatiga los siguientes; el clima al que se encuentra expuesto, la mala compactación de la mezcla, un espesor inadecuado, presencia de un asentamiento no uniforme y pérdida de ligante asfáltico.

Figura 4. **Deterioro visible provocado por la fatiga en el pavimento**



Fuente: 20 avenida, zona 7 Kaminal Juyú II.

1.2.4. Resistencia al agrietamiento por temperaturas bajas

El pavimento se agrieta especialmente en sectores donde existen temperaturas bajas, estas producen retracciones en los materiales. Esta propiedad es de suma importancia ya que las temperaturas pueden llegar a afectar las propiedades físicas, mecánicas las cuales a su vez, influyen directamente en la calidad de la mezcla asfáltica. Para evitar este tipo falla es de suma importancia el análisis del cemento asfáltico AC a utilizar.

Figura 5. **Falla del pavimento debido a contracciones por bajas temperaturas**



Fuente: GUILLERMO ESTRADA, Álvaro César. *Antecedentes del diseño y análisis de mezclas asfálticas de superpave*. p. 32.

1.2.5. Durabilidad

El diseño y preparación de la mezcla asfáltica influyen directamente en esta propiedad, la durabilidad es la habilidad del pavimento de resistir la

desintegración de sus agregados y la oxidación del asfalto. Este tipo de deterioro es provocado debido a varios factores los cuales son: una variación de temperaturas extremas, cargas dinámicas inadecuadas, bajo contenido de asfalto, desgaste en el pavimento debido a la mala calidad de agregados y un alto porcentaje de vacíos en la mezcla.

1.2.6. Trabajabilidad

Esta propiedad define la facilidad con que una mezcla asfáltica puede ser colocada y compactada, este aspecto puede verse afectado debido a diferentes causas:

- Poca humedad en la mezcla
- Bajas temperaturas
- Alto porcentaje de vacíos
- Presencia alta de agregado grueso
- Segregación
- Alto porcentaje de relleno mineral

1.2.7. Resistencia a la humedad

Es la resistencia al paso del aire y del agua hacia el interior del pavimento, está directamente relacionada con la cantidad de vacíos que posee la mezcla compactada. El paso excesivo de aire y agua puede producir una pérdida considerable de adhesión entre el aglomerante y los agregados. Para poder conseguir una buena reacción ante factores como los descritos es sumamente importante conseguir materiales de buena calidad.

1.3. Evaluación y ajustes en un diseño de mezcla asfáltica

Para poder elaborar un diseño de mezcla asfáltica, es necesario realizar pruebas de mezclas previas proponiendo diferentes graduaciones de agregados dentro del rango de límites establecidos que permite la norma. Estas pruebas iniciales pueden brindarnos parámetros para verificar si se cumple con los criterios de diseño y con los de control de calidad, de no ser así, se proponen otras mezclas con diferentes porcentajes de bitumen para variar los porcentajes de vacíos y la estabilidad del pavimento.

Al proponer diferentes variaciones de porcentajes de bitumen se debe verificar que graduación de agregado dentro de los límites cumple mejor con lo que se busca, los resultados de los ensayos pueden variar por lo cual a continuación se mencionan los diferentes resultados que puede arrojar una mezcla asfáltica y cómo manejarlos si es el caso.

1.3.1. Vacíos bajos y estabilidad baja

La existencia de un porcentaje de vacíos bajos se debe a una graduación granulométrica fina y a un alto contenido de bitumen, estos vacíos se pueden incrementar de diferentes maneras. Al eliminarse el exceso de bitumen, si existiese, se elevarían los porcentajes de vacíos ya que el aglomerante cubriría una superficie limitada, pero se deben tomar las precauciones de no eliminar una cantidad elevada ya que podría provocar una permeabilidad considerable, lo cual llevaría a fracturas en el pavimento y poca flexibilidad.

De no tener un exceso de bitumen se considera variar la graduación granulométrica, reduciendo la cantidad de material fino e incrementando el

contenido de agregado grueso, estos ajustes deben de producir una mezcla estable acorde a los objetivos.

1.3.2. Vacíos bajos y estabilidad apropiada

A pesar de tener como resultado inicial una estabilidad apropiada el porcentaje de vacíos en la mezcla asfáltica debe de ajustarse ya que la prueba de laboratorio no nos brinda un resultado bajo cargas a través de un largo periodo de tiempo, por ende, al actuar una carga constante durante un determinado tiempo el pavimento puede ocasionar inestabilidad y provocar fracturas o hundimientos. Estos fenómenos se presentan ya que al no poseer la adecuada cantidad de vacíos la mezcla pierde la capacidad de que sus partículas vuelvan a su posición inicial después de sufrir cargas dinámicas constantemente.

1.3.3. Vacíos apropiados y estabilidad apropiada

Al tener un buen porcentaje de vacíos en una mezcla asfáltica y encontrar una baja estabilidad podemos deducir que se debe a la forma específica del agregado, se puede evitar este resultado si se utiliza agregado triturado en lugar de agregado de canto rodado ya que este tipo de agregado por su forma propensa a ser redonda, cubre volúmenes específicos de una manera que no es la adecuada para el pavimento.

1.3.4. Vacíos altos y estabilidad apropiada

Cuando diseñamos para tener un alto porcentaje de vacíos en la mezcla, estamos buscando un pavimento altamente flexible, sin embargo se debe de cuidar el endurecimiento prematuro en la mezcla ya que una cantidad

considerable de aire y agua circularían en ella. Se puede reducir el porcentaje de vacíos al agregar polvo mineral a la mezcla.

1.3.5. Vacíos altos y estabilidad baja

Esta condición se debe de trabajar intentando mejorar el porcentaje de vacíos mediante los distintos métodos descritos anteriormente, si al mejorar el porcentaje de vacíos la estabilidad no mejora, se debe de analizar la calidad de los materiales que se están utilizando. En el caso de que tengamos un diseño con un porcentaje de vacíos alto, se deben verificar directamente los materiales empleados.

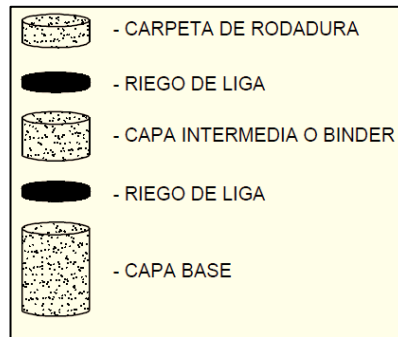
1.4. Graduación de los agregados para pavimentos de concreto asfáltico (ASTM D3515)

El diseño de una mezcla asfáltica debe considerarse como una curva granulométrica sin quiebres bruscos, continua y dentro de los límites dictados por la norma.

1.4.1. Tipos de graduación de agregados

Los límites para una graduación de agregados y tamaños máximos nominales de acuerdo al tamaño de la abertura del tamiz están definidos en la tabla I. El escoger el tipo de graduación a utilizar para el diseño de mezcla depende de la función que se pretende cumplir, la variedad de granulometrías nos indica que para cada una de ellas existe un uso en especial; en la figura 6 se muestra una estructura convencional sin embargo según el uso no siempre es necesario colocar todas las capas señaladas.

Figura 6. Estructura convencional de una carpeta asfáltica



Fuente: *Mezcla Asfáltica en caliente.*

<http://www.vialidad.cl/areasdevialidad/laboratorionacional/MaterialCursos/Mezclas%20Asf%C3%A1lticas.pdf>. Consulta: 16 de marzo de 2017.

Tabla IV. Graduación de los agregados para pavimento de concreto asfáltico (ASTM D 3515)

Tamaño del Tamiz	Porcentaje en Masa que Pasa el Tamiz designado (AASHTO T 27 y T 11)					
	Graduación Designada y Tamaño Máximo Nominal ¹					
	A (50.8 mm)	B (38.1 mm)	C (25.4 mm)	D (19 mm)	E (12.5 mm)	F (9.5 mm)
	2"	1 ½"	1"	¾"	½"	⅜"
63.00 mm	100					
50.00 mm	90-100	100				
38.10 mm	-	90-100	100			
25.00 mm	60-80	-	90-100	100		
19.00 mm	-	56-80	-	90-100	100	
12.50 mm	35-65	-	56-80	-	90-100	100
9.50 mm	-	-	-	56-80	-	90-100
4.75 mm	17-47	23-53	29-59	35-65	44-74	55-85
2.36 mm	10-36	15-41	19-45	23-49	28-58	28-58
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

Fuente: Dirección General de Caminos. *Especificaciones generales para construcción de carreteras y puentes.* p. 298.

1.4.2. Requisitos de las mezclas asfálticas

Las mezclas de bitumen y material pétreo deben de cumplir ciertos requisitos que se encuentran en la sección 401 de las especificaciones generales para construcción de carreteras y puentes. En la tabla II se definen los valores para el análisis en laboratorio.

Tabla V. **Requisitos de las mezclas de concreto asfáltico**

METODO 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)
Numero 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.):		
Transito < 10 ⁶ ESAL	8	16
Transito > 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:		
Transito < 10 ⁶ ESAL	65	78
Transito > 10 ⁶ ESAL	65	75
Relación finos/bitumen ⁽⁴⁾	0.6	1.6
Sensibilidad a la humedad AASHTO T 283, Resistencia Retenida	80%	
Partículas Recubiertas con bitumen, para definir tiempo de mezclado, AASHTO T 195	95%	

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

Tabla VI. **Vacíos de 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.

1.4.3. Granulometría tipo A y tipo B

El procedimiento Marshall no especifica el uso de un tamaño máximo nominal mayor a 1" por lo cual cuando se trabajan con este tipo de granulometrías se deben modificar los procedimientos conocidos del diseño Marshall. Generalmente estas se utilizan más en capas intermedias comúnmente conocidas como binder, esta capa se ubica entre la base y la carpeta de rodadura y actúa como una capa estructural debido a que transmite cargas desde la carpeta de rodadura hacia la capa base o la rasante del terreno. La capa Binder posee un tamaño máximo nominal mayor en relación a las demás, debido a la función que cumple soportando y transmitiendo cargas hacia la base. Esta capa ayuda a economizar la demanda de asfalto ya que no se requiere que sea tan impermeable como la carpeta de rodadura, por lo tanto lleva poco cemento asfáltico.

El diseño de mezclas de bases negras también es aplicable a la granulometría tipo A y tipo B ya que en estas mezclas debe predominar el agregado grueso sumado a una granulometría uniforme y el ligante bituminoso. Este tipo de mezclas poseen un porcentaje de vacíos de 3 a 15% por lo cual deben de poseer una buena trabajabilidad y se compactan a una temperatura entre 10 y 70 grados centígrados.

En la figura 7 podemos observar detenidamente que una granulometría con un tamaño máximo nominal grande produce una mezcla bastante abierta.

Figura 7. **Muestra de capa intermedia Binder**



Fuente: *Criterio ingenieril para la selección del tipo de mezcla asfáltica*
<http://blogramcodes.blogspot.com/2013/08/criterio-ingenieril-para-la-seleccion.html>. Consulta:
17 de marzo de 2017.

Estos tipos de granulometrías también se pueden aplicar para capas superficiales que drenen el agua de lluvia hacia los lados del pavimento, pero se debe de prestar atención a que los vacíos se rellenan con el paso del tiempo con agua y residuos de llanta y si se le tiene el mantenimiento adecuado, la presencia de agua y el efecto de las llantas producen auto limpieza de los

poros. Esto no disminuye significativamente la excelente resistencia al derrape de los automóviles.

1.4.4. Granulometrías tipo C, D, E y F

Estos tipos de granulometrías son utilizadas en el diseño de mezclas densas, también conocidas como mezclas cerradas, y se caracterizan por tener un porcentaje de vacíos entre 3 % a 5 % y en otros casos no mayor a 6 %. Son las que se utilizan en carpetas de rodadura en el diseño Marshall con una granulometría continua. La más utilizada en el medio es la tipo D porque el análisis para diseño provee una variedad de tamaños que son más flexibles de encontrar y económicamente son las más equilibradas. Generalmente mientras más contenido de agregado fino posea la mezcla, esta es económicamente más elevada, por lo cual se busca un equilibrio según el uso para el cual se diseña y las realidades de los entornos en donde se ubica el proyecto.

Las características mecánicas de estos tipos de mezclas varían con pequeños cambios en el porcentaje de cemento asfáltico, lo que permite que se optimice su uso.

1.4.4.1. Granulometría tipo C (25,4mm)

Posee como tamaño máximo nominal 3/2 de pulgada, es la mezcla más gruesa entre las densas ya que posee una textura muy abierta. Es utilizada como carpeta de rodadura para todo tipo de vehículos.

1.4.4.2. Granulometría tipo D (19mm)

Posee tamaños máximos de agregados de 3/4 de pulgada, es una mezcla con textura áspera y abierta. Es la más utilizada en Guatemala debido a la facilidad para encontrar estos tamaños de agregados y el balance económico que estos brindan, se aplica en carreteras, calles principales y secundarias.

1.4.4.3. Granulometría tipo E (12,5mm)

Tamaño máximo es de 1/2 de pulgada, utilizada para espesores de entre 5 a 8 centímetros debido a su textura y las características físicas que posee, generalmente se utiliza en bacheos, pasos peatonales y parqueos.

1.4.4.4. Granulometría tipo F(9,5mm)

Agregados de tamaño máximo de 3/8 de pulgada, es la mezcla más fina entre las mezclas densas ya que posee una textura bastante cerrada. Se utiliza para parqueos de restaurantes, condominios, centros de estudio y calles internas de alguna residencial. Es ideal para espesores menores de 5 centímetros y también puede ser aplicable en bacheos.

Figura 8. **Muestra de una carpeta de rodadura de mezcla densa**



Fuente: *Criterio ingenieril para la selección del tipo de mezcla asfáltica.*

<http://blogramcodes.blogspot.com/2013/08/criterio-ingenieril-para-la-seleccion.html>. Consulta:
17 de marzo de 2017.

1.5. Ensayos a realizar

Los estudios realizados arrojan datos que con una adecuada interpretación pueden ayudar al mejorar las condiciones de servicio que presta un pavimento. Estos resultados se encuentran siguiendo metodologías internacionales de normas específicas.

1.5.1. Densidad específica bruta Bulk (Gmb)

Este ensayo simboliza la densidad específica neta para el agregado de la mezcla asfáltica, se desarrolla de acuerdo a la norma AASHTO T166-05. Puede realizarse al momento de poseer el espécimen con una temperatura ambiente después de desencofrado.

La densidad específica Bulk es la relación entre el peso seco de un volumen conocido que incluye vacíos de aire entre partículas secas y la diferencia entre el peso de del espécimen saturado y el peso del espécimen sumergido en agua. Su valor es adimensional.

1.5.2. Densidad específica teórica máxima (Gmm)

La densidad específica teórica máxima es una propiedad que es afectada directamente por el material utilizado en la mezcla, en relación a la cantidad y calidad de agregados y de cemento asfáltico. Esta prueba se basa en la norma AASHTO T209-05.

