



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

**CARACTERIZACIÓN Y ANÁLISIS COMPARATIVO DE DISEÑOS DE MEZCLAS
ASFÁLTICAS EN CALIENTE, EMPLEANDO CEMENTO ASFÁLTICO AC-20, AC-30 Y AC-40**

Jorge Aníbal Coronado Veliz

Asesorado por el Ing. Yefry Valentín Rosales Juárez

Guatemala, noviembre de 2016

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**CARACTERIZACIÓN Y ANÁLISIS COMPARATIVO DE DISEÑOS DE MEZCLAS
ASFÁLTICAS EN CALIENTE, EMPLEANDO CEMENTO ASFÁLTICO AC-20, AC-30 Y AC-40**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

Jorge Aníbal Coronado Veliz

ASESORADO POR EL ING. YEFRY VALENTÍN ROSALES JUÁREZ

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO CIVIL

GUATEMALA, NOVIEMBRE DE 2016

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

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

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
EXAMINADOR	Ing. Juan Carlos Linares Cruz
EXAMINADOR	Ing. Mario Estuardo Arriola Avila
EXAMINADOR	Ing. Wuillian Ricardo Yon Chavarría
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:

**CARACTERIZACIÓN Y ANÁLISIS COMPARATIVO DE DISEÑOS DE MEZCLAS
ASFÁLTICAS EN CALIENTE, EMPLEANDO CEMENTO ASFÁLTICO AC-20, AC-30 Y AC-40**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Civil, con fecha 20 de agosto de 2015.

Jorge Anibal Coronado Veliz

Guatemala, 20 de septiembre de 2016

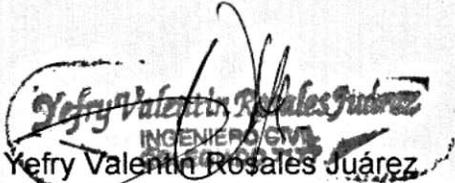
Ingeniero
José Gabriel Ordóñez Morales
Coordinador del Área de Materiales y Construcciones Civiles
Universidad de San Carlos de Guatemala
Guatemala.

Ingeniero Ordoñez:

Al saludarle cordialmente, me dirijo a usted para informarle que ha sido concluido satisfactoriamente el trabajo de graduación titulado: **“CARACTERIZACIÓN Y ANÁLISIS COMPARATIVO DE DISEÑO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE, EMPLEANDO CEMENTO ASFÁLTICO AC-20, AC-30 Y AC-40”** elaborado por el estudiante Jorge Aníbal Coronado Véliz con carné 200924422, 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,


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



USAC
TRICENTENARIA
Universidad de San Carlos de Guatemala

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

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



Guatemala,
07 de octubre de 2016

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

Estimado Ingeniero Montenegro.

Le informo que he revisado el trabajo de graduación **CARACTERIZACIÓN Y ANÁLISIS COMPARATIVO DE DISEÑOS DE MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE, EMPLEANDO CEMENTO ASFÁLTICO AC-20, AC-30 Y AC-40** desarrollado por el estudiante de Ingeniería Civil Jorge Aníbal Coronado Véliz quien contó con la asesoría del Ing. Yefry Valentín Rosales Juárez .

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

Atentamente,

ID Y ENSEÑAD A TODOS

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



FACULTAD DE INGENIERIA
AREA DE MATERIALES Y
CONSTRUCCIONES CIVILES
USAC

/mrrm.

Mas de 134 años de Trabajo Académico y Mejora Continua





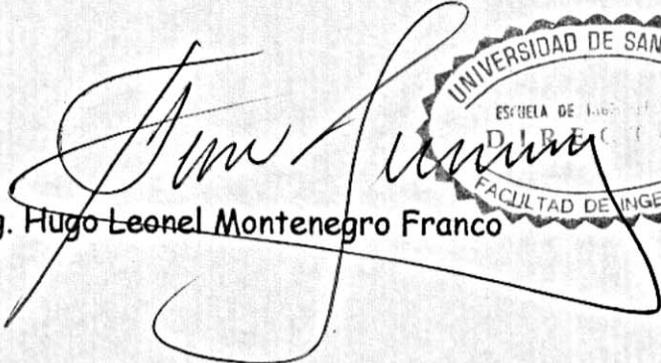
USAC
TRICENTENARIA
Universidad de San Carlos de Guatemala

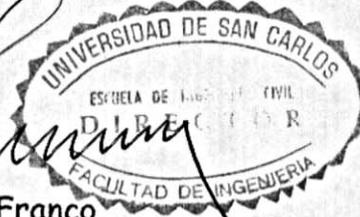
<http://civil.ingenieria.usac.edu.gt>

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



El director de la Escuela de Ingeniería Civil, después de conocer el dictamen del Asesor Ing. Yefry Valentín Rosales Juárez y del Coordinador del Departamento de Materiales y Construcciones Civiles Ing. José Gabriel Ordóñez Morales, al trabajo de graduación del estudiante Jorge Anibal Coronado Véliz, titulado **CARACTERIZACIÓN Y ANÁLISIS COMPARATIVO DE DISEÑOS DE MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE, EMPLEANDO CEMENTO ASFÁLTICO AC-20, AC-30 Y AC-40**, da por este medio su aprobación a dicho trabajo.

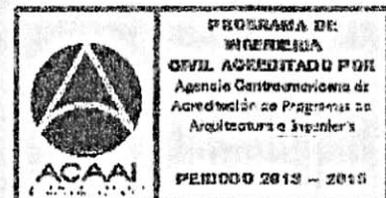

Ing. Hugo Leonel Montenegro Franco



Guatemala, noviembre 2016

/mrrm.

Mas de 134 años de Trabajo Académico y Mejora Continua

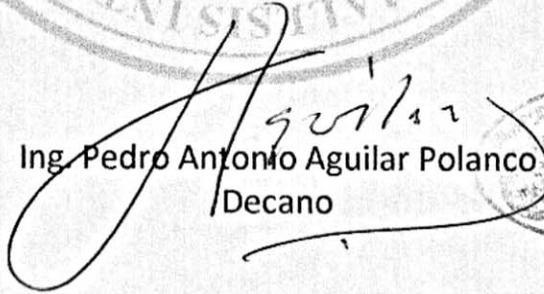




DTG. 550.2016

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Civil, al Trabajo de Graduación titulado: **CARACTERIZACIÓN Y ANÁLISIS COMPARATIVO DE DISEÑOS DE MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE, EMPLEANDO CEMENTO ASFÁLTICO AC-20, AC-30 Y AC-40**, presentado por el estudiante universitario: **Jorge Aníbal Coronado Véliz**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:


Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
Decano



Guatemala, noviembre de 2016

/gdech

ACTO QUE DEDICO A:

Dios	Por derramar bendiciones innumerables y por la oportunidad de lograr todas mis metas en la vida.
Mis padres y hermanos	Por brindarme su amistad, sus muestras de cariño, apoyo incondicional, comprensión y sobre todo por guiarme en el camino correcto para lograr esta meta.
Mi abuela	Quien siempre fue una fuente de inspiración para seguir adelante y nunca bajar la cabeza.
Mi Familia	Por el consejo y apoyo que han puesto a mi diario vivir.
Universidad de San Carlos de Guatemala	Tricentenaria casa de estudios, y principalmente a la Facultad de Ingeniería por formarme como profesional.

AGRADECIMIENTOS A:

- Dios** Por permitirme culminar una de mis metas, y guiarme siempre en el camino correcto.
- Mis padres** Domingo Armando Coronado Guzmán y Silvia Del Carmen Veliz de Coronado, por ser un modelo a seguir y por todo el apoyo que me otorgaron, ya que sin ellos no hubiese sido posible este logro.
- Mis hermanos** Mario Coronado y Edgar Coronado, por cada momento compartido y por el apoyo que siempre me han brindado existió de parte de ustedes, Gracias.
- Mi abuela** Carmen Romelia de Veliz por todo el apoyo que me brindo incondicionalmente.
- Mis tíos** Duglio Mauricio Veliz, Edgar Coronado Guzmán, Hugo Geovanni Veliz y Aníbal Jared Veliz quienes siempre me han mostrado su apoyo y por ser un ejemplo a seguir.
- Mis primos** Allan Giovanni Veliz, Alexander Veliz, Astrid Liseth Veliz y Katherin Veliz por estar siempre en todo momento apoyándome.

Mi Familia	Por los consejos y el inquebrantable apoyo que me han dado en mi diario vivir.
Universidad de San Carlos de Guatemala	Tricentenaria casa de estudios, y principalmente a la Facultad de Ingeniería, por formarme como profesional.
A mi asesor	Ing. Yefry Valentin Rosales, quien me compartió sus conocimientos y me guío en cada paso de la Investigación.
José Juan Istupe	Por su dedicación, por compartir sus conocimientos y por su ayuda incondicional en la realización de los diferentes ensayos de laboratorio.
Sección de Asfaltos	Por su ayuda en la realización de los ensayos de laboratorio.

	1.1.5.3.	Tamaño máximo de partículas	8
	1.1.5.4.	Granulometría del agregado.....	9
1.1.6.		Asfaltos.....	10
1.1.7.		Ensayos físicos a la mezcla asfáltica	12
	1.1.7.1.	Viscosidad.....	12
	1.1.7.2.	Penetración	13
	1.1.7.3.	Punto de inflamación.....	14
	1.1.7.4.	Ductilidad.....	14
	1.1.7.5.	Solubilidad.....	15
1.1.8.		Mezclas asfálticas	16
1.1.9.		Ensayos físicos a la mezcla asfáltica	17
	1.1.9.1.	Densidad de la mezcla	17
	1.1.9.2.	Vacíos de aire, o simplemente vacíos.....	17
	1.1.9.3.	Vacíos en el agregado mineral.....	18
	1.1.9.4.	Contenido de asfalto	19
	1.1.9.5.	Calidad	19
	1.1.9.6.	Durabilidad	20
	1.1.9.7.	Características de la durabilidad del asfalto.....	21
	1.1.9.7.1.	Envejecimiento o endurecimiento.....	21
	1.1.9.7.2.	Oxidación	21
	1.1.9.8.	Volatilización	22
	1.1.9.8.1.	Polimerización.....	22
1.1.10.		Diseño de mezcla.....	22
	1.1.10.1.	Metodología Marshall	23

	1.1.10.1.1.	Pruebas a las mezclas asfálticas compactadas	24
	1.1.10.1.2.	Determinación de la ravedad específica	24
	1.1.10.1.3.	Prueba de estabilidad y flujo.	24
	1.1.10.1.4.	Análisis de densidad de vacíos	25
1.2.		Propiedades de los agregados que se utilizan en mezclas asfálticas en caliente (m.a.c)	26
1.3.		Generalidades	26
	1.3.1.	Definición de mezcla asfáltica.....	26
	1.3.2.	Clasificación de las mezclas asfálticas	27
	1.3.2.1.	Por fracciones de agregado pétreo empleado.....	27
	1.3.2.2.	Por la temperatura puesta en obra	27
	1.3.2.2.1.	Mezclas asfálticas en caliente	28
	1.3.2.2.2.	Mezclas asfálticas en frío	28
	1.3.2.2.3.	Por la proporción de vacíos en la mezcla asfáltica	28
	1.3.2.3.	Por el tamaño máximo del agregado pétreo	29
1.3.3.		Evolución de los diseños de mezclas asfálticas en caliente	29
	1.3.3.1.	The Hubbard-Field (1920)	29

1.3.3.2.	Método Marshall (1930's).....	29
1.3.3.3.	Método Hveem (1930).....	30
1.3.3.4.	Método de la <i>Western Association of State Highway on Transportation Officials, WASHTO</i> (1984).....	30
1.3.3.5.	Método de <i>Asphalt Aggregate Mixture Analysis System. AAMAS</i> (1987).....	30
1.3.3.6.	Método SUPERPAVE (1993)	31
1.3.4.	Características de la mezcla (Método Marshall).....	31
1.3.4.1.	Densidad	31
1.3.4.2.	Vacios de Aire	32
1.3.4.3.	Vacios en el agregado mineral (VMA).....	33
1.3.4.4.	Contenido de asfalto	33
1.3.4.5.	Vacios llenos de asfaltos (VFA)	35
1.3.5.	Propiedades de las mezclas asfálticas.....	35
1.3.5.1.	Estabilidad.....	35
1.3.5.2.	Durabilidad	36
1.3.5.3.	Flexibilidad	37
1.3.5.4.	Resistencia a la fatiga	38
1.3.5.5.	Resistencia al deslizamiento	38
1.3.5.6.	Impermeabilidad.....	39
1.3.5.7.	Trabajabilidad.....	40
1.4.	Método de diseño Marshall	41
1.4.1.	Metodología.....	41
1.4.2.	Propósito de la metodología.....	41
1.4.3.	Descripción general.....	42
1.4.4.	Especificaciones de la metodología	42

1.4.5.	Evaluación y ajustes de una mezcla de diseño	44
1.4.5.1.	Lineamientos generales para ajustar las mezclas de prueba.....	47
1.4.5.1.1.	Bajo contenido de vacíos y estabilidad baja.....	48
1.4.5.1.2.	Bajo contenido de vacíos y estabilidad satisfactoria	48
1.4.5.1.3.	Contenido satisfactorio de vacíos y estabilidad baja.....	49
1.4.5.1.4.	Contenido alto de vacíos y estabilidad satisfactoria	49
1.4.5.1.5.	Vacíos altos y estabilidad baja.....	50
1.4.6.	Ensayos realizados a la mezcla asfáltica compactada	50
1.4.6.1.	Gravedad específica teórica máxima y densidad de mezclas bituminosas de pavimentación.....	50
1.4.6.2.	Determinación de la gravedad específica bulk	51
1.4.6.3.	Resistencia de mezclas bituminosas al flujo plástico utilizando el aparato Marshall	51
1.4.6.4.	Análisis de densidad y vacíos.....	52

1.5.	Procedimiento de diseño de mezclas asfálticas en caliente utilizando el método Marshall.....	53
1.5.1.	Comprobación granulométrica	54
1.5.2.	Dosificación de agregados	54
1.5.3.	Estimación del porcentaje óptimo de asfalto	55
2.	DESARROLLO EXPERIMENTAL ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS DEL DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA POR EL MÉTODO MARSHALL.....	57
2.1.	Trabajo de laboratorio para el diseño de mezcla	57
2.1.1.	Preparación de probetas de mezcla asfáltica.....	58
2.1.1.1.	Metodología.....	58
2.1.1.2.	Procedimiento	61
2.2.	Gravedad específica bulk.....	63
2.2.1.	Metodología.....	63
2.2.2.	Procedimiento	65
2.2.3.	Resultados de los ensayos de gravedad específica bulk.....	66
2.3.	Gravedad específica teórica máxima	72
2.3.1.	Metodología.....	72
2.3.2.	Procedimiento	75
2.3.3.	Resultados de gravedad específica teórica máxima.....	76
2.3.3.1.	Cálculo de gravedad específica teórica máxima	76
2.4.	Porcentaje de vacíos-densidad	81
2.4.1.	Metodología.....	81
2.4.2.	Procedimiento	82
2.4.3.	Resultados de porcentaje de vacíos-densidad.....	82

2.5.	Prueba de estabilidad-flujo Marshall.....	86
2.5.1.	Metodología	86
2.5.2.	Procedimiento.....	87
2.5.3.	Resultados de porcentaje de vacíos-densidad.	88
2.6.	Porcentaje de vacíos en el agregado mineral.....	94
2.6.1.	Metodología	94
2.6.2.	Procedimiento.....	94
2.6.3.	Resultados de vacíos de agregado mineral.....	95
2.7.	Análisis de resultados.....	99
2.7.1.	Tabulación de resultados.....	99
2.7.2.	Interpretación de resultados	103
2.7.2.1.	Mezcla asfáltica AC-20	104
2.7.2.2.	Mezcla asfáltica AC-30	105
2.7.2.3.	Mezcla asfáltica AC-40	106
CONCLUSIONES		109
RECOMENDACIONES.....		111
BIBLIOGRAFÍA.....		113
APÉNDICES		115
ANEXOS.....		119

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Representación de la composición típica de una mezcla asfáltica.....	34
2.	Curvas Fuller de máxima densidad basadas en un gráfico normalizado semi-log de granulometría	46
3.	Curvas de densidad máxima basadas en un gráfico FHWA (potencia de 0,45) de granulometría	47
4.	Curva granulométrica del diseño de mezcla asfáltica	58
5.	Equipo utilizado para calentar agregados al cemento asfáltico.....	60
6.	Equipo utilizado para calentar mezcla asfáltica.....	60
7.	Recipiente y espatula para mezclar	61
8.	Balanza provista de dispositivo de suspensión y pileta de agua para suspensión de probeta	64
9.	Gráfica de resultados de gravedad específica bulk mezcla AC-20	68
10.	Gráfica de resultados de gravedad específica bulk mezcla AC-30	70
11.	Gráfica de resultados de gravedad específica bulk mezcla AC-40	72
12.	Picnómetro para vacío	74
13.	Bomba de vacío y manómetro de presión residual	74
14.	Gráfica de resultados de gravedad específica teórica máxima AC-20 ..	78
15.	Gráfica de resultados de gravedad específica teórica máxima AC-30 ..	79
16.	Gráfica de resultados de gravedad específica teórica máxima AC-40 ..	81
17.	Gráfica de resultados de porcentaje de vacíos-densidad AC-20	83
18.	Gráfica de resultados de porcentaje de vacíos-densidad AC-30	84
19.	Gráfica de resultados de porcentaje de vacíos-densidad AC-40	85

20.	Gráfica de resultados de estabilidad-flujo Marshall de mezcla asfáltica AC-20.....	90
21.	Gráfica de resultados de deformación Marshall de mezcla asfáltica AC-20.....	90
22.	Gráfica de resultados de estabilidad-flujo Marshall de mezcla asfáltica AC-30.....	91
23.	Gráfica de resultados de deformación Marshall de mezcla asfáltica AC-30.....	92
24.	Gráfica de resultados de estabilidad-flujo Marshall de mezcla asfáltica AC-40.....	93
25.	Gráfica de resultados de deformación Marshall de mezcla asfáltica AC-40.....	94
26.	Gráfica de resultados de porcentaje de vacíos en el agregado mineral AC-20.....	96
27.	Gráfica de resultados de porcentaje de vacíos en el agregado mineral AC-30.....	97
28.	Gráfica de resultados de porcentaje de vacíos en el agregado mineral AC-40.....	98
29.	Gráfico comparativo de gravedad específica bulk	100
30.	Gráfico comparativo de gravedad específica teórica máxima.....	101
31.	Gráfico comparativo de porcentaje de vacíos-densidad	102
32.	Gráfico comparativo de estabilidad Marshall	103

TABLAS

I.	Requisitos de graduación para el polvo mineral	7
II.	Especificaciones para cementos asfálticos. Clasificados por su viscosidad a 60 °C	15
III.	Causas y efectos de la poca durabilidad	37

IV.	Causas y efectos de la poca resistencia al deslizamiento.....	39
V.	Causas y efectos de mezcla demasiado permeable	39
VI.	Causas y efectos de la mala trabajabilidad	40
VII.	Criterios del Instituto del Asfalto para el diseño Marshall	43
VIII.	Porcentaje mínimo de VMA.....	44
IX.	Graduación de agregados para pavimento de concreto asfáltico (ASTM D 3515)	57
X.	Datos de gravedad específica bulk de mezcla AC-20	66
XI.	Resultados de gravedad específica bulk de mezcla AC-20	67
XII.	Datos de gravedad específica bulk de mezcla AC-30	68
XIII.	Resultados de gravedad específica bulk de mezcla AC-30	69
XIV.	Datos de gravedad específica bulk de mezcla AC-40	70
XV.	Resultados de gravedad específica bulk de mezcla AC-40	71
XVI.	Resultados de gravedad específica teórica máxima AC-20	77
XVII.	Resultados de gravedad específica teórica máxima AC-30	78
XVIII.	Resultados de gravedad específica teórica máxima AC-40	80
XIX.	Resultados de porcentaje de vacíos-densidad AC-20.....	83
XX.	Resultados de porcentaje de vacíos-densidad AC-30	84
XXI.	Resultados de porcentaje de vacíos-densidad AC-40	85
XXII.	Resultados de estabilidad-flujo Marshall de mezcla asfáltica AC-20 ...	89
XXIII.	Resultados de estabilidad-flujo Marshall de mezcla asfáltica AC-30 ...	91
XXIV.	Resultados de estabilidad-flujo Marshall de mezcla asfáltica AC-40 ...	92
XXV.	Resultados de porcentaje de vacíos en el agregado mineral AC-20.....	96
XXVI.	Resultados de porcentaje de vacíos en el agregado mineral AC-30.....	97
XXVII.	Resultados de porcentaje de vacíos en el agregado mineral AC-40.....	98
XXVIII.	Cuadro comparativo de gravedad específica bulk	99
XXIX.	Cuadro comparativo de gravedad específica teórica máxima	100
XXX.	Cuadro comparativo de porcentaje de vacíos-densidad	101
XXXI.	Cuadro comparativo de estabilidad Marshall	102

LISTA DE SÍMBOLOS

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

GLOSARIO

Aglomerante	Material que en estado pastoso y con consistencia variable es capaz de unir fragmentos de una o varias sustancias y dar cohesión al conjunto.
Agregado pétreo	Agregado proveniente de la trituración de roca, de piedra o de un peñasco.
Anillo dinamométrico	Instrumento utilizado para conocer la carga de compresión aplicada en una máquina de ensayo.
Bomba de vacío	Máquina utilizada para extraer, impulsar o elevar moléculas de gas de un volumen sólido.
Cemento asfáltico	Aglomerante proveniente de la fracción pesada de la destilación del petróleo crudo.
Contenido de asfalto	Cantidad de asfalto que se adiciona a la mezcla de agregados pétreos para obtener las cualidades deseadas de la mezcla.
Deformímetro	Instrumento que mide desplazamientos lineales.
Densidad	Relación que existe entre la masa y el volumen que ocupa una sustancia.

Estabilidad	Capacidad de la mezcla asfáltica para resistir desplazamiento y deformación bajo la aplicación de carga.
Fluencia	Deformación en centésimas de pulgada de la briqueta, bajo la carga de estabilidad Marshall.
Granulometría	Distribución de los diferentes tamaños de las partículas de un agregado.
Gravedad específica	Propiedad obtenida de la comparación de la densidad de una sustancia con la densidad de una sustancia patrón.
INV	Instituto Nacional de Vías de Colombia.
Ligante	Material cuya función es de pegar o unir partículas de otros materiales.
Manómetro	Instrumento utilizado para medir la presión de un fluido, especialmente de los gases.
Pavimento flexible	Constituido con un material bituminoso como aglomerante y agregados pétreos.
Picnómetro	Instrumento de medición utilizado para conocer la densidad o peso específico de un fluido líquido o sólido.

Poise	Unidad de viscosidad dinámica que equivale a un dina sobre una superficie de un centímetro cuadrado.
Polvo mineral	Material que pasa el tamiz núm. 200 utilizado como relleno mineral en la mezcla asfáltica.
Probeta	Pieza sometida a ensayos para estudio del material del que está hecha.
Vacíos de aire	Espacios pequeños de aire o bolsas de aire, que están presentes entre las partículas de la mezcla asfáltica.
Viscosidad	Medida de la resistencia a la deformación de un fluido producida por fuerzas cortantes.

RESUMEN

El propósito de esta investigación es analizar las diferentes propiedades entre tres tipos de cementos asfálticos: AC-20, AC-30 y AC-40, utilizando ensayos avalados por la norma ASTM D 1559. El siguiente trabajo de investigación es sumamente importante en la actualidad, ya que a través de este se pueden dar mejores parámetros para el diseño con distintos cementos asfálticos, debido a que existen muchos problemas con respecto a las distintas propiedades de los cementos asfálticos en las plantas productoras de asfalto del país. Estos problemas se dan debido a que dependiendo de la región geográfica, según la temperatura, se debe utilizar distinto cemento asfáltico.

Este trabajo tiene como objetivo principal crear un diseño de mezcla con agregado basáltico, el cual se obtuvo de la planta productora ubicada en el Kilómetro 32, Ruta al Pacífico, Palín, Oeste I, AGRECA; de la cual se realizará una mezcla tipo D según las especificaciones de la norma D 3515, Tabla 401-1, de las especificaciones generales para la construcción de carreteras y puentes de la dirección general de caminos. Se obtendrá así, mediante la Metodología de diseño de mezclas asfáltica en caliente método Marshall, un porcentaje óptimo de cemento asfáltico, necesario para la comparación entre mezclas asfálticas. Estos son de mucha importancia para el buen funcionamiento y durabilidad en las mezclas asfálticas en caliente.

Este trabajo es de tipo descriptivo, en él se busca comparar las propiedades características y rasgos de la mezcla asfáltica empleando tres tipos de cementos asfálticos, y de esta manera obtener la condición ideal de cemento asfáltico. Se utilizó una misma granulometría controlada para los

diferentes cementos asfálticos, obteniendo distintas características físicas y mecánicas entre los diseños.

OBJETIVOS

General

Analizar comparativamente diseños de mezclas asfálticas en caliente, empleando cemento asfáltico AC-20, AC-30 y AC-40, utilizando el mismo diseño granulométrico.

Específicos

1. Determinar el porcentaje óptimo de cemento asfáltico empleando el tipo AC-20 mediante el método Marshall.
2. Determinar el porcentaje óptimo de cemento asfáltico empleando el tipo AC-30 mediante el método Marshall.
3. Determinar el porcentaje óptimo de cemento asfáltico empleando el tipo AC-40 mediante el método Marshall.
4. Analizar los resultados obtenidos de los diseños de mezclas estudiados para comparar las distintas propiedades físicas y mecánicas de los mismos.

INTRODUCCIÓN

El propósito de esta investigación es analizar variables comparativas entre tres tipos de cementos asfálticos AC-20, AC-30 y AC-40, debido a la existencia de muchos problemas respecto a la disponibilidad de cementos asfálticos utilizados en las distintas regiones del país. En lo que respecta a la infraestructura vial, las carpetas de rodadura son las que reflejan el daño que sufren debido a las cargas que deben de soportar los pavimentos flexibles. Este daño se muchas veces se debe a la mala elección del diseño de mezcla asfáltica utilizada, y en este caso se enfocará a los cementos asfálticos.

Los cementos asfálticos de baja viscosidad se deben utilizar en regiones cuyas temperaturas críticas no sean elevadas; mientras que los cementos asfálticos de alta viscosidad, en las regiones donde las temperaturas críticas se mantengan durante la temporada más larga del año. Para poder comprender como se modifican las características de las mezclas asfálticas con distintos cementos asfálticos se debe analizar la granulometría a utilizar y así obtener mejores resultados tanto de resistencia como de durabilidad en lo que respecta a la carpeta de rodadura.

Se analizarán las características individuales de los tres tipos de cemento asfáltico y su comportamiento de acuerdo al Diseño del método Marshall, variando la cantidad de AC-20, AC-30 y AC-40; ya que se pretende especificar las propiedades, características y comportamiento de la mezcla asfáltica. Se realizarán con el fin de determinar las características propias de los tres tipos de cemento asfáltico mencionados; tomando en cuenta la ubicación y localización

geográfica de la obra a ejecutar y el diseño óptimo de las mezclas asfálticas para que cumplan con los requerimientos y necesidades deseadas.

1. MARCO TEÓRICO

1.1. Diseño de mezclas asfálticas

Las mezclas asfálticas en frío son elaboradas, extendidas y compactadas en frío tanto en plantas como en el sitio donde se deseen colocar.

1.1.1. Pavimentos

Según Herbert Lynch son las estructuras de la carretera formada por una o más capas de material granular seleccionado y colocado directamente sobre la subrasante del suelo natural, lo cual posteriormente es protegido por una capa asfáltica de rodamiento o una de concreto de cemento Portland, con o sin armadura metálica.

También es definido como toda estructura artificialmente alisada en su superficie y destinada a transmitir a la subrasante sobre la que descansa, los efectos de las cargas estáticas o en movimiento, resistiendo los efectos destructivos del tránsito y los agentes atmosféricos. Están formados por las capas de sub-base, base, rodamiento y sello.

1.1.2. Clasificación de pavimentos

Los pavimentos se dividen en pavimentos rígidos y pavimentos flexibles.

- Los pavimentos rígidos son aquellos en los cuales la capa de rodamiento consiste en una losa de concreto de cemento Portland con o sin

armadura metálica y que pueden o no contener una base entre ella y el terreno de fundación. Su característica principal es la capacidad de absorber o resistir por sí sola los esfuerzos producidos por las cargas que le son aplicadas. En algunos casos, la losa de concreto es usada como una delgada capa de rodamiento asfáltico.

- Los pavimentos flexibles consisten en una o más capas de material granular seleccionado o procesado y colocado directamente sobre la subrasante del suelo natural, de esta manera transmiten directamente sobre dicha subrasante las cargas que reciben solo en las zonas próximas a la aplicación de la carga. En la mayoría de los casos, la superficie de esta capa seleccionada es protegida y conservada por una capa asfáltica de rodamiento.
 - Terreno de fundación. Es aquel que sirve de fundación para el pavimento después de haber sido terminado el movimiento de tierra y que, una vez compactado, tiene las secciones transversales y pendientes especificadas en los planos de diseño. Dependiendo de la calidad de este terreno se determina el número de capas que poseerá el pavimento. Si el terreno es malo se requerirá de una capa sub- base, pero en caso contrario puede que no se requiera ni siquiera la capa base.
 - Subrasante. Es la parte superior del terreno de fundación o explanación, también se conoce como la superficie limítrofe entre el terreno de fundación y la estructura de pavimentos.
 - Sub-base. Es la capa de material seleccionado que se coloca encima de la subrasante, su función principal es servir de capa de drenaje, por lo que debe constituirse con materiales granulares como arenas, granzón, piedra picada, arcilla, polvillo de carretera,

etc. Deben ser obtenibles en la localidad y poseer un valor soporte mayor al terreno de fundación compactado sobre el cual son colocados.

- Base. Es la capa de material pétreo, mezcla de suelo cemento y mezcla bituminosa o piedra triturada que se coloca encima de la sub-base. Esta tiene por finalidad absorber los esfuerzos transmitidos por las cargas de los vehículos y además repartir uniformemente estos esfuerzos a la sub-base y al terreno de fundación. Las bases pueden ser granulares, o bien estar formadas por mezclas asfálticas o mezclas estabilizadas con cemento u otro material ligante.
- Rodamiento. Está colocada encima de la base y generalmente está formada por una mezcla bituminosa de pavimentos flexibles o por concreto de pavimentos rígidos. Su función es impermeabilizar la base contra la penetración del agua superficial, la cual podría reducir la capacidad soporte de la base, así como también proteger la base contra los efectos del raimiento y desintegración ocasionados por el tráfico, además de aumentar la capacidad soporte de toda la estructura y proporcionar una superficie suave de rodamiento.
- Sello o desgaste. Se coloca encima de la capa de rodamiento y está formada por una mezcla bituminosa Encima de esta carpeta se coloca, a veces, un riego de arena o piedra picada menuda. Tiene por objeto sellar la superficie, impermeabilizándola, a fin de evitar la infiltración de las aguas de lluvia, además protege la capa de rodamiento contra la acción abrasiva de las ruedas de los vehículos.
- Rasante. Es la que soporta el tránsito de los vehículos.

1.1.3. Materiales de Pavimentos

Están conformados por agregados o áridos, y asfalto líquido, los cuales al ser combinados mediante distintos métodos forman las mezclas asfálticas, y estas mezclas, a su vez, pueden clasificarse en frías o en caliente, según la forma en que son preparadas.

1.1.4. Agregados

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

1.1.4.1. Agregados naturales

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

1.1.4.2. Artificiales o preparados industrialmente

Los agregados artificiales o preparados industrialmente son aquellos que han sido triturados y tamizados antes de ser usados. Existe dos fuentes principales de agregados procesados: la grava natural que es triturada para volverla más apropiada para pavimentos de mezclas asfálticas y los fragmentos de lechos de rocas y piedra grandes que deben ser reducidos en tamaño antes de ser usados en pavimentación.

1.1.4.3. Agregados sintéticos

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

1.1.4.3.1. Agregado Grueso

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

- Debe estar limpio y no debe tener más del 8 % de su peso de trozos alargados o planos.
- El porcentaje de desgaste determinado no debe ser mayor del 35 % para las mezclas usadas como carpeta de rodamiento.

- No debe tener una pérdida de peso mayor del 12 % al ser sometido al ensayo de desgaste de magnesio, 5 ciclos AASHTO T 104, para las mezclas usadas como carpeta de rodamiento.
- En el momento de ser mezclado, el porcentaje de caras producidas por fractura determinado, debe ser mayor del 90 %.

1.1.4.3.2. Agregado fino

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

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

1.1.4.3.3. Polvo mineral

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

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

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

Fuente: elaboración propia.

1.1.5. **Ensayos físicos a los agregados**

Según el *Asphalt Institute* la producción de agregados consiste en excavar las capas de suelo (sobrecarga) encontradas sobre los depósitos de grava, trabajar los depósitos para obtener los agregados adecuados y separar en pilas las partículas de agregado. Los procedimientos para manejar y acopiar las reservas de agregado varían en los distintos lugares, debido a que la mayoría de las agencias contratantes no tienen especificaciones para dichos procedimientos. En vez de ello la agencia requiere, usualmente, que el contratista cumpla con las especificaciones de graduación de los agregados. Estas especificaciones tendrán que ser cumplidas, ya sea durante la elaboración o acopio de reservas del agregado, o cuando la mezcla de pavimento sea producida y colocada. El muestreo y las pruebas son los únicos medios de verificar si las especificaciones están siendo cumplidas, aún si estas requieren que el agregado cumpla con gradaciones durante la fabricación, acopio de reservas o producción de mezclas.

De acuerdo con el *Asphalt Institute* en un pavimento densamente gradado de mezclas asfálticas en caliente, el agregado conforma del 90 a 95 por ciento, en peso, de la mezcla de pavimentación. Esto hace que la calidad del agregado usado sea un factor crítico en el comportamiento de pavimentos. Un agregado

deberá poseer también ciertas propiedades para poder ser considerado apropiado para pavimento asfáltico de buena calidad. Estas propiedades son: gradación y tamaño máximo de la partícula, limpieza, dureza, forma de la partícula, textura de la superficie, capacidad de absorción, afinidad con el asfalto, peso específico

1.1.5.1. Gradación y tamaño máximo de la partícula

Todas las especificaciones de pavimento asfáltico de mezcla en caliente requieren que las partículas de agregado estén dentro de un cierto margen de tamaños y que cada tamaño de partículas esté en ciertas proporciones. Esta distribución de varios tamaños de partículas dentro del agregado es comúnmente llamada gradación del agregado o gradación de la mezcla. Es necesario entender cómo se mide el tamaño de partículas y gradación para determinar si el agregado cumple o no con las especificaciones.

1.1.5.2. Tamaño máximo nominal de la partícula

Designado como un tamiz más grande que el primer tamiz que retiene más del 10 por ciento de la partícula del agregado. Es una serie normal del tamiz.

1.1.5.3. Tamaño máximo de partículas

Designado como un tamiz más grande que el tamaño máximo nominal de partículas. Típicamente, es el tamiz más pequeño por el cual pasa el 100 por ciento de las partículas de agregados.

1.1.5.4. Granulometría del agregado

Es determinada por un análisis de tamices efectuado sobre las muestra de agregados. El análisis de tamices o granulometría consiste en pasar la muestra por una serie de tamices, cada uno de las cuales tiene abertura de un tamaño específico. Los tamices están denominados de acuerdo al tamaño de sus aberturas. Las partículas gruesas quedan atrapadas en los tamices superiores; las partículas de tamaño medio pasan a través de los tamices medianos; las partículas finas pasan a través de los tamices inferiores. La granulometría del agregado tiene en cuenta el porcentaje (en peso) total de la muestra que pasa por cada uno de los tamices. La granulometría es determinada al calcular el peso del contenido de cada tamiz. Luego se resta el peso del contenido de cada tamiz del peso total de la muestra. Ciertos términos son usado al hacer referencia a la fracciones de agregados con el propósito de ayudar a la descripción de las misma. Estos son:

- Agregado grueso (material retenido por el tamiz núm.8).
- Agregado fino (material que pasa el tamiz núm.8).
- Relleno mineral (fracción de agregados finos que pasan el tamiz núm.30).
- Polvo mineral (fracción de agregados finos que pasan el tamiz núm.200).
- Limpieza. Las especificaciones generalmente ponen un límite a los tipos y cantidades de materiales indeseables (vegetación, arcilla esquistosa, partículas blandas, terrones de arcilla, etcétera). El ensayo del equivalente de arena es un método para determinar la proporción indeseable de polvo fino y arcilla en la fracción (porción) de agregado que pasa el tamiz (núm.4).
- Dureza. Los agregados deben ser capaces de resistir la abrasión (desgaste irreversible) y degradación durante la producción, colocación y

- compactación de la mezcla de pavimentación; así como durante la vida de servicio del pavimento. Los agregados que están en la superficie o más cerca de ella deben ser más duros (tener más resistencia) que los agregados usados en las capas inferiores de la estructura de pavimento.
- Forma de la partícula. Afecta la manejabilidad de la mezcla de pavimentación durante su colocación, así como la cantidad de fuerza necesaria para compactar la mezcla a la densidad requerida. La forma de la partícula también afecta a la resistencia de la estructura durante su vida.
 - Textura superficial. La textura superficial de las partículas de agregado es otro factor que determina, no solo la manejabilidad y resistencia final de la mezcla de pavimentación, sino también las características de la resistencia al deslizamiento en la superficie del pavimento.
 - Capacidad de absorción. Todos los agregados son porosos, y algunos más que otros. La cantidad de líquido que un agregado absorbe cuando es sumergido en un baño determina su porosidad.
 - Afinidad por el asfalto. Es la tendencia del agregado a aceptar y retener una capa de asfalto.
 - Peso específico. El peso específico de un agregado es la proporción entre el peso de un volumen dado de agregado y el peso de un volumen igual de agua.

1.1.6. Asfaltos

Según la ASTM se define como betún o bitumen a las “mezclas de hidrocarburos de origen natural o pirógeno, o de ambos tipos, frecuentemente acompañadas por sus derivados no metálicos, los cuales pueden ser gaseosos, líquidos, semi-sólidos y que son completamente solubles en bisulfuro de

carbón¹. Los betunes o bitúmenes empleados en la construcción de carreteras son de dos tipos a saber: asfaltos y alquitranes. El asfalto es un material aglomerante de color que varía de pardo oscuro a negro; de consistencia sólida, semisólida o líquida, cuyos constituyentes predominantes son betunes que se dan en la naturaleza o que se obtienen en la destilación del petróleo, y el cual entra en proporciones variables en la constitución de la mayor parte de los crudos de petróleo. El asfalto es un producto cuyo empleo data de la antigüedad y fue usado de muchas formas en Mesopotamia, Siria, Egipto, entre otros, con fines de impermeabilización, mastic de unión entre los elementos de construcción, momificación, entre otros. Incluso reservorios y piscinas fueron impermeabilizados con asfalto.

La ASTM define a los asfaltos como “materiales aglomerantes sólidos o semisólidos de color que varía de negro a pardo oscuro y que se licuan gradualmente al calentarse, cuyos constituyentes predominantes son betunes que se dan en la naturaleza en forma sólida o semisólida o se obtienen de la destilación del petróleo, o bien, combinaciones de estos entre sí o con el petróleo o productos derivados de estas combinaciones.

Según el *Asphalt Institute* el asfalto es un material negro, cementante, que varía ampliamente en consistencia, entre sólido y semisólido (sólido blando), a temperaturas ambientales normales. Cuando se calienta lo suficiente, el asfalto se ablanda y se vuelve líquido, lo cual le permite cubrir las partículas de agregado durante la producción de mezcla en caliente. Durante el primer proceso de separación, en la mayoría de las refinerías, se obtienen cinco productos que pueden ser clasificados como sigue:

¹ American Society for Testing and Materials. *Test method for resistance of plastic flow of bituminous mixtures using Marshall Apparatus* ASTM D1559. EUA: ASTM, 2001. 4 p

- Base parafínica. Aquellos en los cuales el material restante, después de la destilación de los constituyentes más volátiles, es principalmente parafina.
- Base asfáltica. La porción pesada del asfalto. En su porción más pesada presenta una mezcla de parafina y asfalto. En pavimentación los asfaltos comúnmente usados son los cementos asfálticos y los asfaltos líquidos.

1.1.7. Ensayos físicos a la mezcla asfáltica

A continuación se presentan los ensayos físicos a la mezcla asfáltica.

1.1.7.1. Viscosidad

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

A una temperatura de 60 °C es necesario aplicar un vacío parcial al extremo pequeño del tubo para pasar el asfalto a través del mismo, debido a que el cemento asfáltico es muy viscoso y no puede fluir fácilmente a través de la estrecha abertura del tubo capilar. El tiempo que el asfalto toma para pasar de una marca a otra del tubo es registrado a medida que este comienza a fluir. Este tiempo es convertido fácilmente a poises, siendo la unidad normal de medida para viscosidad de asfaltos. El ensayo de viscosidad a 135 °C es similar al ensayo descrito anteriormente; sin embargo, debe haber ciertas variaciones debido a que la temperatura es más alta. En primer lugar, es necesario usar un aceite claro en el baño con temperatura controlada debido a que el agua se evaporaría a 135 °C. En segundo lugar, se utiliza un viscosímetro que no requiera de la aplicación de vacío debido a que el cemento asfáltico posee suficiente fluidez a 135 °C. Por último, la medida de viscosidad utilizada se convierte a centistokes en vez de noises debido que el flujo a través del tubo es inducido por gravedad y no por vacíos.

1.1.7.2. Penetración

El ensayo de penetración es otra medida de consistencia. La prueba está incluida en las especificaciones basadas en viscosidad para impedir que sean usados los cementos asfálticos que tengan valores inapropiados de penetración a 25 °C. La prueba normal de penetración consiste, como primera medida, en estabilizar una muestra de cemento asfáltico a una temperatura de 25 °C en un baño de agua a temperatura controlada. Seguidamente, una aguja de dimensiones prescritas se coloca sobre la superficie de la muestra bajo una carga de 100 gramos y por un tiempo exacto de 5 segundos. La distancia que la aguja penetra en el cemento asfáltico es registrada en unidades de 0,1 mm. La cantidad de estas unidades es llamada la “penetración” de la muestra.

1.1.7.3. Punto de inflamación

El punto de inflamación de un cemento asfáltico es la temperatura más baja a la cual se separan materiales volátiles de la muestra y crean un “destello” en presencia de una llama abierta. El punto de inflamación no debe ser confundido con el punto de combustión, el cual es la temperatura más baja a la cual el cemento asfáltico se inflama y se quema. El punto de inflamación consiste en la combustión instantánea de las fracciones volátiles que se están separando del asfalto. El punto de inflamación de un cemento asfáltico se determina para identificar la temperatura máxima a la cual este puede ser manejado y almacenado sin peligro de que se inflame. Esta información es muy importante debido a que el cemento asfáltico es generalmente calentado en su almacenaje con el fin de mantener una viscosidad lo suficientemente baja para que el material pueda ser bombeado.

El procedimiento básico para determinar el punto de inflamación consiste en calentar, gradualmente, una muestra de cemento asfáltico en una copa de latón mientras se está aplicando una pequeña llama sobre la superficie de la muestra. La temperatura a la cual se presentan destellos instantáneos de vapores sobre la superficie se denomina punto de inflamación. El ensayo de copia abierta de Cleveland es el procedimiento más comúnmente utilizado para determinar el punto de inflamación.

1.1.7.4. Ductilidad

La ductilidad es una medida de cuanto puede ser estirada una muestra de asfalto antes de que se rompa en dos. La ductilidad es medida mediante una prueba de “extensión”, en donde una probeta de cemento asfáltico es extendida o estirada a una velocidad y temperatura específica. El estiramiento continúa

hasta que el hilo de cemento asfáltico se rompa. La longitud del hilo del material en el momento del corte se mide en centímetros y se denomina la ductilidad de la muestra.

1.1.7.5. Solubilidad

El ensayo de solubilidad es un procedimiento para medir la pureza de un cemento asfáltico. Una muestra es sumergida en un solvente (tricloroetileno) en donde se disuelven sus componentes cementantes activos. Las impurezas como las sales, el carbono libre, y los contaminantes inorgánicos, no se disuelven sino que se depositan en forma de partícula. Estas impurezas insolubles son luego filtradas fuera de la solución y medidas como una proporción de la muestra original.

Las cantidades óptimas de cada ensayo destacado anteriormente se encuentran tabuladas en una tabla según el Reglamento técnico centroamericano.

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

CARACTERÍSTICA	UNIDADES	MÉTODO ASTM	Grado de viscosidad		
			AC-20	AC-30	AC-40
Viscosidad, 60 °C	N s/m ²	D-2170	2000 ± 400	3000 ± 600	4000 ± 800
Viscosidad, 135 °C, mínimo	mm ² /s	D-2170	300	350	400
Penetración, 25 °C, 100g, 5s, mínimo	1/10 mm	D-5	60	50	40
Punto de inflamación, Cleveland Copa Abierta, mínimo	°C	D-90	232	232	232
Solubilidad en tricloroetileno, mínimo	%	D-2042	99	99	99
Pruebas sobre residuo del ensayo de horno sobre película delgada:		D-1754			
Viscosidad, 60 °C, máximox	N s/m ²	D-2171	10 000	15 000	20 000
Ductibilidad, 25 °C, 5 cm/min, mínimo	cm	D-113	50	40	25

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

1.1.8. Mezclas asfálticas

Las mezclas asfálticas en frío son elaboradas, extendidas y compactadas en frío tanto en plantas como en el sitio donde se deseen colocar. Requieren de un curado para que liberen la volatilidad. Este tipo de mezcla solo es utilizado en vías secundarias o de poca importancia. Se dividen en arena asfalto en frío y emulsiones. Una mezcla en caliente de pavimento asfáltico consiste en una mezcla uniforme de asfalto y agregado caliente. Es el tipo de mezcla de mayor protección para bases flexibles, colocadas en caliente.

Poseen una gran resistencia estructural y debidamente diseñadas y compactadas son mucho menos penetrables por el agua que las mezclas asfálticas en frío, por lo tanto son apropiadas para todos los tipos de tráfico. De acuerdo con el *Asphalt Institute*, en una mezcla asfáltica en caliente de pavimentación el asfalto y el agregado son combinados en proporciones exactas. Las proporciones relativas de estos materiales determinan las propiedades físicas de la mezcla y, eventualmente, el desempeño de la misma como pavimento terminado. Se dividen en arena asfalto en caliente y en concretos asfálticos. De acuerdo con Charlie Betances, los concretos asfálticos consisten en una o varias capas compactadas de una mezcla de agregados minerales y cemento asfáltico, producido en las plantas destinadas a este fin, o bien, en la vía.

Este tipo de concreto asfáltico se puede emplear como capa de rodamiento para tráfico liviano, mediano o pesado. Existen diferentes tipos de concretos asfálticos, y estas van desde las mezclas Tipo I hasta las mezclas Tipo X, entre de las cuales las más utilizadas en las vías locales son las llamadas mezclas Tipo III y IV. En cualquier tipo de mezcla asfáltica, los materiales de pavimentación deben cumplir con ciertas especificaciones para

que las mismas sean óptimas y cumplan con el reglamento de Especificaciones Generales Para La Construcción de Carreteras y Puentes de la Dirección General de Caminos.

Según el *Asphalt Institute* una muestra de mezcla de pavimentación preparada en el laboratorio puede ser analizada para determinar su posible desempeño en la estructura de pavimento. El análisis está enfocado hacia cuatro características de la mezcla y la influencia que estas puedan tener en el comportamiento de la mezcla.

1.1.9. Ensayos físicos a la mezcla asfáltica

A continuación, se presentan los ensayos físicos a la mezcla asfáltica.

1.1.9.1. Densidad de la mezcla

La densidad de la mezcla compactada está definida como su peso unitario (el peso de un volumen específico de la mezcla). La densidad es una característica muy importante, debido a que es esencial tener una alta densidad en el pavimento terminado para obtener un rendimiento duradero.

1.1.9.2. Vacíos de aire, o simplemente vacíos

Son espacios pequeños de aire, o bolsas de aire, que están presentes entre los agregados revestidos en la mezcla final compactada. Es necesario que todas las mezclas densamente gradadas contengan cierto porcentaje de vacíos para permitir alguna compactación adicional bajo el tráfico y proporcionar espacios a donde pueda fluir el asfalto durante esa compactación adicional. El porcentaje permitido de vacíos para capas de base y capas superficiales está

entre 3 y 5 por ciento, dependiendo del diseño específico. La durabilidad de un pavimento asfáltico es función del contenido de vacíos. La razón de esto es que entre menor sea la cantidad de vacíos, menor va a ser la permeabilidad de la mezcla. Un contenido demasiado alto de vacíos proporciona pasajes, a través de la mezcla, por los cuales puede entrar el agua y el aire y causar deterioro. Por otro lado, un contenido demasiado bajo de vacíos puede producir exudación de asfalto; una condición en donde el exceso de asfalto es exprimido fuera de la mezcla hacia la superficie. La densidad y el contenido de vacíos están directamente relacionados. Entre más alta la densidad, menor es el porcentaje de vacíos de la mezcla, y viceversa. Las especificaciones de la obra requieren, usualmente, una densidad que permita acomodar el número posible (en la realidad) de vacíos; preferiblemente menos del 8 por ciento.

1.1.9.3. Vacíos en el agregado mineral

Los vacíos en el agregado mineral (VMA) son los espacios de aire que existen entre las partículas de agregado en una mezcla compactada de pavimentación, incluyendo los espacios que están llenos de asfalto. El VMA representa el espacio disponible para acomodar el volumen efectivo del asfalto, (todo el asfalto menos la porción que se pierde, por absorción, en el agregado), y el volumen de vacíos necesario en la mezcla. Cuanto mayor sea el VMA, más espacio habrá disponible para las películas de asfalto. Existen valores mínimos para VMA los cuales están recomendados y especificados como función del tamaño del agregado. Estos valores se basan en el hecho de que mientras más gruesa sea la película de asfalto que cubre las partículas de agregado, más durable será la mezcla. Para que pueda lograrse un espesor durable de película de asfalto, se deben tener los valores mínimos de VMA. Un aumento en la densidad de la graduación del agregado, hasta el punto donde se obtengan valores de VMA por debajo del mínimo especificado, puede resultar en películas

delgadas de asfalto y en mezclas de baja durabilidad y apariencia seca. Por lo tanto, es contraproducente y perjudicial para la calidad del pavimento disminuir el VMA para economizar en el contenido de asfalto.

1.1.9.4. Contenido de asfalto

La proporción de asfalto es importante y debe ser determinada exactamente en el laboratorio y luego controlada con precisión en las plantas y en obra. El contenido de asfalto de una mezcla particular se establece usando criterios dictados por el método de diseño seleccionado. El contenido óptimo de una mezcla depende, en gran parte, de las características del agregado, tales como la granulometría y la capacidad de absorción. La granulometría del agregado está directamente relacionada con el contenido óptimo de asfalto. Entre más finos contenga la graduación de la mezcla, mayor será el área superficial total, y mayor será la cantidad de asfalto requerida para cubrir uniformemente todas las partículas. Por otro lado, las mezclas más gruesas exigen menos asfalto debido a que poseen menos área superficial total.

1.1.9.5. Calidad

Según Rothery, la calidad es un propósito conveniente. Es satisfacer los requerimientos. Es el producto diseñado y elaborado para cumplir con sus funciones de manera apropiada. Los materiales de pavimentación se consideran de calidad cuando cumplen con las especificaciones dadas por las normas. Entre las normas utilizadas para dichos materiales se encuentran: AASHTO, ASTM.

Para comprobar la calidad de los materiales de pavimentación se deben realizar diversos ensayos establecidos según las normas mencionadas. Entre

estos se puede nombrar: granulometría, equivalente de arena, peso específico, desgaste de los ángeles, estabilidad, fluencia, densidad, porcentaje de vacíos, porcentaje de asfalto, caras fracturadas. Según el Asphalt Institute la granulometría es determinada por un análisis de tamices efectuado sobre las muestras de agregado. El análisis consiste en pasar la muestra por una serie de tamices, cada uno de los cuales tiene aberturas de un tamaño específico. El ensayo de equivalente de arena es un método para determinar la proporción indeseable de polvo fino y arcilla en la fracción de agregado que pasa por el tamiz número cuatro (4,75 mm). El peso específico de un agregado es la proporción entre el peso de un volumen dado y el peso de un volumen igual de agua. Esta es una forma de expresar las características de peso y volumen de los materiales. Son especialmente importantes en la producción de mezclas de pavimentación debido a que el agregado y el asfalto son proporcionados, en la mezcla, con respecto al peso. Con este ensayo también se obtiene el porcentaje de absorción, el cual indica la capacidad de absorción del agregado grueso y fino. El ensayo de estabilidad está dirigido a medir la resistencia a la deformación de la mezcla. El valor de estabilidad Marshall es una medida de la carga bajo la cual una probeta se deforma o falla totalmente. La fluencia mide la deformación, bajo la carga, que ocurre en la mezcla.