Esta densidad se considera un parámetro de suma importancia ya que nos proporciona una idea de cómo actuaría el pavimento bajo cargas dinámicas conociendo los vacíos en la mezcla compactada y la cantidad de bitumen en la misma. El cálculo del porcentaje de vacíos involucra, tanto la densidad específica bruta como la densidad específica teórica máxima. Su valor es adimensional.

1.5.3. Resistencia al flujo plástico de mezclas bituminosas utilizando el equipo Marshall

AASHTO T245-97(2004) dicta la manera correcta de realizar este ensayo, como resultado obtenemos la resistencia del espécimen a una carga dinámica aplicada y la deformación que este sufre.

Este ensayo simula las condiciones de servicio y la respuesta de la mezcla asfáltica, para ello se realiza un calentamiento previo en un baño de maría y automáticamente después de 30 o 40 minutos, el espécimen se traslada a la

maquina Marshall para obtener los datos ya descritos. Para esta prueba se utilizan especímenes de tamaño estándar de 64 mm (2 ½") de alto y 102 mm (4") de diámetro.

1.5.4. Análisis de porcentaje de vacíos

Luego de realizar las pruebas de densidad específica bruta, densidad específica teórica máxima y estabilidad-flujo marshall se lleva a cabo un análisis de porcentaje de vacíos, la metodología para este análisis se encuentra descrita en ASTM D 3203 y AASHTO T 269. Se calcula como la unidad menos la relación que existe entre la densidad específica bruta y la densidad específica teórica máxima.

También se realiza un análisis para encontrar los vacíos en el agregado mineral, la metodología utilizada es ASTM D 1559.

Estos son parámetros que se utilizan, tanto para conocer el comportamiento del pavimento en estado de servicio, como para saber si se cumple con los requisitos que se especifican en las tablas II y III.

2. DESARROLLO EXPERIMENTAL

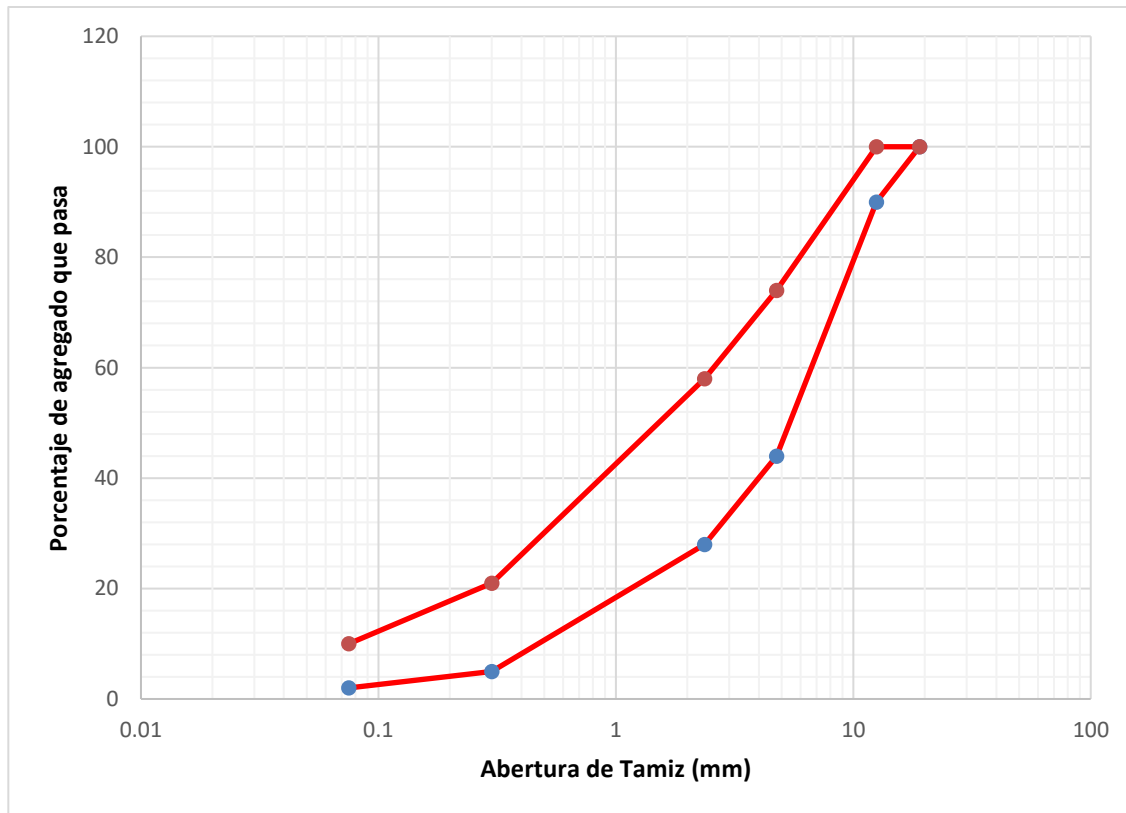
2.1. Diseño del experimento

El experimento se diseña en base al método Marshall, este diseño cuenta con una granulometría que cumple los requisitos de la Norma ASTM D 3515, norma que detalla con una curva límites granulométricos de los agregados.

El primer paso es definir el tipo de granulometría con la cual se va a trabajar, este criterio se aplica teniendo claro el valor de tamaño máximo de agregado que se pretende utilizar así como el conocimiento de la función que va a cumplir el pavimento. En base a este paso definido, el profesional a cargo procede a definir los valores de porcentaje que pasa en cada tamiz para poder así, graficar la curva de diseño y corroborar que el diseño cumpla con las especificaciones solicitadas.

Para este caso, se diseñó utilizando la granulometría tipo E. En la figura 9 se presentan los límites dentro de los cuales debe de prevalecer el diseño para este tipo de granulometría.

Figura 9. **Gráfica de los límites de graduación de agregados para la granulometría tipo E**



	Parámetros de diseño para una granulometría controlada tipo E
--	---

Fuente: elaboración propia.

2.2. Equipo utilizado

A continuación se enlistan el equipo utilizado, tanto para el ensayo Marshall como para la determinación de la densidad específica bruta y la determinación de la densidad específica teórica máxima.

- Tamices.
- Espátulas.
- Balanza analítica.
- Guantes.
- Termómetros.
- Estufa eléctrica.
- Recipiente para mezclar.
- Molde cilíndrico con collar de extensión y placa de base plana, para moldear probetas.
- Martillo de compactación de operación manual, consiste en un dispositivo de acero con una base plana circular de compactación con una articulación de resorte y un pisón deslizante de 4,54 kg de masa total, montado en forma que proporcione una altura de caída de $45,72 \pm 0,15$ cm.
- Pedestal de compactación, pieza prismática de madera de base cuadrada, de 20,32 cm de lado y 45,72 cm de altura. Provista en su cara superior con una platina cuadrada de acero de 30,48 cm de lado y 2,54 cm de espesor, esta debe de estar firmemente sujeta al pedestal.
- Dispositivo con resorte de tensión, diseñado para centrar rígidamente el molde de compactación sobre el pedestal. Debe de sostener en su posición el molde, el collar y la placa de base durante la compactación de la probeta.

- Pileta de agua para suspensión de especímenes provista de un rebalse para mantener el agua a nivel.
- Picnómetro de vacíos, de metal o plástico con un diámetro de 18 a 26 cm y una altura no menor de 16 cm. 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 densidades 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 22,37 kN/m² psi.
- Manómetro de presión residual, para confirmar que se está aplicando la presión al recipiente, debe ser capaz de medir una presión residual de 22,37 kN/m² 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.
- Mordazas de hierro fundido. La mordaza inferior va montada sobre una base plana, provista de dos varillas perpendiculares a ella que sirven de guía para ensamblarla con la mordaza superior.
- Máquina de compresión para la rotura de las probetas. Se emplea una prensa mecánica o hidráulica, capaz de producir una velocidad uniforme de desplazamiento vertical de $5 \pm 0,5$ cm/min.
- Anillo dinamométrico, para medir la resistencia de la probeta. Irá acoplado a la prensa y debe ser de 20 kN de capacidad nominal con una sensibilidad mínima de 50 N.

- Deformímetro de lectura final fija, con divisiones de 0,025 cm o de mayor precisión. En el momento del ensayo, el medidor deberá estar apoyado firmemente sobre la mordaza inferior.
- Baño de agua de profundidad suficiente para mantener una lámina de agua mínima de 3 cm sobre la superficie superior de las probetas compactadas. Debe tener un control termostático que le permita mantener la temperatura en cualquier punto del tanque.

2.2.1. Descripción del equipo utilizado

Figura 10. Tamices



Fuente: laboratorio de asfaltos, Centro de Investigaciones de Ingeniería.

Figura 11. **Balanza analítica**



Fuente: laboratorio de asfaltos, Centro de Investigaciones de Ingeniería.

Figura 12. **Espátula**



Fuente: laboratorio de asfaltos, Centro de Investigaciones de Ingeniería.

Figura 13. **Guantes**



Fuente: laboratorio de asfaltos, Centro de Investigaciones de Ingeniería.

Figura 14. **Horno utilizado para calentar los agregados y los moldes**



Fuente: laboratorio de asfaltos, Centro de Investigaciones de Ingeniería.

Figura 15. **Estufa utilizada para calentar la mezcla asfáltica**



Fuente: laboratorio de asfaltos, Centro de Investigaciones de Ingeniería.

Figura 16. **Termómetros**



Fuente: laboratorio de asfaltos, Centro de Investigaciones de Ingeniería.

Figura 17. **Martillo de compactación**



Fuente: laboratorio de asfaltos, Centro de Investigaciones de Ingeniería.

Figura 18. **Molde cilíndrico**



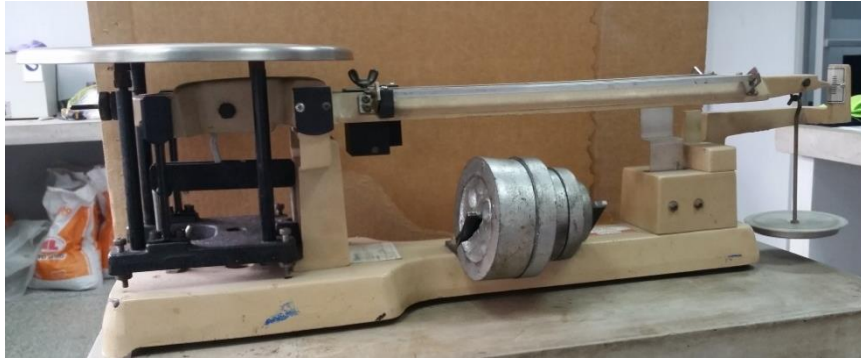
Fuente: laboratorio de asfaltos, Centro de Investigaciones de Ingeniería.

Figura 19. **Pileta con agua para suspensión de especímenes**



Fuente: laboratorio de asfaltos, Centro de Investigaciones de Ingeniería.

Figura 20. **Balanza con la capacidad adecuada y sensibilidad suficiente para densidad teórica máxima**



Fuente: laboratorio de asfaltos, Centro de Investigaciones de Ingeniería.

Figura 21. **Bomba de vacío**



Fuente: laboratorio de asfaltos, Centro de Investigaciones de Ingeniería.

Figura 22. **Manómetro de presión residual con válvula de purga**



Fuente: laboratorio de asfaltos, Centro de Investigaciones de Ingeniería.

Figura 23. **Dispositivo de agitación mecánica**



Fuente: laboratorio de asfaltos, Centro de Investigaciones de Ingeniería.

Figura 24. **Mordazas de hierro fundido**



Fuente: laboratorio de asfaltos, Centro de Investigaciones de Ingeniería.

Figura 25. **Máquina de compresión para la ruptura de las probetas**



Fuente: laboratorio de asfaltos, Centro de Investigaciones de Ingeniería.

Figura 26. **Deformímetro de lectura final fija**



Fuente: laboratorio de asfaltos, Centro de Investigaciones de Ingeniería.

Figura 27. **Baño de maría**



Fuente: laboratorio de asfaltos, Centro de Investigaciones de Ingeniería.

2.3. Material utilizado

Para el desarrollo experimental se define utilizar agregados pétreos triturados proporcionados por Agreca. El cemento asfáltico con la especificación AC-30.

Figura 28. **Agregado utilizado**



Fuente: laboratorio de asfaltos, Centro de Investigaciones de Ingeniería.

Figura 29. **Cemento asfáltico**



Fuente: laboratorio de asfaltos, Centro de Investigaciones de Ingeniería.

2.4. Procedimiento

2.4.1. Procedimiento para la elaboración de probetas

- Se preparan 1 200 gramos de mezcla de agregados para una probeta, a esta mezcla se le agrega un porcentaje de asfalto definido sobre el peso total de la muestra intentando variar estos porcentajes para estudiar el comportamiento de las probetas.
- Calentar el cemento asfáltico hasta una temperatura que permita producir una viscosidad cinemática entre 0,15 y 0,19 Pa-s.
- Pesar las taras previo a mezclar el agregado con el cemento asfáltico.

- Calentar la mezcla de agregados en seco hasta una temperatura recomendable de entre 90 °C y 110 °C para proceder a verter con el cemento asfáltico.
- Verter la cantidad definida de cemento asfáltico en la tara donde se encuentra la mezcla de agregados.
- Calentar el molde, la placa de base y el collarín en el horno hasta una temperatura de 60 °C.
- Mezclar el cemento asfáltico con los agregados de manera que se obtenga una mezcla homogénea y a una temperatura de 140 °C.
- Secar y aplicar aceite a la placa de base, al collar y al molde.
- Armar de manera correcta el molde con sus elementos en la base donde se procederá a la compactación.
- Verter la mezcla homogénea en el molde.
- Apisonar con una espátula 15 veces alrededor del perímetro del molde y 10 veces en el interior.
- Verificar que la temperatura previa a compactación sea de 140 °C.
- Proceder a compactar la mezcla empleando 75 golpes utilizando el martillo antes descrito.
- Retirar el collar y voltear el molde para proceder a compactar la otra cara de la pastilla, colocar el collar seguido de esto.
- Aplicar 75 golpes en la cara faltante de la pastilla.
- Retirar el collar y colocar el molde en un lugar con temperatura ambiente para dejar enfriar la mezcla.
- Esperar 24 horas para proceder a desencofrar.

2.4.2 Procedimiento para determinar la densidad específica bruta

- Pesar el espécimen seco.
- Sumergir el espécimen en una pileta con temperatura ambiente durante 5 minutos.
- Se retira el espécimen de la pileta.
- Secar superficialmente la muestra.
- Pesar para poder obtener el peso de la muestra saturada.
- Colocar la muestra en un balde sujeto a la balanza en su parte inferior.
- Sumergir el balde en el baño de agua, esperar a que se establezca un peso mientras la muestra se encuentra suspendida en el agua.
- Calcular la densidad específica bruta.