1.1.9.6. Durabilidad

Es la habilidad de una mezcla asfáltica de resistir la desintegración ocasionada por los agentes atmosféricos y por los esfuerzos abrasivos del tráfico. El factor más importante de esta propiedad es el asfalto el cual debe ser incorporado a la mezcla para proveer propiedades ligantes adecuadas que permitan resistir las fuerzas de tracción o abrasivas producidas por tráfico. Es la propiedad de la mezcla asfáltica que describe su capacidad para resistir los efectos perjudiciales del aire, del agua, de la temperatura y del tránsito que

pueden provocar envejecimiento del asfalto, desintegración del agregado y desprendimiento de la película de asfalto del agregado. Una buena mezcla asfáltica no debe sufrir envejecimiento excesivo durante la vida en servicio. Esta propiedad se relaciona con el espesor de la película de asfalto, y con los vacíos de aire.

1.1.9.7. Características de la durabilidad del asfalto

A continuación se presentan las características de la durabilidad del asfalto. .

1.1.9.7.1. Envejecimiento o endurecimiento

Se considera que la durabilidad de un asfalto es la resistencia a cambiar las propiedades cuando es sometido a procesamiento (mezclas con agregados) y a los agentes climáticos, y es manifestada por una resistencia al endurecimiento con el tiempo.

1.1.9.7.2. Oxidación

Es la reacción del oxígeno con el asfalto. La rata depende del carácter del asfalto y de la temperatura. A temperaturas normales la reacción del oxígeno con el asfalto es un proceso lento y el oxígeno es totalmente absorbido por el asfalto.

1.1.9.8. Volatilización

Es la evaporización de los constituyentes más livianos del asfalto, el cual, como ya se ha dicho es una mezcla de hidrocarburos. Al aumentar la temperatura se acelera este fenómeno; por eso el proceso de mezclado, donde una alta temperatura se combina con una violenta agitación, es una de las causas principales del endurecimiento del asfalto.

1.1.9.8.1. Polimerización

Es una combinación de moléculas para formar moléculas mayores. En el caso de los asfaltos esto es explicado como la combinación de hidrocarburos de peso molecular mayor. Este cambio puede ser detrimental, ya que tiende a hacer el asfalto frágil y por lo tanto más susceptible al agrietamiento. Según el Asphalt Instituto, estos factores pueden ser el resultado de la acción del clima, el tránsito, o una combinación de ambos. Generalmente, la durabilidad de una mezcla asfáltica puede ser mejorada de tres formas.

1.1.10. Diseño de mezcla

Las mezclas asfálticas han sido típicamente diseñadas con procedimientos empíricos de laboratorio, lo que significa que se requiere la experiencia en campo para determinar si el análisis de laboratorio tiene correlación con el desempeño del pavimento. De cualquier manera, aun con la correcta conjunción de estos procedimientos y el desarrollo del criterio de diseño de la mezcla, no se podían asegurar buenos grados de desempeño.

1.1.10.1. Metodología Marshall

De acuerdo con el *Asphalt Institute* el concepto del método Marshall en el diseño de mezclas para pavimentación fue formulado por Bruce Marshall, ingeniero de asfaltos del Departamento de Autopistas del estado de Mississippi. El Cuerpo de Ingenieros de Estados Unidos, a través de una extensiva investigación y estudios de correlación, mejoró y adicionó ciertos aspectos al procedimiento de prueba Marshall, a la vez que desarrolló un criterio de diseño de mezclas.

El método original únicamente es aplicable a mezclas asfálticas en caliente para pavimentación que contengan agregados con un tamaño máximo de 25 mm (1") o menor. El método Marshall modificado se desarrolló para tamaños máximos arriba de 38 mm (1,5"), y está pensado para diseño en laboratorio y control en campo de mezclas asfálticas en caliente, con graduación densa. Debido a que la prueba de estabilidad es de naturaleza empírica, la importancia de los resultados en términos de estimar el comportamiento en campo se pierde cuando se realizan modificaciones a los procedimientos estándar. El método Marshall utiliza especímenes de prueba estándar de 64 mm (2 ½") de alto y 102 mm (4") de diámetro; se preparan mediante un procedimiento para calentar, combinar y compactar mezclas de asfalto- agregado (ASTM D1559).

Los dos aspectos principales del método Marshall son la densidad, el análisis de vacíos y la prueba de estabilidad y flujo de los especímenes compactados; cabe mencionar que este proceso de diseño no tiene especificadas pruebas para agregados minerales ni para cementos asfálticos.

1.1.10.1.1. Pruebas a las mezclas asfálticas compactadas

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

1.1.10.1.2. Determinación de la gravedad específica

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

1.1.10.1.3. Prueba de estabilidad y flujo.

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

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

1.1.10.1.4. Análisis de densidad de vacíos

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

1.2. Propiedades de los agregados que se utilizan en mezclas asfálticas en caliente (m.a.c)

Las buenas mezclas asfálticas en caliente trabajan bien debido a que son diseñadas, producidas y colocadas de tal manera que se logra obtener las propiedades deseadas. Hay varias propiedades que contribuyen a la buena calidad de pavimentos de mezclas en caliente. Estas incluyen la estabilidad, la durabilidad, la impermeabilidad, la manejabilidad, la flexibilidad, la resistencia a la fatiga y la resistencia al deslizamiento. El objetivo primordial del procedimiento de diseño de mezclar es el de garantizar que la mezcla de pavimentación posea cada una de estas propiedades. Por lo tanto, hay que saber que significa cada una de estas propiedades, cómo es evaluada, y que representa en términos de rendimiento del pavimento.

1.3. Generalidades

A continuación se presentan las generalidades que se contemplan en las mezclas asfálticas.

1.3.1. Definición de mezcla asfáltica

Las mezclas asfálticas, también reciben el nombre de aglomerados, están formadas por una combinación de agregados pétreos y un ligante hidrocarbonato, de manera que aquellos quedan cubiertos por una película continua de este. Se fabrican en unas centrales fijas o móviles, se transportan después a la obra y allí se extienden y se compactan.

Las mezclas asfálticas se utilizan en la construcción de carreteras, aeropuertos, y pavimentos industriales, entre otros. Sin olvidar que se utilizan en las capas inferiores de los firmes para tráfico pesados intensos. Las

mezclas asfálticas están constituidas aproximadamente por un 90 % de agregados pétreos grueso y fino, un 5 % de polvo mineral (filler) y otro 5 % de ligante asfáltico. Los componentes mencionados anteriormente son de gran importancia para el correcto funcionamiento del pavimento y la falta de calidad en alguno de ellos afecta el conjunto. El ligante asfáltico y el polvo mineral son los dos elementos que más influyen tanto en la calidad de la mezcla asfáltica como en su costo total.

1.3.2. Clasificación de las mezclas asfálticas

Existen varios parámetros de clasificación para establecer las diferencias entre las distintas mezclas y las clasificaciones pueden ser diversas:

1.3.2.1. Por fracciones de agregado pétreo empleado

- Masilla asfáltica: Polvo mineral más ligante
- Mortero asfáltico: Agregado fino más masilla
- Concreto asfáltico: Agregado grueso más mortero
- Macadam asfáltico: Agregado grueso más ligante asfáltico

1.3.2.2. Por la temperatura puesta en obra

A continuación se presentan por la temperatura puesta en obra y su clasificación respectiva.

1.3.2.2.1. Mezclas asfálticas en caliente

Se fabrican con asfaltos a unas temperaturas elevadas, en el rango de los 150 grados centígrados, según la viscosidad del ligante. Se calientan también los agregados para que el asfalto no se enfríe al entrar en contacto con ellos. La puesta en obra se realiza a temperaturas muy superiores a la ambiente, pues en caso contrario estos materiales no pueden extenderse y menos aún compactarse adecuadamente.

1.3.2.2.2. Mezclas asfálticas en frío

El ligante suele ser una emulsión asfáltica (debido a que se siguen utilizando en algunos lugares los asfaltos fluidificados), y la puesta en obra se realiza a temperatura ambiente.

1.3.2.2.3. Por la proporción de vacíos en la mezcla asfáltica

Este parámetro suele ser imprescindible para que no se produzcan deformaciones plásticas como consecuencia del paso de las cargas y de las variaciones térmicas.

- Mezclas cerradas o densas: La proporción de vacíos no supera el 6 %.
- Mezclas semicerradas o Semidensas: La proporción de vacíos está entre el 6 % y el 10 %.
- Mezclas abiertas: La proporción de vacíos supera el 12 %.

- Mezclas porosas o drenantes: la proporción de vacíos es superior al 20 %.

1.3.2.3. Por el tamaño máximo del agregado pétreo

Mezclas gruesas: donde el tamaño máximo del agregado pétreo excede los 10 mm.

1.3.3. Evolución de los diseños de mezclas asfálticas en caliente

A continuación se presenta la evolución de los métodos de diseños de mezclas asfálticas en caliente

1.3.3.1. The Hubbard-Field (1920)

Método de diseño de mezclas asfálticas, fue uno de los primeros métodos en evaluar contenidos de vacíos en la mezcla y en el agregado mineral. Usaba una estabilidad como prueba para medir la deformación. Funcionó adecuadamente para evaluar mezclas con agregado pequeño o granulometrías finas, pero no así para mezclas con granulometrías que contenían agregados grandes.

1.3.3.2. Método Marshall (1930's)

Método de diseño de mezclas asfálticas desarrollado durante la Segunda Guerra Mundial y adaptado posteriormente para su uso en carreteras. Utiliza una estabilidad y porcentaje de vacíos como pruebas fundamentalmente.

Excepto cambios en las especificaciones, el método no ha sufrido modificación desde los años cuarenta.

1.3.3.3. Método Hveem (1930)

Método de diseño de mezclas asfálticas, desarrollado casi en el mismo tiempo que el método Marshall. Evalúa una estabilidad pseudotriaxial.

1.3.3.4. Método de la *Western Association of State Highway on Transportation Officials, WASHTO* (1984)

Este método de diseño de mezclas recomendó cambios en los requerimientos del material y especificaciones de diseño de mezclas para mejorar la resistencia del carril.

1.3.3.5. Método de *Asphalt Aggregate Mixture Analysis System. AAMAS* (1987)

La necesidad de cambios en el diseño de mezclas fue reconocida. Tardaron dos años en desarrollar un nuevo proyecto para el diseño de mezclas, que incluía un nuevo método de compactación en laboratorio y la evaluación de las propiedades volumétricas, desarrollo de pruebas para identificar las deformaciones permanentes, grietas de fatiga y resistencia a las grietas a baja temperatura.

1.3.3.6. Método SUPERPAVE (1993)

El método AAMAS sirvió como punto de inicio del método SUPERPAVE, que contiene un nuevo diseño volumétrico completo de mezcla; con funcionamiento basado en predicción a través de modelos y métodos de ensayo en laboratorio, grietas por fatiga y grietas por baja temperatura. Los modelos de predicción de funcionamiento fueron completados satisfactoriamente hasta el año 2000. El diseño volumétrico de mezclas en el SUPERPAVE es actualmente implementado en varios estados de los EUA, debido a que ha sido reconocida una conexión entre las propiedades volumétricas de la mezcla asfáltica caliente y su correcto funcionamiento. Ha tenido buenos resultados y ahora la aceptación en el control de calidad ha sido cambiada a propiedades volumétricas. SUPERPAVE promete un funcionamiento basado en métodos o ensayos de laboratorio que pueden ser usados para identificar la resistencia a las deformaciones plásticas de los pavimentos.

1.3.4. Características de la mezcla (Método Marshall)

La mezcla asfáltica en caliente preparada en laboratorio debe ser analizada para determinar el desempeño posible en la estructura del pavimento. Determinando así las características principales y la influencia que estas tienen en el comportamiento de la mezcla. Dichas características se detallan a continuación:

1.3.4.1. Densidad

Está definida como su peso unitario, es decir, el peso de un volumen específico de mezcla compactada. La densidad es una característica importante para obtener un rendimiento duradero. Si la densidad es baja, la cantidad de

vacíos son mayores, por lo tanto, la mezcla compactada será vulnerable al agua. Si la densidad es alta la cantidad de vacíos es menor, el agua no entrará en su interior obteniéndose de esta manera una carpeta de rodadura más durable. La densidad de la muestra compactada se expresa en kilogramos por metro cúbico (kg/m^3) o libras por pie cúbico (lb/pie^3), es calculada al multiplicar la gravedad específica total de la mezcla por la densidad del agua ($1,000 \text{ kg/m}^3$ o $62,416 \text{ lb/pie}^3$). La densidad patrón obtenida en laboratorio se utiliza como referencia para determinar el grado de compactación del pavimento compactado en la obra es adecuada o no. Difícilmente en la compactación in-situ se obtiene la densidad patrón, por lo tanto las especificaciones permiten un porcentaje aceptable.

1.3.4.2. Vacíos de Aire

Están presentes entre los agregados revestidos de asfalto en la mezcla compactada y son pequeños espacios de aire, o bolsas de aire. Es de mucha importancia que las mezclas densamente graduadas contengan determinado porcentaje de vacíos, ya que estos permiten que el asfalto fluya durante la compactación adicional debido al tráfico. El porcentaje, en muestras elaboradas en laboratorio para capas de base y capas superficiales, debe estar entre 3 % y 5 %. La permeabilidad de una mezcla asfáltica tiene relación con la durabilidad de un pavimento asfáltico. A mayor permeabilidad, mayor contenido de vacíos; permitiendo pasajes a través de la mezcla del agua y el aire causando un deterioro irreversible a la carpeta asfáltica. Por otra parte, un contenido muy bajo de permeabilidad, es decir bajo contenido de vacíos, tiende a producir exudación de asfalto. La exudación consiste en que el exceso de asfalto es exprimido, o expulsado fuera de la mezcla hacia la superficie. La relación de la densidad y el contenido de vacíos demuestra que a mayor densidad menor porcentaje de vacíos y a menor densidad mayor porcentaje de vacíos en la

mezcla. En campo las especificaciones para la densidad requieren acomodar el menor número posible de vacíos inferior al 8 %.

1.3.4.3. Vacíos en el agregado mineral (VMA)

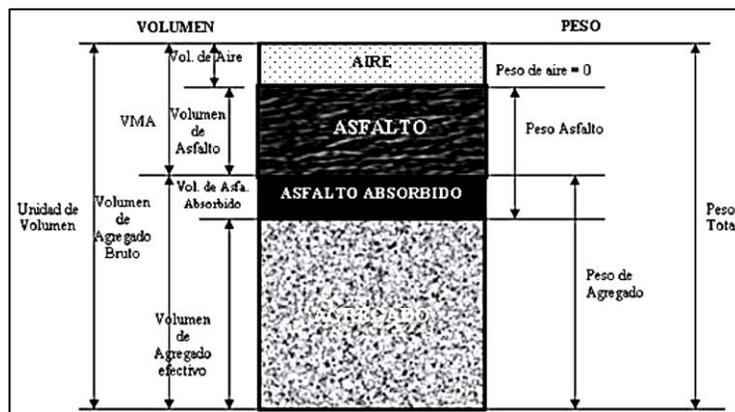
Estos son los espacios de aire que existen de entre las partículas de agregado y los espacios que están llenos de asfalto en una mezcla asfáltica compactada de pavimentación. Es decir el VMA es el espacio disponible para acomodar el volumen efectivo de asfalto y el volumen de vacíos necesarios en la mezcla. El volumen efectivo de asfalto es todo el asfalto menos la porción que se pierde, por absorción, en el agregado. Si el VMA es mayor, existirá más espacio para la película de asfalto. Hay que tener en cuenta que entre más gruesa sea la película de asfalto que cubre las partículas de agregado se obtiene mayor durabilidad de una mezcla. Por lo anteriormente descrito existen valores mínimos de VMA recomendados y especificados en función del tamaño del agregado. Puede resultar que para economizar el contenido de asfalto en un diseño de mezcla disminuyamos los valores de VMA establecidos como mínimos, siendo esto completamente perjudicial y dañino para la calidad de la carpeta asfáltica, obteniéndose películas delgadas de asfalto en el agregado y una mezcla de baja durabilidad y apariencia seca.

1.3.4.4. Contenido de asfalto

El contenido de asfalto de una mezcla en particular es establecido usando los criterios descritos por el método de diseño seleccionado. El contenido óptimo de asfalto de una mezcla depende en gran medida de su granulometría y la capacidad de absorción del agregado. La granulometría del agregado está directamente relacionada con el contenido óptimo de asfalto. Si en una granulometría el porcentaje de finos es considerablemente alto, el área

superficial total será mayor, requiriendo así mayor cantidad de asfalto para cubrir todas las partículas. Las mezclas gruesas exigen menos asfalto debido a que el área superficial total es menor. Si a la mezcla se le agregan pequeños incrementos de filler (fracciones muy finas de agregado que pasan a través del tamiz de 0,075 mm (No. 200), existe una tendencia a absorber la mayor parte del contenido de asfalto, resultando una mezcla inestable y seca. En caso contrario, al efectuar pequeñas disminuciones de filler nos da como resultado una mezcla muy rica (húmeda).

Figura 1. **Representación de la composición típica de una mezcla asfáltica**



Fuente: *Strategic Highway Research Program SHRP A-369*, 1994. 225 p.

Es así que los incrementos o disminuciones de filler causan cambios en las propiedades de la mezcla, llegando a variar de seca a húmeda. La capacidad de absorción del agregado en una mezcla es importante para determinar el contenido óptimo de asfalto. Técnicamente se habla de dos tipos de asfalto al referirse al asfalto absorbido y el no-absorbido: contenido total de asfalto y contenido efectivo de asfalto.

El contenido total de asfalto: cantidad de asfalto que debe ser adicionada a la mezcla para producir las cualidades deseadas en la mezcla. El contenido efectivo de asfalto: volumen de asfalto no absorbido por el agregado; es la cantidad de asfalto que forma una película ligante efectiva sobre las superficies de los agregados. El contenido efectivo de asfalto se obtiene al restar la cantidad absorbida de asfalto del contenido total del mismo. La capacidad de absorción de un agregado es, obviamente, una característica importante en la definición del contenido de asfalto de una mezcla.

1.3.4.5. Vacíos llenos de asfaltos (VFA)

Son el porcentaje de vacíos intergranulares entre las partículas de agregado (VMA) que se encuentran llenos de asfalto. El VMA abarca asfalto y aire, y por lo tanto, el VFA se calcula al restar los vacíos de aire del VMA, y luego dividiendo entre el VMA y expresando su valor como un porcentaje.

1.3.5. Propiedades de las mezclas asfálticas

Para obtener una mezcla de calidad, esta debe poseer las propiedades siguientes: estabilidad, durabilidad, flexibilidad, resistencia a la fatiga, resistencia al deslizamiento, impermeabilidad y manejabilidad .

1.3.5.1. Estabilidad

Es la capacidad de una mezcla asfáltica de resistir desplazamiento y deformación bajo las cargas impuestas por el tránsito. La carpeta asfáltica debe de ser capaz de mantener su forma y textura ante las secuencias de carga que a diario le son impuestas. La fricción interna depende de la textura superficial, graduación del agregado, forma de la partícula, densidad de la mezcla y del

contenido y tipo de asfalto. La estabilidad es función de la fricción y la resistencia interbloqueada del agregado en la mezcla. Cuando sobrepasamos el nivel óptimo de asfalto la película es demasiado gruesa y esto genera que la cohesión decrezca, resultando en pérdida de fricción entre las partículas que componen la mezcla asfáltica. Es importante que las partículas que componen el agregado sean angulares y ásperas en su textura superficial, esto dará una alta estabilidad a la mezcla.

1.3.5.2. Durabilidad

Es la propiedad de una mezcla asfáltica para resistir los efectos perjudiciales causados por el agua, aire, temperatura y las cargas debidas al tráfico. Estos efectos perjudiciales provocan desintegración del agregado, cambio en las propiedades del asfalto (polimerización y oxidación), envejecimiento, segregación, entre otros.

Puede mejorarse la durabilidad de una mezcla asfáltica de tres maneras:

- Utilizando un contenido óptimo de asfalto: se aumenta la durabilidad de la mezcla ya que las partículas del agregado están cubiertas por una película gruesa de asfalto. Esto evita el envejecimiento y el endurecimiento del asfalto, reteniendo por más tiempo las características originales tanto del asfalto como de los agregados.
- Utilizando una graduación densa: esto proporciona un contacto más cercano entre las partículas de agregado, mejorando así la impermeabilidad de la mezcla.
- Diseñando y compactando la mezcla para obtener la máxima impermeabilidad: esto se logra mediante la compactación por medios mecánicos utilizando maquinaria y equipo adecuado.

Tabla III. **Causas y efectos de la poca durabilidad**

Causas	Efectos en la carpeta
Bajo contenido de asfalto.	Endurecimiento rápido del asfalto y desintegración por pérdida de agregado.
Alto contenido de vacíos debido al diseño o a la falta de compactación.	Endurecimiento temprano del asfalto seguido por agrietamiento o desintegración.
Agregados susceptibles al agua (hidrofilitos).	Películas de asfalto se desprenden del agregado dejando una carpeta de rodadura desgastada o desintegrada

Fuente: Asphalt Institute. *Principios de Construcción de Pavimentos de Mezcla Asfáltica en Caliente*, MS 22. p. 125.

1.3.5.3. Flexibilidad

Es la capacidad de la carpeta asfáltica para acomodarse ligeramente, sin sufrir agrietamiento, soportando los movimientos graduales y asentamientos de la base y sub-base. Los asentamientos en el pavimento pueden ocurrir debido a que falle cualquiera de sus componentes provocando daños visibles en la carpeta de rodadura. De hecho, todas las estructuras tienden a tener asentamientos diferenciales. La flexibilidad de las mezclas asfálticas es incrementada agregando mayor contenido de asfalto, hasta llegar al contenido óptimo; a partir de este, si se aumenta en exceso el contenido de asfalto la carpeta tiende a ser extremadamente flexible y provoca entonces una mezcla con estabilidad baja. Algunas veces los requerimientos de flexibilidad entran en conflicto con los requisitos de estabilidad, de tal manera que se debe buscar el equilibrio de los mismos. Una mezcla de granulometría abierta con alto

contenido de asfalto es, generalmente, más flexible que una mezcla densamente graduada de bajo contenido de asfalto.

1.3.5.4. Resistencia a la fatiga

Es la capacidad de un pavimento asfáltico para resistir la flexión repetida causada por las cargas de tránsito. Si el porcentaje de vacíos en la mezcla asfáltica aumenta, ya sea por diseño o por falta de compactación, la resistencia a la fatiga del pavimento disminuye. Por tal razón, las mezclas asfálticas de graduación densa presentan mayor resistencia a la fatiga que las mezclas asfálticas de graduaciones abiertas. El envejecimiento y endurecimiento del asfalto en la carpeta de rodadura da como resultado menor resistencia a la fatiga. Las características de resistencia y espesor de un pavimento, y la capacidad de soporte de la subrasante, influyen determinantemente en la vida útil de una carpeta de rodadura asfáltica. Si la carpeta asfáltica presenta buena resistencia a la fatiga y la sub-base está mal compactada, se verán claramente los asentamientos y la resistencia a la fatiga disminuye considerablemente. En caso contrario, si la sub-base está bien compactada y la carpeta asfáltica presenta mala resistencia a la fatiga la carpeta se dañará. Por lo anterior, el pavimento debe trabajar en conjunto para que pueda resistir la flexión causada por el tránsito.

1.3.5.5. Resistencia al deslizamiento

Es la habilidad de una carpeta asfáltica, particularmente cuando esta mojada, de minimizar el deslizamiento o resbalamiento de las ruedas de los vehículos. Esto implica que el neumático debe mantenerse en contacto con las partículas del agregado y no sobre una película de agua en la superficie del pavimento, conocido como hidropilaje. Una buena resistencia al deslizamiento

lo constituyen agregados con textura áspera y contenidos adecuados de asfalto. Los contenidos altos de asfalto producen mezclas inestables, las cuales tienden a deformarse y exudar, generando así, mayor deslizamiento.

Tabla IV. **Causas y efectos de la poca resistencia al deslizamiento**

Causas	Efectos en la carpeta
Exceso de asfalto.	Exudación, poca resistencia al deslizamiento.
Agregado mal graduado o con mala textura.	Carpeta asfáltica lisa, posibilidad de hidroneo.
Agregado canto rodado, textura lisa.	Poca resistencia al deslizamiento.

Fuente: Asphalt Institute. *Principios de Construcción de Mezcla Asfáltica en Caliente*, MS 22. p. 125.

1.3.5.6. Impermeabilidad

Es la resistencia de una carpeta asfáltica al paso del aire y agua hacia su interior o a través de él. El contenido de vacíos puede ser una indicación a la susceptibilidad de una mezcla compactada al paso del agua y el aire.

Tabla V. **Causas y efectos de mezcla demasiado permeable**

Causas	Efectos en la carpeta
Bajo contenido de asfalto.	Las películas delgadas de asfalto causarán tempranamente un envejecimiento y una desintegración de la mezcla.
Alto contenido de vacíos en la mezcla de diseño.	El agua y el aire pueden entrar fácilmente en la carpeta asfáltica, causando oxidación y desintegración de la mezcla.
Compactación inadecuada.	Resultará en vacíos altos en la carpeta asfáltica, lo cual conducirá a infiltración de agua y baja estabilidad.

Fuente: Asphalt Institute. *Principios de Construcción de Mezcla Asfáltica en Caliente*, MS 22. p. 126.

1.3.5.7. Trabajabilidad

Es la facilidad con la cual una mezcla asfáltica puede ser colocada y compactada. Las mezclas que poseen buena trabajabilidad son fáciles de colocar y compactar; aquellas con mala trabajabilidad son difíciles de colocar y compactar. Las mezclas gruesas (mezclas que contienen un alto porcentaje de agregado grueso) tienen una tendencia a segregarse durante su manejo, y también pueden ser difíciles de compactar. El asfalto no es la principal causa de los problemas de trabajabilidad, pero sí tiene algún efecto sobre esta propiedad.