2.4.3 Procedimiento para realizar la prueba de estabilidad Marshall

- El espécimen se coloca en el baño de maría por 45 minutos a una temperatura de 60°C.
- Se retira la muestra respectiva y se seca de algún exceso de agua que tenga superficialmente.
- El espécimen se coloca en la parte inferior de la mordaza centrándolo.
- Se monta la parte superior de la mordaza.
- La mordaza se coloca centrada en la prensa.
- Se coloca el deformímetro y se ajusta a la posición cero.
- Se le aplica carga al conjunto.
- En el momento en el que la aguja del anillo dinamométrico muestra una disminución en su avance hasta el punto en el cual se detiene y retrocede se

deben anotar los valores de carga y deformación ya que en ese instante el espécimen falló ante la tensión que recibía.

- Se procede a calcular la resistencia con su factor de corrección de la carga obtenida en libras fuerza, utilizando los valores de la tabla Humboldt mfg. Co. 7300 w. agatite ave. norridge, il 60706 (ver anexo 5)

2.4.4 Procedimiento para obtener la densidad específica teórica máxima

- Con el espécimen en estado seco, se debe desintegrar de manera que todas las partículas se separen con el cuidado de no fracturar las mismas.
- Verter las partículas del espécimen en el picnómetro.
- Verter la cantidad suficiente de agua que cubra por lo menos una pulgada por encima de la masa que se encuentra en el picnómetro.
- Proceder a colocar el picnómetro debidamente tapado sobre el dispositivo de agitación mecánica.
- Activar la bomba de vacío y la agitación del dispositivo.
- Regular la presión por medio de la válvula de presión residual, esta presión debe de estar en el rango de 132,37 a 206,84 kN/m². Esta presión se debe de encontrar en un tiempo máximo de un minuto.
- Esperar 15 minutos mientras continúa la agitación del picnómetro con la presión regulada, al terminar el tiempo descrito se apaga la bomba.
- Retirar la presión de vacío gradualmente utilizando la válvula de purga.
- Verter agua cuidadosamente, para evitar provocar aire en el picnómetro.
- Pesar el picnómetro con la masa y lleno de agua, anotar dato.
- Calcular la densidad específica teórica máxima.

2.4.5 Procedimiento para obtener el porcentaje de vacíos

- Para el cálculo del porcentaje de vacíos de un espécimen es necesario haber determinado anteriormente la densidad específica bruta y la densidad específica teórica máxima.
- Calcular el porcentaje de vacíos.

2.4.6 Procedimiento para obtener el porcentaje de vacíos de agregado mineral

- Se utiliza el dato de densidad específica bruta de la mezcla.
- Determinar el porcentaje de agregado en la mezcla restándole a cien por ciento el porcentaje de cemento asfáltico existente en el diseño.
- Calcular la densidad específica bruta de los agregados utilizados.
- Calcular el porcentaje de vacíos en el agregado mineral.

2.5. Datos obtenidos

2.5.1. Datos de análisis para diseños de mezcla

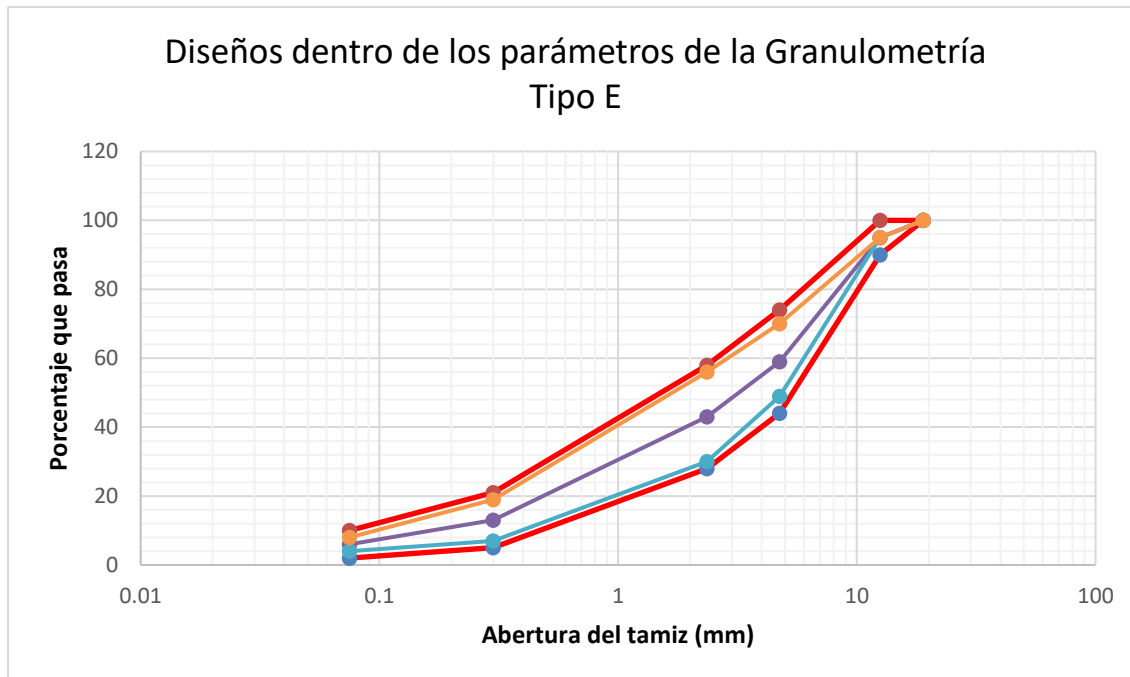
A continuación se presentan los datos de los tres diseños propuestos para analizar la mezcla asfáltica con una granulometría tipo E. El primer diseño está enfocado a manejar una granulometría con partículas más grandes acercándonos a los límites superiores de la Norma ASTM D 3515. El segundo diseño es considerado estándar, ya que se utilizan los valores medios de los intervalos propuestos por la norma. El tercer diseño se realizó utilizando una granulometría más fina, buscando acercarnos a los límites inferiores permitidos.

Tabla VII. Diseños utilizados en el experimento dentro de los parámetros de una granulometría tipo E

TAMIZ	ABERTURA (mm)	DISEÑO 1 PORCENTAJE QUE PASA	DISEÑO 2 PORCENTAJE QUE PASA	DISEÑO 3 PORCENTAJE QUE PASA
3/4"	19	100	100	100
1/2"	12,5	95	95	95
#4	4,75	59	49	70
#8	2,36	43	30	56
#50	0,3	13	7	19
#200	0,075	6	4	8

Fuente: elaboración propia con base en valores propuestos.

Figura 30. **Gráfica de las curvas granulométricas para los tres diseños propuestos**



	PARÁMETROS DE DISEÑO
	DISEÑO 1
	DISEÑO 2
	DISEÑO 3

Fuente: elaboración propia con base en valores propuestos.

2.5.2. Datos de características físicas de los especímenes

El primer paso después de desencofrar los especímenes es tomar datos de diámetro y altura, se procede a tres tomas de datos y encontrar la media.

Tabla VIII. **Datos de diámetros y alturas de las muestras del diseño 1**

#Probeta	%Bitumen	ø1	ø2	ø3	Ø Promedio	h1	h2	h3	h Promedio
1,00	4,5	101,30	101,37	101,35	101,34	65,70	67,01	65,50	66,07
2,00		101,71	101,21	101,48	101,47	67,15	66,61	67,32	67,03
3,00		101,78	101,67	101,17	101,54	66,40	66,60	67,60	66,87
4,00	5,00	101,65	101,20	101,20	101,35	65,00	65,60	67,35	65,98
5,00		101,20	101,51	101,80	101,50	65,40	66,44	66,11	65,98
6,00		101,54	101,94	101,37	101,62	65,52	65,38	65,16	65,35
7,00	5,50	101,30	101,42	101,61	101,44	65,93	65,10	66,44	65,82
8,00		101,25	101,41	101,24	101,30	65,21	66,60	66,26	66,02
9,00		101,74	101,64	101,38	101,59	65,72	65,76	65,09	65,52
10,00	6,00	101,25	101,27	101,13	101,22	66,34	65,38	65,02	65,58
11,00		101,65	101,40	101,65	101,57	65,41	65,85	65,93	65,73
12,00		101,40	101,34	101,27	101,34	65,67	66,29	65,32	65,76
13,00	6,50	101,31	101,40	101,48	101,40	65,37	65,06	66,01	65,48
14,00		101,40	101,26	101,29	101,32	65,70	65,05	65,61	65,45
15,00		101,41	101,07	101,27	101,25	65,40	66,88	67,08	66,45

Fuente: elaboración propia con base en resultados de laboratorio.

Tabla IX. **Datos de diámetro y alturas de las muestras del diseño 2**

#Probeta	%Bitumen	ø1	ø2	ø3	Ø Promedio	h1	h2	h3	h Promedio
1,00	3,00	101,50	101,54	101,33	101,46	64,28	72,72	73,69	68,50
2,00		101,71	101,62	101,42	101,58	70,48	71,56	71,13	71,06
3,00		101,47	101,24	101,70	101,47	72,91	72,00	73,14	72,68
4,00	3,50	101,34	101,39	101,50	101,41	72,01	72,05	70,47	71,51
5,00		101,25	101,30	101,38	101,31	71,14	71,12	70,02	70,76
6,00		101,49	101,29	101,40	101,39	71,16	71,50	71,19	71,28
7,00	4,00	101,37	101,45	101,30	101,37	71,35	71,98	70,91	71,41
8,00		101,30	101,70	101,34	101,45	70,58	71,87	71,58	71,34
9,00		101,23	101,44	101,16	101,28	71,02	71,17	71,78	71,32
10,00	4,50	101,68	101,44	101,61	101,58	71,05	69,29	71,45	70,60
11,00		101,69	101,76	101,90	101,78	70,67	70,48	71,15	70,77
12,00		101,13	101,22	101,40	101,25	70,33	71,15	70,49	70,66

Continuación tabla IX.

13,00	5,00	101,45	101,58	101,32	101,45	70,12	71,50	70,49	70,70
14,00		101,60	101,61	101,70	101,64	72,66	70,67	70,89	71,41
15,00		101,51	101,70	101,40	101,54	70,60	72,34	72,05	71,66

Fuente: elaboración propia con base en resultados de laboratorio.

Tabla X. **Datos de diámetros y alturas de las muestras del diseño 3**

#Probeta	%Bitumen	ø1	ø2	ø3	Ø Promedio	h1	h2	h3	h Promedio
1,00	3,00	101,59	101,46	101,48	101,51	69,53	70,20	68,04	69,26
2,00		101,80	101,88	101,60	101,76	69,45	68,00	69,53	68,99
3,00		101,54	101,30	101,27	101,37	69,12	68,33	67,87	68,44
4,00	3,50	101,16	101,45	101,55	101,39	66,81	67,47	66,43	66,90
5,00		101,48	101,49	101,64	101,54	67,54	67,77	68,10	67,80
6,00		101,00	101,28	101,42	101,23	69,78	67,23	67,81	68,27
7,00	4,00	101,43	101,22	101,60	101,42	65,80	67,53	67,12	66,82
8,00		101,09	101,64	100,89	101,21	68,23	68,00	66,61	67,61
9,00		101,17	101,80	101,25	101,41	65,97	66,93	67,73	66,88
10,00	4,50	101,50	101,14	101,25	101,30	65,89	66,79	66,28	66,32
11,00		101,20	101,36	101,41	101,32	66,16	67,15	66,78	66,70
12,00		101,26	101,19	101,25	101,23	65,30	67,01	67,56	66,62
13,00	5,00	101,70	101,74	101,51	101,65	64,14	65,74	67,85	65,91
14,00		101,53	101,69	101,50	101,57	66,35	65,62	64,67	65,55
15,00		101,25	101,71	101,43	101,46	65,55	66,54	64,91	65,67

Fuente: elaboración propia con base en resultados de laboratorio.

2.5.3. Datos del ensayo de densidad específica bruta

Los datos obtenidos del ensayo de densidad específica bruta pueden indicarnos un rango no específico de vacíos en la mezcla.

Tabla XI. **Pesos de las muestras del diseño 1 en gramos**

# Probeta	% Bitumen	Peso Seco (g)	Peso Seco Saturado (g)	Peso Sumergido (g)
1,00	4,50	1 246,31	1 250,60	724,45
2,00		1 245,83	1 249,51	720,32
3,00		1 243,52	1 247,75	717,79
4,00	5,00	1 249,63	1 253,53	727,33
5,00		1 240,32	1 243,11	725,09
6,00		1 247,20	1 249,09	730,05
7,00	5,50	1 252,41	1 254,07	731,47
8,00		1 255,57	1 256,67	732,44
9,00		1 260,23	1 261,59	737,40
10,00	6,00	1 250,66	1 252,04	729,90
11,00		1 252,68	1 253,54	735,20
12,00		1 255,68	1 256,56	735,09
13,00	6,50	1 266,60	1 267,11	744,36
14,00		1 263,32	1 263,91	742,65
15,00		1 254,67	1 255,22	735,86

Fuente: elaboración propia con base en resultados de laboratorio.

Tabla XII. **Pesos de muestras del diseño 2 en gramos**

# Probeta	% Bitumen	Peso Seco (g)	Peso Seco Saturado (g)	Peso Sumergido (g)
1,00	3,00	1 221,58	1 255,82	705,28
2,00		1 232,87	1 264,56	715,71
3,00		1 230,06	1 258,48	709,05
4,00	3,50	1 233,41	1 258,74	714,59
5,00		1 217,36	1 241,30	700,95

Continuación tabla XII.

6,00		1 220,37	1 244,79	707,70
7,00	4,00	1 224,87	1 248,05	705,10
8,00		1 245,45	1 267,16	716,22
9,00		1 239,43	1 261,00	715,21
10,00	4,50	1 235,31	1 253,91	704,78
11,00		1 236,88	1 257,62	708,16
12,00		1 236,98	1 255,21	706,55
13,00	5,00	1 240,50	1 255,82	705,02
14,00		1 235,06	1 252,63	701,14
15,00		1 250,28	1 266,83	711,01

Fuente: elaboración propia con base en resultados de laboratorio.

Tabla XIII. **Pesos de las muestras del diseño 3 en gramos**

# Probeta	% Bitumen	Peso Seco (g)	Peso Seco Saturado (g)	Peso Sumergido (g)
1,00	3,00	1 224,99	1 231,84	695,90
2,00		1 225,06	1 232,35	694,19
3,00		1 226,93	1 235,22	699,55
4,00	3,50	1 236,84	1 240,96	710,82
5,00		1 232,14	1 236,48	705,64
6,00		1 234,11	1 239,57	709,71
7,00	4,00	1 240,74	1 244,65	714,52
8,00		1 240,36	1 246,39	713,26
9,00		1 240,42	1 246,13	713,83
10,00	4,50	1 247,34	1 250,58	726,03
11,00		1 236,67	1 240,74	715,38
12,00		1 235,59	1 240,28	715,24
13,00	5,00	1 246,09	1 247,53	725,34
14,00		1 253,99	1 255,30	730,18
15,00		1 249,77	1 251,43	729,73

Fuente: elaboración propia con base en resultados de laboratorio.