Tabla VI. **Causas y efectos de la mala trabajabilidad**

Causas	Efectos en la carpeta
Tamaño máximo de partícula: grande.	Superficie áspera, difícil de compactar.
Demasiado agregado grueso.	Puede ser difícil de compactar.
Temperatura muy baja de mezcla.	Agregado sin revestir, mezcla poco durable; superficie áspera, difícil de compactar.
Demasiada arena de tamaño medio.	La mezcla se desplaza bajo la compactadora y permanece tierna o blanda.
Bajo contenido de relleno mineral.	Mezcla tierna, altamente permeable.
Alto contenido de relleno mineral.	Mezcla muy viscosa, difícil de manejar; poco durable.

Fuente: Asphalt Institute. *Principios de Construcción de Mezcla Asfáltica en Caliente*, MS 22.
p. 129.

Debido a que la temperatura de la mezcla afecta la viscosidad del asfalto, una temperatura demasiado baja hará que la mezcla sea poco trabajable, mientras que una temperatura demasiado alta podrá hacer que la mezcla se vuelva tierna. El grado y el porcentaje de asfalto también pueden afectar la trabajabilidad de la mezcla.

1.4. Método de diseño Marshall

A continuación, se presenta el método de diseño Marshall y sus respectivas metodologías.

1.4.1. Metodología

El concepto del método Marshall para diseño de mezclas asfálticas fue formulado por Bruce Marshall, ingeniero de asfaltos del Departamento de Autopistas del estado de Mississippi. El cuerpo de ingenieros de Estados Unidos, a través de una extensiva investigación y estudios de correlación, mejoró y adicionó ciertos aspectos al procedimiento de prueba Marshall y desarrolló un criterio de diseño de mezclas.

1.4.2. Propósito de la metodología

El propósito del método Marshall es determinar el contenido óptimo de asfalto para una combinación específica de agregados. El método también provee información sobre propiedades de la mezcla asfáltica en caliente, y establece densidades y contenidos óptimos de vacío que deben ser cumplidos durante la elaboración de la mezcla. El método original de Marshall solo es aplicable a mezclas asfálticas en caliente que contengan agregados con un tamaño máximo de 25 mm (1 pulg) o menor. El método puede ser usado tanto para el diseño en laboratorio, como para el control de campo de mezclas asfálticas en caliente.

1.4.3. Descripción general

El método Marshall usa muestras de ensayo (probetas) de 64 mm (2,5 pulg) de espesor por 102 mm (4 pulg) de diámetro. Una serie de muestras de ensayo, cada una con la misma combinación de agregados pero con diferentes contenidos de asfalto, es preparada usando un procedimiento específico para calentar, mezclar y compactar la mezcla asfáltica. Los dos aspectos principales del método de diseño son: el análisis de densidad-vacíos y el ensayo de estabilidad y flujo de los especímenes compactados. La selección de una curva granulométrica para el diseño de una mezcla asfáltica cerrada o densa está en función de dos parámetros: el tamaño máximo nominal del agregado y el de las líneas de control (superior e inferior). Las líneas de control son puntos de paso obligado para la curva granulométrica. La tabla 4.5 presenta los tamaños máximos nominales más utilizados, así como sus líneas de control de acuerdo con la ASTM D 3515.

1.4.4. Especificaciones de la metodología

La selección del contenido óptimo de asfalto depende de muchos criterios que se discutirán en este capítulo. Un punto inicial para el diseño es escoger el porcentaje de asfalto para el promedio de los límites de vacíos de aire, el cual es 4 %. El rango de vacíos de aire es de 3 % al 5 %. Todas las propiedades medidas y calculadas bajo este contenido de asfalto deberán ser evaluadas comparándolas con los criterios para el diseño de mezclas (tabla VII). Si todos los criterios se cumplen, entonces se tendrá el diseño preliminar de la mezcla asfáltica, en caso de que un criterio no se cumpla se necesitará hacer ajustes, o rediseñar la mezcla.

Tabla VII. **Criterios del Instituto del Asfalto para el diseño Marshall**

CRITERIOS PARA MEZCLA DEL MÉTODO MARSHALL	TRÁNSITO LIVIANO CARPETA Y BASE		TRÁNSITO MEDIANO CARPETA Y BASE		TRÁNSITO PESADO CARPETA Y BASE	
	MÍNIMO	MÁXIMO	MINIMO	MAXIMO	MINIMO	MAXIMO
Compactación, numero de golpes en cada cara de la probeta	35	35	50	50	75	75
Estabilidad N(lb)	336 (750)	-	5 358 (1 200)	-	8 006 (1 800)	-
Flujo, 0,25mm (0,01pulg)	8	18	8	16	8	14
% de vacíos	3	5	3	5	3	5
% VMA	Ver Tabla VIII					
% VFA	70	80	65	78	65	75

NOTAS

¹Todos los criterios y no solo estabilidad, deben ser considerados al diseñar una mezcla asfáltica de pavimentación. Las mezclas asfálticas en caliente de base que no cumplan estos criterios, cuando se ensayen a 60 °C, se consideraran satisfactorias si cumplen los criterios cuando se ensayen a 38 °C, y si se colocan a 100 mm o más por debajo de la superficie. Esta recomendación se aplica solamente a las regiones que tengan una variedad de condiciones climáticas similar a la que prevalece en casi todas las regiones de Estados Unidos. En las regiones que tengan condiciones climáticas mas extremas puede ser necesario usar temperaturas mas bajas de ensayo.

² **Clasificaciones del Transito**

- Liviano Condiciones de transito que resultan en un ESAL de diseño < 104
- Mediano Condiciones de transito que resultan en un ESAL de diseño entre 104 y 106
- Pesado Condiciones de transito que resultan en un ESAL de diseño > 106

³ Los esfuerzos de compactación en el laboratorio deberán aproximarse a la densidad máxima obtenida en el pavimento bajo el transito.

⁴ Los valores de fluencia se refieren al punto en donde la carga comienza a disminuir.

⁵ Cuando se esté calculando el porcentaje de vacíos, deberá permitirse cierta tolerancia en la porción de cemento asfáltico perdida por absorción en las partículas de agregado.

⁶ El porcentaje de vacíos en el agregado mineral debe ser calculado con base en el peso específico total ASTM del agregado.

Fuente: Asphalt Institute. *Principios de Construcción de Pavimentos de Mezcla Asfáltica en Caliente*, MS 22. p. 128.

Tabla VIII. **Porcentaje mínimo de VMA**

TAMAÑO MÁXIMO EN MM PORCENTAJE		VMA MÍNIMO, POR CIENTO		
		Vacíos de diseño, por ciento ³		
mm	pulg	3,0	4,0	5,0
1,18	No. 16	21,5	22,5	23,5
2,36	No. 8	19,0	20,0	21,0
4,75	No. 4	16,0	17,0	18,0
9,5	3/8	14,0	15,0	16,0
12,5	1/2	13,0	14,0	15,0
19,0	3/4	12,0	13,0	14,0
25,0	1,0	11,0	12,0	13,0
37,5	1,5	10,0	11,0	12,0
50,0	2,0	9,5	10,5	11,5
63,0	2,5	9,0	10,0	11,0

¹ Especificación Normal para Tamaño de Tamices usados en Pruebas AASHTO M 92 (ASTM E 11).

² El tamaño máximo nominal de la partícula es un tamaño mas grande que el primer tamiz que retiene mas del 10% del material.

³ Interpole el VMA mínimo para los valores de vacíos de diseño que se encuentren entre los que están listados.

Fuente: Asphalt Institute. *Tomada de Principios de Construcción de Pavimentos de Mezcla Asfáltica en Caliente*, MS 22. p. 128.

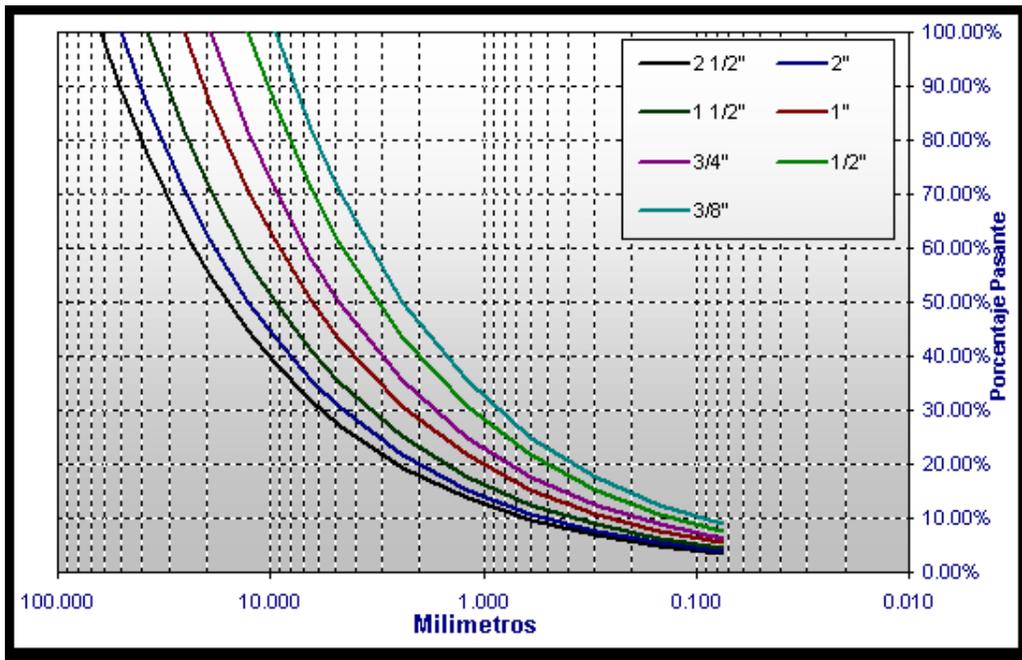
1.4.5. **Evaluación y ajustes de una mezcla de diseño**

Cuando se desarrolla una mezcla de diseño es necesario hacer varias mezclas de prueba para encontrar una que cumpla con todos los criterios de diseño. Cada una de las mezclas de prueba sirve como una guía para evaluar y ajustar las pruebas siguientes. Para diseño de mezclas preliminares o exploratorias es aconsejable comenzar con una graduación de agregado que se acerque a la media de los límites establecidos. Las mezclas de prueba iniciales sirven para establecer la fórmula de trabajo y verificar que la graduación del agregado esté dentro de los límites especificados puede ser reproducida en una planta mezcladora.

Cuando las mezclas de pruebas iniciales fallan con los criterios de diseño en cualquier contenido de asfalto seleccionado, será necesario modificar o rediseñar, en algunos casos la mezcla. Para corregir una deficiencia, la manera más fácil de rediseñar una mezcla es cambiar la graduación de los agregados ajustando los porcentajes utilizados. Frecuentemente este ajuste es suficiente para cumplir con las especificaciones.

Las curvas granulométricas son de gran ayuda al hacer los ajustes necesarios en los diseños de mezclas. Por ejemplo, las curvas obtenidas de la ecuación de densidad máxima de Fuller (Figura 4.9) representan condiciones de densidad máxima y valores mínimos de vacíos en el agregado mineral (VMA). Las mezclas asfálticas que poseen dichas curvas presentan contenidos de vacío que pueden ser demasiado bajos. Generalmente, cualquier desviación de estas curvas resulta en densidades menores y valores más altos de VMA. La magnitud del cambio en la densidad y en el VMA depende de la cantidad de ajustes hechos en el contenido de agregado grueso o fino de la mezcla.

Figura 2. **Curvas Fuller de máxima densidad basadas en un gráfico normalizado semi-log de granulometría**

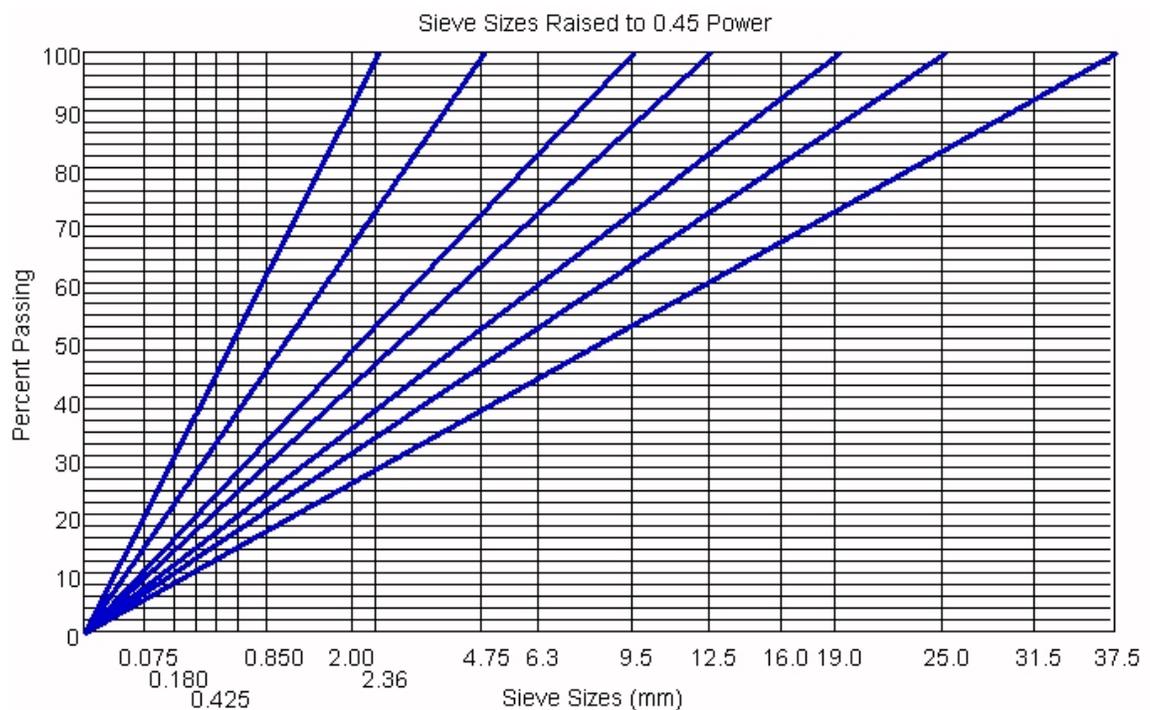


Fuente: Asphalt Institute. *Tomada de Principios de Construcción de Pavimentos de Mezcla Asfáltica en Caliente*, MS 22. p. 128.

La figura 2 muestra curvas de densidad máxima dibujadas sobre un gráfico de granulometría de la Administración Federal de Carreteras (FHWA) (USA), basada en una escala donde las aberturas de los tamices se elevan a una potencia de 0,45. Muchos diseñadores encuentran conveniente la gráfica del FHWA para hacer ajustes en la granulometría del agregado. Las curvas en la gráfica del FHWA pueden hallarse usando la ecuación de densidad máxima de Fuller, o dibujando una línea recta desde el origen, en la parte inferior izquierda de la gráfica, hasta el tamaño máximo nominal de partícula deseado, en la parte superior. Las granulometrías que se acercan a las líneas rectas tienen, generalmente, valores bajos de VMA y deben ser ajustadas alejándolas

de estas líneas. Dichos ajustes aumentan los valores de VMA, permitiendo así el uso de suficiente asfalto para poder obtener máxima durabilidad sin causar exudación en la mezcla.

Figura 3. **Curvas de densidad máxima basadas en un gráfico FHWA (potencia de 0,45) de granulometría**



Fuente: *Pavement Interactive*. <http://www.pavementinteractive.org/>. Consulta: mayo de 2016.

1.4.5.1. **Lineamientos generales para ajustar las mezclas de prueba**

A continuación se presentan los lineamientos generales para ajustar las mezclas de prueba.

1.4.5.1.1. Bajo contenido de vacíos y estabilidad baja

Los vacíos pueden incrementarse en diferentes formas. Como un acercamiento general para lograr vacíos altos en el agregado mineral (y en consecuencia proveer de suficientes espacios, para una adecuada cantidad de asfalto y vacíos de aire), la graduación del agregado debe ajustarse mediante la adición de más agregado grueso o fino. Si el contenido de asfalto es más alto de lo normal y el exceso no es necesario para remplazar el absorbido por el agregado, entonces el contenido de asfalto deberá reducirse a fin de incrementar el porcentaje de vacíos, proveyendo un adecuado VMA. Se deberá recordar que disminuir el porcentaje de asfalto podrá tender a bajar la durabilidad del pavimento.

Demasiada reducción en el contenido de asfalto puede ocasionar fracturación, oxidación acelerada e incremento de la permeabilidad. Si los ajustes anteriores no producen una mezcla estable, el agregado tendrá que cambiarse. Es también posible mejorar la estabilidad e incrementar el contenido de vacíos en el agregado de la mezcla, mediante el incremento del agregado grueso o reducción de la cantidad de material que pasa la malla No. 200. Con la incorporación de arena procesada, el contenido de vacíos puede mejorarse sin sacrificar la estabilidad de la mezcla.

1.4.5.1.2. Bajo contenido de vacíos y estabilidad satisfactoria

Bajos contenidos de vacíos pueden eventualmente resultar en inestabilidad debido a flujo plástico o después de que el pavimento ha sido expuesto al tránsito por un periodo de tiempo ante la reorientación de las

partículas y compactación adicional. Por otra parte, insuficientes vacíos pueden ser producto de la cantidad requerida de asfalto para obtener una durabilidad alta en mezclas finas; sin embargo, la estabilidad es inicialmente satisfactoria por el tránsito específico. Una degradación de agregado pobre durante la producción de la mezcla o bajo la acción de tránsito puede ocasionar subsecuentemente inestabilidad y flujo si el contenido de vacíos de la mezcla no es suficiente.

1.4.5.1.3. Contenido satisfactorio de vacíos y estabilidad baja

La baja estabilidad cuando los vacíos y la graduación del agregado son satisfactorios puede indicar algunas deficiencias en el agregado. Se deberán tomar consideraciones para mejorar la forma de la partícula de los agregados utilizando material producto de trituración o incrementando el porcentaje de agregado grueso en la mezcla, o posiblemente aumentando el tamaño máximo del agregado. Partículas de agregado con textura rugosa y superficies menos redondeadas presentan más estabilidad cuando se mantiene o incrementa el volumen de vacíos.

1.4.5.1.4. Contenido alto de vacíos y estabilidad satisfactoria

Altos contenidos de vacíos se asocian frecuentemente con mezclas con alta permeabilidad; al permitir la circulación de aire y agua a través de la mezcla asfáltica pueden ocasionar endurecimiento prematuro del asfalto, desprendimiento del agregado, o posible desprendimiento del asfalto en el agregado. Aun cuando la estabilidad es satisfactoria, se deberán realizar ajustes para reducir los vacíos. Pequeñas reducciones se lograrán mediante la

adición de polvo mineral a la mezcla. Podría ser necesario seleccionar o combinar agregados para lograr una graduación, la cual deberá estar cerca de la curva de máxima densidad.

1.4.5.1.5. Vacíos altos y estabilidad baja

Se deberán tomar en cuenta dos pasos para este tipo de condiciones; el primero es ajustar el volumen de vacíos mediante los métodos discutidos en los puntos anteriores; y en el segundo, si los ajustes no mejoran la estabilidad, deberá hacerse una consideración de la calidad de los materiales.

1.4.6. Ensayos realizados a la mezcla asfáltica compactada

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

1.4.6.1. Gravedad específica teórica máxima y densidad de mezclas bituminosas de pavimentación

Se determina la gravedad específica teórica máxima Gmm de acuerdo a la norma AASHTO T 209-05, de la mezcla asfáltica en su estado suelto, para al menos dos contenidos de asfalto; de preferencia en un rango en donde se estime que podrá encontrarse el contenido óptimo. Una vez hecho lo anterior, se pueden determinar los valores de Gmm para los distintos contenidos de asfalto que se utilizan en el diseño, empleando fórmulas de aproximación tal como lo describe el Instituto del Asfalto de Norteamérica en su manual de métodos de diseño de mezclas asfálticas en caliente.

1.4.6.2. Determinación de la gravedad específica bulk

El ensayo de gravedad específica bulk de mezclas asfálticas compactadas utilizando especímenes saturados superficialmente secos puede desarrollarse tan pronto como el espécimen se haya enfriado. Este ensayo se desarrolla de acuerdo con la norma AASHTO T 166-05. Para la gravedad específica bulk de mezclas asfálticas compactadas usando especímenes cubiertos con parafina se aplica la norma AASHTO T 275. Para determinar cuál norma se debe utilizar se realizarán pruebas de absorción a la mezcla asfáltica compactada; si la absorción es mayor al 2 % se utiliza la norma AASHTO T 166-05, en caso contrario, se recurre a la norma AASHTO T 275.

1.4.6.3. Resistencia de mezclas bituminosas al flujo plástico utilizando el aparato Marshall

Basado en norma AASHTO: T 245-97(2004), el ensayo de estabilidad está dirigido a medir la resistencia a la deformación de la mezcla. La fluencia mide la deformación, bajo carga, que ocurre en la mezcla.

Sumergir el espécimen en un baño maría a $60\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($140\text{ }^{\circ}\text{F} \pm 1,8\text{ }^{\circ}\text{F}$) de 30 a 40 minutos antes de la prueba. Remueva el espécimen de ensayo del baño maría y cuidadosamente se secará la superficie. Colocándolo y centrándolo en la mordaza inferior, se procederá a colocar la mordaza superior y se centrará completamente en el aparato de carga. Posteriormente, se aplica la carga de prueba al espécimen a una velocidad constante de 50.8 mm/min (2 pulg/min), hasta que ocurra la falla. El punto de falla está definido por la lectura de carga máxima obtenida. El número total de newtons (lb) requeridos para que

se produzca la falla del espécimen deberá registrarse como el valor de estabilidad Marshall.

Mientras que el ensayo de estabilidad está en proceso, si no se utiliza un equipo de registro automático, se deberá mantener el medidor de flujo sobre la barra guía y cuando la carga empiece a disminuir habrá que tomar la lectura y registrarla como el valor de flujo final. La diferencia entre el valor de flujo final e inicial expresado en unidades de 0,25 mm (1/100 “) será el valor del flujo Marshall.

1.4.6.4. Análisis de densidad y vacíos

Después de completar las pruebas de estabilidad y flujo, se realiza el análisis de densidad y vacíos para cada serie de especímenes de prueba. Resulta conveniente determinar la gravedad específica teórica máxima (AASHTO T 209) para al menos dos contenidos de asfalto, preferentemente aquellos que estén cerca del contenido óptimo de asfalto. Un valor promedio de la gravedad específica efectiva del total del agregado se calculará de estos valores.

Utilizando la gravedad específica y la gravedad específica efectiva del total del agregado; el promedio de las gravedades específicas de las mezclas compactadas; la gravedad específica del asfalto y la gravedad específica teórica máxima de la mezcla asfáltica, se calcula el porcentaje de asfalto absorbido en peso del agregado seco, porcentaje de vacíos (V_a), porcentaje de vacíos llenados con asfalto (VFA) y el porcentaje de vacíos en el agregado mineral (VMA).

1.5. Procedimiento de diseño de mezclas asfálticas en caliente utilizando el método Marshall.

Una mezcla asfáltica se puede presentar según su tamaño máximo, por ejemplo, una mezcla de 1 pulg indica que su tamaño máximo es de una pulgada y que dicho material pasará por completo el tamiz de 1 pulg; o según su tamaño máximo nominal, que suele ser la más utilizada, por ejemplo una mezcla con designación de ½ pulg implica que su agregado tiene un tamaño máximo de ¾ pulg y todo el agregado pasará el tamiz de tres cuartos de pulgadas.

El proceso que se explica seguidamente es para diseñar una mezcla densa.

Un diseño de mezcla asfáltica en caliente es un proceso muy amplio y complementario en el cual intervienen varios factores de estudio, los cuales son:

- Establecer la designación de la mezcla que se desea diseñar.
- Para el caso de este estudio es una mezcla de ¾" en base al tamaño máximo nominal del agregado.
- Elección de la especificación bajo la cual se regirá la granulometría, esta dependerá del tamaño máximo nominal.
- Estudio de los materiales que conformarán la mezcla, los cuales básicamente son dos:
 - Agregados pétreos.
 - Asfalto, cuando se diseña una mezcla con cemento asfáltico sin ninguna clase de aditivo, a no ser que este sea considerado para el diseño.

1.5.1. Comprobación granulométrica

Cuando se tienen establecidos los porcentajes para cada uno de los agregados el procedimiento sigue con una comprobación granulométrica que se puede decir que es la combinación real. Es simplemente la verificación que indica que se puede reproducir la combinación teórica, dicha comprobación se realiza según el ensayo basado en AASHTO T 27, o el ensayo AASHTO: T 11-97 que es granulometría por lavado, en el cual se calculan los porcentajes que pasan para cada tamiz.

1.5.2. Dosificación de agregados

El procedimiento para dosificación de agregado que se utilizará en el método de diseño que se explica en este documento es el que recomienda la norma AASHTO T 245, que es la que rige el procedimiento de elaboración de las briquetas por el método Marshall para luego ser ensayadas para la resistencia a la estabilidad y flujo. El ensayo recomienda que los agregados se separen por tamizado seco en ciertas fracciones y recomienda también los rangos. Según el tamaño máximo de los agregados (3/4") que se utilizan en el diseño, se toman las siguientes fracciones de tamaño:

- 19,0 mm a 9,5 mm (3/4 a 3/8 pulg.)
- 9,5 mm a 4,75 mm (3/8 pulg. a núm. 4)
- 4,75 mm a 2,36 mm (núm. 4 a núm. 8)
- Pasa 2,36 mm (núm. 8)

1.5.3. Estimación del porcentaje óptimo de asfalto

La estimación del porcentaje óptimo de asfalto es de una gran ayuda y se realiza utilizando la relación propuesta por el instituto del asfalto, ya que proporciona un valor de asfalto óptimo teórico y a partir de este se establecen los demás porcentajes de asfalto para el diseño.

Relación propuesta por el Instituto del Asfalto:

$$P = 0,032a + 0,045b + K.c + n$$

Donde:

P = porcentaje de asfalto estimado por peso total de la mezcla.

a = porcentaje de material pétreo retenido en el tamiz núm. 10.

b = porcentaje de material que pasa el tamiz núm. 10 y se retiene en la núm. 200.

c = porcentaje de material que pasa la malla núm. 200.

K = factor que depende del valor de "c".

n = varía según el tipo de material pétreo y su absorción.

2. DESARROLLO EXPERIMENTAL ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS DEL DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA POR EL MÉTODO MARSHALL

2.1. Trabajo de laboratorio para el diseño de mezcla

En la dosificación que se realizó las proporciones de agregado fueron: Agregado grueso $\frac{3}{4}$ " 35 %; agregado intermedio $\frac{3}{8}$ " 15 %; arena y filler 50 %, con los porcentajes de las cuatro fracciones de la tabla IX, utilizando la especificación granulométrica para ese tamaño nominal, de acuerdo al tamaño máximo nominal de la combinación de agregados que es de $\frac{3}{4}$ pulgada.

Tabla IX. **Graduación de agregados para pavimento de concreto asfáltico (ASTM D 3515)**

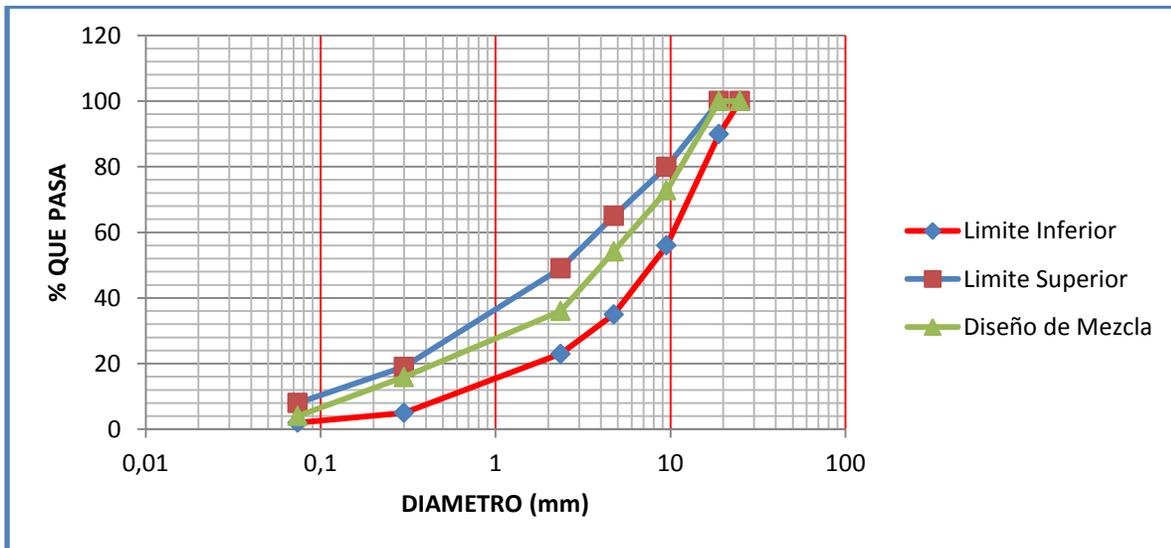
Tamaño del tamiz	Porcentaje en masa que pasa el tamiz designado (AASHTO T 27 y T 11)					
	Graduación designada y tamaño máximo nominal ¹					
	A (50,8 mm)	B (38,1 mm)	C (25,4 mm)	D (19 mm)	E (12,5 mm)	F (9,5 mm)
	2"	1 ½"	1"	$\frac{3}{4}$ "	$\frac{1}{2}$ "	$\frac{3}{8}$ "
63,00 mm	100					
50,00 mm	90-100	100				
38,10 mm	-	90-100	100			
25,00 mm	60-80	-	90-100	100		
19,00 mm	-	56-80	-	90-100	100	
12,50 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

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

Fuente: elaboración propia.

A continuación, se presenta la gráfica granulométrica que representa el diseño propuesto de mezcla asfáltica.

Figura 4. **Curva granulométrica del diseño de mezcla asfáltica**



Fuente: elaboración propia.

2.1.1. Preparación de probetas de mezcla asfáltica

A continuación se presentan la preparación de probetas de mezcla asfáltica.

2.1.1.1. Metodología

INV E748: estabilidad y flujo de mezclas asfálticas en caliente empleando el equipo Marshall.

Equipo necesario::

- Horno.
- Placa de calefacción.
- Termómetros adecuados para medir la temperatura del asfalto, los agregados y la mezcla.
- Balanza para pesar material y probetas compactadas.
- Tamices.
- Recipiente para mezclar.
- Cucharones o espátulas.
- 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 $457,2 \pm 1,5$ mm.
- Pedestal de compactacion: pieza prismática de madera de base cuadrada, de 203,2 mm de lado y 457,2 mm de altura. Está provista en su cara superior de una platina cuadrada de acero de 304,8 mm de lado y 25,4 mm de espesor, la cual debe estar firmemente sujeta al pedestal.
- Dispositivo con resorte de tension, diseñado para centrar rígidamente el molde de compactacion sobre el pedestal. Debe sostener en su posición el molde, el collar y la placa de base durante la compactacion de la probeta.

Figura 5. **Equipo utilizado para calentar agregados al cemento asfáltico**



Fuente: Centro de investigaciones de Ingeniería, Sección de asfaltos. USAC.

Figura 6. **Equipo utilizado para calentar mezcla asfáltica**



Fuente: Centro de investigaciones de Ingeniería, Sección de asfaltos. USAC.

Figura 7. Recipiente y espátula para mezclar



Fuente: Centro de investigaciones de Ingeniería, Sección de asfaltos. USAC.

2.1.1.2. Procedimiento

- Para una graduación de agregado previamente establecida, se deberá preparar una serie de probetas con diferentes contenidos de asfalto, desde un 4 hasta un 6 % (con incrementos de 0,5 % en masa entre ellos) del peso total de la mezcla de agregados. Se prepararán tres probetas para cada contenido de asfalto. Para cada probeta se utilizan 1 200 g de mezcla de agregados.
- Secar los agregados y separar en fracciones de diferentes tamaños.
- Calentar el cemento asfáltico a una temperatura correspondiente para producir una viscosidad cinemática entre 0,15 y 0,19 Pa-s (150 y 190 cS).

- En bandejas taradas, pesar las cantidades de cada porción de agregados, previamente calculadas de acuerdo con el diseño de mezcla propuesto, para la fabricación de una probeta. Los pesos de los agregados debe de ser igual a 1 200 g.
- Calentar los agregados hasta llegar a una temperatura aproximada de 110 °C. Con la ayuda de un recipiente de mezclado y una espátula, mezclar en seco durante un tiempo adecuado que permita obtener una buena combinación de los agregados, sin que se presente una pérdida de temperatura en la mezcla.
- Verter la cantidad requerida de cemento asfáltico en la mezcla de agregados.
- Mezclar los agregados con el cemento asfáltico lo más rápidamente posible hasta obtener una mezcla completa y homogénea. Esta mezcla se debe de realizar en una placa de calentamiento hasta que la mezcla alcance una temperatura de 140 °C.
- Simultáneamente con la preparación de la mezcla, el conjunto de molde, collar y placa de base, se calientan en un baño de agua a temperatura de 60 °C.
- Secar y armar el conjunto de moldeo de las probetas, aplicándole previamente aceite para desencostrar.
- Verter la mezcla en el molde y apisonar con una espátula 15 veces alrededor del perímetro y 10 sobre el interior. Esto se realiza para lograr un mejor acomodo de las partículas de la mezcla en el molde.

- Compactar la mezcla aplicando 75 golpes con el martillo de compactación. La temperatura de la mezcla, inmediatamente antes de la compactación, deberá ser de aproximadamente 140 °C.
- Se procede a retirar el collar, se da vuelta al molde y se vuelve a montar este en el pedestal, seguidamente se aplica el mismo número de golpes a la cara invertida de la probeta.
- Después de la compactación, se retiran el collar y los moldes. Se deja enfriar la muestra al aire dentro del molde. Veinticuatro horas después de la compactación, se desencofra.

2.2. Gravedad específica bulk

A continuación, se presenta la metodología que se utiliza para obtener la gravedad específica bulk.

2.2.1. Metodología

- INV E733: Gravedad específica bulk y densidad de mezclas asfálticas compactadas no absorbentes empleando especímenes saturados y superficialmente secos.
- ASTM D2726: *Bulk Specific Gravity and Density of Non-Absorptive Compacted Bituminous Mixtures.*
- AASHTO T166: *Bulk Specific Gravity of Compacted Bituminous Mixtures Using Saturated Surface-Dry Specimens.*

Equipo necesario:

- Balanza con capacidad adecuada y sensibilidad suficiente para que las gravedades se puedan calcular al menos con cuatro cifras significativas. Deberá estar provista de un dispositivo de suspensión adecuado que permita pesar el espécimen dentro del agua suspendido bajo el centro del platillo de la balanza.

Baño con agua para la inmersión del espécimen. Este deberá estar provisto de un rebosadero para mantener el agua a nivel constante.

Figura 8. **Balanza provista de dispositivo de suspensión y pileta de agua para suspensión de probeta**



(a) Balanza provista de dispositivo de suspensión.



(b) Pileta de agua para suspensión de probeta.

Fuente: Centro de investigaciones de Ingeniería, Sección de asfaltos. USAC.

2.2.2. Procedimiento

- Determinar la masa del espécimen seco, pesándolo después de que haya permanecido al menos durante 1 hora a temperatura ambiente.
- Sumergir la muestra en un baño de agua a temperatura ambiente durante 5 minutos.
- Sacar y secar superficialmente la muestra para posteriormente pesarla y obtener el peso saturado.
- Sumergir la muestra en un baño de agua a temperatura ambiente. Se pesa estando suspendida en el agua.
- Se procede a calcular la gravedad específica de la muestra utilizando la siguiente ecuación:

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

Donde:

G_{mb} = gravedad específica bruta

A= Peso seco del espécimen (g)

B= Peso del espécimen saturado con superficie seca (g)

C= Peso del espécimen sumergido (g)

2.2.3. Resultados de los ensayos de gravedad específica bulk

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

Cálculo de gravedad específica bruta:

Datos:

A: 1 221,38 g

B: 1 241,11 g

C: 697,55 g

$$G_{mb} = \frac{1\ 221,38}{1\ 241,11 - 697,55} = 2,25$$

Tabla X. Datos de gravedad específica bulk de mezcla AC-20

AC-20					
1 PASTILLA 4 %		2 PASTILLA 4 %		3 PASTILLA 4 %	
Pseco	1 221,38	Pseco	1 245,11	Pseco	1 235,88
Psaturado	1 241,11	Psaturado	1 252,18	Psaturado	1 250,79
Psumergido	697,55	Psumergido	705,1	Psumergido	708,2
1 PASTILLA 4,5 %		2 PASTILLA 4,5 %		3 PASTILLA 4,5 %	
Pseco	1 231,38	Pseco	1 232,84	Pseco	1 237,39
Psaturado	1 241,05	Psaturado	1 250,25	Psaturado	1 259,8
Psumergido	709,5	Psumergido	705,96	Psumergido	710,8
1 PASTILLA 5 %		2 PASTILLA 5 %		3 PASTILLA 5 %	
Pseco	1 235,34	Pseco	1 233,6	Pseco	1 209,42
Psaturado	1 240,23	Psaturado	1 240,9	Psaturado	1 214,39
Psumergido	701,3	Psumergido	705,3	Psumergido	703,05

Continuación de la tabla X.

1 PASTILLA 5,5 %		2 PASTILLA 5,5 %		3 PASTILLA 5,5 %	
Pseco	1 247,02	Pseco	1 196,76	Pseco	1 271,3
Psaturado	1 252,8	Psaturado	1 205,4	Psaturado	1 274,7
Psumergido	721,09	Psumergido	695,2	Psumergido	745,3
1 PASTILLA 6 %		2 PASTILLA 6 %		3 PASTILLA 6 %	
Pseco	1 278,96	Pseco	1 273,04	Pseco	1 239,9
Psaturado	1 283,24	Psaturado	1 275,7	Psaturado	1 243,32
Psumergido	744,3	Psumergido	746,9	Psumergido	729,1

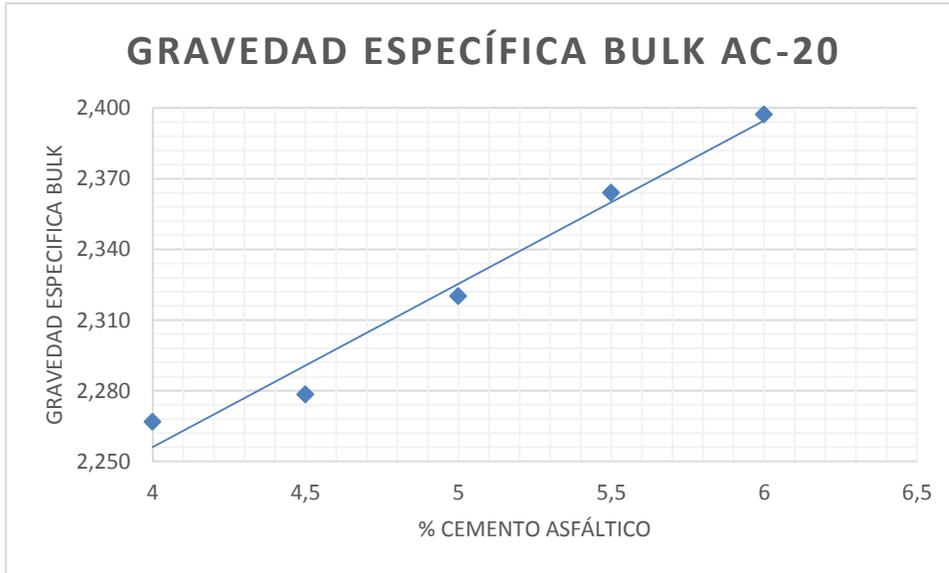
Fuente: elaboración propia.

Tabla XI. **Resultados de gravedad específica bulk de mezcla AC-20**

AC-20					
1 PASTILLA 4 %		2 PASTILLA 4 %		3 PASTILLA 4 %	
Gmb	2,25	Gmb	2,28	Gmb	2,28
Promedio					2,267
1 PASTILLA 4,5 %		2 PASTILLA 4,5 %		3 PASTILLA 4,5 %	
Gmb	2,32	Gmb	2,27	Gmb	2,25
Promedio					2.279
1 PASTILLA 5 %		2 PASTILLA 5 %		3 PASTILLA 5 %	
Gmb	2,29	Gmb	2,30	Gmb	2,37
Promedio					2,320
1 PASTILLA 5,5 %		2 PASTILLA 5,5 %		3 PASTILLA 5,5 %	
Gmb	2,35	Gmb	2,35	Gmb	2,40
Promedio					2,364
1 PASTILLA 6 %		2 PASTILLA 6 %		3 PASTILLA 6 %	
Gmb	2,37	Gmb	2,41	Gmb	2,41
Promedio					2,397

Fuente: elaboración propia.

Figura 9. **Gráfica de resultados de gravedad específica bulk mezcla AC-20**



Fuente: elaboración propia.

Tabla XII. **Datos de gravedad específica bulk de mezcla AC-30**

AC-30					
1 PASTILLA 4 %		2 PASTILLA 4 %		3 PASTILLA 4 %	
Pseco	1 219,5	Pseco	1 271,63	Pseco	1 240,48
Psaturado	1 226	Psaturado	1 276,98	Psaturado	1 243,85
Psumergido	711,47	Psumergido	745,6	Psumergido	718,57
1 PASTILLA 4,5 %		2 PASTILLA 4,5 %		3 PASTILLA 4,5 %	
Pseco	1 236,53	Pseco	1 246,07	Pseco	1 238,89
Psaturado	1 240,25	Psaturado	1 248,55	Psaturado	1 245,27
Psumergido	723,01	Psumergido	728,6	Psumergido	724,94
1 PASTILLA 5 %		2 PASTILLA 5 %		3 PASTILLA 5 %	
Pseco	1 240,6	Pseco	1 233,33	Pseco	1 263,07
Psaturado	1 246,8	Psaturado	1 237,9	Psaturado	1 265,76
Psumergido	730,2	Psumergido	724,3	Psumergido	742,78

Continuación de la tabla XII.

1 PASTILLA 5,5 %		2 PASTILLA 5,5 %		3 PASTILLA 5,5 %	
Pseco	1 228,6	Pseco	1 240,68	Pseco	1 239,49
Psaturado	1 230,4	Psaturado	1 241,76	Psaturado	1 241,6
Psumergido	719,6	Psumergido	733,27	Psumergido	724,3
1 PASTILLA 6 %		2 PASTILLA 6 %		3 PASTILLA 6 %	
Pseco	1 240,82	Pseco	1 252,1	Pseco	1 221,8
Psaturado	1 241,73	Psaturado	1 252,84	Psaturado	1 224,42
Psumergido	733,33	Psumergido	738,43	Psumergido	710,08

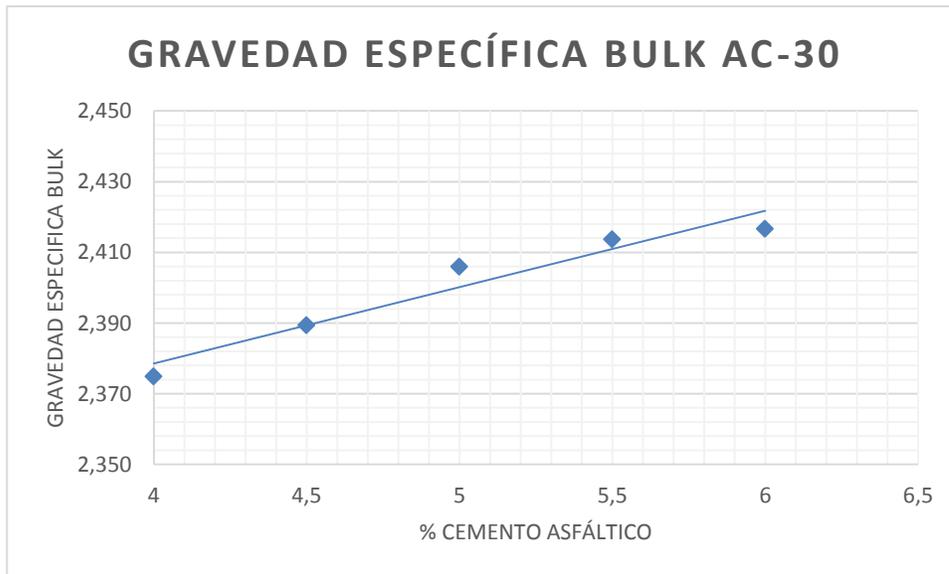
Fuente: elaboración propia.

Tabla XIII. **Resultados de gravedad específica bulk de mezcla AC-30**

AC-30					
1 PASTILLA 4 %		2 PASTILLA 4 %		3 PASTILLA 4 %	
Gmb	2,37	Gmb	2,39	Gmb	2,36
Promedio					2,375
1 PASTILLA 4,5 %		2 PASTILLA 4,5 %		3 PASTILLA 4,5 %	
Gmb	2,39	Gmb	2,40	Gmb	2,38
Promedio					2,389
1 PASTILLA 5 %		2 PASTILLA 5 %		3 PASTILLA 5 %	
Gmb	2,40	Gmb	2,40	Gmb	2,42
Promedio					2.406
1 PASTILLA 5,5 %		2 PASTILLA 5,5 %		3 PASTILLA 5,5 %	
Gmb	2,41	Gmb	2,44	Gmb	2,40
Promedio					2.414
1 PASTILLA 6 %		2 PASTILLA 6 %		3 PASTILLA 6 %	
Gmb	2,44	Gmb	2,43	Gmb	2,38
Promedio					2,417

Fuente: elaboración propia.

Figura 10. **Gráfica de resultados de gravedad específica bulk mezcla AC-30**



Fuente: elaboración propia.

Tabla XIV. **Datos de gravedad específica bulk de mezcla AC-40**

AC-40					
1 PASTILLA 4 %		2 PASTILLA 4 %		3 PASTILLA 4 %	
Pseco	1 287,73	Pseco	1 207,22	Pseco	1 221,29
Psaturado	1 290,43	Psaturado	1 211,2	Psaturado	1 225,42
Psumergido	751,2	Psumergido	705,6	Psumergido	709,2
1 PASTILLA 4,5 %		2 PASTILLA 4,5 %		3 PASTILLA 4,5 %	
Pseco	1221.29	Pseco	1261.52	Pseco	1 243,25
Psaturado	1225.42	Psaturado	1265.02	Psaturado	1 246,74
Psumergido	711,6	Psumergido	738.71	Psumergido	728,38
1 PASTILLA 5 %		2 PASTILLA 5 %		3 PASTILLA 5 %	
Pseco	1 236,94	Pseco	1 262,72	Pseco	1 231,73
Psaturado	1 239,19	Psaturado	1 265,4	Psaturado	1 245,4
Psumergido	725,36	Psumergido	732,6	Psumergido	726,51

Continuación de la tabla XIV.

1 PASTILLA 5,5 %		2 PASTILLA 5,5 %		3 PASTILLA 5,5 %	
Pseco	1 243,61	Pseco	1 247,23	Pseco	1 205,61
Psaturado	1 245,4	Psaturado	1 248,78	Psaturado	1 211,34
Psumergido	726,51	Psumergido	732,45	Psumergido	703,94
1 PASTILLA 6 %		2 PASTILLA 6 %		3 PASTILLA 6 %	
Pseco	1 269,67	Pseco	1 261,16	Pseco	1 248,46
Psaturado	1 272,42	Psaturado	1 262,82	Psaturado	1 251,41
Psumergido	743,42	Psumergido	741,21	Psumergido	731,49

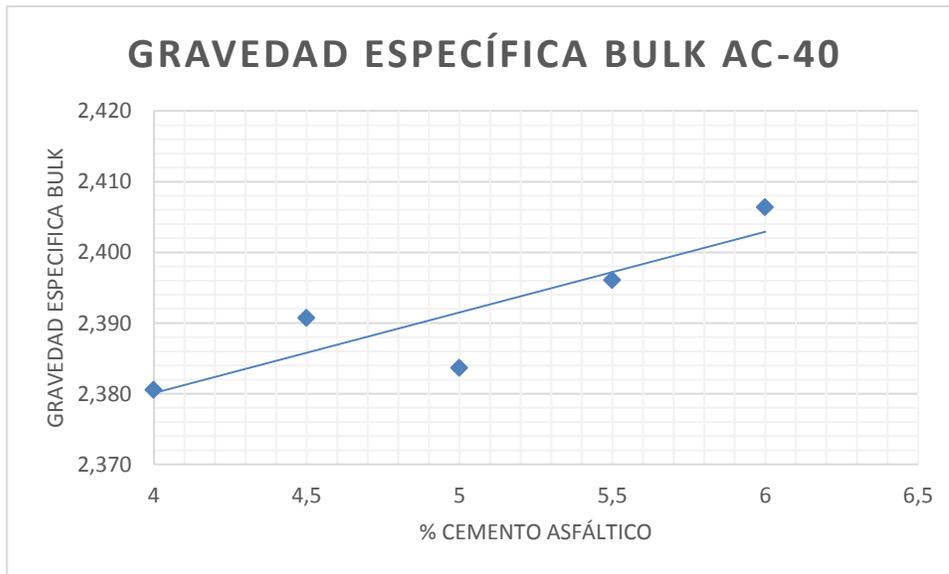
Fuente: elaboración propia.

Tabla XV. **Resultados de gravedad específica bulk de mezcla AC-40**

AC-40					
1 PASTILLA 4 %		2 PASTILLA 4 %		3 PASTILLA 4 %	
Gmb	2,39	Gmb	2,39	Gmb	2,37
Promedio					2,381
1 PASTILLA 4,5 %		2 PASTILLA 4,5 %		3 PASTILLA 4,5 %	
Gmb	2,38	Gmb	2,40	Gmb	2,40
Promedio					2,391
1 PASTILLA 5 %		2 PASTILLA 5 %		3 PASTILLA 5 %	
Gmb	2,41	Gmb	2,37	Gmb	2,37
Promedio					2,384
1 PASTILLA 5,5 %		2 PASTILLA 5,5 %		3 PASTILLA 5,5 %	
Gmb	2,40	Gmb	2,42	Gmb	2,38
Promedio					2,396
1 PASTILLA 6 %		2 PASTILLA 6 %		3 PASTILLA 6 %	
Gmb	2,40	Gmb	2,42	Gmb	2,40
Promedio					2,406

Fuente: elaboración propia.

Figura 11. **Gráfica de resultados de gravedad específica bulk mezcla AC-40**



Fuente: elaboración propia.

2.3. Gravedad específica teórica máxima

A continuación se presentan la metodología que se utiliza en la gravedad específica teórica máxima.

2.3.1. Metodología

- INV E735: Gravedad específica máxima de mezclas asfálticas para pavimentos.
- ASTM D2041: *Theoretical Maximum Specific Gravity and Density of Bituminous Paving Mixtures.*

- AASHTO T209: *Theoretical Maximum Specific Gravity and Density of Bituminous Paving Mixtures.*

Equipo necesario:

- Picnómetro de vacíos, de metal o plástico, con un diámetro de 180 a 260 mm y una altura no menor de 160 mm. Este debe estar equipado con una tapa transparente, asegurada con un empaque de caucho y con una conexión para la aplicación del vacío.
- Balanza con capacidad adecuada y sensibilidad suficiente para que las gravedades específicas de las muestras se puedan calcular al menos con cuatro cifras significativas.
- Bomba de vacío, capaz de evacuar el aire del recipiente de vacío hasta una presión residual de 25 psi.
- Manómetro de presión residual, para confirmar que se está aplicando la presión al recipiente, debe ser capaz de medir una presión residual de 25 psi o menos.
- Válvula de purga, para facilitar el ajuste del vacío que está siendo aplicado al recipiente y la liberación lenta de la presión de vacío.

Dispositivo de agitación mecánica, capaz de aplicar una agitación suave pero consistente a la muestra.

Figura 12. **Picnómetro para vacío**



Fuente: Centro de investigaciones de Ingeniería, Sección de asfaltos. USAC.

Figura 13. **Bomba de vacío y manómetro de presión residual**



(a) Bomba de vacíos.



(b) Manómetro de presión residual

Fuente: Centro de investigaciones de Ingeniería, Sección de asfaltos. USAC.

2.3.2. Procedimiento

- Una vez que la muestra está seca y se encuentre tibia, desintegrar con las manos logrando separar sus partículas, teniendo cuidado de no fracturarlas. Las partículas de la porción del agregado fino no deben de ser mayores de 6 mm.
- Verter la muestra directamente en el picnómetro previamente tarado. Se pesa el recipiente con la muestra y se designa la masa neta (únicamente la masa de la muestra).
- Agregar agua a temperatura ambiente, suficiente para cubrir la muestra por completo. Se recomienda que el espejo de agua esté a una altura de por lo menos 1" por encima de la mezcla.
- Colocar el picnómetro con la muestra y agua sobre el dispositivo de agitación mecánica y asegurarlo a la superficie de este. Activar la bomba de vacío, poner en marcha la agitación, e inmediatamente, por medio de la válvula de presión residual se busca que la presión de vacío se encuentre dentro de un rango de 25 a 30 psi. La presión de vacío se deberá alcanzar en un tiempo no mayor a 1 minuto y una vez alcanzado, se continuará el vacío y la agitación durante 15 minutos.
- Una vez transcuridos los 15 minutos, liberar gradualmente la presión de vacío usando la válvula de purga
- Llenar lentamente el picnómetro con agua, teniendo el cuidado de no introducir aire dentro de la muestra. Secar cualquier humedad presente

en el exterior del matraz y de la placa de vidrio. Se determina la masa del picnómetro más la placa, más la muestra, más agua.