2.5.4. Datos del ensayo estabilidad-flujo Marshall

Tabla XIV. Lectura y deformación de los especímenes del diseño 1

# Probeta	% Bitumen	Lectura dada	Deformación
1,00	4,50	332,00	12,00
2,00		338,00	11,00
3,00		222,00	12,00
4,00	5,00	274,00	14,00
5,00		304,00	10,00
6,00		314,00	10,00
7,00	5,50	274,00	13,00
8,00		258,00	12,00
9,00		264,00	12,00
10,00	6,00	215,00	13,00
11,00		264,00	14,00
12,00		250,00	14,00
13,00	6,50	257,00	17,00
14,00		250,00	17,00
15,00		230,00	16,00

Fuente: elaboración propia con base en resultados de laboratorio.

Tabla XV. Lectura y deformación de los especímenes del diseño 2

# Probeta	% Bitumen	Lectura dada	Deformación
1,00	3,00	122,00	12,00
2,00		119,00	20,00
3,00		114,00	9,00
4,00	3,50	126,00	10,00
5,00		129,00	11,00
6,00		130,00	10,00
7,00	4,00	142,00	10,00
8,00		145,00	10,00
9,00		132,00	11,00
10,00	4,50	136,00	11,00
11,00		120,00	13,00
12,00		142,00	11,00

Continuación tabla XV.

13,00	5,00	118,00	15,00
14,00		115,00	13,00
15,00		112,00	12,00

Fuente: elaboración propia con base en resultados de laboratorio.

Tabla XVI. **Lectura y deformación de los especímenes del diseño 3**

# Probeta	% Bitumen	Lectura dada	Deformación
1,00	3,00	244,00	10,00
2,00		189,00	10,00
3,00		234,00	9,00
4,00	3,50	283,00	10,00
5,00		234,00	10,00
6,00		227,00	10,00
7,00	4,00	275,00	11,00
8,00		221,00	10,00
9,00		242,00	10,00
10,00	4,50	279,00	9,00
11,00		235,00	11,00
12,00		223,00	10,00
13,00	5,00	256,00	10,00
14,00		270,00	11,00
15,00		267,00	12,00

Fuente: elaboración propia con base en resultados de laboratorio.

2.5.5. Datos del ensayo de densidad específica teórica máxima

Tabla XVII. **Peso en gramos de especímenes escogidos, diseño 1**

# Probeta	% Bitumen	Picnómetro + Agua (g)	Tara + Material (g)	Tara (g)
3,00	4,50	7 380,00	1 481,00	251,00
6,00	5,00	7 383,00	1 494,00	254,00
7,00	5,50	7 381,00	1 485,00	253,00
10,00	6,00	7 381,00	1 471,00	254,00
13,00	6,50	7 384,00	1 509,00	254,00

Fuente: elaboración propia con base en resultados de laboratorio.

Tabla XVIII. **Peso en gramos de los especímenes escogidos, diseño 2**

# Probeta	% Bitumen	Picnómetro + Agua (g)	Tara + Material (g)	Tara (g)
2,00	3,00	7 381,00	1 505,00	254,00
6,00	3,50	7 381,00	1 481,00	251,50
8,00	4,00	7 377,50	1 503,00	251,00
11,00	4,50	7 378,50	1 471,00	253,00
14,00	5,00	7 382,00	1 470,00	251,00

Fuente: elaboración propia con base en resultados de laboratorio.

Tabla XIX. **Peso en gramos de los especímenes escogidos, diseño 3**

# Probeta	% Bitumen	Picnómetro + Agua (g)	Tara + Material (g)	Tara (g)
1,00	3,00	7 381,50	1 452,00	254,70
6,00	3,50	7 382,30	1 490,80	252,50
9,00	4,00	7 380,70	1 491,90	250,50
12,00	4,50	7 381,30	1 479,50	251,00
13,00	5,00	7 381,20	1 482,00	251,30

Fuente: elaboración propia con base en resultados de laboratorio.

2.5.6. Datos para el porcentaje de vacíos en el agregado mineral

Tabla XX. Porcentaje de agregado en la mezcla asfáltica y densidad específica bruta de los agregados, diseño 1

%Bitumen	4,5	5	5,5	6	6,5
Ps	95,5	95	94,5	94	93,5
G _{sb}	2,61	2,61	2,61	2,61	2,61

Fuente: elaboración propia con base en resultados de laboratorio.

Tabla XXI. Porcentaje de agregado de la mezcla asfáltica y densidad específica bruta de los agregados, diseño 2

%Bitumen	3	3,5	4	4,5	5
Ps	97	96,5	96	95,5	95
G _{sb}	2,61	2,61	2,61	2,61	2,61

Fuente: elaboración propia con base en resultados de laboratorio.

Tabla XXII. Porcentaje de agregado de la mezcla asfáltica y densidad específica bruta de los agregados, diseño 3

% Bitumen	3	3,5	4	4,5	5
Ps	97	96,5	96	95,5	95
G _{sb}	2,61	2,61	2,61	2,61	2,61

Fuente: elaboración propia con base en resultados de laboratorio.

2.6. Cálculos efectuados

Estos cálculos se efectúan para encontrar datos que nos indique, de qué manera se va a comportar la mezcla y si efectivamente se cumple con los requisitos necesarios que solicitan las especificaciones generales para construcción de carreteras y puentes.

Se hace la indicación que todos los pesos presentados a continuación tienen como unidad de medida el gramo.

2.6.1. Densidad específica bruta

La densidad específica bruta se calcula utilizando la siguiente ecuación;

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

A continuación se determina el cálculo de densidad específica bruta:

Muestra:

Datos:

B= 1 246,31 g.

A= 1 250,60 g.

C= 724,45 g.

- Primera iteración

$$G_{mb} = \frac{1\ 246,31}{1\ 250,60 - 724,45}$$

$$G_{mb} = 2,36$$

- Segunda iteración

$$G_{mb} = \frac{1\,249,63}{1\,253,53 - 727,33}$$

$$G_{mb} = 2,37$$

- Tercera iteración

$$G_{mb} = \frac{1\,252,41}{1\,254,07 - 731,47}$$

$$G_{mb} = 2,39$$

- Cuarta iteración

$$G_{mb} = \frac{1\,250,66}{1\,252,04 - 729,90}$$

$$G_{mb} = 2,39$$

- Quinta iteración

$$G_{mb} = \frac{1\,266,60}{1\,267,11 - 744,36}$$

$$G_{mb} = 2,36$$

2.6.2. Densidad específica teórica máxima

La densidad específica teórica máxima se calcula empleando la siguiente ecuación:

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

A continuación se determina el cálculo de densidad específica teórica máxima:

Muestra:

Datos:

F= 1 230 g.

D= 7 380 g.

E= 8 120 g.

- Primera iteración

$$G_{mm} = \frac{1\ 230}{1\ 230 + 7\ 380 - 8\ 120}$$

$$G_{mm} = 2,51$$

- Segunda iteración

$$G_{mb} = \frac{1\ 240}{1\ 240 + 7\ 383 - 8\ 125}$$

$$G_{mb} = 2,49$$

- Tercera iteración

$$G_{mb} = \frac{1\ 251}{1\ 251 + 7\ 381 - 8\ 143}$$

$$G_{mb} = 2,56$$

- Cuarta iteración

$$G_{mb} = \frac{1\ 229,50}{1\ 229,50 + 7381 - 8119,50}$$

$$G_{mb} = 2,50$$

- Quinta iteración

$$G_{mb} = \frac{1\ 119,30}{1\ 119,30 + 7381,50 - 8116,30}$$

$$G_{mb} = 2,59$$

2.6.3. Porcentaje de vacíos

Para el cálculo de porcentaje de vacíos se aplica la siguiente ecuación:

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

A continuación se determina el cálculo del porcentaje de vacíos:

Muestra:

Datos:

$$G_{mm} = 2,51$$

$$G_{mb} = 2,36$$

- Primera iteración

$$V_A = \frac{2,51 - 2,36}{2,51} \times 100$$

$$V_A = 6,13$$

- Segunda iteración

$$V_A = \frac{2,49 - 2,39}{2,49} \times 100$$

$$V_A = 4,00$$

- Tercera iteración

$$V_A = \frac{2,56 - 2,34}{2,56} \times 100$$

$$V_A = 8,71$$

- Cuarta iteración

$$V_A = \frac{2,55 - 2,34}{2,55} \times 100$$

$$V_A = 8,24$$

- Quinta iteración

$$V_A = \frac{2,59 - 2,28}{2,59} \times 100$$

$$V_A = 11,77$$

2.6.4. Porcentaje de vacíos de agregado mineral

Para el cálculo de porcentaje de vacíos en el agregado mineral se utiliza la siguiente ecuación:

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

Muestra:

Datos:

G_{mb} : 2,356

P_s : 95,5 %

G_{sb} : 2,61

- Primera iteración

$$VAM = 100 - \frac{2,356 * 95,5}{2,61}$$

$$VAM = 13,78$$

- Segunda iteración

$$VAM = 100 - \frac{2,391 * 95}{2,61}$$

$$VAM = 12,98$$

- Tercera iteración

$$VAM = 100 - \frac{2,336 * 97}{2,61}$$

$$VAM = 13,20$$

- Cuarta iteración

$$\text{VAM} = 100 - \frac{2,341 * 96,5}{2,61}$$

$$\text{VAM} = 13,46$$

- Quinta iteración

$$\text{VAM} = 100 - \frac{2,284 * 97}{2,61}$$

$$\text{VAM} = 15,11$$

2.7. Presentación de resultados

2.7.1. Tablas

A continuación se muestran los resultados obtenidos en cada uno de los ensayos.

2.7.1.1. Volumen y densidad específica bruta

Tabla XXIII. Resultados de volumen y densidad específica bruta diseño 1

# Probeta	% Bitumen	Volumen	G _{mb}	Promedio
1,00	4,50	526,15	2,369	2,356
2,00		529,19	2,354	
3,00		529,96	2,346	
4,00	5,00	526,20	2,375	2,391
5,00		518,02	2,394	
6,00		519,04	2,403	
7,00	5,50	522,60	2,396	2,399
8,00		524,23	2,395	
9,00		524,19	2,404	
10,00	6,00	522,14	2,395	2,407
11,00		518,34	2,417	
12,00		521,47	2,408	
13,00	6,50	522,75	2,423	2,421
14,00		521,26	2,424	
15,00		519,36	2,416	

Fuente: elaboración propia con base en resultados de laboratorio.

Tabla XXIV. **Resultados volumen y densidad específica bruta diseño 2**

# Probeta	% Bitumen	Volumen	G _{mb}	Promedio
1,00	3,00	550,54	2,326	2,336
2,00		548,85	2,349	
3,00		549,43	2,332	
4,00	3,50	544,15	2,332	2,341
5,00		540,35	2,335	
6,00		537,09	2,355	
7,00	4,00	542,95	2,369	2,350
8,00		550,94	2,335	
9,00		545,79	2,346	
10,00	4,50	549,13	2,347	2,352
11,00		549,46	2,362	
12,00		548,66	2,348	
13,00	5,00	550,80	2,377	2,380
14,00		551,49	2,381	
15,00		555,82	2,382	

Fuente: elaboración propia con base en resultados de laboratorio.

Tabla XXV. **Resultados volumen y densidad específica bruta diseño 3**

# Probeta	% Bitumen	Volumen	G _{mb}	Promedio
1,00	3,00	535,94	2,286	2,284
2,00		538,16	2,276	
3,00		535,67	2,290	
4,00	3,50	530,14	2,333	2,328
5,00		530,84	2,321	
6,00		529,86	2,329	
7,00	4,00	530,13	2,340	2,332
8,00		533,13	2,327	
9,00		532,30	2,330	
10,00	4,50	524,55	2,378	2,362
11,00		525,36	2,354	
12,00		525,04	2,353	
13,00	5,00	522,19	2,386	2,390
14,00		525,12	2,388	
15,00		521,70	2,396	

Fuente: elaboración propia con base en resultados de laboratorio.

2.7.1.2. Resultados de densidad específica teórica máxima y porcentaje de vacíos

Tabla XXVI. Resultados de densidad específica teórica máxima y vacíos diseño 1

% Bitumen	G_{mm}	V_A
4,50	2,51	6,12
5,00	2,49	3,99
5,50	2,48	3,43
6,00	2,47	2,71
6,50	2,43	0,47

Fuente: elaboración propia con base en resultados de laboratorio.

Tabla XXVII. Resultados de densidad específica teórica máxima y vacíos diseño 2

% Bitumen	G_{mm}	V_A
3,00	2,56	8,71
3,50	2,55	8,24
4,00	2,53	5,17
4,50	2,50	6,07
5,00	2,50	2,93

Fuente: elaboración propia con base en resultados de laboratorio.

Tabla XXVIII. Resultados de densidad específica teórica máxima y vacíos diseño 3

% Bitumen	G_{mm}	V_A
3,00	2,59	11,77
3,50	2,47	5,60
4,00	2,52	7,54

Continuación tabla XXVIII.

4,50	2,51	5,88
5,00	2,46	2,96

Fuente: elaboración propia con base en resultados de laboratorio.

2.7.1.3. Resultados de estabilidad-flujo Marshall

Tabla XXIX. Resultados de estabilidad-flujo diseño 1

# Probeta	% Bitumen	Lectura	Carga en Lbf	Corrección (Lbf)	Promedio (Lbf)
1,00	4,50	332,00	3 143,37	3 017,64	2 391,67
2,00		338,00	3 199,05	3 071,09	
3,00		222,00	2 106,64	2 022,38	
4,00	5,00	274,00	2 597,16	2 493,27	2 781,97
5,00		304,00	2 879,16	2 879,16	
6,00		314,00	2 973,48	2 973,48	
7,00	5,50	274,00	2 597,16	2 493,27	2 550,00
8,00		258,00	2 446,21	2 348,36	
9,00		264,00	2 502,84	2 402,73	
10,00	6,00	215,00	2 040,51	2 040,51	2 304,65
11,00		264,00	2 502,84	2 502,84	
12,00		250,00	2 370,60	2 370,60	
13,00	6,50	257,00	2 436,73	2 339,26	2 297,28
14,00		250,00	2 370,60	2 370,60	
15,00		230,00	2 181,97	2 181,97	

Fuente: elaboración propia con base en resultados de laboratorio.

Tabla XXX. Resultados de estabilidad-flujo diseño 2

# Probeta	% Bitumen	Lectura	Carga en Lbf	Corrección (Lbf)	Promedio (Lbf)
1,00	3,00	122,00	1 159,50	1 031,96	1 001,05
2,00		119,00	1 130,99	1 006,58	
3,00		114,00	1 083,84	964,62	

Continuación tabla XXX.