- Calcular la gravedad específica teórica máxima por medio de la siguiente expresión:

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

Donde:

G_{mm} = gravedad específica teórica máxima

A= masa de la muestra seca (g)

D= masa del picnómetro lleno de agua (g)

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

2.3.3. Resultados de gravedad específica teórica máxima

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

2.3.3.1. Cálculo de gravedad específica teórica máxima

Datos:

A: 1 234,49 gr

D: 7 378,50 gr

E: 8 107,90 gr

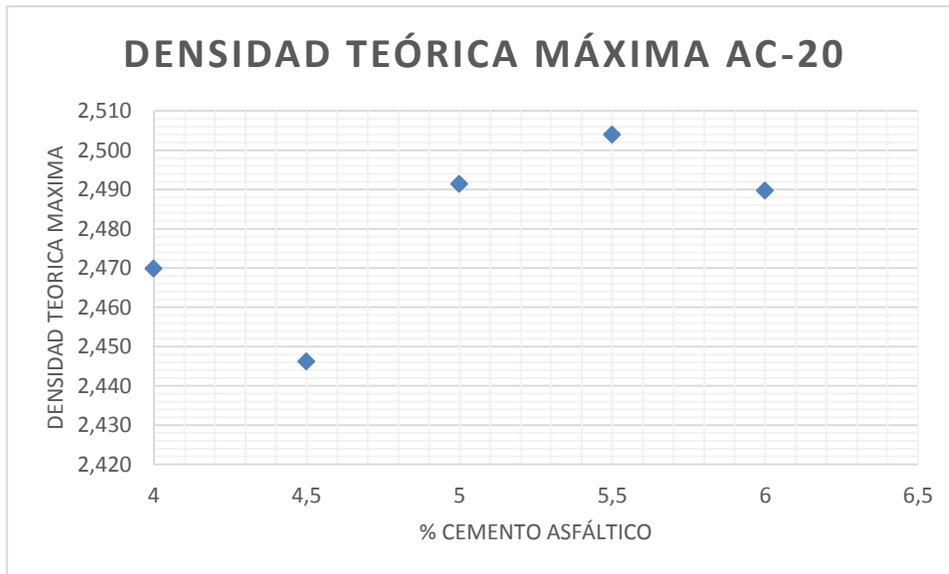
$$G_{mm} = \frac{1\,234,49}{1\,234,49 + 7\,378,50 - 8\,107,90} = 2,44$$

Tabla XVI. **Resultados de gravedad específica teórica máxima AC-20**

AC-20			
PASTILLA 4 %		PASTILLA 4 %	
Peso Tara + Material	1 503,5	Gmm	2,470
Pignómetro + Agua	7 383,4		
Pignómetro + Mat + Agua	8 132		
Peso Tara	245,6		
PASTILLA 4.5 %		PASTILLA 4,5 %	
Peso Tara + Material	1 470,9	Gmm	2,446
Pignómetro + Agua	7 381,2		
Pignómetro + Mat + Agua	8 099		
Peso Tara	256,77		
PASTILLA 5 %		PASTILLA 5 %	
Peso Tara + Material	1 449,51	Gmm	2,491
Pignómetro + Agua	7 376,5		
Pignómetro + Mat + Agua	8 090,5		
Peso Tara	256,78		
PASTILLA 5.5 %		PASTILLA 5,5 %	
Peso Tara + Material	1 412,98	Gmm	2,504
Pignómetro + Agua	7 376 ,5		
Pignómetro + Mat + Agua	8 071		
Peso Tara	256,7		
PASTILLA 6 %		PASTILLA 6 %	
Peso Tara + Material	1 485,39	Gmm	2,490
Pignómetro + Agua	7 376		
Pignómetro + Mat + Agua	8 111,5		
Peso Tara	256,17		

Fuente: elaboración propia.

Figura 14. **Gráfica de resultados de gravedad específica teórica máxima AC-20**



Fuente: elaboración propia.

Tabla XVII. **Resultados de gravedad específica teórica máxima AC-30**

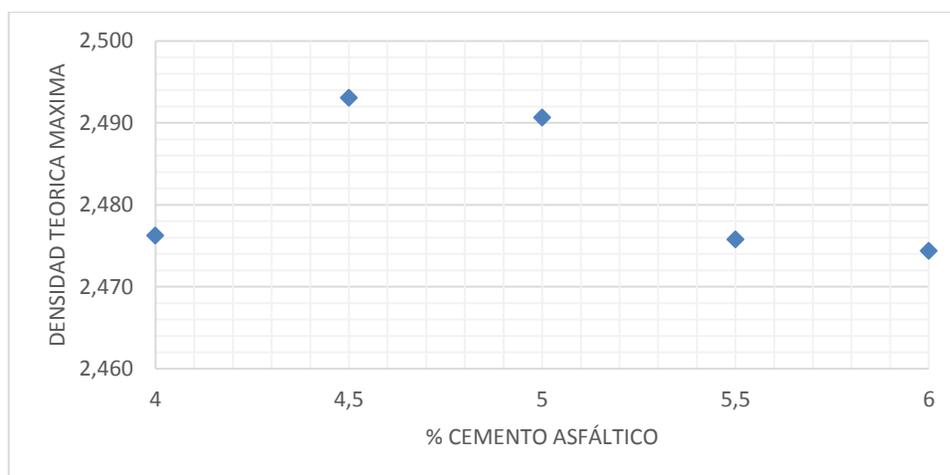
AC-30			
PASTILLA 4 %		PASTILLA 4 %	
Peso Tara + Material	1 526,25	Gmm	2,476
Pignómetro + Agua	7 383,2		
Pignómetro + Mat + Agua	8 140,9		
Peso Tara	255,29		
PASTILLA 4,5 %		PASTILLA 4,5 %	
Peso Tara + Material	1 472,58	Gmm	2,493
Pignómetro + Agua	7 383,2		
Pignómetro + Mat + Agua	8 119,2		
Peso Tara	243,63		

Continuación de la tabla XVII.

PASTILLA 5 %		PASTILLA 5 %	
Peso Tara + Material	1 485,2	Gmm	2,491
Pignómetro + Agua	7 383,2		
Pignómetro + Mat + Agua	8 119,3		
Peso Tara	255,29		
PASTILLA 5,5 %		PASTILLA 5,5 %	
Peso Tara + Material	1 476,3	Gmm	2,476
Pignómetro + Agua	7 378,5		
Pignómetro + Mat + Agua	8 111,3		
Peso Tara	246,95		
PASTILLA 6 %		PASTILLA 6 %	
Peso Tara + Material	1 463,79	Gmm	2,474
Pignómetro + Agua	7 378,5		
Pignómetro + Mat + Agua	8 097,4		
Peso Tara	257,3		

Fuente: elaboración propia.

Figura 15. **Gráfica de resultados de gravedad específica teórica máxima AC-30**



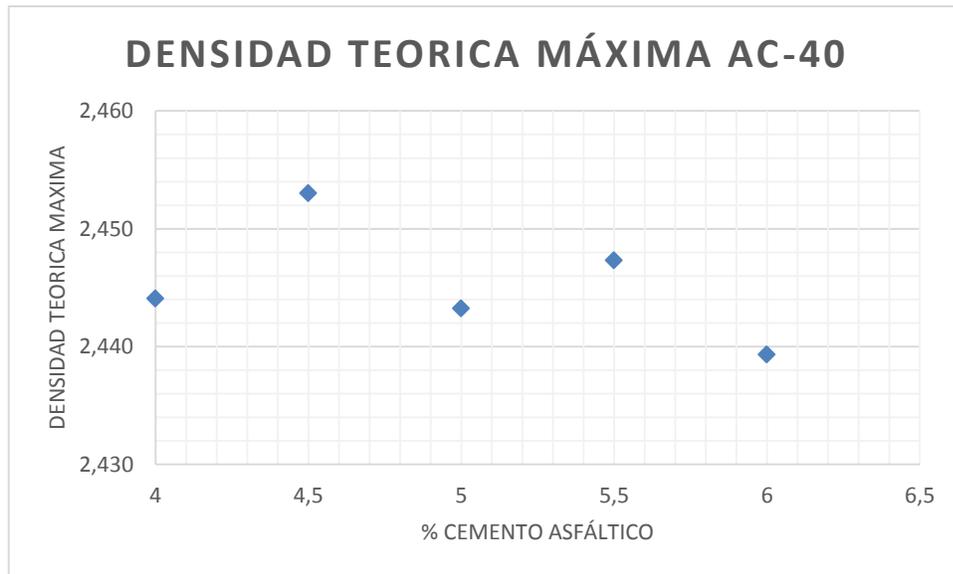
Fuente: elaboración propia.

Tabla XVIII. **Resultados de gravedad específica teórica máxima AC-40**

AC-40			
PASTILLA 4 %		PASTILLA 4 %	
Peso Tara + Material	1 489,2	Gmm	2,444
Pignómetro + Agua	7 378,5		
Pignómetro + Mat + Agua	8 107,9		
Peso Tara	254,71		
PASTILLA 4.5 %		PASTILLA 4,5 %	
Peso Tara + Material	1 497,11	Gmm	2,453
Pignómetro + Agua	7 378,5		
Pignómetro + Mat + Agua	8 112		
Peso Tara	258,8		
PASTILLA 5 %		PASTILLA 5 %	
Peso Tara + Material	1 493,6	Gmm	2,443
Pignómetro + Agua	7 380,2		
Pignómetro + Mat + Agua	8 112,8		
Peso Tara	253,4		
PASTILLA 5.5 %		PASTILLA 5,5 %	
Peso Tara + Material	1 467,3	Gmm	2,447
Pignómetro + Agua	7 380,2		
Pignómetro + Mat + Agua	8 096,5		
Peso Tara	256,09		
PASTILLA 6 %		PASTILLA 6 %	
Peso Tara + Material	1 526,34	Gmm	2,439
Pignómetro + Agua	7 380,2		
Pignómetro + Mat + Agua	8 129		
Peso Tara	257,3		

Fuente: elaboración propia.

Figura 16. **Gráfica de resultados de gravedad específica teórica máxima AC-40**



Fuente: elaboración propia.

2.4. Porcentaje de vacíos-densidad

A continuación se presentan la metodología que se utiliza en el porcentaje de vacíos-densidad.

2.4.1. Metodología

- INV E736: Porcentaje de vacíos con aire en mezclas asfálticas compactadas densas y abiertas.
- ASTM D3203: *Standard Test Method for Porcent Air Voids in Compacted Dense and Open Bituminous Paving Mixtures.*

- AASHTO T269: *Percent Air Voids in Compacted Dense and Open Bituminous Paving Mixtures.*

2.4.2. Procedimiento

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

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

Donde:

V_A = porcentaje de vacíos

G_{mm} = gravedad específica teórica máxima

G_{mb} = gravedad específica bruta

2.4.3. Resultados de porcentaje de vacíos-densidad.

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

Datos:

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

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

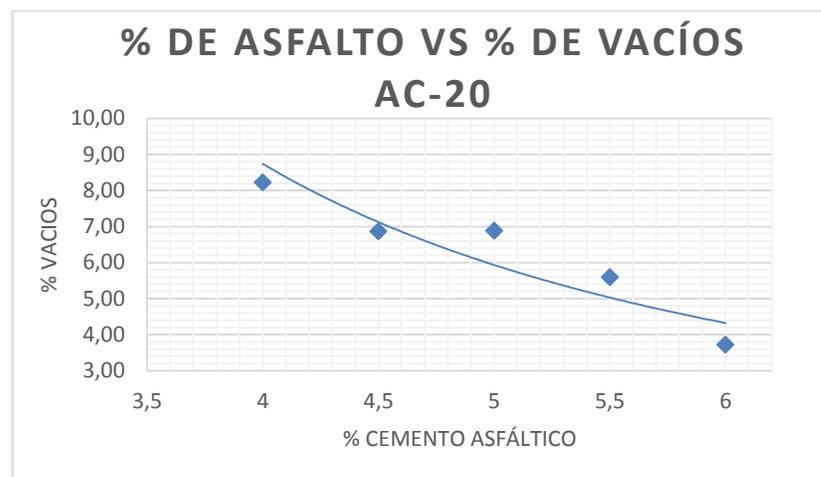
$$V_A = \frac{2,47 - 2,27}{2,47} \times 100 = 8,22 \%$$

Tabla XIX. Resultados de porcentaje de vacíos-densidad AC-20

AC-20					
PASTILLA 4 %					
Gmm	2.47	Gmb	2,27	% Vacios	8,22
PASTILLA 4,5 %					
Gmm	2.45	Gmb	2,28	% Vacios	6,86
PASTILLA 5 %					
Gmm	2.49	Gmb	2,32	% Vacios	6,87
PASTILLA 5,5 %					
Gmm	2.50	Gmb	2,36	% Vacios	5,58
PASTILLA 6 %					
Gmm	2.49	Gmb	2,40	% Vacios	3,71

Fuente: elaboración propia.

Figura 17. Gráfica de resultados de porcentaje de vacíos-densidad AC-20



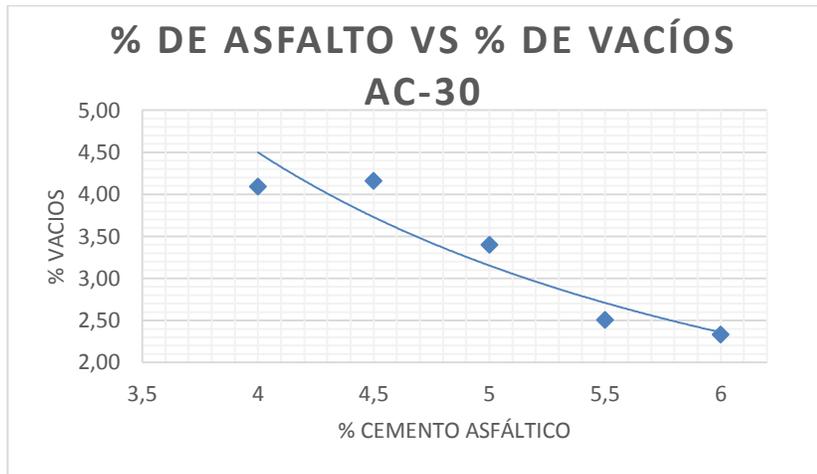
Fuente: elaboración propia.

Tabla XX. **Resultados de porcentaje de vacíos-densidad AC-30**

AC-30					
PASTILLA 4 %					
Gmm	2.48	Gmb	2,37	% Vacios	4,09
PASTILLA 4,5 %					
Gmm	2.49	Gmb	2,39	% Vacios	4,16
PASTILLA 5 %					
Gmm	2.49	Gmb	2,41	% Vacios	3,40
PASTILLA 5,5 %					
Gmm	2.48	Gmb	2,41	% Vacios	2,51
PASTILLA 6 %					
Gmm	2.47	Gmb	2,42	% Vacios	2,33

Fuente: elaboración propia.

Figura 18. **Gráfica de resultados de porcentaje de vacíos-densidad AC-30**



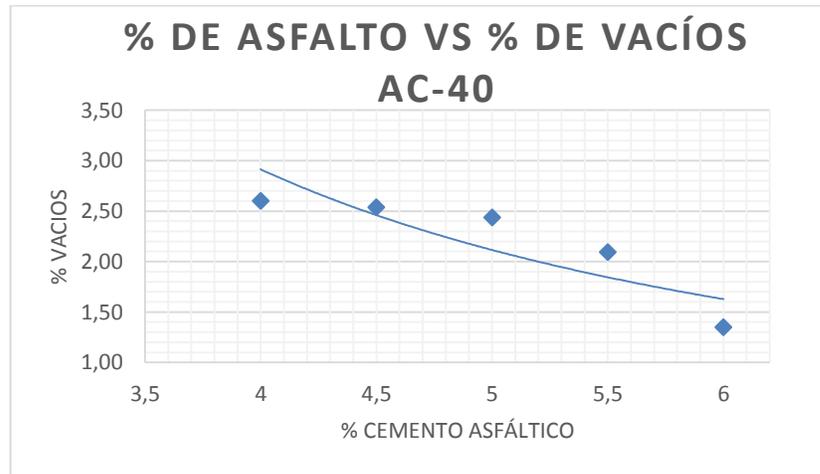
Fuente: elaboración propia.

Tabla XXI. **Resultados de porcentaje de vacíos-densidad AC-40**

AC-40					
PASTILLA 4 %					
Gmm	2.44	Gmb	2,38	% Vacios	2,60
PASTILLA 4,5 %					
Gmm	2.45	Gmb	2,39	% Vacios	2,54
PASTILLA 5 %					
Gmm	2.44	Gmb	2,38	% Vacios	2,44
PASTILLA 5,5 %					
Gmm	2.45	Gmb	2,40	% Vacios	2,09
PASTILLA 6 %					
Gmm	2.44	Gmb	2,41	% Vacios	1,35

Fuente: elaboración propia.

Figura 19. **Gráfica de resultados de porcentaje de vacíos-densidad AC-40**



Fuente: elaboración propia.

2.5. Prueba de estabilidad-flujo Marshall

A continuación, se presenta la metodología que se utiliza para la prueba de estabilidad flujo Marshall.

2.5.1. Metodología

- INV E748: Estabilidad y flujo de mezclas asfálticas en caliente empleando el equipo Marshall.
- ASTM D1559: *Test Method for Resistance of Plastic Flow of Bituminous Mixtures Using Marshall Apparatus.*
- AASHTO T245: *Resistance to Plastic Flow of Bituminous Mixtures Using Marshall Apparatus.*

Equipo necesario:

- 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 50 ± 5 mm/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 0,25 mm 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 30 mm sobre la superficie superior de las probetas compactadas. Debe tener un control termostático que le permita mantener la temperatura en cualquier punto del tanque.

2.5.2. Procedimiento

El ensayo se debe realizar dentro de las 24 horas siguientes a la compactación de las probetas.

- Colocar las probetas en el baño de agua durante 45 minutos manteniendo una temperatura constante de 60 °C.
- Antes de colocar las probetas, limpiar perfectamente las barras guías y las superficies interiores de las mordazas de ensayo.
- Retirar una probeta del baño de agua y secar cualquier exceso de agua con una toalla. Se coloca centrada en la mordaza inferior, se monta la mordaza superior con el medidor de deformación y el conjunto se sitúa centrado en la prensa. Colocar el medidor de flujo en posición, se ajusta a cero y se mantiene su vástago firmemente contra la mordaza superior, mientras se aplica la carga de ensayo.
- A continuación se aplica la carga sobre la probeta con la prensa a una tasa de deformación constante de 50 ± 5 mm/min, hasta que ocurra la falla, es decir, cuando se advierte que se alcanza la máxima carga y luego comienza decrecer. El procedimiento completo, desde la extracción de la probeta del baño de agua hasta su falla, no deberá exceder los 30 segundos.

- Anotar el valor de carga leído en el anillo dinamométrico y el valor de la deformación leído en el deformímetro.
- Se calcula el equivalente de resistencia en lbf de la carga obtenida, utilizando los valores de la tabla HUMBOLDT MFG. CO. 7300 W. AGATITE AVE. NORRIDGE, IL 60706 (ver anexo 1).

Al valor de resistencia en lbf se le aplica un factor de corrección, el cual está en función del volumen de la probeta ensayada. Para esto se utiliza la tabla de factores de corrección de estabilidad medida (ver anexo 2).

2.5.3. Resultados de porcentaje de vacíos-densidad.

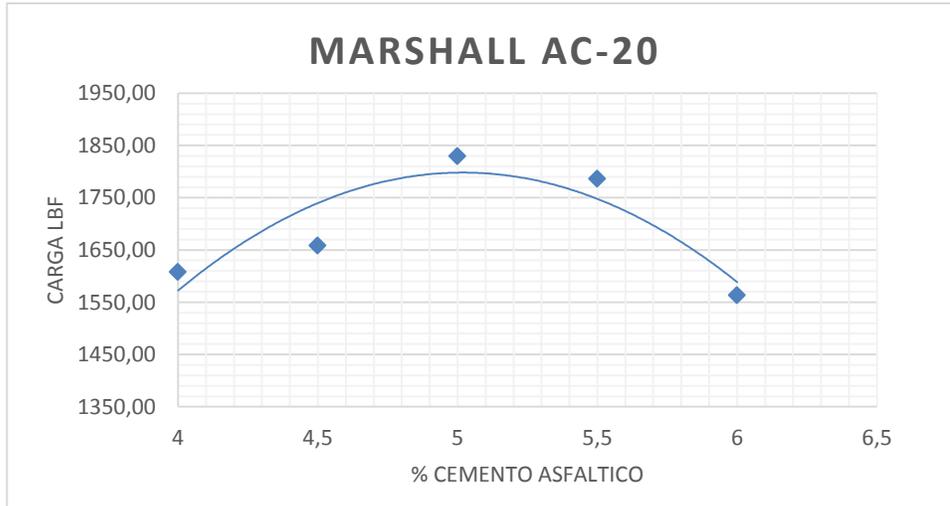
A continuación, se presentan los datos y cálculos respectivos al ensayo descrito anteriormente.

Tabla XXII. **Resultados de estabilidad-flujo Marshall de mezcla asfáltica AC-20**

AC-20							
1 PASTILLA 4 %		2 PASTILLA 4 %		3 PASTILLA 4 %		PASTILLA 4 %	
Carga	185	Carga	205	Carga	185	promedio	1 607,83
lbf	1 750	lbf	1 950	lbf	1 750		
Deformación	20	Deformación	20	Deformación	15		
Corrección	1 452,5	Corrección	1 813,5	Corrección	1 557,5		
1 PASTILLA 4,5 %		2 PASTILLA 4,5 %		3 PASTILLA 4,5 %		PASTILLA 4,5 %	
Carga	205	Carga	221	Carga	195	promedio	1 658,33
lbf	1 950	lbf	2 100	lbf	1 850		
Deformación	18	Deformación	17	Deformación	20		
Corrección	1 696,5	Corrección	1 743	Corrección	1 535,5		
1 PASTILLA 5 %		2 PASTILLA 5 %		3 PASTILLA 5 %		PASTILLA 5 %	
Carga	215	Carga	210	Carga	228	promedio	1 829,75
lbf	2 050	lbf	2 000	lbf	2 175		
Deformación	16	Deformación	20	Deformación	20		
Corrección	1 906,5	Corrección	1 560	Corrección	2 022,75		
1 PASTILLA 5,5 %		2 PASTILLA 5,5 %		3 PASTILLA 5,5 %		PASTILLA 5,5 %	
Carga	200	Carga	147	Carga	280	promedio	1 786,5
lbf	1 900	lbf	1 400	lbf	2 650		
Deformación	15	Deformación	20	Deformación	20		
Corrección	1 691	Corrección	1 204	Corrección	2 464,5		
1 PASTILLA 6 %		2 PASTILLA 6 %		3 PASTILLA 6 %		PASTILLA 6 %	
Carga	185	Carga	190	Carga	174	promedio	1 563,67
lbf	1 750	lbf	1 800	lbf	1 650		
Deformación	20	Deformación	16	Deformación	16		
Corrección	1 505	Corrección	1 602	Corrección	1 584		

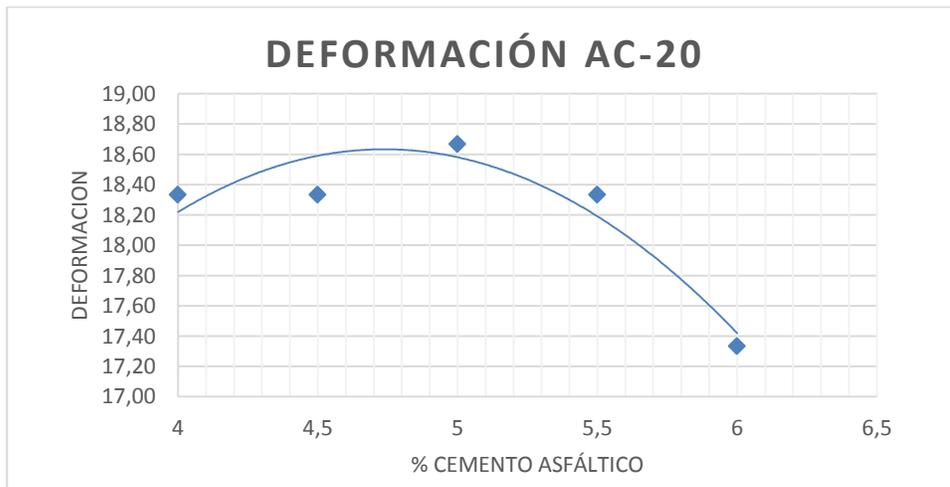
Fuente: elaboración propia.

Figura 20. **Gráfica de resultados de estabilidad-flujo Marshall de mezcla asfáltica AC-20**



Fuente: elaboración propia.

Figura 21. **Gráfica de resultados de deformación Marshall de mezcla asfáltica AC-20**



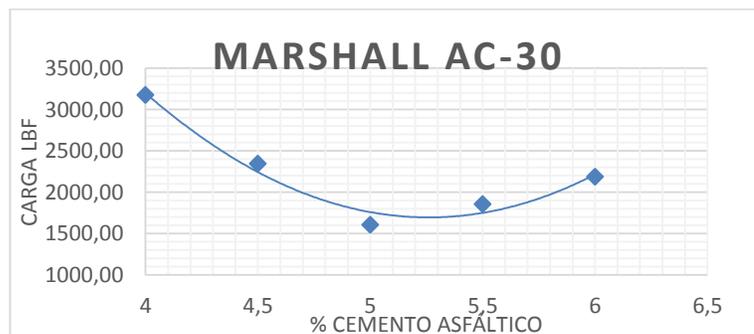
Fuente: elaboración propia.

Tabla XXIII. **Resultados de estabilidad-flujo Marshall de mezcla asfáltica AC-30**

AC-30							
1 PASTILLA 4 %		2 PASTILLA 4 %		3 PASTILLA 4 %		PASTILLA 4 %	
Carga	282	Carga	370	Carga	397	promedio	3176.00
lbf	2 675	lbf	3 500	lbf	3 750		
Deformación	10	Deformación	10	Deformación	10		
Corrección	2 568	Corrección	3 360	Corrección	3 600		
1 PASTILLA 4,5 %		2 PASTILLA 4,5 %		3 PASTILLA 4,5 %		PASTILLA 4,5%	
Carga	278	Carga	255	Carga	244	promedio	2344.75
lbf	2 650	lbf	2 425	lbf	2 325		
Deformación	9	Deformación	15	Deformación	12		
Corrección	2 544	Corrección	2 328	Corrección	2 162,25		
1 PASTILLA 5%		2 PASTILLA 5 %		3 PASTILLA 5 %		PASTILLA 5 %	
Carga	115	Carga	180	Carga	277	promedio	1 605,42
lbf	1 100	lbf	1 700	lbf	2625		
Deformación	30	Deformación	15	Deformación	14		
Corrección	913	Corrección	1 462	Corrección	2441,25		
1 PASTILLA 5,5 %		2 PASTILLA 5,5 %		3 PASTILLA 5,5%		PASTILLA 5,5%	
Carga	145	Carga	325	Carga	150	promedio	1 855,67
lbf	1 375	lbf	3 075	lbf	1425		
Deformación	20	Deformación	15	Deformación	15		
Corrección	1 223,75	Corrección	3 075	Corrección	1268,25		
1 PASTILLA 6 %		2 PASTILLA 6 %		3 PASTILLA 6%		PASTILLA 6 %	
Carga	245	Carga	282	Carga	190	promedio	2 189,00
lbf	2 325	lbf	2 675	lbf	1 800		
Deformación	18	Deformación	20	Deformación	15		
Corrección	2 325	Corrección	2 568	Corrección	1 674		

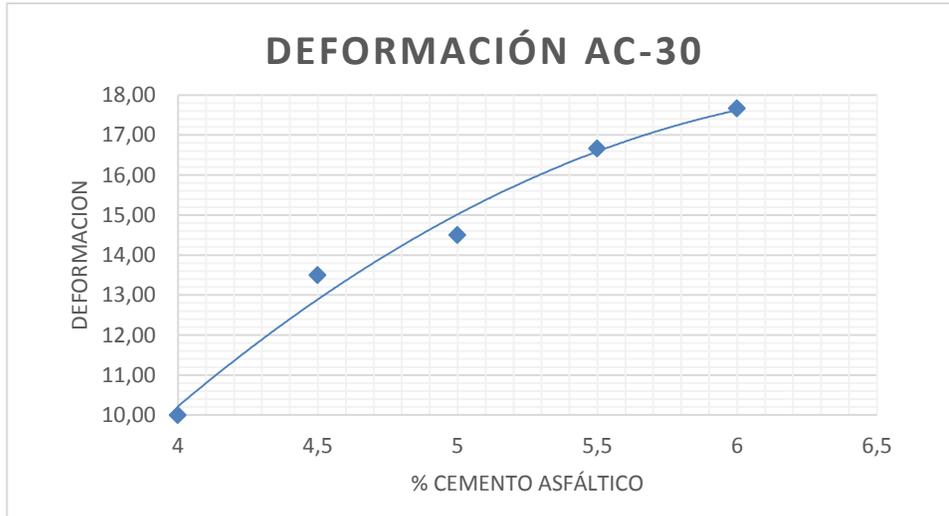
Fuente: elaboración propia.

Figura 22. **Gráfica de resultados de estabilidad-flujo Marshall de mezcla asfáltica AC-30**



Fuente: elaboración propia.

Figura 23. **Gráfica de resultados de deformación Marshall de mezcla asfáltica AC-30**



Fuente: elaboración propia.

Tabla XXIV. **Resultados de estabilidad-flujo Marshall de mezcla asfáltica AC-40**

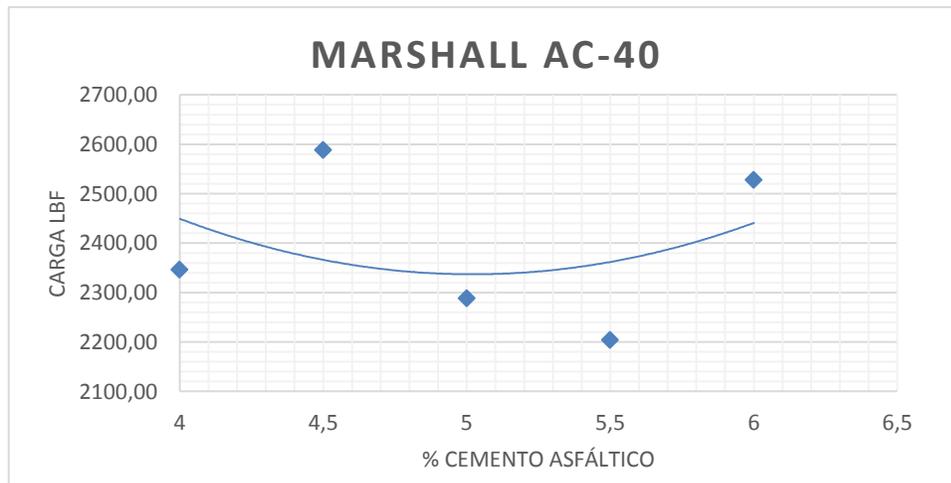
AC-40							
1 PASTILLA 4 %		2 PASTILLA 4 %		3 PASTILLA 4 %		1 PASTILLA 4 %	
Carga	366	Carga	220	Carga	260	promedio	2346,25
Lbf	3450	lbf	2 100	Lbf	2475		
Deformación	15	Deformación	10	Deformación	13		
Corrección	2 967	Corrección	1 869	Corrección	2 202,75		
1 PASTILLA 4,5 %		2 PASTILLA 4,5 %		3 PASTILLA 4,5 %		1 PASTILLA 4,5 %	
Carga	297	Carga	295	Carga	289	promedio	2588,50
Lbf	2 800	lbf	2 800	Lbf	2750		
Deformación	13	Deformación	16	Deformación	12		
Corrección	2 604	Corrección	2 604	Corrección	2 557,5		

Continuación de la tabla XXIV.

1 PASTILLA 5 %		2 PASTILLA 5 %		3 PASTILLA 5%		1 PASTILLA 5 %	
Carga	299	Carga	201	Carga	275	promedio	2 288,67
lbf	2 850	lbf	1 900	Lbf	2600		
Deformación	15	Deformación	11	Deformación	12		
Corrección	2 736	Corrección	1 634	Corrección	2496		
1 PASTILLA 5,5 %		2 PASTILLA 5,5 %		3 PASTILLA 5.5%		1 PASTILLA 5,5 %	
Carga	210	Carga	259	Carga	262	promedio	2204.00
lbf	2 000	lbf	2 450	Lbf	2500		
Deformación	12	Deformación	16	Deformación	11		
Corrección	1860	Corrección	2 352	Corrección	2400		
1 PASTILLA 6 %		2 PASTILLA 6 %		3 PASTILLA 6%		1 PASTILLA 6 %	
Carga	255	Carga	302	Carga	285	promedio	2 527,75
lbf	2 425	lbf	2 850	Lbf	2 700		
Deformación	16	Deformación	25	Deformación	20		
Corrección	2 255,25	Corrección	2736	Corrección	2592		

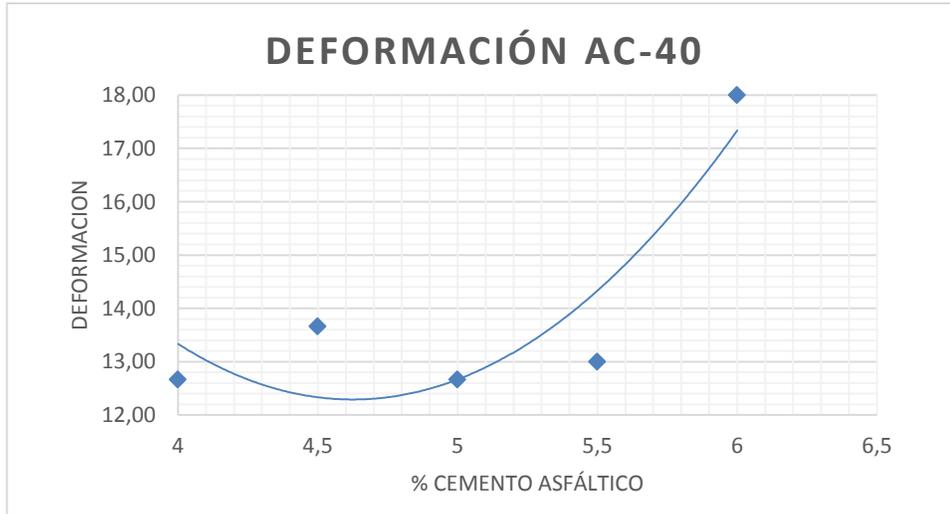
Fuente: elaboración propia.

Figura 24. **Gráfica de resultados de estabilidad-flujo Marshall de mezcla asfáltica AC-40**



Fuente: elaboración propia.

Figura 25. **Gráfica de resultados de deformación Marshall de mezcla asfáltica AC-40**



Fuente: elaboración propia.

2.6. Porcentaje de vacíos en el agregado mineral

A continuación, se presenta la metodología utilizada en el porcentaje de vacíos en el agregado mineral.

2.6.1. Metodología

ASTM D 1559: *Test method for resistance of plastic flow of bituminous mixtures using Marshall Apparatus.*

2.6.2. Procedimiento

- Calcular la gravedad específica *ulk* de la mezcla asfáltica.

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

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

Donde:

VAM= porcentaje de vacíos en el agregado mineral

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

P_s = porcentaje de agregados en la mezcla asfáltica

G_{sb} = gravedad específica bruta de los agregados

2.6.3. Resultados de vacíos de agregado mineral

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

Ejemplo de cálculo:

Datos:

G_{mb} : 2,27

P_s : 96 %

G_{sb} : 2,60

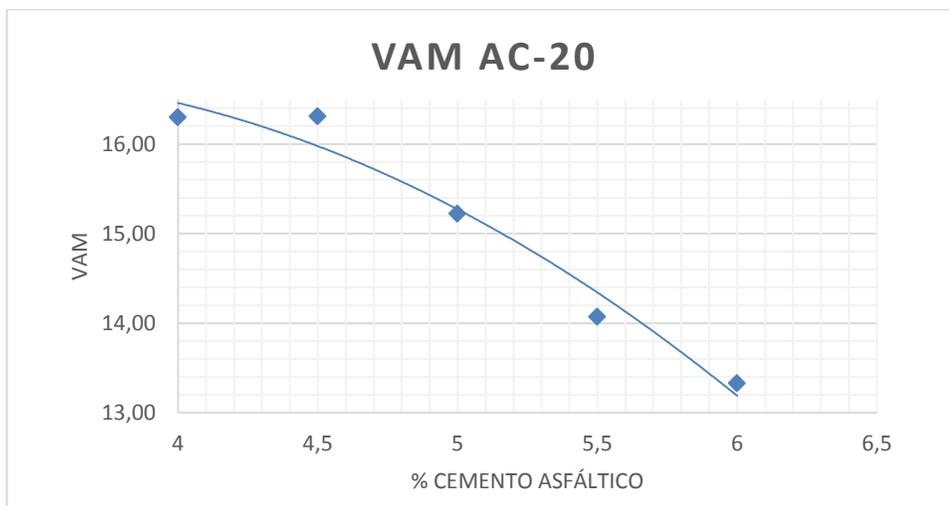
$$VAM = 100 - \frac{2,27 * 96}{2,60} = 16,30 \%$$

Tabla XXV. **Resultados de porcentaje de vacíos en el agregado mineral AC-20**

AC-20							
PASTILLA 4 %							
Gmb	2,27	Ps	96	Gsb	2,6	VAM	16,30
PASTILLA 4,5 %							
Gmb	2,28	Ps	95,5	Gsb	2,6	VAM	16,31
PASTILLA 5 %							
Gmb	2,32	Ps	95	Gsb	2,6	VAM	15,22
PASTILLA 5,5 %							
Gmb	2,36	Ps	94,5	Gsb	2,6	VAM	14,07
PASTILLA 6 %							
Gmb	2,40	Ps	94	Gsb	2,6	VAM	13,33

Fuente: elaboración propia.

Figura 26. **Gráfica de resultados de porcentaje de vacíos en el agregado mineral AC-20**



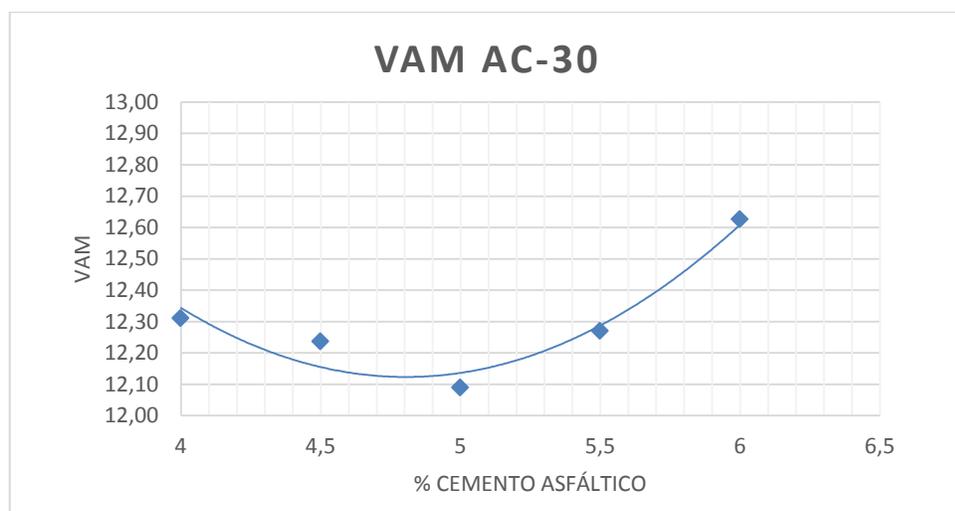
Fuente: elaboración propia.

Tabla XXVI. **Resultados de porcentaje de vacíos en el agregado mineral AC-30**

AC-30							
PASTILLA 4 %							
Gmb	2,37	Ps	96	Gsb	2,6	VAM	12,31
PASTILLA 4,5 %							
Gmb	2,39	Ps	95,5	Gsb	2,6	VAM	12,24
PASTILLA 5 %							
Gmb	2,41	Ps	95	Gsb	2,6	VAM	12,09
PASTILLA 5,5 %							
Gmb	2,41	Ps	94,5	Gsb	2,6	VAM	12,27
PASTILLA 6 %							
Gmb	2,42	Ps	94	Gsb	2,6	VAM	12,63

Fuente: elaboración propia.

Figura 27. **Gráfica de resultados de porcentaje de vacíos en el agregado mineral AC-30**



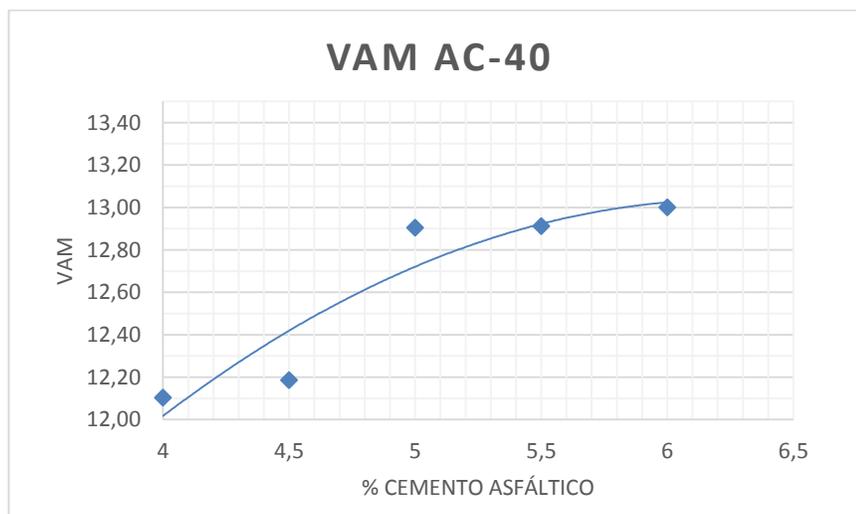
Fuente: elaboración propia.

Tabla XXVII. **Resultados de porcentaje de vacíos en el agregado mineral AC-40**

AC-40							
PASTILLA 4 %							
Gmb	2,38	Ps	96	Gsb	2,6	VAM	12,10
PASTILLA 4,5 %							
Gmb	2,39	Ps	95,5	Gsb	2,6	VAM	12,19
PASTILLA 5 %							
Gmb	2,38	Ps	95	Gsb	2,6	VAM	12,90
PASTILLA 5,5 %							
Gmb	2,40	Ps	94,5	Gsb	2,6	VAM	12,91
PASTILLA 6 %							
Gmb	2,41	Ps	94	Gsb	2,6	VAM	13,00

Fuente: elaboración propia.

Figura 28. **Gráfica de resultados de porcentaje de vacíos en el agregado mineral AC-40**



Fuente: elaboración propia.

2.7. Análisis de resultados

A continuación, se presenta un análisis de resultados correspondientes a cada uno de los ensayos realizados

2.7.1. Tabulación de resultados

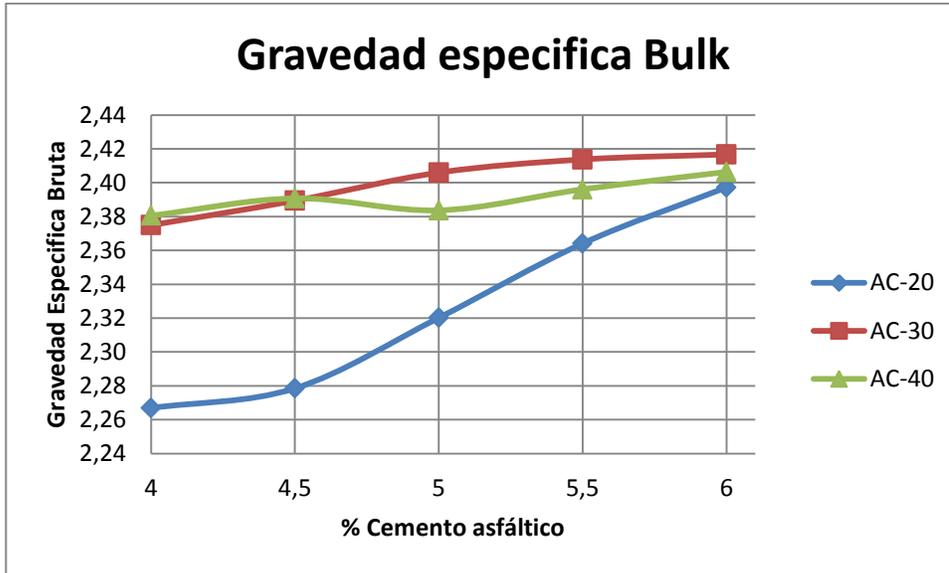
A continuación, se presenta un cuadro de resumen de los resultados correspondientes a cada uno de los ensayos realizados.

Tabla XXVIII. Cuadro comparativo de gravedad específica bulk

Gravedad específica bulk			
% CEMENTO ASFÁLTICO	AC-20	AC-30	AC-40
4	2,27	2,37	2,38
4,5	2,28	2,39	2,39
5	2,32	2,41	2,38
5,5	2,36	2,41	2,40
6	2,40	2,42	2,41

Fuente: elaboración.

Figura 29. Gráfico comparativo de gravedad específica bulk



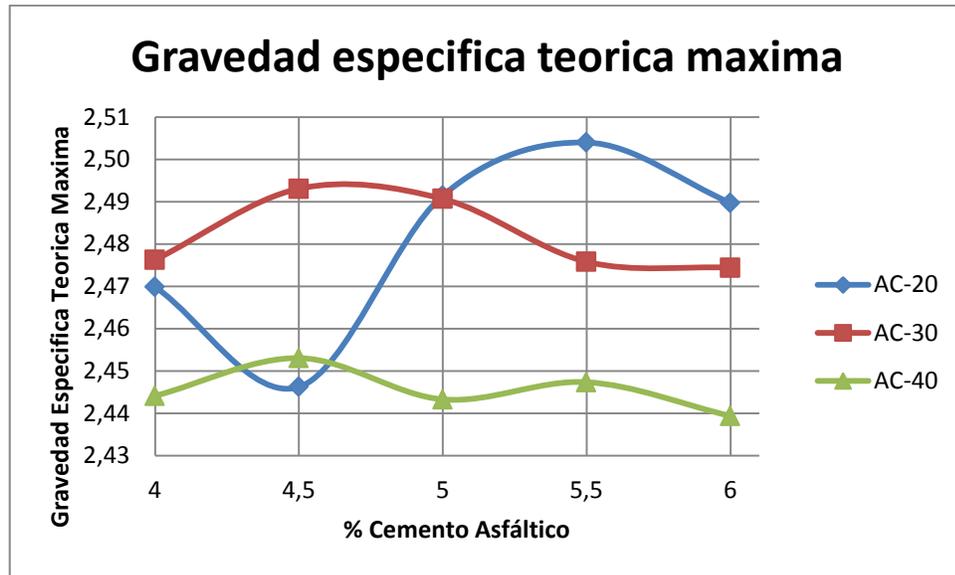
Fuente: elaboración propia.

Tabla XXIX. Cuadro comparativo de gravedad específica teórica máxima

Gravedad específica teórica máxima			
% CEMENTO ASFÁLTICO	AC-20	AC-30	AC-40
4	2,47	2,48	2,44
4.5	2,45	2,49	2,45
5	2,49	2,49	2,44
5.5	2,50	2,48	2,45
6	2,49	2,47	2,44

Fuente: elaboración propia.

Figura 30. Gráfico comparativo de gravedad específica teórica máxima



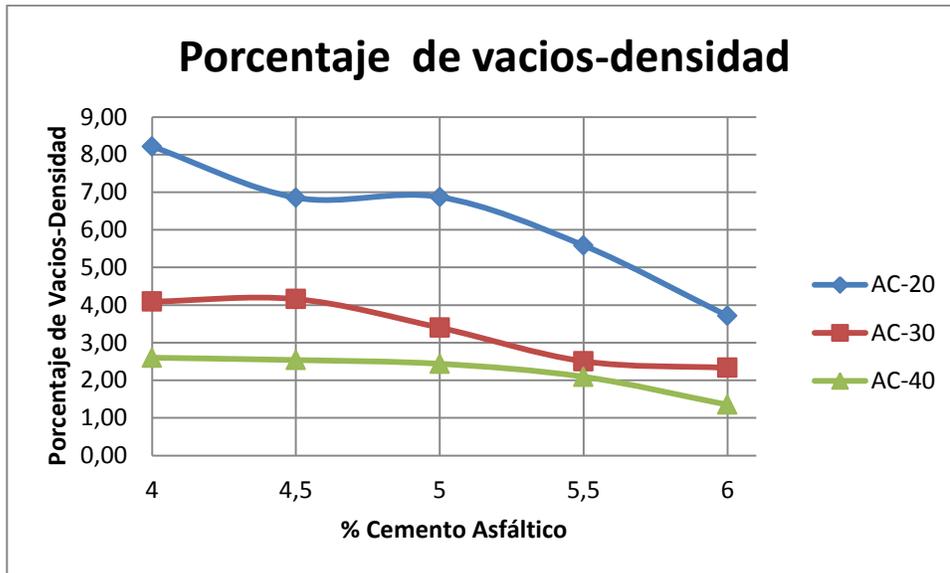
Fuente: elaboración propia.

Tabla XXX. Cuadro comparativo de porcentaje de vacíos-densidad

Porcentaje de vacíos-densidad			
% CEMENTO ASFÁLTICO	AC-20	AC-30	AC-40
4	8,22	4,09	2,60
4.5	6,86	4,16	2,54
5	6,87	3,40	2,44
5.5	5,58	2,51	2,09
6	3,71	2,33	1,35

Fuente: elaboración propia.

Figura 31. **Gráfico comparativo de porcentaje de vacíos-densidad**



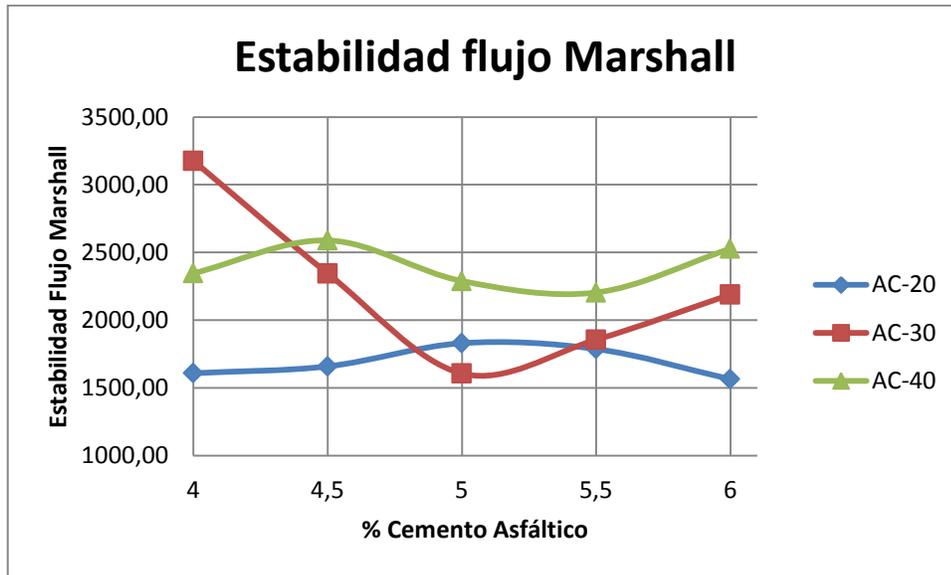
Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXI. **Cuadro comparativo de estabilidad Marshall**

Estabilidad flujo Marshall			
% CEMENTO ASFÁLTICO	AC-20	AC-30	AC-40
4	1 607,83	3 176,00	2 346,25
4.5	1 658,33	2 344,75	2 588,50
5	1 829,75	1 605,42	2 288,67
5.5	1 786,50	1 855,67	2 204,00
6	1 563,67	2 189,00	2 527,75

Fuente: elaboración propia.

Figura 32. Gráfico comparativo de estabilidad Marshall



Fuente: elaboración propia.

2.7.2. Interpretación de resultados

A continuación, se presenta el análisis de los resultados de los diferentes ensayos realizados a los tres tipos de mezcla asfáltica. En esta sección se dará a conocer si las mezclas cumplen con los parámetros de diseño indicados en Las Especificaciones Generales Para Construcción de Carreteras y Puentes de la Dirección General de Caminos, para cada uno de los respectivos ensayos realizados.