4,00	3,50	126,00	1 200,00	1 116,00	1 135,21
5,00		129,00	1 226,24	1 140,40	
6,00		130,00	1 235,74	1 149,24	
7,00	4,00	142,00	1 350,00	1 255,50	1 225,16
8,00		145,00	1 378,14	1 226,54	
9,00		132,00	1 283,27	1 193,44	
10,00	4,50	136,00	1 292,40	1 150,23	1 122,26
11,00		120,00	1 140,50	1 015,04	
12,00		142,00	1 350,00	1 201,50	
13,00	5,00	118,00	1 121,49	998,12	973,08
14,00		115,00	1 093,34	973,08	
15,00		112,00	1 065,22	948,04	

Fuente: elaboración propia con base en resultados de laboratorio.

Tabla XXXI. Resultados de estabilidad-flujo diseño 3

# Probeta	% Bitumen	Lectura	Carga en Lbf	Corrección (Lbf)	Promedio (Lbf)
1,00	3,00	244,00	2 314,23	2 152,23	1 961,82
2,00		189,00	1 794,30	1 668,70	
3,00		234,00	2 219,92	2 064,53	
4,00	3,50	283,00	2 681,99	2 574,71	2 257,74
5,00		234,00	2 219,65	2 130,86	
6,00		227,00	2 153,80	2 067,64	
7,00	4,00	275,00	2 616,11	2 511,47	2 242,73
8,00		221,00	2 097,15	2 013,27	
9,00		242,00	2 295,26	2 203,45	
10,00	4,50	279,00	2 644,31	2 538,54	2 236,57
11,00		235,00	2 229,13	2 139,97	
12,00		223,00	2 115,84	2 031,21	
13,00	5,00	256,00	2 427,24	2 427,24	2 050,00
14,00		270,00	2 559,48	2 457,10	
15,00		267,00	2 531,04	2 531,04	

Fuente: elaboración propia con base en resultados de laboratorio.

2.7.1.4. Resultados de porcentaje de vacíos en el agregado mineral

Tabla XXXII. Resultados de porcentaje de bitumen y vacíos en el agregado mineral diseño 1

Porcentaje de bitumen	4,5	5	5,5	6	6,5
VAM	13,78	12,98	13,16	13,32	13,28

Fuente: elaboración propia con base en resultados de laboratorio.

Tabla XXXIII. Resultados de porcentaje de bitumen y vacíos en el agregado mineral diseño 2

Porcentaje de bitumen	3	3,5	4	4,5	5
VAM	13,20	13,46	13,56	13,94	13,38

Fuente: elaboración propia con base en resultados de laboratorio.

Tabla XXXIV. Resultados de porcentaje de bitumen y vacíos en el agregado mineral diseño 3

Porcentaje de bitumen	3	3,5	4	4,5	5
VAM	15,11	13,94	14,21	13,58	13,01

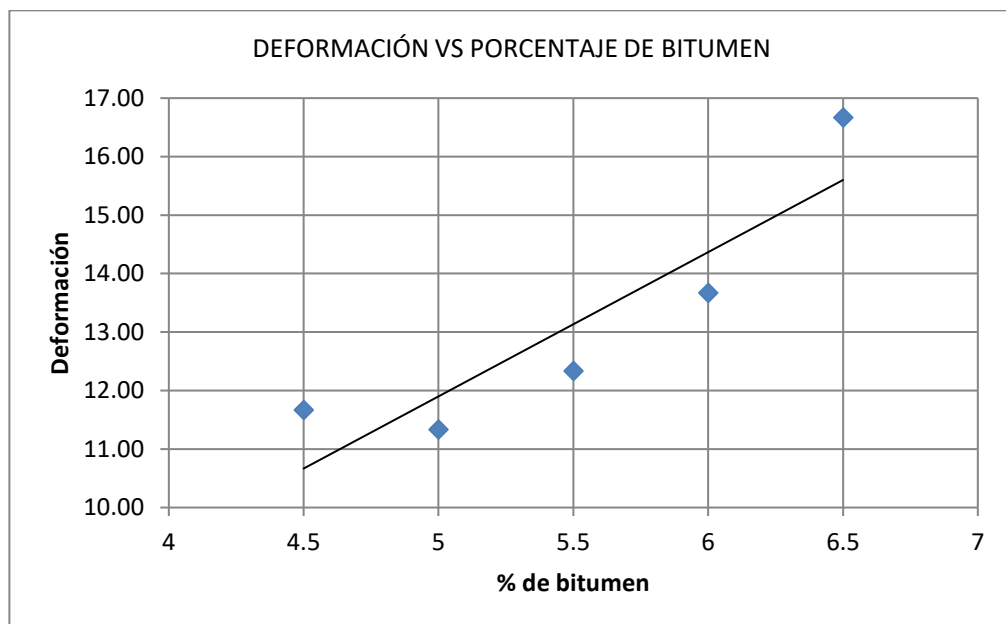
Fuente: elaboración propia con base en resultados de laboratorio.

2.7.2. Gráficas

A continuación se muestran las gráficas con los datos obtenidos para una mejor visualización.

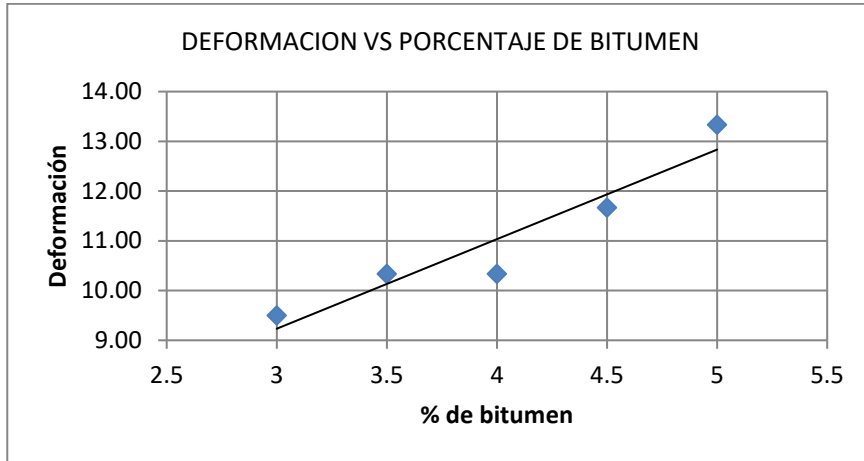
2.7.2.1. Gráficas de deformación vs porcentaje de bitumen

Figura 31. Gráfica deformación vs porcentaje de bitumen diseño 1



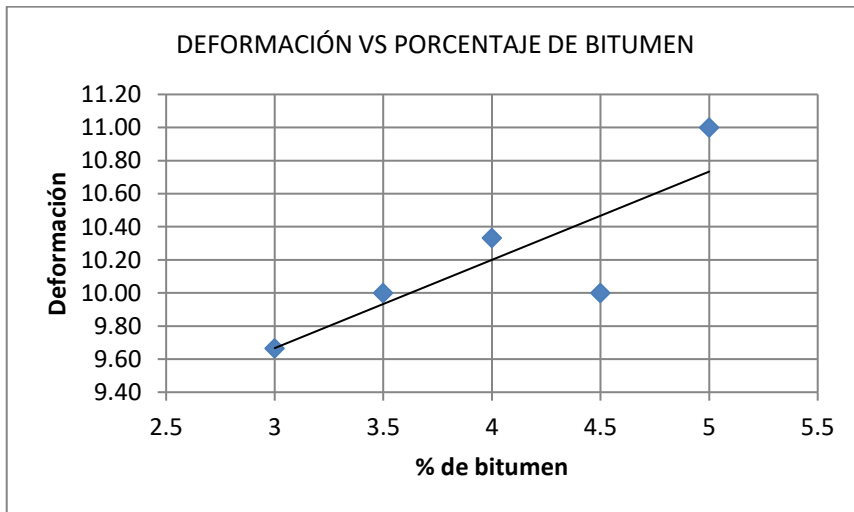
Fuente: elaboración propia con base en resultados de laboratorio.

Figura 32. **Gráfica deformación vs porcentaje de bitumen diseño 2**



Fuente: elaboración propia con base en resultados de laboratorio.

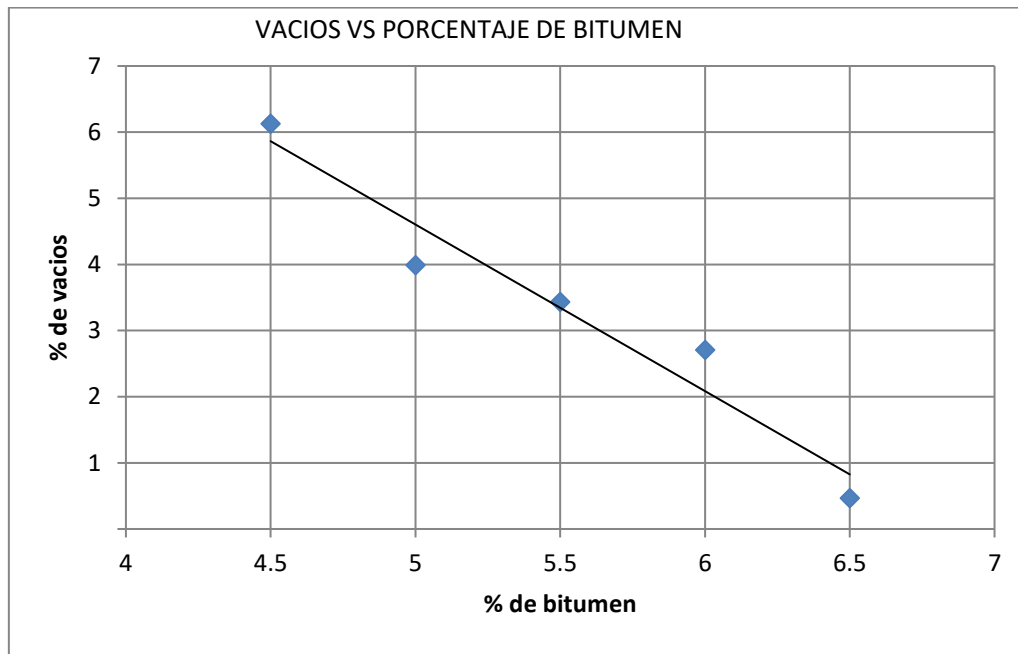
Figura 33. **Gráfica deformación vs porcentaje de bitumen diseño 3**



Fuente: elaboración propia con base en resultados de laboratorio.

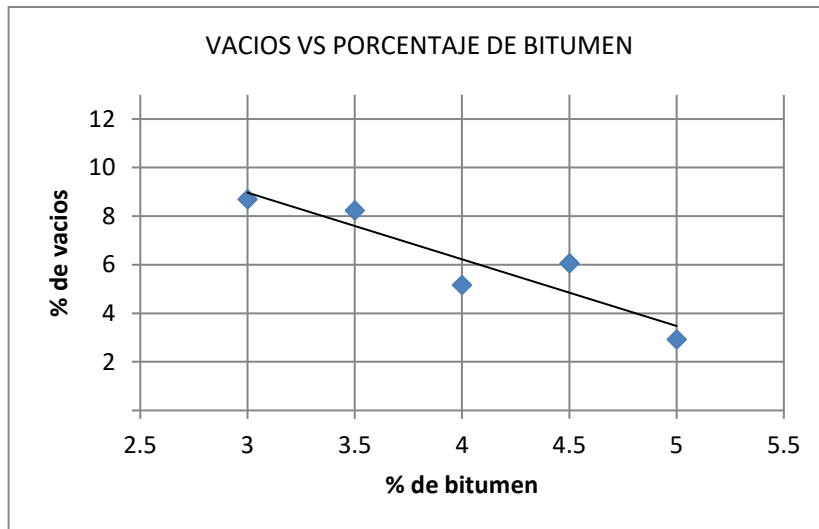
2.7.2.2. Gráficas de porcentaje de vacíos vs porcentaje de bitumen

Figura 34. Gráfica porcentaje de vacíos vs porcentaje de bitumen diseño 1



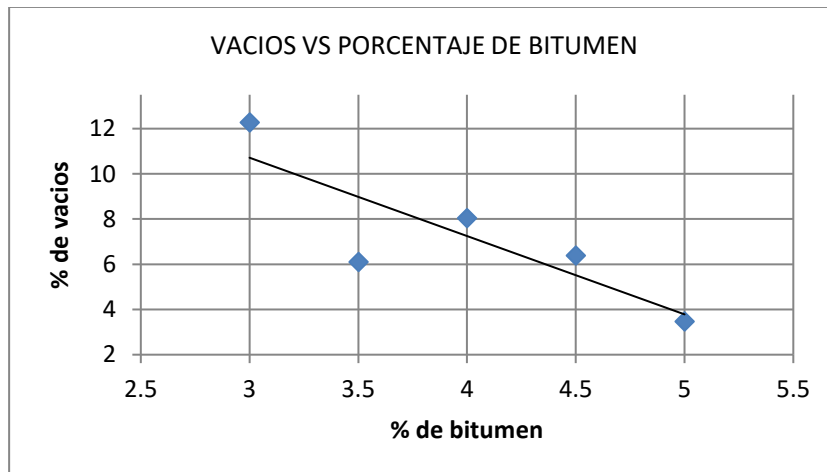
Fuente: elaboración propia con base en resultados de laboratorio.

Figura 35. **Gráfica porcentaje de vacíos vs porcentaje de bitumen
diseño 2**



Fuente: elaboración propia con base en resultados de laboratorio.

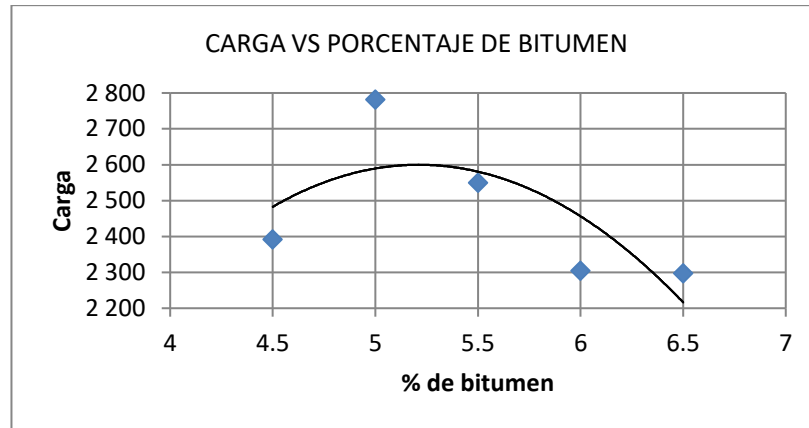
Figura 36. **Gráfica porcentaje de vacíos vs porcentaje de bitumen
diseño 3**



Fuente: elaboración propia con base en resultados de laboratorio.