El análisis se presenta en forma separada para las diferentes mezclas, sin embargo, cabe mencionar que para lograr un análisis más profundo de los resultados este fue obtenido de la interpretación tanto de las tablas y los gráficos comparativos entre ambas mezclas.

2.7.2.1. Mezcla asfáltica AC-20

El contenido óptimo de cemento asfáltico para el diseño de mezcla asfáltica AC-20 que se observa en la grafica de porcentaje de vacíos vs cemento asfáltico (ver figura 17) propuesto se encuentra en un rango de 5,5 a 6 %.

Este rango se determinó mediante el resultado de porcentaje de vacíos en la mezcla, ya que con esta cantidad de ligante el porcentaje se encuentra dentro de la sección 401 de las Especificaciones Generales para la Construcción de Carreteras y Puentes de la Direccion General de Caminos, que tienen un rango de 3 a 5 %.

Al observar la gráfica de gravedad especifica Bulk (ver figura 9) se observa que el peso específico va en aumento. Esto es debido a que se incrementa el porcentaje de bitumen y esto provoca que disminuyan los vacios, como se observa en la gráfica de densidad teórica máxima (ver figura 14). Esta gráfica en un punto tiende a aumentar debido a que la densidad del bitumen tiene una densidad similar a la del agua y esto provoca que aumente. El porcentaje de vacíos en el agregado mineral, que en este caso es el polvo de roca, disminuye al incrementarles el contenido de asfalto, tendiendo hacia un mínimo.

Por lo tanto, este ensayo no cumplen con las Especificaciones Generales para Construcción de Carreteras y Puentes de la Dirección General de Caminos; al analizar los ensayos de la norma ASTM D1559 se evidencia que no cumple con todos los parámetros de las características físicas y mecánicas. Lo anterior indica que se le tendría que hacer cambios a la granulometría: un

mayor porcentaje de finos para que cumpla con las características físicas y mecánicas.

2.7.2.2. Mezcla asfáltica AC-30

El contenido óptimo de cemento asfáltico para el diseño de mezcla asfáltica AC-30 que se observa en la gráfica de porcentaje propuesto de vacíos vs cemento asfáltico (ver figura 18) se encuentra en un rango de 4 a 5,1 %.

Este rango se determinó mediante el resultado de porcentaje de vacíos en la mezcla, ya que con esta cantidad de ligante, el porcentaje se encuentra dentro de la sección 401 de las Especificaciones Generales para la Construcción de Carreteras y Puentes de la Dirección General de Caminos, ya que los parámetros de diseño tienen un rango de 3 a 5 %.

Al observar la gráfica de gravedad específica bulk, (ver figura 10), se observa que el peso específico va en aumento. Esto es debido a que se incrementa el porcentaje de bitumen, lo cual provoca que disminuyan los vacíos, tal como se observa en la gráfica de densidad teórica máxima (ver figura 15). Esta gráfica tiende a aumentar y luego a disminuir debido a que la densidad del bitumen tiene una densidad similar a la del agua y esto provoca que aumente y luego disminuya porque los vacíos van en aumento en una escala baja.

El porcentaje de vacíos en el agregado mineral, que es en este caso el polvo de roca, disminuye al incrementarles el contenido de asfalto hasta alcanzar un mínimo a partir del cual comienza a aumentar. Por lo tanto, este ensayo cumple con las especificaciones al utilizar el contenido óptimo de cemento asfáltico indicado en Las Especificaciones Generales para

Construcción de Carreteras y Puentes de la Dirección General de Caminos. Al analizar los ensayos de la norma ASTM D1559 se evidencia que sí cumple con los parámetros de características físicas y mecánicas. Lo anterior es debido a que la granulometría es acorde y cumple con las características físicas y mecánicas.

2.7.2.3. Mezcla asfáltica AC-40

El contenido óptimo de cemento asfáltico para el diseño de mezcla asfáltica AC-40 que se observa en la gráfica de porcentaje de vacíos vs cemento asfáltico, (ver figura 19), no se encuentra entre los rangos propuestos.

Este rango se determinó mediante el ensayo de porcentaje de vacíos en la mezcla, ya que con esta cantidad de ligante el porcentaje de vacíos no se encuentra dentro de la sección 401 de las Especificaciones Generales para la Construcción de Carreteras y Puentes de la Dirección General de Caminos, que tienen un rango de 3 a 5 %.

Al observar la gráfica de gravedad específica bulk, (ver figura 11), se observa que el peso específico va en aumento. Esto es debido a que se incrementa el porcentaje de bitumen, lo cual provoca que disminuyan los vacíos, tal como se observa en la gráfica de densidad teórica máxima (ver figura 16). Esta gráfica tiende a aumentar y luego a disminuir debido a que la densidad del bitumen tiene una densidad similar a la del agua y esto provoca que aumente y luego disminuya porque los vacíos van en aumento en una escala baja.

El porcentaje de vacíos en el agregado mineral, que es en este caso el polvo de roca, aumenta con el contenido de asfalto hasta un máximo y después

comienza a decrecer. Por lo tanto, este ensayo sí cumplen con las especificaciones al utilizar el contenido óptimo de cemento asfáltico indicado en Las Especificaciones Generales para Construcción de Carreteras y Puentes de la Dirección General de Caminos. Al analizar los ensayo de la norma ASTM D1559 se evidencia que no cumple con los parámetros de características físicas y mecánicas, lo que indica que se tendrían que realizar cambios a la granulometría con un mayor porcentaje de gruesos para que se encuentre dentro de los parámetros indicados en la norma.

CONCLUSIONES

1. Las características de los cementos asfálticos AC-20, AC-30 y AC-40 son muy distintas, por lo cual la utilización de un mismo diseño granulométrico no es suficiente para tener mezclas asfálticas con características físicas y mecánicas optimas, aunque el diseño granulométrico esté en el rango que se da en la sección 401 de la DCG. Esto conlleva que es preciso realizar más de un diseño granulométrico para optimizar la calidad de las mezclas asfálticas.
2. Los resultados obtenidos de los porcentajes de vacíos de los diferentes tipos de cementos asfálticos nos indican que, dependiendo del tipo de cemento asfáltico utilizado, se tiene que ir aumentando o disminuyendo según sea el caso; ya que estos por sus características de viscosidad hacen que en el cemento asfáltico AC-20, AC-30 y AC-40 vaya en aumento la capa de recubrimiento, y esto, a su vez, ocasiona que los porcentajes de vacíos en cemento asfáltico AC-20 sean mayores que los de AC-30 y AC-40, y que con el cemento asfáltico AC-40 disminuyan los porcentajes de vacíos en un rango mayor comparados con los diferentes tipos de cemento asfáltico AC-20 y AC-30.
3. La deformación en los tres tipos de diseños de mezcla asfálticas fue mayor en donde se utilizó AC-20, lo cual indica una menor adherencia entre partículas debido a la viscosidad. Las mezclas realizadas con AC-30 y AC-40 mostraron menor deformación antes de fallar debido a que la adherencia es mayor entre las partículas de agregado pétreo evitando las deformaciones por carga.

4. Con relación al ensayo Marshall se observa que la carga soportada por las diferentes mezclas asfálticas está dentro del rango que indica la norma ASTM D1559. Esto indica que con respecto a carga sí cumple, pero siempre el cemento asfáltico AC-20 es el que soporta menor carga y mayor deformación con respecto a los otros cementos asfálticos comparados. Lo anterior es debido a las características de adherencia que posee este tipo de cemento asfáltico AC-20, ya que es menor y esto provoca que no soporte tanta carga.

5. Con base en los ensayos que se realizaron, cabe mencionar que la ubicación en donde se desee colocar la mezcla asfáltica alterara los resultados, ya que los resultados del presente trabajo se analizaron en condiciones controladas en el laboratorio del Centro de Investigaciones de la Facultad de Ingeniería.

RECOMENDACIONES

1. Para obtener resultados confiables de los ensayos realizados a la mezcla asfáltica, se recomienda realizar de tres a cuatro probetas por cada variación de contenido de asfalto en la mezcla. Esto se hace ya que aunque se utilice el mismo procedimiento para realizar las probetas, estas no son 100 % homogéneas entre sí. Realizar tres probetas por contenido de asfalto tiene el fin de poder obtener un resultado confiable del ensayo a partir de un promedio entre las dos probetas que tengan mayor similitud en sus datos numéricos.
2. Para tener una mezcla de cemento asfáltico que cumpla las especificaciones técnicas de la DGC se recomienda que se realice más de un diseño granulométrico por cada tipo de cemento asfáltico que se vaya a utilizar. De esta forma mejoran las propiedades físicas y mecánicas para que la mezcla asfáltica presente propiedades óptimas.
3. Por medio del ensayo de porcentaje de vacíos se debe determinar el contenido de asfalto óptimo para el diseño de mezcla propuesto. Posteriormente, con esta cantidad de asfalto se debe de comprobar que la mezcla cumpla con los parámetros de diseño de los respectivos ensayos indicados en las *Especificaciones generales para la construcción de carreteras y puentes*.

BIBLIOGRAFÍA

1. American Society for Testing and Materials. *Test method for resistance of plastic flow of bituminous mixtures using Marshall Apparatus* ASTM D1559. EUA: ASTM, 2001. 4 p.
2. Dirección General de Caminos. *Especificaciones generales para construcción de carreteras y puentes*. Guatemala: Cámara Guatemalteca de la Construcción, 2001. 724 p.
3. Instituto Mexicano del Transporte. *Análisis de la influencia de método de compactación en el comportamiento mecánico de mezclas asfálticas*. México: Secretaría de Comunicaciones y Transportes, 2004. 46 p.
4. 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. 626 p.
5. MINAYA GONZÁLEZ, Silene; ORDÓÑEZ HUAMÁN, Abel. *Diseño moderno de pavimentos asfálticos*. M. Sc. Silene Minaya González. M. Sc. e Ing. Abel Ordóñez Huamán. 2a ed. Lima, 2006. 7 p.

APÉNDICES

Apéndice 1. **Juego de tamices utilizado para la separación por tamaño de las partículas del agregado pétreo**



Fuente: elaboración propia. Laboratorio de Mecánica de Suelos. Centro de investigaciones de Ingeniería, USAC.

Apéndice 2. Recipiente con la cantidad de cada uno de los diferentes tamaños de material del diseño de mezcla, previo a ser mezclado para la realización de una pastilla de mezcla asfáltica de 1 200 g



Fuente: elaboración propia. Sección de asfaltos. Centro de investigaciones de Ingeniería, USAC.

Apéndice 3. Medición de temperatura de la mezcla colocada en el molde previo a la compactación, por medio del termómetro de vástago



Fuente: elaboración propia. Sección de asfaltos. Centro de investigaciones de Ingeniería, USAC.

**Apéndice 4. Espécimen de mezcla asfáltica colocado en las mordazas
para la realización del ensayo de estabilidad y flujo Marshall**



Fuente: elaboración propia. Sección de asfaltos. Centro de investigaciones de Ingeniería, USAC.

ANEXOS

Anexo 1. Tabla Humboldt Mfg. Co. corrección estabilidad Marshall

HUMBOLDT MFG. CO.
7300 W. AGATITE AVE.
NORRIDGE, IL 60706

4 SEP 200

RECOMMEND RECALIBRATION ONE YEAR FROM START OF USE AFTER LAST CALIBRATION
CALIBRATION FOR MODEL H-4454.100 11000 LBF SERIAL 2366 BY *B. Backerman*
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. Co. p. 1.

Anexo 2. **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: Dirección General de Caminos, Especificaciones Generales para Construcción de Carreteras y Puentes. Pág. 489.

Anexo 3. Densidad específica teórica máxima



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



INFORME NUMERO: 037 L.B.A.

ORDEN DE TRABAJO: 35962

No. 09502

INTERESADO: JORGE ANIBAL CORONADO VELIZ

PROYECTO: TESIS: CARACTERIZACION Y ANALISIS COMPARATIVO DE DISEÑO DE MEZCLAS ASFALTICAS EN CALIENTE, EMPLEANDO CEMENTO ASFALTICO AC-20, AC-30 Y AC-40

DIRECCION: CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERIA

ENSAYO: DENSIDAD ESPECIFICA TEORICA MAXIMA "RICE" ASTM 2041

FECHA: 20 DE SEPTIEMBRE DEL 2016

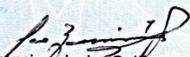
MUESTRA: MEZCLA ASFALTICA EN CALIENTE

PROBETA	GMM
4% AC 20	2,4699
4,5% AC 20	2,4462
5% AC 20	2,4914
5,5% AC 20	2,5040
6% AC 20	2,4897
4% AC 30	2,4762
4,5% AC 30	2,4931
5% AC 30	2,4907
5,5% AC 30	2,4758
6% AC 30	2,4744

PROBETA	GMM
4% AC 40	2,4441
4,5% AC 40	2,4530
5% AC 40	2,4433
5,5% AC 40	2,4473
6% AC 40	2,4393

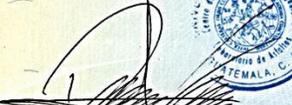
Atentamente,

Vo. Bo. :



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





Ing. Dario Francisco Lucas Mazarregos
Jefe Laboratorio de Asfaltos



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

Fuente: Centro de Investigaciones de Ingeniería, Facultad de Ingeniería, USAC..

Anexo 4. Densidad específica de bulk



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



INFORME NUMERO: 038 L.B.A ORDEN DE TRABAJO: 35962 No. **09503**

INTERESADO: JORGE ANIBAL CORONADO VELIZ

PROYECTO: TESIS: CARACTERIZACION Y ANALISIS COMPARATIVO DE DISEÑO DE MEZCLAS ASFALTICAS EN CALIENTE, EMPLEANDO CEMENTO ASFALTICO AC-20, AC-30 Y AC-40

DIRECCION: CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERIA

ENSAYO: DENSIDAD ESPECIFICA DE BULK ASTM 2726-05a

FECHA: 20 DE SEPTIEMBRE DEL 2016

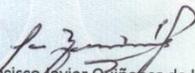
MUESTRA: MEZCLA ASFALTICA EN CALIENTE

PROBETA	GRAVEDAD ESPECIFICA
1 AC 20 4 %	2,247
2 AC 20 4 %	2,276
3 AC 20 4 %	2,278
4 AC 20 4,5 %	2,317
5 AC 20 4,5 %	2,265
6 AC 20 4,5 %	2,254
7 AC 20 5 %	2,292
8 AC 20 5 %	2,303
9 AC 20 5 %	2,365
10 AC 20 5,5 %	2,345
11 AC 20 5,5 %	2,346

PROBETA	GRAVEDAD ESPECIFICA
12 AC 20 5,5%	2,401
13 AC 20 6%	2,373
14 AC 20 6%	2,407
15 AC 20 6%	2,411
16 AC 30 4%	2,370
17 AC 30 4%	2,393
18 AC 30 4%	2,362
19 AC 30 4,5%	2,391
20 AC 30 4,5%	2,397
21 AC 30 4,5%	2,381
22 AC 30 5%	2,402

Atentamente,

Vo. Bo. :



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





Ing. Dario Francisco Lucas Mazariegos
Jefe Laboratorio de Asfaltos



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

Fuente: Centro de Investigaciones de Ingeniería, Facultad de Ingeniería, USAC.

Anexo 5. Densidad específica de bulk



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



INFORME NUMERO: 039 L.B.A ORDEN DE TRABAJO: 35962 No. 09504

INTERESADO: JORGE ANIBAL CORONADO VELIZ

PROYECTO: TESIS: CARACTERIZACION Y ANALISIS COMPARATIVO DE DISEÑO DE MEZCLAS ASFALTICAS EN CALIENTE, EMPLEANDO CEMENTO ASFALTICO AC-20, AC-30 Y AC-40

DIRECCION: CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERIA

ENSAYO: DENSIDAD ESPECIFICA DE BULK ASTM 2726-05a

FECHA: 20 DE SEPTIEMBRE DEL 2016

MUESTRA: MEZCLA ASFALTICA EN CALIENTE

PROBETA	GRAVEDAD ESPECIFICA
23 AC 30 5%	2,401
24 AC 30 5%	2,388
25 AC 30 5,5%	2,405
26 AC 30 5,5%	2,440
27 AC 30 5,5%	2,396
28 AC 30 6%	2,441
29 AC 30 6%	2,434
30 AC 30 6%	2,375
31 AC 40 4 %	2,388
32 AC 40 4 %	2,388
33 AC 40 4 %	2,368

PROBETA	GRAVEDAD ESPECIFICA
34 AC 40 4,5%	2,377
35 AC 40 4,5%	2,397
36 AC 40 4,5%	2,398
37 AC 40 5%	2,407
38 AC 40 5%	2,370
39 AC 40 5%	2,374
40 AC 40 5,5%	2,397
41 AC 40 5,5%	2,416
42 AC 40 5,5%	2,376
43 AC 40 6%	2,400
44 AC 40 6%	2,418
45 AC 40 6%	2,4012

Atentamente,

Vo. Bo. : 

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



Ing. Darío Francisco Lucas Mazariegos
Jefe Laboratorio de Asfaltos



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

Fuente: Centro de Investigaciones de Ingeniería, Facultad de Ingeniería, USAC.

Anexo 6. Estabilidad de flujo Marshall



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



No. 6096

INFORME NUMERO: 031 L.B.A.

ORDEN DE TRABAJO: 35962

INTERESADO: JORGE ANIBAL CORONADO VELIZ

PROYECTO: TESIS: CARACTERIZACION Y ANALISIS COMPARATIVO DE DISEÑO DE MEZCLAS ASFALTICAS EN CALIENTE, EMPLEANDO CEMENTO ASFALTICO AC-20, AC-30 Y AC-40

DIRECCION: CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERIA

ENSAYO: ESTABILIDAD Y FLUJO MARSHALL ASTM D 1559

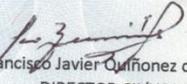
FECHA: 20 DE SEPTIEMBRE DEL 2016

MUESTRA: MEZCLA ASFALTICA EN CALIENTE

PROBETA	ESTABILIDAD LBF	FLUJO 0,01"
1 AC 20 4%	1452,50	20
2 AC 20 4%	1813,50	20
3 AC 20 4%	1557,50	15
4 AC 20 4,5%	1696,50	18
5 AC 20 4,5%	1743,00	17
6 AC 20 4,5%	1535,50	20
7 AC 20 5%	1906,50	16
8 AC 20 5%	1560,00	20

Atentamente,

Vo. Bo. :



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




Ing. Mario Francisco Lucas Mazariegos
Jefe Laboratorio de Asfaltos

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

Fuente: Centro de Investigaciones de Ingeniería, Facultad de Ingeniería, USAC.

Anexo 7. Estabilidad de flujo Marshall



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



No. 6097

INFORME NUMERO: 032 L.B.A.

ORDEN DE TRABAJO: 35962

INTERESADO: JORGE ANIBAL CORONADO VELIZ

PROYECTO: TESIS: CARACTERIZACION Y ANALISIS COMPARATIVO DE DISEÑO DE MEZCLAS ASFALTICAS EN CALIENTE, EMPLEANDO CEMENTO ASFALTICO AC-20, AC-30 Y AC-40

DIRECCION: CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERIA

ENSAYO: ESTABILIDAD Y FLUJO MARSHALL ASTM D 1559

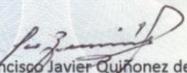
FECHA: 20 DE SEPTIEMBRE DEL 2016

MUESTRA: MEZCLA ASFALTICA EN CALIENTE

PROBETA	ESTABILIDAD LBF	FLUJO 0,01"
9 AC 20 5%	2022,75	20
10 AC 20 5,5%	1691,00	15
11 AC 20 5,5%	1204,00	20
12 AC 20 5,5%	2464,50	20
13 AC 20 6%	1505,00	20
14 AC 20 6%	1602,00	16
15 AC 20 6%	1584,00	16
16 AC 30 4%	2568,00	10

Atentamente,

Vo. Bo. :



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





Ing. Darío Fernández Lucas Mazariegos
Jefe Laboratorio de Asfaltos



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

Fuente: Centro de Investigaciones de Ingeniería, Facultad de Ingeniería, USAC.

Anexo 8. Estabilidad de flujo Marshall



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



No. 6098

INFORME NUMERO: 033 L.B.A.

ORDEN DE TRABAJO: 35962

INTERESADO: JORGE ANIBAL CORONADO VELIZ

PROYECTO: TESIS: CARACTERIZACION Y ANALISIS COMPARATIVO DE DISEÑO DE MEZCLAS ASFALTICAS EN CALIENTE, EMPLEANDO CEMENTO ASFALTICO AC-20, AC-30 Y AC-40

DIRECCION: CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERIA

ENSAYO: ESTABILIDAD Y FLUJO MARSHALL ASTM D 1559

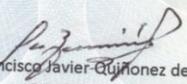
FECHA: 20 DE SEPTIEMBRE DEL 2016

MUESTRA: MEZCLA ASFALTICA EN CALIENTE

PROBETA	ESTABILIDAD LBF	FLUJO 0,01"
17 AC 30 4%	3360,00	10
18 AC 30 4%	3600,00	10
19 AC 30 4,5%	2544,00	9
20 AC 30 4,5%	2328,00	15
21 AC 30 4,5%	2162,25	12
22 AC 30 5%	913,00	30
23 AC 30 5%	1462,00	15
24 AC 30 5%	2441,25	14

Atentamente,

Vo. Bo. :



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





Ing. Darío Francisco Lucas Mazariegos
Laboratorio de Asfaltos



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

Fuente: Centro de Investigaciones de Ingeniería, Facultad de Ingeniería, USAC.

Anexo 9. Estabilidad de flujo Marshall



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



No. 6099

INFORME NUMERO: 034 L.B.A.

ORDEN DE TRABAJO: 35962

INTERESADO: JORGE ANIBAL CORONADO VELIZ

PROYECTO: TESIS: CARACTERIZACION Y ANALISIS COMPARATIVO DE DISEÑO DE MEZCLAS ASFALTICAS EN CALIENTE, EMPLEANDO CEMENTO ASFALTICO AC-20, AC-30 Y AC-40

DIRECCION: CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERIA

ENSAYO: ESTABILIDAD Y FLUJO MARSHALL ASTM D 1559

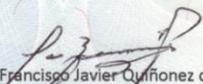
FECHA: 20 DE SEPTIEMBRE DEL 2016

MUESTRA: MEZCLA ASFALTICA EN CALIENTE

PROBETA	ESTABILIDAD LBF	FLUJO 0,01"
25 AC 30 5,5%	1223,75	20
26 AC 30 5,5%	3075,00	15
27 AC 30 5,5%	1268,25	15
28 AC 30 6%	2325,00	18
29 AC 30 6%	2568,00	20
30 AC 30 6%	1674,00	15
31 AC 40 4%	2967,00	15
32 AC 40 4%	1869,00	10

Atentamente,

Vo. Bo. :



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





Ing. Danilo Francisco Lucas Mazariegos
Jefe Laboratorio de Asfaltos

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

Fuente: Centro de Investigaciones de Ingeniería, Facultad de Ingeniería, USAC.

Anexo 10. Estabilidad de flujo Marshall



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



No. 5100

INFORME NUMERO: 035 L.B.A.

ORDEN DE TRABAJO: 35962

INTERESADO: JORGE ANIBAL CORONADO VELIZ

PROYECTO: TESIS: CARACTERIZACION Y ANALISIS COMPARATIVO DE DISEÑO DE MEZCLAS ASFALTICAS EN CALIENTE, EMPLEANDO CEMENTO ASFALTICO AC-20, AC-30 Y AC-40

DIRECCION: CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERIA

ENSAYO: ESTABILIDAD Y FLUJO MARSHALL ASTM D 1559

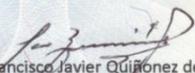
FECHA: 20 DE SEPTIEMBRE DEL 2016

MUESTRA: MEZCLA ASFALTICA EN CALIENTE

PROBETA	ESTABILIDAD LBF	FLUJO 0,01"
33 AC 40 4%	2202,75	13
34 AC 40 4,5%	2604,00	13
35 AC 40 4,5%	2604,00	16
36 AC 40 4,5%	2557,50	12
37 AC 40 5%	2736,00	15
38 AC 40 5%	1634,00	11
39 AC 40 5%	2496,00	12
40 AC 40 5,5%	1860,00	12

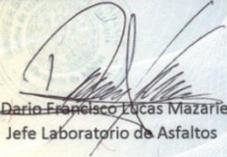
Atentamente,

Vo. Bo. :



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



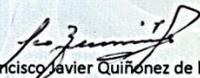


Ing. Dario Francisco Lucas Mazariegos
Jefe Laboratorio de Asfaltos

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: Centro de Investigaciones de Ingeniería, Facultad de Ingeniería, USAC.

Anexo 11. Estabilidad de flujo Marshall

	CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERIA FACULTAD DE INGENIERIA UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA	
		No. 09501
INFORME NUMERO: 036 L.B.A.	ORDEN DE TRABAJO: 35962	
INTERESADO:	JORGE ANIBAL CORONADO VELIZ	
PROYECTO: -	TESIS: CARACTERIZACION Y ANALISIS COMPARATIVO DE DISEÑO DE MEZCLAS ASFALTICAS EN CALIENTE, EMPLEANDO CEMENTO ASFALTICO AC-20, AC-30 Y AC-40	
DIRECCION:	CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERIA	
ENSAYO:	ESTABILIDAD Y FLUJO MARSHALL ASTM D 1559	
FECHA:	20 DE SEPTIEMBRE DEL 2016	
MUESTRA:	MEZCLA ASFALTICA EN CALIENTE	
PROBETA	ESTABILIDAD LBF	FLUJO 0,01"
41 AC 40 5,5%	2352,00	16
42 AC 40 5,5%	2400,00	11
43 AC 40 6%	2255,25	16
44 AC 40 6%	2736,00	25
45 AC 40 6%	2592,00	20
Atentamente,		
Vo. Bo. :		
Ing. Francisco Javier Quiñonez de la Cruz DIRECTOR CII/USAC		Ing. Dario Francisco Lucas Mazariegos Jefe Laboratorio de Asfaltos
FACULTAD DE INGENIERIA —USAC— Edificio T-5, Ciudad Universitaria zona 12 Teléfono directo: 2418-9115, Planta: 2418-8000 Exts. 86209 y 86221 Fax: 2418-9121 Página web: http://cii.usac.edu.gt		

Fuente: Centro de Investigaciones de Ingeniería, Facultad de Ingeniería, USAC.