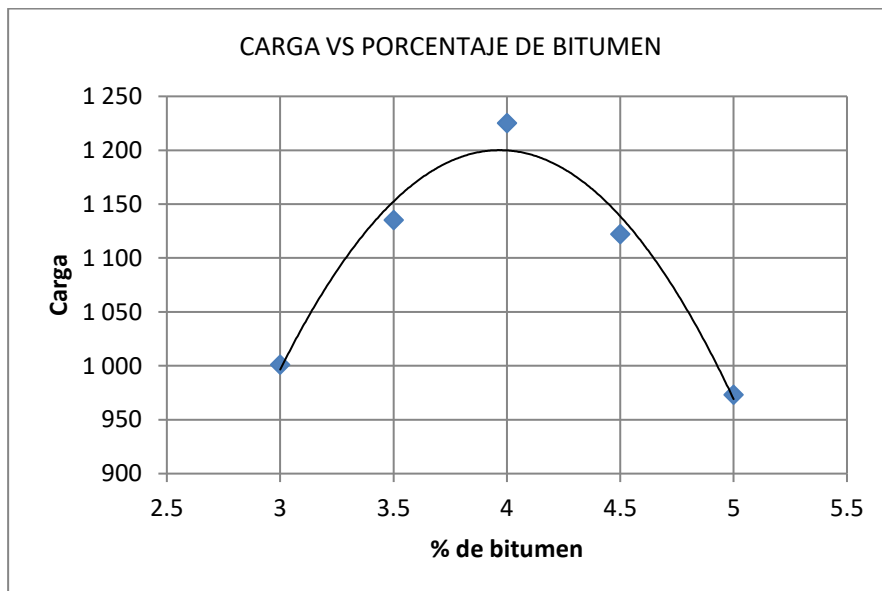
2.7.2.3. Gráficas de carga vs porcentaje de bitumen

Figura 37. Gráfica de carga vs porcentaje de bitumen diseño 1



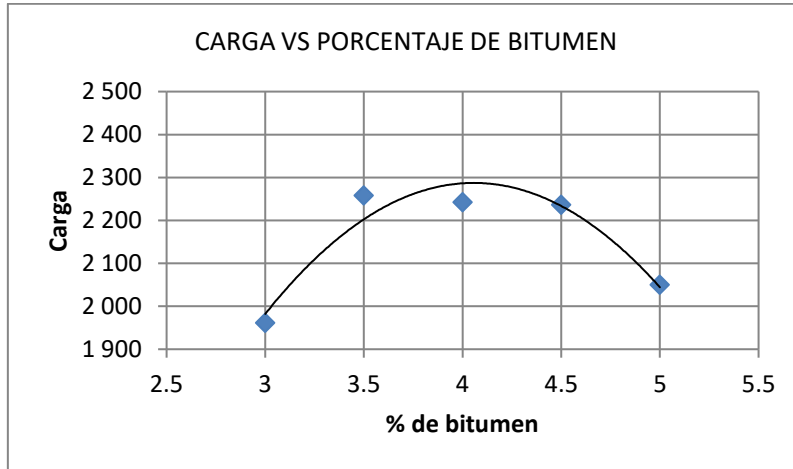
Fuente: elaboración propia con base en resultados de laboratorio.

Figura 38. Gráfica de carga vs porcentaje de bitumen diseño 2



Fuente: elaboración propia con base en resultados de laboratorio.

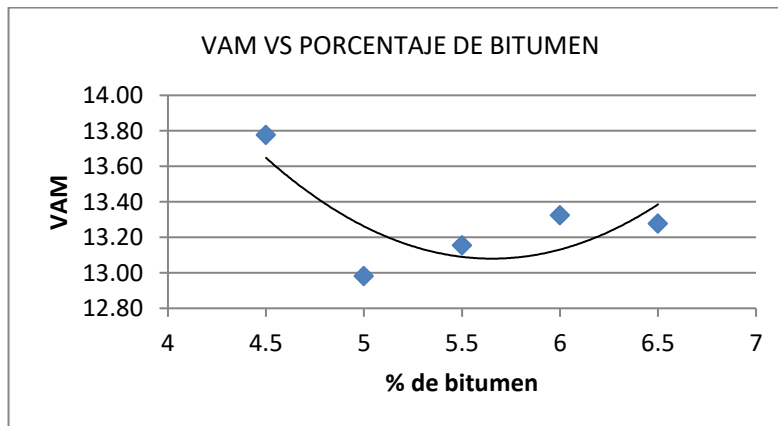
Figura 39. **Gráfica de carga vs porcentaje de bitumen diseño 3**



Fuente: elaboración propia con base en resultados de laboratorio.

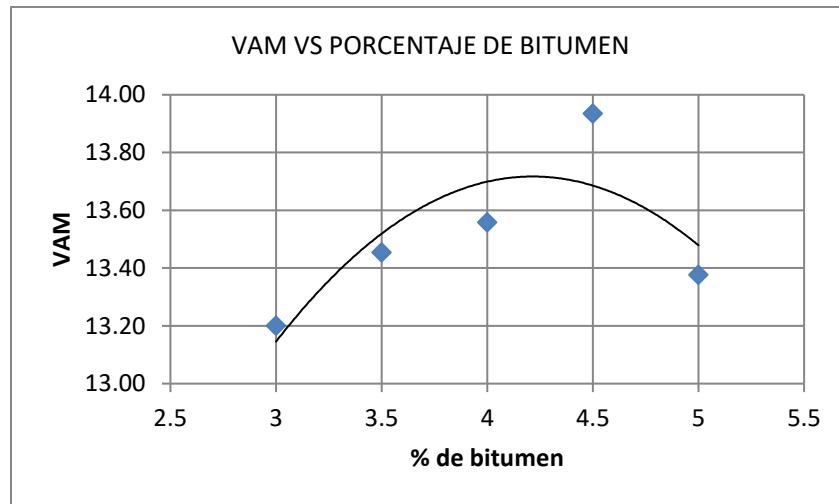
2.7.2.4. Gráficas de vacíos de agregado minera vs porcentaje de bitumen

Figura 40. **Gráfica de vacíos de agregado mineral vs porcentaje de bitumen diseño 1**



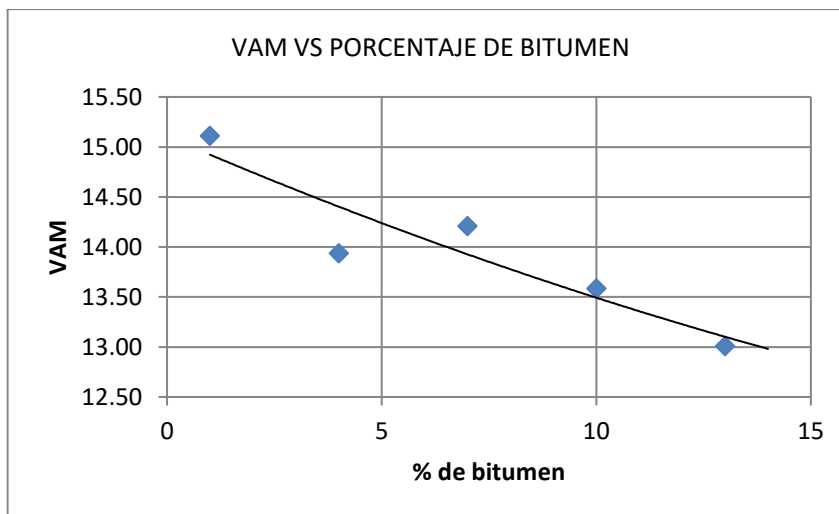
Fuente: elaboración propia con base en resultados de laboratorio.

Figura 41. **Gráfica de vacíos de agregado mineral vs porcentaje de bitumen diseño 2**



Fuente: elaboración propia con base en resultados de laboratorio.

Figura 42. **Gráfica de vacíos de agregado mineral vs porcentaje de bitumen diseño 3**



Fuente: elaboración propia con base en resultados de laboratorio.

3. ANALISIS DE RESULTADOS

A continuación se presentan todos los resultados con los cuales se procede a hacer una comparación para el correspondiente análisis de los distintos diseños y de cada ensayo.

3.1. Resistencia de mezclas asfálticas Marshall, estabilidad y flujo Marshall, ASHTTO T 245 y ASTM D 1559

De los diseño propuestos, dos cumplen con el parámetro para control de estabilidad con una carga mayor arriba de 1 200 lbf debido a que a la hora de hacer el diseño no se toman factores físicos de forma del agregado por lo que al variar la granulometría las características mecánicas de la mezcla asfáltica cambian.

Tabla XXXV. Resultados comparativos de ensayo de estabilidad Marshall

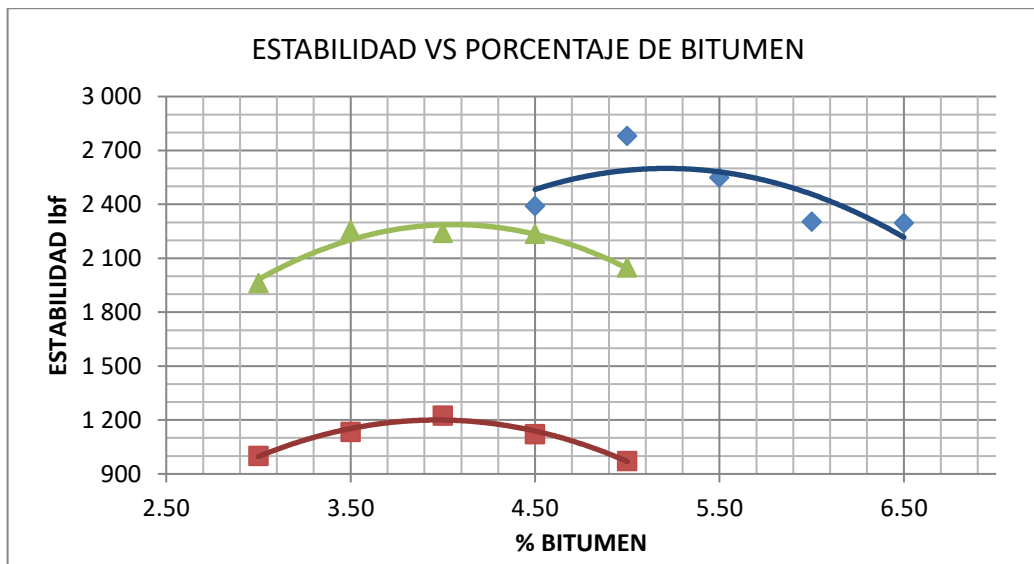
DISEÑO 1		Diseño 2		Diseño 3	
% Bitumen	Estabilidad lbf	% Bitumen	Estabilidad lbf	% Bitumen	Estabilidad lbf
4,50	2 391,67	3,00	1 001,05	3,00	1 961,82
5,00	2 781,97	3,50	1 135,21	3,50	2 257,74
5,50	2 550,00	4,00	1 225,16	4,00	2 242,73

Continuación de tabla XXXV.

6,00	2 304,65	4,50	1 122,26	4,50	2 236,57
6,50	2 297,28	5,00	973,08	5,00	2 050,00

Fuente: elaboración propia con base en resultados de laboratorio.

Figura 43. **Gráfica comparativa de estabilidad vs porcentaje de bitumen**



	Diseño 1
	Diseño 3
	Diseño 2

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

Para flujo Marshall todos los diseños cumplen en un rango definido sin embargo en el diseño uno, cuando se empieza a aumentar la cantidad de bitumen existen menos vacíos y existe una mayor deformación debido a la alta presencia de material viscoso, por lo que en 6,50% no cumple el parámetro de flujo.

Tabla XXXVI. **Parámetros de flujo de Marshall**

TRANSITO	PARAMETROS DE ESPECIFICACIÓN	DISEÑO 1	DISEÑO 2	DISEÑO 3
ESAL < 10 ⁶	8 - 16	CUMPLE EN EL RANGO DE 4,5 % A 6,00 %	CUMPLEN TODOS	CUMPLEN TODOS
ESAL > 10 ⁶	8 - 14	CUMPLE EN EL RANGO DE 4,5 % A 6,00 %	CUMPLEN TODOS	CUMPLEN TODOS

Fuente: elaboración propia con base en resultados de laboratorio.

Tabla XXXVII. **Resultados comparativos de ensayo de flujo Marshall**

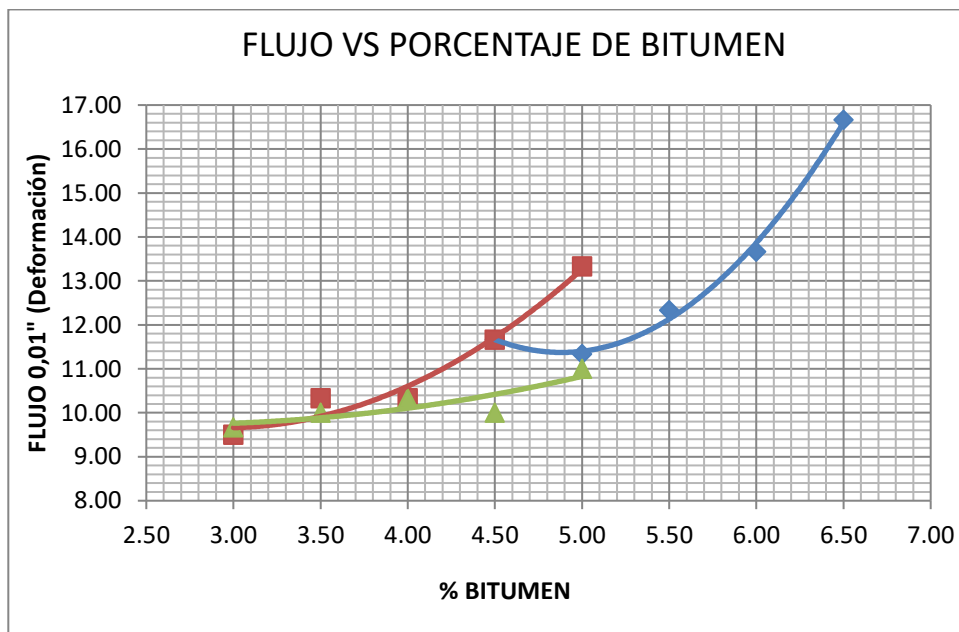
DISEÑO 1		Diseño 2		Diseño 3	
% Bitumen	Flujo 0,01"	% Bitumen	Flujo 0,01"	% Bitumen	Flujo 0,01"
4,50	11,67	3,00	9,50	3,00	9,67
5,00	11,33	3,50	10,33	3,50	10,00
5,50	12,33	4,00	10,33	4,00	10,33
6,00	13,67	4,50	11,67	4,50	10,00

Continuación de tabla XXXVII.

6,50	16,67	5,00	13,33	5,00	11,00
------	-------	------	-------	------	-------

Fuente: elaboración propia con base en resultados de laboratorio.

Figura 44. **Gráfica comparativa de flujo vs porcentaje de bitumen**



	Diseño 1
	Diseño 2
	Diseño 3

Fuente: elaboración propia con base en resultados de laboratorio.

3.2. Densidad específica bruta “Bulk” de probetas ASTM D 1188

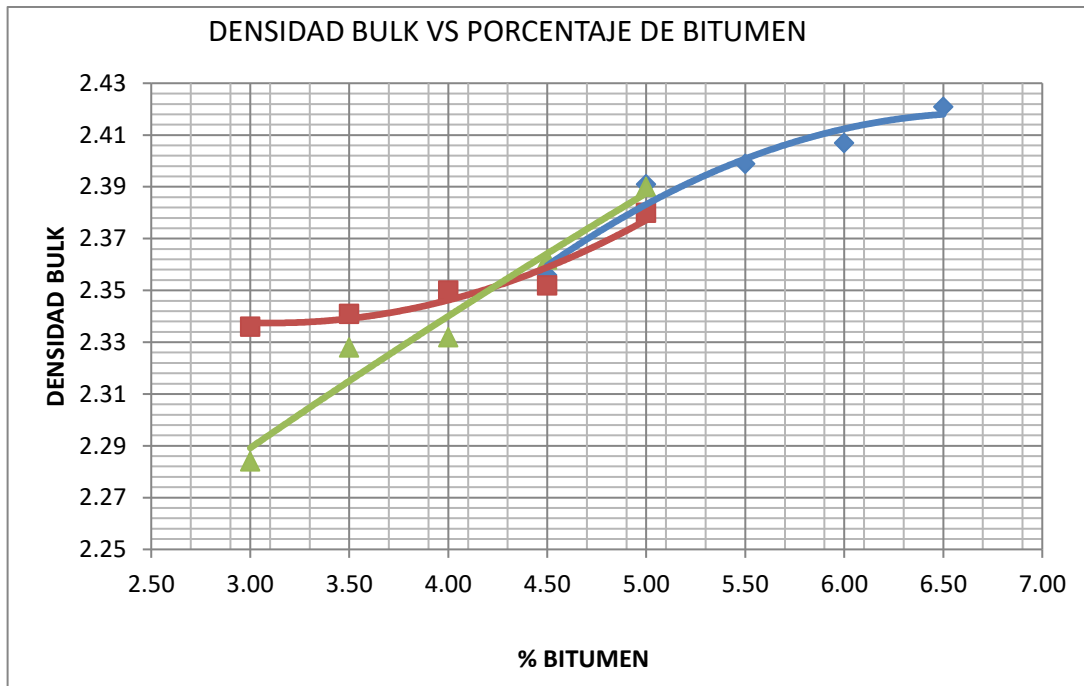
Para densidad específica bruta no existe un parámetro específico de diseño, sin embargo es un dato de suma importancia y podemos observar que la densidad más pesada es la de diseño 1, debido a que mientras más fino se tiene, más densa es una mezcla asfáltica y se observa claramente como en los otros dos diseños al ir agregando agregado más grueso, la densidad baja.

Tabla XXXVIII. **Resultados comparativos de la densidad específica bruta**

DISEÑO 1		DISEÑO 2		DISEÑO 3	
% Bitumen	Gmb	% Bitumen	Gmb	% Bitumen	Gmb
4,50	2,36	3,00	2,34	3,00	2,28
5,00	2,39	3,50	2,34	3,50	2,33
5,50	2,40	4,00	2,35	4,00	2,33
6,00	2,41	4,50	2,35	4,50	2,36
6,50	2,42	5,00	2,38	5,00	2,39

Fuente: elaboración propia con base en resultados de laboratorio.

Figura 45. **Gráfica comparativa de densidad Bulk vs porcentaje de bitumen**



	Diseño 1
	Diseño 2
	Diseño 3

Fuente: elaboración propia con base en resultados de laboratorio.

3.3. Densidad específica teórica máxima

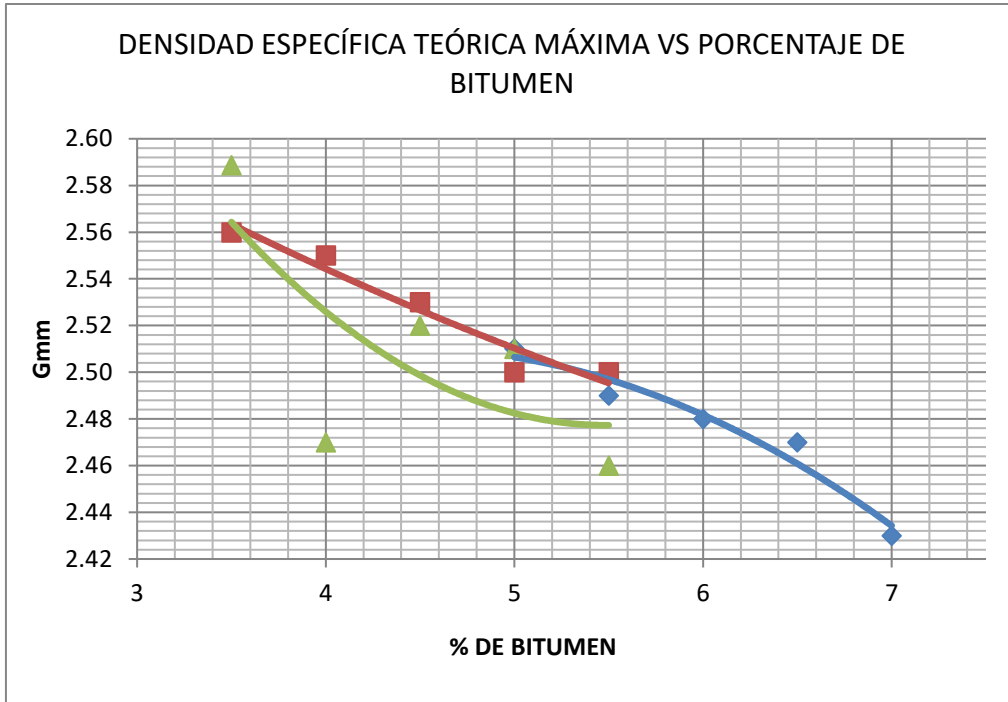
La densidad específica teórica máxima disminuye cuando aumenta el porcentaje de bitumen, ya que mientras más bitumen mayores espacios se cubren y menos vacíos existentes. En cambio, aumenta conforme el tamaño del agregado es más grande, por lo cual, mientras más vacíos existen, mayor será esta densidad.

Tabla XXXIX. **Resultados comparativos de densidad específica teórica máxima**

DISEÑO 1		DISEÑO 2		DISEÑO 3	
% Bitumen	G _{mm}	% Bitumen	G _{mm}	% Bitumen	G _{mm}
4,50	2,51	3,00	2,56	3,00	2,59
5,00	2,49	3,50	2,55	3,50	2,47
5,50	2,48	4,00	2,53	4,00	2,52
6,00	2,47	4,50	2,50	4,50	2,51
6,50	2,43	5,00	2,50	5,00	2,46

Fuente: elaboración propia con base en resultados de laboratorio.

Figura 46. **Gráfica comparativa de densidad específica teórica máxima vs porcentaje de bitumen**



	Diseño 1
	Diseño 2
	Diseño 3

Fuente: elaboración propia con base en resultados de laboratorio.

3.4. Porcentaje de vacíos-densidad

Los vacíos presentan un comportamiento más estable en las dosificaciones de los diseño 1 y 2 en relación al diseño 3 que presenta un salto significativo en sus porcentajes de vacíos conforme aumenta el porcentaje de bitumen. Se puede observar que con un promedio de 5 % de bitumen se cumple con las especificaciones en los 3 diseños, siendo esto un equilibrio si se

analiza que mientras más áreas superficiales se cubran, más cerca estamos de cumplir con los requerimientos, debido a que la granulometría controlada tipo E es una granulometría con mucha presencia de agregado fino.

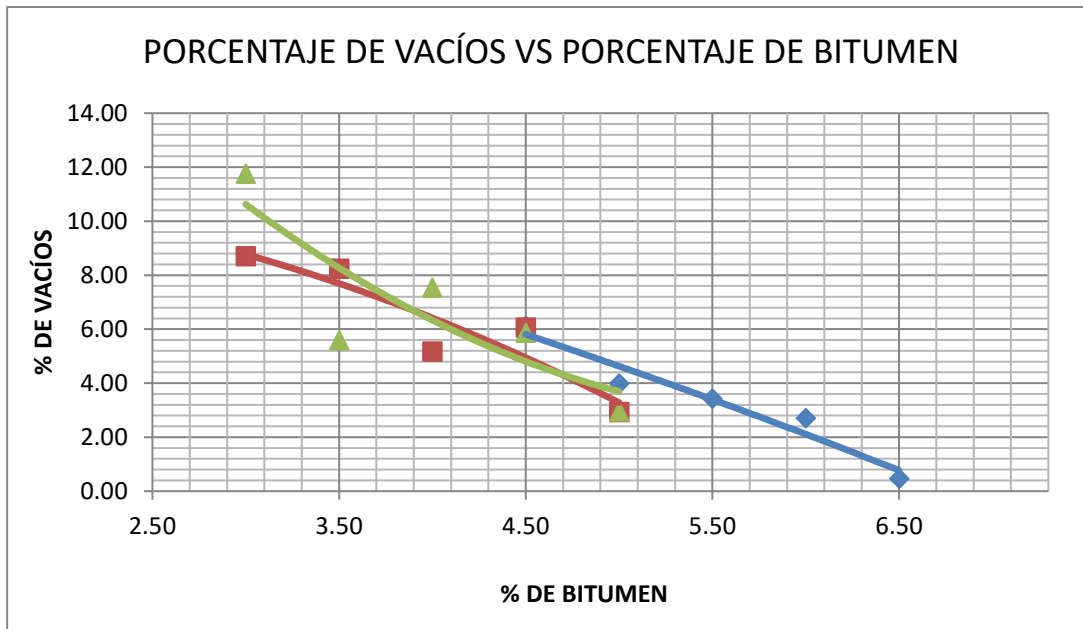
Las mezclas realizadas con el diseño 1 y 2 son las más estables para diseñar.

Tabla XL. Resultados comparativos de porcentaje de vacíos

DISEÑO 1		DISEÑO 2		DISEÑO 3	
% Bitumen	% VACIOS	% Bitumen	% VACIOS	% Bitumen	% VACIOS
4,50	6,12	3,00	8,71	3,00	11,77
5,00	3,99	3,50	8,24	3,50	5,60
5,50	3,43	4,00	5,17	4,00	7,54
6,00	2,71	4,50	6,07	4,50	5,88
6,50	0,47	5,00	2,93	5,00	2,96

Fuente: elaboración propia con base en resultados de laboratorio.

Figura 47. **Gráfica comparativa de porcentaje de vacíos vs porcentaje de bitumen**



	Diseño 1
	Diseño 2
	Diseño 3

Fuente: elaboración propia con base en resultados de laboratorio.

3.5. **Porcentaje de vacíos en el agregado mineral ASTM D1559**

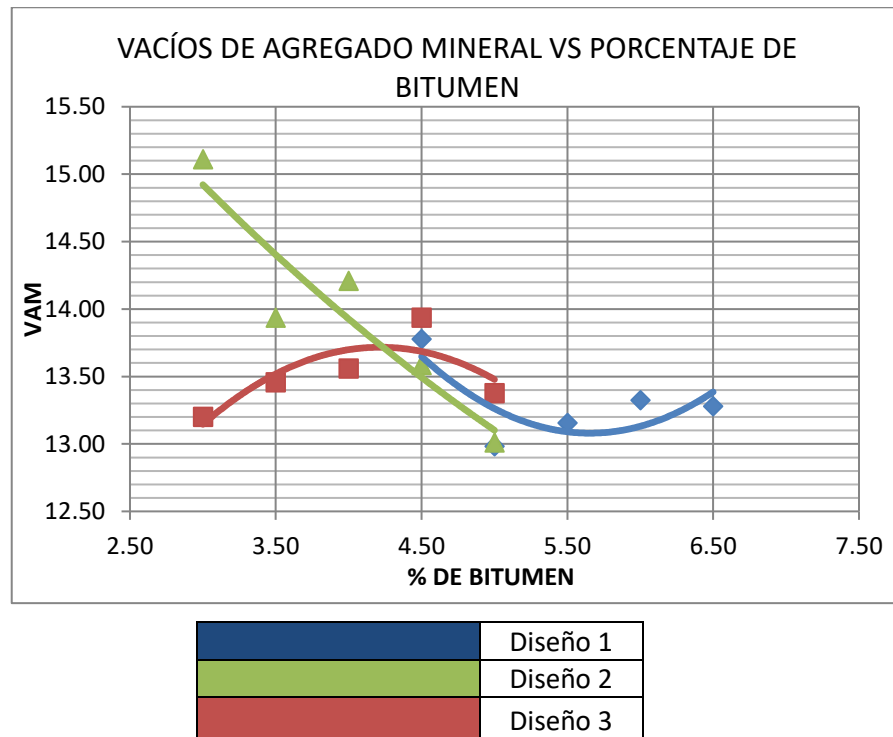
Los diseños cumplen con los parámetros requeridos por la Dirección General de Caminos. Estos resultados no tuvieron una separación considerable entre ellos sin embargo el diseño 1 presenta un comportamiento más estable por lo que se analiza como el más adecuado para diseñar.

Tabla XLI. **Resultados comparativos de porcentaje de vacíos de agregado mineral**

DISEÑO 1		DISEÑO 2		DISEÑO 3	
% Bitumen	VAM	% Bitumen	VAM	% Bitumen	VAM
4,50	13,78	3,00	13,20	3,00	15,11
5,00	12,98	3,50	13,46	3,50	13,94
5,50	13,16	4,00	13,56	4,00	14,21
6,00	13,32	4,50	13,94	4,50	13,58
6,50	13,28	5,00	13,38	5,00	13,01

Fuente: elaboración propia con base en resultados de laboratorio.

Figura 48. **Gráfica comparativa de porcentaje de vacíos de agregado mineral vs porcentaje de bitumen**



Fuente: elaboración propia con base en resultados de laboratorio.

CONCLUSIONES

1. Las mezclas asfálticas presentan variaciones volumétricas vinculadas a las variaciones granulométricas, la granulometría tipo E presenta un comportamiento más uniforme y estable si la curva de diseño está cercana a los límites, como fueron el caso del diseño 1 y 3; en cambio el diseño 2 presentó una inconsistencia en sus características debido a la presencia alta de agregado fino de tamaño medio.
2. Las variaciones grandes en los porcentajes de vacíos, como existieron en el diseño 2, pueden ser consecuencia de una mala homogeneidad en las características físicas de los agregados. Esto indica que el diseño que se encuentre en el centro de la gráfica de parámetros no siempre asegura que se cumplan los requerimientos, debe de tomarse muy en cuenta la calidad del material con el que se trabaja.
3. Las causas de inestabilidad en la mezcla asfáltica son provocadas por diferentes factores, para este estudio se puede ver claramente en el análisis de resultados que en el diseño 2 algunas probetas no pasan del dato de carga requerido, esto debido a que no se realizó un estudio previo para certificar la calidad de los agregados. Este diseño posee una gran cantidad de agregado fino de tamaño medio, lo que podría provocar fácilmente ondulaciones. En el diseño 1, la deformación no cumple cuando agregamos una alta cantidad de cemento asfáltico, lo que la hace una mezcla demasiado plástica y con tendencia a deformarse fácilmente bajo las cargas del tránsito.

4. Los vacíos en una mezcla asfáltica y los vacíos en el agregado mineral son considerados los parámetros más importantes para determinar si las propiedades de una mezcla son las óptimas para el diseño del pavimento flexible, para el caso del diseño 1 es el que mejor comportamiento presentó y el más estable ya que las variaciones respecto a los vacíos de aire, vacíos de agregado mineral y estabilidad cumplieron para todas las probetas, como se observó en el análisis de resultados.
5. La carga no cumplió en el diseño 2, salvo con el 4 % de bitumen, esto a que en este diseño se presenta mayor cantidad de finos de tamaño medio. El diseño 1 y 3 son más uniformes, por lo que cumplieron todos los valores de carga. Se concluye que en cualquier caso para una granulometría tipo E, en donde la curva de diseño se encuentre cercana a los límites de la curva granulométrica, siempre se va a cumplir con la especificación de carga a menos de que el agregado o el cemento asfáltico utilizado sean de mala calidad.
6. Para una granulometría controlada tipo E, el diseño 1 contó con mayores proporciones de finos y nos brindó mejores propiedades físicas y mecánicas en relación a los otros dos diseños. El comportamiento que presentaron las probetas del diseño 1 es el ideal, cumpliéndose las especificaciones requeridas.
7. Con base en los resultados obtenidos en las características físicas y mecánicas, el diseño de granulometría 3 es el que cumple con todas las especificaciones requeridas para mezclas de concreto asfáltico y la que mejor contenido de cemento asfáltico lleva, por lo tanto es la que económicamente resulta más viable.

RECOMENDACIONES

1. Conocer las características y propiedades de los materiales escogidos, tanto de los agregados como del cemento asfáltico para poder predecir de qué manera se va a comportar la mezcla asfáltica y tener los controles de calidad necesarios.
2. Utilizar agregado triturado y evitar utilizar la arena de río, agregado de canto rodado, para mejorar las propiedades mecánicas y características físicas del pavimento
3. Realizar un análisis detallado del lugar donde se realizan los proyectos para definir bancos de materiales y el tipo de cemento asfáltico a utilizar, la viscosidad del cemento asfáltico puede contribuir a una resistencia mayor a la deformación, sin embargo debe de hacerse el análisis económico paralelamente.
4. Implementar un mayor control de calidad en laboratorio y en campo en la colocación de las mezclas para evitar que la carpeta asfáltica se deteriore con facilidad.
5. Analizar de manera detallada qué tipo de granulometría se va a utilizar para la capa que corresponda, buscar estudios previos para tener una base en cuanto a cómo se comportan las mezclas con sus diferentes proporciones de agregados y de cemento asfáltico.

BIBLIOGRAFÍA

1. American Society for Testing and Materials. *Standard specification for coarse aggregate for bituminous paving mixtures*. ASTM D692. EUA: ASTM, 2000. 4 p.
2. _____ . *Standard specification for fine aggregate for bituminous paving mixtures*. ASTM D1073. EUA: ASTM, 1999. 6 p.
3. American Association of State Highway and Transportation Officials. *Resistance to plastic flow of bituminous mixtures using Marshall apparatus*. AASHTO T 245. Estados Unidos de Norteamérica: AASHTO, 2001. 6 p.
4. Dirección General de Caminos. *Especificaciones generales para construcción de carreteras y puentes*. Guatemala: Cámara Guatemalteca de la Construcción, 2001. 12 p.
5. Instituto Nacional de Vías. *Manual de normas de ensayo de materiales para carreteras, Secciones 700 y 800, Materiales y mezclas asfálticas y prospección de pavimentos*. Colombia: INVIAS, 2012. 16 p.
6. LEON FAJARDO, José Luis. *Criterios para el Diseño de Mezclas Asfálticas en Caliente*. Trabajo de graduación de Ing. Civil. Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala, 1996. 18 p.

APÉNDICES

Apéndice 1. Verificación de temperatura de agregados



Fuente: laboratorio de asfaltos, Centro de Investigaciones de Ingeniería.

Apéndice 2. Adición de cemento asfáltico a los agregados



Fuente: laboratorio de asfaltos, Centro de Investigaciones de Ingeniería.

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



Fuente: laboratorio de asfaltos, Centro de Investigaciones de Ingeniería.

Apéndice 4. **Probetas en baño María previo a ensayo Marshall**



Fuente: laboratorio de asfaltos, Centro de Investigaciones de Ingeniería.

Apéndice 5. **Ensayo Marshall**



Fuente: laboratorio de asfaltos, Centro de Investigaciones de Ingeniería.

Apéndice 6. **Especímenes del estudio**



Fuente: laboratorio de asfaltos, Centro de Investigaciones de Ingeniería.

Apéndice 7.

Muestra compactada



Fuente: laboratorio de asfaltos, Centro de Investigaciones de Ingeniería.

ANEXOS

Anexo 1. Informe de estabilidad y flujo Marshall

	CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERIA FACULTAD DE INGENIERIA UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA	
		No. 09549
INFORME NUMERO: 037 L.B.A.	ORDEN DE TRABAJO: 36497	
INTERESADO:	EDGAR FRANCISCO MORALES DONIS - 201020194	
PROYECTO:	TRABAJO DE GRADUACIÓN: CAMBIOS VOLUMÉTRICOS Y FÍSICOS EN MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE POR EL MÉTODO MARSHALL UTILIZANDO MATERIALES FINOS	
DIRECCION:	CII/FIUSAC LABORATORIO DE ASFALTOS	
FECHA:	26 DE MAYO DEL 2017	
MUESTRA:	AGREGADO GRUESO Y AGREGADO FINO	
PROBETA	ESTABILIDAD LBF	FLUJO 0,01"
D1 AC 30 4,5% # 1	2250,00	12
D1 AC 30 4,5% # 2	2525,00	11
D1 AC 30 5% # 1	2493,27	14
D1 AC 30 5% # 2	2879,16	10
D1 AC 30 5,5% # 1	2493,27	13
D1 AC 30 5,5% # 2	2348,36	12
D1 AC 30 6% # 1	2040,51	13
D1 AC 30 6% # 2	2502,84	14
D1 AC 30 6,5% # 1	2339,26	17
D1 AC 30 6,5% # 2	2370,60	17
D2 AC 30 3% # 1	1031,96	12
D2 AC 30 3% # 2	1006,58	20
D2 AC 30 3,5% # 1	1116,00	10
D2 AC 30 3,5% # 2	1140,40	11
D2 AC 30 4% # 1	1255,50	10

Atentamente,

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




Ing. Darío Francisco Lucas Mazariegos
Jefe Laboratorio de Asfaltos

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

Fuente: laboratorio de asfaltos, Centro de Investigaciones de Ingeniería.

Anexo 2. Informe de estabilidad y flujo Marshall



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



No. 09550

INFORME NUMERO: 038 L.B.A.

ORDEN DE TRABAJO: 36497

INTERESADO: EDGAR FRANCISCO MORALES DONIS - 201020194

PROYECTO: TRABAJO DE GRADUACIÓN: CAMBIOS VOLUMÉTRICOS Y FÍSICOS EN MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE POR EL MÉTODO MARSHALL UTILIZANDO MATERIALES FINOS

DIRECCION: CII/FIUSAC LABORATORIO DE ASFALTOS

FECHA: 26 DE MAYO DEL 2017

MUESTRA: AGREGADO GRUESO Y AGREGADO FINO

PROBETA	ESTABILIDAD LBF	FLUJO 0,01"
D2 AC 30 4% # 2	1226,54	10
D2 AC 30 4,5% # 1	1150,23	11
D2 AC 30 4,5% # 2	1015,04	13
D2 AC 30 5% # 1	998,12	15
D2 AC 30 5% # 2	973,08	13
D3 AC 30 3% # 1	2152,23	10
D3 AC 30 3% # 2	1168,70	10
D3 AC 30 3,5% # 1	2574,71	10
D3 AC 30 3,5% # 2	2130,86	10
D3 AC 30 4% # 1	2511,47	11
D3 AC 30 4% # 2	213,27	10
D3 AC 30 4,5% # 1	2538,54	9
D3 AC 30 4,5% # 2	2139,97	11
D3 AC 30 5% # 1	2427,24	12
D3 AC 30 5% #2	2457,10	11

Atentamente,

Vo. Bo. :



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





Ing. Dario Francisco Lucas Mazariegos
Jefe Laboratorio de Asfaltos



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

Fuente: laboratorio de asfaltos, Centro de Investigaciones de Ingeniería.

Anexo 3. Informe de densidad específica bruta



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



INFORME NUMERO: 039 L.B.A.
ORDEN DE TRABAJO: 36497
No. 12001

INTERESADO: EDGAR FRANCISCO MORALES DONIS - 201020194

PROYECTO: TRABAJO DE GRADUACIÓN: CAMBIOS VOLUMÉTRICOS Y FÍSICOS EN MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE POR EL MÉTODO MARSHALL UTILIZANDO MATERIALES FINOS

DIRECCION: CII/FIUSAC LABORATORIO DE ASFALTOS

ENSAYO: DENSIDAD ESPECIFICA DE BULK ASTM 2726-05a

FECHA: 26 DE MAYO DEL 2017

MUESTRA: AGREGADO GRUESO Y AGREGADO FINO

PROBETA	GRAVEDAD ESPECIFICA
D1 AC 30 4,5% #1	2,369
D1 AC 30 4,5% #2	2,354
D1 AC 30 5% #1	2,375
D1 AC 30 5% #2	2,394
D1 AC 30 5,5% #1	2,396
D1 AC 30 5,5% #2	2,395
D1 AC 30 6% #1	2,395
D1 AC 30 6% #2	2,417
D1 AC 30 6,5% #1	2,423
D1 AC 30 6,5% #2	2,424
D2 AC 30 3% #1	2,326
D2 AC 30 3% #2	2,349
D2 AC 30 3,5% #1	2,332
D2 AC 30 3,5% #2	2,335
D2 AC 30 4% #1	2,369

PROBETA	GRAVEDAD ESPECIFICA
D2 AC 30 4% #2	2,335
D2 AC 30 4,5% #1	2,347
D2 AC 30 4,5% #2	2,362
D2 AC 30 5% #1	2,377
D2 AC 30 5% #2	2,381
D3 AC 30 3% #1	2,286
D3 AC 30 3% #2	2,276
D3 AC 30 3,5% #1	2,333
D3 AC 30 3,5% #2	2,321
D3 AC 30 4% #1	2,340
D3 AC 30 4% #2	2,327
D3 AC 30 4,5% #1	2,378
D3 AC 30 4,5% #2	2,354
D3 AC 30 5% #1	2,386
D3 AC 30 5% #2	2,388

Atentamente,

Vo. Bo. : 

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






Ing. Edgar Francisco Lucas Mazariegos
Jefe Laboratorio de Asfaltos


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

Fuente: laboratorio de asfaltos, Centro de Investigaciones de Ingeniería.

Anexo 4. Informe de densidad específica teórica máxima



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



INFORME NUMERO: 040 L.B.A.

ORDEN DE TRABAJO: 36497

No. 12002

INTERESADO: EDGAR FRANCISCO MORALES DONIS - 201020194

PROYECTO: TRABAJO DE GRADUACIÓN: CAMBIOS VOLUMÉTRICOS Y FÍSICOS EN MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE POR EL MÉTODO MARSHALL UTILIZANDO MATERIALES FINOS

DIRECCION: CII/FIUSAC LABORATORIO DE ASFALTOS

ENSAYO: DENSIDAD ESPECIFICA TEORICA MAXIMA "RICE" ASTM 2041

FECHA: 26 DE MAYO DE 2017

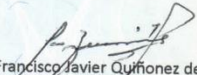
MUESTRA: AGREGADO GRUESO Y AGREGADO FINO

PROBETA	GMM
D1 AC 30 4,5%	2,510
D1 AC 30 5%	2,490
D1 AC 30 5,5%	2,484
D1 AC 30 6%	2,474
D1 AC 30 6,5%	2,432

PROBETA	GMM
D2 AC 30 3%	2,558
D2 AC 30 3,5%	2,551
D2 AC 30 4%	2,478
D2 AC 30 4,5%	2,504
D2 AC 30 5%	2,452

PROBETA	GMM
D3 AC 30 3%	2,589
D3 AC 30 3,5%	2,466
D3 AC 30 4%	2,523
D3 AC 30 4,5%	2,509
D3 AC 30 5%	2,463


Atentamente,

Vo. Bo. : 

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



Ing. Darío Francisco Lucas Mazariegos
Jefe Laboratorio de Asfaltos



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

Fuente: Laboratorio de Asfaltos, Centro de Investigaciones de Ingeniería.

Anexo 5. **Tabla de factores de corrección estabilidad marshall**

Volumen de la probeta (cm ³)	Espesor de la probeta		Factor de corrección
	mm	pg	
290 a 301	36,5	1,44	3,03
302 a 316	38,1	1,50	2,78
317 a 328	39,7	1,56	2,50
329 a 340	41,3	1,62	2,27
341 a 353	42,9	1,69	2,08
354 a 367	44,4	1,75	1,92
368 a 379	46,0	1,81	1,79
380 a 392	47,6	1,88	1,67
393 a 405	49,2	1,94	1,56
406 a 420	50,8	2,00	1,47
421 a 431	52,4	2,06	1,39
432 a 443	54,0	2,12	1,32
444 a 456	55,6	2,19	1,25
457 a 470	57,2	2,25	1,19
471 a 482	58,7	2,31	1,14
483 a 495	60,3	2,38	1,09
496 a 508	61,9	2,44	1,04
509 a 522	63,5	2,50	1,00
523 a 535	65,1	2,56	0,96
536 a 546	66,7	2,62	0,93
547 a 559	68,3	2,69	0,89
560 a 573	69,8	2,75	0,86
574 a 585	71,4	2,81	0,83
586 a 598	73,0	2,88	0,81
599 a 610	74,6	2,94	0,78
611 a 626	76,2	3,00	0,76

Fuente: Laboratorio de Asfaltos, Centro de Investigaciones de Ingeniería.

Anexo 6. Tabla de factores de corrección estabilidad Marshall

7300 W. AGATITE AVE.
NORRIDGE, IL 60706

4 SEP 20

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

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

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